

Das Wissenschaftsmagazin

Ausgabe 2 April 2008

Technische Universität München

TUM

Faszination Forschung

Wo bitte geht's zum Tunnel?

Wie TUM-Forscher beim Durchbruch
des Gotthard-Massivs helfen

Reine Geschmackssache

Chemie enträtselt den Genuss

Überall – und kaum zu fassen

Die spannende Jagd nach Neutrinos

Dem Krebs auf der Spur · Lkw-Simulator · Lernende Muskeln



Wie deckt man den weltweit wachsenden Energiebedarf, ohne die Umwelt zu zerstören?

Unsere Antwort: „Effiziente Energieversorgung.“

Mit unseren Innovationen sorgen wir für mehr Effizienz bei der Erzeugung und Übertragung von Energie. Und somit auch für deutlich reduzierte CO₂-Emissionen.
www.siemens.com/answers

Answers for the environment.

SIEMENS

Liebe Leserinnen und Leser!

„Wissenschaftliche Erkenntnis setzt Wissenwollen und Staunenkönnen voraus. Neues Wissen dient den Menschen. Staunen konditioniert für die Ehrfurcht vor der Schöpfung.“



Durch den Tunnel zum Neutrino, von denkenden Muskeln zum Fahrzeugsimulator. Ein riesiger Horizont, den uns die „Faszination Forschung“ der Technischen Universität München eröffnet. Wir präsentieren heute spannende Beiträge aus der Spitzenforschung unserer Universität und zeigen damit gleichzeitig ganz unterschiedliche Denk- und Methodenansätze aus Naturwissenschaft, Technik und Medizin. Alle aber entsprungen der kreatürlichen Neugier und Lust zur Entdeckung als den kräftigsten Quellen des wissenschaftlich-technischen Fortschritts.

Die vorliegende zweite Ausgabe unseres Forschungsmagazins spannt den Bogen von innovativen Ingenieursprojekten über die Avantgarde der Geschmacksforschung bis hin zu diffizilen molekularmedizinischen Erkenntnissen über Nerven, Muskeln und künftige Krebstherapien. Aufregend ist unsere Entdeckungsreise zu Neutrinos im Grand-Sasso-Massiv – gleichzeitig ein weltweit führendes Beispiel hochaufwendiger Forschung, die viel Geld, Geduld und Präzision erfordert.

Neue Bioreaktoren als ingenieurwissenschaftlichen Durchbruch in der so genannten Weißen Biotechnologie stellen wir heute umso selbstbewusster dar, als Prof. Weuster-Botz einen verlockenden Ruf an das konkurrierende Forschungszentrum Jülich ausgeschlagen hat. Mit ihm entsteht an der TUM ein Lehr- und Forschungsschwerpunkt, der interdisziplinär die Mikrobiologen, Biochemiker und Verfahreningenieure zusammenführt, um zu einer neuen biotechnologischen Zukunft chemischer Stoffumwandlungsprozesse beizutragen – umweltschonend, energieeffizient.

Wir sehen also: Die TUM-Forschung ist kulturell von größter Vielfalt. Sie lebt aus der fach- und standortübergreifenden Kooperation. Sie lebt aus vielen Sprachen, die einander zu verstehen gelernt haben. Wir sind stolz auf unsere Forscherinnen und Forscher!

Viel Vergnügen und Faszination beim Lesen wünscht Ihnen
Ihr

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

Astrophysik: TUM-Forscher jagen Neutrinos

Foto: Henning Back - Virginia Tech

Geodäsie: Wo bitte geht's denn hier zum Tunnel?

Foto: © AlpTransit Gotthard AG



Foto: AG Prof. Dr. Achim Krüger

Nano-Detektive: Dem Krebs auf der Spur

Wie finden 1800 Mineure von fünf Stollen in 2 300 Meter Tiefe zusammen? TUM-Forscher wissen es

Kleine Teilchen, große Hoffnung: Nano-Technik soll bald helfen, Krebs frühzeitig zu erkennen

Titelgeschichten

- Reine Geschmackssache!**
TUM-Forscher enträtseln das Geheimnis der Sinne . . . 6
- Wo bitte geht's denn hier zum Tunnel?**
TUM hilft beim Bau des Gotthard-Basistunnels . . . 14
- Dem Krebs auf der Spur**
Nano-Technik bietet neue Behandlungschancen . . . 26
- Ein Brummi aus acht Bildschirmen**
Wie die TUM den Verkehr sicherer macht 32
- Überall – und kaum zu fassen**
Die spannende Jagd nach Neutrinos 60
- Wie Muskeln denken**
Wie intelligent unser Körper wirklich ist 76

Forschung und Technik

- Wie Zellen Stress bewältigen**
Hitzeschockproteine leisten Erste Hilfe 25
- „Man spielt wie mit einem Baukasten“**
7 Fragen an den Forscher Prof. Dr. Fritz Kühn 39
- Die Revolution aus dem Bio-Reaktor**
TUM-Forscher erproben die Chemie der Zukunft . . . 42
- Sonnenschutz mit Durchblick**
Eine neue Technik überlistet das Auge 50
- Kleine Wellen – scharfes Bild**
Mathematik & Lebenswissenschaft Hand in Hand . . 56
- Der Trick mit dem Knochen**
TUM-Forscher klären, wie Schlangen hören 59
- Der Navigator für den Körper**
Wie Technik neue Blicke in den Körper ermöglicht . . 69
- Anziehende Kräfte**
Neuartiges Modellsystem konzipiert 74



Foto: Thomas Misgeld

Seite 76

Medizin: Wie Muskeln denken



In dieser Ausgabe

Seite 6

Foto: Laura Egger

Lebensmittelchemie: Reine Geschmackssache



Foto: Naeser

Seite 42

Weißer Biotechnologie: Die Revolution aus dem Bioreaktor



Foto: Laura Egger

Seite 32

Fahrzeugtechnik: Ein Brummi aus acht Bildschirmen

Chemie vom Acker krempelt die Industrie um:
TUM-Forscher marschieren dabei voran

Kann man im Labor den Verkehr sicherer machen?
Man kann es – wie der neue Simulator der TUM zeigt

Rubriken

Editorial	
Wir sind stolz auf unsere Forscher/innen!	3
Standpunkt: Hubert Markl	
Der Preis des Preises	82
Autoren	75
Impressum	75

Weise Worte der Wissenschaft

Rudolf Diesel (1858–1913)
Der Gebrauch von Pflanzenöl als Kraftstoff mag heute unbedeutend sein. Aber derartige Produkte können im Laufe der Zeit ebenso wichtig werden wie Petroleum und diese Kohle-Teer-Produkte von heute.

Karl Popper (1902 – 1994)
Niemand ist gegen Irrtümer gefeit; das Große ist, aus ihnen zu lernen.

Sir Bertrand Russell (1872–1970)
So kann also die Mathematik definiert werden als diejenige Wissenschaft, in der wir niemals das kennen, worüber wir sprechen, und niemals wissen, ob das, worüber wir sprechen, wahr ist.

Link

www.molekulare-sensorik.de

Reine Geschmackssache

Zu bitter? Zu salzig? Nicht süß genug? Die Geschmäcker der Menschen sind verschieden. Auf der Spur nach den chemischen Sensationen zwischen Rachen und Zunge braucht Professor Thomas Hofmann messbare Daten. Darum hat der Forscher nun den Gaumenkitzel ins Reagenzglas verlegt



Foto: Laura Egger





Fotos: Laura Egger

Mittels des sogenannten „Half-tongue-Tests“ kann die Bioaktivität neuer Geschmacksstoffe am Menschen zuverlässig gemessen werden

Als wir Menschen noch in Fellschurzen durch die Wälder streiften und uns von Beeren und anderen Pflanzen ernährten, schützte uns unser Geschmackssinn vor Vergiftung und Tod. Unsere Zunge diente als Wegweiser durch Gefahr oder genießbarkeit unserer Nahrungsmittel. Beispielsweise stellt unsere Empfindlichkeit für den Bittergeschmack einen lebenswichtigen Schutz dar: Giftige Pflanzen enthalten oftmals Bitterstoffe, ihr Geschmack warnt uns vor ihrem Verzehr.

Heute, da wir in Seide und Tuch durch die internationale Cuisine streifen, nutzen wir unseren Geschmackssinn, um den Abgang eines Chateau Mouton-Rothschild zu identifizieren oder um unserem Gaumen durch Erdbeersoufflé-an-Rosmarin etwas Abwechslung zu gönnen.

Vom Überlebens-Sinn zum sinnlichen Leben

Zum Überleben brauchen wir diesen Sinn normalerweise nicht mehr. Dennoch ist Essen ohne Schmecken – zumindest ohne Not – kaum vorstellbar. Neben dem Geruchssinn spielt der Geschmackssinn auch für den heutigen Menschen, seine Orientierung und Sozialisation, eine große Rolle. Gaumenfreuden gehören zum sinnlichen Glück des Lebens und sind auch wirtschaftlich lebenswichtig: Die Nahrungsmittelindustrie hat sich

darauf eingestellt, dass nach dem Wunsch des Verbrauchers fast jedes Lebensmittel Genuss und Wohlbefinden hervorrufen soll.

Doch wie funktioniert Schmecken eigentlich? Tatsächlich ist der Geschmackssinn der bislang am wenigsten erforschte Sinn des Menschen. Erst vor knapp zehn Jahren hat man den ersten Geschmacksrezeptor entdeckt. Weltweit sind Biochemiker, Neurophysiologen, Molekularbiologen und Lebensmittelchemiker wie Professor Dr. Thomas Hofmann an der Technischen Universität München konkreten Hinweisen auf die Spur: Was genau ist, das heißt, welche Moleküle sind in einem Nahrungsmittel eigentlich geschmacklich aktiv und wie funktioniert die Wahrnehmung dieser Aktivität?

Heute ist Thomas Hofmann am Wissenschaftszentrum Weihenstephan der TUM führend auf diesem Gebiet: Am Lehrstuhl für Lebensmittelchemie und Molekulare Sensorik sind er und sein Team aus 30 Mitarbeitern den Molekülen auf der Spur, die unsere Lebensmittel „schmeckbar“, also sensorisch aktiv und attraktiv machen. Neben dem Lehrstuhl hat der 39-jährige auch die Leitung der Abteilung Bioanalytik des Zentralinstituts für Ernährungs- und Lebensmittelforschung (ZIEL) übernommen. Es gibt enge Kooperationen mit anderen Köpfen der Geschmacksforschung in Deutschland. Der



Mit der künstlichen Luftdurchströmung kann man Geschmack ohne Beeinflussung durch den Geruchssinn studieren

Turbo-Professor braucht sich keine Sorgen zu machen: Sein Forschungskreis wächst und Drittmittel fließen so reichlich wie an Geschmacksforscher in den USA. Einzigartig in Deutschland beschäftigt sich sein Arbeitskreis damit, in pflanzlichen Rohstoffen und verarbeiteten Lebensmitteln geschmacklich aktive Naturstoffe zu orten, deren chemische Struktur zu beschreiben, deren Bioaktivität zu gewichten und deren Wirkmechanismen zu verstehen.

Bitter, süß und umami

Manche, wenn auch noch nicht alle Mechanismen des Geschmacks sind seit wenigen Jahren bekannt: Der geschmacklichen Wahrnehmung von Molekülen liegt vor allem deren Zusammenspiel mit Geschmacksrezeptoren, das heißt mit G-Protein-gekoppelten Rezeptorproteinen auf der Zunge zugrunde. So kennt man heute eine Familie von 25 Rezeptorproteinen, die Tausende von Bitterstoffen erkennen können.

Wie die Rezeptoren Bitterkeit, Süße und den Umami-Geschmack erschmecken, das ist weitgehend erforscht. Von der Rezeptor-Seite also ist klar: Führt ein Mensch sich einen Löffel Suppe zu, setzt er einen Espresso an die Lippen, steht in seinem Mund alles bereit, um zu schmecken.

Doch was ist in einem Nahrungsmittel tatsächlich geschmackswirksam, welche Substanzen werden wann und wie aktiv?

„Das schmeckt man doch!“, möchte man da sagen. Schließlich ist die eigene Zunge ein feiner Detektor. Doch auf den Menschen und seine subjektive Zunge alleine will sich Hofmann nicht verlassen.

Denn der Mensch schmeckt nicht nur mit dem Material, das auf seiner Zunge landet: Die flüchtigen Stoffe, die von außen und im Rachenraum innen in die Nase steigen, spielen eine große Rolle: Kurz, der Geruch beeinflusst den Geschmack. Auch das Auge isst bekanntermaßen mit. Und schließlich trägt der Tastsinn, der die Textur erfasst, zum Geschmack bei – etwa wie cremig der Sahnejoghurt dem Gaumen schmeichelt.

Das Auge isst wirklich mit

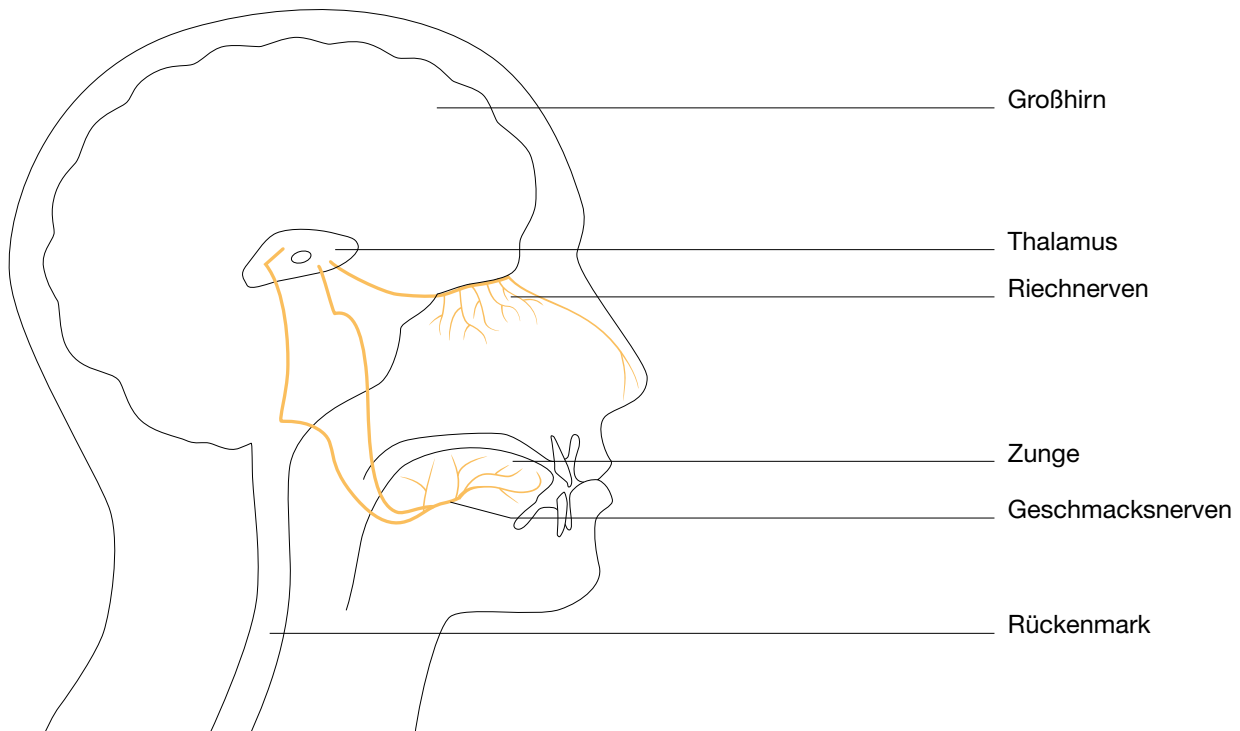
Der Mensch ist außerdem beeinflussbar in seiner geschmacklichen Wahrnehmung durch mentale Dinge: Erinnerungen, zu denen etwa Verzehr von einem Madeleine den Protagonisten Swann in dem Roman „Auf der Suche nach der verlorenen Zeit“ verführt; kulturelle Vorlieben (haben Sie in Indien schon mal „mildes“ Curry probiert?); Geschmacks-Moden – wie „fett und salzig“ in den 50er-Jahren, mediterran und irgendwie „gesund“ heutzutage – prägen den subjektiven Geschmack von Lebensmitteln.

Schließlich verändert auch das Bewusstsein, sich durch Essen sozial zu differenzieren, den individuellen Gaumenkitzel: Würde Ihnen Trüffel schmecken, auch wenn Sie nicht wüssten, wie selten, kostbar, auf einer Briefwaage abgewogen und edel der Pilz ist?

Deshalb war für Professor Hofmann klar: Back to the basics. Das hieß, sich den grundlegenden Fragen stellen: Welche Geschmacksstoffe sind in einem Lebensmittel vorhanden? Welche sind wirklich relevant und unter welchen Bedingungen verändert sich ihre sensorische Wirksamkeit?

Professor Hofmann spürt mit seinem Team seit einigen Jahren die wirklich bedeutenden Geschmackssubstanzen in Nahrungsmitteln in einem neuartigen und hochinteressanten Verfahren auf: Geschickt verknüpft er dabei Methoden der Naturstoffchemie mit psychophysikalischen Experimenten an geschulten Testpersonen. Mithilfe dieses Verfahrens kann er sozusagen die sensorische Landschaft eines Lebensmittels auf molekularer Ebene kartieren. Das so genannte Sensometabolom, also die komplette Zusammenstellung der geschmacklich relevanten Verbindungen, dient dann als objektive Grundlage für alles Weitere.

Zunächst einmal muss Geschmack von Geruch getrennt werden. Deren Wechselwirkung hat lange die stoffliche Differenzierung erschwert. Im Labor werden durch Hochvakuumdestillation die flüchtigen Anteile eines ▶



So funktioniert der Geschmackssinn: Was Zunge, Augen und Nase wahrnehmen, wird von Nervenbahnen als sensorische Information in den Thalamus projiziert. Dort entsteht erst, was wir als Geschmack kennen

Wege des Geschmacks

„Schmecken“ können spezialisierte Epithelzellen, die in 2 000 Geschmacksknospen über die Zunge verstreut sind und alle zehn Tage erneuert werden.

In jeder Geschmacksknospe liegen zehn bis fünfzig Sinneszellen sowie Stütz- und Stammzellen wie Orangenschnitze dicht nebeneinander. Über einen mit Flüssigkeit gefüllten Geschmacksporus ganz oben können die Geschmacksstoffe auf so genannten Geschmacksstiftchen, d.h. auf Fortsätzen der Sinneszellen, die Rezeptoren erreichen. Werden die Sinneszellen aktiviert, reichen sie die Transmitter an benachbarte Ausläufer von Nerven. Von dort,

auf der Nervenbahn ins Gehirn kommen schließlich eine Unmenge Informationen zusammen, zunächst in chaotischer Zusammenstellung: Vier große Nervenstränge verarbeiten die Reize aus verschiedenen Mund- und Rachenregionen – von der Zungenspitze bis zu seltenen Geschmacksknospen auf dem Gaumen. Der Rachen etwa erkennt überall in Mund, Hals und Nase die Form von Speisen, ihre Konsistenz, ihre Temperatur und ihre Schärfe. Sind alle diese Informationen unterwegs, muss das Gehirn später aus einem vielfältigen Reizmuster herausrechnen, was der Mensch da gerade schmeckt.

Lebensmittels, die auch die Aromastoffe enthalten, von den nicht-flüchtigen Geschmacksstoffen getrennt. Nun können beide unabhängig voneinander untersucht und wiederum in ihre Bestandteile zerlegt werden. Bleiben wir bei den nicht-flüchtigen Stoffen: Auf der Suche nach den Substanzen, die „schmecken“, die also für die jeweilige Geschmacksnote verantwortlich sind, genügt es allerdings nicht, herauszufinden, was in welchen Mengen vorhanden ist. Geschmacklich bedeutsame Verbindungen unterscheiden sich nämlich in ihrer Wirksamkeit zum Teil sehr stark: Denn nicht durch ihre Konzentration trägt die Substanz zum Geschmack bei, sondern durch

ihre Bioaktivität – und die kann je nach ihrer Struktur des Geschmacksstoffes stark variieren. Von den vielen tausend Inhaltsstoffen eines Lebensmittels, von denen viele in großen Mengen vorhanden sind, sind oft nur wenige sensorisch aktiv, das heißt, überhaupt schmeckbar. Um diese wiederum herauszusuchen, teilt Thomas Hofmann zunächst das Nahrungsmittel in verschiedene Substanzgruppen auf. Dabei werden diese Fraktionen in ihrer Geschmacksaktivität bewertet – durch den Menschen als „Biosensor“: Geschulte Probanden identifizieren die einzelnen Geschmacksnoten erst einmal auf der Zunge. Süß? Bitter? Sehr oder nur ein bisschen?

Hofmann hat für diese Frage eigens die „Geschmacksverdünnungsanalyse“ entwickelt. Mithilfe dieser Technik kann der Grad der geschmacklichen Wirksamkeit einer Substanz oder Substanzgruppe bewertet werden.

Schlüsselsubstanzen: Die Menge macht's

Dabei wird der Faktor bestimmt, mit dem ein Stoff über dem Schwellenwert der Schmeckbarkeit liegt. Hofmann konzentriert seine weiteren Arbeiten dann auf diese geschmacksaktiven Substanzen. Deren genaue chemische Struktur findet und benennt er mittels moderner instrumentell-analytischer Verfahren wie der Massenspektrometrie und der Kernresonanzspektrometrie. Auf diese – aktivitätsorientierte – Weise findet Thomas Hofmann die Schlüsselsubstanzen, die für einen bestimmten Geschmack verantwortlich sind. Allerdings zunächst nur in ihrem relativen Beitrag zum gesamten Geschmackserlebnis.

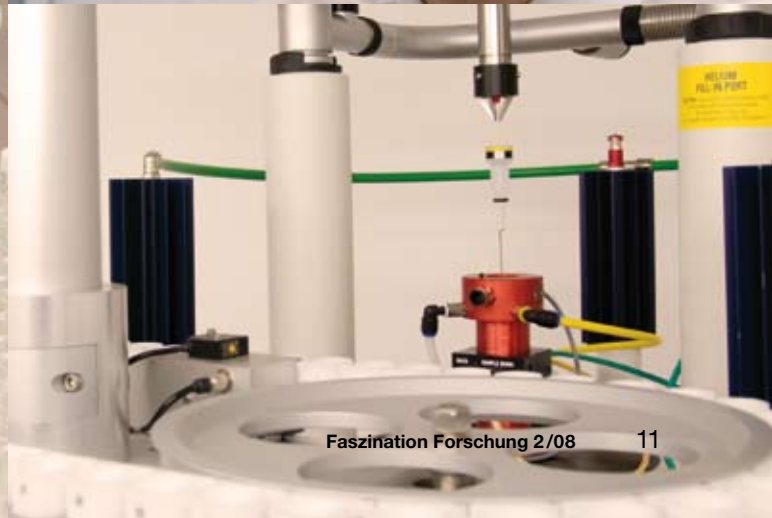
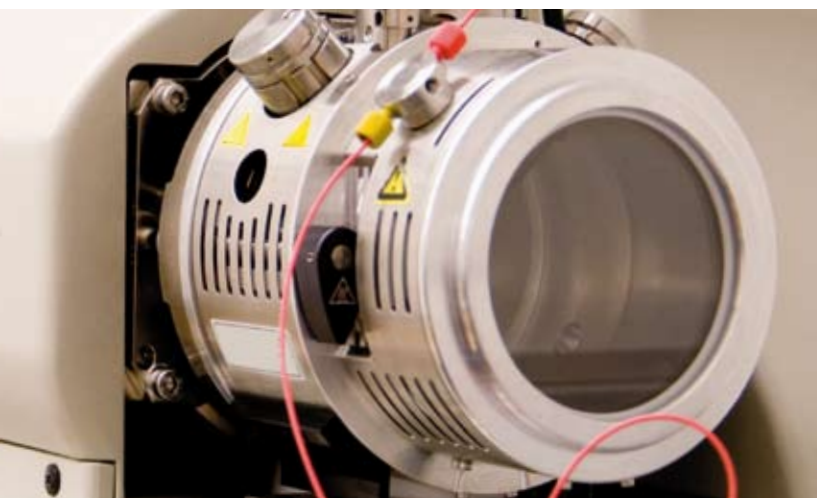
Um den tatsächlichen Geschmacksbeitrag der identifizierten Verbindungen zu bewerten, muss zunächst deren Menge in dem Lebensmittel bestimmt werden.

Dann erschmecken wiederum geschulte Testpersonen die spezifische Geschmackswirksamkeit dieser einzelnen Verbindungen. Wie relevant sie für die geschmackliche Qualität des Lebensmittels sind, ergibt sich aus diesen Zusammenhängen: nämlich aus der Wirkkonzentration der einzelnen, Wert gebenden Geschmacksstoffe in jenem Lebensmittel.

Und nun? „Auf diese Weise ist es möglich, von Lebensmitteln sozusagen eine Bibliothek der geschmacklich aktiven Moleküle zu erstellen“, sagt Prof. Hofmann. „Genaue Daten über die Anzahl, die chemische Struktur, die Aktivität und die Wirkkonzentrationen geschmacklich aktiver Verbindungen liegen bislang nur vereinzelt vor, ob sie in den Rohstoffen vorhanden sind oder erst während der Verarbeitung und Lagerung entstehen. Kennt man jedoch die Gesamtheit dieser Verbindungen, dann erhalten wir neue Maßstäbe für eine objektive Beurteilung der Qualität von Lebensmitteln – sowie neue Mittel, sie zu variieren und zu verbessern.“

Zum Beispiel Babynahrung aus Karotten: Selbst der beste Karottenbrei weist hin und wieder einen bitteren ▶

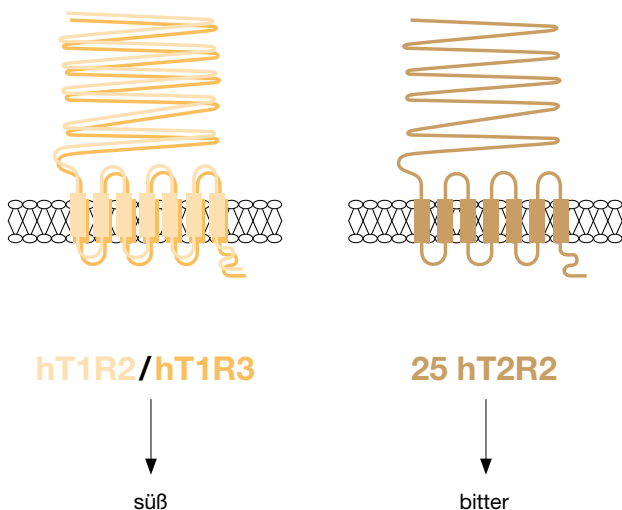
Mittels modernen spektroskopischen Methoden nimmt Prof. Dr. Thomas Hofmann die chemischen Strukturen geschmacksaktiver Naturstoffe unter die Lupe



Fünf Geschmacksrichtungen

Unsere rund 2 000 Gaumenknospen können fünf Geschmacksrichtungen unterscheiden. Diese Fähigkeit dient lebenswichtigen Zwecken.

Die angeborene Aversion gegen Bitterstoffe entwickelte sich im Laufe der Evolution als Schutzfunktion vor giftigen pflanzlichen Substanzen, die meistens bitter schmecken. Babys etwa, die ihre Welt zunächst vor allem mit dem Mund entdecken, haben eine höhere Dichte an Geschmacksrezeptoren für Bitterstoffe als jemals später in ihrem Leben. Indem wir Saures schmecken, erkennen wir unreife oder verdorbene Früchte. Süße signalisiert kalorienreiche Kohlehydrate – ist man satt, lässt übrigens die Empfindlichkeit für „süß“ nach! Süßer Geschmack kommt in giftigen Nahrungsmitteln der Natur nicht vor, signalisiert also auch Unbedenklichkeit. Ein salziger Geschmack lässt unserem Gehirn Rückschlüsse auf den Mineraliengehalt zu, ebenso wie „Umami“ (ein Sojasaucen-ähnlicher Geschmack) eiweißreiche Kost markiert. In bestimmten Mangelerkrankungen greift der Mensch, so man ihn lässt, automatisch nach Nahrungsmitteln, deren Nährstoffe er braucht. Und er erkennt sie am Geschmack.



Ein Proteindimer (hT1R2/hT1R3) agiert als Sensor für Zucker und Süßstoffe, 25 Rezeptoren (hT1R1) sind für die Detektion von Bitterstoffen verantwortlich

Geschmack auf. Seit 50 Jahren ist man auf der Suche nach der Ursache: Bisherige Forschungsarbeiten ergeben, dass es die beiden Verbindungen 6-Methoxymellein und Eugenin sind, die für den Bittergeschmack verantwortlich sind.

Hofmann ging nun von Neuem an den Brei: Er nahm ein handelsübliches Karottenmus, das einen bitteren Fehlgeschmack aufwies, und unterzog es der oben beschriebenen Analyse. Dabei konnte er diejenigen geschmacklich wirksamen Verbindungen lokalisieren, die mit hoher Bitterkeit aktiv sind. Und siehe da: Am bitteren Geschmack von Karottenbrei sind nicht die beiden bisher bekannten Verbindungen ursächlich beteiligt, sondern ein bisacetylenisches Diol. Mit dessen zunehmender Dosis in einem Brei steigt auch dessen Bitterintensität.

Babys können hoffen – auf süßere Karotten

In Zukunft lässt sich durch die Methode von Professor Hofmann frühzeitig ermitteln, wie viel von diesen Bitterstoffen in Karottenprodukten vorhanden ist, um diese dann vor dem Verkauf auszusortieren. Und zwar so objektiv messbar, dass nicht eine Testperson an jedem Babygläschen erst kosten muss, um die bitteren unter ihnen herauszuschmecken.

Und das Ganze ohne Zusatzstoffe oder künstliche Aromen. Was das bedeutet, veranschaulicht der Versuch, geschmacksverändernden Verbindungen auf die Spur zu kommen. Solche Verbindungen sind nämlich da interessant, wo sie Medikamente oder notwendige Lebensmittel wie in einer Diät geschmacklich so verändern, dass sie auch vom Menschen angenommen werden:

1. Bitterer Hustensaft muss in Zukunft nicht derart mit Zucker versetzt werden, dass er etwa für einen Diabetiker nicht mehr akzeptabel wäre. So kennt Hofmann inzwischen chemische Verbindungen, die die menschliche Sensitivität des Süßgeschmacks von Zuckern verstärken, ohne die Konzentration von Zucker zu erhöhen.

2. Wer schon mal völlig salzlos essen musste, kennt die Überwindung. Doch Patienten mit Bluthochdruck müssen eine Diät mit natriumarmem Essen einhalten. Dennoch ist, wie Hofmann und sein Team herausgefunden haben, nicht bloß Salz für den salzigen Geschmack verantwortlich. Sie konnten – testweise anhand einer Rindfleischbouillon – eine Verbindung identifizieren, die den salzig, bzw. umamiartigen Geschmack intensiviert. Die Identifizierung solcher Geschmacksverstärker schaffen die Grundlage, natriumarme Lebensmittel zu entwickeln, die trotzdem gut schmecken!

Ein anderes Beispiel: Kaffee schmeckt bitter – weil er Coffein enthält, so die bisher gängige Meinung. Doch

der bittere Geschmack von Kaffee, so haben Hofmann und sein Team herausgefunden, wird nur in geringem Maße von Coffein bestimmt. Der Rest entfällt auf Verbindungen, die erst bei der Verarbeitung der Kaffeebohnen gebildet werden.

Erst die Röstung macht Kaffee richtig bitter

Der Zusammenhang von Lebensmittelverarbeitung und Geschmackswirksamkeit wird hier besonders deutlich: Die Ausgangssubstanz für die meisten Bitterstoffe in Kaffee ist die Chlorogensäure, ein Polyphenol in rohen Kaffeebohnen. Bei der Röstung entstehen verschiedene O-Caffeoylchinasäurelactone und hydroxylierte Phenylindane, wobei je nach Röststärke des Kaffees der bittere Geschmack mehr von der einen oder der anderen Verbindung bestimmt wird: die angenehmen, leicht bitteren Lactone oder – bei stärkerer Röstung – die Phenylindane, die zum harschen Abgang des Kaffeegetränks beitragen.

Darüber hinaus spielt auch die Lagerung und der Brühvorgang für die Bitterkeit eine Rolle: Hoher Druck und hohe Temperaturen – wie in einer Espressomaschine – verursachen besonders große Mengen an Bitterstoffen im Getränk. Bei langer Lagerung des gemahlene Kaffees dagegen nimmt die Bitterkeit grundsätzlich ab. Mit dieser Enträtselung der Bitterstoffe lässt sich die Kaffeeverarbeitung gezielt verbessern. Anhand der messbaren Aktivität der Bitterstoffe kann man in Zukunft je nach Verarbeitungsgrad die Milde oder Bitterintensität eines Kaffeeprodukts einstellen.

Dennoch: Der Kaffee schmeckt jedem anders

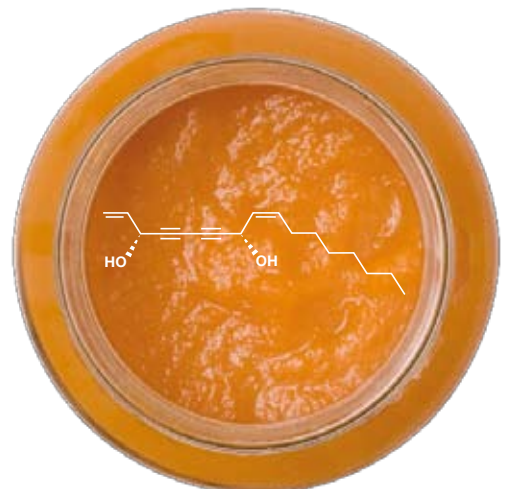
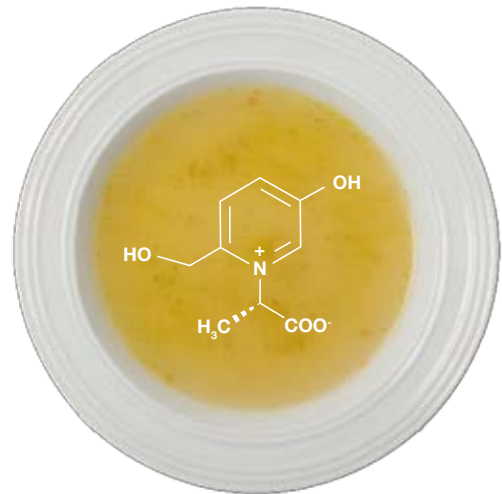
Ob man eine gute Tasse Kaffee genießt, ist natürlich von vielen Faktoren abhängig: Trinkt man sie in Eile im Stehen oder gemütlich mit einem Freund. Essen Sie dazu Pralinen oder trinken Sie dazu einen Amaretto?

Hofmann selbst zum Beispiel trinkt am liebsten Arabica und will auf Lactone nicht verzichten. Die Rindfleischsuppe will ihm heute vielleicht nicht schmecken – weil er an der nächsten Frage knobelt: Einen zweifelsfreien Geschmacksdetektor wird es nie geben.

Dennoch ist die stoffliche Objektivierung der Geschmacksstoffe der Beginn einer völlig neuen Ära: Nach und nach werden in Zukunft von Rohstoffen und verarbeiteten Lebensmitteln diejenigen Verbindungen kartiert werden, die deren geschmackliche Eigenschaften prägen.

Eine Art Bibliothek von Schlüsselgeschmacksstoffen und deren Wirkkonzentrationen wird entstehen. Ohne den Einsatz von Zusatzstoffen gibt Hofmann damit den Lebensmittelherstellern Werkzeuge an die Hand, um die geschmackliche Qualität ihrer Produkte zu verbessern. Und das lassen wir uns gerne auf der Zunge zergehen!

Kathrin Kommerell



Die chemischen Formeln von geschmacksaktiven Stoffen in Kaffee, Rindfleischsuppe und Karottenbrei



Links

www.alptransit.ch
www.geo.bv.tum.de

Tief im Bauch der Schweizer Alpen treiben die Bergbauingenieure ihren Tunnelbohrer durch das Gestein. Am Tag schaffen sie rund 20 Meter. 2017 soll der längste Tunnel der Welt in Betrieb gehen. Auf der 57 Kilometer langen Strecke rollen dann täglich 300 Züge



Wo bitte geht's denn hier zum Tunnel?

Wie finden 1 800 Maulwürfe von fünf Stollen in 2 300 Meter Tiefe unter den Bergspitzen des Gotthard-Massivs zueinander? Professor Wunderlich von der TUM hat die Antwort. Und damit ein Stück Pioniergeschichte der Vermessungstechnik geschrieben



Einspurtunnel Ost: In zwei voneinander getrennten Röhren werden die Züge ab 2017 die Alpen durchqueren



Schachtförderanlage Sedrun: Rund 1800 Mineure arbeiten zur Zeit am Tunnelvortrieb

Fotos: © AlpTransit Gotthard AG



Vortrieb im Einspurtunnel West: Bergbauingenieure bereiten die nächste Sprengung vor



Einspurtunnel West: Der „Wurm“ bewegt sich im Tunnel und installiert das Innengewölbe

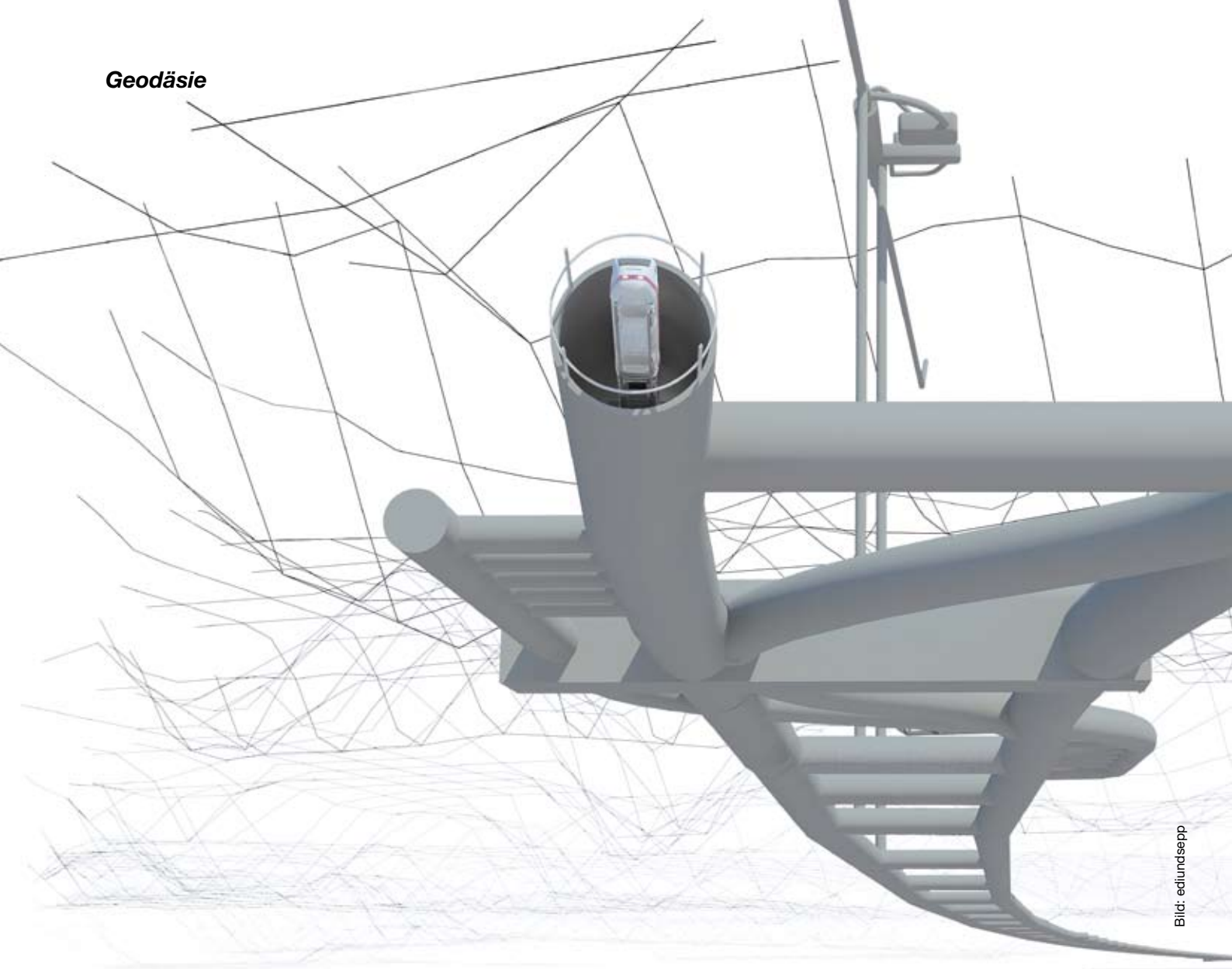


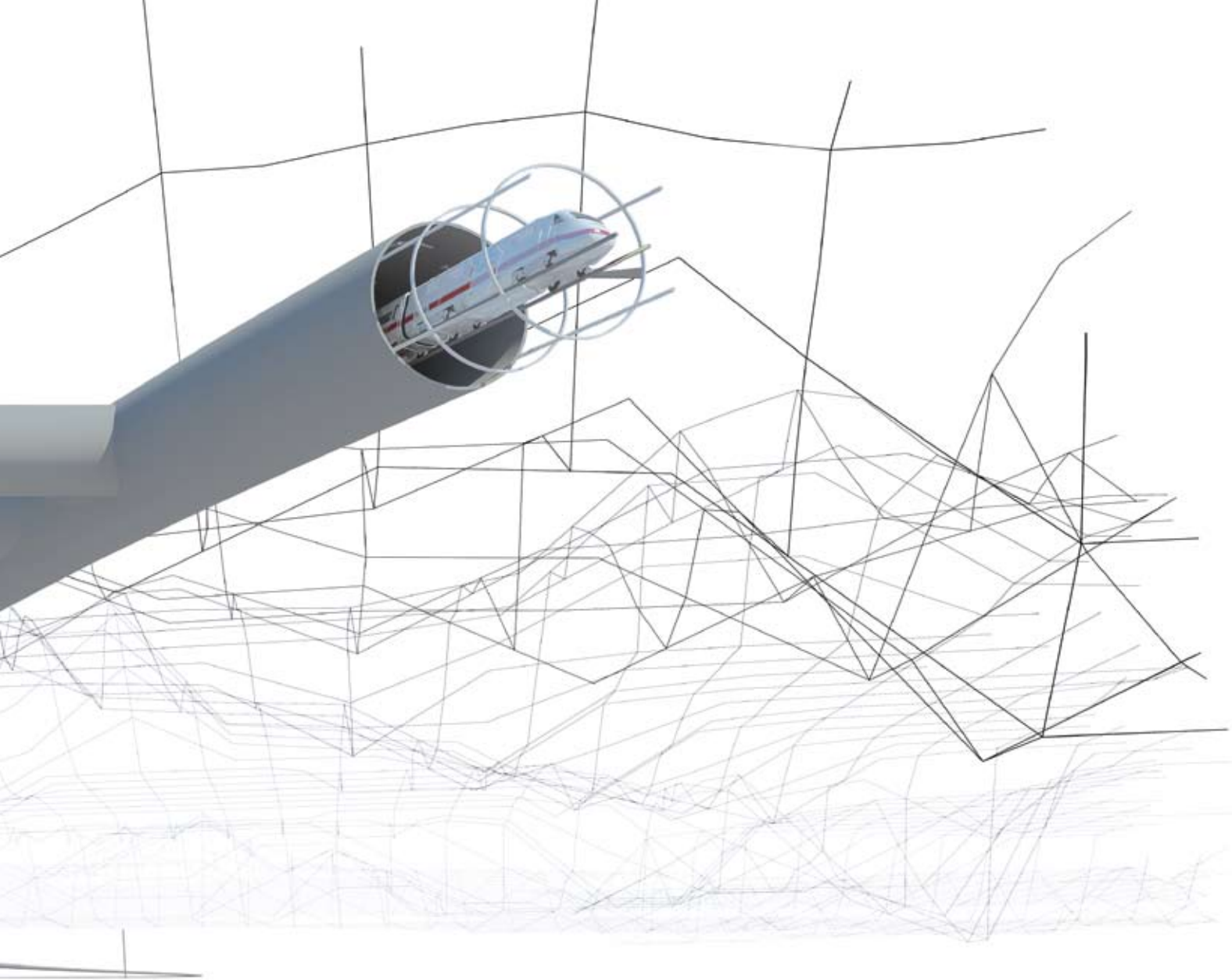
Bild: edlundsepp

Die Planungs- und Bauzeit des Tunnels erstreckt sich auf über 25 Jahre. Immer wieder haben sich in der Vergangenheit die Sicherheitsstandards geändert. Knapp zwölf Milliarden Franken dürfte das Gesamtprojekt Gotthard- und Ceneri-Basistunnel letztendlich kosten

Lautes Dröhnen schmerzt in den Ohren. Der Staub von zermalmtem Gestein liegt in der feuchten Luft. Eine gigantische, fast 400 Meter lange Tunnelbohrmaschine frisst sich durch Granit und Gneis. Knapp 20 Meter pro Tag schaffen die Bauingenieure mit dem Tunnel-Tatzelwurm. Sie bauen den Gotthard-Basistunnel zwischen Erstfeld im Kanton Uri und Bodio im Kanton Tessin. 57 Kilometer ist er lang. Voraussichtlich Ende 2017 wird der längste Eisenbahntunnel der Welt in Betrieb gehen. Nie zuvor wurde eine so lange Verkehrsverbindung in den Tiefen eines Gebirges angelegt. Bis zu 2 300 Meter türmt sich das Gestein über den rund 1 800 Mineuren auf, die sich zurzeit an fünf Baustellen gleichzeitig durch das Massiv kämpfen.

57 Kilometer Länge – 25 Zentimeter Abweichung

Eine besondere Schwierigkeit ist es dabei für die Vortriebsmannschaften, dass sie sich exakt an den dafür vorgesehenen Durchbruchstellen tief im Bauch der Alpen treffen – und nicht aneinander vorbeibohren. Nur rund 25 Zentimeter darf die Querabweichung betragen, die sich bei den Durchschlagsstellen maximal ergeben soll. Diese ehrgeizige Vorgabe stellt die Messtechnik vor große Herausforderungen. Denn in dem Berg funktioniert kein satellitengestütztes Global Positioning System (GPS), so wie es heute jeder Autofahrer nutzt. Die Führung der Tunnelvortriebsmaschinen wird an den Tunnelportalen begonnen und mit Hilfe von Laserstrahlen und modernsten Vermessungsinstrumenten in den Bauch



Auf der rund 57 Kilometer langen Strecke verändert sich oftmals das Gestein, durch das sich die Tunnelbohrmaschine wühlt. Doch trotz der unterschiedlichen geologischen Bedingungen darf die Querabweichung von der Bohrrichtung am Ende nur 25 Zentimeter betragen

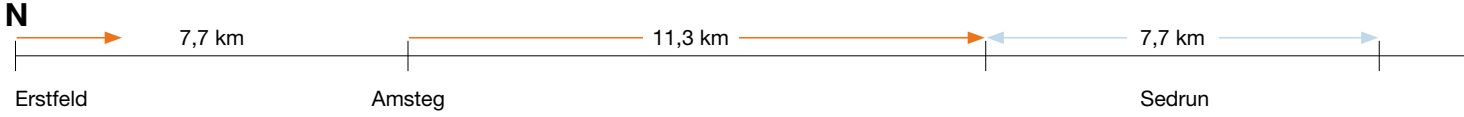
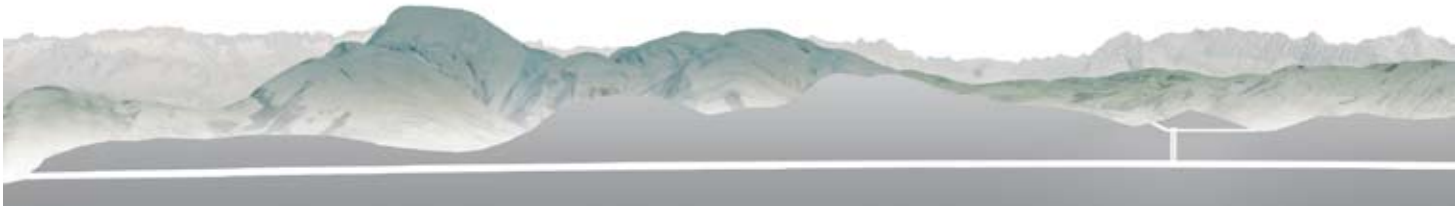
der Alpen übertragen. Doch das ist nur die halbe Miete. An der genauen Absteckung des Tunnels ist nämlich auch ein Team um Professor Thomas Wunderlich vom Lehrstuhl für Geodäsie der Technischen Universität München beteiligt. Die Geodäten haben speziell für den Gotthard-Basistunnel eine weltweit einmalige Messtechnik entwickelt. Mit ihrer neuen Vermessungsmethode haben sie die Anschlagrichtung auf der Sohle des Sedruner Zwischenangriffs verifiziert. Dieser Zwischenangriff ist ein senkrecht gebohrter Versorgungstunnel, den die Bohrmannschaften vom Dach der Alpen in den Berg getrieben haben, um von seiner Sohle aus den eigentlichen Verkehrstunnel anzulegen. Von diesem 800 Meter tiefen Schachtfuß aus wollten die Münchner

Wissenschaftler sicherstellen, dass die Vortriebsmannschaften exakt in der geplanten Richtung zu den gegenläufigen Tunnelvortrieben im Norden und Süden des Gebirgsmassivs fräsen und sprengen.

„Der Gotthard-Tunnel wird nämlich nicht von einem Ende des Gebirgsmassivs zum anderen durchstoßen“, erklärt Thomas Wunderlich in seinem Büro an der TUM in der Arcisstraße. An den Wänden in Wunderlichs Arbeitszimmer stapeln sich Bücher über das Vermessungswesen, aber auch über den Brücken- und den Tunnelbau. Dazwischen liegen Magazine über das Gotthard-Projekt.

„Die gesamte Strecke des neuen Gotthard-Tunnels ist in vier Abschnitte aufgeteilt“, erläutert Wunderlich. Eine Mannschaft bohrt von Süden in den Fels, die zweite ▶

Geodäsie



von Norden und weitere sechs arbeiten sich von drei Zwischenangriffen aus jeweils nach beiden Seiten durch das Massiv. Für den zentralen Abschnitt haben die Ingenieure den gigantischen Schacht nahe dem 1 700 Einwohner zählenden Alpendorf Sedrun angelegt. Durch diesen Schacht läuft der gesamte Transport zum und vom unterirdischen System.

Traditionelle Methoden stoßen an Grenzen

„Unsere Aufgabe war es, zu bestätigen, dass sich die Ingenieure der Multifunktionsstelle Sedrun von der Kaverne aus in die exakte Richtung zu den anderen Baustellen vorarbeiten“, erklärt Thomas Wunderlich. An seinem Schreibtisch zeigt er dazu eine Karte mit einem geologischen Querschnitt durch das Alpenmassiv. Zu erkennen sind steile Berge, die sich aus den unterschiedlichsten Gesteinen zusammensetzen, von hartem Granit bis zum weichen Dolomit-Marmor. Am unteren Ende des Profils verläuft der geplante Verkehrstunnel, der aus zwei Röhren besteht. Senkrecht dazu, etwa in der Mitte der Skizze, stößt der Versorgungsschacht Sedrun auf die Neue Europäische Alpentransversale (NEAT). Sofort nach seiner Fertigstellung wurde durch den Schacht Sedrun von Vermessungsexperten eine Koordinatenübertragung mit optischen und mechanischen Messmethoden durchgeführt. Ziel war es, für die Vortriebsrichtungen der Zwischenangriffe präzise und kontrollierte Ausgangspunkte am

Grafiken: edlundsepp

Die Bauabläufe bei einem Tunnelbau unterliegen wegen der extremen räumlichen Zwänge einer hochkomplizierten Logistik. Der Schacht von Sedrun ist eine Art Hauptschlagader für den Baubetrieb unter Tage – von hier aus werden Mensch und Maschine versorgt.



Foto: Thomas Schäfer



14,2 km



Faido

15,9 km

→ Vortrieb mit Tunnelbohrmaschine
 ← Sprengung

S

Schachtfuß zu erhalten. Doch für die Orientierung unter Tage stand nur eine bewährte Methode zur Verfügung: die Azimutbestimmung mit nordsuchenden Kreiselinstrumenten. Das System funktioniert ähnlich wie bei einem Spielkreisel, den man um seine senkrechte Achse rotieren lässt. Die Drehrichtung ist aber in der Geodäsie nicht senkrecht, sondern horizontal. Durch die Rotation der Erde um sich selbst, erfährt nun die vororientierte Drehachse des horizontalen Kreisels eine Schwingung, die um die Nordrichtung pendelt. Diese Oszillation kann elektronisch gemessen werden, ihre Mittellage zeigt genau nach Norden.

Doch kein Geodät gibt sich mit nur einer Messung zufrieden. Denn das Erdschwerefeld ist nicht homogen. Das heißt: Nicht überall ist die Erdanziehung gleich stark. Dazu kommt, dass durch die Luftschichtung im Tunnel überall Fehlereinflüsse auf die Messung lauern. Eine Überschreitung des vorgegebenen Durchschlagsfehlers der neuen Alpentransversale aufgrund eines unerkannten Fehlereinflusses im Sedruner Tunnel hätte aber unabsehbare finanzielle Konsequenzen gehabt. So wollten die Verantwortlichen im Jahr 2004 die Messergebnisse noch einmal mit einer vollkommen unabhängigen Methode bestätigt wissen. Sie wandten sich an den Lehrstuhl für Geodäsie der TUM. Wunderlichs wissenschaftliche Mitarbeiterin, Theresa Neuhierl, sollte in ihrer Doktorarbeit eine solche unabhängige Methode entwickeln und in der Praxis am Tunnel testen.

Eine besondere Rolle bei Neuhierls Doktorarbeit spielt der Aufzug im Sedruner Schacht, dessen Bewegung durch vier Führungsseile stabilisiert wird. Während der Fahrt durch den 800 Meter langen Schlund verdreht sich dieser Lift dennoch ganz leicht. Er ist also an der Sohle nicht mehr genauso ausgerichtet, wie am oberen Ende. Über diesen Lift sollte die neue Einmessung der Schachtsohle stattfinden.

Der Kniff mit dem Fahrstuhl

„Für unsere neuen Messungen haben wir das so genannte Inertialmesssystem verwendet“, erklärt Thomas Wunderlich. Dieses Messsystem (engl.: Inertial Measurement Unit, IMU) kombiniert drei senkrecht zueinander montierte Ringlaser und drei dazugehörige Beschleunigungsmesser. In einem ruhenden Ringlaser laufen zwei Laserstrahlen in entgegengesetzte Richtungen. Auf ihrer Kreisbahn gebändigt werden die Laserstrahlen durch Spiegel. Ihre Umlaufzeiten sind exakt gleich. Wird das Gehäuse jedoch einer Drehung unterworfen, so stellt sich eine messbare Differenz ein, weil dann unterschiedliche Wege durchlaufen werden. Aus diesem sogenannten Sagnac-Effekt kann man die Drehrate ermitteln. Mit drei orthogonal montierten Ringlasern werden so die Verdrehungen gegenüber einem festen Koordinatenrahmen gemessen. Dazu liefern die parallel zu den Achsen der Ringlaser ausgerichteten Beschleunigungsmesser die Verschiebung des Systems in den drei ▶

Wenn dieser Zugang für die Arbeiten der Vermessungsexperten einen Tag lang exklusiv gesperrt werden soll, muss dies schon Monate vorher bis ins Detail geplant werden – denn die anderen Arbeiten tief unter der Erde dürfen darunter nicht leiden





Foto: © AlpTransit Gotthard AG

Am oberen Ende des Versorgungstunnels Sedrun lagern die Materialien und warten auf ihren Einsatz unter Tage. Hier werden auch die Bohrgeräte für den Transport in 800 Meter Tiefe vorbereitet. Der Aufzug bringt Mensch und Material mit 16 Meter pro Sekunde abwärts

Der Gotthard-Basistunnel in Zahlen	
Baubeginn	1993
Gesamtlänge des Gotthard- Basistunnels	57 km
Tiefe des Schachtfußes Sedrun	800 Meter
Maximale Querabweichung der Durchbruchstellen	25 cm
Länge mit allen Quer- und Verbindungsstollen insgesamt	153,5 km
Transportleistung	80 Mio. t Güter pro Jahr
Einspurige Tunnelröhren	2
Querstollen	ca. 180
Von aussen zugängliche und klimatisierte Multifunktionsstellen	2
Gesamtverantwortlich	AlpTransit Gotthard AG
Mutmaßliche Gesamtkosten (ohne Ceneri-Basistunnel)	5,15 Milliarden Euro
Reisezeit Strecke Zürich-Mailand	2:40 h
Kabel für Stromversorgung und Datenübertragung	2 800 km
Schienen	228 km
Betonschwellen für den schotterlosen Oberbau	190 000
Züge pro Tag zwischen Zürich oder Basel und Chiasso-Mailand oder Luino-Busto Arsizio/Novara	ca. 300
Fertigstellung	vorauss. Ende 2017

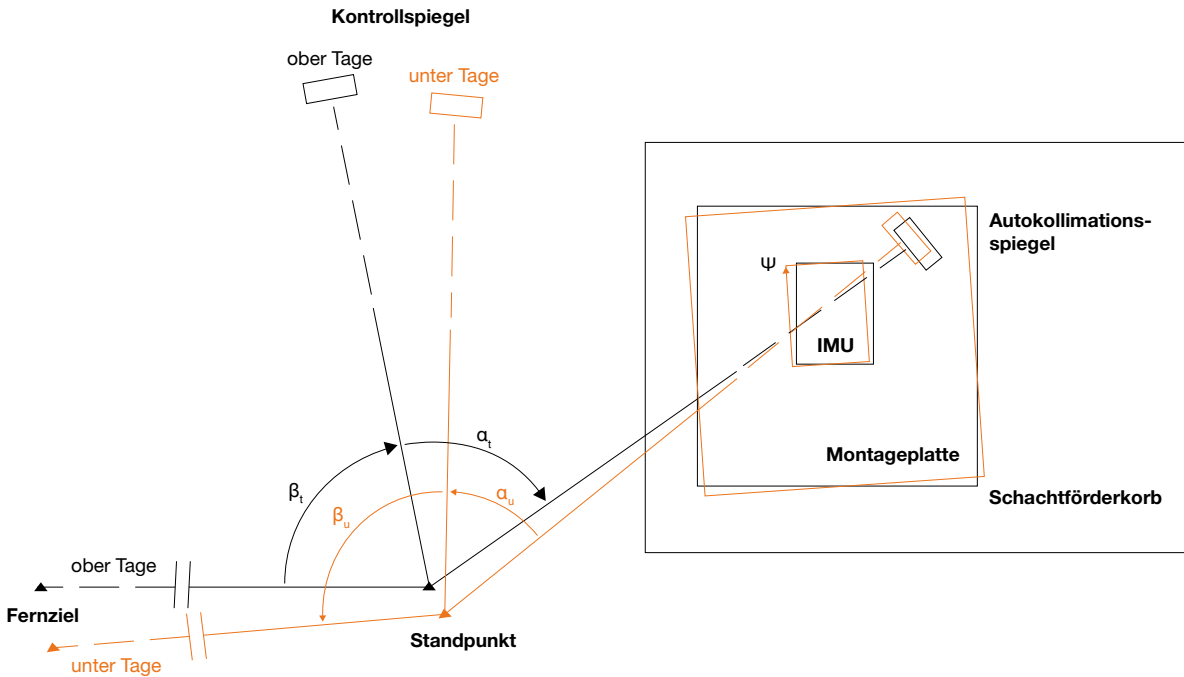
Achsenrichtungen während der Fahrt des Aufzugs. Diese Daten werden später für Korrekturen benötigt.

Das Inertialmesssystem ist nicht größer als eine Autobatterie. Zusammen mit Kollegen um Prof. Hilmar Ingensand, dem Leiter der Geodätischen Messtechnik und Ingenieurgeodäsie der ETH Zürich, montierten die Münchner Geodäten die IMU in dem Aufzug. Der Lift fährt mit bis zu 16 Metern pro Sekunde und bewältigt so die Strecke zwischen Sohle und Schachtkopf in rund zwei Minuten. Das fest mit dem Schachtkorb verbundene System erlaubt den Vermessungsexperten die Verdrehung, die dieser zwischen den Haltepunkten erfährt, exakt zu bestimmen. Dazu ist das hohe Tempo des Aufzugs von großem Vorteil, da sich Fehlereinflüsse umso geringer auswirken, je kürzer die Fahrzeit ist.

Das Drehratensignal jenes Ringlasers, der nahezu horizontal im Aufzug liegt, liefert den Rohwert der Plattformverdrehung durch den Sedruner Schacht. Dieser Wert wird anschließend durch die Signale der restlichen Sensoren korrigiert.

Der Tunnelschacht im Fadenkreuz

Eine besondere Herausforderung für Theresa Neuhiel war die exakte Erfassung der Ausrichtung der IMU am Kopf des Schachts. Die Münchner Geodätin musste ihr Messsystem an das obertägige Tunnelnetz anschließen. Dieses ist zuvor durch hochpräzise geodätische GPS-Messungen bestimmt worden. Anschließend ▶



Prinzipische Skizze zur Richtungsübertragung durch den Schacht von Sedrun

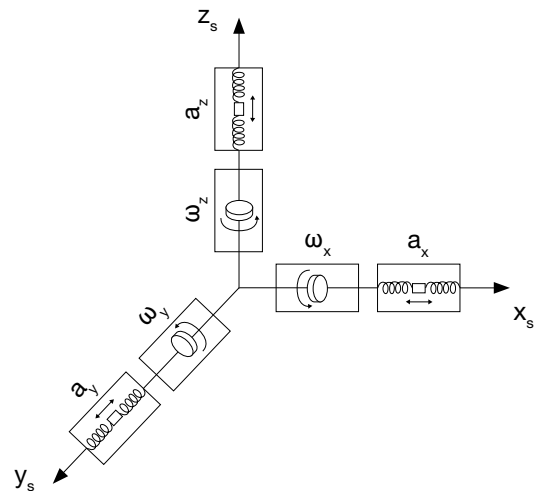
Ober Tage wird von einem Standpunkt vor der Schachtförderanlage die Nordrichtung mit Hilfe paralleler Visuren von einem Fernziel über einen Kontrollspiegel auf eine Montageplatte mit weiteren Spiegeln und der inertialen Messeinheit (IMU) im Schachtförderkorb übertragen (schwarz). Während der Schachtfahrt nach Unter Tage wird von der IMU die Verdrehung ψ gemessen. Unter Tage werden die Richtungsänderungen auf ein Fernziel übertragen (orange). Damit erhält das Koordinatensystem unter Tage seine Nordrichtung.

Funktionsweise einer IMU

Ein Inertiales Messsystem (engl.: Inertial Measurement Unit, IMU) besteht aus drei Beschleunigungsmessern und drei Kreiseln, die jeweils parallel und paarweise senkrecht zueinander angeordnet sind.

Newton fand bereits heraus, dass die wirkende Kraft proportional zur Beschleunigung ist. Aus der Beschleunigungsmessung ergibt sich demzufolge das Maß der Bewegung (zurückgelegter Weg). Die Kreisel liefern die Richtungsänderung für die Bewegung. Diese kleinen Wegstrecken und Richtungsänderungen werden in sehr kurzen Zeitabständen gemessen und berechnet. Aufsummiert ergibt sich die Spur der Bewegung in Form von Koordinaten. Im Schacht von Sedrun speicherte die IMU jeweils 100 Werte pro Sekunde.

Die Messwerte werden im IMU-eigenen Koordinatensystem erfasst, jedoch mit Bezug zu einem ruhenden Inertialsystem, das an den Sternen orientiert ist. Es unterliegt also der Erdrotation und der Erdschwerebeschleunigung, die von der Position auf der Erde abhängig sind. Diese Einflüsse werden durch verschiedene Koordinatenumformungen berücksichtigt. Vorhandene Messungenauigkeiten werden durch rechnerische Stützung minimiert.
Dr. Theresa Neuhierl





Fotos: Adrian Ryf (links), © AlpTransit Gotthard AG (rechts)

Am Schachtkopf Sedrun messen die Münchner Geodäten die Position des Aufzuges ein. Sobald der Aufzug am unteren Ende des Tunnels angekommen ist, hat er sich verdreht (links). Im Rangierbahnhof in der Kaverne findet der gesamte Materialumschlag statt (rechts)

musste die Geodätin alle Daten, die die Orientierung des Stollens am oberen Ende beschreiben, bis an die Sohle des Schachts übertragen. Damit war es ihr möglich, die während des Transports aufgetretenen Verdrehungen am Fuß des Schachts mit den Koordinaten des oberen Endes abzugleichen. Erschwert wurden die Messungen durch die engen Verhältnisse in dem Stollen und die relativ kurze Distanz zum Schacht.

„Aufgrund der beengten Verhältnisse musste man bei der Datenübertragung von einem Ende des Tunnels zum anderen auf optische Methoden der Industrievermessung zurückgreifen“, erläutert Wunderlich und ergänzt: „Wenn man für feinste Richtungsmessungen kein Ziel in großer Entfernung zur Verfügung hat, so simuliert man ein solches durch Autokollimation.“ Dazu wird am Zielobjekt ein Spiegel angebracht. Durch eine spezielle Einrichtung am Messinstrument kann bei auf unendlich fokussiertem Fernrohr erreicht werden, dass dessen projiziertes Fadenkreuz in sich selbst reflektiert wird. Wenn sich das eigentliche Fadenkreuz und sein vom Planspiegel zurückgeworfenes Bild exakt decken, was Geodäten als Koinzidieren bezeichnen, dann steht die Zielachse des Fernrohres genau senkrecht auf der Fläche des Reflektors. Durch die feste Verbindung von Spiegel, IMU und Schachtkorb kann so die Ausrichtung eingemessen und am anderen Endpunkt des Schachts abgenommen werden.

Dass die Einmessung des Versorgungstunnels erfolgreich verlief, erfuhren die Geodäten am 17. Oktober

2007. An diesem Tag wurde der 17 Kilometer lange Abschnitt Sedrun-Amsteg des Gotthard-Basistunnels mit nur 15 Zentimeter Querabweichung durchgeschlagen. An diesem Tag feierte man auch in München und Zürich, denn die geodätische Kooperation von Forschern der TUM und der ETH Zürich hat einen entscheidenden Teil zu diesem Erfolg beigetragen.

Üben am Olympiaturm: Der Brenner wartet!

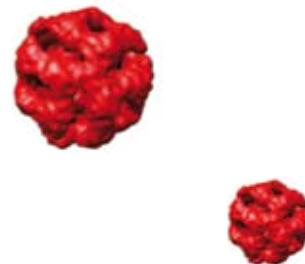
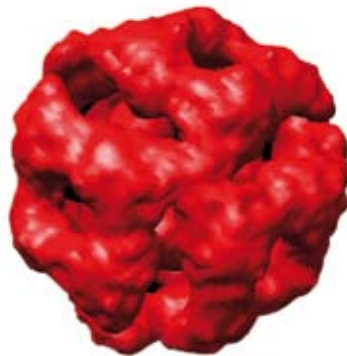
Dass die neue Messmethode letztendlich so hervorragend funktionierte, hatte sie nicht zuletzt der akribischen Vorbereitung in München zu verdanken. Man war für alle Eventualitäten gerüstet. Denn bevor die Münchner Geodäten in die Schweiz fuhren, konnten sie ihre Messungen durch ausgiebige Tests im Betriebsaufzug des Olympiaturms vorbereiten.

„Mit unseren Ergebnissen aus der Kombination von Inertialen Messsystem und Autokollimation konnten wir sehr genau und unabhängig von der zuvor angewandten Messmethode die Orientierung des Sedruner Tunnels überprüfen“, erklärt Professor Thomas Wunderlich. „Jetzt wollen wir das System optimieren, um es als generelles Prüfinstrument für ähnliche Bauprojekte zu etablieren“, sagt er. Dabei hat der Geodät schon eine konkrete Vorstellung, wo die Münchner Messmethode in den Alpen wieder zum Einsatz kommen könnte. „Der Brenner-Basistunnel wartet: Mit drei Zwischenangriffen über tiefe Schächte!“ sagt er. Und lacht dabei.

Thorsten Naeser

Wie Zellen Stress bewältigen

Wissenschaftler der TUM haben einen Mechanismus entdeckt, der Zellen dabei hilft, ihre Proteine vor Hitzeschäden zu schützen



Das Hitzeschockprotein Hsp26 im chaperone-inaktiven Zustand. 24 Hsp26-Moleküle lagern sich zu einer sphärischen Hohlkugel zusammen

Auch Zellen kennen Stress. Chemische Einflüsse oder Hitze können die fein ausbalancierten Prozesse innerhalb der Zelle aus dem Takt bringen. So können zum Beispiel empfindliche Proteine ihre zerbrechliche dreidimensional gefaltete Struktur verlieren oder gar miteinander zu Mischungen verklumpen. Erste Hilfe leisten in solchen Fällen der Zelle so genannte Hitzeschockproteine (Hsps). Sie bewahren andere Proteine vor dem Verklumpen oder bringen sie notfalls sogar wieder in die ursprüngliche korrekte Form zurück.

Wo diese „zellulären Sanitäter“ ihre Aufgabe nicht wahrnehmen können, werden Krankheiten wie Alzheimer oder das Creutzfeldt-Jakob-Syndrom begünstigt. Angesichts der Bedeutung der Hsps auch in Hinsicht auf solche Krankheiten versuchen Wissenschaftler ein möglichst umfassendes Verständnis der Arbeit dieser Proteine und ihrer Regulation zu gewinnen.

Wissenschaftler der Technischen Universität München haben nun einen Mechanismus entdeckt, der Zellen dabei hilft, ihre Proteine vor Hitzeschäden zu schützen. Die Forscher um Professor Johannes Buchner vom Lehrstuhl für Biotechnologie untersuchten am Beispiel der Bäckerhefe das Hitzeschockprotein Hsp26. Bei diesem

Protein hatten sie eine besondere Eigenheit entdeckt: In der Hefe nimmt es Hitzestress selbstständig wahr. Bei normalen Temperaturen ist es nicht aktiv, schaltet sich aber bei Hitze selbstständig ein und entfaltet blitzschnell seine Schutzwirkung. Dies zeigten Versuche bei verschiedenen Temperaturen. Lässt man ein Testprotein bei 25°C verklumpen, so zeigt das nicht aktivierte Hsp26 keinen Effekt. Erhöht man die Temperatur aber für nur zehn Sekunden auf 36°C, dann bewahrt Hsp26 schon die Hälfte des Testproteins vor dem Verklumpen. Und nach fünf Minuten bei Hitzestress bleibt das Testprotein in Gegenwart von Hsp26 zu 100 Prozent intakt.

Welcher Mechanismus dem zugrunde liegt, haben die TUM-Biotechnologen jetzt herausgefunden. Das Aktivierungssignal ist eine temperaturabhängige Umlagerung innerhalb des Hsp26-Moleküls. Die Forscher konnten sogar den exakten Ort dieses molekularen Temperatursensors lokalisieren – eine als Mitteldomäne bezeichnete Region. Und sie wiesen nach, dass der Sensor in einem engen Temperaturbereich zwei Stellungen einnehmen kann: inaktiv und aktiv. Die Struktur der Mitteldomäne bestimmt, ob und wann Hsp26 aktiv wird und seine Schutzfunktion wahrnimmt. Das hier entdeckte Prinzip, eine Temperaturänderung in eine molekulare Strukturänderung umzusetzen, könnte auch für die Nano-Biotechnologie von Interesse sein. □

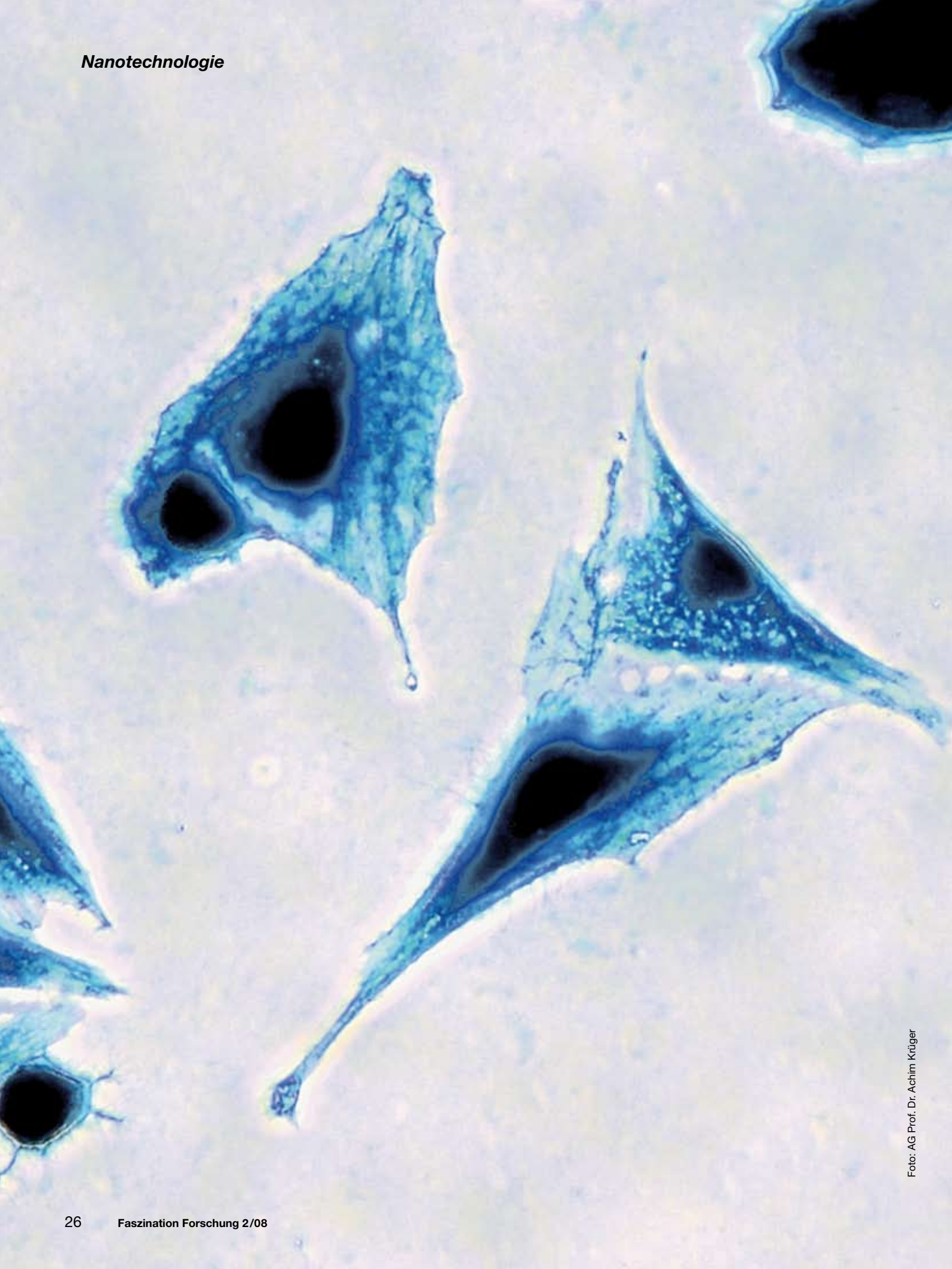


Foto: AG Prof. Dr. Achim Krüger

The background of the entire page is a light blue, grainy microscopic image showing several large, irregularly shaped cells. These cells have a dark blue, almost black, central region, likely representing the nucleus. The cells are scattered across the frame, with some appearing more elongated and others more rounded. The overall appearance is that of a light micrograph of stained tissue or cells.

Link

www.frauenklinik.med.tu-muenchen.de

Nano-Detektive: Dem Krebs auf der Spur

Wissenschaftler der TUM-Frauenklinik erproben einen Nanodetektor, der mit Hilfe von Antikörpern Krebszellen im Blut aufspürt und einfängt – und eröffnen damit neue Methoden zur individualisierten Krebstherapie

Lichtmikroskopische Aufnahme von Tumorzellen. Zum leichten Nachweis sind die Tumorzellen mit einem Genmarker versehen, der die Zellen blau färbbar macht



Ausschnitt aus der nanostrukturierten Oberfläche des Drahtes: Auf dem Draht werden winzige Latexkügelchen zum Schmelzen gebracht; sie fließen zusammen und bilden kleine Dreiecke. Auf der verbleibenden mit Gold bedampften Oberfläche docken Antikörper an

Die Pinnwand im Besprechungsraum bietet das übliche Sammelsurium: ein Faltblatt „Die Apotheke informiert“, ein Zeitungsausschnitt „Vermehrt Fälle von Masern in Bayern“, ein offizielles Schreiben „Ankündigung der großen Feuerbeschau durch die Branddirektion München“.

Dazwischen die Kopie einer Gratulation von Bundesforschungsministerin Dr. Annette Schavan: Sie wünscht dem Forschungsverbund aus der Firma GILUPI zusammen mit Wissenschaftlern der TUM-Frauenklinik und der Universität Bonn für die zukünftige Arbeit viel Erfolg. Dieses Team hat 2007 im Innovationswettbewerb zur Förderung der Medizintechnik des Ministeriums einen Stich gemacht: Bis zu 1,25 Millionen Euro kassieren die Wissenschaftler gemeinsam für das Projekt „Isolierung von seltenen zirkulierenden Tumorzellen aus dem Blut von Malignompatienten durch Einsatz eines strukturierten Antikörper-beschichteten Nanodetektors“. Was der komplizierte Titel bedeutet, erklärt

Schmitt kurz so: „Wir erproben eine Methode, mit der wir im Blut zirkulierende Tumorzellen früher entdecken können als bisher. Dieser Nanodetektor wird empfindlicher sein als herkömmliche Untersuchungsmethoden. Mit ihm fischen wir gezielt Tumorzellen aus dem Blut, um sie dann im Labor molekularbiologisch und zellbiologisch zu charakterisieren. Dazu existiert bisher keine In-vivo-Technologie auf Einzelzellniveau. Der Nanodetektor kann die Tumordiagnostik verfeinern und ausgestreute Tumorzellen – auch zur Kontrolle des Krankheitsverlaufes – aufspüren.“

Ein Draht als Angel für die Krebszellen

Die Grundlage dieser Neuheit ist eigentlich ein alter Hut: der Herzkatheter. Damit der Katheterschlauch das Blutgefäß nicht beschädigt, schieben die Chirurgen als Führung als Erstes einen feinen Draht mit nach hinten gebogener Spitze in die Vene. Dieser nach seinem Erfinder Seldinger benannte Draht, ist Kern des von der

Zulassungsverfahren Medikamente	
<p>Der steinige Weg zu einem erfolgreichen Medikament beginnt in unseren Tagen mit der Suche nach einer geeigneten Zielstruktur. Damit wird bereits im Vorfeld festgelegt, wo eine bestimmte Substanz mit ihrer Wirkung ansetzt. Völlig anders in der Vergangenheit: So kam Acetylsalicylsäure (Aspirin®) erstmalig um 1900 auf den Markt, der Wirkmechanismus des Entzündungshemmers wurde jedoch erst 2005 aufgeklärt.</p> <p>Leider werden neue Wirksubstanzen selten per Zufall entdeckt, wie seinerzeit das Penicillin durch Alexander Flemming auf verschimmelten Agarplatten. Vielmehr müssen viele tausend potenzielle Kandidaten in einem langwierigen Prozess zunächst im Labor vorselektiert werden. Zeigt eine der Testsubstanzen dabei Wirkung auf die gewählte Zielstruktur, durchläuft sie noch einige Optimierungsschritte mit dem Ziel, ihren Effekt zu verstärken. Erst dann folgt die nächste Stufe: die präklinische Forschung. Dabei wird vor allem die Sicherheit des neuen Stoffes durch Laborexperimente, Computersimulation und Tierversuche geprüft. Parallel dazu erforschen die Wissenschaftler, in welcher Darreichungsform (Galenik) das neue Medikament später zum Einsatz kommt. Durchschnittliche Dauer dieser Phase: 1,5 bis 3 Jahre.</p> <p>In der darauf folgenden klinischen Forschung wird in geeigneten Studien die Unbedenklichkeit und Wirksamkeit beim Menschen untersucht. Die Arzneimittelbehörde (in Deutschland das Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte, BfArM) muss</p>	<p>klinische Studien zuvor genehmigen; gleichzeitig kontrolliert eine Ethikkommission Prüfplan und Qualifikation der Prüfarzte. Die klinische Prüfung gliedert sich grob in vier Phasen.</p> <p>Phase 0: Gesunde Freiwillige erhalten eine minimale Menge des Prüfpräparats (Microdosing), weit unter der therapeutischen Dosis.</p> <p>Phase I: Erfolgt meist an gesunden Personen (Ausnahme: bestimmte Krebsmedikamente), um generell Sicherheit und Verträglichkeit im Menschen abzuklären.</p> <p>Phase II: Dosis und Wirkung werden erstmals an Patienten (ca. 100 – 200) getestet.</p> <p>Phase III: Hierbei muss ein signifikanter Wirkungsnachweis an 200 – 10 000 Patienten erbracht werden. Durchschnittliche Dauer der klinischen Phase: 5 bis 7 Jahre. Weiterführende Studien der Phase IV, mit mehreren Tausend bis Millionen Patienten, erfolgen nach Marktzulassung, um mögliche seltene Effekte festzustellen.</p> <p>Bilanz: Von 5 000 Substanzen der präklinischen Forschung erreichen so nur fünf die klinische Phase und nur eine davon wird schließlich zugelassen.</p>
Zulassungsverfahren Medizinprodukte	
<p>Ein Medizinprodukt, wie der Nano-Detektor der TUM-Wissenschaftler, ist ein Produkt, das zur diagnostischen oder therapeutischen Anwendung am Menschen bestimmt, aber kein Arzneimittel ist (z. B. Rollstühle, Herzkatheter). Vor der Zulassung in der EU muss es ein Konformitätsbewertungsverfahren durchlaufen. Besteht das Medizinprodukt diese Prüfung, erhält es eine CE-Kennzeichnung und Zulassung. Bei Produkten mit höherem</p>	<p>Gefahrenpotenzial (Risikoeinstufung Klasse II und III) muss dazu eine benannte Stelle (Neutrale Auditier-, Zertifizier- und Prüfstelle) eingeschaltet werden und bei innovativen Produkten sind zusätzlich klinische Studien notwendig. Zulassungsdauer und Patientenzahlen liegen jedoch weit unter denen zur Zulassung eines Arzneimittels.</p> <p style="text-align: right;"><i>Dr. Sonja Becker</i></p>

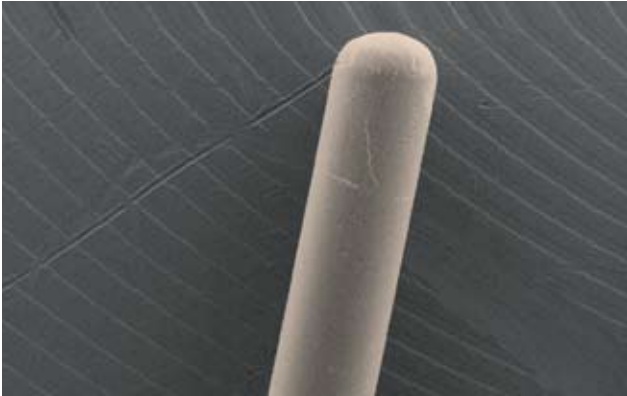
Firma GILUPI, Golm/Potsdam, entwickelten Nano-Detektors. Er bildet quasi die Angel, mit der Ärzte in Zukunft im Blut ihrer Patienten nach Zellen und Molekülen fischen sollen. Gute Dienste leistet er bereits in präklinischen Studien zur vorgeburtlichen Diagnostik, für die er von Professor Michael Giersig, Forschungszentrum Caesar in Bonn und Prof. Ulrich Pison, Charité Berlin, entwickelt wurde.

Schnell erkannten die Wissenschaftler der Arbeitsgruppe Schmitt: Dieses neuartige Instrument müsste sich hervorragend für ihre Forschung zur Tumorbilogie und ebenso für die Klinik eignen. Sie könnten sich genau die Zellen von Tumoren oder Metastasen aus einer Vene des Patienten angeln, die sie analysieren möchten. Da diese Zellen nur vereinzelt im Blut zirkulieren, kommt man heute nur schlecht an sie heran. Doch wie bringt man die Zellen zum „Anbeißen“? Der richtige Köder sind in diesem Fall Antikörper. Und zwar solche, die spezifisch zu Antigenen auf der Oberfläche von Tumor-

zellen passen. Kommt eine solche Zelle mit der Angel in Kontakt, koppelt sich ihr Antigen an den Antikörper-Köder. Dieses Prinzip verleiht dem Nano-Detektor seine einzigartige Sensitivität und erlaubt es, ganz gezielt Tumorzellen aus dem Blut zu fischen.

Wie kriegt man die richtige Zelle zu fassen?

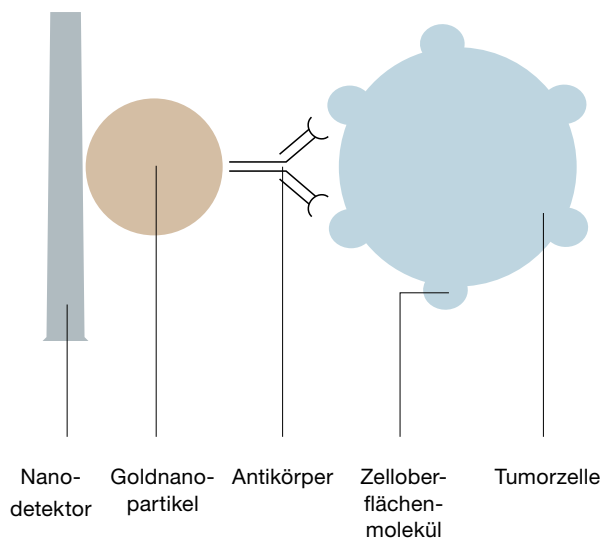
Schwierig ist es allerdings, den Köder an der Angel zu befestigen – besteht sie doch aus einem Material, an dem gerade nichts kleben bleiben soll. Deshalb werden die ersten Zentimeter des Drahts mit Nano-Goldpartikeln beschichtet. An ihnen lagern sich die Antikörper recht gut an. Damit sie das in geordneter Weise tun und so besser mit den Krebszell-Antigenen reagieren können, darf man ihnen aber nur sehr wenig Platz bieten. Darum werden nur winzige Inseln beschichtet, jede einen fünfzigmillionstel Millimeter groß. Auf dem Draht werden winzige Latexkügelchen zum Schmelzen gebracht; sie fließen zusammen und bilden kleine Dreiecke; ▷



2 cm lange Spitze eines nanostrukturierten Federdrahtes (Seldinger-Draht), wie er routinemäßig für verschiedene klinische Anwendungen in die Blutbahn eingebracht wird



Immunzelle, die über Antikörper an der nanostrukturierten Oberfläche fixiert ist



Über an Gold-Nanopartikel des Detektors gekoppelte Antikörper, die gegen Zelloberflächenmoleküle gerichtet sind, wird die Tumorzelle angebunden

ein von GILUPI-Mitgründer Prof. Giersig entwickeltes Verfahren. Auf den verbleibenden mit Gold bedampften Oberflächen werden Antikörper angedockt.

Von Mäusen zu Menschen

Noch arbeiten die TUM-Wissenschaftler sowie Projektpartner Dr. Andreas Limmer von der Universität Bonn mit Antikörpern gegen Tumor-Antigene von Maus und Ratte, um die Verträglichkeit des Verfahrens nachzuweisen. Sobald diese präklinischen Versuche positiv abgeschlossen sind, soll das Votum der Ethikkommission für den Test mit humanen Antikörpern am Menschen eingeholt werden. Planung, Vorbereitung und spätere Durchführung der klinischen Studien sind Aufgabe der TUM-Wissenschaftler. Damit der Start möglichst reibungslos verlaufen kann, sind noch einige ganz praktische Fragen zu klären: Wie vermeidet man, dass gefischte Zellen während der Prozedur wieder verloren gehen? Wie löst man sie für die spätere Analyse ab? Wie ist der Detektor zu sterilisieren?

Vor allem aber steht die Arbeitsgruppe Schmitt vor der schwierigen Aufgabe, geeignete menschliche Antikörper zu finden. Vorrangiges Ziel sind Tumoren von Epithelien - Geweben aus einer oder mehreren Zellschichten, die wie eine Tapete viele Organe auskleiden oder bedecken. Die Forscher müssen zunächst die Oberflächen-Antigene solcher epithelialer Tumoren analysieren und dann exakt passende Antikörper finden. Hilfe kommt hier wiederum aus der Industrie: Das Biotech-Unternehmen AbD-Serotec-MorphoSys in Martinsried bei München stellt in Bakterienkulturen humane Antikörper her. In einer „Bibliothek“ bietet es rund zehn Milliarden verschiedene Antikörper an und liefert das Gewünschte nach knapp sechs Wochen Produktionszeit.

Ein Frühwarnsystem für Metastasen

Ziel des Ganzen ist es letztlich, auf schonende, minimal-invasive Weise Zellen zu gewinnen, deren Analyse dem Arzt wertvolle Informationen über den jeweiligen Tumor gibt. „Zur Krebs-Früherkennung soll das Verfahren nicht dienen“, betont Manfred Schmitt, „außer vielleicht, wenn in einer Familie bestimmte Krebserkrankungen gehäuft vorkommen, also ein erhöhtes Tumorrisiko besteht. Der Detektor soll vielmehr bei konkreten Verdachtsmomenten eingesetzt werden – um den Erfolg einer Therapie zu kontrollieren oder den Verlauf nach dem operativen Entfernen eines Tumors zu überwachen. Weil der Detektor so empfindlich und spezifisch arbeitet, können wir frühzeitig erkennen, ob erneut Tumorzellen auftauchen, was ein Hinweis auf Metastasen ist. In jeder Phase einer Krebserkrankung kann der Arzt sich rasch ein Bild verschaffen.“ Sein Team interessiert sich vor allem für fortgeschrittenen Brustkrebs, bei dessen Entstehung genetische

Faktoren eine wichtige Rolle spielen. Zur Erforschung der Tumorgenetik sind die Wissenschaftler heute vor allem auf Gewebe des Primärtumors, von Metastasen oder Lymphknoten angewiesen. Aus Blut lassen sich mit den heutigen, wenig spezifischen Verfahren nur mühsam genügend Zellen gewinnen – in etwa einer Million Blutzellen schwimmt ungefähr eine Tumorzelle. Die hoch sensitive Nano-Angel wird für die Forschung einen ebenso großen Fortschritt bedeuten wie für die kontinuierliche Überwachung von Krebspatientinnen, denen ein Tumor entfernt wurde. So sagt die Menge der im Blut zirkulierenden Tumorzellen dem Arzt beispielsweise, ob ein Medikament wirkt. Bei Misserfolg kann er frühzeitig auf eine andere Therapie ausweichen. Der Nano-Detektor hilft also auch, unwirksame und oben-dreiein teure Behandlungen zu vermeiden.

Warten auf die nächsten Glückwünsche

Angesichts der Relevanz der neuen Methode für die medizinische Praxis und Forschung hoffen die Wissenschaftler auch auf Förderung durch die EU. Immerhin hat ihr Antrag in Brüssel alle Hürden bis zur ausführlichen Begutachtung genommen. Ideen für weitere Projekte haben die Forscher genug. Nicht nur wollen sie versuchen, die Tumorzellen quantitativ aus dem Blut zu entfernen. Geplant ist auch, solche genetischen Abweichungen der Tumorzellen zu analysieren, die nicht auf Störungen in der DNA-Sequenz beruhen, sondern auf einer veränderten Regulation und Ausprägung der Gene. Das lässt ein noch tieferes Verständnis des Krankheitsgeschehens und damit noch individuellere Therapien erwarten.

Als besonderer Clou soll in Zusammenarbeit mit GILUPI und der Plasmonic Biosensor AG ein Licht leitender Sensor entwickelt werden. Die Idee: Die mit Antikörpern beschichteten Mini-Inseln auf dem Seldinger-Draht wirken wie Prismen. Die Art, wie sie einen auftreffenden Lichtstrahl ablenken, gibt Auskunft darüber ob eine Zelle an den Nanodetektor angedockt hat. Mit dieser optischen Angel werden die Wissenschaftler den Tumorzellen in Echtzeit beim „Anbeißen“ zuschauen. Und irgendwann werden die nächsten Glückwünsche zu lesen sein, an der Pinnwand im Besprechungsraum der Klinischen Forschergruppe Tumorgenetik der TUM-Frauenklinik. *Sibylle Kettembeil*

Fördermittel

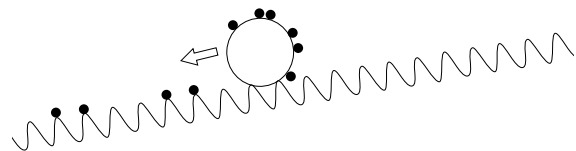
Das Projekt mit einem Gesamtfinanzvolumen von 1,6 Millionen Euro wird vom BMBF mit 1,25 Millionen Euro gefördert. Etwa 650 000 Euro davon gehen an die TUM-Arbeitsgruppe für Grundlagenforschung. Hält der Nano-Detektor, was sich Wissenschaftler und Ärzte von ihm versprechen, gibt es für die klinischen Prüfungen weitere 110 000 Euro.

Nanotechnologie: Die Welt der Zwerge

Sonnencreme mit Lichtschutzfaktor 40, Klebefolien, die sich abwaschen lassen und sich selbst reinigende Fassaden: Produkte mit solchen Eigenschaften zu versehen, wurde erst durch die Nanowissenschaft möglich, die Objekte bis zu einer Größe von 100 Nanometern erforscht.

„Nanos“ (griechisch: Zwerg) steht für die Welt kleiner Moleküle und Atome, die erst mit der Erfindung des Rastertunnelmikroskops 1981 durch den deutschen Physiker Professor Gerd Binnig und seinen Schweizer Kollegen Professor Heinrich Rohrer sichtbar wurden: Ein Nanometer ist ein Millionstel Millimeter und entspricht einer Kette von nur fünf bis zehn Atomen.

In der Nanodimension zeigen Stoffe plötzlich höchst interessante, neue Eigenschaften: In der Sonnencreme reflektieren Nanopartikel aus Titandioxid das UV-Licht, sind aber zugleich durchsichtig. Klebefolie und Fassade besitzen nanostrukturierte Oberflächen: Bei der Folie sorgen submikroskopische Lamellen dafür, dass sie zwar fest haftet, aber nicht mit Schmutz verklebt. Und auf der Fassadenoberfläche lassen winzige Noppen alle Wassertropfen samt Staub ablaufen – ähnlich, wie dies auch Lotusblätter tun.



Auch das chemisch inaktive Gold wird in atomaren Schichten zum effizienten Katalysator, der in Brennstoffzellen Dienste tun kann. Nanoröhren aus wabenförmigen Kohlenstoffgittern, die Carbon Nano Tubes, halten mehr Zugkraft aus als Stahl, leiten Wärme besser als Diamant und sind je nach Anordnung der Waben elektrische Leiter oder Halbleiter. Mit neuen Verfahren können die Röhrrchen heute in großen Mengen hergestellt werden und harren ihres Einsatzes in papierdünnen Bildschirmen oder Keramikteilen von Flugzeugturbinen.

Auf die Eigenschaft von Atomen setzt auch die Forschung am Quantencomputer. Er soll die Daten nicht mehr als elektrische Bits kodieren, sondern etwa die Drehrichtung subatomarer Teilchen zur Datenverarbeitung in Quantenbits nutzen. Rechenoperationen, so ist die Hoffnung, könnten mit einem solchen Quantencomputer viel schneller durchführbar sein.

Auch in den Biowissenschaften hat die Nanotechnologie Einzug gehalten. Professor Arne Skerra vom TUM-Wissenschaftszentrum Weihenstephan zum Beispiel verformt mithilfe von Computer und Gentechnik gezielt taschenförmige Eiweißmoleküle, um diese als eine Art kleine Antikörper in Diagnostik und Therapie etwa von Krebskrankheiten einzusetzen (siehe Faszination Forschung 1/2007).

Andere Biowissenschaftler und Biowissenschaftlerinnen arbeiten an Nanomotoren, die einmal medikamentöse Wirkstoffe verpacken oder molekulare U-Boote antreiben sollen. Die Vision der Wissenschaftler: Die Energie könnten die Nano-boote selber herstellen – mithilfe von Licht und einem umgebauten Photosyntheseapparat aus Pflanzen. Viele Anwendungen der Nanotechnologie lassen sich heute noch nicht absehen. Doch die Nanotechnologie eröffnet so faszinierende Möglichkeiten, dass sie das Zeug dazu hat, sich zu einer der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts zu entwickeln.

Markus Bernards

Link

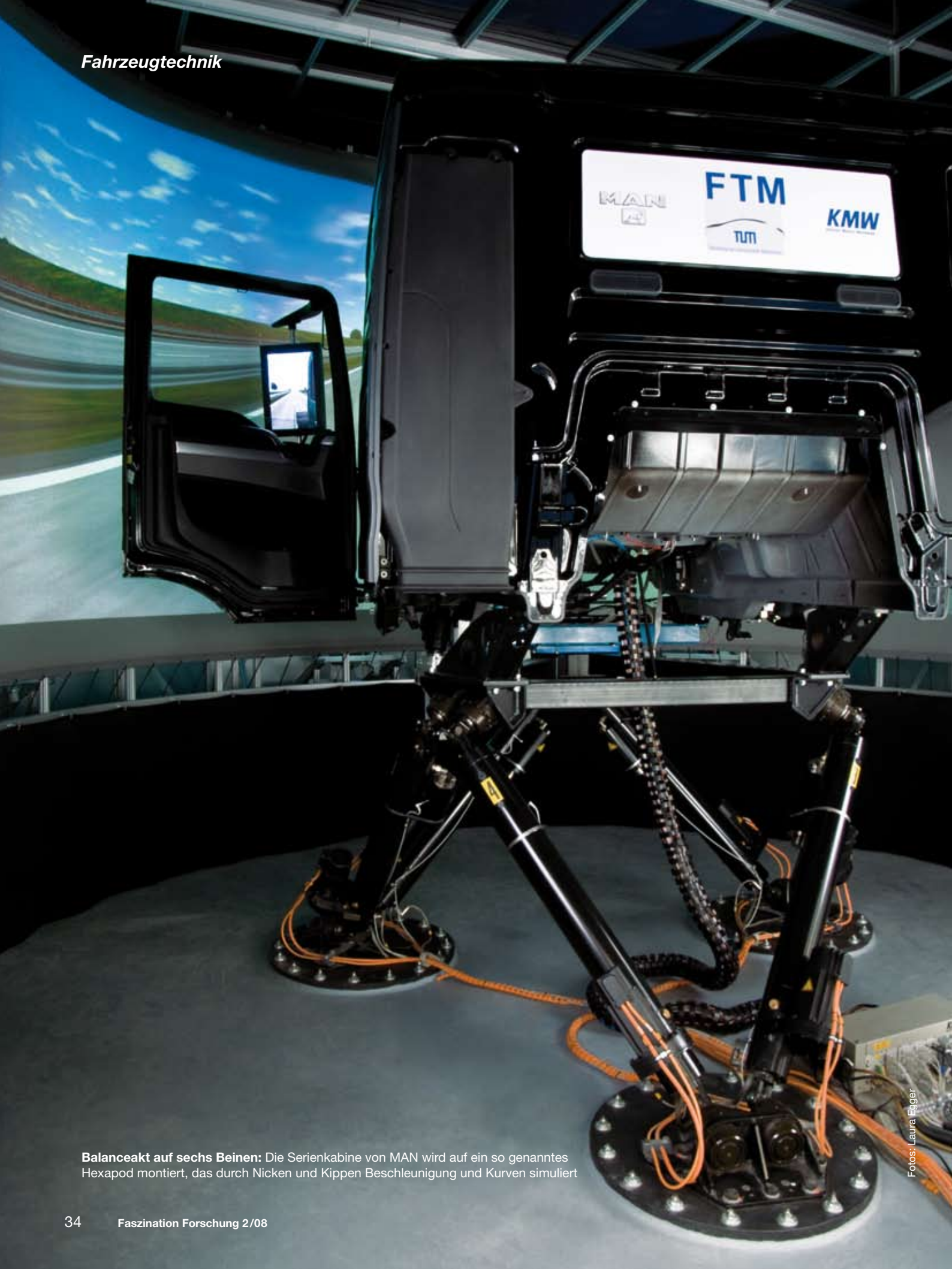
www.fahrzeugtechnik-muenchen.de

Landstraße auf Leinwand: Ein Blick links vorbei an der Fahrerkabine auf die 210 Grad umfassende, runde Projektionsfläche. Links unten ist einer der fünf Projektoren sichtbar, die den lebendigen Eindruck auf der Projektionsfläche erzeugen

A large truck simulator is shown from a low angle, looking up at the cab. The simulator is dark-colored with a large, multi-screen display on the front. The display shows a bright, sunny day with a clear blue sky, green grass, and a road with white dashed lines. The truck's headlights and mirrors are visible. The simulator is mounted on a complex mechanical base with various pipes and components.

Ein Brummi aus acht Bildschirmen

Die TUM hat einen Lkw-Simulator entwickelt, mit dem Forscher das Verhalten von Menschen am Steuer beobachten können. Im Kern steht die Frage: Kann neue Technik im Nutzfahrzeug dem Fahrer helfen – oder lenkt sie ihn vom Verkehr ab?



MAN FTM KMW
TUM

Balanceakt auf sechs Beinen: Die Serienkabine von MAN wird auf ein so genanntes Hexapod montiert, das durch Nicken und Kippen Beschleunigung und Kurven simuliert

Fotos: Laura Egger



Im Fahrerhaus wirkt alles wie aus einem Guss, um den Testfahrer in die Simulation eintauchen zu lassen. Die Rückspiegel sind handelsübliche Flachbildschirme



Auch eine Stadt ist in der Simulation enthalten. Bald soll sie von Bewohnern nur so wimmeln, auch, um die Testfahrer größerem Druck auszusetzen



Foto: Laura Egner

Rush hour in Simulationen? Auch das beste Programm hat mal verstopfte Straßen. Denn hier lässt sich am Besten die Beherrschung des Fahrzeugs in schwierigen Situationen üben. Bewundern wir also den Berufsverkehr, der mit viel Liebe zum Detail digitalisiert wurde.

Der Fahrersitz vibriert, als die Zündung des Lkws den Motor auf Touren bringt. Die Innenstadtstraße ist eng, die Rückspiegel zeigen den kleinen Spielraum. Links unten saust ein Audi vorbei. Gang rein und Gas geben: Die Kabine schwankt unter dem Zug der Maschine. Plötzlich drängelt sich ein silberner Pkw vor der Haube in die Spur: Das war knapp!

Glücklicherweise nur eine Simulation, wenngleich eine sehr realistische. Der Motor: nicht mehr als eine kräftige Soundanlage. Die Beschleunigung: nur das sanfte Nicken des Fahrerhauses, das auf sechs elektrisch bewegliche Aktuatoren, einer Art Stelzen, montiert ist. Und die Innenstadtumgebung? Von acht Bildschirmen und Projektoren erzeugt, die von drei Seiten um eine detailgetreue Kabine eines MAN-Lasters montiert sind. Dieser Simulator ist ein Wunderwerk moderner Technik, verpackt unter einer riesigen blauen Halbkugel in den Laborhallen des TUM-Geländes in Garching.

Der Fahrsimulator, den der Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik München (FTM) in jahrelanger Zusammenarbeit mit MAN Nutzfahrzeuge und Krauss-Maffei Wegmann entwickelt hat, ist eine offensichtlich fruchtbare Kooperation: Die Anlage hat die Größe eines Reihenhauses, unzählige Kabel fließen wie Adern in und um den Simulator-Aufbau, und auch die Rechnerstafette am Eingang wächst immer weiter.

„Unser Simulator ist täglich für Forschung und Entwicklung im Einsatz“, sagt Holger Mohra, und es schwingt ein bisschen Stolz in seiner Stimme mit. Der Diplomingenieur der TUM ist so etwas wie der Adoptivvater des FTM-Fahrzeugsimulators. Seine Vorgänger haben bis 2004 an der Entwicklung des halb virtuellen, halb

realen Brummis gearbeitet. Denn die Kabine ist ein Serienmodell, und alle Teile bis zu den elektronischen Steuergeräten sind Originaltechnik der Industriepartner. Ab der Fahrerhauslagerung sowie den Bedienelementen im Fahrzeuginnenraum, wie beispielsweise Fußpedale, Lenkrad und Gangschaltung, übernehmen Elektromotoren und Computer die Funktionen – und gaukeln so dem Probanden einen kompletten Lastkraftwagen im Einsatz vor.

Wie Bedienung intuitiv wird

Holger Mohra kennt jedes Detail, jede Einstellung des Gerätes. Eine Überlandfahrt oder lieber doch den Großstadtdschungel? Für den 29-Jährigen ist beides nur wenige Mausklicks entfernt. Schon weichen die Häuserfronten einer Landstraße; am Horizont erkennt man ein kleines Wäldchen. Nach links geht es nach „Neustadt“; detailgetreue gelbe Bundesstraßenschilder weisen den Weg durch die virtuelle Welt.

Holger Mohra braucht keine Schilder, um sich dort zu orientieren. Der Doktorand betreut zusammen mit zwei Kollegen alle Forschungsprojekte, für die die Anlage eingesetzt wird. Etwa die Erforschung von Mensch-Maschine-Schnittstellen: „Wir wollen wissen, wie Fahrer mit neuen Bedien- und Anzeige-Elementen zurechtkommen.“ Lässt sich der Bordcomputer intuitiv benutzen? Oder fordert er dem Fahrer so viel Aufmerksamkeit ab, dass dieser sich nicht mehr auf den Straßenverkehr konzentrieren kann? Dabei muss alles bis ins Detail stimmig sein, denn die neuen Elemente sollen sich so unauffällig wie möglich in die Serienausstattung einpassen.

Anders läuft es bei Tests von aktiven Sicherheitssysteme-



Ganz rechts noch einmal gut zu sehen: Der FTM-Fahrsimulator nutzt normale LCD-Flachbildschirme für die Rückspiegel des Digi-Trucks, so wie sie jeder Computerbenutzer eines modernen Gerätes kennt

men. Hier bemerken Probanden recht schnell, warum sie im Simulator sitzen, denn die Maschine greift bisweilen in die Fahrweise ein und denkt mit. „Ein Fahrzeug könnte bei schlechter Sicht per Sensorik feststellen, wenn ein Auto auf der Strecke vor uns steht und dann automatisch bremsen“, erklärt Holger Mohra ein Versuchsszenario. „Die Frage für uns ist nun: Wie erkläre ich das dem Fahrer? Wann informiere ich ihn über die Notbremsung, ohne ihn zu verstören?“

Kann man Stress-Verhalten vorhersagen?

Im Simulator können Forscher und Industriepartner also allerlei Situationen nachstellen und neue Systeme ausprobieren, ohne den Straßenverkehr nördlich von München unnötig aufzumischen. Das ist besonders dann von Nutzen, wenn die Forscher ihren Blick auf den Menschen hinterm Steuer richten wollen, ihn überraschenden und unerwarteten Situationen aussetzen. „Stressoren“, so nennt Mohra Ereignisse und Elemente in der Simulation, die die routinierten Fahrer fordern sollen. An der Schnittstelle zwischen Ingenieurwissenschaft und Psychologie erforscht das Team Verhaltens- und Fahrweisen von Menschen unter unterschiedlichen Belastungen. Per Befragung während der Fahrt und mit unauffällig angebrachten Kameras werten die Wissenschaftler die Reaktionen der Testpersonen aus – eine große Hilfe, wenn es um Ideen für intelligente Assistenzsysteme geht.

Apropos Testpersonen: Nicht jeder darf sich verhaltenspsychologischen Herausforderungen im Lkw stellen. Mohra erzählt von den Anfängen: „Wir haben Ergebnisse von Simulatorfahrten von Studenten und echten Lkw-Fahrern verglichen und festgestellt: Studis und ▶

Der FTM-Fahrsimulator in Zahlen und Fakten

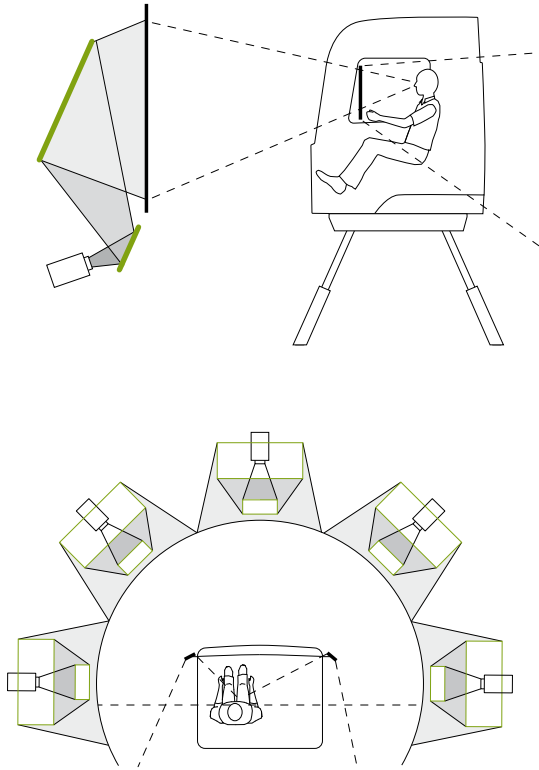
Unter der blauen Haube des Simulators steckt viel Technik, die das Fahrgefühl so realistisch wie möglich machen soll. Alleine für die Bilderzeugung nutzen die Ingenieure fünf Rücklichtprojektoren auf einer feststehenden Leinwand (Fixed-Screen-Konzept), deren Bilder ineinander greifen. Damit hat der Fahrer einen Sichtwinkel von 210 Grad in der Horizontalen und 45 Grad in der Vertikalen – mehr als ausreichend, um ein etwa 130 Kilometer umfassendes Streckennetz mit einer detailgetreuen Umgebung während der Fahrt zu simulieren.

Die Rückspiegel sind zwei Flachbildschirme, wie man sie von normalen Heimcomputern oder Laptops kennt. Apropos Heimcomputer: Die gesamte Rechnerarchitektur des Simulators basiert auf üblichen PCs – somit bleibt der Prüfstand einfach und kostengünstig erweiterbar, sobald mehr Leistung benötigt wird.

Bewegungen der Kabine erzeugt das Gerät über ein elektrisch angetriebenes Standard-Bewegungssystem (Hexapod) mit 1,5 Tonnen Nutzlast. Dabei sorgt eine sechsbeinige Stelzenkonstruktion durch die Bewegung der einzelnen Aktuatoren für ein möglichst reales Beschleunigungsempfinden während der Fahrt.

Für das richtige akustische Ambiente sind vier Lautsprecher sowie ein Körperschallwandler im Inneren des Fahrerhauses verantwortlich. Mittels 35 Geräusch-Vorlagen wird die Simulatorfahrt auch für die Ohren zum beinahe realistischen Erlebnis.

Und auch die Kabine des Industriepartners MAN Nutzfahrzeuge ist stets das neueste Serienmodell. Zurzeit ist ein Fahrerhaus der TGS-Serie auf das Hexapod montiert. Das lässt sich sogar, falls gewünscht, aufgrund vorausschauender Konstruktion ohne großen Aufwand gegen ein Pkw-Mockup – also eine Originalkabine mit simulierter Technik – umtauschen. Dies würde allerdings zugleich eine Anpassung der Simulationssoftware bedeuten.



In der Vertikalen hat der Testfahrer einen Sichtwinkel von 45 Grad – oben und unten begrenzt durch die Kabine (oben).

Der Simulator von oben: Fünf Rücklichtprojektoren erzeugen ein Bild rund um den Testfahrer – auf insgesamt 210 Grad (unten)

Trucker verhalten sich am Steuer unterschiedlich.“ Die Studenten der TUM hatten meist wenig Erfahrung mit Fahrzeugen dieser Größe – der Praxisbezug fehlte. Die Forschergruppe lässt also für die Untersuchungen nur Berufskraftfahrer ans Steuer der virtuellen Umgebung, um möglichst exakte und realistische Ergebnisse zu erzielen.

Doch selbst dann birgt die Simulation Hindernisse. Zum einen muss die Testperson vom Ambiente des Simulators überzeugt sein. „Uns ist wichtig, dass sich der Fahrer wie in einem realen Serienfahrzeug fühlt“, sagt Mohra. Deswegen steckt auch in der Grafik-Erzeugung eine Menge Liebe zum Detail – auf den ersten Blick wirken Straße, Wald und Häuserzeile täuschend echt. Denn: „Denkt der Fahrer ständig daran, dass er in einer Simulation sitzt, verhält er sich nicht natürlich – und das verfälscht die Ergebnisse.“

Achterbahn statt Simulation

Und dann gibt es noch die Testfahrer, bei denen Symptome einer Simulatorkrankheit auftreten. Die Wahrnehmung dieser Menschen, im Falle des FTM-Simulators

allerdings nicht mehr als zehn Prozent der Testpersonen, kann vom Simulator nicht überlistet werden. Sie nehmen beispielsweise das Kippen nicht als Beschleunigung wahr, und durch diese Verfälschungseffekte wird ihnen flau im Magen. Mohra erklärt trocken: „Das ist wie auf der Wies'n: Der eine verträgt's, der andere nicht.“ Dennoch: Der FTM-Simulator ist bis zum Anschlag optimiert, jede Bewegung der Fahrerkabine jahrelang austariert, um simulatorkrankte Testfahrer weitestmöglich zu vermeiden. Das zahlt sich heute aus. Das Gerät der TUM zählt unter den deutschen Simulator-Konkurrenten deutlich unterdurchschnittliche Ausfälle unter den Testfahrern.

Spaß macht das Fahren durch die virtuellen Weiten trotzdem. Auch, weil an den Einstellungen der Simulation ständig verbessert und geschraubt wird. Ein Beispiel: Als die Lkw-Fahrer monierten, dass das Lenkgefühl nicht dem eines echten Trucks entsprach, weil die Reibungs- und Dämpfungseffekte fehlten, nahm sich eine Studentengruppe des Problems an. Wenig später war eine hydraulische Dämpfung entwickelt – und die Testpersonen fühlten sich noch ein Stück heimischer im FTM-Truck.

Das Programm, das die fünf Projektoren und drei Bildschirme mit Grafik versorgt und auf einem ganzen Netzwerk von Rechnern läuft, wurde von Krauss-Maffei Wegmann entwickelt und umfasst zur Zeit rund 130 Kilometer befahrbare Strecken. „Wir haben eine Großstadt im Norden, eine Bergstrecke, sogar einen Verkehrsübungsplatz“, sagt Mohra. Doch die Forscher wollen mehr, vor allem mehr „Stressoren“. Deswegen bauen sie das Programm um. Holger Mohras Augen blitzen kurz, als er von Fußgängern und Tieren berichtet, die in Zukunft Probanden irritieren sollen. „Wir können selbst die Laufwege der Figuren über die Bildschirme von außen bestimmen. Und die Stadt wirkt endlich bevölkert“, freut sich der junge Forscher.

Gesucht: Der Platz für die Thermoskanne

Doch nicht immer geht es um so große Dinge wie eine noch bessere virtuelle Darstellung. Da reicht Alltägliches, um die Forscher auf neue Ideen zu bringen. Dinge, auf die sie alleine nicht gekommen wären. Wie etwa die Platzierung eines Getränkeflaschenhalters. „Die Firmen bringen neue Modelle auf den Markt, die Spediteure kaufen die Fahrzeuge. Und die Fahrer müssen dann im beruflichen Alltag damit umgehen“, fasst Mohra zusammen. Die Versuchspersonen „von der Straße“, rund 400 an der Zahl, bringen nun ihre Vorschläge schon bei der Entwicklung mit ein. So wird der Fahrsimulator zum Ort für Lkw-Basisdemokratie. „Die Fahrer leben teilweise mehrere Tage in ihren Fahrerhäusern“, sagt Holger Mohra. „Wir gehören zu den ersten, die schon bei der Entwicklung daran denken.“

Jonathan Fasel

Auf der Suche nach der unendlichen Energiequelle

Faszination Forschung präsentiert im Gespräch Wissenschaftler der TUM: Menschen mit ihren Zielen, ihren Prinzipien – und fragt, was sie antreibt. Lesen Sie die Antwort auf unsere sieben Fragen zu Wissenschaft und Person. Zur Premiere: Der Chemiker Prof. Fritz Kühn, Professor für Molekulare Katalyse

Herr Professor Kühn, warum sind Sie Chemiker geworden?

Als Kind hat mich die Natur fasziniert, vor allem Tiere. Erst waren das lebende Tiere, später ausgestorbene Tiere, wie die Saurier, deren Modelle heute auf meinem Schreibtisch stehen. Im Laufe meiner Schulzeit hat sich mein Interesse auf die Chemie verlagert. Die Biologie ist eine beobachtende Wissenschaft, während die Chemie es ermöglicht, Neues zu schaffen. Andererseits ist die Chemie mit ihren Systemen einfacher als die Biologie. In der klassischen Chemie sind die Moleküle klein. Hier kann man Veränderungen schrittweise so gestalten, dass sich die Wirkungen gezielt in eine Richtung entwickeln. Man spielt als Forscher sozusagen wie mit einem Baukasten und kann einen Fortschritt in der Regel auf eine ganz bestimmte Ursache zurückführen.

Was fasziniert Sie am meisten an Ihrem Forschungsfeld, der Molekularen Katalyse?

Die Molekulare Katalyse ist ein Grenzfeld zwischen organischer Chemie, anorganischer Chemie und technischer Chemie. Meine Motivation ist, etwas zu machen, das auch brauchbar ist. Mich fasziniert dabei, grundlegende Forschung zu betreiben und zugleich die Probleme der Anwendung im Blick zu haben.

Über viele Jahrzehnte war man sich in der Chemie nicht ausreichend der Umweltprobleme von bestimmten chemischen Verbindungen bewusst. Hier hat ein gründliches Umdenken stattgefunden.

Heute sucht die Chemie nach Reaktionen und Prozessen, die die Umwelt nicht negativ beeinflussen. Dabei ist die Katalyse ein Schlüsselwerkzeug. Sie verhindert, dass zu viel Energie verbraucht wird, dass zu auf- ▶

Prof. Dr. Fritz Kühn

Er ist ein echtes „Gewächs“ der Technischen Universität München: Geboren 1965 in der Hallertau, dann Studium, Diplom und Promotion an der TUM, zwischendurch als Wissenschaftler in den USA und Portugal, seit 2006 als Professor für Molekulare Katalyse wieder an der Technischen Universität München. Er vertritt den TUM-Präsidenten auf dem Lehrstuhl für Anorganische Chemie, hat aber längst als Forscher und Lehrer eigene Zeichen gesetzt. Etwa 400 Studenten betreut er jedes Jahr, rund 30 Doktoranden und Postdocs hat er bereits in das zukunftssträchtige Forschungsgebiet Katalyse eingeführt. Er wurde unter anderem mit dem Hans-Fischer-Preis und der Otto Roelen-Medaille ausgezeichnet, ist Autor bzw. Co-Autor von rund 200 Originalpublikationen, Übersichtsartikeln, Buchbeiträgen und Patenten.

wändige Prozesse benötigt werden, um bestimmte Dinge herzustellen. Die Katalyse ermöglicht es also, mit neuen Reaktionswegen die benötigten Produkte energiesparender und umweltschonender herzustellen.

Als Wissenschaftler habe ich hier die Möglichkeit, einfache Systeme in kleinen Schritten zu verändern und so zu gestalten, dass sie in die gewünschte Richtung von Einfachheit und Umweltfreundlichkeit gehen und darüber hinaus sogar im täglichen Leben genutzt werden können. Und ich denke, die Katalyse ist in der Lage, die großen Herausforderungen der Zukunft zu lösen: Zumindest teilweise, zum Beispiel einen Teil des Energieproblems der Menschheit.

Was möchten Sie in Ihrem Forschungsgebiet einmal erreichen? Haben Sie einen wissenschaftlichen Traum?

Besonders interessant wäre es, mit Katalyse Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff aufzuspalten, ohne dabei viel mehr Energie zu verbrauchen, als die Verbrennung von beiden dann wieder freisetzt. Dies würde bedeuten, dass man mit Hilfe von Sonnenenergie Wasser (katalytisch) spalten und es als Brennstoff verwenden kann. Damit könnte das Energieproblem der Menschheit für die absehbare Zukunft auf umweltfreundliche Art gelöst werden.

Ein etwas weniger großartiges, aber nicht minder schwieriges Ziel ist es, Kohlendioxid aufzuspalten in seine Bestandteile Kohlenstoff und Sauerstoff. Damit könnte man Ähnliches machen, also den Kohlenstoff, Erdgas und Erdöl verbrennen. Aber diese Lösung der Energiefrage ist weniger elegant als die Spaltung von Wasser, sondern eher eine Reaktion auf die Probleme, die wir dadurch haben, dass wir überall Kohlenstoff verbrennen. Auch wäre dieser Kreislauf nicht so einfach wie der Kreislauf bei der Aufspaltung von Wasser und Verbrennung des Wasserstoffs.

Nun kann man natürlich auch fragen, was das für Folgen hätte, wenn dies gelänge: Würden dann auf der Erde

25 Milliarden Menschen leben und ganz neue Probleme entstehen? Im 19. und 20. Jahrhundert hat der medizinische Fortschritt dazu geführt, dass die Zahl der Menschen auf 6,5 Milliarden angewachsen ist.

Das ist natürlich ein Risiko. Aber das ist eher eine politische und nicht eine wissenschaftlich zu lösende Frage. Wir Wissenschaftler versuchen ja nicht, die Politik eines Landes zu bestimmen, sondern brauchbare Lösungen zu finden für Probleme, die existieren.

Warum sind Sie Wissenschaftler geworden und nicht Politiker oder Rechtsanwalt?

In diesen Bereichen geht es mir zu wenig um grundlegende Fragen, sondern oft um Kasuistik. Es geht letztlich teilweise nicht mehr darum, was wirklich rechtens, gerecht oder richtig ist, was gut oder was schlecht ist. Politische und juristische Fragestellungen sind zudem oft schwer zu beantworten. Ich fühle mich nicht kompetent genug, so schwierige Fragen gerecht zu lösen. Ich bleibe lieber bei den einfachen Dingen, etwa bei der Naturwissenschaft, wo ich aus präzisen Messungen etwas folgern kann. Natürlich muss man sich auch als Naturwissenschaftler immer der Probleme bewusst sein, die man schafft. Aber das ist überschaubarer als historisch gewachsene Dinge, wie Rechtssysteme. In der Politik wird das sogar noch schwieriger, denn da geht es ja nicht nur darum, den Bürgern Gutes zu tun, sondern auch um Machterhalt, von Personen und Parteien. Und diese beiden Ziele geraten allzuleicht in Konflikt.

Sind Sie zufrieden mit dem, was Wissenschaft heute ist und wie mit der Wissenschaft in unserer Gesellschaft umgegangen wird?

Aus meiner Sicht wäre es wünschenswert, dass die Wissenschaft in den Augen der Gesellschaft einen höheren Stellenwert bekommt, als sie ihn hat. Mir scheint, unsere Gesellschaft tendiert heute zu sehr in Richtung Huxleys „Brave New World“, zu sehr in Richtung Brot und Zirkusspiele. Viele Fragen stellt man sich



erst gar nicht, die Leute werden eher eingelullt. Und das, obwohl die Bildung und die Möglichkeiten, an Informationen zu kommen, wesentlich besser sind als noch vor fünfzig Jahren. Die Verantwortung und das Verständnis der Bürger scheinen mir nicht im gleichen Maße mitgewachsen zu sein.

Ich mache mir oft Gedanken, was man besser machen könnte, um ein besseres Umfeld für Wissenschaft in unserer Gesellschaft zu gestalten. Ich glaube, in Deutschland und Europa haben wir das Problem, dass nicht genug finanzielle Ressourcen für Wissenschaft zur Verfügung gestellt werden. In den letzten 40 Jahren haben viele große Firmen ihre Forschungs- und Entwicklungsabteilungen verkleinert.

Im Moment hat Europa Glück, dass die USA seit dem 11. September nicht mehr so offen sind für Wissenschaftler aus aller Welt. Das kann sich aber ganz schnell wieder ändern, wenn die USA 2009 einen neuen Präsidenten bekommen. Andererseits schaffen die Golfstaaten und viele Länder im Fernen Osten neue, großartige Forschungsmöglichkeiten.

Welches erreichbare Problem würden Sie selbst gern lösen?

Die großen Probleme reduzieren sich automatisch auf kleinere Teilprobleme, wenn man versucht, sie zu lösen. Die Frage ist immer: Was kann ich tun, um mein Ziel zu erreichen? Dann muss ich aber gleich auch fragen: Was weiß ich denn bereits? Und daran schließt sich an: Was muss ich tun, um dem großen Ziel näher zu kommen? Das Ergebnis sind dann in der Regel kleine beantwortbare Fragen. Für mein Fachgebiet heißt das, dass ich zu sehr konkreten chemischen Reaktionen komme, die ich mir anschauen muss, um zu sehen, ob dieser oder jener Weg zu einem großen Ziel überhaupt realistisch ist. Eines der Themen, an denen wir arbeiten, sind Epoxide, ein wichtiges Zwischenprodukt in der Chemischen Industrie. Bei der Produktion von Epoxiden entstanden früher viele Nebenprodukte, die man lagern musste.

Inzwischen werden Katalysatoren eingesetzt, aber die Prozesse sind noch zu energieaufwändig.

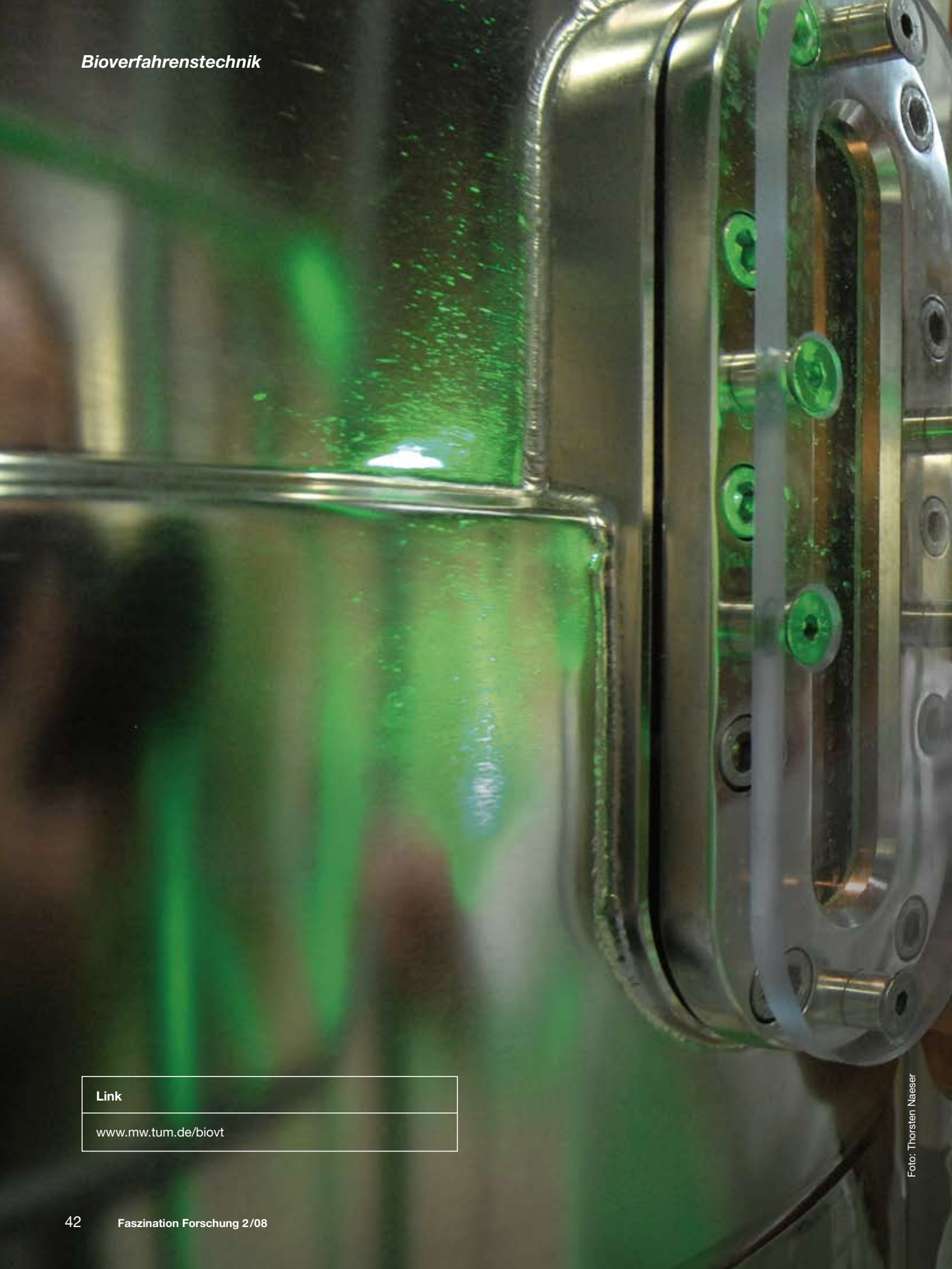
Am schönsten wäre es, wenn wir Epoxide mit Luftsauerstoff bei Raumtemperatur und Normaldruck produzieren könnten. Das geht heute noch nicht. Wenn man aber im Detail betrachtet, was wir heute können und was der Unterschied ist, zu dem was wir wollen, dann stoßen wir sicher auf eine Frage, die wir konkret angehen können. Und wenn wir die beantwortet haben, sind wir unserem Ziel einen Schritt näher gekommen. So gibt es beispielsweise Katalysatoren, die mit Sauerstoff arbeiten, aber bei höheren Temperaturen. Wir müssen nun herausbekommen, was bei niedrigeren Temperaturen passiert. So bauen wir nach und nach wie bei einem Puzzlespiel die Lösung zusammen.

Sie beschäftigen sich mit komplexen Forschungsthemen und argumentieren dennoch verständlich. Welche Rolle spielt für Sie der gesunde Menschenverstand?

Ich hoffe zuversichtlich, dass es einen gesunden Menschenverstand gibt. Tatsächlich habe ich den Eindruck, dass wir viele Probleme nicht nur mit Wissen, sondern auch durch intensives Nachdenken lösen können. Mir scheint, dass viele Menschen einfach verlernt haben, selbst nachzudenken, durch eigene Überlegungen Problemstellungen logisch zu analysieren und zu einer Lösung zu führen.

Vielleicht sind wir manchmal auch nur zu bequem dazu. Wenn das der gesunde Menschenverstand ist, dann kann er uns sehr weit bringen und wird wohl nur – in unserer von Informationen überfluteten Zeit – zu selten eingesetzt. Wenn man Fragen beantworten oder Probleme lösen will, dann darf man nicht nur nach vorgefertigten Antworten suchen, man kann sich vieles durch Nachdenken erschließen. Aber nicht alles. Eine gute Portion Wissen gehört natürlich auch dazu.

Reiner Korbmann



Link

www.mw.tum.de/biovt



Die Revolution aus dem Bioreaktor

Die Weiße Biotechnologie verändert die chemische Industrie. Mikroorganismen werkeln für Waschmittel und Geschmacksverstärker. TUM-Forscher arbeiten an der Zukunft. Ihr Ziel: Chemikalien billiger und umweltschonender herzustellen



Kathrin Hölsch sucht in Mikroalgen nach neuen Enzymen zur Herstellung von Feinchemikalien. Sie ist Doktorandin bei Prof. Weuster-Botz und züchtet hierzu diese speziellen Mikroorganismen in großen Photobioreaktoren, die künstlich mit Licht versorgt werden



Bestimmte ionische Flüssigkeiten sind ideal für die Herstellung von Feinchemikalien einsetzbar. Nach der biokatalytischen Umsetzung muss lediglich die gebildete Feinchemikalie aus dieser Flüssigkeit abgetrennt werden. Stefan Bräutigam destilliert hierzu das wertvolle Produkt ab

Fotos: Thorsten Naeser



Minireaktoren für die Biokatalyse: Die ionischen Flüssigkeiten enthalten schon das Substrat für die biokatalytische Umsetzung in hoher Konzentration. Doktorand Stefan Bräutigam gibt die Zellsuspension mit den Ganzzellbiokatalysatoren mit einer Pipette zu



Die ionischen Flüssigkeiten wurden so ausgewählt, dass sie nicht mit Wasser mischbar sind, so dass nach der Zugabe der Zellsuspension zwei Phasen vorliegen. Nach der Biokatalyse trennen sich beide Flüssigkeiten wieder

Der Eberhard-von-Kuenheim-Bau ist ein weißes, lichtdurchflutetes Gebäude auf dem Campus des Garchingener Forschungszentrums der TUM. Rund eintausend Studenten beginnen hier jedes Jahr an der Fakultät für Maschinenwesen ihr Studium. Bayerns einzige Fakultät dieser Art ist berühmt für ihre herausragende Forschung und Lehre.

Hier ist auch der Ort, an dem die zukunftssträchtige Biotechnologie weiterentwickelt wird. In einem Seitenflügel, über Hörsäle und Laboren, hat im 3. Stock Professor Dirk Weuster-Botz sein Büro. Er ist Inhaber des Lehrstuhls für Bioverfahrenstechnik und befasst sich mit allen Aspekten der technischen Nutzung biologischer Stoffumwandlungen – bekannt als Weiße Biotechnologie. Weuster-Botz erklärt: „Die Weiße oder industrielle Biotechnologie bedient sich der Werkzeuge der Natur zur Herstellung von chemischen Produkten. Ihre wichtigsten Methoden sind die Fermentation und die Biokatalyse. Dabei nutzt man den Stoffwechsel von Mikroorganismen oder deren Bestandteilen, zum Beispiel Enzymen, für chemische Reaktionen.“

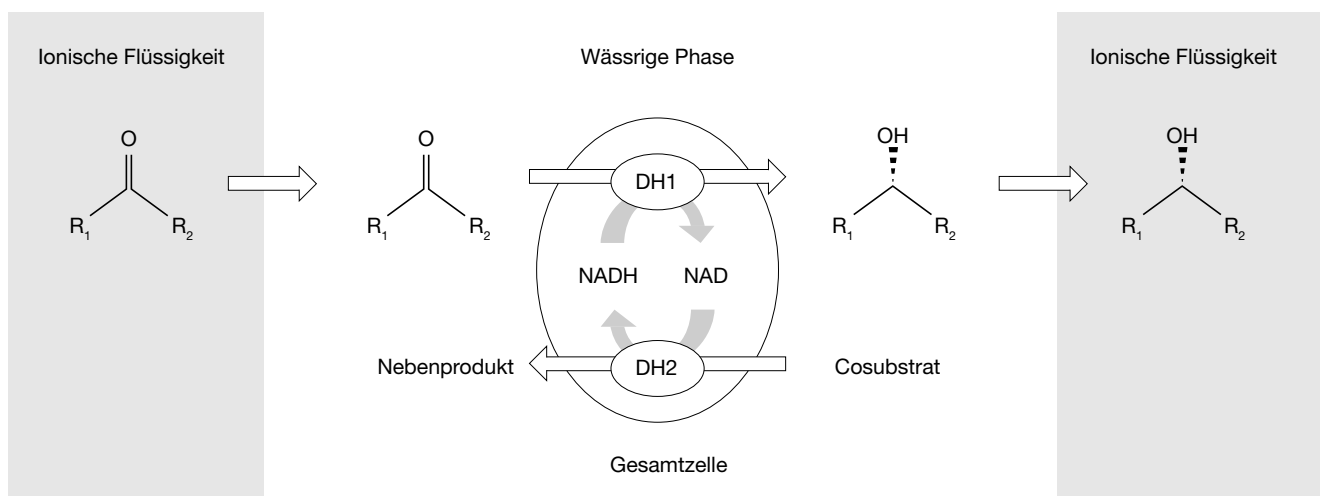
Mit seinen wissenschaftlichen Mitarbeitern treibt Weuster-Botz eine Technik voran, deren Möglichkeiten schier grenzenlos scheinen, bedenkt man die Vielfalt der Synthesemöglichkeiten in der Natur. Nur eine Zahl zum Vergleich: Vermutlich existieren in dem uns Menschen zugänglichen Kosmos mehr als zwei Milliarden verschiedene Spezies von Mikroorganismen. Davon sind bisher erst weniger als ein Prozent bekannt. Auch von den geschätzten 10 000 natürlich vorkommenden Enzymen

kennen die Wissenschaftler bisher nur einen Bruchteil. Doch Enzyme beeinflussen und steuern fast alle chemischen Reaktionen in lebenden Zellen, auch sämtliche Stoffwechselforgänge und den Aufbau aller Zellbestandteile. Sie wirken dabei als so genannte Biokatalysatoren. Das heißt, sie helfen bei der chemischen Umwandlung von Ausgangsstoffen in andere Produkte, ohne sich dabei selbst zu verändern. „Das Gute ist“, sagt Weuster-Botz, „neue Enzyme müssen nicht erst erfunden werden. Denn die natürlichen Mikroorganismen produzieren Millionen von Enzymvarianten, die es zu entdecken und deren Eigenschaften es zu nutzen gilt.“

Natürlich besser – was Weiße Biotechnologie kann

In der Pharma- und Lebensmittelindustrie wird die Weiße Biotechnologie an einigen Stellen bereits erfolgreich eingesetzt, so etwa bei der Herstellung von wichtigen Antibiotika wie Penicillin oder Geschmacksverstärkern. Auch in der chemischen Industrie wird sie zunehmend angewandt, da sie mehrere sonst übliche chemische Verfahrensschritte durch einen mit Enzymen und Fermentation ersetzen kann. Ihre ökologischen, ökonomischen und funktionellen Vorteile liegen auf der Hand: Bei Biokatalysen entstehen weniger Abfall- und Nebenprodukte. Die Produktion ist unter milderen Bedingungen möglich – bei Raumtemperatur, ohne den Einsatz aggressiver Lösungsmittel. Das senkt im Vergleich zu konventionellen chemischen Verfahren den Energie- und Rohstoffbedarf erheblich. Außerdem sind die Stoffumwandlungen sehr erfolgreich und bringen

Schema einer mehrphasigen Biokatalyse mit Ganzzellbiokatalysatoren für asymmetrische Synthesen





Bioreaktoren sind wie Intensivstationen in der Klinik – die Arbeitsbedingungen für die Zellen müssen optimal kontrolliert werden. Dirk Weuster-Botz bespricht mit Doktorand Hannes Link einen neuen Versuchsaufbau

eine höhere Wertschöpfung. Weltweit werden derzeit zum Beispiel schon über eine Million Tonnen Zitronensäure für Wasch- und Lebensmittel jährlich mit Mikroorganismen hergestellt. Der Anteil biotechnologischer

Chirale Verbindungen – was sie sind und was sie können

Viele chemische Substanzen für Medikamente oder Pflanzenschutzmittel kommen in zwei Formen vor, die einander spiegelbildlich gleichen. Das Problem dabei: Bild und Spiegelbild, die so genannten „Enantiomere“, können völlig unterschiedliche Wirkungen haben. So wird die eine Form der Aminosäure Asparagin als Süßkraftverstärker eingesetzt, während die andere bitter schmeckt. Und auch im tragischen alle des als Schlafmittels verkauften Contergan handelte es sich um eine spiegelbildliche Fehlwirkung. Unter chiralen Verbindungen versteht man im einfachsten Fall eine der beiden spiegelbildlichen Formen eines Moleküls. Chiralika sind wichtige Ausgangsstoffe für Medikamente, Agrochemikalien, Flüssigkristalle und Feinchemikalien. Besonders bei der Gewinnung von Bausteinen für Medikamente ist eine hohe Enantiomerenreinheit wichtig. Industriell lassen sich chirale Verbindungen mit physikalischen, chemischen und biokatalytischen Methoden herstellen. Beim Vergleich erweisen sich Biokatalysatoren jedoch mittlerweile vielfach als überlegen.

Verfahren am Umsatz der chemischen Industrie liegt zurzeit bei etwa fünf Prozent. In wenigen Jahren soll er auf 15 bis 20 Prozent steigen. Bei dieser Entwicklung spielen vor allem Feinchemikalien eine wichtige Rolle. Das sind Substanzen mit einem hohen Funktionalisierungsgrad, von denen jeweils weltweit weniger als 10 000 Tonnen pro Jahr benötigt werden.

Ein Beispiel für solche Spezialitäten sind die so genannten enantiomerenreinen Chemikalien, mit denen sich eines der Projekte von Weuster-Botz befasst. Worum handelt es sich dabei? In chemischen Reaktionen werden häufig so genannte Enantiomere gebildet. Das sind Moleküle mit gleicher chemischer Struktur, die sich aber wie Bild und Spiegelbild in ihrer räumlichen Anordnung voneinander unterscheiden. Die Forscher sprechen in diesem Zusammenhang auch von „chiralen Verbindungen“. Das Problem: In ihrer biologischen Aktivität weichen diese spiegelbildlichen Moleküle manchmal stark voneinander ab. Das musste die Menschheit Anfang der 1960er-Jahre im Contergan-Skandal schmerzlich erfahren, als die unerwartete Wirkung eines Schlafmittels für Schwangere zu Missbildungen ihrer Kinder führte. Heute ist daher die Enantiomerenreinheit ein ▶



Im Biotechnikum erfolgt die Maßstabsvergrößerung, um zu zeigen, dass die neu entwickelten Verfahren auch technisch durchführbar sind. Dirk Weuster-Botz kontrolliert zusammen mit seinem Assistenten Markus Amann die Messdaten aus dem 200-Liter Bioreaktor

wichtiges Kriterium bei der Herstellung von Pharmazeutika. Das Team von Weuster-Botz hat nun in bestimmten Bakterien und Algenarten Enzyme entdeckt, die in der Lage sind, aus nicht-chiralen Ausgangsstoffen nur eine enantiomere Form von bisher nicht in reiner Form zugänglichen Molekülen zu bilden. Weuster-Botz: „Wir isolieren diese Enzyme aus den Mikroalgen, identifizieren ihre Gensequenz und bringen sie in ganze Zellen, zum Beispiel das Bakterium *Escherichia coli*.“ Der Effekt: Die Bakterienzellen arbeiten dann wie kleine Reaktoren und brüten die gewünschten Stoffe aus – als Bioreaktoren im Nanolitermaßstab.

Des Rätsels Lösung: Ionische Flüssigkeiten

Damit solche Biokatalysatoren, die mit ganzen Zellen arbeiten, im technischen Prozess leistungsfähig eingesetzt werden können, sollten sie möglichst lange verwendbar sein. Die Schwierigkeit dabei ist, die Zelle intakt und damit produktionsfähig zu halten. Das funktionierte bisher nur unbefriedigend, da viele organische Lösungsmittel Zellmembranen zerstören. Doch das Team um Weuster-Botz fand eine neue Lösung: „Wir haben einen neuartigen technischen Ansatz entwickelt,

Glossar: Die wichtigsten Begriffe, die Sie brauchen, um die

Biokatalyse: Die Biokatalyse verwendet Enzyme zur Beschleunigung von chemischen Reaktionen. Diese laufen häufig bei milden Bedingungen, das bedeutet in Wasser und bei Temperaturen zwischen 20 und 40 Grad Celsius. Als Biokatalysatoren werden sowohl isolierte Enzyme als auch ganze Zellen verwendet.

Biotechnologie: Biotechnologie ist die gezielte Nutzbarmachung von Organismen, Zellen oder isolierten Zellbestandteilen, um damit Produkte herzustellen oder Dienstleistungen anzubieten.

Chiralität: Mit Chiralität bezeichnet man die Eigenschaft eines Objektes, sich von seinem Spiegelbild zu unterscheiden. Chirale Moleküle haben zwar eine identische Zusammensetzung, unterscheiden sich jedoch in der räumlichen Anordnung, so dass sie nicht zur Deckung gebracht werden können - wie linke und rechte Hand.

Chromosom: Chromosomen sind die Träger der Erbinformationen beliebiger Zellen. Sie bestehen aus DNA und diese umlagernden Proteinen.

Cofaktor: Als Cofaktor bezeichnet man eine niedermolekulare Substanz, die zum Ablauf einer biochemischen Reaktion notwendig ist. Cofaktoren dienen in der Regel zur Übertragung von Elektronen oder Molekülgruppen.

Cosubstrat: Cosubstrate nehmen wie ein weiteres Substrat an der enzymatischen Reaktion teil.

der auf ionischen Flüssigkeiten basiert“, sagt der Forscher. „Das sind bei Raumtemperatur flüssige Salze, deren Eigenschaften durch gezielte Veränderungen in der Struktur variiert werden können. Wir haben entdeckt, dass bestimmte ionische Flüssigkeiten die Bakterienzellen nicht schädigen. Entgegen der bisherigen Lehrmeinung sind sie also biokompatibel.“

Den Garchinger Forschern ist damit eine ungeheure Effizienzsteigerung gelungen: Mithilfe von zwei Bearbeitungsphasen, bestehend aus der ionischen Flüssigkeit, die das Ausgangssubstrat in hoher Konzentration enthält, und einer Wasserphase mit den Biokatalysatoren, können nun die Forscher in einfachen Rührkesselreaktoren Synthesen durchführen. Nach der Reaktion enthält die ionische Flüssigkeit das gesamte gewünschte Produkt in hoher Konzentration. Weuster-Botz ist stolz auf diesen Erfolg: „Wir konnten zeigen, dass sich mit ionischen Flüssigkeiten die Ausbeuten teilweise um mehr als eine Zehnerpotenz steigern lassen.“

Der Blick über den Tellerrand bringt den Erfolg

Solche Forschungsfortschritte erfordern neben klugen Köpfen auch beste Voraussetzungen im Universitäts-

Vorgänge in der Weißen Biotechnologie zu verstehen

Desoxyribonukleinsäure (DNS/DNA): Die DNA dient als genetischer Informationsspeicher. Sie ist ein doppelsträngiges Makromolekül, das aus Zucker- und Phosphorsäureestern und damit verknüpften (Nuclein-) Basen besteht. Die DNA befindet sich im Zellkern von Zellen.

Enzym: Enzyme sind Proteine, die biologische Vorgänge als Katalysatoren ermöglichen oder beschleunigen, ohne dabei selbst verändert zu werden. Der Name vieler Enzyme endet auf „-ase“ wie z. B. Phytase.

Eukaryoten: Als Eukaryoten werden alle Lebewesen bezeichnet, deren Zellen einen Zellkern und Organellen besitzen.

Extraktionsmittel: Als Extraktionsmittel wird in der Chemie eine Substanz bezeichnet, mit der aus einem Gemisch eine Komponente herausgelöst wird. Das Verfahren selbst nennt man Extraktion.

Feinchemikalien: Feinchemikalien oder Spezialchemikalien weisen einen hohen Funktionalisierungsgrad auf. Weltweit werden davon jährlich weniger als 10 000 Tonnen hergestellt.

Fermentation: In der Biotechnologie bezeichnet Fermentation alle biologischen Stoffumwandlungen, bei denen Mikroorganismen oder Zellen in Bioreaktoren zur Wertstoffproduktion eingesetzt werden.

Bioreaktor: Behälter oder Apparate zur Durchführung von biochemischen Reaktionen mit Mikroorganismen, Zellen oder Enzymen. In der Regel sind Bioreaktoren geschlossene Gefäße aus Edel-

stahl, in denen möglichst optimale Bedingungen beispielsweise zur Kultivierung von Mikroorganismen in einer Nährlösung eingestellt werden.

Gen: Ein bestimmter Abschnitt auf der DNA, der Zellen die Informationen für die Herstellung eines Proteins liefert.

Gensequenz: In der Genetik ist die Sequenz der genomischen DNA, kurz DNA-Sequenz oder Nukleotid-Sequenz, die Abfolge der DNA-Bausteine (Nukleotide), wie sie aus der DNA-Sequenzierung entziffert werden kann.

Gentechnik: Die Gentechnik ist eine Disziplin der Biotechnologie. Mit molekularbiologischen, chemischen und physikalischen Methoden können Gene identifiziert, untersucht und im Labor neu kombiniert werden.

Katalysator: Ein Katalysator ist ein Stoff, der eine (chemische) Reaktion beschleunigt, ohne dabei selbst verbraucht zu werden.

Proteine: Proteine, auch Eiweiße genannt, sind Makromoleküle, die hauptsächlich aus Aminosäuren bestehen. Die Aminosäuren sind dabei durch Peptidbindungen zu Ketten verbunden.

Rekombination: Vorgang, bei dem DNA neu kombiniert wird. Als natürlicher Prozess findet Rekombination bei der Verschmelzung von Ei- und Samenzelle statt. Bei der sogenannten In-vitro-Rekombination (d. h. außerhalb des Körpers) werden mit Hilfe molekulargenetischer Methoden DNA-Abschnitte unterschiedlicher Herkunft miteinander verknüpft.

Umfeld. „Man kann nicht alles selbst machen“, sagt der Wissenschaftler beim Rundgang durch die Arbeitsräume. Zwischen Inkubatoren, komplizierten Analysegeräten und Bioreaktoren unterschiedlichster Form und Größe analysieren Mitarbeiter seines Teams geschäftig Reaktionen, die sich in grünen, gelben und grauen Flüssigkeiten abspielen. „Unsere Forschung ist interdisziplinär“, fährt er fort. „Bei uns arbeiten Biotechnologen und Ingenieure in einem Team zusammen und kooperieren mit nationalen und internationalen Partnern aus der Pharma- und Chemieindustrie, aber auch aus dem Geräte- und Anlagenbau.“

In drei Jahren vom Labor zur Großtechnik

Der Erfolg kommt also nicht von ungefähr. Neben vielen fähigen Kollegen greift das Forscherteam für die Weiße Biotechnologie auch auf eine solide Ausstattung zurück. Der Lehrstuhl für Bioverfahrenstechnik an der TUM verfügt zum Beispiel über ein neu eingerichtetes Biotechnikum und die dazu gehörigen Labore mit kompletter Infrastruktur zur Kultivierung und Analyse von Mikroorganismen und Zellen vom 1 Milliliter- bis 200 Liter-Maßstab. Deshalb sind hier auch Übertragungen des

Maßstabs der Herstellung um mehrere Größenordnungen vom miniaturisierten Labortest bis zum technischen Produktionsprozess möglich.

Allerdings: Vor einem Einsatz der in Garching entwickelten Methode im großen Stil gilt es noch ein paar Probleme zu lösen. Zum Beispiel die Tatsache, dass ionische Flüssigkeiten teuer sind. Deshalb sollten auch sie für die wirtschaftliche Anwendung der Biotransformationen möglichst lange wieder verwendbar sein. „Wir wissen noch nicht, mit welchen Flüssigkeiten das wie oft geht. 10mal, 50mal oder mehr?“, sagt Weuster-Botz. „Aber das erforschen wir gerade!“

Solche Information brauchen die potenziellen Nutzer aus der Industrie, damit sie kalkulieren können. Auch über die Umweltverträglichkeit ionischer Flüssigkeiten. Sie muss geklärt werden, da auch bei einer Restlöslichkeit von weniger als einem Prozent in Wasser immer Bruchteile im Abwasser landen können. Der Forscher ist optimistisch: „Wir sind schon sehr weit. In etwa drei Jahren könnte unser Ansatz mit ganzen Zellen für Biokatalysen kommerziell angewendet werden: Zum Beispiel bei der Herstellung von Medikamenten.“

Karsten Werth

Der Lehrstuhl arbeitet an der Entwicklung eines neuartigen Sonnenschutzsystems. Ziel ist es, eine Glasscheibe zu entwickeln, die variabel auf Sonneneinstrahlung reagiert und so selbständig für gutes Raumklima sorgt

Link

www.climadesign.de

Sonnenschutz mit echtem Durchblick

Sonne draußen, Sicht weg? Das muss nicht sein: Ein Lichtschutz-System, entwickelt an der TUM, lässt die Hitze draußen – und das Licht dennoch herein. Der Kniff dabei: Die neue Technik überlistet das menschliche Auge

Die Wintersonne scheint vom blauen Himmel herunter – zum ersten Mal seit Wochen. Doch die Freude der Mitarbeiter im Büroturm währt nicht lange: Der Sonnenschutz fährt vor dem Fenster herunter. Schade, die Wintersonne hätte gerne noch länger auf den Schreibtisch scheinen sollen. Doch die Temperaturfühler des Gebäudeleitsystems messen zu viel Wärme – und setzen den Sonnenschutz in Gang. Diese – fiktive – Szene wäre anders, wäre das Bürogebäude mit dem Sonnensystem ausgerüstet, das am Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik an der Fakultät für Architektur der TUM entwickelt wurde. Diplom-Ingenieur Philipp Dreher forscht an einem System, in dem der Sonnenschutz schon in der Glasscheibe eingebaut ist. Vorteil gegenüber üblichen Sonnen- und Blendschutzsystemen: Man kann auch bei geschlos-

sener Sonnenschutzfunktion durch die Scheibe sehen und muss eine angenehme Temperatur nicht nur über Klimaanlage regeln.

Hinter dieser sich einfach anmutenden Idee stecken viele Monate der Forschung, die Dreher im Rahmen seiner Dissertation investiert hat. Denn Lösungsansätze für einen im Glas integrierten Sonnenschutz gibt es schon länger – nur ist bisher kaum ein Ansatz marktreif geworden. „Und einige der Firmen, die damals an Forschungen beteiligt waren, haben die Entwicklungen eingestellt“, erzählt der 39-jährige Ingenieur. Dreher zeigt die unterschiedlichen Lösungen für den Sonnenschutz, die in den Räumen des Instituts an der Arcisstraße hoch über den Dächern Münchens angebracht sind: Im Besprechungszimmer etwa ist außen ein Lamellenbehang anmontiert, der vor der Sonne schützt. Im Wind – so ▷

Bimetall	Definition
Ein Bimetall ist eine feste Verbindung zwischen zwei unterschiedlichen Metallen. Die Verbindung zwischen den beiden Metallen wird durch Schweißen, Walzen oder Lötten hergestellt. Da beide Metalle eine unterschiedliche Dichte haben, dehnen sie sich bei Temperaturschwankungen verschieden stark aus. Die Folge: Das Metall krümmt sich und löst damit temperaturabhängige Vorgänge aus – ein so funktionierender Bimetallschalter kann etwa einen Wasserkocher oder ein Bügeleisen regeln.	



Climadesign



Fotos: Philipp Dreher

Fassade ohne Sonnenschutz von außen bei Nacht, von innen am Tag (links); **Fassade mit herkömmlichem Sonnenschutz** von außen bei Nacht, von innen am Tag (Mitte); **Fassade mit Philipp Dreher's Sonnenschutzsystem** von außen bei Nacht, von innen am Tag (rechts)

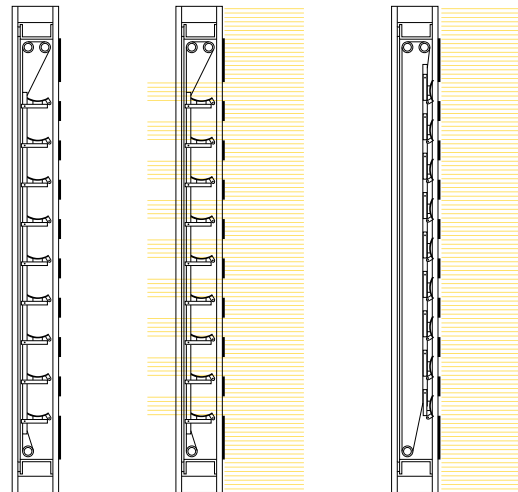
wie er hier im fünften Stock pfeift – können die schon einmal lauter gegen das Fenster schlagen. „Und überlegen Sie mal, was passiert, wenn man die an ein zwanzigstöckiges Hochhaus montiert“, sagt er.

Geht Schutz auch ohne Dunkelheit?

Im Nebenraum wurde eine Scheibe mit einem innenliegenden Folienrollo ausgestattet. Der Raum ist dadurch verdunkelt, man sieht noch durch, dennoch sind die Lichtverhältnisse und damit der Komfort im Raum mit diesem Sonnenschutz nicht optimal.

Im Arbeitsbereich der beiden Sekretärinnen des Lehrstuhls gibt es Scheiben, die sich je nach Licht- und Wärmeeinfluss milchig verfärben. Vorteil: Die Sonne bleibt draußen, die Wärme größtenteils auch, aber durchsehen kann man nicht mehr. „Jede dieser Möglichkeiten bietet Vor-, aber auch viele Nachteile“, erklärt Dreher.

Daher hat Philipp Dreher einen neuen Ansatz verfolgt: Er kombiniert Elemente von außen- und innenliegendem Sonnenschutz und montiert sie in dem Zwischenraum einer Isolierglasscheibe. Einzelne Querstreifen auf der äußeren Scheibe werden metallisch bedampft und damit dunkel eingefärbt. Die Scheibe sieht dann aus wie ein Zebrastrifen: helle und dunkle waagerechte Streifen wechseln sich ab. Das menschliche Auge löst diese Streifenstruktur auf. Automatisch blickt es durch die hellen Bereiche. ▶



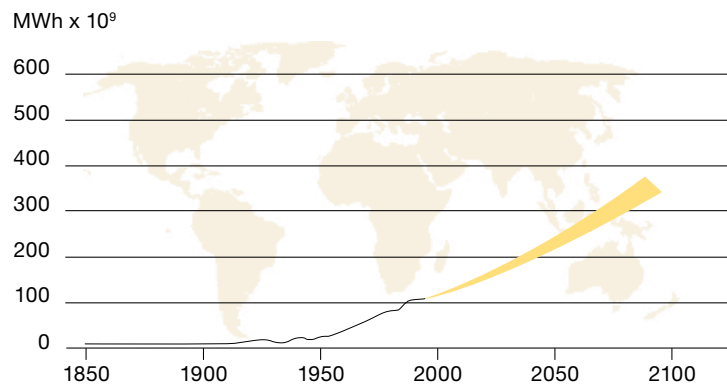
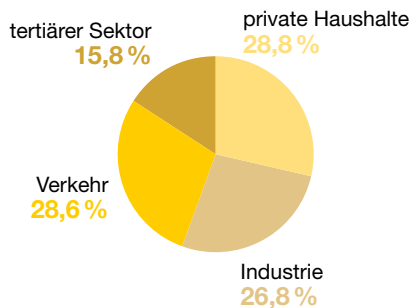
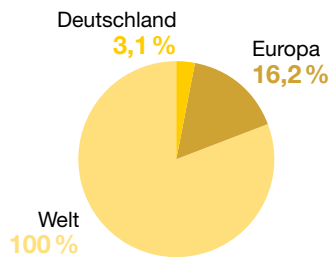
Philipp Dreher geht in seiner Neuentwicklung einen Weg, bei dem durch den Einsatz von bewährter Lamellentechnik in Kombination mit Bimetallstreifen der Schaltvorgang ähnlich einem Thermoschalter von der Temperaturänderung durch Besonnung ausgelöst wird

Grafik: ecludsepp nach Philipp Dreher



Die metallisch bedampften Streifen sowie die Lamellen sind verspiegelt. In geöffnetem Zustand wirft die verspiegelte Oberfläche bei bewölktem Himmel Tageslicht nach innen, in geschlossenem Zustand wird die Sonne reflektiert, dennoch bleibt der Sichtbezug erhalten

Energieverbrauch in Zahlen



1 Primärenergieverbrauch Welt/Europa/Deutschland

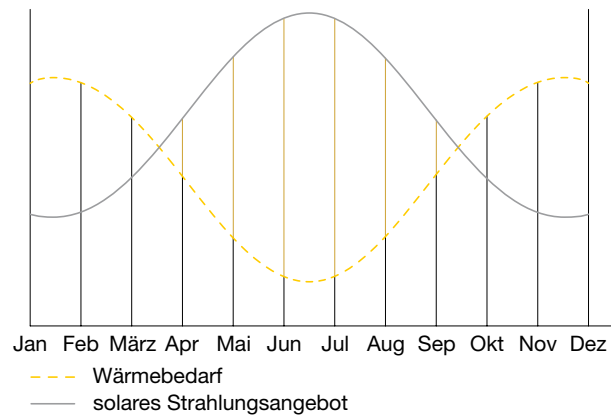
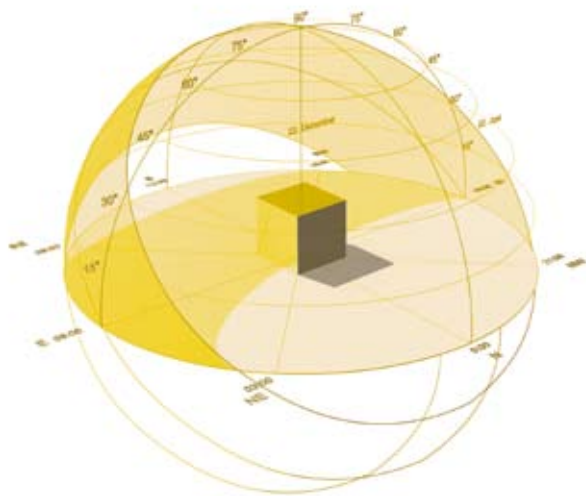
1,15% der Weltbevölkerung verbrauchen 3,1% der Primärenergie.

2 Endenergieverbrauch Deutschland nach Konsumentengruppen

Der größte Endenergiekonsument sind die Privaten Haushalte. Im Verkehrsanteil sind alle privaten und gewerblichen Transportformen berücksichtigt.

3 Globaler Endenergieverbrauch, geschätzter Endenergieverbrauch

Der globale Endenergieverbrauch wird weiter steigen. Deshalb gilt es, Einsparungspotenziale auszuloten, Effizienzsteigerungen zu erwirken und Alternative Energieformen zu erschließen.



Sonnenstandsdiagramm für München, Schattenschwurf am 20. Juni 2007 um 14.30 Uhr. Anhand dieses Diagramms können Sonnenstände, Einfallswinkel und Verschattung beliebiger Objekte simuliert werden (links). **Schemadarstellung zum Verhältnis solarer Strahlungsenergie und dem Wärmebedarf** in Mitteleuropa. Die angelegte Fläche markiert schematisch den Kühlenergiebedarf (rechts)

Diagramm links: edlundsepp mit LANGHUGGERRAMPP
Diagramm rechts: edlundsepp nach Herzog, Thomas; Krippner, Roland; Lang, Werner: Fassaden Atlas, Edition DETAIL, München, 2004, S. 20

Zweites Prinzip von Drehers Ansatz: Lamellen, die als außen liegender Sonnenschutz eingesetzt werden, so zu verkleinern, dass sie in den Isolierraum zwischen den beiden Fensterscheiben passen. Die Lamellen werden im rechten Winkel hinter den metallischen Streifen eingebaut – besser gesagt: versteckt. Sobald eine festgelegte Energiemenge auf die Scheibe trifft, klappen die sonst verborgenen Lamellen in die Sonnenschutzstellung. Dabei werden die durchsichtigen, nicht bedampften Fensterflächen verschlossen.

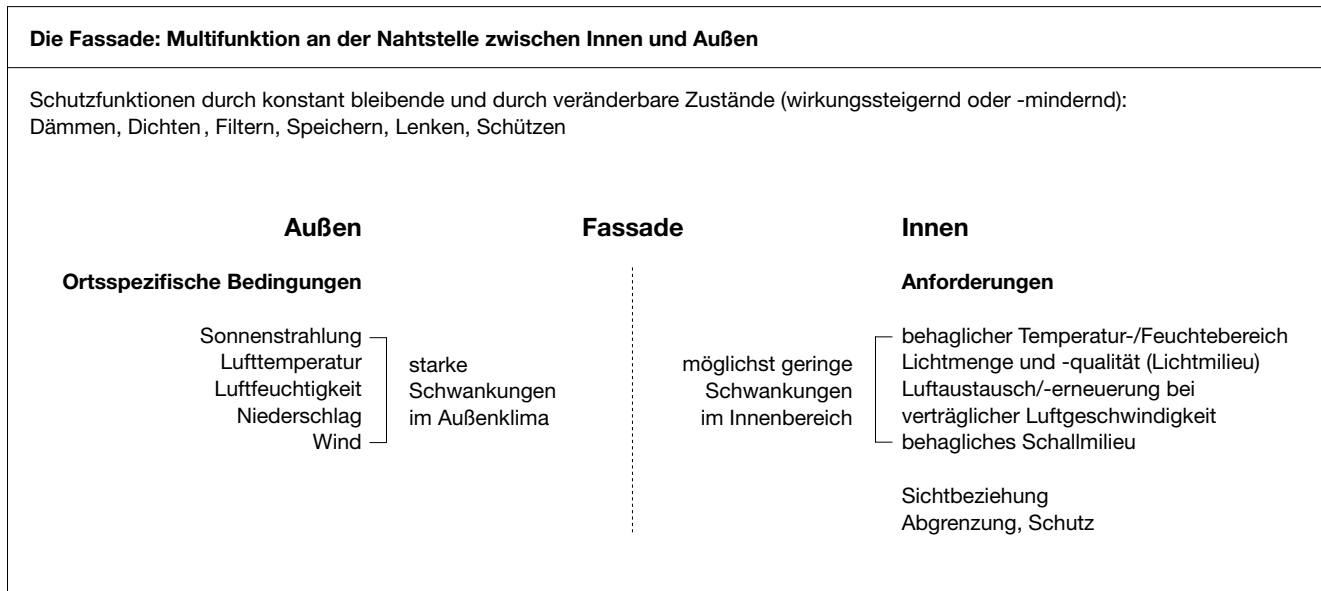
Wieder passt sich das Auge an: Jetzt blickt es durch die aufgedampften Streifen hindurch – wie durch eine verspiegelte Sonnenbrille. Der Trick dabei ist, dass sowohl die Streifen als auch die Lamellen verspiegelt sind. Zusammen reflektieren sie daher die Sonnenstrahlen und halten Energie vom Gebäude fern. Sind die Lamellen bei bedecktem Himmel offen, wirft ihre verspiegelte Oberfläche zudem Tageslicht in den Raum hinein.

Das Signal zum Schließen der Lamellen gibt ein Bimetall. Wird es wärmer, dehnt sich das Bimetall aus und die Lamellen werden geschlossen. Philipp Dreher: „Im Prinzip wie eine Blume, die aufgeht, wenn sie besonnt wird.“

Im geöffneten wie im geschlossenen Zustand sieht das Auge im Moment noch 15 Millimeter breite Streifen. Damit das Auge die Streifenstruktur nicht wahrnimmt, müsste sie etwa zwei Millimeter dünn werden. Technisch sind zur Zeit nur etwa fünf Millimeter möglich.

In verschiedenen Versuchen hat Dreher festgestellt, dass die Scheibe auch bei Dunkelheit gewöhnungsbedürftig sein könnte. Dann spiegeln schon normale Scheiben so stark, dass man sich darin sehen kann. Dieser Spiegelfeffekt wird bei Drehers Scheibe noch erhöht. „Man muss sich bei neuen Systemen auch auf eine neue Ästhetik einlassen“, sagt Dreher.

Das zum Patent angemeldete Funktionsglas von Philipp Dreher ist ein Teil der Fassadentechnik, die am Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik erforscht wird. Eine energieeffiziente Gestaltung der Fassade wird immer wichtiger – speziell im Bereich der Büro- und Verwaltungsgebäude. Fassadentechnik, die Energiekosten senkt, ist für Betreiber und spätere Mieter interessant. In der Planungsphase muss auch der Komfort in den Büroräumen für die späteren Nutzer bedacht werden. „Früher war es so, dass eine Komfort-Verbesserung im-



mer mit einem Mehrverbrauch an Energie einherging“, sagt Dreher. Mit Klimaanlage versuchte man, ineffiziente Sonnensysteme zu kompensieren und den Ansprüchen der Mitarbeiter nachzukommen.

Der Sonnenschutz schützt auch die Klima-Bilanz

Doch Klimaanlage verschlingen viel Energie. Am Institut für Bauklimatik und Haustechnik unter der Leitung von Professor Gerhard Hausladen wird auch an weiteren Möglichkeiten zur Energieeinsparung geforscht. Ein Ansatz ist dabei Dreher's Fenster-scheibe. Da die Bimetalle in jedem Fenster autark handeln und den Sonnenschutz ganz ohne elektronische Steuerung schließen, wird keine aufwendige Gebäudeleittechnik benötigt. Weiterer Vorteil: Wenn der Wunsch nach natürlicher Lüftung besteht, kann Dreher's Fenster weiterhin gekippt werden, ohne dass sich die Lamellen verschieben oder verkleben. Dies ist bei vielen heutigen Systemen nicht möglich. Doch die Umsetzung der Prototypen in einen Produktionsablauf ist die schwierigste Aufgabe bei Dreher's Projekt. Denn für solch eine Scheibe muss man verschiedene Hersteller mit unterschiedlichem Know-how an

einen Tisch bringen. „Die Koordination von Gewerken ist schwierig, aber spannend“, sagt Dreher. Damit das Zusammenspiel klappt, müssen Firmen davon überzeugt werden, selbst in die Innovation zu investieren. Oder wie in Dreher's Fall gleich drei: eine für die Bedampfung der Scheibe, eine für die Lamellen und eine weitere, die das Glas letztendlich zusammenbaut.

Wann die Fensterscheibe an einem Hochhaus Realität wird, ist noch nicht klar. Geplant ist ein Pilotprojekt in München. Dreher hat errechnet, dass sich sein Funktionsglas in der Produktion ab etwa 8 000 Quadratmeter Fläche rechnen würde – das wäre ein Bürohochhaus mit 20 Stockwerken.

Am liebsten wäre ihm ein Einsatz in südlichen Ländern. „Hier gibt es ganz andere Sonnenintensität, da sie näher am Äquator liegen“, sagt Dreher. Projektziel ist also, das Münchner Sonnenschutzsystem eines Tages an einem Hochhaus in Singapur oder Shanghai zu sehen. Für ein Einfamilienhaus eignet sich solch eine Scheibe allerdings nicht. „Denn“, sagt Philipp Dreher, „man will es im Wohnzimmer ja sonnig haben.“

Rebecca Beerheide



Fotos: Original-Bildstapel B. Hense

Aus einer Reihe von Lichtmikroskopaufnahmen einer Alge segmentieren die Wissenschaftler der TUM mit mathematischen Methoden die scharfen Bereiche aus jedem Einzelbild. Danach setzen sie die Bildbestandteile zu einem höherwertigen Gesamtbild zusammen. Das

Mit kleinen Wellen zum scharfen Bild

Die Forschungsgruppe MAMEBIA entwickelt mathematische Methoden zur Analyse biologischer Bilddaten. Die Wissenschaftler haben das Ziel, bessere Informationen aus Aufnahmen im Mikro- und Nanobereich der Lebenswissenschaften zu gewinnen

Das Bild ist unscharf. Das wichtige Detail, ein Tumor, klein, im Frühstadium, verschwindet im großen Ganzen des umliegenden Gewebes. Eine Früherkennung durch den Pathologen ist nahezu ausgeschlossen. Hier hilft keine Brille für den Mediziner, kein Zweitgutachten von einem Kollegen, keine weitere Aufnahme unter dem Lichtmikroskop. Hier hilft nur eines weiter: Mathematik.

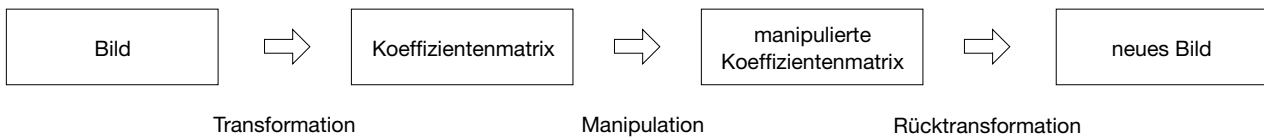
„Seit November 2005 entwickeln wir mathematische Methoden für die biologische Bildanalyse mit Schwer-

punkt auf komplexwertigen Methoden und Phaseninformation“, sagt die Projektinitiatorin und -leiterin Prof. Dr. Brigitte Forster-Heinlein. Wir, das sind sieben Mathematiker aus Frankreich, Iran, Deutschland und den USA. Das Marie-Curie-Excellence-Team MAMEBIA (Mathematical Methods in Biological Image Analysis) hat sie zusammengebracht, ein Gemeinschaftsprojekt des Helmholtz-Zentrums München mit der TUM, das die Europäische Kommission mit 750 000 Euro über drei Jahre finanziert. Im Mittelpunkt der Forschung stehen Wavelets, mathematische Funktionen, mit denen Bilder scharf gemacht, entrauscht und wichtige Bilddetails herausgearbeitet werden können. Das Wort Wavelet ist eine wörtlich-phonetische Übertragung des französischen ondelette ins Englische (onde => wave, lette => let) und bedeutet „kleine Welle“.

Link
www.mamebia.de



vereinfacht und beschleunigt dem Biologen die Analyse der Algen-Segmente, um daraus Rückschlüsse auf die Wasserqualität zu ziehen. Dieser Vorgang der Bildbearbeitung mit mathematischen Mitteln wird auch in der medizinischen Bildanalyse angewandt



Bildtransformation

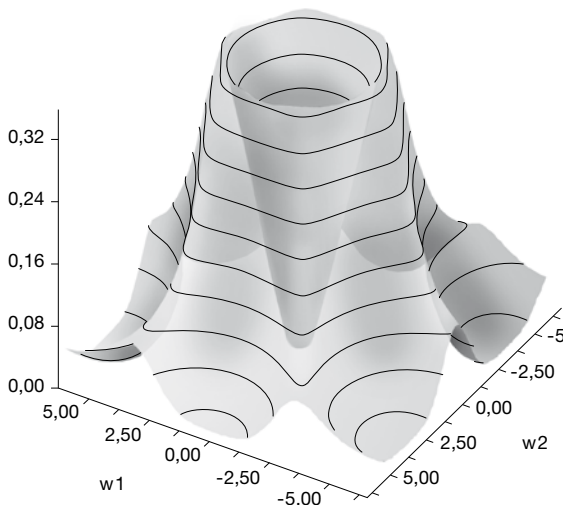
Ein Bild ist eine Summe von Frequenzanteilen, die sich als Funktionen darstellen lassen. Die Mathematiker der Forschungsgruppe MAMEBIA überführen diese Funktionen in eine Koeffizientenmatrix und verändern einzelne Terme, die zum Beispiel für Bildunschärfe verantwortlich sind. Über die Rücktransformation der manipulierten Matrix entsteht ein höherwertiges Bild.

Transformation + Manipulation = Information

Wie gewinnt das MAMEBIA-Team zusätzliche Bildinformationen mittels mathematischer Funktionen? Ähnlich wie die Musik eines Orchesters ist ein Bild eine Summe von Signalen bzw. Frequenzen. Diese Frequenzanteile lassen sich als Funktionen und die zugehörigen Koeffizienten in einer Koeffizientenmatrix darstellen. Das Bild wird so zu einer Matrix von Zahlen. Diese Veränderung der Darstellungsform nennt man Transformation. Die Koeffizientenmatrix lässt sich je nach Zielsetzung manipulieren: Wollen die Wissenschaftler zum Beispiel das Bild entrauschen, identifizieren sie die Terme, die für das Rauschen verantwortlich sind. Danach werden sie entfernt. Über die Rücktransformation entsteht ein Bild mit erhöhter Bildqualität und damit hervorgehobenen Bildinformationen. Analog ist die Vorgehensweise bei Bildun-

schärfe. „Das Bild wird zerlegt und rekonstruiert“, bringt es die promovierte Mathematikerin und MAMEBIA-Mitglied Azita Mayeli auf den Punkt.

Transformation ist jedoch nicht gleich Transformation. Die klassische Methode der mathematischen Bildanalyse, die Fourier-Transformation, basiert auf Sinus- und Cosinus-Funktionen. „Mit dieser Methode lassen sich lokale Eigenschaften eines Signals nicht identifizieren. Eine lokale Frequenzveränderung verursacht eine Veränderung auf der gesamten Zeitachse“, erklärt Forster-Heinlein den Nachteil der Fourier-Transformation. Anders ausgedrückt: Die Fourier-Transformation betrachtet das zu transformierende Signal als Gesamtobjekt. Sie liefert globale Frequenzinformationen. Wavelets hingegen besitzen Lokalität im Frequenzspektrum und im Zeitbereich. „Mit Wavelets kann man ▶



Was sind Wavelets?

„Wavelets sind mathematische Funktionen, die akustische und optische Signale auf die enthaltenen Frequenzbestandteile untersuchen“, erklärt MAMEBIA-Mitglied Dr. Laurent Condat das Geheimnis der kleinen Wellen. Wavelets können an eine bestimmte Stelle des Signals verschoben werden. Übereinstimmungen mit dem Signal lassen sich mittels Strecken und Stauchen der Wavelet-Kurve ermitteln. Dadurch können Detailinformationen des Signals gewonnen werden. So kann z.B. Musik mit Wavelets in einzelne Bestandteile (Frequenzanteile) zerlegt (transformiert) werden. Handelt es sich um eine alte Aufnahme, lassen sich die Bestandteile, die für schlechte Tonqualität verantwortlich sind, identifizieren und entfernen. Fügt man die verbleibenden Bestandteile wieder zusammen, erklingt die Musik in reinen Tönen.

Grafik: edlundsepp nach Prof. Dr. Forster-Heinlein

Mit derartigen Wavelet-Funktionen können Bilder analysiert und Details herausgeholt werden. Dazu wird das Wavelet gestaucht, gestreckt und über das Bild verschoben, um lokale Korrelationen mit dem Bild zu messen

bestimmte Stellen eines Signals analysieren und damit ungeahnte Detailinformationen aus den Bildern herausholen“, sagt Forster-Heinlein.

Auf einen weiteren Vorteil von Wavelets weist Teammitglied Dr. Peter Massopust hin: „Fourier betrachtet nur die Größe der Koeffizienten, nicht aber die Richtung der Funktion. Eine lokale Phasenbetrachtung gibt aber Auskunft über Richtungsentwicklungen und Größe.“ Ein entscheidender Vorteil.

„Es ist da etwas, das da nicht hingehört“

Medizinische Diagnostik und Früherkennung lassen sich durch mathematische Bildanalysen weiter verbessern. Aber wie lässt sich nun ein Tumor im Frühstadium durch mathematische Bildanalyse identifizieren? Peter Massopust: „Das gesuchte Objekt ist klein und im Bild nicht erkennbar. Dennoch ist da etwas, das da nicht hingehört. Der Tumor muss vom Rest des Gewebes differenziert, die Geschwulst eingegrenzt, also segmentiert, und die Ränder identifiziert werden – und die Ränder sind richtungsabhängig.“ Teammitglied Dr. Gunter Semmler ergänzt: „Wir müssen den Krebs vom Hintergrund trennen. Dafür sind Richtungsinformationen wichtig. Richtungen sind aber auch von Bedeutung, um festzustellen, in welchem Stadium Zellen sind und wohin sie sich ausdehnen werden.“

Um den Tumor zu entdecken, konstruieren die Wissenschaftler Wavelets, die das gesuchte Objekt mathematisch abbilden. Danach gleichen sie die Wavelet-Funktion mit den Bilddaten über ein eigens entwickeltes Softwareprogramm ab. Bei Übereinstimmung von Bild-

signalen mit dem Wavelet ist das gesuchte Objekt identifiziert und lokalisiert. Der relevante Bildausschnitt lässt sich nun vergrößern, entzerrt und der Tumor sich sogar farblich hervorheben. „Die Wavelet-Transformation macht das Bild schärfer und verdeutlicht die Grenzen des Tumors. Das Wavelet ist wie ein Zoom, das die wichtigen Bildinformationen hervorhebt“, erläutert Azita Mayeli den Vorgang. Nach der Rücktransformation ist das Objekt für den Pathologen sichtbar – und die Krankheit diagnostizierbar.

Mediziner und Mathematiker in einem Boot

MAMEBIA ist anwendungsorientierte Grundlagenforschung. Eine enge Absprache mit Biologen und Medizinern ist notwendig, damit das Forschungsteam mathematische Methoden der Bildanalyse entwickeln kann, die auch von praktischem Interesse sind.

Nur wenn die Wissenschaftler der Life Sciences präzise definieren, was sie suchen, kann die Bildtransformation Ergebnisse liefern, die besser interpretierbar sind als das Original. Interdisziplinäre Wissenschaft zum Nutzen für die Allgemeinheit heißt die Losung, alle Mann in ein Boot. Die Grundlagen liefert die Mathematik.

„Die Zeiten, in denen Wissenschaftler der Disziplinen abgeschottet für sich arbeiteten, diese Zeiten sind vorbei“, sagt Peter Massopust überzeugt, lächelt und wirft einen Blick auf die Wandtafel mit einer endlos langen Differenzialformel, die sich nur mühselig auf einer Fläche von 2,5 x 2 m bändigen lässt. Die Bedeutung dieser Funktion bleibt dem Nichtmathematiker ein Rätsel – ihr Nutzen liegt auf der Hand.

Odin Hug

Links

www.t35.physik.tu-muenchen.de
www.bernstein-zentren.de

Foto: Guy Haimovitch

Schlangen hören mit dem Kiefer

Biophysiker der TUM und des BCCN lüften das Geheimnis, wie Reptilien ihre Beute orten – mithilfe von Bodenwellen und einem raffinierten Knochen-Trick

Das Vorurteil ist weit verbreitet: Schlangen, so sagt der Volksmund, sind taub. Der Grund der Annahme liegt vor allem darin, dass die Kriechtiere keine von außen sichtbaren Ohren haben und es nur wenig wissenschaftliche Indizien dafür gibt, dass sie hören können.

Dennoch: Schlangen haben ein Innenohr mit einer funktionsfähigen Hörschnecke (Cochlea). Wissenschaftler der Technischen Universität München (TUM) und des Bernstein Zentrums für Computational Neuroscience (BCCN) fanden nun heraus, dass die Tiere dieses Organ ähnlich wie ein Gehör einsetzen können. Sie nehmen damit kleinste Vibrationen der Sandoberfläche wahr, die durch die Bewegung von Beutetieren verursacht werden. Diese Ohren sind so empfindlich, dass sie die Beute nicht nur kommen „hören“, sondern auch unterscheiden können, aus welcher Richtung sie sich nähert. Prof. J. Leo van Hemmen und Paul Friedel, Biophysiker an der TUM und dem BCCN haben zusammen mit ihrem Kollegen Bruce Young von der Washburn University in Topeka (Kansas, USA) diese Erkenntnis gewonnen. Der Ausgangspunkt ihrer Überlegungen: Jede Erschütterung auf einer sandigen Oberfläche verursacht Vibrationswellen, die sich von der Quelle aus auf der Oberfläche ausbreiten – so wie Wellen in einem Teich, nachdem ein Stein hineingeworfen wurde. Die Sandwellen breiten sich allerdings mit einer Geschwindigkeit von etwa 50 Metern pro Sekunde viel schneller aus als Wasserwellen; ihre Amplitude, also ihre Schwingungsweite, beträgt nur wenige tausendstel Millimeter. Dennoch kann eine Schlange diese winzigen Wellen wahrnehmen. Wenn sie ihren Kopf auf den Sand legt, werden die

Gute Gründe für ein Großmaul	Detailinfo
Schlangen können vor allem ihre Unterkiefer außergewöhnlich bewegen. Diese besondere Fähigkeit des Unterkiefers ist in der Evolution entstanden. Denn dadurch konnte die Schlange extrem große Beutetiere verschlingen – was im Kampf der Arten ums Überleben einen evolutionären Vorteil bietet, wenn Futterressourcen knapp sind und die Konkurrenz hart ist. Erst durch diese Trennung der Unterkieferhälften wurde es möglich, auch die besondere Form des Hörens hervorzubringen.	

beiden Hälften des Unterkiefers durch die eintreffende Welle in Schwingung gebracht. Diese Schwingungen werden dann über eine Reihe von Knochen, die mit dem Unterkiefer verbunden sind, ins Innenohr übertragen. Die Schlange hört also im wahrsten Sinne des Wortes die Oberflächenwellen.

Säugetiere und Vögel können Geräusche orten, indem sie die zeitliche Verzögerung messen, mit der eine Schallwelle die beiden Ohren erreicht. Geräusche, die von rechts kommen, erreichen das rechte Ohr einen Bruchteil einer Sekunde früher als das linke. Aus dieser Zeitdifferenz berechnet das Gehirn, aus welcher Richtung ein Signal kommt. Durch Forschungsansätze aus Biomechanik, Schiffsbautechnik und der Modellierung neuronaler Schaltkreise haben Friedel und seine Kollegen gezeigt, dass Schlangen mit ihrem Hörsystem dieses Kunststück ebenfalls beherrschen. Die linke und rechte Hälfte des Unterkiefers einer Schlange sind durch flexible Bänder verknüpft, die es ihr ermöglichen, sich unabhängig voneinander zu bewegen - und so in Stereo zu hören. □

Link

<http://borex.lngs.infn.it/>



Borexino wirkt wie eine Zauberkegel: Eine 8,5 Meter große, durchsichtige Blase aus Nylonfolie, die mit 300 Tonnen einer exotischen Flüssigkeit gefüllt ist und tief unter der Erde in einem Stollen unter den Abruzzen liegt. Hier wollen Forscher Neutrinos einfangen

Foto: Borexino Kollaboration



Überall – und kaum zu fassen

Forscher der TUM machen tief unter der Erde Jagd auf Neutrinos.
Die scheuen Teilchen sollen dabei helfen, die letzten Rätsel der Natur zu lösen



Eine Stahlkugel umgibt und schützt die Nylonblase (großes Bild). Und so sieht die Stahlkugel von innen aus: 2 200 Messgeräte in Glas-
kugeln sind auf ihrer Innenseite montiert (rechts oben). Und so sehen die Anschlussstutzen für die Messgeräte aus (rechts Mitte). Beim
Einbau – hier die Montage der Glasfaserkabel, die zu den Messgeräten führen – sind extreme Sauberkeit und Präzision nötig (rechts unten)

Foto: LNGS-INFN

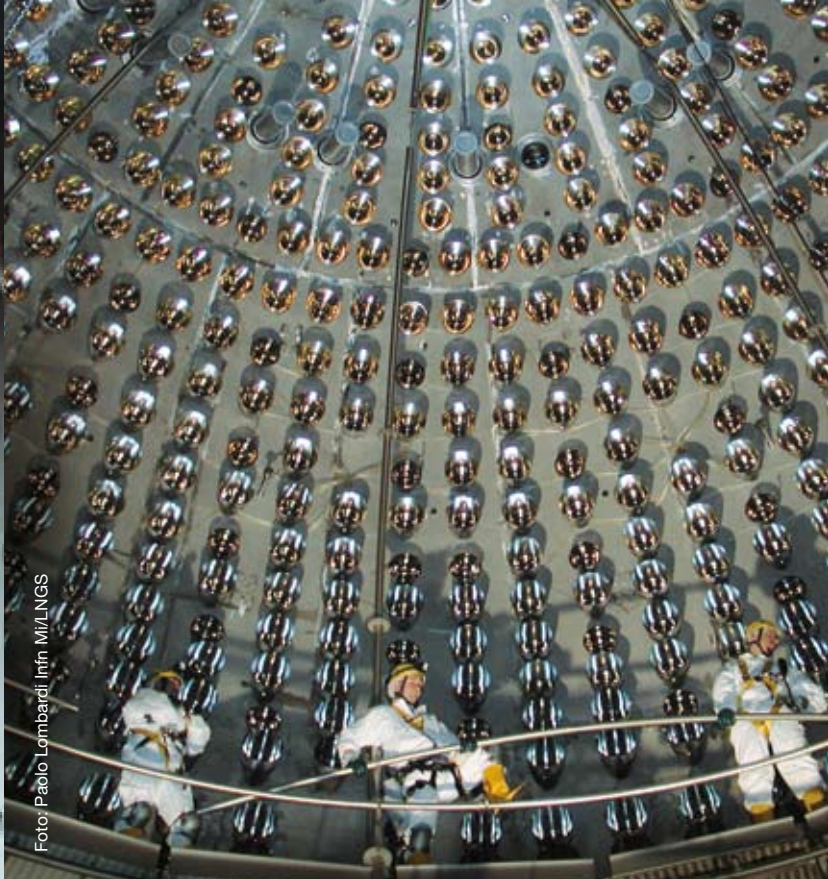


Foto: Paolo Lombardi / Infn Mi/LNGS



Foto: Boexino Kollaboration



Foto: INFN

Neutrino-Physik

Edelstahlkugel, \varnothing : 13,7 m

Radon Konvektionssperre

Nylonball, \varnothing : 8,5 m

2 240 8" Photomultiplier

Detektionsvolumen (100 Tonnen)

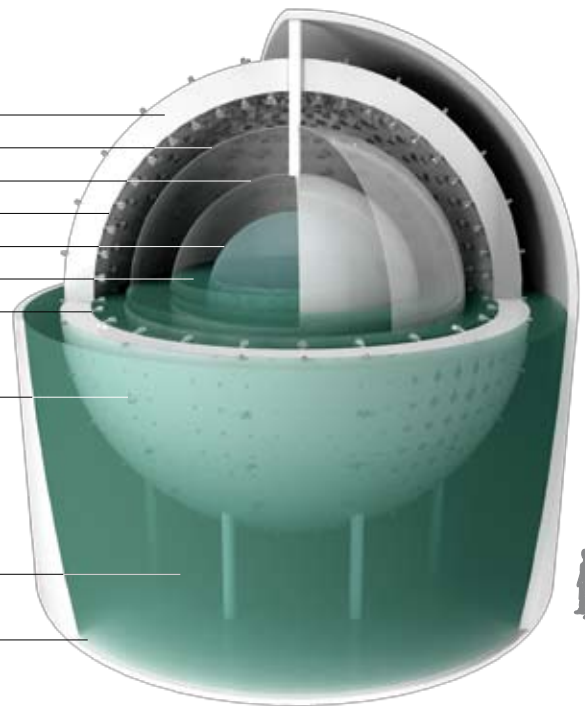
Szintillator (300 Tonnen)

Lichtsammler

208 PM's als Myon-Detektor

2 500 Tonnen hochreines, deionisiertes Wasser

Wassertank aus Edelstahl, \varnothing : 18 m



Gratik: edlundsepp

Früher blieb der Physiker in der Regel in seinem Labor und machte dort Experimente. Lediglich die Astronomen schauten mit ihren Teleskopen hinaus in den Nachthimmel. Heute hingegen suchen Forscher die ausgefallensten Stellen der Welt auf, um ungestört zu arbeiten. Nicht etwa, weil Paparazzi sie belästigen oder Kollegen spionieren, sondern weil sie bei ihren Messungen unbehelligt bleiben wollen von Strahlung und Teilchen.

Manche Wissenschaftler steigen auf die höchsten Berge, um dem Lichtsmog zu entkommen; oder sie schicken ihre Instrumente gar mit Satelliten auf eine Erdumlaufbahn. Andere wiederum flüchten in die Antarktis, um dort im sauberen Eis zu forschen, wieder andere verziehen sich unter die Erde, etwa in ehemalige Bergwerke, und bauen dort erstaunliche Gebilde auf.

Eines davon heißt Borexino. Es ist eine 8,5 Meter große, durchsichtige Kugel aus Nylonfolie, die mit 300 Tonnen einer exotischen Flüssigkeit gefüllt ist und tief unter der Erde in einem Stollen unter den Abruzzern liegt, im italienischen Gran-Sasso-Labor, 120 Kilometer nordöstlich von Rom. Hier unten wollen Forscher, so seltsam das klingen mag, herausfinden, wie die Sonne funktioniert. Dabei machen sie sich zunutze, dass unser Zentralgestirn nicht nur Licht und Wärme zur Erde schickt, sondern auch eine ununterbrochene Flut winzigster Elementarteilchen, so genannter Neutrinos. Sie sind extrem leicht, haben keine elektrische Ladung und fliegen fast

mit Lichtgeschwindigkeit. Aus diesen Gründen können sie auch Materie durchdringen und sind – obwohl allgegenwärtig – nur sehr schwer zu fassen. Alle Neutrino-Detektoren sind deshalb sehr groß. Denn je mehr Masse die winzigen Teilchen durchlaufen müssen, desto höher wird die Wahrscheinlichkeit, dass doch einmal eines von ihnen mit einem Molekül zusammenstößt.

Die TUM – vom Start an mit dabei

Borexino ist der jüngste der großen Neutrino-Detektoren auf der Welt und der modernste. Rund 80 Forscher aus Europa und den USA arbeiten dort, und Physiker der TUM sind von Anfang an dabei. Sie haben mittlerweile knapp fünf Millionen Euro plus Personalkosten dafür ausgegeben. Professor Lothar Oberauer und sein Kollege Franz von Feilitzsch befassen sich schon lange mit Astroteilchenphysik, diesem aufregenden Zweig der Physik, der das Allergrößte mit dem Allerkleinsten in einer Disziplin verbindet.

„Seit der Nobelpreisträger Rudolf Mößbauer Ende der siebziger Jahre mit Neutrino-Experimenten begonnen hat, führen wir diese Tradition weiter“, sagt Oberauer, „zumal sich dieses Gebiet zu einem der spannendsten in der modernen Physik entwickelt hat.“ Das Hauptengagement des Lehrstuhls gilt heute Borexino, das bereits bei seinen ersten Messungen von Mai bis August 2007 einen grandiosen Erfolg brachte. Zur Vorgeschichte: Hans Bethe und Carl Friedrich von Weizsäcker ent-

deckten zwischen 1937 und 1939, dass die Sonne mittels Kernfusion unter unvorstellbar hohen Temperaturen und Drücken in einem komplizierten Zyklus ihre Energie erzeugt. Seitdem wissen wir, bei welchen Prozessen dort Neutrinos entstehen: zunächst bei der Verschmelzung von zwei Wasserstoffkernen zu schwerem Wasserstoff und in späteren Schritten beim radioaktiven Zerfall von Beryllium zu Bor und von Beryllium zu Lithium. Jedes dieser Neutrinos hat eine ganz charakteristische Energie, und damit lässt sich jeweils unterscheiden, wie es entstanden ist.

70 000 000 000 Neutrinos pro Sekunde pro cm²

Die Teilchen fliegen aus dem Sonneninneren in alle Richtungen des Weltraums. Selbst auf der 150 Millionen Kilometer entfernten Erde durchqueren noch fast 70 Milliarden Sonnenneutrinos pro Sekunde jeden Quadratzentimeter, und zwar unabhängig von der Tageszeit: Wegen ihres großen Durchdringungsvermögens erreichen sie uns sogar nachts, von unten durch die Erde. Raymond Davis jr. und John N. Bahcall gelang es 1968, erstmals experimentell nachzuweisen, dass tatsächlich Neutrinos von der Sonne kommen. „Heute geht es darum, die Details zu verstehen“, erklärt Professor Oberauer. „In der Sonne gibt es die verschiedenen Zyklen und Unterzyklen, und bei jedem entstehen Neutrinos mit einer anderen Energie.

Bisher konnte man diese nicht unterscheiden. Aber Borexino kann die Energie der Neutrinos messen, und so können wir auch quantitative Angaben über die Pro-

zesse im Sonneninneren machen.“ Vor allem Neutrinos, die eine besonders niedrige Energie haben, kann das Experiment herausfiltern.

1 300 Tonnen Pseudocumol für Neutronenblitz

Dazu ist die spektakuläre Nylonkugel nötig. Sie ist gefüllt mit der Substanz Pseudocumol – chemisch betrachtet bestehen ihre Moleküle aus einem Benzolring mit drei Methylgruppen. Es handelt sich dabei um ein giftiges Zwischenprodukt, das bei der Herstellung von Farben oder Waschmitteln anfällt. Diese chemische Verbindung hat die Eigenschaft, dass Neutrinos aus ihren Molekülen ein Elektron herausschlagen können. Dieses stößt dann mit jeweils rund 100 000 weiteren Molekülen in der näheren Nachbarschaft zusammen und regt sie zum Leuchten an. Man nennt dieses Phänomen Szintillation. Man kann es mit Messgeräten registrieren, und aus der Intensität der winzigen Lichtblitze zieht man Rückschlüsse auf die Energie des Neutrinos.

Damit man diese Lichtblitze, die innerhalb der Flüssigkeit entstehen, auch von außen sehen und registrieren kann, müssen sowohl das Medium als auch die Hülle transparent sein. Deshalb wählte man eine Nylonfolie, ein Zehntel Millimeter dünn. Da sie aber nicht 300 Tonnen Flüssigkeit halten kann, ohne zu platzen, haben die Forscher das Gebilde mit einer weiteren, 1 000 Tonnen schweren Flüssigkeitsschicht als Gegengewicht umgeben. Es handelt sich auch hier um Pseudocumol, diesmal aber versetzt mit einem Zusatz, der verhindert, dass dort außen ebenfalls Szintillationen entstehen, ▷

An der Princeton University wurden die Nylonkugeln vor ihrem Einsatz im Berg getestet (links). Die Borexinokugel aus rostfreiem Spezialstahl vor der Installation (rechts)



Fotos: INELV, Princeton University (links), Borexino Kollaboration (rechts)

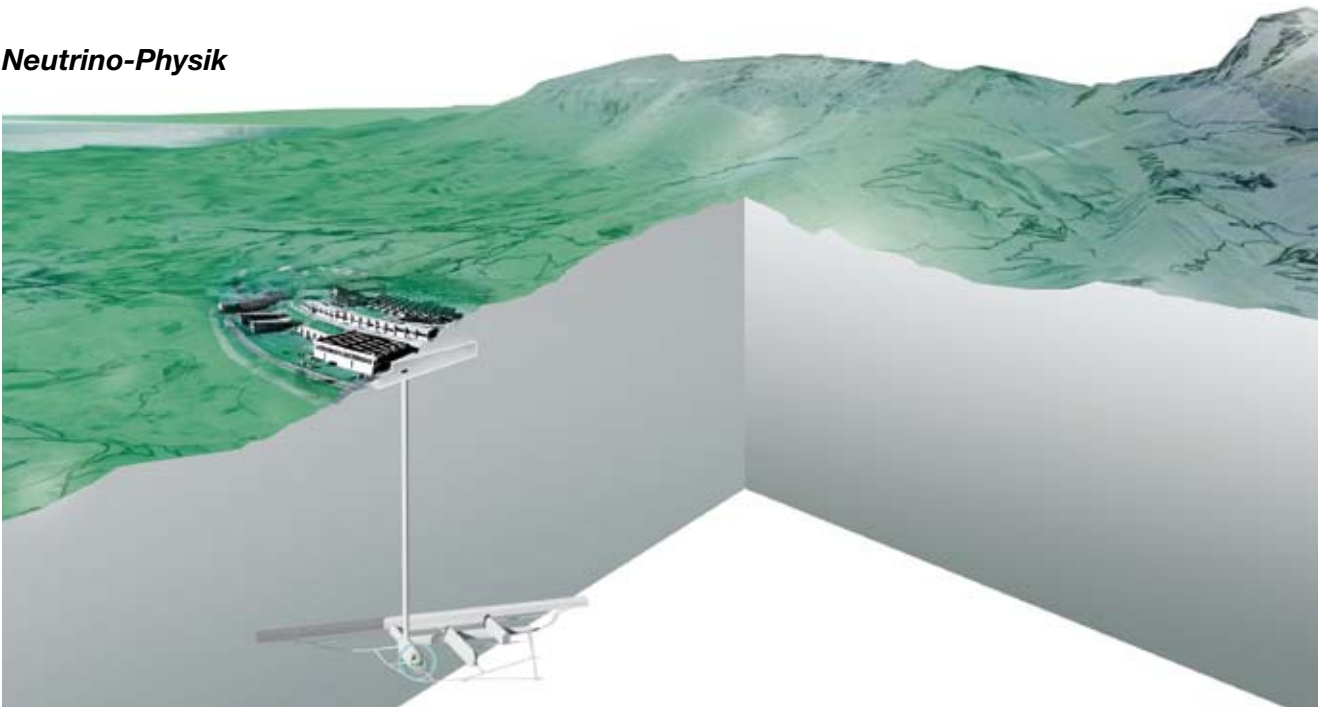


Abbildung: edlundsepp

Schemaplan des italienischen Gran-Sasso-Labors: Es liegt 120 Kilometer nordöstlich von Rom in den Abruzzen, ganz in der Nähe des höchsten Berges des Italienischen Stiefels, des Gran Sasso. Im Stollen des aufgelassenen Bergwerks ganz rechts befindet sich Borexino

Natürliche Neutrinoquellen

Der Urknall hat vor 13,7 Milliarden Jahren alle Arten von Neutrinos erzeugt; diese Urknallneutrinos konnten bisher noch nicht experimentell nachgewiesen werden.

Die Sonne und alle Sterne senden Elektron-Neutrinos aus; sie stammen aus den Fusionsreaktionen.

Supernova-Explosionen senden alle Arten und Antineutrinos aus: sie werden im wesentlichen thermisch erzeugt.

Die Erde sendet Elektron-Antineutrinos aus; sie kommen aus den Betazerfällen von Uran, Kalium und Thorium.

Atmosphäre: Elektron-Myonneutrinos und deren Antineutrinos; aus Reaktionen hochenergetischer Protonen der kosmischen Strahlung in den obersten Schichten unserer Atmosphäre.

Künstliche Neutrinoquellen

Beschleuniger: Heutzutage können dort alle Arten in Kollisionen von energetischen geladenen Teilchen produziert werden.

Kernreaktoren senden Elektron-Antineutrinos aus; sie kommen aus den Betazerfällen der Spaltprodukte.

Bis auf den Urknall sind alle Quellen experimentell verifiziert und werden heutzutage auch in der Neutrinforschung verwendet. Dazu kann man zum einen die Eigenschaften von Neutrinos messen – wichtig für die Teilchenphysik.

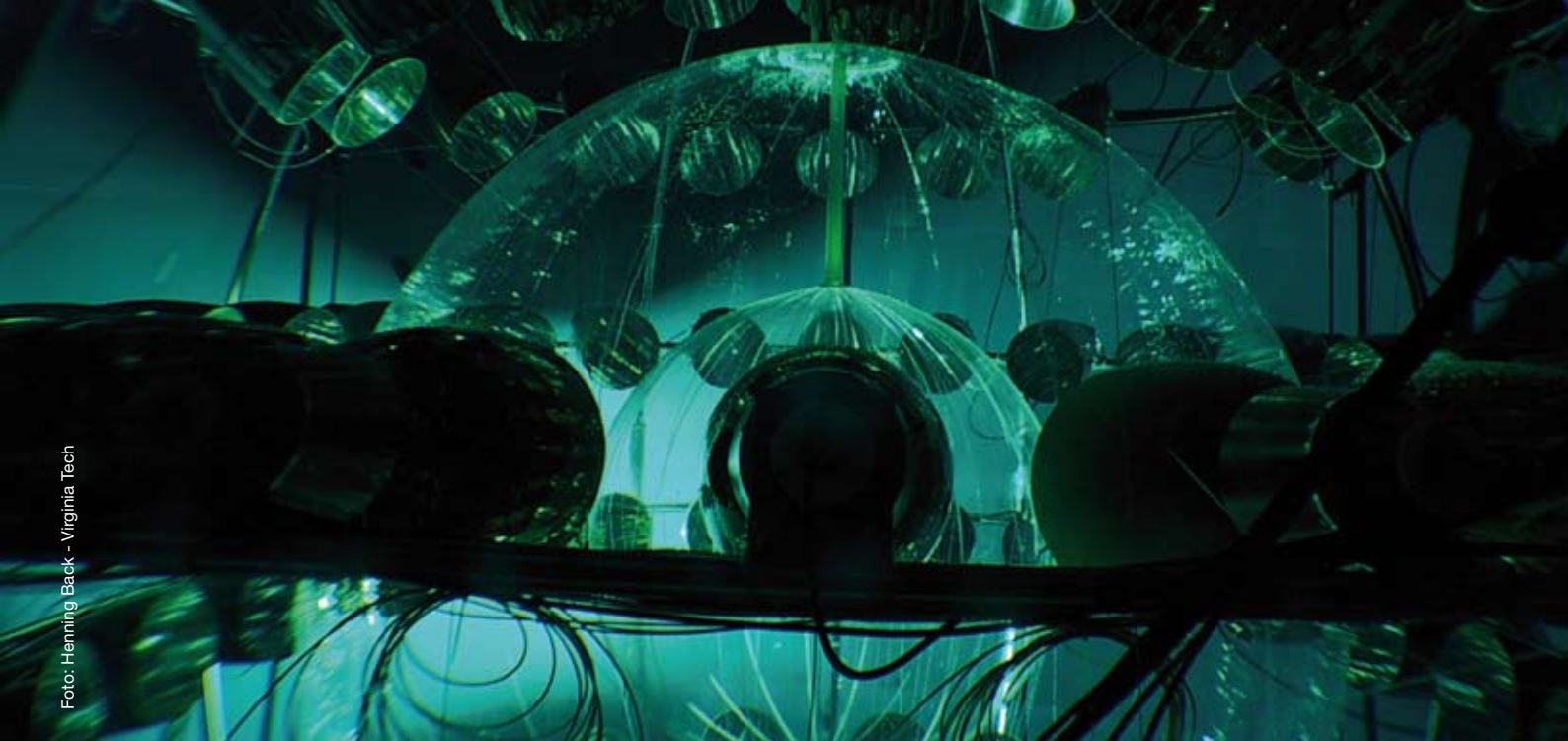
Oder man nützt die Neutrinos als Sonden: Damit können wir zum Beispiel die Fusionsreaktionen in der Sonne besser verstehen als bisher – wichtig für die Astrophysik.

Erwartet werden daneben astrophysikalische Quellen, die sehr hochenergetische Neutrinos (aller Arten) abstrahlen: AGN (aktive galaktische Kerne), GRB (Gamma Ray Bursts), usw.

denn man will nur die Blitze aus dem Inneren messen. Außen ist das Experiment umgeben von einer großen Stahlkugel, an deren Innenseite die Messgeräte angebracht sind: 2 200 so genannte Photomultiplier, die auch den kleinsten Lichtblitz verstärken und registrieren. Sie sehen aus wie überdimensionale Glühbirnen, denn sie bestehen aus Glaskugeln, in denen die eigentliche Apparatur steckt. Rund um die Stahlsphäre befinden sich noch einmal 2 400 Tonnen Wasser, gehalten durch einen großen Stahldom mit 18 Metern Durchmesser, zur Abschirmung gegen äußere Strahlung. Denn nicht nur Neutrinos erzeugen Photonen, sondern Strahlung kann aus vielen Quellen stammen: aus radioaktiven Zerfallsprozessen in Borexino selbst oder in seiner Hülle, aus der Radioaktivität der umgebenden Erde oder aus der kosmischen Strahlung. Das A und O für den Erfolg des Experiments liegt also darin, alle störenden Einflüsse auszuschalten, die das Messergebnis verfälschen könnten. Drei Strategien gibt es dafür: Störungen abschirmen, vermeiden oder sie registrieren und anschließend herausrechnen. In Borexino wurden alle drei kombiniert.

Im Berg geht's extra sauber zu

Zur Abschirmung von außen dient zunächst einmal das Gran-Sasso-Massiv selbst. Es schützt das unter ihm gelegene Labor vor dem Eindringen kosmischer Strahlung; sie bleibt im Berg größtenteils stecken. Alles, was dann noch durchkommt, dazu auch die Strahlung aus dem umgebenden Gestein, schirmt der erwähnte Puffer aus 2 400 Tonnen reinsten Wassers ab. Damit auch kein radioaktives Radongas von außen in den Detektor



Testlauf vor dem Ernstfall: Bevor der gesamte Versuchskomplex in Originalgröße unter Tage aufgebaut wurde, testeten die Wissenschaftler jede einzelne der Komponenten in eigenen Studien

eindringen kann, hat man obendrein noch eine weitere Nylonhaut zwischen der inneren Folie und den Photomultipliern eingezogen.

Noch schwieriger ist es, Störungen durch Radioaktivität von innen zu vermeiden. Dazu haben die Wissenschaftler und Ingenieure bei Borexino einen Riesenaufwand getrieben. Sie verwendeten keine normalen Werkstoffe, sondern jede Komponente musste aus hochreinem Material bestehen, je weiter innen, desto reiner. „Sie müssen sich vorstellen, jede Art von Radioaktivität, die ganz natürlich in jedem Material vorhanden ist, kann man zunächst einmal nicht von einem Neutrino-Ereignis unterscheiden“, erklärt Lothar Oberauer. „Das heißt aber, man muss sehr vorsichtig sein und eine unglaubliche Sauberkeit entwickeln. Man kann Materialien nicht so rein kaufen und transportieren, wie wir sie brauchen, sondern man muss selbst Maßnahmen entwickeln, um sie zu reinigen.“ Das hat das Münchner Team zusammen mit Kollegen der internationalen Kollaboration getan, mit großem Erfolg. In der Flüssigkeit im Inneren von Borexino, dem Szintillator, sind die Spurenelemente Uran und Thorium nur noch mit einem Gewichtsanteil von weniger als 10^{-17} vorhanden, das heißt, das Material ist in Bezug auf Uran und Thorium 100 Milliarden mal reiner als jedes natürliche Baumaterial.

Die dritte Maßnahme, um sich vor Störungen zu schützen, ist es, unerwünschte Ereignisse zu messen und anschließend vom Ergebnis abzuziehen. Dazu hat die Münchner Gruppe einen eigenen Detektor gebaut. Er besteht aus 208 nach außen gerichteten Photomultipliern, die bildlich gesprochen „ein Veto einlegen“, wenn ein Myon aus der kosmischen Strahlung trotz der Gesteins-

Was sind Neutrinos?

Neutrinos sind Elementarteilchen. Diese zerfallen in 2 Gruppen: **Quarks und Leptonen**.

Aus den **Quarks** werden die **Nukleonen (Protonen und Neutronen)** gebildet, die wiederum **Atomkerne** bilden.

Die **Leptonen** (griechisch für „leicht“) bestehen aus den geladenen **Leptonen** und den **Neutrinos**.

Geladene Leptonen: **Elektron, Myon** (findet man in der kosmischen Strahlung) und das **Tauon** (kann man am Beschleuniger erzeugen)

Neutrale Leptonen: **Elektron-Neutrinos, Myon-Neutrinos und Tau-Neutrinos**.

schichten des Gran-Sasso-Massivs noch eindringt. Sein Signal wird dann von der Elektronik automatisch ignoriert. Auch die Messgeräte, die nach innen schauen, können zum Teil unterscheiden, ob ein Lichtblitz aus dem Zentrum kommt oder vom Rand. Registriert werden dann nur die Photonen aus dem Zentrum. Nachdem der Bau der Anlage nach jahrelangen Vorarbeiten endlich abgeschlossen war, begannen am 16. Mai 2007 die Messungen. Und sie brachten schnell Erfolg: Schon im August veröffentlichte das Team die Neuigkeit, dass es zum ersten Mal auf der Welt die niederenergetischen Neutrinos in Echtzeit beobachtet hatte, die aus dem radioaktiven Zerfall von Beryllium im Sonnenkern stammen. Frühere Experimente hatten lediglich nachweisen können, dass derartige Neutrinos existieren, aber nicht, wann sie eintrafen. Damit konnte Borexino erstmals live beobachten, wie Energie im ▶

Eine kurze Geschichte der Neutrino-Physik in Daten	
1931	Der Physiker Wolfgang Pauli sagt ein sehr leichtes, neutrales Teilchen voraus, um das Energiespektrum des Beta-Zerfalls zu erklären.
1934	Enrico Fermi entwickelt die Theorie der schwachen Wechselwirkung und gibt dem Neutrino seinen Namen.
1956	gelingt es Frederick Reines und Clyde Cowan, am Savannah River Reaktor in den USA Anti-Neutrinos nachzuweisen. Reines erhält dafür im Jahr 1995 den Nobelpreis.
1962	Ziro Maki, Masami Nakagawa, Shoichi Sakata und Bruno Pontecorvo entwickeln eine Theorie der Neutrino-Oszillationen.
1962	Entdeckung eines weiteren Neutrinotyps durch Leon M. Lederman, Melvin Schwartz and Jack Steinberger. Sie erhalten dafür 1988 den Nobelpreis.
1965	Reines und seine Kollegen beobachten zum ersten Mal natürliche Neutrinos aus dem Weltall in einer Goldmine in Kolar, Indien.
1968	Erstes Experiment in der Homestake-Mine in North Dakota, USA, mit dem Sonnenneutrinos nachgewiesen werden
1978	Entdeckung eines dritten Neutrinotyps, des Tau-Neutrinos, durch Martin Perl und sein Team am Linearbeschleuniger in Stanford, Kalifornien, Entwicklung der Theorie dazu. Inzwischen wissen wir, dass es drei Neutrinosorten gibt: Elektron-Neutrino, Myon-Neutrino und Tau-Neutrino.
Anfang 80er:	Das IMB-Experiment wird in der Morton Salzmine bei Cleveland, Ohio, in Betrieb genommen, das Experiment Kamiokande in einer ehemaligen Zinkmine in Japan.
1987	Kamiokande und IMB weisen simultan Neutrinos aus einem Supernova-Ausbruch nach.
1989	Kamiokande ist das zweite Experiment, das Neutrinos von der Sonne nachweisen kann, und findet nur ein Drittel der erwarteten Anzahl.
1991	LEP-Experimente am Cern in Genf können beweisen, dass es nur drei leichte Neutrinos gibt.
1994	Erste Anzeichen für eine Oszillation der Neutrinos
1995	Auch das europäische GALLEX-Experiment in Gran Sasso (Italien) findet weniger solare Neutrinos als erwartet.
1996	Das Neutrino-Teleskop AMANDA am Südpol beginnt mit der Arbeit.
1998	Die internationale Kollaboration am Super-Kamiokande gibt bekannt, dass Neutrinos oszillieren und daher eine Masse besitzen müssen.
2002	Masatoshi Koshiha and Raymond Davis erhalten den Nobelpreis für die Messung von solaren und Supernova-Neutrinos.
2002	Im Januar beginnt KamLAND in Japan mit der Arbeit, im November meldet es erste Ergebnisse.
2004	Super-Kamiokande und KamLAND finden Hinweise, dass das Modell der Neutrino-Oszillation richtig ist.
2005	KamLAND misst den Neutrinofluss aus der Erde und macht erste Messungen zur geologischen Wärmebilanz.

Sonneninneren freigesetzt wird. Denn das Licht, das von der Sonne zur Erde strahlt, kann darüber keine Auskunft geben. Photonen, die im Inneren des Sterns entstehen, brauchen mindestens 100 000 Jahre, um vom Sonnenkern zur Oberfläche zu gelangen. Neutrinos hingegen flitzen fast ungehindert durch den Gasball. Die Messung von Sonnenneutrinos ist also ein Test zur Überprüfung der heutigen Sonnenmodelle.

Nach dem erfolgreichen Beginn haben die Forscher nun eine Menge Pläne: „Unser Ziel ist es unter anderem, die jahreszeitliche Schwankung der Neutrino-Rate zu

messen“, sagt Lothar Oberauer. „Die Erde läuft ja nicht auf einem Kreis um die Sonne, sondern beschreibt eine Ellipse. Das heißt, ihr Abstand ändert sich im Lauf des Jahres, und je näher sich Sonne und Erde sind, desto mehr Neutrinos müssten wir messen. Der Unterschied zwischen den Extrempunkten soll sieben Prozent ausmachen. Das wollen wir sehen.“

Borexino kann aber noch mehr, als nur Sonnen-Neutrinos messen: Es „sieht“ unter anderem auch Neutrinos, die von der Erde selbst stammen, die so genannten Geo-Neutrinos. „Die Erde ist noch schlechter verstanden als die Sonne“, erklärt Oberauer. „Wir wissen, dass aus ihr ein Wärmestrom von insgesamt 40 Terawatt kommt. Das ist etwa so viel wie die Gesamtleistung aller irdischen Atomreaktoren zusammengenommen. Und man weiß bis heute noch nicht genau, wo diese Wärme eigentlich herkommt.“

Ein Teil der Strahlungswärme stammt sicherlich aus der Radioaktivität. Und diesen Anteil könnten die Forscher über die Messung von Neutrinos experimentell bestimmen, nicht nur aus der Erdkruste, sondern auch aus dem Erdmantel oder gar ihrem Kern. Damit könnte Borexino nicht nur unser Wissen über die Sonne, sondern auch das über die Erde erweitern. *Brigitte Röthlein*

Andere Neutrino-Experimente weltweit
KamLAND in Japan: www.awa.tohoku.ac.jp/KamLAND/index.html
SNO: Sudbury Neutrino Observatory in Ontario: www.sno.phy.queensu.ca
SuperKamiokande in Japan: www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html
IceCube am Südpol: www.icecube.wisc.edu/info

Das Navi für den Körper

Hier zählen Bruchteile von Millimetern: Minimal-invasive Operationen können nur dann erfolgreich sein, wenn der Arzt weiß, wo er sich befindet. Eine Kooperation von Siemens und TUM eröffnet Medizinern neue Einblicke

Link

<http://campar.in.tum.de>

Chirurgen geht es manchmal wie Autofahrern, die auf einer Straßenkarte den Weg durch eine fremde Stadt suchen. Bei so genannten Schlüssellochoperationen – minimal-invasiven Eingriffen – tasten sie sich mit Endoskopen, Kathetern und winzigen Bohrern durch kleine Öffnungen sachte in den Körper vor. Den Weg durch Knochen oder die verzweigten Blutgefäße der Leber sehen sie nicht direkt. Sie orientieren sich an einem abstrakten zweidimensionalen Bild auf dem Röntgenmonitor im Operationssaal.

Ganz so wie ein Autofahrer mit der guten alten – aber zweidimensionalen – Straßenkarte den Weg aus dem Wirrwarr bunter Striche herauslesen muss. Während Navigationsgeräte dem Fahrer längst sagen, wo es lang geht, gibt es für Chirurgen bislang kaum eingängige Orientierungshilfen, die vergleichbar einfach funktionieren. Doch die Lösung naht: Denn Informatiker der Technischen Universität München, Ärzte von Münchner Kliniken und Experten der Firma Siemens arbeiten in Kooperation an acht Projekten, die leicht bedienbare digitale Wegweiser für den OP hervorbringen werden. Das Ziel sind Systeme, die dem Arzt während minimal-invasiver Operationen ein dreidimensionales Bild des Körperinnern und der Instrumente geben – ohne ihn dabei mit Technik zu überfrachten.

Dr. Sandro-Michael Heining setzt das Skalpell an – zitterfrei, sicher. Er schneidet tief, legt einen Teil des Knochens frei. Heining greift zu einem winzigen Bohrer.

Jetzt geht es um Millimeter. Heining blickt zum Monitor neben dem Tisch, während ein leises Surren erklingt und seine Hände den Knochen bearbeiten. Grau ist im Röntgenbild der Knochen zu erkennen, die dünne Bohrer Spitze als heller Punkt. Dann kommt Farbe auf die Mattscheibe – ein buntes Videobild legt sich wie eine leuchtende Folie über das Röntgen-Grau. Heining hat eine Videokamera zugeschaltet, die denselben Ausschnitt des Beins und den Bohrer von außen aus der Vogelperspektive zeigt. Heining starrt konzentriert auf den Knochen am Bildschirm. Er setzt eine Schraube an, dreht. Sie sitzt auf Anhieb perfekt.

Der Navigator für den Knochen

Sandro-Michael Heining ist Chirurg am Münchener Klinikum Innenstadt. Was er derzeit noch an Tierkadavern oder an Patienten-Dummys aus Kunststoff testet, soll in wenigen Monaten erstmals in klinischen Studien am Menschen eingesetzt werden – ein Navigations-Doppelpack, ein Orientierungssystem aus klassischem Röntgen-C-Bogen und einer aufgepflanzten Beobachtungskamera. CAM-C (camera augmented mobile C-Arm) heißt das von den Informatikern der TUM erdachte System. Für gewöhnlich orientiert sich der Chirurg bei orthopädischen Operationen oder beim Verschrauben komplizierter Brüche allein mit einem gewöhnlichen C-Bogen. Das ist ein schwenkbarer Halbkreis mit etwa zwei Meter Durchmesser. An diesem sitzt

Bildgebende Verfahren in der Medizin

Röntgenaufnahme

Eine Röntgenuntersuchung kann Körperregionen und -gewebe als „Schattenbild“ darstellen. Der Körper des Patienten oder ein Teil desselben wird mit Röntgenstrahlung durchstrahlt. Auf der Gegenseite wird die Strahlung registriert und in ein Bild umgewandelt. Dieses zeigt die im Strahlengang liegenden Gewebe in der Projektion: Knochen absorbieren mehr Strahlung als Weichteile und werfen daher Schatten; luftgefüllte Gewebe wie die Lunge sind relativ durchlässig, so dass dahinter eine höhere Strahlenintensität registriert wird.

Da verschiedene Strukturen sich im Strahlengang überlagern, ist es oft hilfreich, Bilder aus unterschiedlicher Projektionsrichtung anzufertigen. Dennoch gehen bei der Röntgenaufnahme Informationen über die Dicke der Strukturen verloren. Diese erbringt die Computertomographie.

Computertomographie (CT)

Die Computertomographie erstellt viele Röntgenbilder aus unterschiedlichen Richtungen und rekonstruiert daraus die Volumeninformationen. In der Regel setzen sich diese 3D-Rekonstruktionen aus Einzelschnitten, die quer durch das Objekt verlaufen, zusammen. Auf diese Weise kann für jedes Volumenelement des Objektes eine Dichte ermittelt werden. Die CT-Aufnahme ist übersichtlicher als ein normales Röntgenbild. Dank der besseren Kon-

trastabstufung kann der Arzt verschiedene Gewebearten unterscheiden. Im Gegensatz zu Röntgenaufnahmen, die in der Regel nur aus einer Richtung gemacht werden, kreist die Strahlenquelle beim CT rund um den Körper. Auf dem Bild gibt es deshalb keine Überlagerungen von Gewebe. Moderne CT-Geräte schaffen die Umdrehung in 0,36 Sekunden.

Nachteil der Röntgendiagnoseverfahren ist die hohe Strahlenexposition, die bei der CT sogar noch deutlich höher ist als bei herkömmlichen Röntgenaufnahmen. Eine Alternative stellt die Magnetresonanztomographie dar.

Magnetresonanztomographie (MRT)

Die Magnetresonanztomographie (MRT) arbeitet mit Magnetfeldern und Radiowellen. Das Messverfahren beruht auf einer synchronen Anregung von Kernteilchen und der anschließenden Messung der Zeit, bis sie wieder in den Normalzustand übergehen. Dabei senden sie Signale aus. Ein Computer berechnet daraus ein Schnittbild. Im Gegensatz zur CT können bei der MRT neben horizontalen auch andere Schnittebenen dargestellt werden, ohne die Lage des Patienten zu verändern. Die Magnetresonanztomographie liefert sehr differenzierte Darstellungen von Körpergeweben, insbesondere Weichteile, Organe, Knorpel und Gehirn.

Tina Heun

eine Röntgenkamera, mit der man den Patienten von allen Seiten umkreisen kann. Der wird auf diese Weise aus verschiedenen Winkeln durchleuchtet.

Der Arzt kann damit auch jene Details erkennen, die in einer schlichten frontalen Röntgenaufnahme verborgen sind; durch einen gebrochenen Knochen verdeckte Splitter zum Beispiel. Wird es kompliziert, muss der Chirurg den C-Bogen Stück für Stück weiterdrehen und Röntgenaufnahme nach Röntgenaufnahme schießen. Komplizierte Brüche beispielsweise muss man gleich mit mehreren Schrauben richten: Die einen stoßen mitten durch den Knochen und halten ihn – und dann fixieren andere Schrauben die ganze Konstruktion.

Der Chirurg muss präzise arbeiten, damit Schraube exakt in Schraube greift. „Hat man nur das C-Bogen-Röntgenbild, drückt man häufiger auf den Auslöser, um sich zu orientieren“, sagt Heining. Entsprechend hoch ist die Strahlenbelastung für den Patienten – und den Arzt, der täglich im OP steht.

Spicken statt Strahlen

Wo befindet sich die Spitze des Bohrers? Wie tief sitzt sie? Bohre ich im richtigen Winkel? Während der Operation schaut der Arzt ständig auf den Monitor. Ein ergänzendes Videobild kann da sehr hilfreich sein. „Es gibt bestimmte Eingriffe, bei denen das Videobild wichtige zusätzliche Informationen liefert – die Neigung des Instruments oder dessen Eindringtiefe.“ Der Vorteil: Der Arzt kann besser abschätzen, wo sich die Spitzen der Instrumente befinden und muss den C-Arm nicht ständig in eine neue Position schieben und Röntgenbilder schießen. Nicht zu vergessen: Die Röntgenbelastung sinkt erheblich.

CAM-C ist die goldene Mitte, wenn es um die Visualisierung von orthopädischen Eingriffen geht. Es füllt die Lücke zwischen dem klassischen Röntgen-C-Bogen und Hightech-Trackingsystemen. Dieses bestimmt mithilfe mehrerer im Raum aufgestellter Kameras exakt die Lage der Endoskope in der Hand des Arztes und errechnet daraus vollautomatisch die genaue Position der Endoskope im Körper des Patienten.

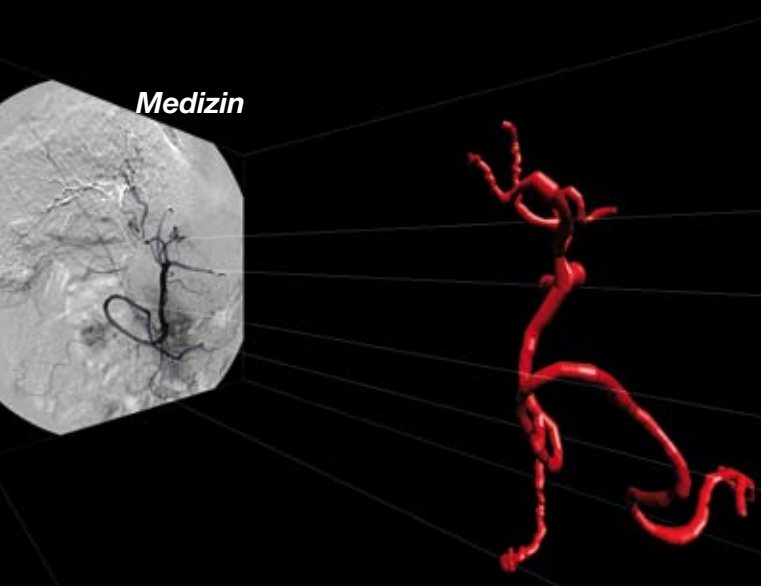
Solche Anlagen werden beispielsweise für Operationen der Wirbelsäule eingesetzt, bei denen es auf höchste Präzision ankommt. Sie müssen vor der Operation aufgestellt und aufwendig justiert werden. Eine zeitraubende Prozedur, die den Arbeitsablauf im Krankenhaus aufhält. CAM-C liefert einerseits mehr Information als der C-Arm und lässt sich andererseits schnell und einfach auf Knopfdruck bedienen. „Da CAM-C auf eine bestehende Technik aufsattelt, müssen die Ärzte nicht wie bei komplexen Medizintechnik-Geräten erst angeleitet werden. Jeder Chirurg kann das Gerät sofort benutzen“, betont Prof. Ekkehard Euler, Chef der Chirurgischen Klinik und Poliklinik am Klinikum Innenstadt.



Sandro-Michael Heining zeigt an einem mit Tüchern verdeckten Wirbelsäulennachbau aus Kunststoff die Funktionsweise des Cam-C-Systems. Röntgenbild und Videoaufnahmen werden auf den Monitoren im Hintergrund überlagert

Genau das ist das Ziel des Kooperationsprojektes: Hilfsmittel entwickeln, die die Kliniker in der Praxis schnell und unkompliziert einsetzen können. Echte Unterstützung statt Technikverwirrung.

Die Nähe zur Praxis kommt nicht von ungefähr. Die TUM-Informatiker arbeiten direkt vor Ort in den Kliniken – Tür an Tür mit den Ärzten im Operationssaal. So hat das CAM-C-Team im Innenstadt-Klinikum eigens ein Labor eingerichtet. „Normalerweise kann ein Mediziner nicht in medizintechnische Geräte hineinschauen“, sagt Heining. „Jetzt aber sitzen bei uns Informatik-Spezialisten, die Geräte direkt nach unseren Vorstellungen programmieren können.“ CAM-C – eine Röntgenkamera mit aufgepflanzter Video-Optik – das klingt nicht gerade nach einem Geniestreich. Doch der Teufel steckt im Detail. „Die Herausforderung bestand darin, das ▶



Das Bildgebungssystem **AngioReg** überlagert 3-D-Gefäßmodelle (rot, im Vordergrund rechts) mit 2-D-Röntgenaufnahmen der Blutgefäße. Der Eindruck erleichtert dem Arzt die Orientierung

Röntgen- und Videobild exakt zur Deckung zu bringen, damit beide wirklich denselben Ausschnitt zeigen“, erklärt Jörg Traub, Leiter des Teilprojekts CAM-C am Institut für Informatik der TUM. Registrierung nennt man eine solche Eichung auf ein gemeinsames Koordinatensystem. Probleme macht die unterschiedliche optische Verzerrung von Röntgen- und Videobild. Die Informatiker mussten zunächst also eine Software stricken, um dem System den Silberblick auszutreiben. Ansonsten ist die CAM-C-Software ausgesprochen schlank. Während der Operation müssen weder riesige Bilddaten noch andere Informationen hin- und hergeschoben werden. Die Genialität von CAM-C besteht in seiner Einfachheit.

Genial, aber möglichst einfach

Ähnliches gilt auch für andere Teilprojekte der trilateralen Kooperation. Stets geht es darum, dem Arzt die alltäglichen Handgriffe mit wenig Technik zu erleichtern. Ein solches Projekt ist auch AngioReg.

AngioReg wird künftig bei der lokalen Behandlung von Lebertumoren zum Einsatz kommen – der Chemoembolisation. Bei einem solchen Eingriff schiebt der Mediziner einen mit Medikamenten beladenen Katheter über die Hüftarterie bis in die Leber. Hat er das Tumorgewebe erreicht, entlässt er das Medikament an Ort und Stelle. Dem Patienten bleibt damit eine Medikamenteneinnahme erspart, die mitunter den ganzen Körper schwächt. Doch die minimal-invasive Tunnelfahrt durch die Blutgefäße ist anspruchsvoll. Verzweigt sich ein Blutgefäß, muss der Mediziner die richtige Ausfahrt nehmen, um den Katheter ans Ziel zu bugsieren.

Auch bei diesem Eingriff hilft er sich in der Regel mit einem Röntgen-C-Arm. Die Operation wird dadurch erschwert, dass Blutgefäße im Röntgenbild nur dann im Detail zu erkennen sind, wenn dem Patienten ein reflektierendes Kontrastmittel gespritzt wird. Zwar ist das

Kontrastmittel nicht giftig. Dennoch belastet es den Körper zusätzlich. Ähnlich wie beim orthopädischen Eingriff muss der Arzt also während der Operation immer wieder die Position des C-Bogens verändern, neue Röntgenaufnahmen schießen und dem Patienten zudem hin und wieder Kontrastmittel spritzen, um die Position des Katheters und die Verzweigung der Blutgefäße richtig einzuschätzen.

Für diesen Spezialfall haben die TUM-Informatiker um Traubs Kollegen Martin Groher jetzt AngioReg entwickelt. Auch hier werden zwei Bilddatensätze miteinander verknüpft, registriert. Bild 1 liefert, wie gehabt, die Röntgenkamera. Bildinformation 2 stammt hingegen aus dem Datensatz eines Computertomographen (CT). Ein solches CT-Bild ist heutzutage Standard. Dazu wird der Patient noch vor der Operation in einer CT-Röhre gescannt.

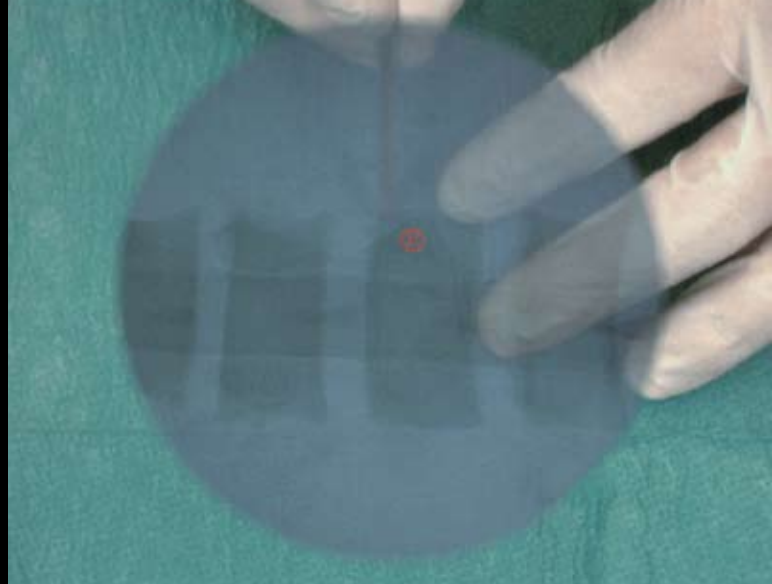
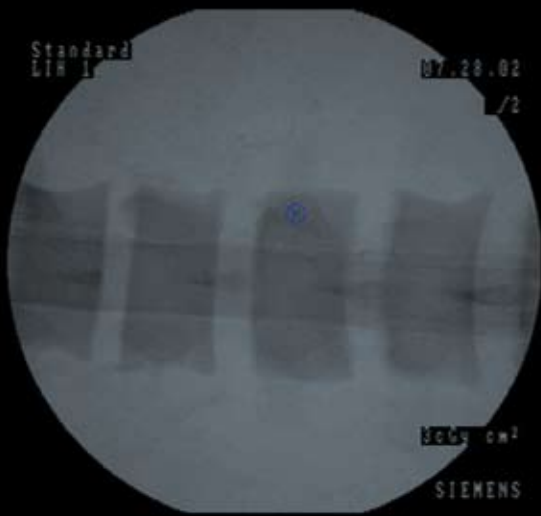
Ergebnis ist ein dreidimensionales Bild des betroffenen Körperabschnitts, das man am Computer aus allen Winkeln im Detail betrachten kann – in diesem Fall das Abbild des Blutgefäßgeflechts. Der Arzt plant an diesem CT-Modell den Eingriff. Während der Operation aber hilft ihm die schöne 3-D-Darstellung bisher wenig. Groher und seine Kollegen machen das jetzt möglich. Mit selbstentwickelter Software überlagern sie das aktuelle Röntgenbild mit dem bei der Voruntersuchung gespeicherten CT-Datensatz.

Der Clou: Das CT-Abbild richtet sich dank der Verknüpfung – Registrierung – automatisch nach dem aktuellen Röntgenbild aus. Der Arzt sieht auf dem Monitor die zweidimensionale Röntgenaufnahme, vor der das 3-D-Blutgefäßmodell schwebt. Statt den C-Bogen zu drehen, um damit um die Ecke zu schauen, dreht der Mediziner einfach den dreidimensionalen CT-Datensatz. Groher: „Der Mediziner kann so in manchen Momenten besser einschätzen, wo sich der Katheter befindet, ohne gleich Kontrastmittel spritzen zu müssen. Die Belastung für den Patienten verringert sich.“

Selbst Störungen lassen sich herausrechnen

Eine Herausforderung sind derzeit noch die störenden Bewegungen des Patienten, etwa durch die Atmung oder die Bewegung des Darms, die die Lage der Blutgefäße kurzzeitig verändern können. Groher und seine Kollegen arbeiten bereits an speziellen Algorithmen, die diese Bewegungen aus den Daten herausrechnen können.

Wie Traub kooperiert auch Groher eng mit den Klinikern vor Ort – insbesondere mit Medizinern am Klinikum Großhadern. „Das Besondere dieses Kooperationsprojektes ist die intensive Zusammenarbeit von Spezialisten verschiedener Disziplinen – von Informatikern, exzellenten Medizinern und einem der führenden Medizintechnik-Unternehmen“, sagt Professor Nassir Navab, Inhaber des TUM-Lehrstuhls für Informatikanwen-



Für gewöhnlich steht Chirurgen nur das abstrakte Röntgenbild (links) zur Verfügung. Um zu erkennen, ob ein medizinisches Instrument in ihrer Hand die richtige Position zum Knochen hat, müssen sie während der Operation häufig neue Röntgenaufnahmen schießen. Nicht so mit Cam-C: Vor dem Eingriff legt der Chirurg die Eintrittsstelle des Instruments im Bild fest (Blauer Kreis mit Kreuz, Bild links)

dungen in der Medizin & Augmented Reality und geistiger Vater des Projekts.

Die TUM liefert Wissen, die Wirtschaft Technik

Weiterer Partner ist das Klinikum Rechts der Isar. „Die Mediziner haben im Alltag kaum Zeit für die Forschung. Dass unsere Fachleute direkt bei ihnen vor Ort arbeiten, erleichtert die Zusammenarbeit enorm und beschleunigt die praxisnahe Entwicklung.“

Mit Siemens, sagt Navab, sei ein Industriepartner im Boot, der nicht nur auf schnellen Gewinn schiele, sondern Interesse an einer langfristigen Entwicklung habe. „Wir entwickeln hier gemeinsam ja nicht die Technik von heute, sondern Technik, die vielleicht erst in zehn Jahren auf den Markt kommt.“

Für seine Mitarbeiter sei das Anreiz und Herausforderung zugleich. Dr. Rainer Graumann, bei Siemens Medical Solutions zuständig für den Bereich Special Systems, sieht das ähnlich: „Für uns bietet die Zusammenarbeit mit den Informatikern der TUM die Möglichkeit, ein Thema aus der Vorfeld-Entwicklung intensiv zu bearbeiten, von dem zunächst niemand weiß, ob es später auch tatsächlich in ein Produkt für den Markt münden wird.“

Ein Tummelplatz für wissenschaftliche Talente

Expertise für derlei Projekte einfach im eigenen Hause aufzubauen, so sind sich Firmenvertreter sicher, sei im Alltagsgeschäft schlicht nicht gut möglich. Auch aus diesem Grund pumpt das Unternehmen 1,2 Millionen Euro in die Kooperation. Neue medizintechnische Geräte gibt es gratis dazu. Auch der direkte Kontakt zu den Studenten ist Graumann wichtig: „Hier arbeiten viele Diplomanden und Doktoranden in engem Kontakt mit unseren Leuten. Es ist durchaus möglich, dass wir ihre Kenntnisse auch später in unserem Unternehmen brau-

chen können.“ Für die Studenten bietet die Zusammenarbeit damit vielleicht nicht gerade Arbeitsplatzgarantie aber sicher den richtigen Draht zu einem großen Technik-Unternehmen.

Graumanns Kollege in Erlangen, Dr. Klaus Klingenberg-Regn, der die Kooperation auf Siemensseite lange Zeit betreut hat, staunt vor allem über das Tempo der Forscher: „Die Einzelprojekte sind vor etwa vier Jahren, zum Teil sogar noch später gestartet. Es ist beeindruckend, wie viel man in Kürze erreichen kann, wenn sich eine universitäre Arbeitsgruppe mit vielen Experten einem solchen Thema widmet.“

Dazu zählt auch das Projekt „Stent“. Ende 2006 gestartet, gibt es schon jetzt erste Softwaremodelle, die künftig die Behandlung so genannter Aneurysmen, gefährlicher Ausbeulungen der Aorta, erleichtern sollen.

Der nächste Schritt: Die Aorta stützen

Aneurysmen sind Schwachstellen innerhalb der Aorta. Platzen sie, kann ein Mensch innerlich verbluten. Um den Druck auf die geschwächte Gefäßwand zu reduzieren und die Aorta zu stützen, schieben Ärzte „Stents“, kleine zylindrische Drahtgeflechte, in den betroffenen Abschnitt.

Dabei muss der Mediziner unbedingt vermeiden, dass Seitenäste und abgehende Gefäße verdeckt und blockiert werden. Die Informatikerin Stefanie Demirci hat dafür, ähnlich wie Groher, eine Software entwickelt, die CT-Datensatz aus der Voruntersuchung und C-Bogen-Bild passgenau überlagert. Auch hier geht es darum, die Zahl der Röntgenaufnahmen und die Gabe von Kontrastmittel zu reduzieren, indem man nicht den C-Bogen, sondern das CT-Bild dreht.

Der Mediziner soll damit künftig leichter durch die Aorta navigieren – wie der Autofahrer durch die engen Gassen einer Großstadt.

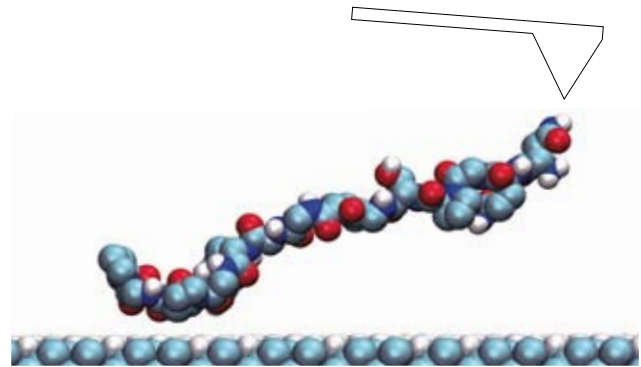
Tim Schröder

Anziehende Kräfte

Mit dem Rasterkraftmikroskop lösen TUM-Forscher ein zentrales Geheimnis der Biophysik – die hydrophobe Anziehung. Die Erkenntnis kann helfen, zukünftig Aufbau und Eigenschaften von Proteinen besser vorherzusagen

Eine der wichtigsten Kräfte in der Biologie konnte bisher nicht zufriedenstellend erklärt werden: die wasserabstoßende (hydrophobe) Anziehung. Der Durchbruch gelang jetzt einem Forscherteam an der Technischen Universität München in Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern. Die Forscher maßen die hydrophobe Anziehung zwischen einer Peptid-Kette und einer Diamant-Oberfläche mit einem Rasterkraftmikroskop (AFM). Dann verglichen sie die Ergebnisse mit Simulationsrechnungen. Die neuen Erkenntnisse erlauben weit reichende Schlüsse über den Mechanismus dieser fundamentalen Wechselwirkung. Sie kann nun erstmals auch in ihrer Stärke erklärt werden. Die Forschungsarbeit wurde in der amerikanischen Fachzeitschrift „Proceedings of the National Academy of Sciences“ (PNAS) veröffentlicht.

Ausgangspunkt der Forschung ist folgendes Faktum: In wässriger Umgebung ziehen sich nicht-polare Moleküle aufgrund der hydrophoben Wechselwirkung an. Diese Kraft ist von zentraler Bedeutung für die Biologie, etwa bei der Proteinfaltung und dem Zusammenhalt von großen Proteinmolekülen. Aber wichtig ist sie auch für viele Phänomene des täglichen Lebens: zum Beispiel bei der Bindung von Fettmolekülen durch Seife oder der Stabilität von Mayonnaise und anderen Emulsionen. Dass der Mechanismus der hydrophoben Wechselwirkung bislang noch nicht zufriedenstellend erklärt werden konnte, liegt an den bislang untersuchten Modellsystemen. Viele Wissenschaftler betrachteten etwa zwei einander auf wenige Nanometer angenäherte schwach gekrümmte hydrophobe Oberflächen. Die Messungen mit diesem sogenannten „Surface-Force Apparatus“ werden aber durch die Bildung von Luftblasen zwischen den Oberflächen gestört, so dass die eigentliche hydrophobe Kraft nicht bestimmt werden kann. Auch für Simulations-Studien ist dieser Aufbau ungeeignet, da das Wasser zwischen den Oberflächen relativ träge ist und der Gleichgewichtszustand nur langsam erreicht wird. Um das Problem zu lösen, konzipierten die Münchner



Das Spinnenseide-Peptid wird mit einer AFM-Spitze von einer hydrophoben Diamantoberfläche abgelöst (nicht maßstabsgetreu)

Wissenschaftler aus den Arbeitsgruppen um Thorsten Hugel und Roland Netz ein neuartiges Modellsystem. Die Wissenschaftler befestigten ein einzelnes Peptid-Molekül an der Spitze eines Rasterkraftmikroskops (AFM). Das in diesem Fall verwendete Peptid ist ein Hauptbestandteil der Spinnenseide. Die auf diese Weise präparierte Spitze wurde so weit an eine extrem glatte Diamant-Oberfläche angenähert, bis sich die Peptid-Kette an die Oberfläche hingezogen. Die Spitze wurde nach oben gezogen und gleichzeitig die dabei aufgewendete Kraft gemessen.

Erst gleiten, dann lösen

Mit den Ergebnissen können die Forscher zeigen, dass die Peptid-Kette durch den Zug zunächst auf der Oberfläche entlang gleitet, bis sie sich komplett von ihr löst. Aus über 200 dieser Messungen kann eine mittlere Lösungskraft von 58 Pico-Newton ermittelt werden. Dieser Wert stimmt gut mit der Kraft von 54 Pico-Newton überein, die sich für das Modellsystem aus theoretischen Simulationen ergibt. Prof. Netz betont: „Dies ist nach unserem Wissen die erste quantitative Untersuchung der hydrophoben Wechselwirkung, die eine Übereinstimmung zwischen Experiment und Theorie zeigt.“ Dank dieser Bestätigung konnte anhand der theoretischen Simulation der Mechanismus der Wechselwirkung entschlüsselt werden. Mit diesem neuartigen Messprinzip soll in Zukunft die Wechselwirkung verschiedenster Peptid-Moleküle mit unterschiedlichen Oberflächen untersucht und damit die Vorhersage von Protein-Strukturen und ihren Eigenschaften verbessert werden. □

Links

www.physik.tu-muenchen.de/lehrstuehle/T37
www.nano-initiative-munich.de



Impressum

Faszination Forschung

Das Wissenschaftsmagazin
der Technischen Universität München

gefördert durch die **Exzellenzinitiative
des Bundes und der Länder**

Herausgeber:

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

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, Infografik und Bildredaktion:

Alexandra Bankel, Kiril Damyanov, Florian Hugger,
Nina Hürlimann, Thomas Rampp, Susanne Schmid
ediundsepp Gestaltungsgesellschaft, München

Autoren dieser Ausgabe: Rebecca Beerheide,
Dr. Markus Bernards, Jonathan Fasel, Odin Hug,
Sibylle Kettmeil, Kathrin Kommerell, Reiner Korbmann,
Thorsten Naeser, Dr. Brigitte Röthlein, Tim Schröder,
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: Herrenknecht AG

© 2008 für alle Beiträge Technische Universität München,
Presse & Kommunikation, 80290 München. Alle Rechte vor-
behalten. Nachdruck, Aufnahme in Onlinedienste und Inter-
net, Vervielfältigung auf Datenträgern nur mit ausdrücklicher
Nennung der Quelle: „Faszination Forschung. Das Wissen-
schaftsmagazin der Technischen Universität München.“

Anmerkungen zu den Bildnachweisen: Wir haben uns be-
müht, 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, 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.

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.

Odin Hug ist seit 2007 Chefredakteur der Kommunikationsagentur WortFreunde in Stuttgart. Er studierte Politikwissenschaft, Geschichte und Soziologie an den Universitäten von Konstanz und Coleraine/Nordirland. Danach Redakteur und Projektleiter beim Verlag Karl Baedeker in Ostfildern bei Stuttgart. Berufsbegleitend absolvierte er ein MBA-Studium mit Schwerpunkt Marketing an der Fachhochschule Koblenz/Remagen.

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

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.

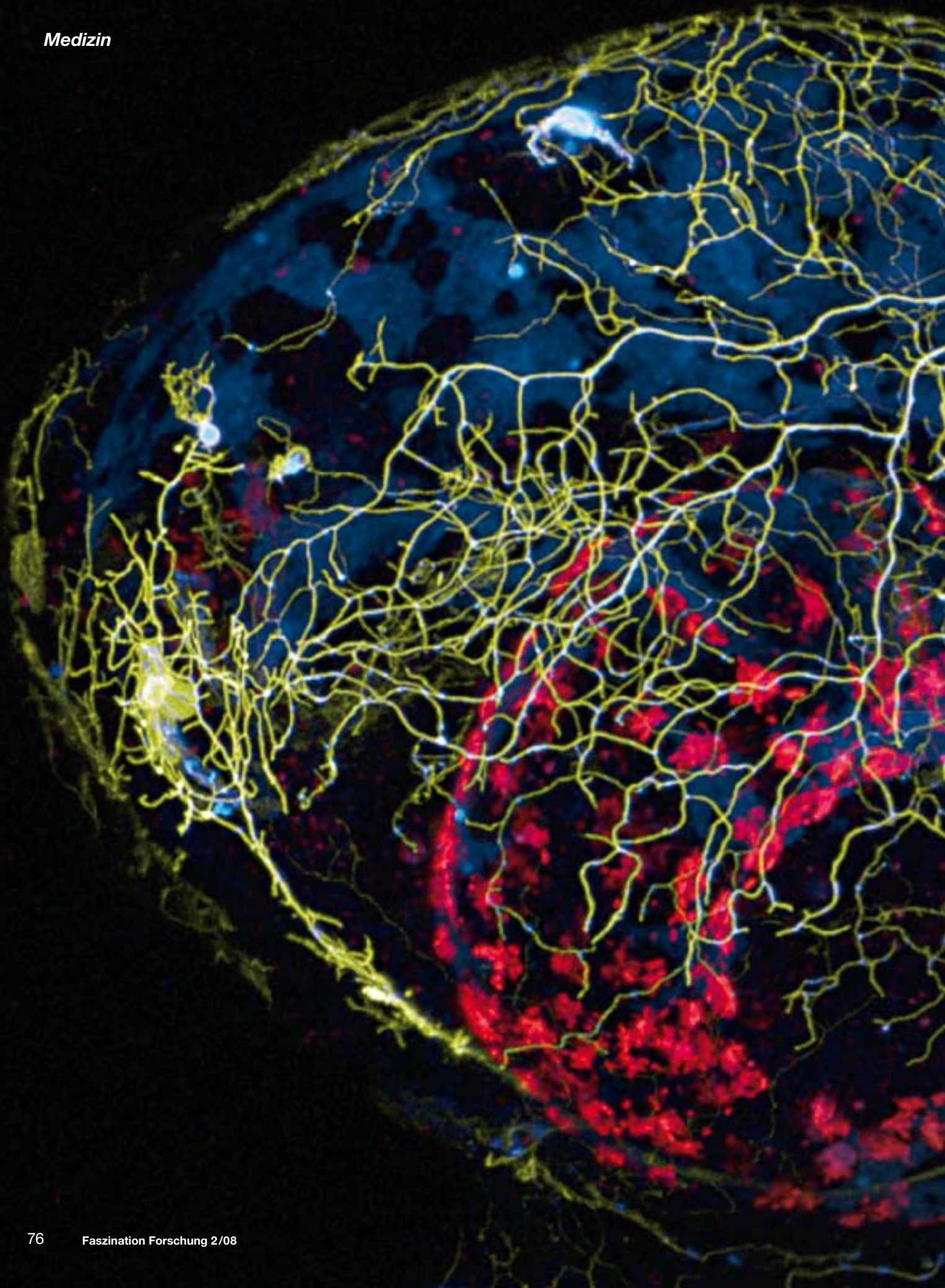
Reiner Korbmann ist seit 35 Jahren Wissenschaftsjournalist. Seit 2001 betreibt er das Büro für Wissenschafts- und Technikkommunikation Science&Media in München. Zuvor war er elf Jahre Chefredakteur von bild der wissenschaft, sechs Jahre Chefredakteur des Computermagazins Chip, drei Jahre Chefredakteur 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.

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

Dr. Brigitte Röthlein arbeitet seit 1973 als Wissenschaftsautorin bei verschiedenen Zeitschriften, bei Fernsehen, Rundfunk und für Zeitungen. Sie ist Diplomphysikerin und promovierte in Kommunikationswissenschaft, Pädagogik und Geschichte der Naturwissenschaften. Von 1993 bis 1996 leitete sie neben ihrer freien publizistischen Tätigkeit das Geschichtsmagazin „Damals“, 2004/5 das Forschungs- und Technologiemaßnahmenmagazin „Innovate“. Sie veröffentlichte Sachbücher unter anderem über Hirnforschung, Atomphysik und Quantenphysik. Im Juli 2008 erscheint ihr neuestes Buch „Der Mond“.

Tim Schröder ist freier Wissenschaftsjournalist in Oldenburg. Er schreibt regelmäßig für die Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung, die Neue Zürcher Zeitung und Mare. Seine Schwerpunkte sind die angewandte Forschung, die Grundlagenforschung sowie die Themen Energie und Umwelt.

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 Fernseh Nachrichten Agentur in Düsseldorf und als freier Mitarbeiter beim Schwäbischen Tagblatt in Tübingen.





Link

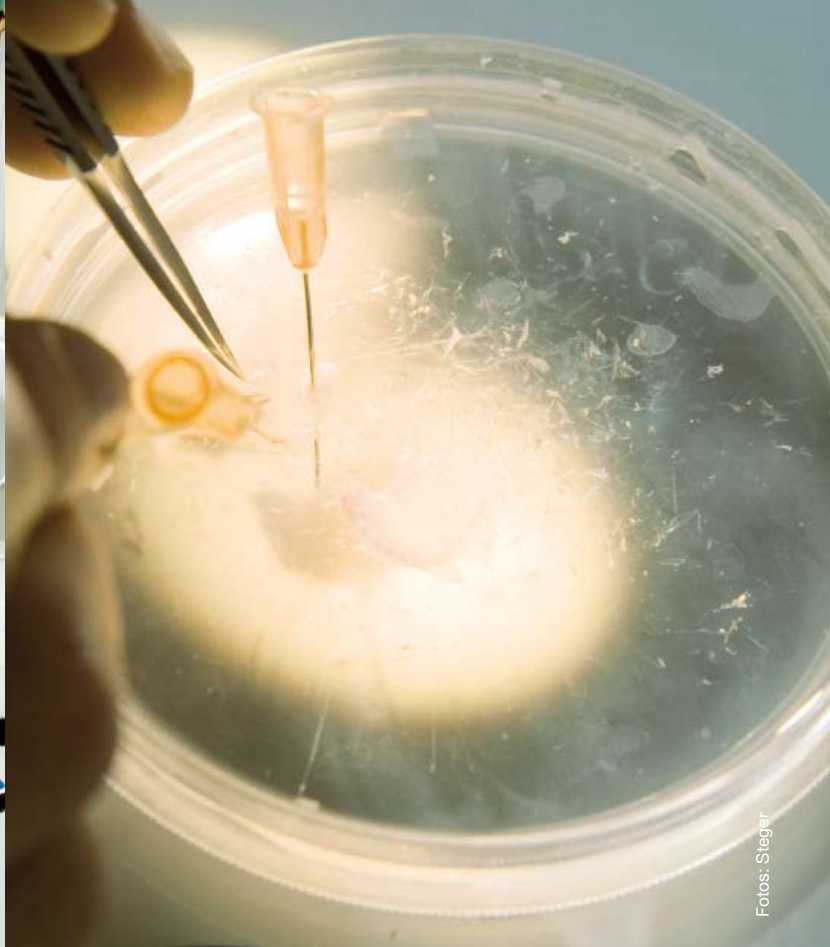
www.misgeld-lab.me.tum.de

Wie Muskeln denken

Wir lernen nicht nur mit dem Kopf – auch die Nerven, die unsere Muskeln steuern, entwickeln sich, während wir als Kinder lernen, komplizierte Bewegungen durchzuführen. Der Mediziner Thomas Misgeld versucht, das Rätsel zu ergründen, wie unser Körper klüger wird

Foto: Dr. Thomas Misgeld

Kopf eines Zebrafisches mit fluoreszent markierten gelben Nervenfasern. Mitochondrien in den Nervenfasern sind zusätzlich blau markiert, während die Augen des Fisches und einige Hauptzellen spontan rot leuchten



Fotos: Steiger

Präparation von fluoreszent markierten Muskeln. Miriam Reuter, TUM-Medizinstudentin und Doktorandin in Misgelds Labor, präpariert einen Muskel zur mikroskopischen Analyse

Ein bunter Ring! Der kleine Conrad guckt interessiert auf das Spielzeug, das sein Vater ihm vor das Gesicht hält. Mit beiden gestreckten Armen patscht der Säugling dagegen, doch mit dem Greifen klappt es noch nicht so richtig: Conrad hält die Finger gestreckt, dann klappen sie zur Faust – daneben. Ein neuer Versuch, und wieder einer. Endlich: Die Hände des Winzlings schließen sich um den Ring, und der wird sofort eingehend mit dem Mund untersucht.

Diese Entwicklung macht jedes Baby durch: Bewegungen wie Greifen oder Laufen muss der kleine Mensch üben, wieder und wieder, bis sie nicht mehr eckig und un gelenk, sondern fließend und zielgerichtet wie von selbst ablaufen. Ein spannender Prozess, findet der Neurowissenschaftler Thomas Misgeld. Denn wie er an der Entwicklung von Mäusen sieht, findet Lernen nicht nur im Gehirn statt – offenbar „lernt“ auch das Nervennetz, welches das Rückenmark mit den Muskeln verbindet. Während Mäuse laufen üben, verändert sich dieses Netz dramatisch und in überraschender Weise: Es wird simpler – obwohl die Bewegungsabläufe komplexer werden.

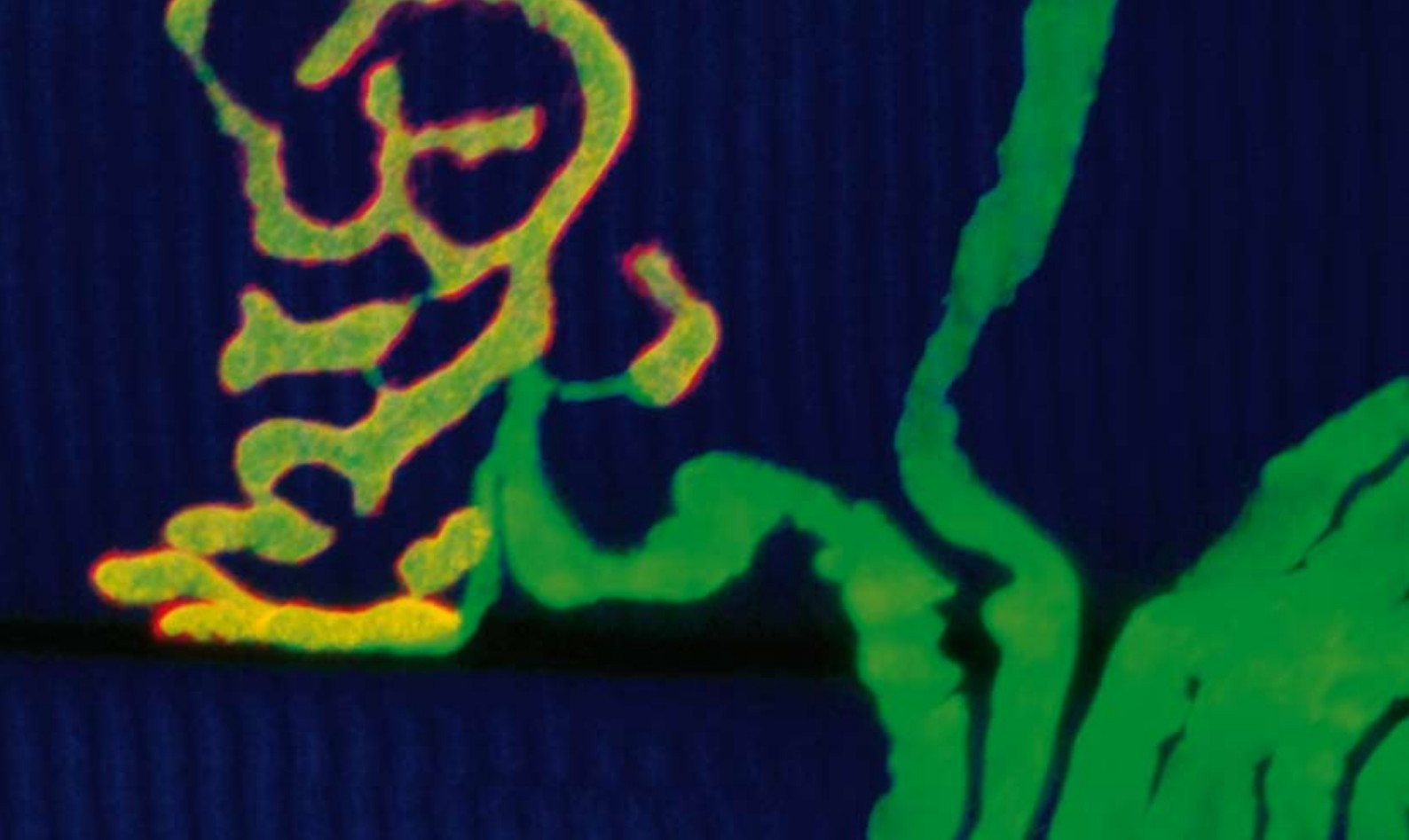
Thomas Misgeld ist Mediziner, „ein TUM-Gewächs“, wie er sagt. Nach mehreren Jahren im Ausland ist er

zurück an seine Universität gekommen, doch ein bisschen wirkt er immer noch wie ein Student: Jeans und schwarzer Pullover, schlank, gestutzter Vollbart: Mit jugendlichem Lächeln begrüßt er den Besucher am Eingang des Instituts. Hinter der altherwürdigen Wohnhausfassade des Hauses herrschen grauweiße Nüchternheit und makellooses Linoleum.

Teure Mikroskope für feinste Nervenäste

Misgelds Labor ist im zweiten Stock, auf dem geräumigen Flur stehen halb ausgepackte, große Holzkisten mit dem Aufdruck einer Mikroskop-Firma. „Vom Nachbarlabor“, erklärt Misgeld. Die Gruppe des Nobelpreisträgers Bert Sakmann bekommt ein Hightech-Gerät. „Unser Institut hat eine der höchsten Dichten hochentwickelter Lichtmikroskope der Welt“, sagt Misgeld stolz und führt den Besucher in sein Labor.

Dort teilen blauschwarze Vorhänge den Raum, die heruntergelassenen Rollos lassen den strahlenden Wintertag draußen nur ahnen. Doch im Halbdunkel geben die überall stehenden Mikroskope den Blick auf feinste Nervenverästelungen preis, die Misgeld mit seinen Mitarbeitern untersucht. Einer der an die Mikroskope angeschlossenen Bildschirme zeigt gefärbte Nervenfasern,



Grün fluoreszente Nervenzellfortsätze (Axonäste) im Muskel einer erwachsenen Maus. Die Synapse ist rot markiert, die zylindrische Muskelfaser ist blau gestreift – wie man leicht erkennen kann, wird die Synapse von genau einem Axonast kontaktiert

so genannte Axone, und Kontaktstellen zu Muskelfasern: Aus einem grünen Schilfbündel zweigen einzelne Halme in Richtung der blau-schwarz gestreiften Muskelbänder ab, wo die Halme in einer Art Blüte als gelbrote Schleife enden – die Synapse. An einer solchen Synapse gibt das Axon sein Signal an den Muskel weiter: Kontrahiere dich!

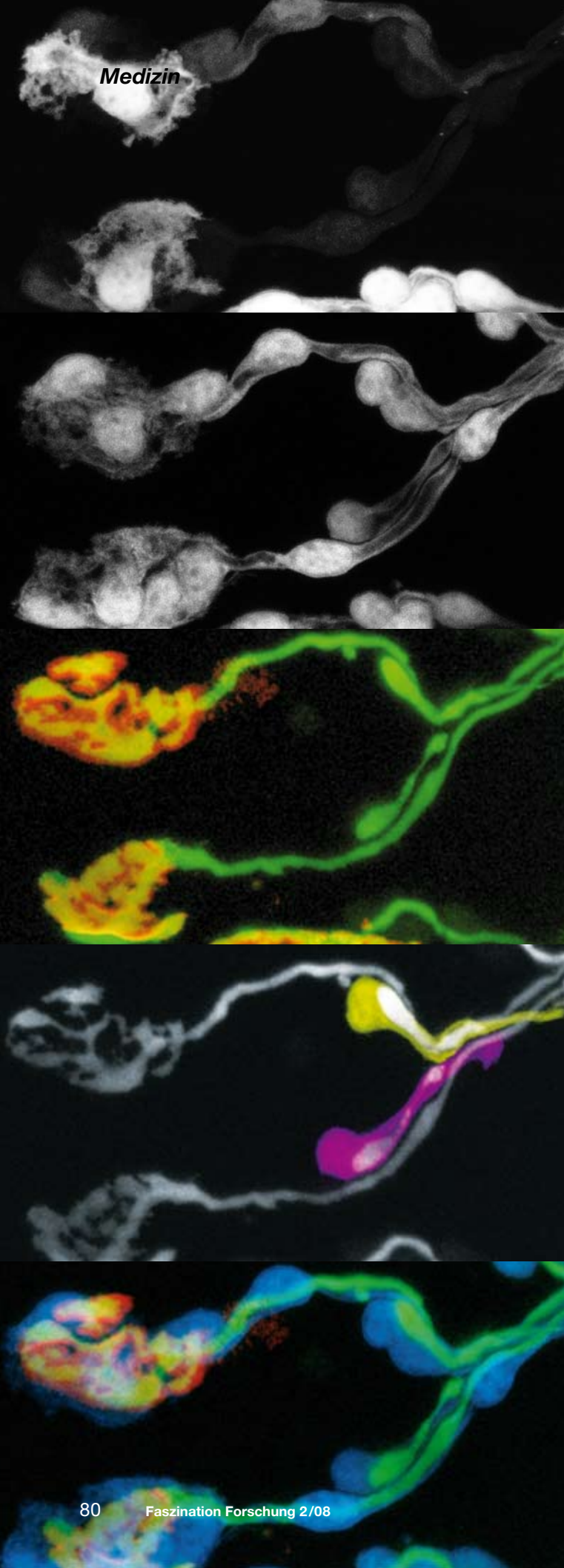
„Jede Muskelfaser wird von genau einem Axon innerviert“, erläutert Misgeld, „jedenfalls im ausgewachsenen Tier.“ Er spricht schnell, die Leidenschaft für das Thema ist ihm anzumerken. Mit einem Mausklick holt er ein anderes Foto auf den Computerschirm. Dort findet sich eine Schleifenblüte mit zwei Halmen: „Jüngere Mäuse besitzen mehrere Axonäste pro Synapse, kurz nach der Geburt können es bis zu zehn sein. Und jeder dieser Axonäste stammt von einer anderen Nervenzelle.“ Im Laufe der Entwicklung verringert sich also die Zahl der Axonäste, die die Synapsen eines Muskels innervieren – in derselben Zeit, in der die Maus laufen lernt.

Synapsen: Nicht Masse, sondern Klasse zählt

Bei Menschenbabys laufen ähnliche Prozesse ab: Die Zahl der Nervenzellen bleibt unverändert, doch das System wird simpler. Ein Prozess, der gar nicht in die

gängige Vorstellung von Entwicklung passt. „Wir glauben immer: Viele Synapsen sind grundsätzlich besser, wir hätten beispielsweise ein größeres Gehirn und wären schlauer“, lächelt Misgeld. Entscheidend ist vielmehr die Art der Verschaltung, die Mäuse wie Menschen im Laufe ihrer Entwicklung zu immer koordinierteren Bewegungen befähigt. Beide Säuger sind kurz nach der Geburt ungelenkt, Mäusebabys haben zudem noch ein ständiges Zittern. Der Grund: Jede Nervenzelle, die ein Signal weitergibt, aktiviert immer 70 bis 80 Prozent der Muskelfasern eines Muskelteils. Muskeln können sich daher nicht nach und nach anspannen, um etwa nach dem Aufsetzen eines Fußes langsam Kraft zu entwickeln und schließlich das Körpergewicht zu tragen.

Wird jede Muskelfaser nur von einer Nervenzelle innerviert, lassen sich die Bewegungen dagegen graduell steuern: In älteren Mäusen gibt es wie im Menschen dann Nervenzellen, die zum Beispiel nur fünf Muskelfasern in einem Bereich aktivieren, andere verzweigen sich wie Bäume in viele Axonäste und steuern 50 oder 100. Werden die Nervenzellen nacheinander angesprochen, lässt sich die Muskelkraft genau dosieren und langsam steigern. Erst durch diese feine Dosierung gelingen die Bewegungen fließend, etwa vom ziel- ▶



genauen Tasten bis zum kräftigen Zugreifen. Bis es soweit ist, müssen sich im Laufe der Entwicklung die meisten Axonäste zurückziehen – Verlierer in der Konkurrenz um Muskelfasern. Misgeld startet einen kurzen Trickfilm mit Knetgummifiguren à la Wallace und Gromit, den amerikanischen Kollegen für einen Studentenkurs gemacht haben.

Die Protagonisten: Zwei Axonäste aus grünem und blauem Plastilin. Die schieben und schubsen sich auf einer roten Synapse zunächst hin und her. „Genau das sehen wir auch bei lebenden Nervenzellen“, kommentiert Misgeld. Dann feuert der grüne Axonast zwei kleine gelbe Bomben ab, und der blaue Ast zieht sich zurück. Für diesen Verlierer interessieren sich Misgeld und seine Arbeitsgruppe, denn er ist offenbar für das erfolgreiche Lernen mitverantwortlich. „Zweifellos sind Hirnrinde und Rückenmark beteiligt, dort beobachtet man ähnliche Prozesse“, meint Misgeld. Insgesamt ist er überzeugt: „Bestimmte Bewegungsabläufe wie zum Beispiel Geige spielen können wir viel besser lernen, wenn wir jung sind.“

Der Verlierer ist interessanter als der Sieger

Das große Rätsel ist das Ereignis, das der Trickfilm durch die kleinen gelben Bomben symbolisiert. „Warum der Gewinner gewinnt und der Verlierer verliert, wissen wir heute noch nicht“, sagt Misgeld. „Wir wissen eigentlich noch nicht einmal, wer Gewinner und wer Verlierer ist, denn es könnte ja auch sein, dass der blaue Axonast gewinnt, weil es ihm gelingt, sich aus der Verantwortung zu stehlen.“

Doch die Wissenschaftler sind dem Verlierer-Axon auf der Fährte: Sie haben eine gentechnisch veränderte Maus gezüchtet, deren Nervenfasern grün oder blau fluoreszieren. Damit gelingt es den Forschern, den Rückzug von Axonästen unter dem Mikroskop zu beobachten und sogar in Filmen festzuhalten: Die Nervenfaser zerfällt nicht auf ihrer ganzen Länge gleichzeitig, wie das nach Verletzungen geschieht, wenn sich Axone in kurzer Zeit – Misgeld schnippt mit dem Finger –, auflösen. Vielmehr lösen sich von der Spitze nach und nach kleine Stücke, der Axonast schmilzt ab wie ein Eiszapfen. Axosomen-Shedding bezeichnen die Wissenschaftler diesen Vorgang – „Es ist immer schön, wenn man etwas benennen kann“, grinst Misgeld – und mittlerweile ist es ihnen in Kooperation mit einer US-amerikanischen Gruppe gelungen, hochauflösende Elektronenmikroskop-

Der Tod eines Axons. Zwei grüne Axon-Äste innervieren zwei rot markierte Synapsen (mittleres Bild). Zwei weitere Axon-Äste befinden sich auf dem Rückzug und enden blind in Schwellungen, die oft von kleinen Axonfragmenten umgeben sind

Bilder des Axosomen-Sheddings zu erhalten. Auf diese Weise wurde klar: Die abgelösten Axon-Teile sind von so genannten Gliazellen umschlossen, die die Nervenfasern elektrisch isolieren und offenbar auch im Axon-Shedding eine wichtige Rolle spielen.

Internet über die Wasserleitung

Neben den Gliazellen verfolgt Misgeld noch eine weitere Spur: Den Transport der Kraftwerke der Zellen, der Mitochondrien. Diese sind normalerweise unsichtbar, Misgeld gelang jedoch zusammen mit seinem Kooperationspartner, Martin Kerschensteiner von der Ludwig-Maximilians-Universität München, die Züchtung von Mäusen mit fluoreszierenden Mitochondrien.

Unter dem Mikroskop bot sich den Neurowissenschaftlern ein faszinierendes Bild: Wie auf einer Autobahn bei Nacht sausen die winzigen, ovalen Mitochondrien durch die Nervenfaser, an Verzweigungen biegen sie links oder rechts ab, 10 000 passieren eine solche Stelle pro Tag. „Dabei ist die primäre Aufgabe einer Nervenzelle ja eigentlich die elektrische Weiterleitung von Signalen, der Mitochondrien-Transport kommt noch dazu“, erläutert Misgeld. „Das ist ein bisschen so, als ob man seinen Internetanschluss über die Wasserleitung bezieht.“

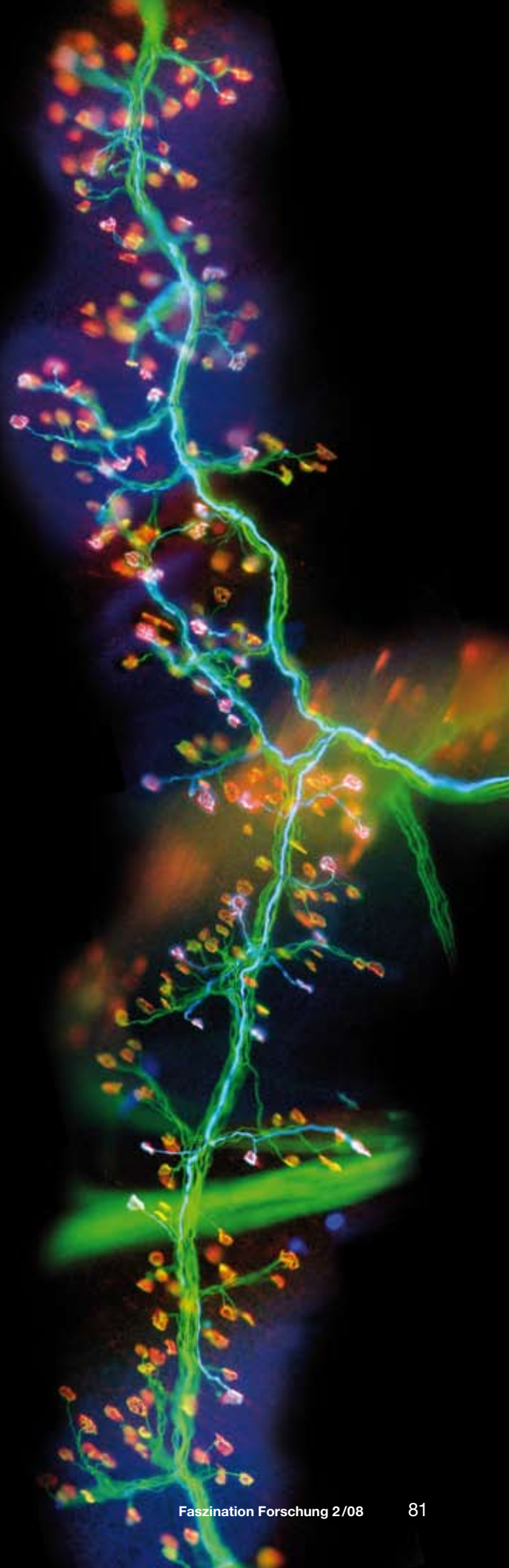
Bei den Verlierer-Axonästen fiel den Wissenschaftlern auf: Hier kommt der Verkehr der Mitochondrien zum Erliegen. Ob das Ursache oder Folge für den Rückzug der Axonäste ist, wird zurzeit intensiv erforscht.

Schmelzende Nerven, sausende Mitochondrien

Dabei sollen Misgeld kleine blau gestreifte Fische helfen: Zebraquärlinge sind als Larven durchsichtig, und Fluoreszenzgene zur Markierung von Nervenzellen und Mitochondrien lassen sich verhältnismäßig leicht einpflanzen. Zur Untersuchung werden die Fische vorübergehend betäubt, dann lässt sich die ganze Nervenzelle mit allen Axonästen beobachten. Sogar einzelne Mitochondrien möchte Misgeld dann per Mikroskop verfolgen: „Irgendwann werden wir statt der Stellschrauben des Mikroskops einen Joystick brauchen“, lacht er.

Noch wartet Thomas Misgeld auf die Genehmigung, die Zebraquärlinge halten zu dürfen. Aber bald werden die Quärlinge ebenso wie die Mäuse dabei helfen, die biologischen Mechanismen hinter abschmelzenden Nervenfasern und sausenden Mitochondrien zu verstehen. Und damit das Rätsel lösen, wie Conrad und andere Babys greifen und laufen lernen. *Dr. Markus Bernards*

Die Innervation eines Muskels. Die Axone, die den Muskel innervieren, sind alle grün markiert; ein einzelnes leuchtet zudem in Blau. Die Synapsen des Muskels erscheinen als rot leuchtende Flecken



Hubert Markl

Der Preis des Preises

Das Wissen, das die Universitäten hervorbringen, darf nicht sich selbst dienen, es muss der Gesellschaft zugute kommen. Daher ist die Kür von exzellenten Universitäten zu Elite-Unis nur ein Baustein in einem erfolgreichen Bildungssystem. Ebenso müssen die Ausbildung der Studierenden gefördert und die Arbeit aller Wissenschaftler besser anerkannt werden.



Wenn eine Institution öffentlich als exzellent ausgezeichnet wird, dürfen ihre Mitglieder zu Recht stolz darauf sein, zumal wenn andere dies von ihr sagen, die wohl wissen, wovon dabei die Rede ist. Kein Kundiger konnte verwundert sein, dass gerade die TUM (und natürlich genauso die Ludwig-Maximilians-Universität in München, immerhin meine eigene alma mater!) besonders schnell als herausragend erkannt und anerkannt wurden. Denn es ist gut, dies nicht nur selbst zu wissen.

Dennoch hat im Leben jeder Preis auch seinen Preis: jeder Lobpreis nämlich seinen Kostenpreis, der auch nicht übersehen werden darf. So wichtig es auch war, dass die deutschen Universitäten durch den frischen Wind der Exzellenzsuche durchgewirbelt wurden: Es bleibt doch wahr, dass Universitäten nicht für Politik und Medien da sind; nicht einmal für die Wissenschaft selbst! Dass nämlich auch Wissen, das sie hervorbringen, nicht vor allem dem Wissen selbst dienen sollte, und dass selbst Nobelpreise zwar viel über jene sagen mögen, die durch sie zu Recht gerühmt werden, aber doch oft nur begrenzt für die ganze Gesellschaft, vor allem aber zur Volkswirtschaft beitragen können, wenn nicht eine Unzahl „einfacher“ Naturwissenschaftler, Ingenieure und Techniker das umzusetzen helfen, was dann erst allen zugute kommen kann.

Um diese „einfachen“ Leistungserbringer muss man gerade im alternden Deutschland sehr bemüht sein, wo auch immer sie ausgebildet werden, auch an den „minderen“ Hochschulen, und kei-

neswegs nur an jenen, die nun für ihre hervorragenden Leistungen als Elitehochschulen gepriesen werden. Und zwar in allen Fächern, denn wir werden leistungsfähige junge Frauen und junge Männer von ihnen allen brauchen – und nicht nur von denen, die im Glanz erstrahlen! Sollte also jemand glauben, man könne an den nicht ausgezeichneten Universitäten und Fachhochschulen einsparen, was man den Elite-Institutionen zukommen lässt, so täuscht der sich sehr. Das Gegenteil ist richtig: Nur wenn es dem gesamten Ausbildungssystem gut geht – und das schließt Kindergärten und Schulen ein – dann kann auch Exzellenz an den ausgewählten wenigen Stätten blühen. Man könnte es auch anders sagen: Der Preis ist eben der Preis des Preises!

„An ihren Früchten sollt ihr sie erkennen“, ist zwar eine alte christliche Weisheit. Aber weder ist sie veraltet, noch gilt sie nur für Christen. Deshalb müssen sich alle Hochschulen – selbst wenn das die Preise für die besten davon schmälern sollte! – mehr denn je darum kümmern, damit ihre Absolventen richtig reifen und rechtzeitig von der gesamten Gesellschaft geerntet werden können. Vergessen wir daher im Jubel über die Auszeichnung nicht, dass hinter jeder bedeutenden Frau und hinter jedem großen Gelehrten, die im Rampenlicht stehen, auch künftig viele – und oft genug gar nicht einmal so viel schlechtere – Wissenschaftler und Techniker stehen, die ihnen erst dazu verhelfen, ihre Größe entwickeln zu können und dann voll Stolz vorzuzeigen. □

Hubert Markl, 1938 in Regensburg geboren, lehrte als Biologe an den Universitäten Frankfurt am Main, Darmstadt und Konstanz. Von 1986 bis 1991 war er Präsident der Deutschen Forschungsgemeinschaft, von 1993 bis 1996 Präsident der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften und von 1996 bis 2002 Präsident der Max-Planck-Gesellschaft.

PHILIPS



Einfachheit bedeutet zuverlässige Diagnose und Behandlung für jeden Patienten.

Panorama HFO. Kein Patient gleicht dem anderen, aber die Qualität ihrer Untersuchungen sollte immer die Gleiche sein. Nur Philips liefert die bahnbrechende offene MRT-Konstruktionsweise zur Verbesserung des Komforts von Patient und Arzt. So sind auch minimalinvasive Eingriffe mit bester Weichteilkontrast-Darstellung möglich. Bessere Bilder helfen Ihnen bei der frühzeitigen Erkennung und Behandlung von Krankheiten. Wenn Sie mehr erfahren möchten, wenden Sie sich an Philips. Das macht einfach Sinn. Telefon 01805 767 222 (0,14 EUR/Min. inkl. MwSt. aus dem dt. Festnetz, ggf. abweichende Mobilfunkpreise).

www.philips.de/medizin

PHILIPS
sense and simplicity

Vielfalt in Lehre und Forschung

