



TUM

Das Wissenschaftsmagazin der Technischen Universität München
Dezember 2012 | Ausgabe 11

TUM

www.bmwgroup.jobs

LEIDENSCHAFT SCHAFFT ZUKUNFT.

JETZT BEI DER BMW GROUP EINSTEIGEN UND DIE ZUKUNFT DER MOBILITÄT GESTALTEN.

Man kann viel über die Zukunft der Mobilität reden. Im Team der BMW Group wird sie gemacht. Mit innovativen Technologien für mehr Nachhaltigkeit, Effizienz, Sicherheit, Umweltverträglichkeit und natürlich Fahrspaß. Um diese Innovationen zu entwickeln und auf die Straße zu bringen, brauchen wir Menschen wie Sie. Menschen mit einem eigenen Kopf und einem klaren Ziel: So schnell wie möglich die Theorie mit der Praxis zu verbinden und mit viel Freiheit und Gestaltungsspielraum für große Ideen die Welt der Mobilität zu verändern. Wenn Sie diese Leidenschaft antreibt, sind Sie bei uns genau richtig. Wir suchen

Studenten und Absolventen aus dem Ingenieurbereich sowie anderen Fachbereichen.

Informieren Sie sich jetzt über die vielfältigen Einstiegsmöglichkeiten und Herausforderungen bei der BMW Group für unser Team in München, Leipzig oder einem anderen Standort. Egal ob Sie über ein Praktikum, Ihren Studienabschluss- bzw. Doktorarbeit, als Trainee oder Direkteinsteiger zu uns kommen: Wir planen mit Ihnen zusammen Ihre individuelle Erfolgsgeschichte bei der BMW Group. Wir freuen uns auf Sie. Machen Sie jetzt den ersten Schritt.



Details, konkrete Stellenangebote und die Möglichkeit zur Online-Bewerbung finden Sie auf www.bmwgroup.jobs. Oder direkt über den QR Code.



www.facebook.com/bmwkarriere

BMW GROUP
Recruiting



Rolls-Royce
Motor Cars Limited

Faszination Forschung

Eine Brille für die dunkle Seite der Welt

Geheimnis des kürzesten Weges: Mathematiker knacken ungelöste Probleme

Im Grenzbereich der Metalle: Eine chemische Matroschka

Die Beerdigung des Klimakillers: Wie Böden Kohlenstoff speichern

Faszination Forschung 11 / 2012

ISSN 18653022
9 177 1865 302004

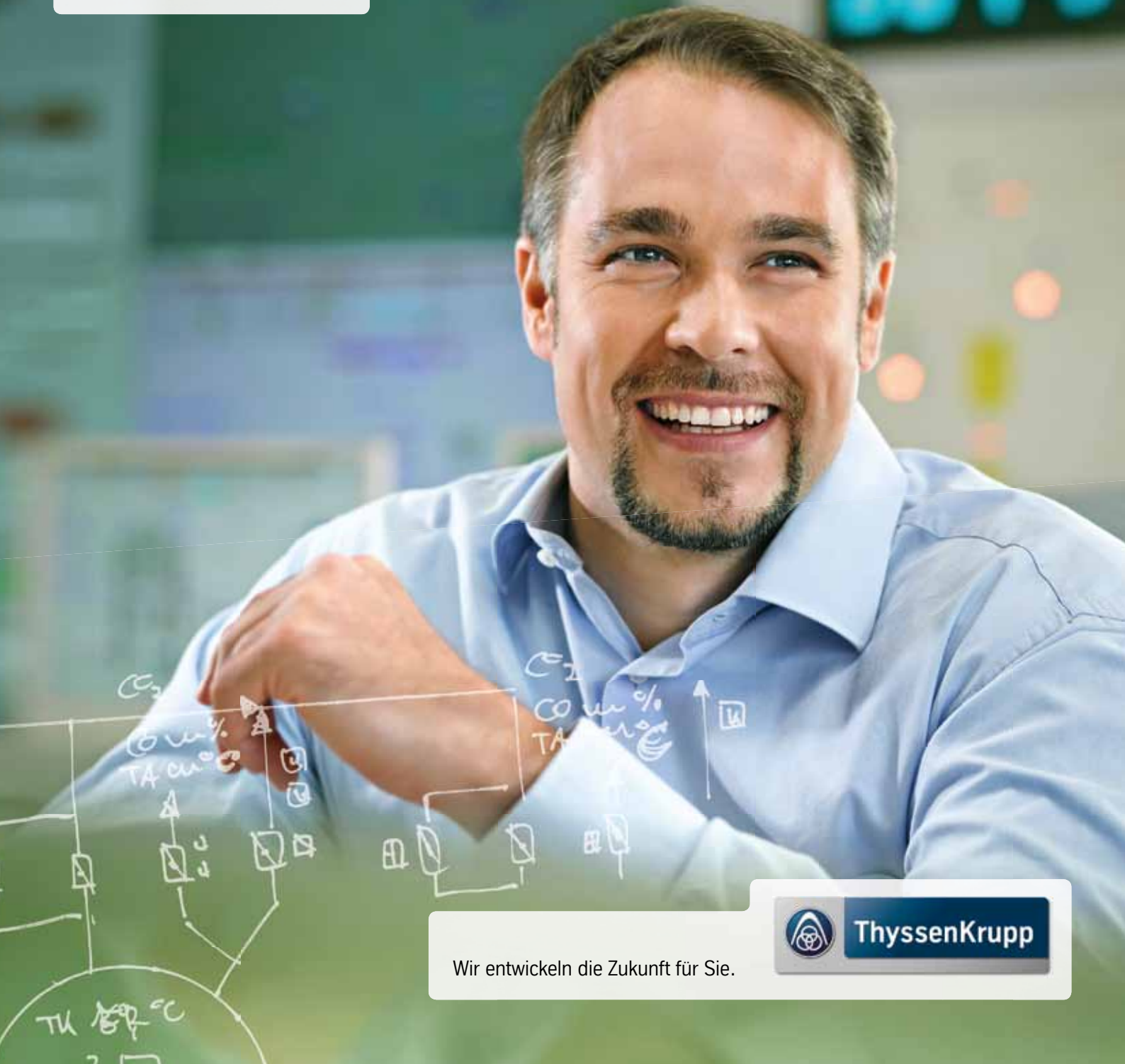
Schutzgebühr
9,- Euro



Große Herausforderungen gehören für Sie zum kleinen Einmaleins? Werden Sie einer von uns.

Genau wie Andreas Eichstaedt, Teamleiter „Management Prozesse Roheisen“ bei der ThyssenKrupp Steel Europe AG in Duisburg, unserem Spezialisten für intelligente Stahlprodukte. Als einer von uns stellt er sich jeden Tag der Herausforderung, eine der größten Roheisen-Produktionsstätten Europas noch effizienter zu machen. Wenn auch Sie echte Herausforderungen suchen und engagiert großen Aufgaben begegnen, werden Sie einer von uns.

www.thyssenkrupp.com/karriere



ThyssenKrupp

Wir entwickeln die Zukunft für Sie.

Liebe Leserinnen und Leser,

Wir leben auf Böden, und wir leben mit den Böden. Sie liefern uns Nahrung, sie prägen unsere Landschaft, sie bilden das wirtschaftliche Kapital unserer Landwirte. Und sie speichern Kohlendioxid – nach den Ozeanen sind Böden der wichtigste Speicher für das Klimagas. In diesem Heft stellen wir Ihnen aktuelle Forschungsprojekte rund um Böden aus verschiedenen Perspektiven vor. Jedes Thema hat große Relevanz für viele Menschen dieser Erde.



Wer mit dem Flugzeug nach München kommt, blickt auf ein Mosaik verschiedenfarbiger Felder. Die kleinen, räumlich verteilten Einheiten sind oft ein Nachteil unserer Bauern gegenüber Landwirten anderer Länder, die große Flächen bewirtschaften. Der Mathematiker Peter Gritzmann entwickelt Computermodelle, mit denen Bauern zunächst virtuell Felder tauschen und schließlich die für alle optimale Verteilung finden können. Um den Einfluss des Klimawandels auf unsere Vegetation geht es der Ökologin Annette Menzel. Die Koautorin des letzten Sachstandberichts des Weltklimarates IPCC hat einen der begehrten ERC Starting Grants des Europäischen Forschungsrats erhalten. Sie entwickelt unter anderem ein Frühwarnsystem für Waldbrände, das auf Messungen der Bodenbeschaffenheit beruht. Messtechnik steht auch im Mittelpunkt der Arbeit von Ingrid Kögel-Knabner. Die Bodenkundlerin sucht nach Methoden, um die Fruchtbarkeit der Böden zu verbessern, und setzt dabei auf ausgefeilte Messtechnik, wie sie sonst in der Materialwissenschaft üblich ist.

Mithilfe der Nanotechnologie setzt Johann Plank Meilensteine für die Bautechnik. Sein Institut für Bauchemie schuf kürzlich den weltweit festesten Beton – verstärkt mit dem

Nanomaterial Graphenoxid. Von Grund auf neue Materialien ersinnt Thomas F. Fässler. Im Labor des Chemikers entstehen metallische Verbindungen, die sehr aktuelle Probleme lösen können: als hocheffiziente Katalysatoren etwa oder als Supraleiter mit neuartigen Eigenschaften. Nach Teilchen, die bisher niemand gesehen hat, sucht Jean-Côme Lanfranchi vom Exzellenzcluster Universe. Tief unter dem italienischen Gran-Sasso-Massiv stellt er in internationaler Kooperation dunkler Materie nach. Entscheidend für seine Arbeit sind Spezialisten vom Kristalllabor der TUM, die als eine von sehr wenigen Gruppen weltweit in der Lage sind, Kristalle für den hochempfindlichen Teilchendetektor zu züchten.

Hans-Jürgen Wester liegt eine bessere Behandlung von Krebspatienten am Herzen. In jahrelanger Arbeit suchte er nach einem neuen Marker für die Positronen-Emissions-Tomographie, mit deren Hilfe ein Arzt gleich zu Beginn einer Chemotherapie klären kann, ob der Patient darauf anspricht oder nicht.

Eine spannende Lesereise in unser Laboratorium wünscht Ihnen

JH
 Wolfgang A. Herrmann

Prof. Wolfgang A. Herrmann
 Präsident

In dieser Ausgabe

Seite 70

Die Beerdigung
des Klimakillers

Seite 18

Geheimnis des
kürzesten Weges

Seite 40

Ein neuer Marker für
die Tumordiagnostik

Seite 52

Hightech-Baustoffe

TUM Mediziner verbessern bildgebende Verfahren –
und in Zukunft vielleicht auch die Therapie

Im Labor von Prof. Johann Plank entstehen Betonmi-
schungen mit Rekordfestigkeit und andere neue Baustoffe

Titelgeschichten

- Eine Brille für die dunkle Seite der Welt**
Forscher versuchen, dunkle Materie
nachzuweisen. 6
- Geheimnis des kürzesten Weges**
Mathematiker knacken mit Computermodellen
bisher ungelöste Probleme. 18
- Die Beerdigung des Klimakillers**
Bodenkundler untersuchen, wie Kohlenstoff
im Boden gebunden wird 70
- Im Grenzbereich der Metalle**
TUM Chemiker entwickeln neue Substanzklassen,
die bei der Energiewende große Bedeutung
erlangen könnten 86

Forschung und Technik

- Alpenwälder in Gefahr**
Ökologiklimatologen wollen Waldbrandgefahren
künftig besser abschätzen 28
- Reaktionslawine am Ursprung des Lebens**
Der Ursprung des Lebens im Labor 38
- Ein neuer Marker für die Tumordiagnostik**
TUM Mediziner wollen helfen, die richtige
Therapie für Tumorpatienten zu finden. 40
- Navigation mit Bilddaten**
NAVVIS – das Navigationssystem
für Innenräume 50
- Superleichte Materialien und
Kohlenstoff-Nanoschichten**
Bauchemiker entwickeln völlig neuartige Baustoffe. . . . 52

Fotos/Darstellungen Reihe oben: Heddergott/TUM; edlundsepp; Heddergott/TUM
Fotos/Darstellungen Reihe unten: Heddergott/TUM; Eckert/TUM;
Peter Pattavina/istockphoto.com; edlundsepp

Titelgeschichte: Eine Brille für die dunkle Seite der Welt



Alpenwälder in Gefahr

Durch die globale Erwärmung werden Waldbrände in den Alpen zunehmen, warnt Ökologin Annette Menzel



Navigation mit Bilddaten

Orientierung in Gebäuden: Eine neue Technik weist anhand von 3-D-Daten den Weg

Lithiumanreicherung im Gehirn
Wie das Antidepressivum wirkt 68

Eine molekulare Nanosolarzelle
Protein fungiert als Elektronenpumpe 84

Rubriken

Editorial 3

Autoren 66

Impressum 66

Standpunkt: Ulrich Wilhelm
Wissensvermittlung in den Medien 98

Weise Worte der Wissenschaft

Werner Heisenberg (1901 – 1976)
Wirkliches Neuland in einer Wissenschaft kann wohl nur gewonnen werden, wenn man an einer entscheidenden Stelle bereit ist, den Grund zu verlassen, auf dem die bisherige Wissenschaft ruht, und gewissermaßen ins Leere zu springen.

Auguste Comte (1798 – 1857)
Sehen, um vor auszusehen, so lautet der Spruch der wahrhaften Wissenschaft.

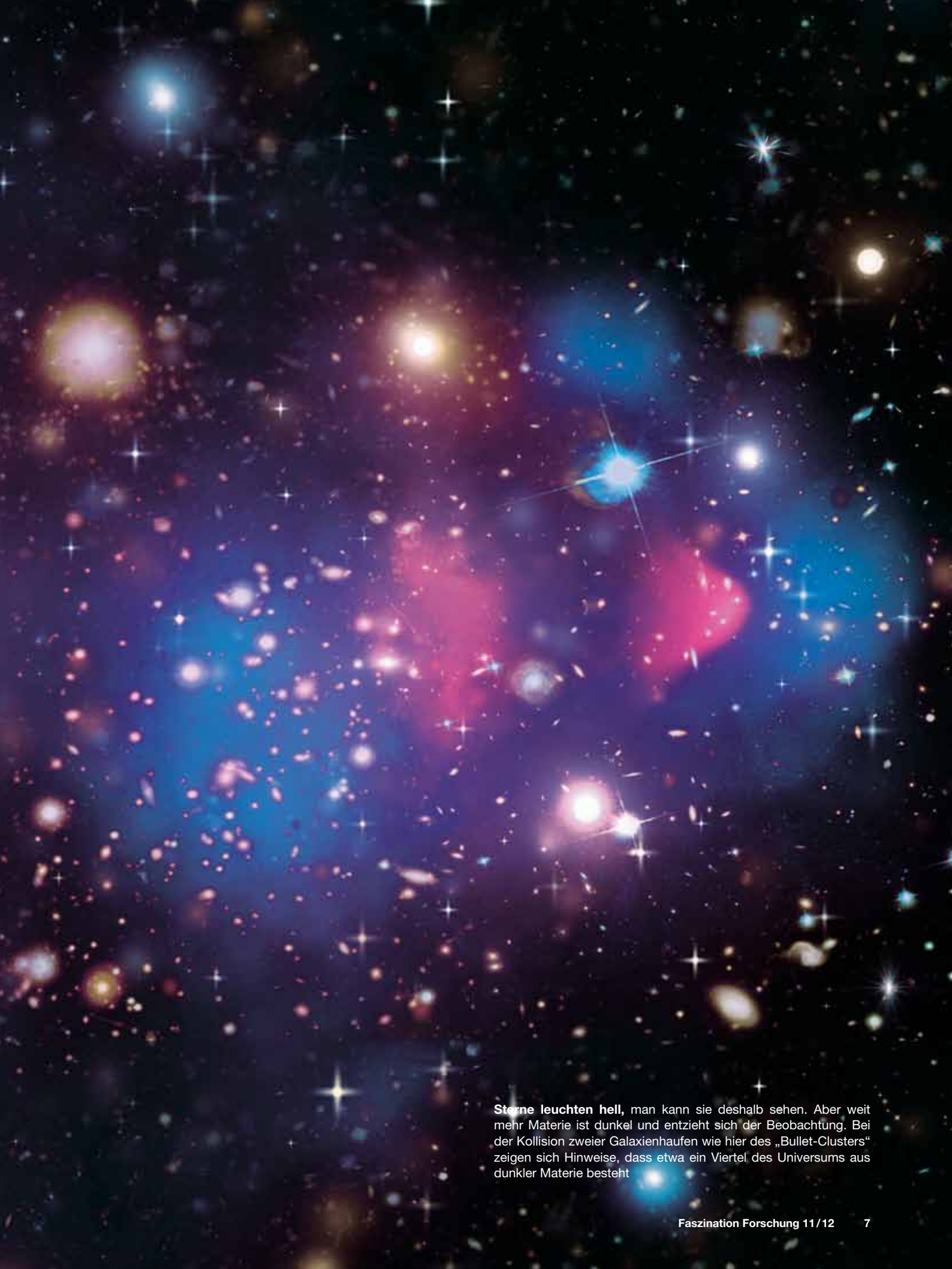
Carl Friedrich Gauß (1777 – 1855)
Es ist nicht das Wissen, sondern das Lernen, nicht das Besitzen, sondern das Erwerben, nicht das Dasein, sondern das Hinkommen, was den größten Genuss gewährt.

Eine Brille für die dunkle Seite der Welt

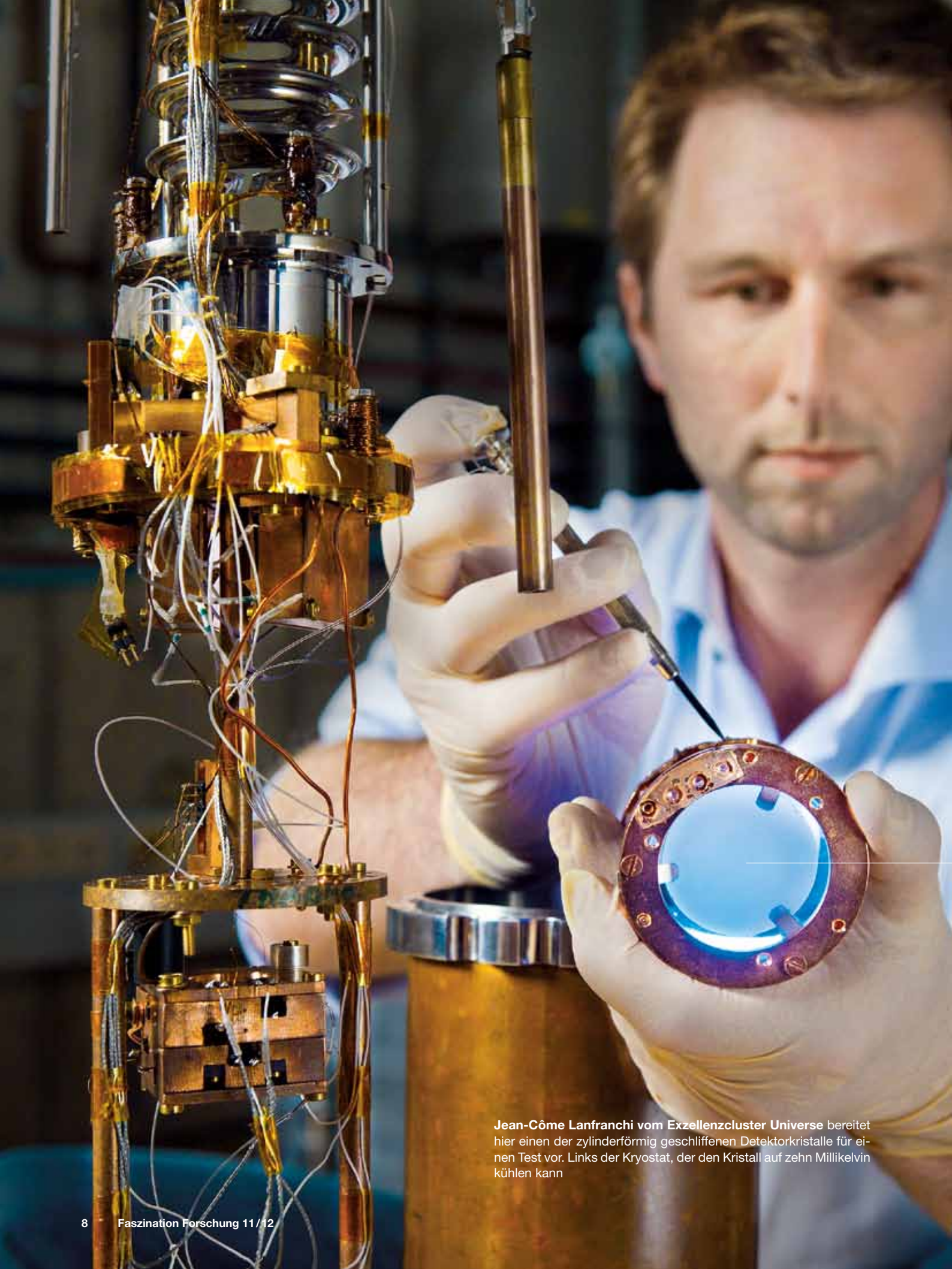
Tief unter dem Gran-Sasso-Massiv in Italien versuchen Forscher, dunkle Materie nachzuweisen. Die entscheidende Rolle spielen dabei Kristalle, die von Spezialisten der TU München mit sehr viel Geduld und Know-how angefertigt und zu höchst empfindlichen Detektoren gemacht werden

Links

www.e15.ph.tum.de/research_and_projects/cresst
www.universe-cluster.de



Sterne leuchten hell, man kann sie deshalb sehen. Aber weit mehr Materie ist dunkel und entzieht sich der Beobachtung. Bei der Kollision zweier Galaxienhaufen wie hier des „Bullet-Clusters“ zeigen sich Hinweise, dass etwa ein Viertel des Universums aus dunkler Materie besteht



Jean-Côme Lanfranchi vom Exzellenzcluster **Universe** bereitet hier einen der zylinderförmig geschliffenen Detektorkristalle für einen Test vor. Links der Kryostat, der den Kristall auf zehn Millikelvin kühlen kann

Szintillierende Kristalle
aus Kalziumwolframat



Warum es dunkle Materie geben muss

Spiralgalaxien wie beispielsweise unsere Milchstraße würden von der Fliehkraft zerrissen, wenn es nicht eine Art von dunkler Materie gäbe, die sie durch ihre Gravitation zusammenhalten würde. Im Außenbereich solcher Galaxien ist die Rotationsgeschwindigkeit sehr hoch, und die beobachtete leuchtende Materie reicht nicht aus, um ihren Zusammenhalt zu erklären. Neben derartigen Beobachtungen, wie sie Fritz Zwicky schon 1933 machte, gibt es inzwischen weitere Hinweise: Gravitationslinsen beugen das Licht in weit stärkerem Maß, als dies nach ihrer sichtbaren Materie geschehen dürfte. Auch Kosmologen, die darüber nachdenken, was kurz nach dem Urknall geschehen sein mag, fanden Hinweise, die auf die Existenz dunkler Materie hindeuten, etwa die Strukturbildung im Universum, die sich mit dunkler Materie in Simulationen perfekt erklären lässt.

Es war eine Katastrophe: Kaum war Hermann VIII. aus dem Ofen genommen und auf den Tisch gelegt worden, machte er leise klack, klack, klack und zersprang in mehrere Stücke. Dr. Andreas Erb, der das Werden des Einkristalls in mehr als zehnstündiger Sitzung beobachtet und überwacht hatte, war wie vom Donner gerührt. Erst nachträglich ging ihm auf, was das wertvolle Stück zerstört hatte: Im Ofen hing der Kristall senkrecht nach unten, und entsprechend hatten sich Spannungen in seinem Inneren aufgebaut. Sobald die ausgleichende Zugspannung fehlte, weil der Kristall waagrecht lag, führten die Spannungen zum Bruch des Materials.

Der Physiker und Kristallzüchter Erb hat aus dem Debakel gelernt: Heute zieht er große Kristalle so, dass sie „schmalere Schultern“ haben. „Ich habe mir das von den alten Dombaumeistern abgeschaut“, sagt er, „denn auch bei deren Bauten ging es darum, wie man Querkräfte wirkungsvoll ableiten kann. Und da kommt es auf steile Winkel an.“ Mittlerweile ist es Erb gelungen, mehrere perfekte Kristalle herzustellen, die jeweils über 850 Gramm schwer sind. Und weil sie ihm ans Herz gewachsen sind, hat er ihnen Namen gegeben: Er hat sie nach Markgrafen aus seiner badischen Heimat benannt. Da gibt es Philibert und Jakob

II. oder Bernhard III. „Momentan sind wir in der Bernhardinischen Hauptlinie des Hauses Baden bei Ludwig Wilhelm angekommen, der wegen seiner Verdienste in den Türkenkriegen auch Türkenlouis genannt wurde und im 17. Jahrhundert ein richtiggehender ‚Popstar‘ war“, erzählt Erb. Auch der Ludwig Wilhelm aus dem TUM Kristalllabor kann Geschichte schreiben: Zusammen mit anderen markgräflichen Einkristallen wird er quaderförmig zugeschliffen und spielt ab Ende des Jahres die Hauptrolle in einem wissenschaftlichen Krimi: Im Experiment CRESST (Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers) im Gran-Sasso-Untergrundlabor, an dem außer TUM Forschern noch Physiker des Max-Planck-Instituts für Physik in München und der Universitäten Tübingen und Oxford teilnehmen, soll er dabei helfen, Teilchen der geheimnisvollen dunklen Materie dingfest zu machen.

Wenige Millionstel Grad

Dass diese Kristalle dazu in der Lage sind, liegt an ihrem Material: Sie bestehen aus Kalziumwolframat, einer transparenten Substanz. „Sie hat die Eigenschaft, dass sie beim Eindringen eines Teilchens zwei Reaktionen parallel zeigt“, sagt Dr. Jean-Côme Lanfranchi, Gruppenleiter ▶

an der TUM und Mitglied der CRESST-Kollaboration. „Das Kristallgitter gerät in Schwingung, dadurch erwärmt sich der Kristall um einige Millionstel Grad, und gleichzeitig gibt der Kristall abhängig von dem einfallenden Teilchen einen unterschiedlich starken Lichtblitz ab – wir Physiker nennen das Szintillation.“ Genau diese Fähigkeit wollen sich die Forscher zunutze machen, um Teilchen zu finden, die bisher weltweit noch niemand mit Sicherheit nachweisen konnte: sogenannte WIMPs. Die englische Abkürzung steht für „Weakly Interacting Massive Particles“, also Teilchen, die zwar massiv sind, aber nur schwach mit unserer „normalen“ Materie wechselwirken.

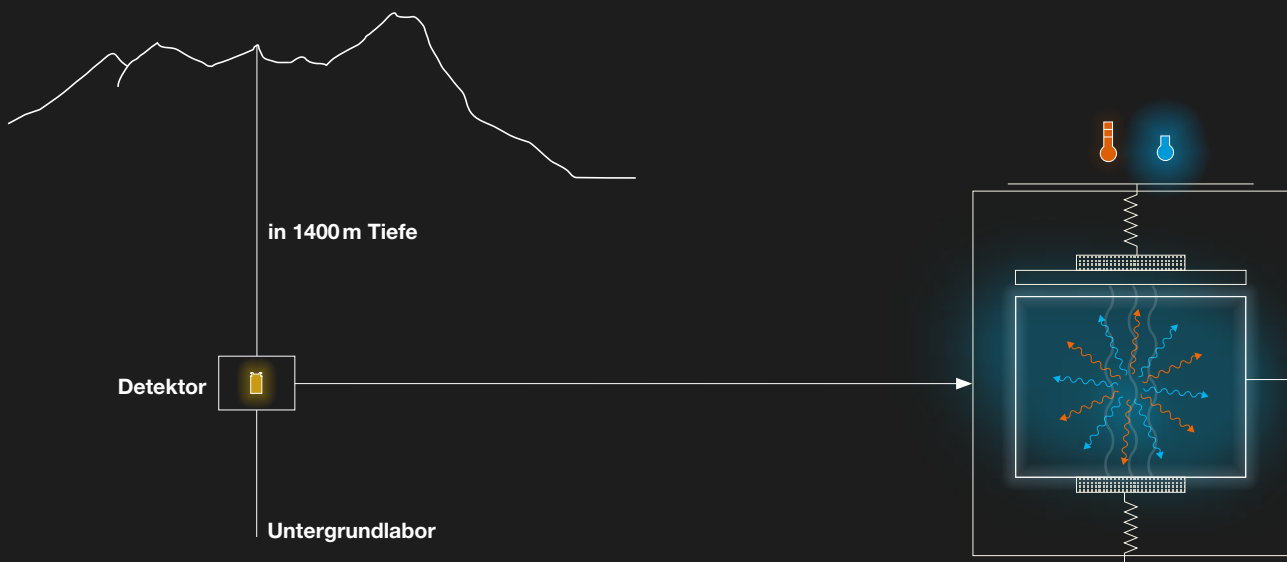
Dass sie dies nur sehr selten und dann nur sehr schwach tun, ist der Grund, warum man bisher keine WIMPs zu fassen bekam. Denn obwohl man annimmt, dass sie so schwer sind wie unsere Atome und dass sich im Mittel in der Milchstraße etwa ein WIMP pro Kaffeetasse befinden müsste, fliegen sie praktisch ungestört auch durch massivste Körper hindurch.

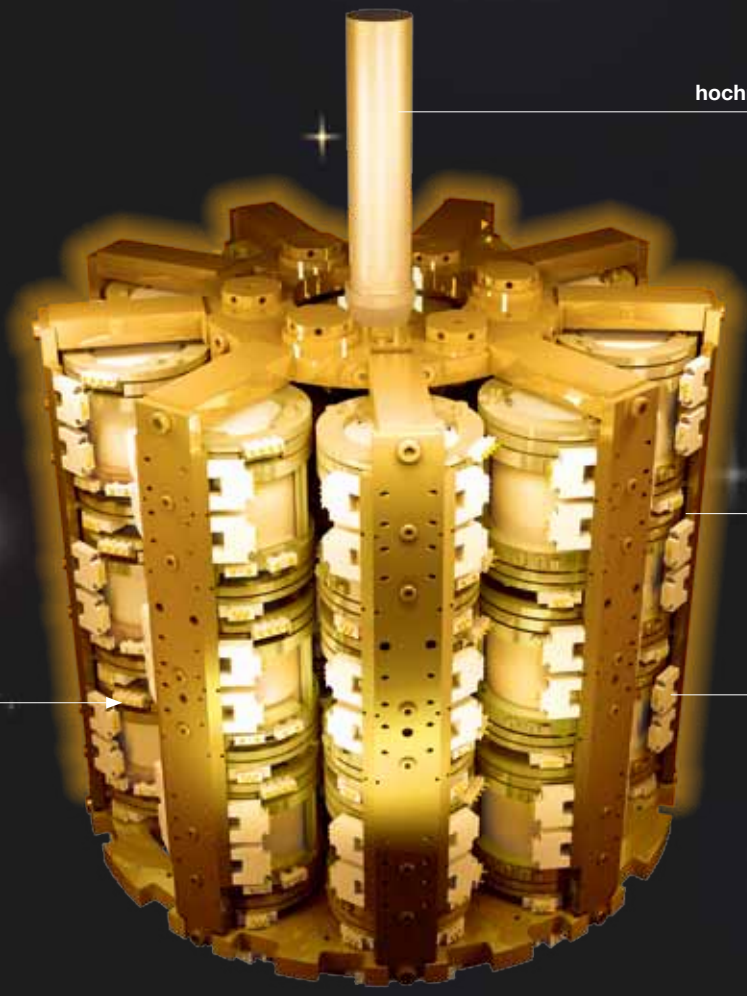
Um möglichst viele Einflüsse von außen abzuschirmen, haben die Forscher ihr Labor 1400 Meter unter dem Gran-Sasso-Massiv aufgebaut. Dort steht auch der CRESST-Detektor, rechts im Querschnitt

Es bedarf also höchster Experimentierkunst, Detektoren zu bauen, die in der Lage sind, die flüchtigen Teilchen dennoch nachzuweisen. Und Lanfranchi ist einer, der diese Kunst beherrscht, wenn es um außergewöhnlich empfindliche Kristalldetektoren geht. Jahrelang hat er ähnliche Messgeräte entwickelt für die Suche nach Neutrinos – extrem kleine Teilchen, die ebenfalls kaum mit Materie in Kontakt treten, inzwischen aber erfolgreich erforscht werden.

Mehr dunkle Materie als sichtbare

Dass es die geheimnisvolle dunkle Materie gibt, davon sind die meisten Wissenschaftler überzeugt. Seit Astrophysiker herausgefunden haben, dass im Weltall weit mehr davon existieren muss als von der sichtbaren Variante, suchen sie danach. Spiralgalaxien wie unsere Milchstraße würden von der Fliehkraft zerrissen, wenn dunkle Materie sie nicht zusammenhalten würde. Neben derartigen Beobachtungen, die zum Teil schon aus den 30er-Jahren datieren, gibt >

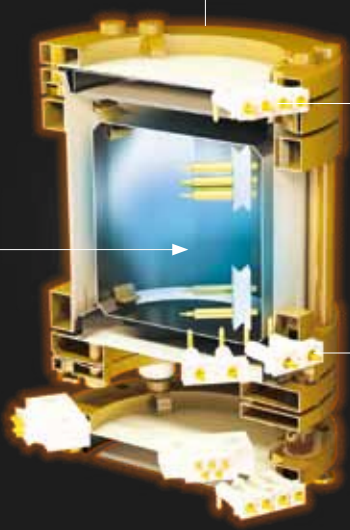




Kaltfinger, der die Kälte in das hochreine Detektorvolumen überträgt

hochreines Kupfer

Detektormodule



Lichtdetektor

Kristalldetektor

Der Einkristall wird ganz langsam aus der Schmelze gezogen. Das Ganze geschieht bei 1600 Grad Celsius. Über die Wendel am Rand wird zum Erhitzen eine Hochfrequenz eingekoppelt

es inzwischen weitere Hinweise, etwa bei der Dynamik von Galaxienhaufen. Auch Kosmologen, die darüber nachdenken, was kurz nach dem Urknall geschehen sein mag und wie die Strukturen im Universum zustande kamen, fanden Hinweise, die auf die Existenz dunkler Materie hindeuten (siehe Kasten Seite 9). Deren Masse soll etwa 76 Prozent der Gesamtmaterie des Universums betragen. Wie könnte sie beschaffen sein?

Schwer wie Gold oder Blei

Viele Forscher glauben, dass es sich um WIMPs handelt, die noch aus den allerersten Sekunden nach dem Urknall stammen (siehe Kasten Seite 15). Derartige Teilchen sollten aufgrund der Indizien etwa so schwer sein wie größere Atomkerne, etwa Gold- oder Bleikerne, die aber so schwach wie Neutrinos oder sogar noch schwächer wechselwirken. Um die sichtbare Scheibe unserer Milchstraße sollen die WIMPs eine enorme Wolke bilden, durch welche sich die Erde gemeinsam mit der Sonne hindurchbewegt. Forscher auf der ganzen Welt haben sich unterschiedliche Strategien ausgedacht, wie man der Teilchen habhaft werden könnte. Astrophysiker schicken Messgeräte auf Satelliten ins All, um nach Zerfallsprodukten zu suchen, falls WIMPs mit ihren An-

teilchen zusammenstoßen und sich gegenseitig vernichten. Teilchenphysiker versuchen, sie in großen Beschleunigern künstlich zu erzeugen und nachzuweisen, andere Gruppen gehen unter die Erde und bauen dort Nachweisgeräte auf. Wie Detektive versuchen sie, Spuren zu finden, die von WIMPs stammen können oder bestenfalls sogar müssen. „Letztendlich wird nur eine widerspruchsfreie gemeinsame Interpretation von Ergebnissen der direkten Suche, der indirekten Suche, der Suche an Beschleunigern und der Untersuchung des gravitativen Verhaltens einen eindeutigen Beweis erbringen“, sagt Lanfranchi.

Extrem kalte Kristalle

So haben auch die Wissenschaftler im CRESST-Experiment 1400 Meter unter dem italienischen Gran-Sasso-Massiv, 120 Kilometer nordöstlich von Rom, ihre Detektoren in Stellung gebracht. Sie bestehen aus den schon vorgestellten Kalziumwolframat-Kristallen, auf deren Oberfläche eine dünne supraleitende Schicht aus Wolfram aufgebracht wurde. Das Ganze kühlt man sehr stark, auf zehn Tausendstel Kelvin über dem absoluten Nullpunkt. Sollte nun ein WIMP ein Atom anstoßen und so eine Gitterschwingung auslösen, erwärmt sich der Kristall um einige ▷





Am Tandem-Beschleuniger in Garching charakterisiert das Team von Jean-Côme Lanfranchi die Detektoren. Man schießt Neutronen darauf und misst die Reaktion. Diese Anlage ist einmalig auf der Welt

Am Ende dieses Strahlrohrs werden in einer Kernreaktion Neutronen erzeugt, welche auf den Tieftemperaturdetektor treffen. Messungen dieser Art sind von essentieller Bedeutung, um den bei der Suche nach dunkler Materie gefährlichen Neutronenuntergrund in den Experimenten CRESST und EURECA zu verstehen



Welche Kandidaten gibt es für die dunkle Materie?

Der größte Teil der Masse des Universums besteht nicht aus Sternen, sondern ist dunkel und offenbart sich nur durch seine Gravitationswirkung. „Lassen Sie sich nicht von den hellen Lichtern täuschen“, so der theoretische Physiker Michael Turner vom Enrico-Fermi-Institut in Chicago, „in Wirklichkeit kontrolliert die dunkle Seite das Universum.“ Wahrscheinlich bestehen nur etwa sieben Prozent der gesamten Masse aus „normaler“ Materie, aus der auch wir sind. Der Rest setzt sich aus sogenannten WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) zusammen. Dabei handelt es sich vielleicht um supersymmetrische Elementarteilchen, die noch

aus den allerersten Sekunden nach dem Urknall stammen. Eine Zeitlang glaubte man auch, in den Neutrinos die fehlende Masse gefunden zu haben, aber inzwischen weiß man, dass sie nur „eine Prise Salz“ – so Turner – im kosmischen Gefüge sein können und maximal ein halbes Prozent dazu beitragen. Sie wären aufgrund ihrer geringen Masse auch nicht in der Lage, Sterne und Galaxien zu bilden. Noch schwieriger zu finden wären Super-WIMPs, die von manchen Forschern postuliert werden. Sie würden nur durch Gravitation mit unserer Materie wechselwirken; ein direkter Nachweis wäre in diesem Fall äußerst fraglich.

Millionstel Grad. Dies führt dazu, dass die Wolframschicht in einen Temperaturbereich kommt, in dem in ihr die Supraleitung beginnt zusammenzubrechen. Dabei ändert sich der elektrische Widerstand sehr stark. Ein winzig kleiner Temperaturunterschied zieht somit ziemlich gravierende Folgen für die Leitfähigkeit der Schicht nach sich und sorgt dafür, dass man das Ereignis mit hochempfindlichen magnetischen Messgeräten, sogenannten SQUIDs (Superconducting Quantum Interference Devices), erkennen kann.

Leider reagieren die Kristalle nicht nur auf WIMPs, sondern auch auf fast alle anderen Teilchen, die von außen angefliegen kommen. Da gibt es Myonen, Neutronen, Elektronen, Photonen und Alphateilchen, und deren Vorkommen ist um viele Größenordnungen häufiger als die erwarteten raren Zusammenstöße mit dunkler Materie. Das A und O ist es also, alles herauszufiltern, was nicht auf dunkle Materie hindeutet. Drei Strategien gibt es dafür: Störungen abschirmen, vermeiden oder sie registrieren und anschließend herausrechnen. In CRESST werden alle drei kombiniert.

Zwar ist das Experiment durch die großen Gesteinsmassen über dem Untergrundlabor gut gegen die lästige kosmische Strahlung abgeschirmt. Zusätzlich wird aber ein gigantischer Aufwand betrieben, um alle anderen Arten von un-

erwünschten Effekten zu eliminieren, etwa die Folgen der radioaktiven Strahlung aus dem Detektor selbst und seiner Umgebung. „Da wir erkannt haben, dass Neutronen besonders häufig stören, umgaben wir den Kryostat mit einer 50 Zentimeter dicken Schicht aus Polyethylen“, sagt Lanfranchi. „Dieses Material kann die Neutralteilchen besonders effizient abfangen. Außerdem installierten wir einen eigenen Detektor für Myonen, der diese erkennt und aussortiert.“ Natürlich darf kein Mensch die wertvollen Detektoren berühren, denn allein in seinem Schweiß ist so viel radioaktives Kalium enthalten, dass er damit die Messungen verderben würde. So steckt der Versuchsaufbau abgeschlossen von der äußeren Welt in einem rund fünf Meter hohen Kasten aus Spezialmaterial, das möglichst rein und möglichst wenig radioaktiv ist. Auch bei den Vorversuchen, die die Forscher in Garching im dortigen Untergrundlabor und am Beschleuniger machen, ist höchste Sorgfalt angesagt.

Kontroverse Ansichten

Seit 2007 ist CRESST in Betrieb. Zwischen 2009 und 2011 hat es 67 Ereignisse gemessen, von denen rein statistisch gesehen lediglich etwa die Hälfte auf die üblichen Hintergrundereignisse zurückgeführt werden kann. Sollten ▷



Unter dem wachsamen Auge des Physikers und Kristallzüchters Andreas Erb entstehen die Kristalle für den CRESST-Detektor

die Forscher mit den restlichen Signalen wirklich die lange gesuchten WIMPs nachgewiesen haben, wären diese eher leichte Teilchen, eine Variante, die jedoch vom konkurrierenden Experiment Xenon-100 ausgeschlossen wurde. Wissenschaftler aus Chicago und Rom hingegen bekräftigten das CRESST-Ergebnis. „Da wird auf den Fachtagungen

hart diskutiert“, erzählt der 39-jährige Jean-Côme Lanfranchi, „selbst wenn man mit den Kollegen von anderen Experimenten persönlich befreundet ist.“

Seiner Ansicht nach hat sich der Ansatz, Kalziumwolframat-Kristalle als Nachweismedium zu nutzen, bereits bewährt. „Wir können bei diesem Material nicht nur die relevanten Ereignisse leichter finden, da Gitterschwingung und Szintillation gleichzeitig auftreten, sondern wir haben auch die Möglichkeit, die Masse der WIMPs in einem sehr weiten Bereich zu messen. Das können andere Verfahren nicht.“ Noch bessere Ergebnisse als bisher versprechen sich die Forscher vom CRESST-Nachfolgeexperiment, das bereits in Vorbereitung ist. Es soll EURECA (European Underground Rare Event Calorimeter Array) heißen und bis zu 500 Kilogramm Kalziumwolframat enthalten, was ohne das Kristalllabor der TUM gar nicht möglich wäre. Bisher musste man sich auf gekaufte Einkristalle aus Russland, China und der Ukraine verlassen, die nicht nur extrem teuer, sondern auch bezüglich ihrer Reinheit und Qualität nur schwer zu kontrollieren waren. Nun aber wird man die selbst gefertigten Kristalle einsetzen können. Die Forscher um Lanfranchi und Erb hoffen, damit der dunklen Materie näherzukommen.

Brigitte Röthlein

Der Moment, in dem Sie sicheren Boden betreten. Und begreifen,
warum man bei uns immer wieder zu Höhenflügen starten kann.
Für diesen Moment arbeiten wir.



// PIONIERGEIST UND
BODENHAFTUNG
MADE BY CARL ZEISS

Carl Zeiss ist ein weltweit führendes Unternehmen der Optik und Optoelektronik mit rund 24.000 Mitarbeitern. Zusammen mit den Besten ihres Fachs arbeiten Sie hier in einem kollegialen Klima für technologisch bahnbrechende Produkte. Mitarbeiter von Carl Zeiss stehen leidenschaftlich dafür ein, immer wieder etwas zu schaffen, das die Welt ein bisschen besser macht.

Starten Sie Ihre Karriere bei uns: www.zeiss.de/karriere



We make it visible.

Geheimnis des kürzesten Weges

Die Computermodelle des Mathematikers Prof. Peter Gritzmann knacken bisher ungelöste Probleme. Zum Beispiel finden sie die für alle Beteiligten beste Felderaufteilung bei der Flurbereinigung oder arrangieren die Leitungen auf einem Computerchip so, dass möglichst wenig Wärme entsteht

Link

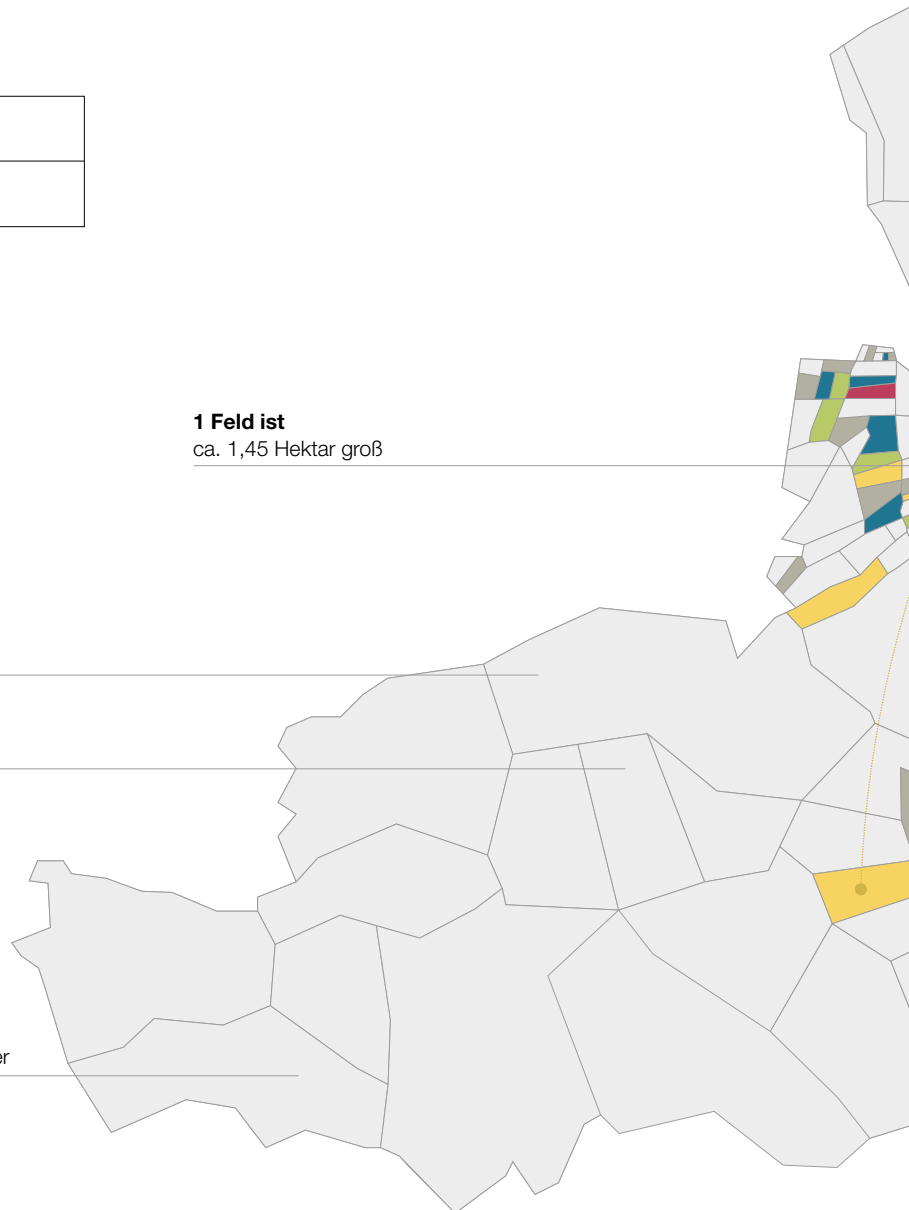
www-m9.ma.tum.de

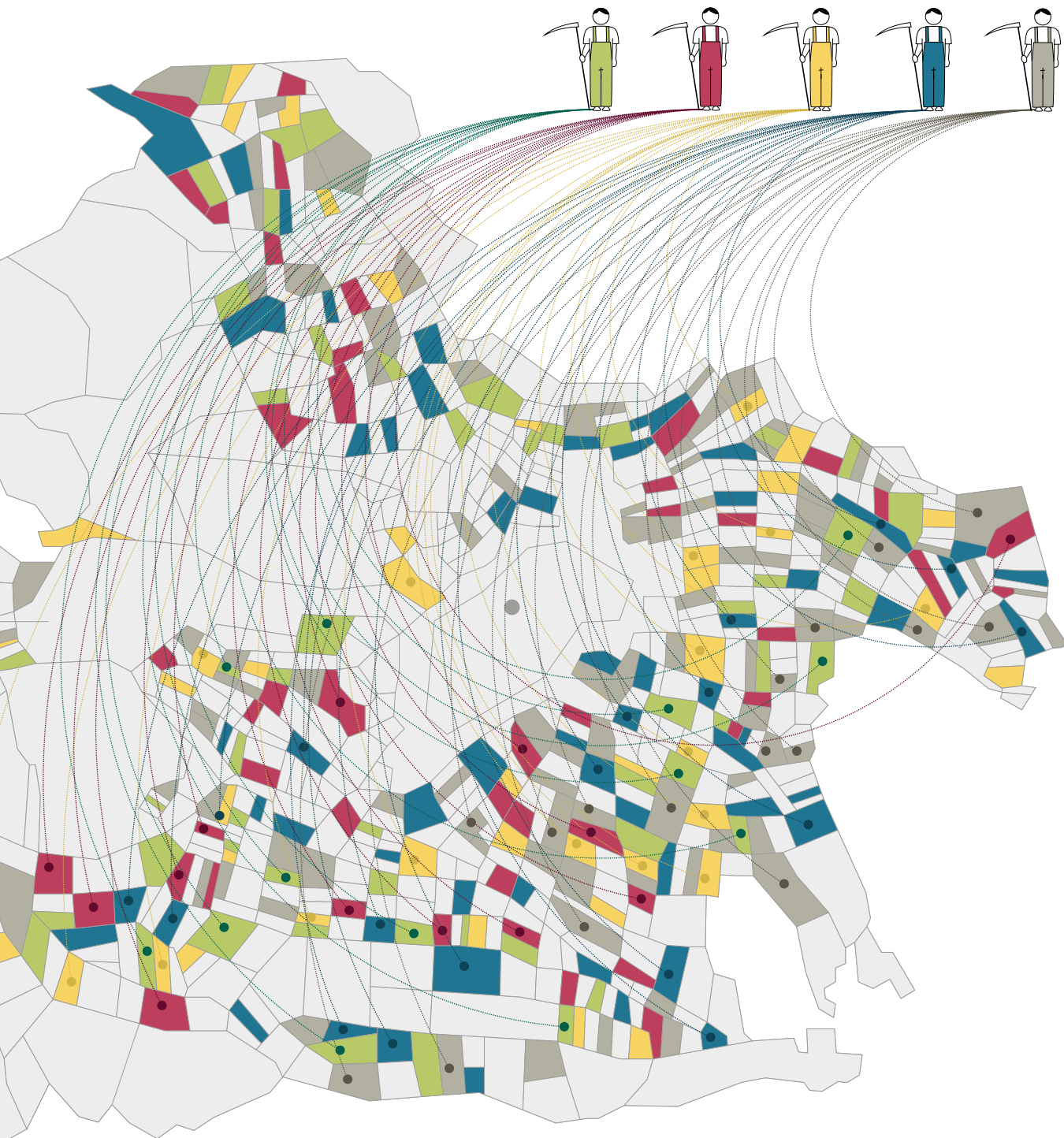
1 Feld ist
ca. 1,45 Hektar groß

Lange Fahrtwege
= Hohe Fahrtkosten

140.000
Landwirte in Bayern

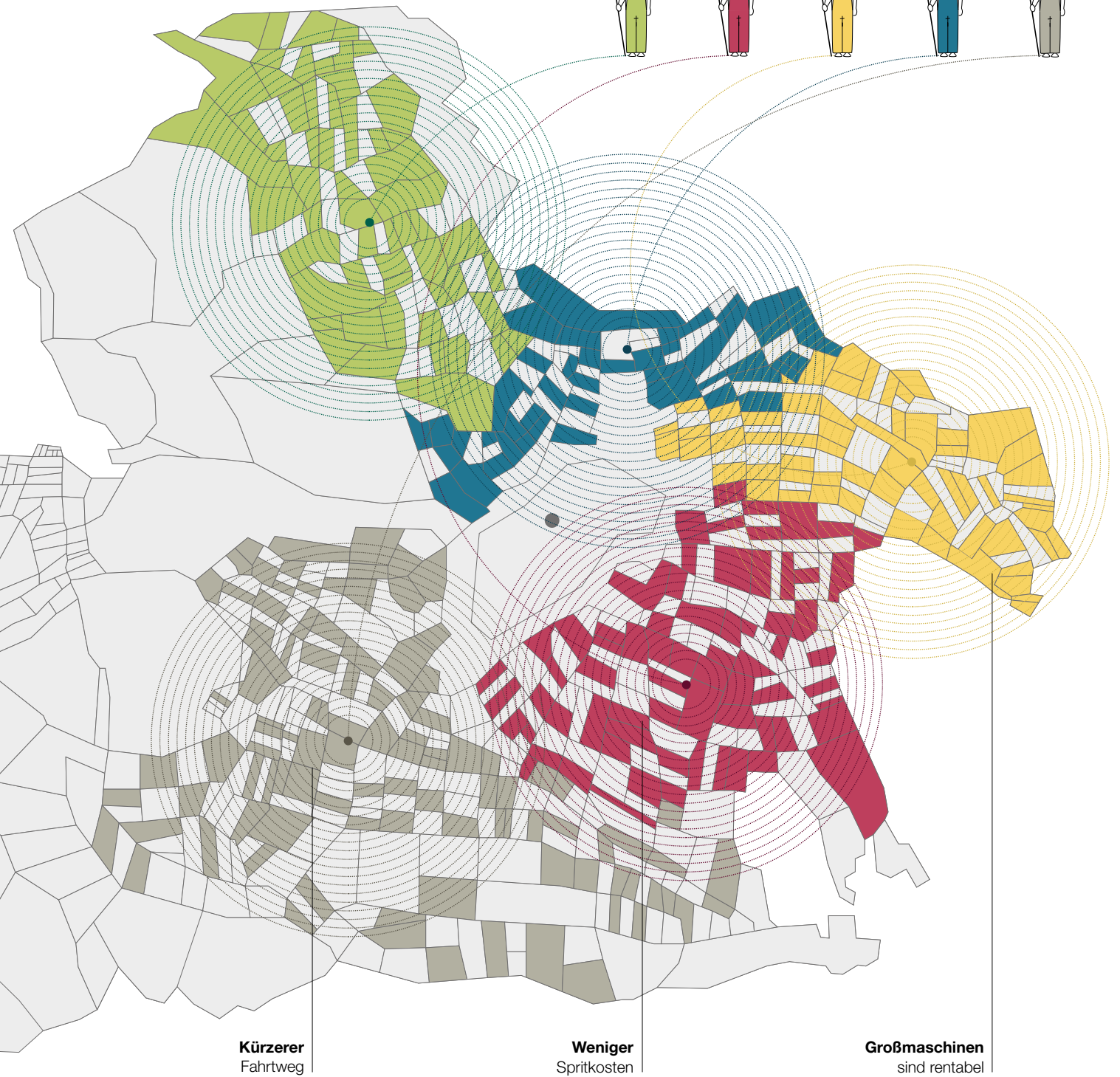
1 Bauer
hat \approx 12 Felder





Grafik: eclundsepp

Teurer Flickenteppich: Im Durchschnitt bewirtschaftet jeder der 140.000 bayerischen Bauern zwölf über die Region verteilte Felder. Die Fahrtkosten betragen bei typischen Betrieben mehr als zehn Prozent des Nettoeinkommens



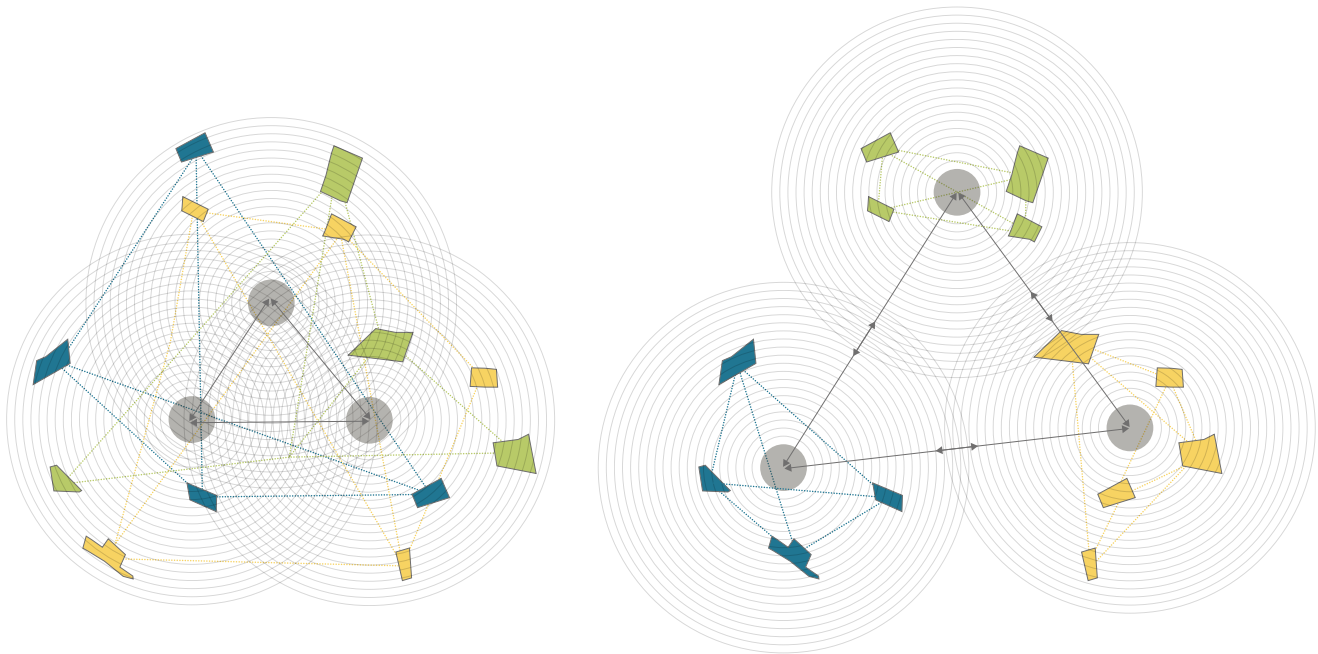
Eine ideale Flurbereinigung, die alle Felder jedes Landwirts zusammenlegt, scheitert an der unterschiedlichen Qualität der Felder, die getauscht werden müssten

Was ein Topmodell sein soll, ist Ansichtssache. Schließlich liegt Schönheit für viele im Auge des Betrachters. Fragt man zum Beispiel einen Wissenschaftler wie Peter Gritzmann, muss man mit einer Antwort rechnen, wie sie in den einschlägigen Castingshows wohl kaum zu hören wäre. Seine Topmodelle sind vielfältige, bisweilen unterm Strich ziemlich kantige Erscheinungen und entspringen der Mathematik. Für Gritzmann, der als Professor für Angewandte Mathematik am Zentrum Mathematik in Garching forscht und lehrt, besteht die Schönheit eines mathematischen Modells darin, dass es unklare, schwer durchschaubare Beziehungen auf den Punkt bringt und so mathematisch fassbar und praktisch zugänglich macht. Dazu modelliert er so lange an einer Formel herum und befreit sie von allem Überflüssigem, bis sie die optimale Lösung des Problems präsentiert und Verfahren zu ihrer Berechnung ermöglicht. „In der Mathematik hängt Schönheit eng mit Schlichtheit zusammen“, sagt er über die besondere Ästhetik seines Fachgebiets. Allerdings betreiben er und seine Kolleginnen und Kollegen in Garching die Feilerei an Algorithmen nicht als reine formalästhetische Denksportaufgabe. Diskret ist ihre Mathematik, weil sie sich mit abzählbaren und unterscheidbaren Phänomenen befasst – Mathematik also, die in

besonderer Weise mit der Computertechnologie verbunden ist, die mit den diskreten Zuständen 0 oder 1 arbeitet. Wenn sich Gritzmann auf die Suche nach einem Topmodell macht, geht es häufig um ganz konkrete Probleme aus dem echten Leben.

Optimale Flurbereinigung

In Gritzmanns wissenschaftlicher Arbeit wirken verschiedene Gebiete der Mathematik und Informatik zusammen. Geradezu bodenständig war das Projekt, bei dem Gritzmann und sein Kollege Prof. Andreas Brieden von der Universität der Bundeswehr ein mathematisches Verfahren zur Erleichterung der Flurbereinigung im landwirtschaftlichen Raum entwickelten. Wer schon einmal beim Landeanflug über dem Flughafen München einen Blick aus dem Fenster geworfen hat, verfügt über eine Vorstellung von dem Problem, das schon König Ludwig II. mit dem „Gesetz die Flurbereinigung betreffend“ lösen wollte. Aus der Vogelperspektive wirkt die Acker- und Wiesenlandschaft wie ein Flickenteppich aus farbigen Rechtecken unterschiedlicher Größe. Zwar entsteht dieses bunte Muster durch das Nebeneinander von braunem Ackerboden, grünen Wiesen und gelbem Getreide, doch würde man die Felder entsprechend der ▶



Der Kniff von Gritzmans Computermodell besteht darin, die Schwerpunkte aller Felder der Landwirte so auseinanderzuschieben, dass die Felder eines Landwirts möglichst nahe beieinanderliegen und weit von den anderen entfernt sind

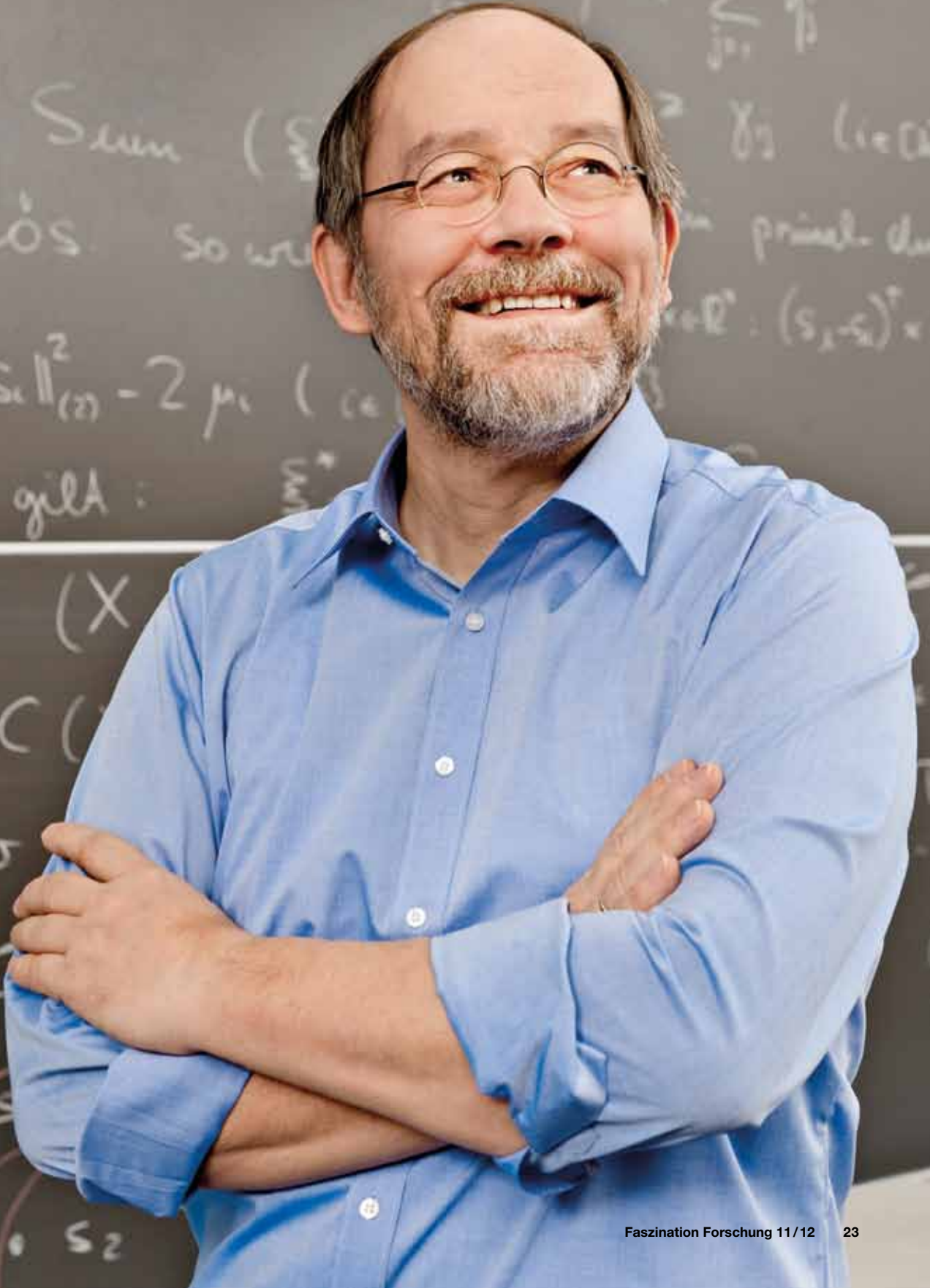
Besitzverhältnisse am Computer unterschiedlich einfärben, entstünde ein vergleichbares Muster: Kaum zwei Felder einer Farbe würden zusammenliegen. Mit seinem Gesetz von 1886 schuf der König erstmals eine zentrale Ordnungsbehörde, die dafür sorgen sollte, dass die verstreuten Flächen zu wirtschaftlich zu bearbeitenden Einheiten zusammengelegt werden. So weit der Plan. Einfach umzusetzen ist das aber nicht. Denn jeder der etwa 140.000 Landwirte in Bayern bewirtschaftet durchschnittlich zwölf über die Region verteilte Flurstücke mit einer durchschnittlichen Feldgröße von etwa 1,45 Hektar. „Daraus ergibt sich eine unvorteilhafte Kostenstruktur“, so Gritzmans. Die Landwirte müssen mit ihren Maschinen zwischen den weit verteilten Feldern hin- und herfahren. Die langen Fahrtzeiten kommen den Bauern teuer zu stehen, denn sie bedeuten unproduktive Zeit für Arbeitskräfte und Maschinen. „Außerdem ist auch kein wirtschaftlicher Einsatz moderner Großmaschinen möglich“, nennt Gritzmans einen weiteren Nachteil der kleinen Einzelflurstücke. Nach einer Berechnung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft liegt bei typischen Betrieben allein der unproduktive Overhead der Fahrtkosten bereits in einer Größenordnung von mehr als zehn Prozent des Nettoeinkommens der betroffenen Landwirte. „Dies ist für

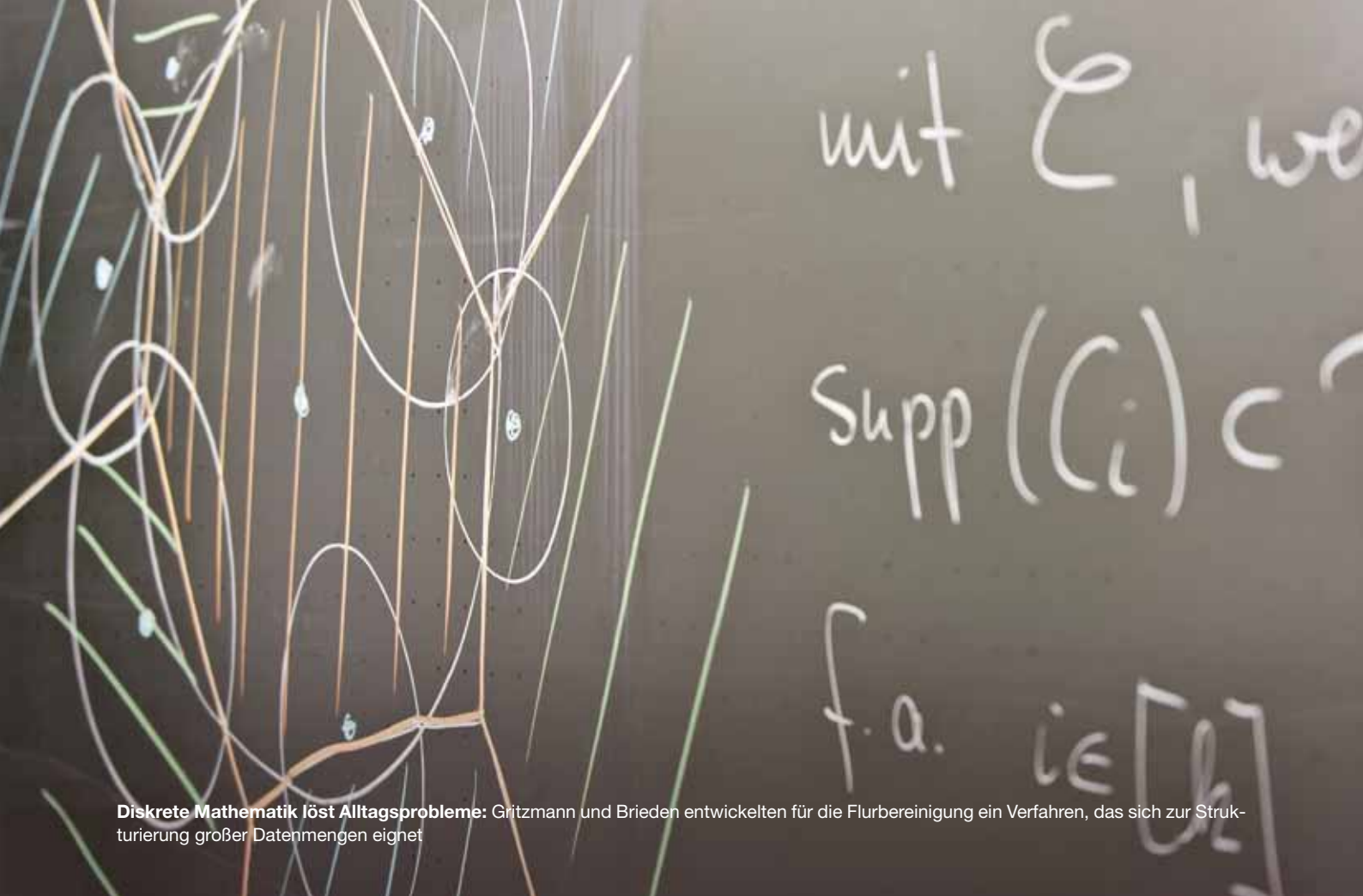
die Landwirte insbesondere nach der EU-Osterweiterung ein entscheidender, zum Teil existenzbedrohender Wettbewerbsnachteil, da in den Staaten des früheren Ostblocks in der Regel viel größere zusammenhängende Flächen bewirtschaftet werden.“

Laptop statt Supercomputer

Dabei müssen gar nicht unbedingt neue Eigentumsverhältnisse geschaffen werden, was die Flurbereinigung in der Vergangenheit zu einer äußerst langwierigen Prozedur gemacht hat. Stattdessen bleiben im Rahmen eines freiwilligen Pacht- und Nutzungsaustauschs sämtliche Eigentumsverhältnisse unverändert. Lediglich das Recht zur Bewirtschaftung wird getauscht. Natürlich darf jeder Landwirt selbst entscheiden, ob und mit welchen Flurstücken er teilnehmen möchte. Die Idee hierzu ist nicht neu, scheiterte aber in der Praxis an den zu ihrer Umsetzung fehlenden mathematischen Methoden. Es gibt nämlich so viele Tauschmöglichkeiten, dass selbst ein Supercomputer für die Berechnung so lange brauchen würde, dass sich am Ende tatsächlich niemand mehr an die Ausgangsfrage erinnern könnte. „Wenn nur zehn Landwirte mit insgesamt 300 Feldern mitmachen, gibt es 10^{300} verschiedene mögli- ▶

Mit seinem Modell können Landwirte den virtuellen Feldertausch proben: Peter Gritzmann hat mit Kollegen der Universität der Bundeswehr ein mathematisches Verfahren zur Erleichterung der Flurbereinigung entwickelt





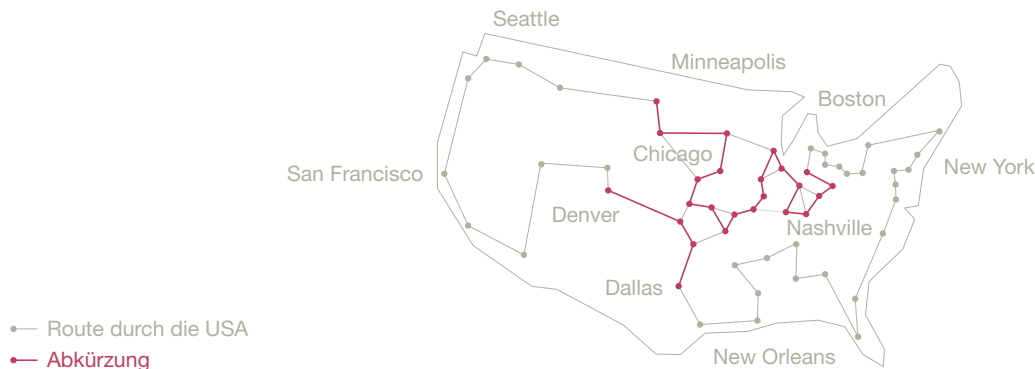
Diskrete Mathematik löst Alltagsprobleme: Gritzmann und Brieden entwickelten für die Flurbereinigung ein Verfahren, das sich zur Strukturierung großer Datenmengen eignet

che Zuordnungen“, so Gritzmann. „Das ist erheblich mehr als die Zahl der Atome im bekannten Universum.“

Für ihre Lösung des Problems entwickelten Gritzmann und Brieden ein Verfahren, das sich zur Strukturierung selbst größerer Datenmengen eignet und auch alle erforderlichen Bedingungen einhält. Es basiert auf einem völlig neuen Modell, das die Aufgabe beweisbar gut erfasst. Man kann tatsächlich exakt nachweisen, dass die erzeugten Tauschvorschläge die gesamte Flur „perfekt aufräumen“. Und das in beachtlichem Tempo: Der optimale Tausch kann auf einem Laptop innerhalb von Sekunden bestimmt werden. Der Ansatz der Forscher beruht auf der intuitiven Idee, die Schwerpunkte aller Felder der Landwirte auseinanderzuschieben, um so eine Zuordnung zu bestimmen, in der die einem Landwirt zugewiesenen Felder nahe beieinander und von den anderen weit entfernt sind. Auf diese Weise bestimmen Gritzmann und Brieden einen optimalen Tauschplan, der neben den Grundstücksgrößen auch die Bodenqualität oder eventuell vorhandene EU-Subventionen berücksichtigt; schließlich soll die Gesamtfläche für jeden Landwirt vorher und nachher etwa gleich sein, ebenso die Bodenqualität und die an die Felder gebundenen EU-Subventionen. In der Praxis kommen noch eine Reihe weiterer Bedingungen hinzu,

und natürlich werden nur solche Felder einbezogen, die die Landwirte in das Verfahren tatsächlich einbringen wollen. Danach ist die Flurkarte auf dem Computerbildschirm zwar immer noch schön bunt, aber farblich deutlich ordentlicher als zuvor. „Tatsächlich bietet diese Aufteilung jedem einzelnen Landwirt eine deutliche Kostenersparnis, weil nun die meisten seiner Felder beieinanderliegen und größere Schläge bilden“, sagt Gritzmann. Das sahen wohl auch die rund zwei Dutzend Bauern im fränkischen Oberstreu so, die sich als Teilnehmer des Pilotprojekts auf einen Feldertausch eingeladen hatten. Nach anfänglicher Skepsis zeigten sie sich bei der Vorstellung des Verfahrens auf einer ihrer Versammlungen zunehmend begeistert. „Unter anderem auch, weil sie selbst via Laptop und Beamer Varianten durchprobieren und deren Vorteile per Mausclick ausrechnen konnten“, erinnert sich der Forscher. Mittlerweile ist der Nutzungstausch jedenfalls längst praktisch umgesetzt, und aus den neuen Ergebnissen der Garchingener Forscher ist schon eine eigene Theorie geworden, die es ermöglicht, systematisch verborgene Strukturen in großen Datenmengen zu erkennen, mit einer Vielzahl neuer Anwendungsfelder. Für seine bahnbrechenden Arbeiten zur algorithmischen Konvexgeometrie, die auch für die Lösung des Problems aus der Landwirt-

Das Problem des Handlungsreisenden



Am Problem des Handlungsreisenden haben sich schon Generationen von Mathematikern und Informatikern seit seiner ersten Erwähnung im Jahr 1832 die Zähne ausgebissen. Perfiderweise klingt die Aufgabe stocksimpel: Der Vertreter muss Kunden in einer Reihe von Städten besuchen, und zwar in jeder Stadt genau einen. Da er möglichst wenig unterwegs sein möchte, sucht er die kürzeste Route. Die Entfernungen zwischen den einzelnen Städten sind bekannt. Gefragt ist also nach der optimalen Reihenfolge, in der die Städte besucht werden müssen. Bei fünf Städten sieht das Problem noch relativ leicht aus, denn da hat er noch übersichtliche 24 Möglichkeiten. Ein Ausprobieren aller Touren würde in diesem Fall zum Ziel führen. Doch wird es immer komplizierter, je größer die Zahl der Eingaben wird. Schon bei zehn Städten bestehen 362.880 Möglichkeiten, und damit wird diese

Strategie etwas aufwendig. Entsprechend komplizierter wird die Aufgabe mit steigender Anzahl der Städte und den damit ins Gigantische anwachsenden Möglichkeiten. Immerhin entstanden im Laufe der Zeit Methoden, mit denen auch kürzeste Wege bei Reisen durch Tausende von Städten gefunden werden können, und die Forschung geht weiter. Tatsächlich hat dieses Problem nicht nur eine Vielzahl von praktischen Anwendungen, für die schnelle Algorithmen benötigt werden. Es liegt auch im Kern eines der sogenannten Millenniumsprobleme der Mathematik, sieben zentrale offene Probleme, die das 20. dem 21. Jahrhundert vererbt hat. Kann man wasserdicht entscheiden, ob es für das Problem des Handlungsreisenden einen effizienten Algorithmus gibt, so erhält man ein Preisgeld von einer Million Euro. Aber vielleicht noch wichtiger: Es winkt die wissenschaftliche Unsterblichkeit.

Foto: Heddergott / TUM; Grafik: edlundsepp nach TUM

schaft entscheidende Grundlagen sind, wurde Gritzmann unter anderem mit dem Max-Planck-Forschungspreis ausgezeichnet.

Lange Leitungen im Computerchip

Mit kürzesten Wegen hat auch ein anderes Problem zu tun, mit dem sich die Garching Mathematiker unlängst erfolgreich befassten. Eigentlich kennt es jeder, der gern mit dem Laptop auf dem Schoß arbeitet. Üblicherweise werden die Geräte nach einer Weile heißer, als so manchem lieb ist. „Über die Hälfte des Stromverbrauchs heutiger Chips ist Abwärme“, so Gritzmann, der von einem Kollegen aus der Elektrotechnik um Rat gefragt wurde. Als er sich die Sache zusammen mit seinem Mitarbeiter Dr. Michael Ritter näher anschaute, wurde ihm klar, dass es dabei nicht allein um Bequemlichkeitsoptimierung geht. „Wenn bei einer Leistung von 100 Watt weltweit etwa eine Milliarde Computer auch nur eine halbe Stunde pro Tag laufen, so sind das mehr als 50.000.000 Kilowattstunden pro Tag – eine gigantische Energieverschwendung und ökologisch völlig inakzeptabel“, gibt er zu bedenken. „Auch für den Betrieb der Chips und die Akkulaufzeit ist das ein riesiges Problem.“ Eine aktive Kühlung der Laptops kommt als Lösung nicht infrage,

denn die würde den Computer vergrößern und zusätzlich Strom verbrauchen. Aus Sicht der Mathematiker präsentierte sich das Problem als eine Optimierungsaufgabe, die diskrete mit stetigen Zutaten verbindet. Das mathematische Modell erfasst dabei alle wesentlichen Einflussfaktoren der Abwärmeproduktion. Wenn ein Computer rechnet, werden die aus Einsen und Nullen bestehenden Ziffernfolgen durch Stromflüsse realisiert, indem ein Schalter an- oder ausgeht. Immer wenn Strom durch die winzigen, aber insgesamt einige Kilometer langen Drähte fließt, die in mehreren Schichten auf dem gerade einmal 200 Quadratmillimeter kleinen Chip liegen, entsteht ein elektrisches Feld und damit letztlich Wärme. Viel hängt davon ab, wie weit benachbarte Leitungen voneinander entfernt sind. Wenn man nun Leitungen, in denen seltener Strom fließt, näher aneinander vorbeiführt, gewinnt man den Platz, um jene mit hoher Schaltfrequenz und entsprechender Wärmeentwicklung möglichst weit auseinanderzubekommen. Dabei ist auch die Reihenfolge der Belegung der einzelnen Leiterbahnen zu optimieren. „Dadurch erhielt das Problem zusätzlich einen kombinatorischen Charakter, der an das Problem des Handlungsreisenden erinnert: ein klassisches Problem der Graphentheorie, das nach der kürzesten Rundreise durch alle Städte ▷

In einem modernen Computerchip liegen kilometerlange Drähte in mehreren Schichten verteilt. Immer wenn Strom fließt, entsteht Wärme. Abwärme macht heute mehr als die Hälfte des Stromverbrauchs eines Chips aus

fragt, die ein Handlungsreisender besuchen möchte“, fügt Gritzmann hinzu. Die Landkarte wird dabei stark abstrahiert: Die Städte werden zu Punkten, die Autobahnverbindungen zwischen ihnen zu Kanten; es entsteht ein sogenannter Graph. „Ein Graph ist eine sehr einfache Struktur, die es erlaubt, Abhängigkeiten zu modellieren“, erklärt er. Er besteht aus Knoten – das können zum Beispiel die Haltestellen eines Straßenbahnnetzes sein oder eben Drähte auf Computerchips – und Linien, die zwischen benachbarten Punkten gezogen werden. Diese Kanten setzen die beiden Knoten in eine je nach Aufgabenstellung aussagekräftige Beziehung. Das kann die Erreichbarkeit von Orten über Straßen, die Nachbarschaft von Feldern in der Landwirtschaft oder aber die gegenseitige Beeinflussung von Leitungen in einem Computerchip sein. Auch in diesem Fall war es wie so häufig in der Diskreten Mathematik, dass sich eine anschauliche Aufgabe als ausgesprochen harte Nuss erweisen kann. „Ein adäquates mathematisches Modell zu erstellen, war verhältnismäßig einfach. Es war allerdings mathematische Schwerstarbeit, seine Eigenschaften und damit die Struktur des Problems so genau zu analysieren, dass wir beweisbar effiziente Algorithmen entwickeln konnten“, erinnert sich Gritzmann an die vielen Versuche, das Problem in den

Griff zu bekommen. „Aber als wir den Beweis erst hatten, war der Weg zu schnellen, praktisch einsetzbaren Verfahren nicht mehr weit.“

Spricht man den Garchingener Mathematikprofessor darauf an, ob nicht mit jedem gelösten Problem die Gefahr zunimmt, dass der Mathematik die offenen Fragen ausgehen, lehnt er sich lächelnd zurück. „Die Anzahl der gelösten Probleme ist gegenüber der Menge der ungelösten verschwindend klein“, lautet sein schlichter Kommentar dazu. Er findet diese Situation keineswegs frustrierend. „Es wird immer viele wichtige Probleme geben, die gelöst werden müssen; die Arbeit geht den Mathematikern also bestimmt nicht aus.“ Für die Platzierung der Leitungen auf dem Mikrochip konnten sie jedenfalls die passenden Algorithmen finden. In vielen Bereichen gibt es ähnliche Probleme wie das Geheimnis des kürzesten Weges – angefangen von der Transportlogistik über das Design intelligenter Stromnetze für die neuen Energien bis hin zur Konstruktion besonders leistungsstarker Getriebe im Maschinenbau. „In zunehmendem Maße kommen die Fragen auch aus der Medizin und Biologie“, so Gritzmann. Und wer weiß, vielleicht begegnen sich hier ja eines Tages die verschiedenen Konzepte der Topmodelle.

Birgit Fenzel

»You can't eat straw.
That's why we're
making fuel out of it.«

WHAT IS PRECIOUS TO YOU?



**THIS IS CLARIANT:
SPECIALTY CHEMICALS
CREATING VALUE**

Energy from renewable resources is only valuable if no foodstuffs are used to make it. That's why Clariant developed a process that turns agricultural waste into carbon-neutral ethanol biofuel. That is precious to us. **what is precious to you?**

WWW.CLARIANT.COM



Foto: iStockphoto.com / Serdar Uckun

Link

www.oekoklimatologie.wzw.tum.de

Alpenwälder in Gefahr

Wissenschaftler im Brandlabor des Fachgebiets für Ökoklimatologie in Freising experimentieren mit Streuproben verschiedener Feuchtigkeitsstufen. Die Daten helfen Forstbehörden, die Waldbrandgefahr in Beständen besser abzuschätzen



Extreme Wetterereignisse wie Dürren oder Waldbrände bedrohen auch unsere Regionen. Im Herbst 2011 brannte es am Nordufer des Sylvensteinspeichers tagelang. Ein ungewöhnliches Ereignis für diese Jahreszeit

Seit Wochen hatte es nicht geregnet, es war so trocken, dass der Boden staubte. Und dann standen 14 Hektar in Flammen. Rauchschwaden deuteten auf das Drama hin, das sich am Bergrücken abspielte. Obwohl vier Hubschrauber Löschwasser aus einem Stausee herant transportierten, gelang es der Feuerwehr erst nach Tagen, die Brände zu löschen.

Das bekannte allsommerliche Waldbrandszenario aus dem Mittelmeerraum? „Im Gegenteil, das alles hat sich vor rund einem Jahr am Nordufer des Sylvensteinspeichers abgepielt. Und es wäre falsch, das Ereignis als einmaligen Vorgang abzutun“, warnt Prof. Annette Menzel. Die Leiterin des TUM Fachgebiets für Ökoklimatologie ist Koautorin des letzten Sachstandberichts des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), jenes Berichts aus dem Jahr 2007, der dokumentiert, dass die vom Menschen verursachte Erwärmung bereits nachweisbare Folgen in der Natur hatte. ▶

Klimastationen, wie hier am Schachen, gibt es in den Bayerischen Alpen nicht viele. Sie liefern wichtige Daten, anhand derer die Forstbehörden und Feuerwehren die Waldbrandgefahr besser abschätzen können



Foto: Schuster

Folgenreicher aber werden Extremereignisse wie Hitzewellen oder Dürren sein, deren Häufigkeit und Intensität sich ändern, sodass nie da gewesene Situationen auftreten könnten.

Annette Menzel, die auch eine Forschungsgruppe am Institute for Advanced Study (TUM-IAS) betreut, und ihre Mitarbeiter haben sich intensiv mit den Auswirkungen des Klimawandels auf die Umwelt befasst. Und sie wissen: Die globale Erwärmung hat auch Folgen für das Ökosystem Alpen. „Diese sensible Region muss sich künftig auf extreme Wetterphänomene einstellen.“ Menzels Analyse der Daten von 25 Klimastationen ergab, dass im gesamten Alpenraum die Temperatur von 1951 bis 2010 zwischen 1,1 und 1,7 °C angestiegen ist. Der Jahresniederschlag hat lediglich in den Südalpen um acht Prozent abgenommen. Gleichzeitig haben die Waldbrandgefahr und die Anzahl der Tage mit hohem Gefahrenpotenzial überall – vor allem in den südlichen Alpen - signifikant zugenommen. Das heißt aber nicht, dass

es für die nördlichen Alpen Entwarnung gibt: „Der Trend ist eindeutig: In den Bayerischen Alpen hat zwar die Zahl der Feuer abgenommen, dafür besteht aufgrund veränderter klimatischer Verhältnisse eine erhöhte Waldbrandgefahr“, berichtet Annette Menzel. Wer bislang glaubte, Waldbrände entstünden nur im Frühjahr oder Sommer, muss angesichts der neuen Extreme umdenken. Künftig kann die Landschaft ebenso im November oder schon im Februar Feuer fangen, wenn noch kein Schnee liegt oder frisches Grün noch nicht nachgewachsen ist.

Die meisten Feuer entstehen am Boden

Nur während der Waldbrandsaison von März bis Oktober stellt der Deutsche Wetterdienst täglich aktualisierte Waldbrandgefahrenindizes für Deutschland bereit. Wie groß ist aber die Gefahr in untypischen Jahreszeiten oder im Alpenraum, der durch Klimastationen schlecht abgedeckt ist? Gibt es baumartenspezifische Unterschiede? Für Forstbe-

Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS)

Deutschlands höchstgelegene Forschungsstation unterhalb des Zugspitzgipfels bietet Wissenschaftlern eine einzigartige Infrastruktur im hochalpinen Raum. Sie erlaubt beispielsweise eine kontinuierliche Klima- und Atmosphärenbeobachtung, die Früherkennung von Naturgefahren oder Arbeiten im Bereich Umwelt- und Höhenmedizin. Ebenso stehen die Folgen des Klimawandels im alpinen Raum mit drastischen Veränderungen der Biodiversität oder der Gletscher und Permafrostgebiete im Fokus der UFS.

Die Station wird unter Federführung des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Gesundheit von einem Konsortium aus renommierten Forschungseinrichtungen (Umweltbundesamt, Deutscher Wetterdienst, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Technische Universität München, Karlsruher Institut für Technologie, Ludwig-Maximilians-Universität München, Helmholtz Zentrum München, Max-Planck-Gesellschaft, Universität Augsburg) als „Virtuelles Institut“ betrieben.

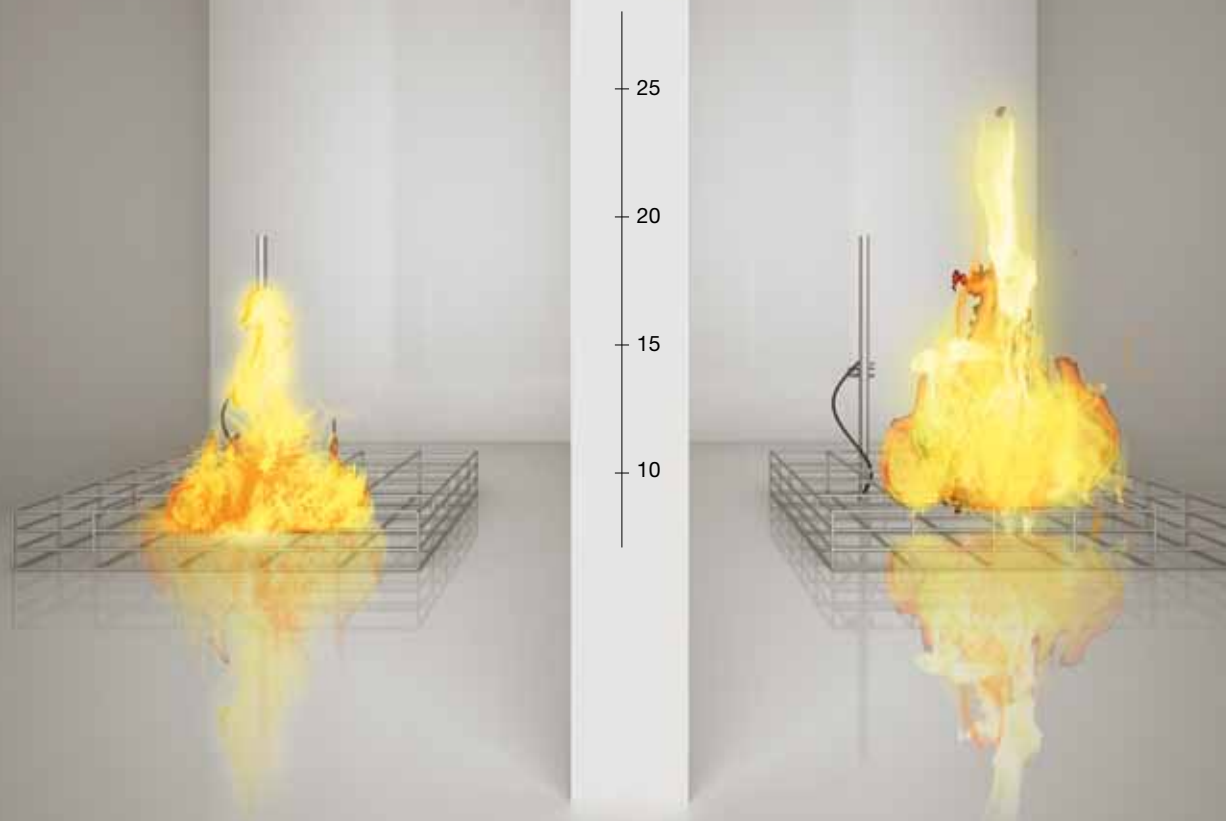
hörden sind solche ergänzenden Informationen wichtig, um die aktuelle Waldbrandgefahr operationell abzuschätzen und entsprechende Vorbereitungen zu treffen.

Deshalb stehen in einem Forschungsprojekt die Trockenheit des Waldbodens, in der Fachsprache Streufeuchte genannt, und ihre Entzündbarkeit im Mittelpunkt. Dafür wird Material an ausgesuchten bayerischen Standorten vom Boden gesammelt. „Die meisten Feuer entstehen am Untergrund – etwa durch Autos über die Wärmestrahlung von Katalysatoren oder heiße Bremscheiben-Partikel. Als Entzündungsquellen kommen auch offene Feuer, weggeworfene Streichhölzer oder Zigarettenkippen infrage“, erklärt Versuchsleiter Christian Schunk.

Brandversuche mit Streuproben

In der Klimakammer am Campus Weihenstephan stehen in den Regalen Schälchen mit Laub von Buche und Eiche sowie Nadeln von Fichte und Kiefer bereit. Sie sind für die gut

isolierte Brandkammer im Nachbarlabor bestimmt. Diesmal liegen Buchenblätter auf der Glasoberfläche einer Heizplatte, deren elektrische Wendel Wärmestrahlung produzieren. Über eine verglaste Wandöffnung lässt sich beobachten, wie sich brennbare Gase bilden und an einer externen Quelle entzünden. Wie stark sich Baumart und Trockenheitsgrad der Streu auf das Brennverhalten auswirken, machen die Videoaufzeichnungen der Entzündungsversuche deutlich, anhand derer die Zeit bis zur Entzündung bzw. zum vollständigen Abbrand gemessen wird. Die Ergebnisse aus den Brandexperimenten sowie Vergleiche historischer Daten sollen helfen, die bisherige und künftige Brandgefahr in Bayerns Wäldern besser abzuschätzen. Derzeit testen die Experten verschiedene Brennstoffeuchte- und -temperatursensoren an den Waldklimastationen der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Die Messfühler erlauben künftig ein dauerhaftes automatisiertes Monitoring der Streufeuchte im Alpenraum. ▷



Im Brandlabor werden unterschiedliche Streuproben – Blätter, kleine Zweige oder Nadeln der Waldbäume – abgebrannt. Die Grafik veranschaulicht unterschiedliche Flammenhöhe und -ausbreitung

Die Auswirkungen des extrem trockenen Herbstes 2011 sind in einem weiteren Projekt des Fachgebiets Ökoklimatologie dokumentiert. An vier Höhengradienten im Werdenfelser Land unterhalb der Zugspitze untersucht Doktorandin Christina Schuster die Phänologie und das Zuwachsverhalten von Baumarten im Bergmischwald. Bei ihrem wöchentlichen Monitoring hat sie den Austrieb der Bäume und das Ende der Vegetationsperiode sprichwörtlich erlaufen: Rechnet man die Höhenmeter ihrer Touren zusammen, dann wäre sie achtmal auf dem Mount Everest gewesen. Um bis zu sechs Tage pro 100 Höhenmeter bewegt sich die „grüne Welle“ im Frühjahr nach oben, hat die Geoökologin festgestellt. Im Herbst startet die Gelbfärbung in den Hochlagen und pflanzt sich mit rund zwei Tagen pro 100 Höhenmeter nach unten fort.

Die häufigen Inversionslagen mit hohen Temperaturen und fehlendem Niederschlag oberhalb des kalten, nebelreichen Talbodens drehten im vergangenen Herbst die Verhältnis-



Foto links: Seidel; Fotos rechts: Schuster; 3-D-Grafik oben: edlundsepp

Unten linke Seite: 5000 Kiefern sämlinge werden im Gewächshaus Trockenstress ausgesetzt. Die Untersuchung verschiedener Provenienzen der Kiefern, auch aus dem trocken-warmen Mittelmeerraum, soll zeigen, welche Herkünfte unter zukünftigen Extremereignissen potenziell geeignet bzw. ungeeignet sein könnten

Unten: Dünnschnitte von horizontal entnommenen Holzproben zweier Fichten auf 800 Metern über Normalnull vom Mai 2011 in 6,3-facher Vergrößerung. Sichtbar sind (von links): Rinde, Phloem, Kambium, Xylem des Jahrrings 2011, Xylem des Jahrrings 2010 und Spätholz 2009 bzw. nur das Spätholz 2010 (rechtes Bild)

se komplett um: kahle Bäume in Garmisch-Partenkirchen und noch verfärbtes Laub in 1400 Meter Höhe. Auch das wöchentlich neu gebildete Holz zeigt an, dass Beginn und Dauer der Wachstumsperiode sowie die Breite des Gesamtjahrrings deutlich von der Temperatur beeinflusst werden. Die saisonale Aktivität der Vegetation lässt sich auch an den verschiedenen Messungen ablesen, die Wissenschaftler auf der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus UFS (siehe Kasten Seite 33) in 2650 Meter Höhe am steilen Südhang des Zugspitzgipfels durchführen. Die atmosphärische Kohlendioxidkonzentration (CO_2) nimmt im Laufe des Sommers durch die Fotosynthese der Biosphäre ab; ebenso ändern sich die Verhältnisse von stabilen Kohlenstoffisotopen ($\Delta^{13}\text{C}$).

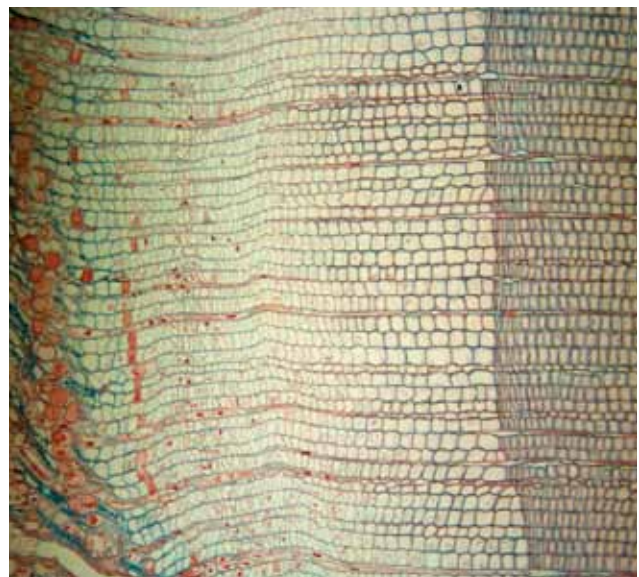
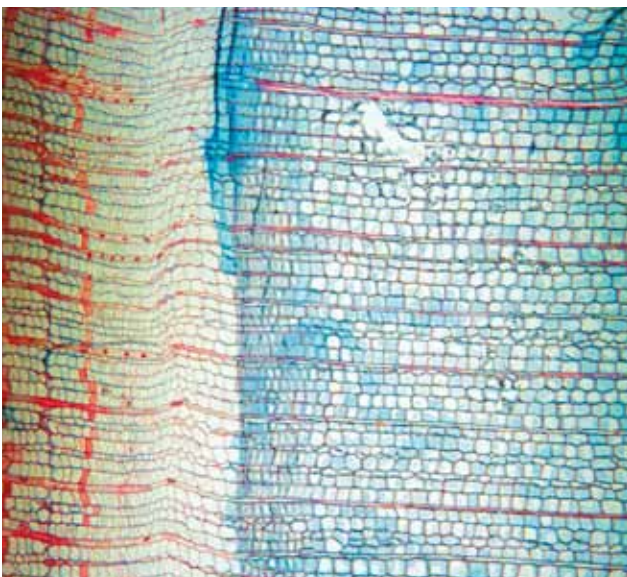
Trocken- und Hitzestress im Gewächshaus

Wie können Auswirkungen von zukünftigen neuen Extremereignissen systematisch untersucht werden? Hier helfen nur Experimente: Im TUM Gewächshauslaborzentrum Dürnast stehen 5000 getopfte Kiefern sämlinge aus zwölf verschiedenen europäischen Herkunftsgebieten im arrangierten Trocken- und Hitzestress. Die Kiefern aus dem Wallis, die

in der trockenen Südschweiz vielfach absterben, sind auch hier nur schlecht aufgelaufen. Und draußen im Freilandexperiment weist eine mobile Schwimmbadüberdachung, der Rain-out-Shelter, auf die Behandlungsvariante Trockenstress hin. Kein Regen mehr seit Ende Mai und zwei Grad Erwärmung durch eine ausgetüftelte Warmwasserheizung genau über der Bodenoberfläche haben im September nur wenig sichtbaren Schaden bei den Kiefern hinterlassen. Anfang November wird die ober- und unterirdische Biomasse geerntet, wobei die genaue Erfassung von Nährstoffgehalten und stabilen Isotopen mehr Aufschluss gibt.

Die Pollenmenge steigt

Extreme Wetterphänomene mit Trockenheit oder Starkregen sind nicht die einzigen Auswirkungen der globalen Erwärmung. Für Allergiker sind die Nachrichten ebenfalls nicht gut: Die Pollenmenge in Europa steigt. „Das liegt daran, dass die höhere Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre wie ein Dünger auf die Pflanzen wirkt: Sie begünstigt Blütenbildung und die Pollenproduktion“, erläutert Annette Menzel. Ihr Team hat die Pollentrends aus 13 ▷





Annette Menzel hat den Wald im Blick. Die Ökoklimatologin interessiert sich insbesondere für die Auswirkungen des Klimawandels auf das Ökosystem Wald. Extreme Klimaereignisse wie Dürren, Spätfröste oder Waldbrände werden infolge der Klimaerwärmung häufiger auftreten

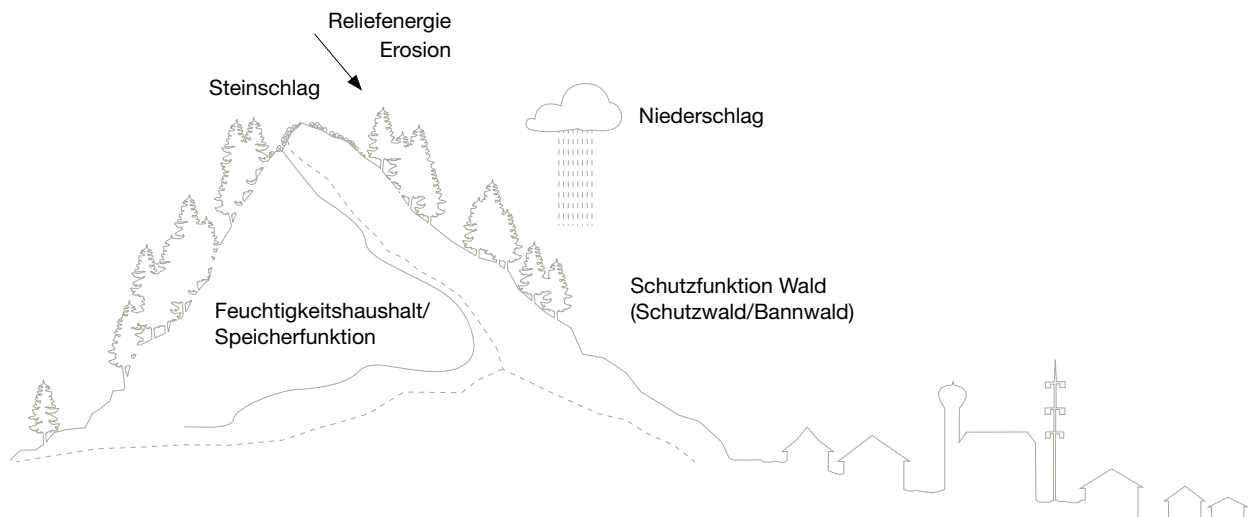
europäischen Staaten ausgewertet. Für knapp 1200 Pollenzzeitreihen über einen Zeitraum von zehn Jahren haben die Wissenschaftler jährliche Pollenindizes berechnet. Die Ergebnisse: In Metropol-Regionen nahm die Pollenmenge um drei Prozent, in ländlichen Gebieten um ein Prozent zu. Dass der Zuwachs der Pollenmenge in Städten größer ist, mutmaßen die Klimaforscher, könnte ebenfalls an den höheren Kohlendioxidkonzentrationen dort liegen. Luftschadstoffe, Mikropartikel und andere allergene Substanzen fahren auf den Pollen „huckepack“, und deshalb ist die Allergiebelastung der Stadtbewohner höher.

„Über die absoluten Pollenmengen können wir nichts sagen. Aber die Daten zeigen, wohin der Trend bei der Entwicklung der Pollenmenge geht: Allergiker müssen mit einer höheren Belastung rechnen“, stellt Annette Menzel fest. Sind die Menschen auf dem Land besser dran? „Städte bilden das Szenario ab, das sich künftig in ländlichen Gegenden abzeichnen wird“, bedauert die Wissenschaftlerin.

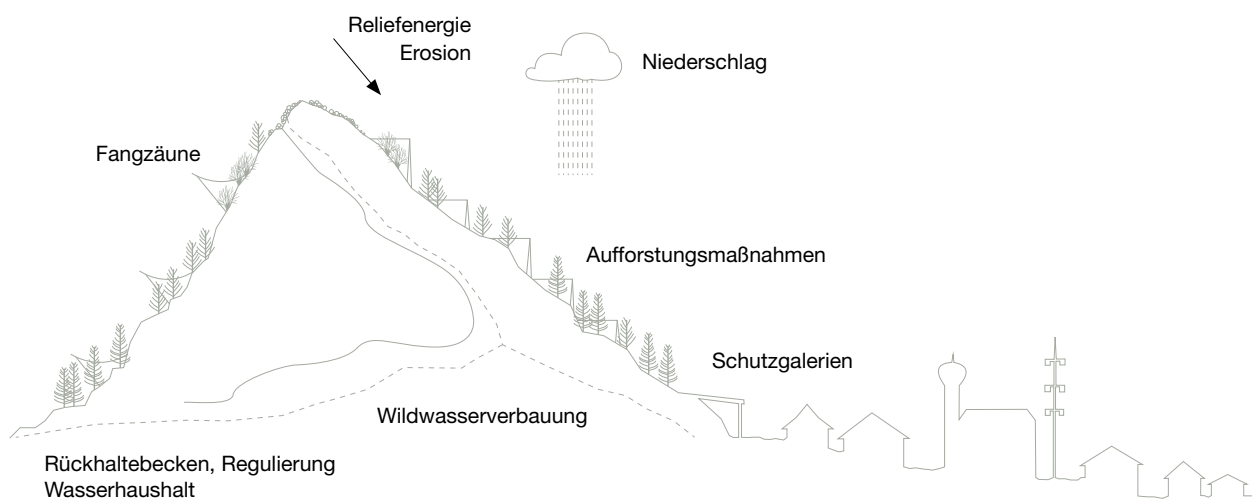
Demnächst müssen die Menschen verstärkt mit Spätfrostergebnissen, Dürren, Stürmen oder Waldbränden rechnen, prognostizieren die Klimaforscher. In ihrem von der EU mit 1,5 Millionen Euro geförderten European Research Council Starting Grant „E3 – Extreme Event Ecology“ wird Annette Menzel die Auswirkungen solcher Extremereignisse auf die Vegetation interdisziplinär untersuchen. Mit optimierten mathematischen Beschreibungen von Extremen möchten die Forscher vergangene und zukünftige Risiken besser abschätzen. Experimente sollen helfen, die kritischen Schwellenwerte zu ermitteln und geeignete Baumartenherkünfte für den Wald der Zukunft auszuwählen. Vielleicht gelingt es sogar, anhand von Emissionsmustern biogener flüchtiger Substanzen den individuellen Stress zu charakterisieren. Im Hinterkopf hat Annette Menzel immer die Frage, „welche neuen Konzepte nötig sind, um die Vegetation – sei es in der Stadt oder den Alpen – an die sich zu schnell ändernden Klimabedingungen richtig anzupassen“. *Evdoxia Tsakiridou*

Schutzwaldmanagement in den Alpen

Schutzfunktion Wald



Aufforstung und technische Schutzmaßnahmen



Bergwälder bieten Erholung und Naturgenuss, sind Lebensraum für viele gefährdete Arten und ermöglichen die Nutzung des nachwachsenden Rohstoffes Holz. Gleichzeitig erfüllen die bewaldeten Bergrücken eine äußerst wichtige ökologische Funktion: Neben dem Schutz vor Erosion reguliert der Bergwald den natürlichen Wasserhaushalt im Gebirge und speichert zugleich klimaschädliches Kohlendioxid.

Von den rund 250.000 Hektar Bergwald in den Bayerischen Alpen sind knapp zwei Drittel Schutzwald. Dieser Wald oberhalb von Dörfern, Straßen und Schienen schützt die Talbewohner vor Felsstürzen, Murenabgängen, Lawinen und Hochwasser. Über 1,3 Millionen Menschen leben und arbeiten im bayerischen Al-

penraum, rund 4,5 Millionen Urlaubsgäste sowie unzählige Tagesausflügler besuchen die Bergwelt. Sie alle sind mehr denn je auf intakte und leistungsfähige Bergwälder angewiesen. Wird Schutzwald großflächig zerstört – beispielsweise durch Waldbrand oder Windwurf –, sind teure Maßnahmen nötig, um die Schutzwirkung wieder herzustellen. Langfristig kann der Wald aufgeforstet werden, doch bis die Bäume nachgewachsen sind, müssen technische Maßnahmen wie Fangzäune, Lawinerverbauungen, Schutzgalerien oder Wasserrückhaltebecken die Schutzfunktion des Waldes übernehmen. Waldpflege ist zwar recht teuer, aber immer noch 10 bis 30 Mal kostengünstiger als der Bau und Unterhalt von technischen Schutzmaßnahmen.

Der schwarze Raucher „Kandelabra“ in 3300 Meter Wassertiefe am Mittelatlantischen Rücken. An solchen hydrothermalen Strömungskanälen könnte das Leben begonnen haben

Reaktionslawine am Ursprung des Lebens

Die Entstehung erster Biomoleküle, die sich vervielfältigen und weiterentwickeln können, gilt chemisch gesehen als der Ursprung des Lebens. Wissenschaftler der TU München zeigten im Labor erstmals Mechanismen, mit denen wenige Biomoleküle eine solche Reaktionslawine in Gang setzen können

Vulkanisch-hydrothermale Strömungskanäle sind Risse in der Erdkruste, durch die Wasser strömt, das Vulkangase enthält und diverse Mineralien kontaktiert. In dieser extremen Umgebung könnten sich jene beiden Mechanismen entwickelt haben, die allem Leben zugrunde liegen: Vervielfältigung (Reproduktion) und Weiterentwicklung (Evolution) von Biomolekülen.

Am Anfang dieser „Kettenreaktion“ stehen nur einige wenige Aminosäuren, die aus den vulkanischen Gasen unter Katalyse durch die Mineralien gebildet werden. Ähnlich wie ein Dominostein, der eine ganze Lawine nach sich zieht, regen diese ersten Biomoleküle dann sowohl ihre eigene Vervielfältigung als auch die Produktion ganz neuer Biomoleküle an. „Auf diese Weise entsteht das Leben nach von Anfang an feststehenden Gesetzen der Chemie zwangsläufig und in einer vorgegebenen Richtung“, erklärt Prof. Günter Wächtershäuser, Honorarprofessor für evolutionäre Biochemie an der Universität Regensburg. Er hat den Mechanismus des sich selbst erzeugenden Urstoffwechsels theoretisch entwickelt – ein Laborbeweis jedoch fehlte bislang.

In Zusammenarbeit mit Wächtershäuser gelang es Wissenschaftlern um Dr. Claudia Huber und PD Dr. Wolfgang Eisenreich am Lehrstuhl für Biochemie der TUM erstmals, die Möglichkeit eines solchen sich selbst anregenden Mechanismus im Labor direkt nachzuweisen. Die zentrale Rolle kommt dem aus Verbindungen der Übergangsmetalle Nickel, Kobalt oder Eisen bestehenden Katalysator zu, mit dessen Hilfe die ersten Aminosäuren gebildet werden.

Er ist der Ursprung der Kettenreaktion, denn die gerade erst neu entstandenen Biomoleküle greifen am Zentrum des Katalysators an und ermöglichen so weitere chemische Reaktionen, in denen ganz neue Biomoleküle geschaffen werden.

In ihren Versuchen ahmten die Forscher die Bedingungen hydrothermaler Strömungskanäle nach und etablierten ein wässrig-metallorganisches System, das verschiedene Biomoleküle produziert, darunter auch die Aminosäuren Glycin und Alanin. Als Kohlenstoffquelle diente eine Cyano-Verbindung und Kohlenmonoxid als Reduktionsmittel. Nickelverbindungen erwiesen sich als der effektivste Katalysator. Das entstandene Glycin und Alanin führten die Wissenschaftler dann einem weiteren System zu, das wiederum zwei neue Biomoleküle herstellte. Das Ergebnis: Die beiden Aminosäuren erhöhten die Produktivität des zweiten Systems um das Fünffache.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Entstehung von Leben im heißen Wasser vulkanischer Schlotte praktisch möglich ist. Weil sich Temperatur, Druck und pH-Wert entlang des Strömungswegs ändern, bieten die Schlotte außerdem ein graduelles Spektrum von Bedingungen, das allen Stadien der frühen Evolution zuträglich ist, bis hin zur Entstehung der ersten Erbsubstanz. □

Link

www.biochemie.ch.tum.de

Der wichtigste Rohstoff für den Energiemix der Zukunft sind frische Ideen.

Tragen Sie Ihre dazu bei.



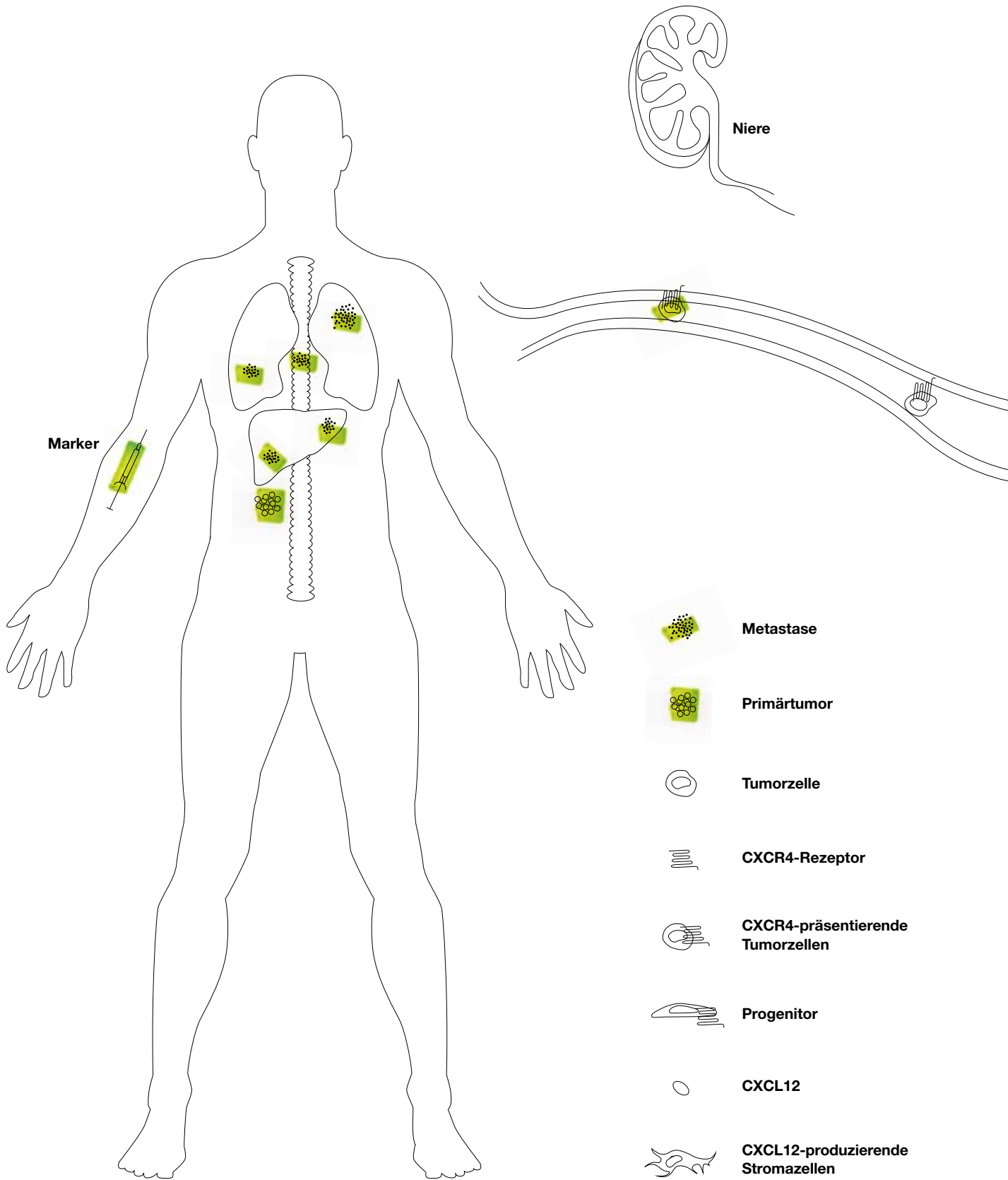
Hier bewerben!

Nur mit Energie lässt sich Zukunft sichern.

Die Welt steht vor ihrer wahrscheinlich größten Herausforderung: Bis zur Mitte des Jahrhunderts wird sich der Energiebedarf der Menschen verdoppeln. Gleichzeitig gilt es jedoch, die CO₂-Emissionen zu halbieren. AREVA stellt sich dieser Aufgabe und bietet wegweisende Konzepte für die Energieversorgung. Als Wegbereiter für Technologien zur CO₂-freien Stromerzeugung führen wir aber nicht nur die Kernenergie in eine sichere Zukunft. Unsere Kompetenz in den Bereichen Wind, Biomasse, Photovoltaik und Wasserstoff erweitert den Zugang zu sauberen, sicheren und wirtschaftlichen Energieträgern.

Bewerben Sie sich online unter: www.areva-career.com.

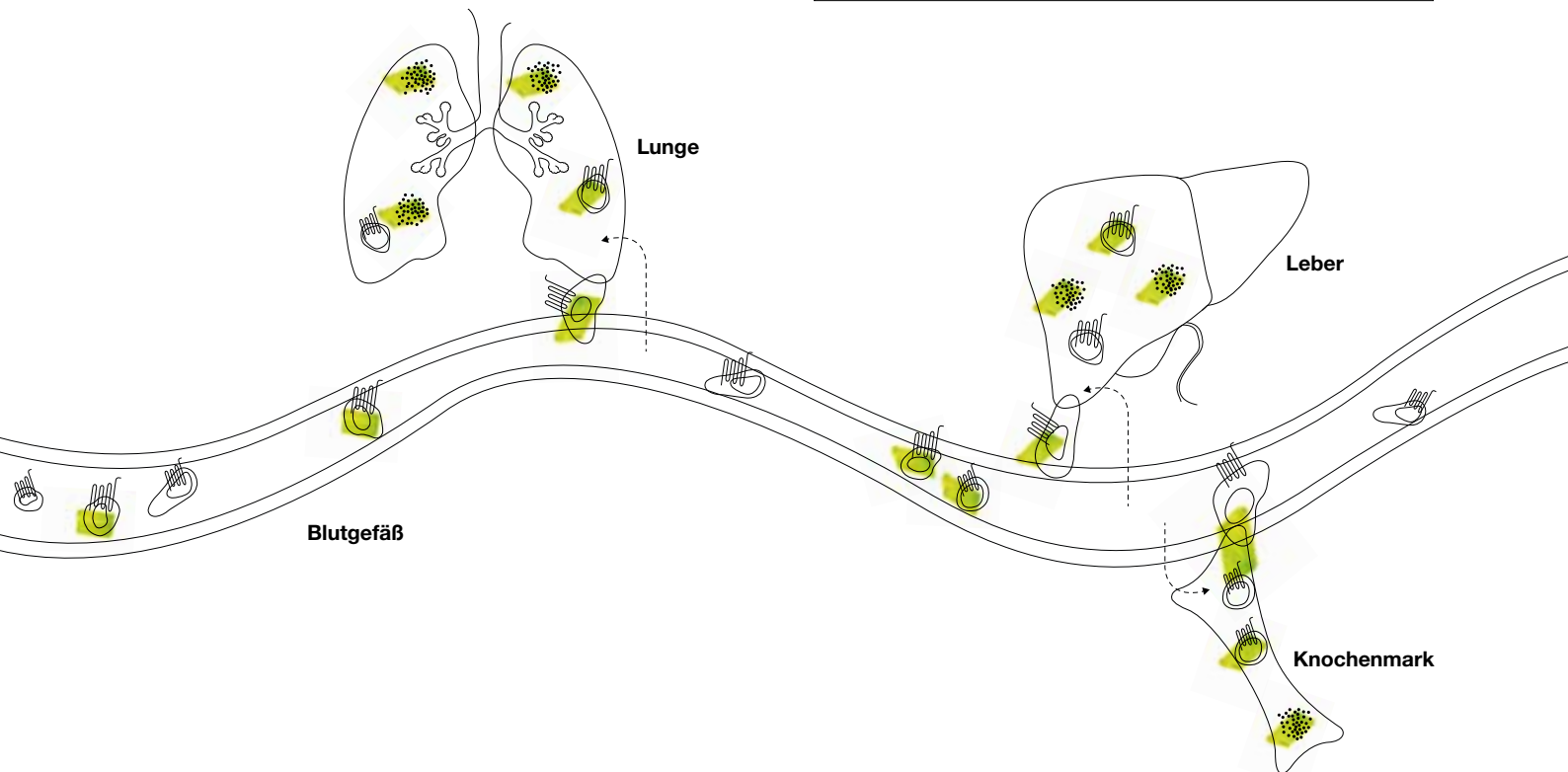




CXCR4-Rezeptor präsentierende Zellen des Primärtumors und seiner Metastasen, hier in Lunge, Leber und Knochenmark, binden den intravenös injizierten Marker binnen einiger Minuten und werden so im Rahmen einer PET Untersuchung sichtbar

Link

www.prc.ch.tum.de



Ein neuer Marker für die Tumordiagnostik

Eine Forschergruppe an der TU München entwickelt einen neuen Marker für PET-Untersuchungen in der Onkologie. Das Ziel: eine rasche und individuellere Diagnostik, welche Patienten von einer Chemotherapie profitieren werden und welche nicht

Gallium-68 besitzt eine Halbwertszeit von 68 Minuten – das können Sie sich leicht merken“, erklärt Prof. Hans-Jürgen Wester. „Aber schnell sollte es schon gehen, wenn Sie dieses Diagnostikum anwenden wollen – nach ungefähr einer Stunde ist die Hälfte davon schon wieder zerfallen.“

Wester, Inhaber des Lehrstuhls für Pharmazeutische Radiochemie an der TU München, zeigt die Produktionsanlage für radioaktiv markierte Substanzen der Universität am Klinikum rechts der Isar. In einem Raum stehen 14 gut kühlschrank-

große Wandschränke: „Heiße Zellen“, erklärt Wester. Hier werden die Tracer produziert – bedarfsgerecht, oft unmittelbar bevor eine nuklearmedizinische Diagnostik für die Patienten ansteht.

Das instabile Gallium-68 (^{68}Ga) sendet beim Zerfall sogenannte Positronen aus und kommt, gekoppelt an eine biologische Sonde, die das Isotop zu seinem Zielgewebe trägt, bei PET-Untersuchungen zum Einsatz. PET, die Positronen-Emissions-Tomographie, ist heute neben der Computertomographie (CT) und der Magnetresonanztomographie ▷



(MRT) eines der wichtigen Verfahren in der bildgebenden Diagnostik (siehe Kasten Seite 44). CT und MRT basieren auf Röntgenstrahlen bzw. magnetischen Wechselfeldern und machen vor allem Strukturen sichtbar, erfassen zum Beispiel die räumliche Gestalt und Abgrenzung von Tumoren. PET hingegen kann Aufschluss über feinste Stoffwechselveränderungen geben und damit frühzeitig Hinweise auf krankhafte Veränderungen – selbst wenn strukturell noch keine Veränderungen zu beobachten sind. Kann. Tut sie aber nach Westers Geschmack viel zu selten. „PET ist die bildgebende Methode mit dem größten Potenzial“, betont der Radiopharmazeut. Das aber eben bislang noch zu wenig erschlossen sei.

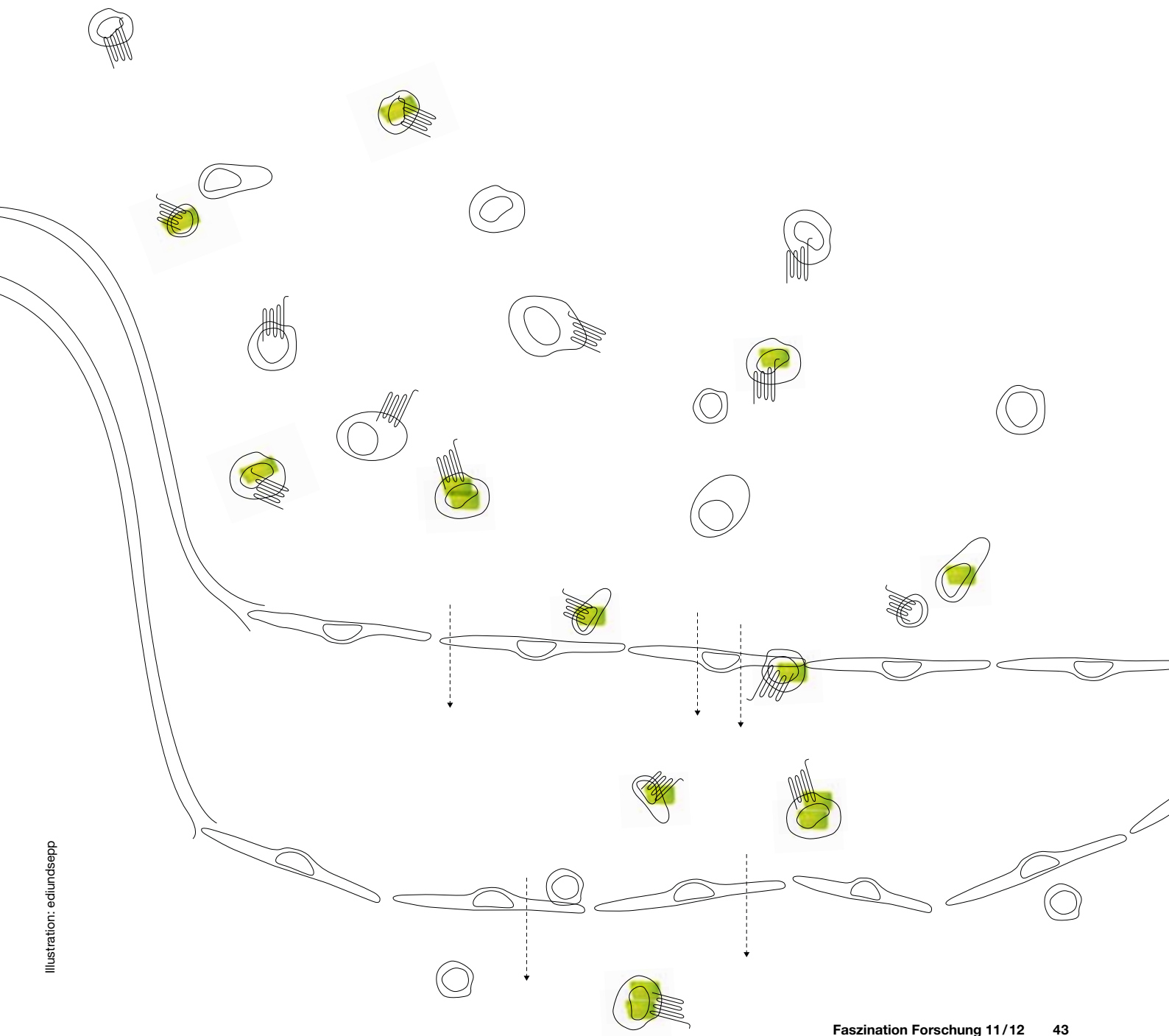
Eine Hürde sind die hohen Kosten. Viele wüssten gar nicht, welchen Aufwand es für Kliniken bedeutet, die Produktionsstätten zu unterhalten“, meint Wester. „Wir müssen hier den gesamten Formalismus erfüllen, der auch für die Arzneimittelproduktion in einem großen Pharmaunternehmen Vorschrift ist, nur dass wir nicht im Tonnenmaßstab, sondern im Nanomol-Bereich arbeiten.“ Und das unter hohem Zeitdruck: Die Nuklide werden mittels eines Isotopengenerators (^{68}Ga) oder in einem Zyklotron (etwa die Isotope ^{11}C , ^{18}F)

hergestellt, gleich zu den PET-Diagnostika weiterverarbeitet und kommen in der Regel unverzüglich zum Einsatz. Bei ^{68}Ga ist es der pure Zufall, dass seine Ordnungszahl auch der Halbwertszeit in Minuten entspricht. Beim Kohlenstoff ^{11}C ist bereits nach 20 Minuten die Hälfte zerfallen, bei Fluor ^{18}F nach 110 Minuten. Die aufwendige Produktion macht PET teuer. Die Kosten einer Untersuchung, heute meist in Kombination mit einer Computertomographie (CT) als PET-CT, können bis zu 1500 Euro ausmachen. CT oder MRT sind oft für weniger zu haben.

Auch wegen der Kosten gibt es es eine PET-Untersuchung als Kassenleistung regulär nur bei Lungenkarzinomen und manchen Lymphomen. Darüber hinaus nur bei speziellen Fragestellungen oder nach Entscheidung im Einzelfall.

Das Hauptproblem sieht Wester aber ganz woanders: „Wir brauchen spezifischere Marker, um die Methode noch erfolgreicher nutzen zu können.“ Als PET-Tracer für die Tumordiagnostik werden bislang vor allem Glucose- oder Aminosäurederivate eingesetzt, beides nehmen Tumorzellen oft schneller auf als gesunde Zellen. Wester: „In der Regel kommt die PET-CT heute vorrangig zum Einsatz, um onkologische Erkrankungen hinsichtlich Ausmaß und Verlauf ▶

Im Primärtumor stimuliert CXCL12 über den CXCR4 Rezeptor das Tumorwachstum. CXCL12/CXCR4 kann auch die Neubildung von Blutgefäßen (Neoangiogenese/Neovasculogenese) im Tumor unterstützen und auf diesem Wege für eine bessere Versorgung des schnell wachsenden Tumors sorgen. Einige wenige CXCR4-exprimierende Zellen des Primärtumors können sich ablösen, wandern in benachbarte Blutgefäße (Intravasation), und werden über das Gefäßsystem im Körper verteilt



zu charakterisieren und den Therapieerfolg abschließend zu bestimmen.“ Das Feld suche aber händeringend bessere Marker. „Etwa um gleich zu Beginn einer Therapie zu klären, ob sie nun einem Patienten nutzen wird oder ob eine andere nötig ist.“ Solche Marker sind aber Mangelware.

Raus aus dem Schattendasein

Eine Truppe von gut 15 Leuten um Wester will jetzt liefern – gefördert werden sie über den Sonderforschungsbereich 824 der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Im Zentrum steht ein zellmembranständiger Rezeptor, nach Forscher(un)-art reichlich abstrakt benannt als CXCR-Motiv-Chemokinrezeptor 4, abgekürzt CXCR4. Der hatte zunächst gute Chancen auf ein Dasein als Minor Important. 1993 fischten mehrere Gruppen die Gensequenz von CXCR4 aus dem Genom – erkannten in ihm einen weiteren von zahllosen Rezeptoren auf Immunzellen. Funktion unklar.

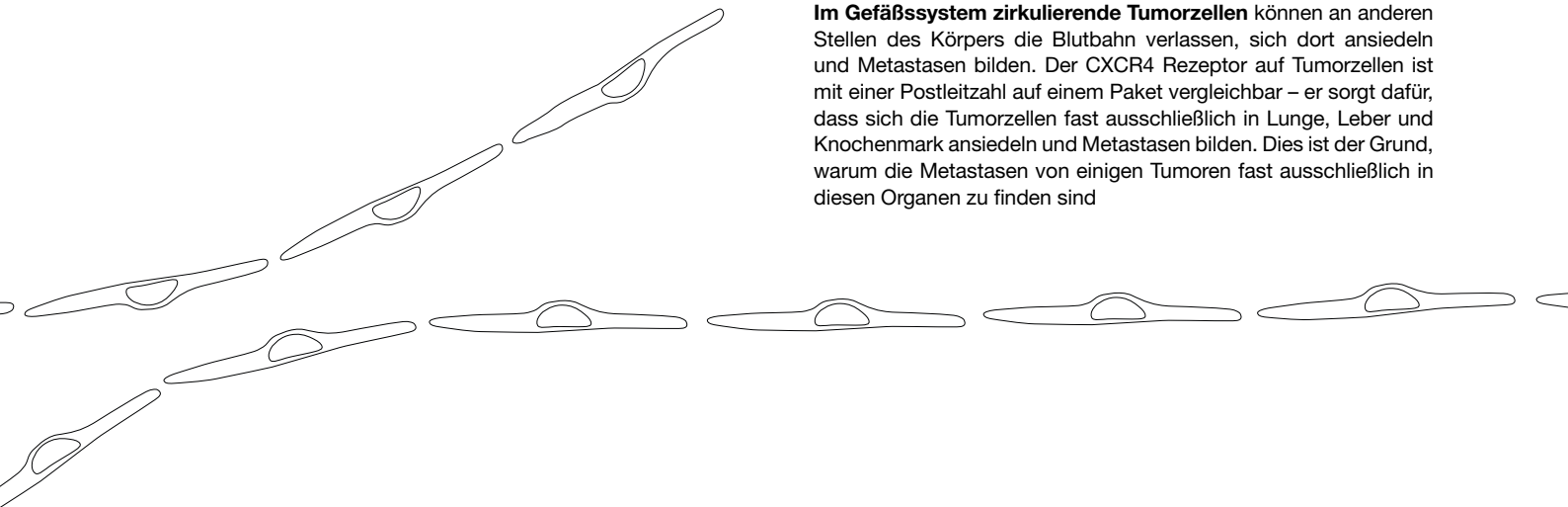
Schon drei Jahre später aber kommt der Nachweis, dass HIViren an CXCR4 andocken und ihn oft als Corezeptor für den Befall von menschlichen Immunzellen benötigen. Auf einmal brummt das Feld, denn sofort beginnt die Suche nach neuen Medikamenten gegen Aids-Viren via CXCR4-Blockade. Und bei HIV bleibt es nicht, denn längst ist klar: CXCR4 und das an ihn bindende Molekül, CXCL12, stehen für ein enorm wichtiges chemisches Kommunikationssystem im Körper, ein, so Hans-Jürgen Wester, „universales Adressierungssys-

Positronen-Emissions-Tomographie (PET)

Eine PET-Untersuchung gibt primär eine Information über Stoffwechselprozesse in einem Gewebe, weniger über dessen exakte Lokalisation. Letzteres ermöglicht eine in Kombination durchgeführte CT-Untersuchung. Die räumliche Auflösung einer PET-CT liegt, ähnlich wie bei CT und MRT, bei einigen wenigen Millimetern.

PET setzt auf sogenannte Positronen, positiv geladene Teilchen mit der gleichen Masse wie Elektronen. Detektiert werden von den PET-Geräten aber zwei diametral emittierte γ -Quanten. Diese entstehen, wenn das Positron mit einem Elektron im angrenzenden Gewebe annihiliert und die Massen beider Teilchen in sogenannte „Annihilationsstrahlung“ umgewandelt werden.

Die Kopplung eines Radionuklids an ein Biomolekül liefert das gewünschte Diagnostikum (den Marker, oder auch Tracer). Besonders oft im Einsatz ist mit ^{18}F Fluor (Halbwertszeit von 110 Minuten) markierte Glucose alias ^{18}F Fluorodeoxyglucose (FDG). Viele Tumorzellen nehmen aufgrund ihres erhöhten Stoffwechsels große Mengen Glucose auf. Andere gebräuchliche Radionuklide sind ^{11}C (Halbwertszeit von 20,3 Minuten) und ^{68}Ga Gallium (Halbwertszeit 68 Minuten). Ersteres kommt in der modifizierten Aminosäure (O-2 ^{18}F Fluorethyl)-L-Tyrosin (FET) zum Einsatz. Dieser Tracer ist eine Entwicklung einer AG um Hans-Jürgen Wester aus den 1990er-Jahren. Hirntumoren zeigen eine erhöhte Aufnahme von Aminosäuren. FET ist so heute ein Standard, um die biochemische Ausdehnung eines Tumors zu bestimmen, während z. B. MRT nur die morphologische Ausdehnung zeigt.



Im Gefäßsystem zirkulierende Tumorzellen können an anderen Stellen des Körpers die Blutbahn verlassen, sich dort ansiedeln und Metastasen bilden. Der CXCR4 Rezeptor auf Tumorzellen ist mit einer Postleitzahl auf einem Paket vergleichbar – er sorgt dafür, dass sich die Tumorzellen fast ausschließlich in Lunge, Leber und Knochenmark ansiedeln und Metastasen bilden. Dies ist der Grund, warum die Metastasen von einigen Tumoren fast ausschließlich in diesen Organen zu finden sind

tem“. So finden viele Stammzellen bereits im Embryo ihren Bestimmungsort nur, weil sie von CXCR4 auf ihrer Oberfläche quasi hingeführt werden. Ebenso funktioniert auch die Freisetzung von Stammzellen aus ihren Nischen im Knochenmark und ihre Beteiligung bei der Wundheilung bzw. Gefäßneubildung. Gleiches gilt für Immunzellen, die zum Ort einer Infektion strömen. Gelockt werden sie immer dorthin, wo gerade hohe Mengen des Gegenstücks zu CXCR4 produziert werden – des Liganden CXCL12. Wie Schlüssel und Schloss passen Rezeptor und Ligand zusammen.

Fehlregulationen im Gespann CXCR4/CXCL12 treten bei vielen Krankheiten auf. Über 20 Krebsarten zeigen eine Überexpression von CXCR4/CXCL12 mit negativen Folgen. Sei es Brust- oder Prostatakrebs: Die fatale Metastasierung startet, indem einzelne Zellen aus dem Primärtumor in andere Körpergewebe wandern; angelockt werden sie dabei oft von CXCL12. Auch sorgen Tumoren durch Abgabe von CXCL12 mit dafür, dass der Körper ihnen ein besseres Gefäßbett baut – es ist wiederum eine Voraussetzung dafür, dass ein Primärtumor über eine Größe von zwei bis drei Millimetern hinaus wachsen kann. Krebszellen „missbrauchen“ damit ein evolutiv altes Programm im Organismus für ihre Zwecke. „Mit CXCR4 haben wir einen Rezeptor in Händen, der uns beim Verständnis und damit zumindest bei der Diagnostik und Therapiekontrolle weiterhelfen kann“, ist Wester überzeugt.

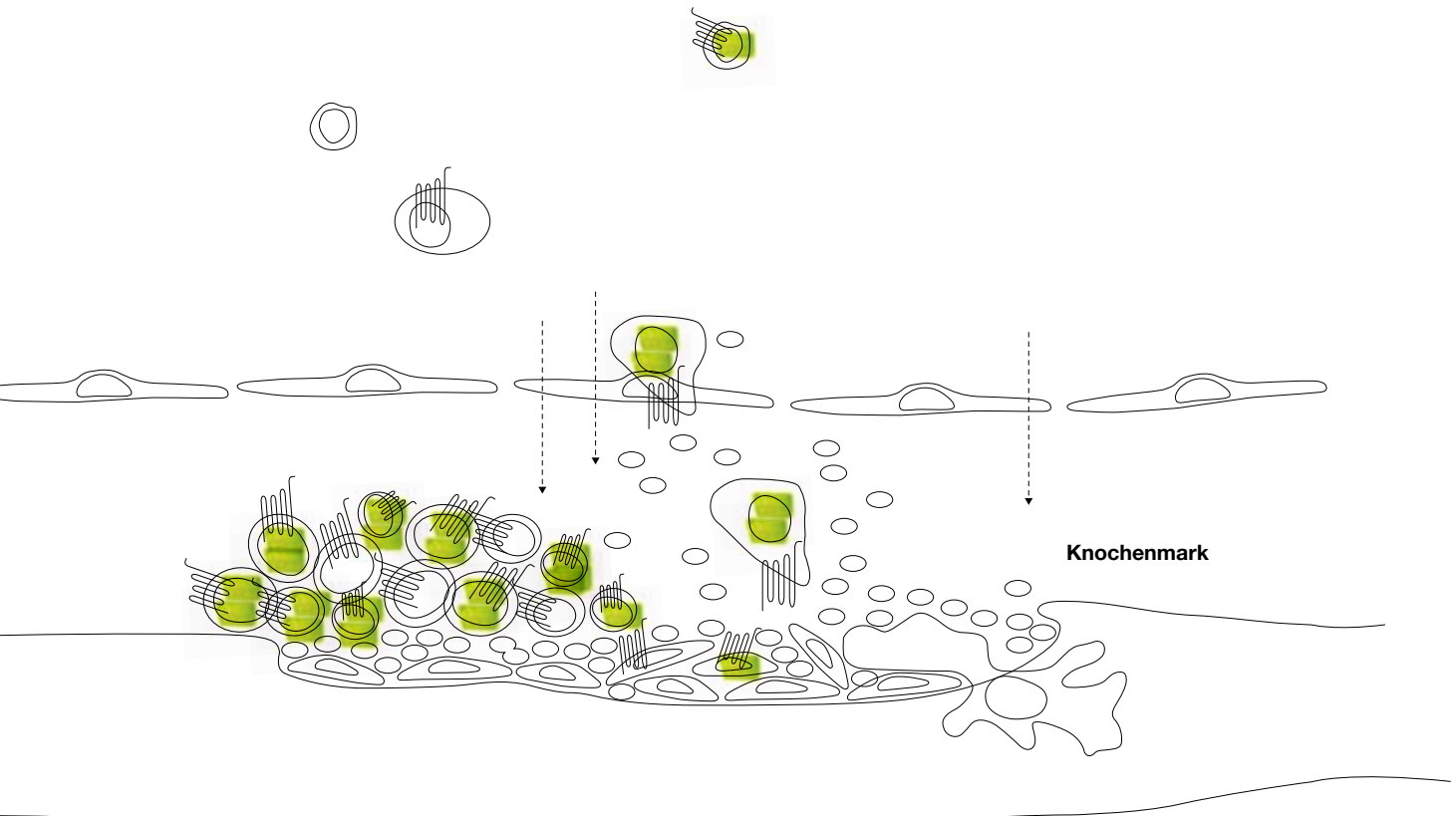
Anwendung in der Diagnostik

Denn die Hoffnung auf neue Therapeutika hat sich bisher kaum erfüllt. Auch wenn viele Studien mit Wirkstoffkandidaten laufen: Zugelassen ist nur der CXCR4-Blocker AMD3100 zur Mobilisierung von Stammzellen, die Ärzte nach einer Chemo- oder Strahlentherapie retransplantieren. Das große Hindernis für therapeutische Erfolge sind Probleme mit Nebenwirkungen. „Sobald Sie Wirkstoffe gegen CXCR4 in großer Menge und über einen längeren Zeitraum geben müssen, werden Sie immer auch gesunde Stammzellen im Körper in Mitleidenschaft ziehen, das ist ein womöglich kaum lösbarer Zielkonflikt“, betont Wester.

Anders bei einem neuen PET-Diagnostikum. Ein Tracer, der an CXCR4 bindet und ihn dadurch markiert, würde dem Patienten nur für kurze Zeit in kleinsten Mengen injiziert. Und anders als bei einem Medikament sollte es genügen, wenige Rezeptoren zu besetzen. „Für eine PET-Diagnostik reicht es, wenn wir weniger als fünf Prozent der CXCR4-Rezeptoren im Körper markieren“, erläutert Wester. Damit sollte es möglich sein, Tumoren sichtbar zu machen, die sehr hohe Mengen an CXCR4 tragen. Zugleich würde das Gros der nativen Rezeptoren ungestört weiterfunktionieren.

Erster Marker soll erprobt werden

Die ersten Daten geben dem Konzept recht. Ein erster neuer PET-Marker gegen CXCR4 soll tatsächlich noch ▶





dieses Jahr erstmals in Patienten erprobt werden. Fünf Jahre hat die Entwicklung gedauert. Man nehme: in diesem Fall ein Molekül, das japanische Forscher publiziert haben. 2005 berichtete eine Gruppe von der Kyoto University von ringförmigen kleinen Eiweißmolekülen als neuen Blockadestoffen (Antagonisten) von CXCR4. Die Japaner suchten nach besseren Medikamenten gegen HIV, verkleinerten dafür eine Ausgangssubstanz, ein kleines Eiweiß aus Pfeilschwanzkrebsen, Schritt für Schritt, ohne dass seine Fähigkeit verloren ging, an CXCR4 anzudocken. Dann verpassten sie der ganzen Angelegenheit noch einen Ringschluss – sie koppelten die fünf zentralen Aminosäuren zu einem Ring. Das Ergebnis bekommt noch das Laborkürzel FC131. In der vornehmen Fachsprache ist es ein „Zyklisches Pentapeptid“.

Den Kniff mit dem Ringschluss hatten sich die Forscher aus Kyoto wiederum von Wissenschaftlern der TUM abgeschaut. Es war der renommierte Peptidchemiker Horst Kessler, heute am Institute for Advanced Study der TUM und bei der Entwicklung der neuen PET-Marker ein Hauptakteur, der schon Mitte der 1970er lineare Peptide in Ringform gebracht hatte, um eine gewünschte räumliche Kon-

formation dauerhafter zu stabilisieren. Lineare Moleküle „zittern“ aufgrund der höheren Freiheitsgrade viel stärker im molekularen Maßstab hin und her – wechseln ihre Konformation. „Auch eine gewünschte Bioaktivität können wir durch die Ringform stabilisieren“, erklärt Kessler.

Die Münchener wiederum „fischten“ FC131 aus der Literatur und nahmen es zum Ausgangspunkt ihrer Entwicklung neuer Radiopharmaka. „Die ersten Daten zur Bindung mit dem radiomarkierten Liganden waren gut“, erinnert sich Wester. Doch zeigten Versuche im Mausmodell gravierende Probleme. FC131 markierte zwar Tumoren, doch zeigten die Aufnahmen starke unspezifische Anreicherungen vielerorts im Körper. „Viel zu viel Hintergrundsignal, sodass vor allem Tumoren im Bauchraum schlicht nicht erkannt würden“, erinnert sich Wester. Als Grund der Malaise stellte sich heraus, dass FC131 sehr fettlöslich war, lipophil, und sich deshalb vor allem in Leber und Darm anreicherte. Zunächst war sogar denkbar, dass FC131 in Leber und Bauchraum noch an anderen Rezeptoren als CXCR4 andockte – was einen kompletten Neubeginn der Entwicklung bedeutet hätte. Entwarnung gaben weitere Versuche, die zeigten, dass die Signale in Leber oder Niere mit der ▶



Innenleben des Kompaktzyklotrons am Klinikum rechts der Isar: Hier werden Wasserstoffionen beschleunigt und mittels Kernreaktionen radioaktive Isotope produziert. Diese werden dann als Gas oder in Flüssigkeit gelöst in dünnen Kapillaren zur Weiterverarbeitung in das benachbarte GMP (Good Manufacturing Practice) Labor geleitet



Zeit rasch abnehmen, während sie in Tumorgewebe länger konstant blieben. „Das war ein klarer Hinweis, dass die Substanz wirklich spezifisch an CXCR4 bindet“, erklärt Wester.

Es blieb die Schlüsselfrage: Wie lässt sich die Substanz so umbauen, dass sie nur noch wenig unspezifische Bindung eingeht? Geholfen haben Computerprogramme, mit denen sich die räumliche Anordnung von CXCR4 mit neu designten Liganden simulieren lässt. „Wir konnten hieraus schließen, an welchen Molekülteilen wir chemisch variieren können, ohne die Affinität zum Rezeptor zu verschlechtern“, berichtet Wester. Der Rest war viel Fleißarbeit: Design und Synthese zahlreicher chemischer Varianten, gefolgt von Tests und nochmals Tests in Zellkultur und Tiermodell.

Zusätzlich galt es auch noch, eine weitere Moleküleinheit an das Grundgerüst anzufüügen, die das nötige Isotop aufnehmen würde. Besonders gute CXCR4-Liganden ergaben sich, wenn die Münchener einen etablierten Träger just für Gallium-68 an ein verbessertes Grundgerüst von FC131 koppelten, genannt DOTA. Wie ein winziger molekularer Käfig kann DOTA ein Gallium-Molekül festhalten.

Am Ende standen Verbindungen, die in Zellkulturen in sehr geringen Mengen, also nanomolarer Konzentration (6 mal 10^{11} Moleküle je Milliliter Zellkultur), bereits eine sehr hohe Affinität zum Rezeptor zeigten – und dies bei drastisch reduzierter unspezifischer Bindung in anderen Regionen.

Neue zyklische Pentapeptide gegen CXCR4 alias DOTA-konjugierte CPCR4-Marker lautet der sperrige Oberbegriff für die neue Molekülgruppe. „Es sind derzeit die besten PET-Liganden für CXCR4“, betont Wester. Läuft bei der weiteren Entwicklung alles glatt, wären es die ersten Marker für diesen Rezeptor überhaupt im klinischen Einsatz. Noch bleibt vieles zu testen. Inwieweit die Substanzen wirklich funktionieren, müssen klinische Versuche zeigen. Die ersten sollen noch 2012 in Zusammenarbeit mit Prof. Markus Schwaiger, Direktor der Nuklearmedizinischen Klinik und Poliklinik am Klinikum rechts der Isar der TUM, beginnen.

Auch die Frage nach dem medizinischen Gewinn durch eine solche CXCR4-Diagnostik bleibt dann zu klären. Eine Chance darauf, hier einen Frühmarker für das Ansprechen auf eine Therapie zu haben, besteht. „Wir hoffen, dass wir über das Auslesen der CXCR4-Expression auf Tumoren in Zukunft Ärzten wertvolle, therapierelevante Informationen geben können“, erklärt Wester. Ein rasches Absinken der Dichte dieser Rezeptoren könnte einmal wichtiger Parameter werden für das Ansprechen auf eine Therapie. Wester: „Welcher Patient eignet sich für eine ausgewählte Therapie, wie schnell spricht jemand auf diese Therapie an, und bei welchem Patienten muss man die Therapie wechseln?“ Ein neuer Marker für die PET-Diagnostik als Baustein für eine individuellere Medizin. *Bernhard Epping*

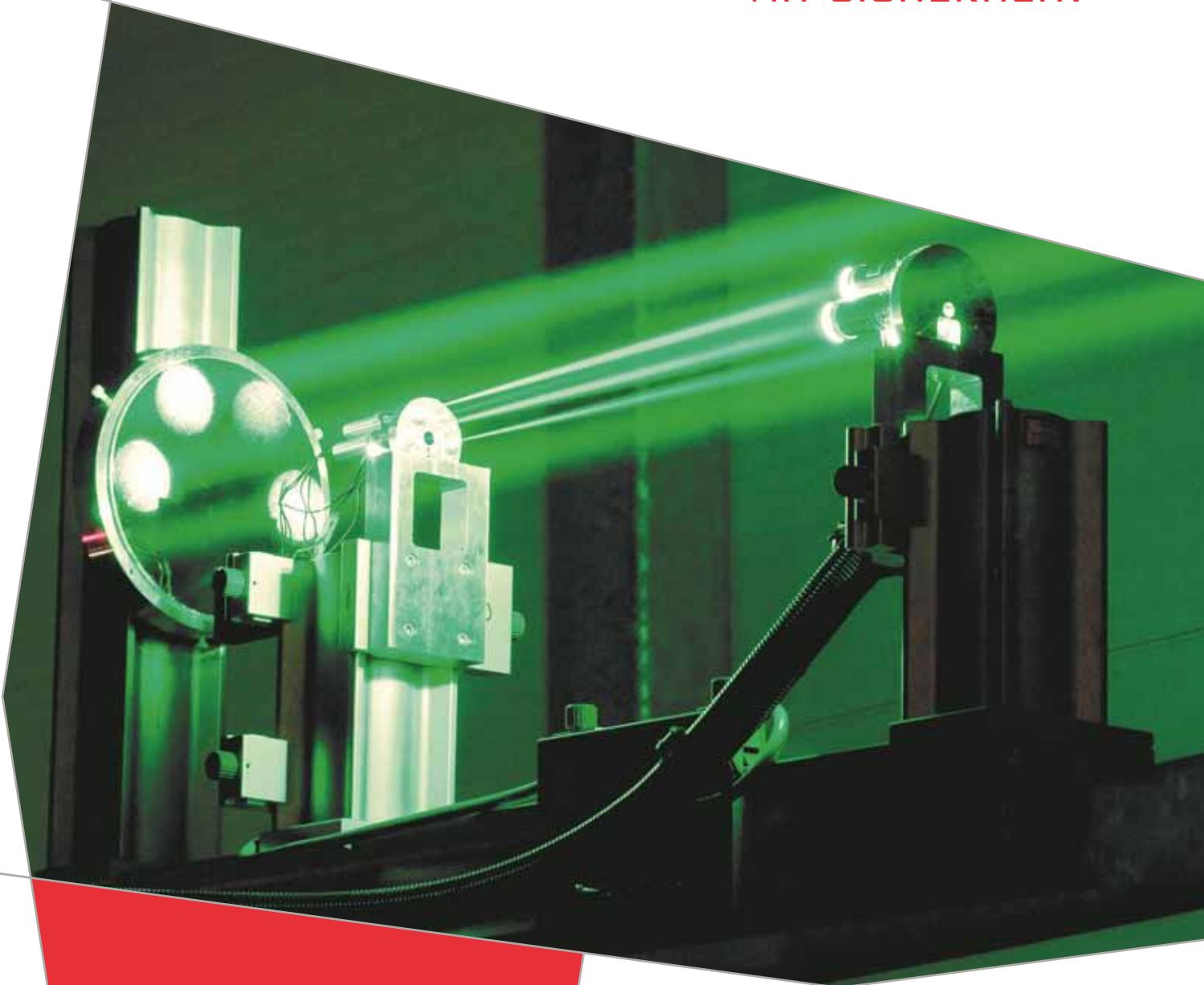


Die applikationsfertigen Radiopharmaka werden unter kontrollierten Bedingungen hergestellt. Die Produktion erfolgt vollautomatisch in miniaturisierten Syntheseapparaturen in bleiabgeschirmten „Heissen Zellen“. Die am Ende der Apparatur in sterile Gefäße tropfende, injektionsfertige Lösung wird nach aufwändiger Qualitätskontrolle direkt am PET für die intravenöse Applikation am Patienten verwendet



Foto: Lehrstuhl für Pharmazeutische Radiochemie; Illustration: edlundsepp

WISSEN SCHAFFT ZUKUNFT.
MIT SICHERHEIT.



Als High-Tech-Unternehmen der Verteidigungsindustrie entwickeln, produzieren und warten wir Lenkflugkörpersysteme, Komponenten und Subsysteme für Luftwaffe, Marine und Heer. Wir suchen engagierte, motivierte und erfahrene Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die mit uns an der Sicherheit der Zukunft arbeiten.

Wir sind Teil der europäischen und global agierenden MBDA mit einer Konzernzugehörigkeit zur EADS und bieten Ihnen ein stabiles Umfeld, langfristige Perspektiven sowie nationale und internationale Entwicklungsmöglichkeiten.

Bei uns erwarten Sie herausfordernde Aufgaben, ein modernes Arbeitsumfeld, ein ausgezeichnetes Betriebsklima, umfangreiche Sozialleistungen, flexible Arbeitszeitmodelle sowie eine leistungsorientierte Vergütung.

Unsere aktuellen Stellenangebote finden Sie unter www.mbda-careers.de

MBDA Deutschland
Recruiting
Hagenauer Forst 27
86529 Schrobenhausen

bewerbung@mbda-careers.de
www.mbda-careers.de



MBDA
MISSILE SYSTEMS



Navigation mit Bilddaten

Ob im Auto, im Gelände oder in der Stadt: Navigationsysteme weisen den Weg – GPS-Empfang vorausgesetzt. Um sich in Gebäuden zurechtzufinden, bleiben oft nur Hinweisschilder. Wissenschaftler an der TU München haben jetzt eine Technik entwickelt, die ohne GPS auskommt. Das System NAVVIS arbeitet mit visuellen Daten – und bringt seine Anwender mit wirklichkeitsgetreuen 3-D-Bildern zum Ziel

Für die Positionsbestimmung nutzt NAVVIS überwiegend visuelle Informationen. Die Wissenschaftler haben dafür ein besonderes Wiedererkennungsverfahren entwickelt. Ein Gebäude wird zunächst fotografiert, markante Stellen, zum Beispiel Treppen oder Beschilderungen, werden dabei kartiert. Mit einer Smartphone-App können Anwender dann das Kartenmaterial anzeigen und ihren aktuellen Standort feststellen. Dafür müssen sie nur ein Bild ihrer Umgebung aufnehmen – die Datenbank vergleicht das Foto mit den hinterlegten Aufnahmen und bestimmt die Orientierung und Position auf den Meter genau. Den Weg zum Ziel weist die App mit Pfeilen in einer 3-D-Darstellung. Das NAVVIS-Verfahren eignet sich für alle Orte, die außerhalb des Satellitenempfangs liegen.

Mit dem Start der Applikation lädt das System die vorhandenen visuellen Datenpakete. Wenn der Nutzer seine aktuelle Umgebung fotografiert, vergleicht das Programm die Aufnahme in Sekundenbruchteilen mit den Referenzdaten und ermittelt so die genaue Position. Für die grobe

Für die Kartierung nutzt NAVVIS vertikale und horizontale Laseraufnahmen. Die Umgebung wird als dreidimensionale Punktwolke dargestellt

Ortsbestimmung lassen sich zusätzlich Funknetz-Signale verwenden. Allerdings ändern sich Gebäude ständig: Schilder werden abmontiert, gerade in großen Gebäuden gibt es immer wieder Baustellen. Wie sich NAVVIS aktualisiert, beschreibt Georg Schroth, der das Projekt am Lehrstuhl für Medientechnik der TUM leitet: „Neben der Ortsbestimmung setzt das System die Aufnahmen der User dazu ein, Änderungen in der Umgebung zu erfassen und veraltete Daten zu überschreiben.“

Für die Kartierung der Gebäude nutzen die Wissenschaftler einen „Mapping-Trolley“. Dieser Wagen hat unter anderem zwei Laseraufnahmegeräte, Spiegelreflexkameras und eine 360-Grad-Kamera an Bord. Während der Trolley durch ein Gebäude fährt, tasten die beiden Laser horizontal und vertikal die Abmessungen der Umgebung ab und erzeugen mithilfe von dreidimensionalen Punktwolken eine virtuelle Karte. Die fotografischen Aufnahmen werden mit einer Software über die Bildpunkte gelegt. Auf diese Weise entsteht eine realitätsgetreue 3-D-Darstellung.

NAVVIS wird derzeit an der TU München getestet: „Mit seinen vielen Stockwerken und verwinkelten Korridoren ist das über Jahrzehnte gewachsene Stammgelände ziemlich unübersichtlich. Damit bietet es ein ausgezeichnetes Test-szenario“, sagt Georg Schroth. Neben der reinen Navigation gibt es weitere Einsatzmöglichkeiten, die sein Kollege Robert Huitl erklärt: „Mit Zusatzprogrammen lässt sich die Software auch für Augmented-Reality-Anwendungen nutzen. Damit könnten beispielsweise die Besucher im Louvre die Mona Lisa nicht nur finden, sondern sich auch Informationen zum Gemälde oder andere Werke von Leonardo da Vinci zeigen lassen.“ Eine weitere Einsatzmöglichkeit sind virtuelle Rundgänge per PC oder Smartphone. □

Link

www.navvis.de

Hightech-Baustoffe: Superleichte Materialien und Kohlenstoff-Nanoschichten

Millionen Jahre brauchte die Natur, um verschüttete Bäume langsam in Stein zu verwandeln. Deutlich schneller entstehen steinerne Holzstrukturen im Labor am Lehrstuhl für Bauchemie der TU München. Hier forscht Prof. Johann Plank an Betonmischungen mit Rekordfestigkeit und entwickelt völlig neuartige Baustoffe



Link

www.bauchemie.ch.tum.de





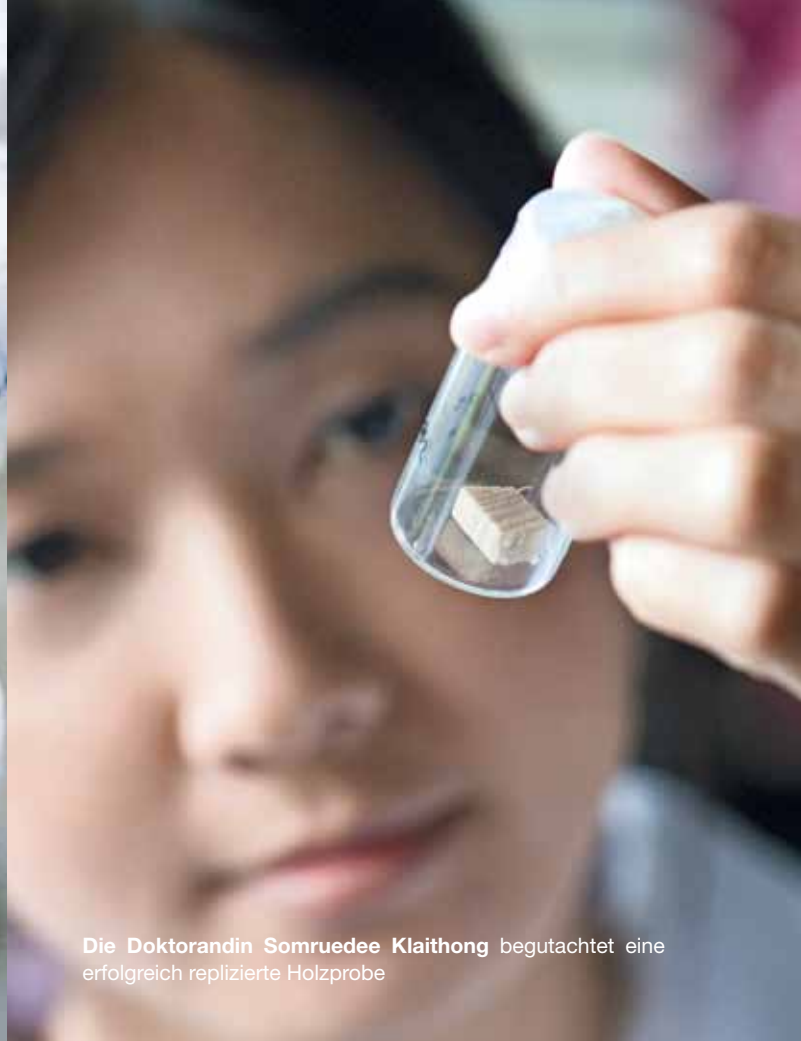
Holzprobe nach der Infiltration. Nach dem anschließenden Verbrennen des Holzes bleibt ein Abbild der Struktur aus Calciumcarbonat zurück

Der **Bauchemiker Johann Plank** entwickelt unter anderem Aergelle. Die ultraleichten Materialien haben hervorragende Wärmeisolationseigenschaften und können zur Dämmung von Gebäuden eingesetzt werden





Einige Versuche waren nötig, um die Replikation von Holz mit organischem Material zu optimieren



Die Doktorandin Somruedee Klaiithong begutachtet eine erfolgreich replizierte Holzprobe

Die Doktoranden Julia Pickelmann und Tobias Kornprobst betrachten Nanopartikel im Elektronenmikroskop. Mit dem Gerät am Lehrstuhl können auch feuchte Proben wie hydratisierender Zement in hoher Vergrößerung untersucht werden





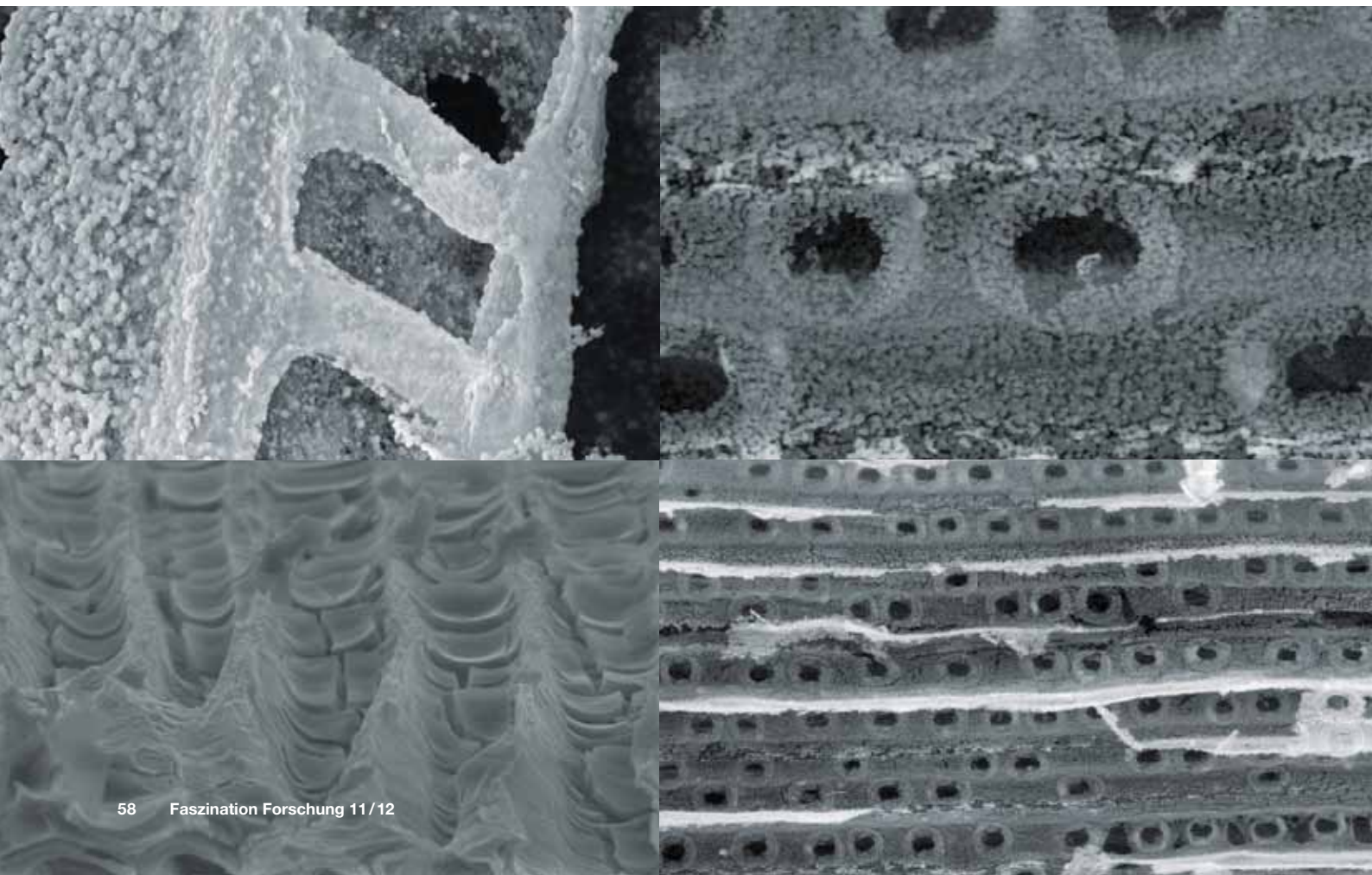
Mehrere Millionen Jahre brauchte die Natur, um die Baumriesen im Petrified Forest südlich vom Grand Canyon in Arizona zu versteinern. Am Lehrstuhl für Bauchemie dauert es nur Stunden, ein Stück Holz praktisch auf die gleiche Art und Weise zu verwandeln. Klar, es sind nicht ganze Baumstämme, sondern kleine, fingerlange Abschnitte. Und sie versteinern auch nicht vollständig, es werden nur die Zellwände durch Calciumcarbonat, also Kalkstein, ersetzt. Aber das Prinzip ist gleich: In der Natur sickerte über Jahrtausende kieselensäurehaltiges Wasser in die Bäume, die nach heftigen Vulkanausbrüchen unter einer dicken Schicht Asche und Lava begraben lagen. Nach und nach lagerte sich in den Zellen immer mehr Kieselsäure ab und ersetzte die organischen Baubestandteile. Übrig blieb ein zu Stein gewordener Baum.

Viel schneller geht dieser Prozess am Lehrstuhl für Bauchemie der TU München bei Johann Plank. Seine Arbeitsgruppe beschäftigt sich nicht nur mit modernen Betonen und Zement, sondern auch mit gänzlich neuartigen Baustoffen. Dort werden aus Holz schneeweiße, nanoporöse Gesteinsabdrücke gefertigt, deren filigrane Architektur ein exaktes Abbild der Natur ist.

Versteinertes Holz aus dem Ofen

In natürlichem Holz sind die Zellwände hierarchisch aufgebaut – ein Verbundmaterial, dessen kleinste Einheiten aus Cellulosemolekülen bestehen, die sich zu etwa zehn Nanometer dünnen Faserbausteinen verdichten, den Mikrofibrillen. Aus denen entstehen wiederum Faserbündel, die, vom Holzstoff Lignin umschlossen, die Struktur bestimmen und

In diesen elektronenmikroskopischen Aufnahmen von Holz-Replikaten ist ihr Aufbau aus Nanopartikeln deutlich zu erkennen. Zu sehen sind aus Calciumcarbonat nachgebildete Tracheide, also Strukturelemente, die den Pflanzensaft im Holz transportieren



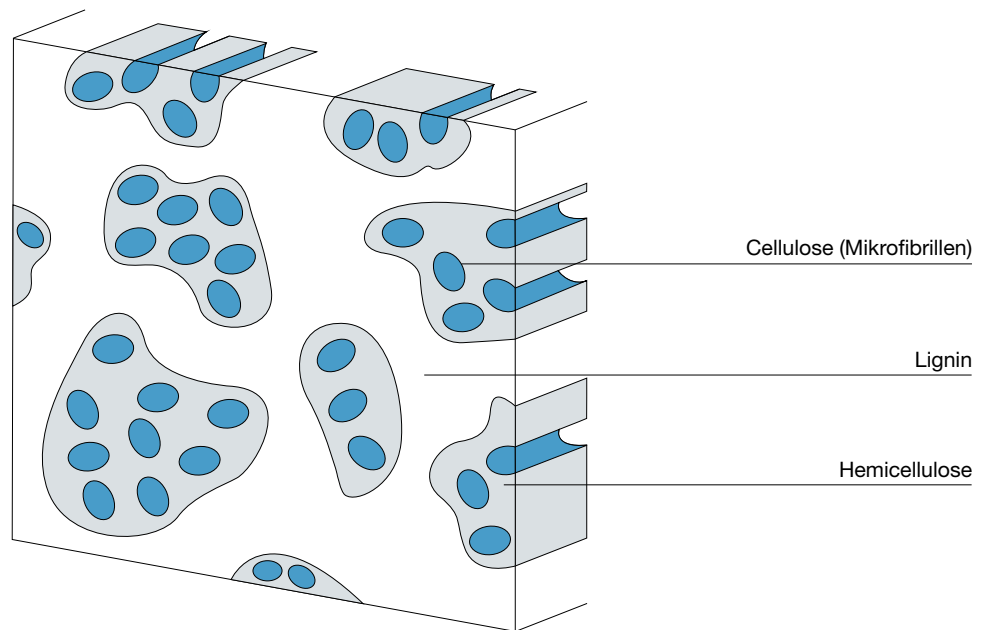
letztlich als größte sichtbare Einheit die Jahresringe bilden. „Bis hinunter auf die Zellebene konnte die Holzstruktur als Kalkstein-Replik abgebildet werden“, sagt Plank. Dazu weicht ein Mitarbeiter ein Stückchen Fichtenholz in der klaren Lösung einer Calciumverbindung ein, dann verbrennen die Zellwände des Holzes im Ofen bei mehr als 600 Grad Celsius und hinterlassen eine exakte Replik – aus reinem, feinporösem Calciumcarbonat. Das Holzstück ist an sich nur eine Schablone, um die hierarchisch angeordneten Poren im Nanomaßstab zu formen. Ganz luftige und leichte Materialien kommen dabei heraus, die man bestens zur Wärme- oder Schalldämmung in Gebäuden einsetzen könnte. Planks Interesse gilt nicht nur klassischen Baustoffen wie dem Zement, manchmal ergeben sich auch ganz andere Ideen: Die aus dem Holz gewonnenen Calciumcarbonat-

Hohlkörper sind genauso als Trägermaterial für Katalysatoren denkbar, in dessen Hohlräumen einmal Spuren von Edelmetallen chemische Reaktionen um ein Vielfaches schneller ablaufen lassen. Mit im Boot bei diesen Forschungsarbeiten ist Prof. Cordt Zollfrank, ein ausgewiesener Holzfachmann, der das Fachgebiet Biogene Polymere der TUM am Wissenschaftszentrum Straubing leitet.

Superleichte Isolierstoffe

Auch ganz ohne Trägermaterial lassen sich aus ähnlichen Calciumsalz-Lösungen innovative Materialien gewinnen: Zu einem Gel erstarrt, trocknen die Lösungen unter Wasserentzug langsam und es bleibt fast nichts – „gefrorener Rauch“ nannten manche Forscher spaßeshalber die luftige Materie oder „feste Luft“. Solche Aerogele auf Basis ▶

Holz ist ein hierarchisch aufgebautes Material: Cellulose bildet dünne Faserbausteine, sogenannte Mikrofibrillen, die ihrerseits wieder eine übergeordnete Struktur von Bündeln ausbilden



von Kieselsäure waren bereits bekannt, in Planks Gruppe gelangen sie zum ersten Mal mit Calciumcarbonat. Warum beschäftigen den Forscher solche Gele? Sie wiegen fast nichts, und in den Nanoporen können Gasteilchen kaum zusammenstoßen, sodass praktisch keine Wärmeübertragung stattfindet. Die laut Guinnessbuch der Rekorde leichtesten Feststoffe überhaupt sind somit auch die besten Wärmeisolatoren.

Das war Grund für die Bauindustrie, sich für Aerogele zu interessieren, schließlich geht hierzulande immer noch der größte Teil unseres Energieverbrauchs in die Heizung von Gebäuden – und über mangelnde Gebäudedämmung wieder verloren. Mit Aerogelen ließen sich die heute dick auf die Fassaden gepackten Dämmschichten auf nur wenige Zentimeter verringern, und diese könnten auch einfach mit dem Putz von innen aufgebracht werden.

So richtig vertragen sich die Kieselsäure-Aerogele allerdings nicht mit dem Zement – mit dort häufig vorkommenden Kaliumverbindungen beispielsweise reagieren sie mit der Zeit zu einem alkalischen Kieselsäure-Gel, welches quillt und durch die Volumenvergrößerung den Beton regelrecht sprengt. „Jeder Hersteller von Beton muss zusehen, dass er bestimmte Gesteine, die mit Zement zu solchen Kieselsäure-Gelen reagieren können, im Sand oder Kies vermeidet“, sagt Plank.

Seine Alternative zu den Aerogelen aus Kieselsäure sind solche aus Calciumcarbonat. „Das passt besser zu unseren Baustoffen, und Kalkstein haben wir sowieso im Putz.“ Die Synthese ist im Grunde einfach – Zutaten sind Methanol, gebrannter Kalk und Kohlendioxid. Löst man den Kalk in Methanol und leitet Kohlendioxid ein, erhält man Calciumdimethylcarbonat – und mit etwas Wasser wächst daraus ein Netzwerk winzigster Partikel aus Calciumcarbonat. Chemisch ist dies im Prinzip identisch mit dem Kalk im Wasserkessel, allerdings sind hier die Teilchen anfangs nur ein bis zehn Nanometer groß. Wie klebrige Perlen verwachsen sie zum Teil miteinander und bilden ein Netzwerk aus winzig kleinen Schneebällen, ein luftiges, weißes Nichts, das nur noch getrocknet werden muss. „Im Moment macht man das vorsichtig mit überkritischem Kohlendioxid, aber es gibt schon Ideen, das anders und preiswerter zu machen“, sagt Plank. „Damit beschäftigt sich die Industrie gerade sehr intensiv.“ Trockenmörtel mit etwa 20 Prozent solcher Aerogele, eingebracht als Granulat aus ein bis zwei Millimeter großen Körnchen, werden gerade als Wärmedämmputze erprobt. Weil die Calciumcarbonat-Aerogele zwar die Wärme stoppen, Licht aber durchlassen, denkt man auch an völlig neuartige Beleuchtungskonzepte wie zum Beispiel transparente Fassadenelemente und Decken für Industriehallen.

Der festeste Beton aller Zeiten

Der letzte Schrei in Sachen Nanomaterialien ist derzeit das Graphen – wabenartige Kohlenstoffflocken, nur eine Atomlage dick, mit vielverheißenden elektrischen und me-

chanischen Eigenschaften und dafür vor zwei Jahren mit dem Nobelpreis für Physik gekrönt. Als ähnlich strukturierte Schläuche schon länger bekannt sind die Kohlenstoff-Nanoröhren. Sie sind inzwischen in technische Anwendungen vorgedrungen – bis hin zu Tennisschlägern aus Kunststoff, welchem eine Beimischung von nur einem Prozent Carbon Nanotubes (CNT) eine um 25 Prozent verbesserte Zugfestigkeit verleiht.

Nanomaterialien als Betonarmierung

Könnte Graphen auch Beton zu deutlich besserer Zugfestigkeit verhelfen – ähnlich wie ein Glasfasernetz bestimmte Kunststoffe nahezu unzerstörbar macht? Der Maßstab ist hier allerdings um mehrere Größenordnungen kleiner, das Graphengitter für das menschliche Auge nicht mehr sichtbar. Erste Versuche waren wenig erfolgreich: Die geschlossenen CNTs und Graphenschichten bieten keine Ankerpunkte für eine Anbindung an die anorganischen Zementbestandteile. Am Lehrstuhl für Bauchemie gelang es der Arbeitsgruppe von Johann Plank vor wenigen Wochen erstmals, speziell oxidiertes Graphen im Zement chemisch einzubauen. Damit könnte eine Nanoarmierung für Beton erreicht werden. „Dieser Beton hätte unglaublich hohe Festigkeiten“, schwärmt Plank. ▷

Unten: Im Mörtellabor des Lehrstuhls mischen M. Sc. Alex Lange und die CTA Dagmar Lettrich Material für Versuchskörper an **Diese Proben** werden dann in einer hydraulischen Presse auf Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit geprüft – rechts ist der Test eines Mörtelprismas zu sehen





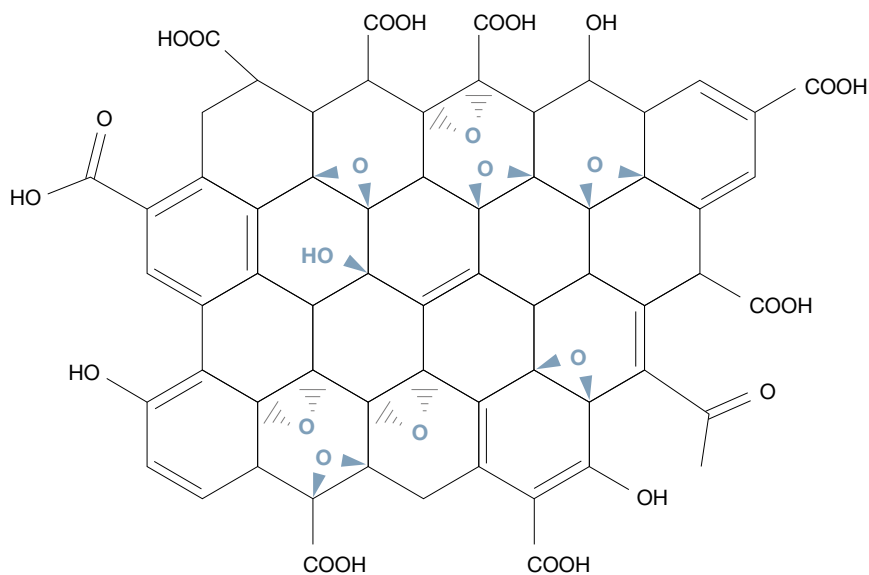
Ende eines Druckfestigkeitstests: Ein Probenkörper versagt in der hydraulischen Presse



Mit speziellen Reagenzien gelingt es, die Graphenschichten aufzubrechen und Sauerstoffatome anzubinden, also das Graphen zu oxidieren. So ausgestattet mit einem Saum aus Sauerstoff- und Wasserstoffatomen gewinnen die Kohlenstoffwaben an negativer Ladung, werden wasserlöslich – und rutschen zwischen die positiv geladenen Schichten eines klassischen Zementbestandteils wie Calcium-Aluminat-Hydrat. Das Ergebnis ist ein unscheinbares, graues Pulver mit allerdings geradezu magischen Eigenschaften: Wie ein Stahlgitter im Beton oder Fasern im Kunststoff würden die Graphenoxid-Schichten die mechanischen Eigenschaften ganz erheblich verbessern, allerdings nicht sichtbar, sondern auf der Ebene der Moleküle, so Plank. „Hier sind wir wirklich auf der Nanoebene.“ Der Bauchemiker freut sich: „Das hat vor uns noch niemand geschafft.“ Beton ist

zwar sehr druckbeständig, ein Problem ist aber die mangelnde Biegezugfestigkeit. Das begrenzt die Höhenflüge der Architekten – bei Brücken und Wolkenkratzern gilt es, enorme Windlasten abzuleiten. Das höchste Gebäude der Welt, der Burj Khalifa in Dubai, schwankt in 828 Meter Höhe etwa eineinhalb Meter seitlich – die Spannungen fängt die einer Pflanze nachempfundene Struktur auf. „In China und Moskau sind Gebäude mit mehr als einem Kilometer Höhe in Vorbereitung“, weiß Plank. Die nötige Stabilität könnte dem Beton seine neue Zutat verleihen. „Wir schaffen Beton mit bisher nie gekannten Eigenschaften, und das Material ist spottbillig“, betont er. Versuche in größerem Maßstab sind schon in Planung. „Wenn’s klappt, dann erreichen wir mit nur einem Prozent Zusatz eine Verdopplung der Zugfestigkeit – das wäre ein ganz neues Material.“ ▸

Am Institut für Bauchemie ist es erstmals gelungen, das Nanomaterial Graphenoxid als Verstärkung in Zement einzusetzen. Der Beton gewinnt dadurch an Zugfestigkeit, was besonders für Brücken und Hochhäuser wichtig ist



Warum explodierte die Bohrinself im Golf von Mexiko?

Eine falsche Zementmischung war einer der Gründe, erklärt Johann Plank. Er ist der europäische Experte für Tiefbohrzementierung, er diskutierte die Ursachen gleich nach der Explosion der Bohrinself „Deepwater Horizon“ vor zwei Jahren bei einer Anhörung mit Spezialisten verschiedener Ölgesellschaften in Houston.

Was war geschehen? Ein enormer Zeit- und Kostendruck lastete auf den Arbeitern der Plattform, nach dem Zeitplan von BP sollte die Bohrinself eigentlich schon am nächsten Bohrloch arbeiten. Fahrlässig verursachte die Besatzung so die größte Ölkatastrophe in der Geschichte der Menschheit: „Das war wie eine Sprudelflasche“, sagt Plank. Der Zement war noch nicht fest und nicht gleichmäßig verteilt, als oben der Bohrlochverschluss abgenommen wurde: Getrieben von dem enormen Druck in großer Tiefe – am Grunde des Bohrlochs herrschten etwa 900 bar –, schoss das Gemisch aus Öl und Gas durch die halb feste Zementschicht und entzündete sich an der Oberfläche.

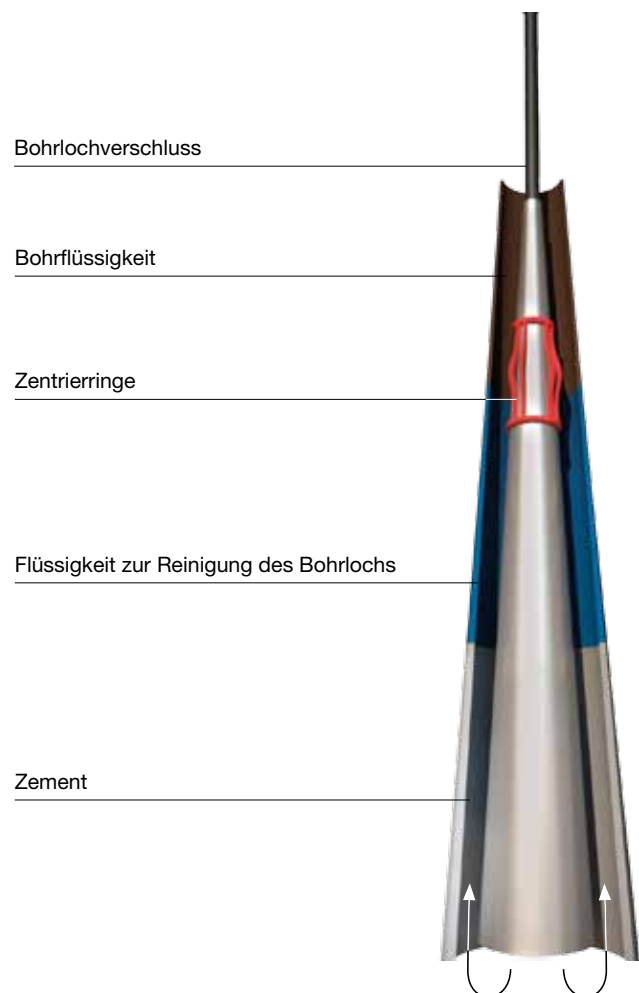
Ein Loch für eine Tiefbohrung wird abschnittsweise gebohrt: Zunächst geht es 500 bis 2000 Meter in die Tiefe. Um das lose Gestein aus dem Loch nach oben zu bringen und gleichzeitig den Bohrer zu kühlen, wird eine Spülflüssigkeit nach unten gedrückt und steigt beladen mit Sand und Gestein wieder auf. Diese Flüssigkeit ist deutlich dickflüssiger als Wasser, damit das Gestein darin quasi schweben kann und sich nicht absetzt. Ist die vorgegebene Tiefe erreicht, wird ein Rohr eingelassen, das mit Abstandhaltern außen einen Ringraum frei hält. Dort steigt anschließend eine Zementmischung nach oben, die durch das Innere des Rohres zur Sohle des Bohrlochs gepresst wird, am unteren Ende des Rohres austritt und von dort den Ringraum auffüllt. Der Zement soll die Rohre im Bohrloch stabilisieren und die Öllagerstätte absolut dicht verschließen. Dafür ist die Zementmischung für Tiefbohrungen wesentlich hochwertiger als etwa für den Hausbau. Sie enthält spezielle Zusätze, mit denen sich ihr Verhalten exakt steuern lässt. Hier machte die Besatzung der Bohrinself einen katastrophalen Fehler: Zum Zement, der das letzte Stück Rohr in mehr als 5000 Meter Tiefe fixieren und abdichten sollte, mischte sie zu viel Verzögerungsmittel – er wurde deshalb zu langsam fest. „Nach 24 Stunden war diese Mixtur immer noch flüssig“, erklärt Plank. „Aber schon nach 15 Stunden begannen die Arbeiter damit, die über dem Zement liegende Bohrflüssigkeit durch Meerwasser zu ersetzen.“ Die Bohrspülung ist wesentlich schwerer als Wasser und hätte so lange als Gegengewicht im Bohrloch bleiben müssen, bis der Zement ausgehärtet gewesen wäre. Denn die Lagerstätte drückt von unten Öl und Gas mit über 900 bar ins Bohrloch – gehalten nur durch das Gewicht der Spülung.

Mit dem Austausch dieser Bohrspülung öffnete der Bohrtross am 20. April 2010 quasi die Sprudelflasche: Gas schoss durch den noch flüssigen Zement nach oben, durchbrach die unzureichende Drucksicherung am Meeresboden

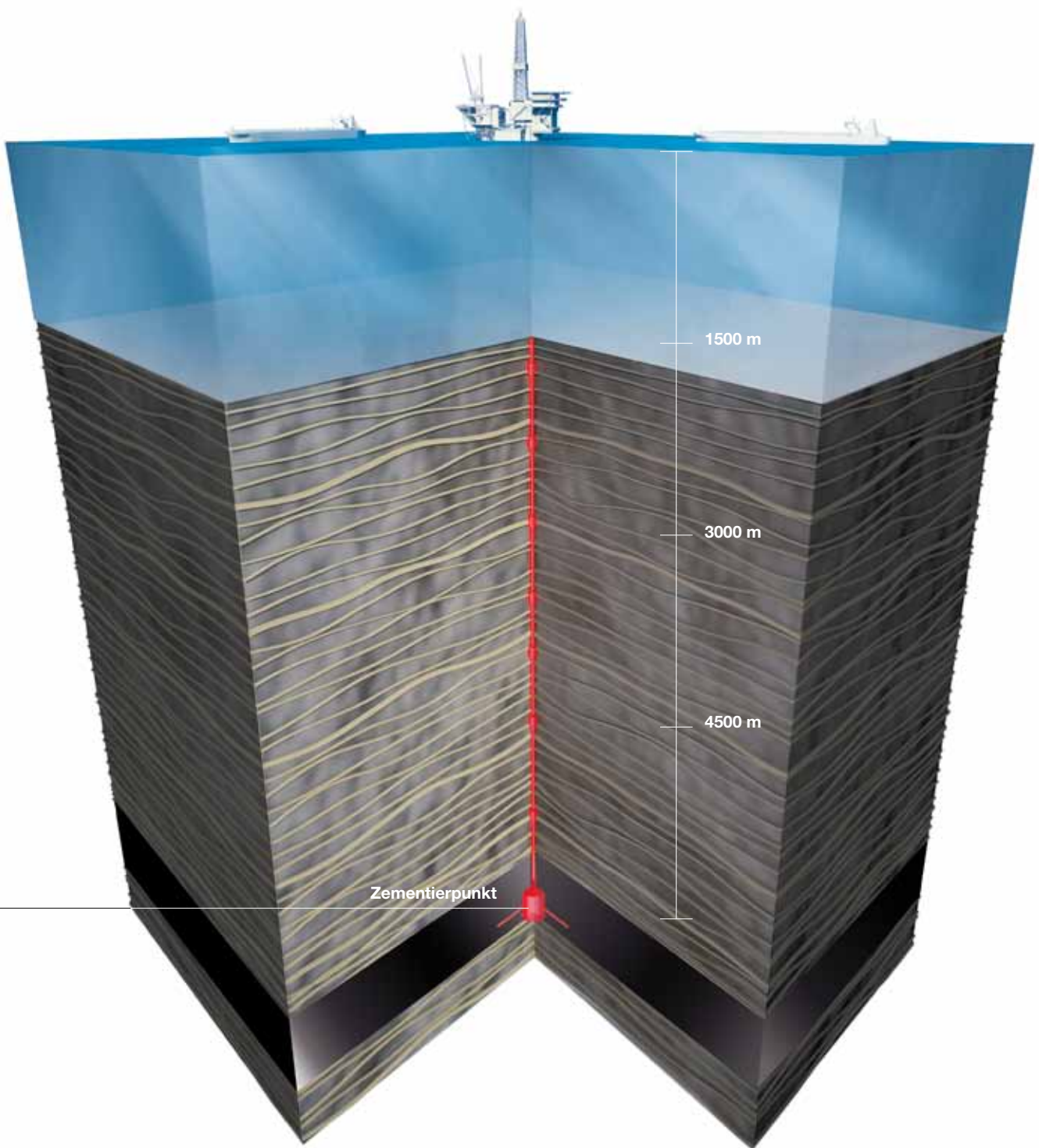
(Blow-out-Preventer) und explodierte mit der Bohrinself, die anschließend sank. Elf Menschen werden seitdem vermisst, sie starben offenbar bei der Explosion.

„Es steht und fällt immer wieder mit der richtigen Zementrezeptur“, sagt Plank. Schon bei den Rohrstücken im oberen Bereich sei aus Sparsamkeit zu wenig zementiert worden. Damit hätten auch dort die Rohre dem gewaltigen Druck möglicherweise nicht auf Dauer standgehalten. Noch mehr Zement half schließlich, die Folgen der Katastrophe zu begrenzen: Über eine teure Hilfsbohrung von der Seite wurde das Loch erfolgreich aufgefüllt und endlich auf Dauer verstopft.

Axel Fischer



So wird zementiert: Zentrierringe halten einen Ringraum um das Rohr frei. Nach dem Bohren wird Reinigungsflüssigkeit in das Rohr gepumpt, die die Spülrreste entfernt. Danach wird eine Zementmischung in das Rohr gepresst, die ebenfalls am unteren Rohrende austritt und von dort den Ringraum auffüllt



3-D-Grafik links: edlundsepp nach TUM
3-D-Grafik rechts: edlundsepp nach BP

Fehler bei der Zementierung waren die Ursache der Ölkatastrophe im Golf von Mexiko 2010: Gas schoss durch den noch flüssigen Zement nach oben und die Bohrplattform „Deepwater Horizon“ explodierte

Die Autoren

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

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

Axel Fischer studierte Chemie an der TUM. Danach war er in Hamburg für die Wissenschaftredaktion der dpa verantwortlich, später arbeitete er als freier Wissenschaftsjournalist in München. Drei Jahre lang moderierte er das „Technikmagazin“ im Bayerischen Fernsehen. 1997 erhielt er den Preis für Journalisten der Gesellschaft Deutscher Chemiker. Heute verantwortet er die Kommunikation für einen internationalen Verband von Papierfabriken und schreibt für Tageszeitungen und Magazine.

Dr. Brigitte Röthlein arbeitet seit 1973 als Wissenschaftsautorin für Zeitschriften, Fernsehen, Rundfunk und Zeitungen. Sie ist Diplom-Physikerin und promovierte in Kommunikationswissenschaft, Pädagogik und Geschichte der Naturwissenschaften. Von 1993 bis 1996 leitete sie neben ihrer freien publizistischen Tätigkeit das Geschichtsmagazin „Damals“, 2004/2005 das Forschungs- und Technologiema-gazin „Innovate“. Sie veröffentlichte Sachbücher unter anderem über Hirnforschung, Atomphysik und Quantenphysik. 2008 erschien ihr Buch „Der Mond“.

Dr. Evdoxía Tsakiridou hat Biologie studiert und in Neurophysiologie promoviert. Nach einem Volontariat bei einer Tageszeitung arbeitet sie seit 1998 als freie Wissenschaftsjournalistin und schreibt für Tageszeitungen, Magazine und Internetseiten. Von 1999 bis 2001 war sie Pressereferentin für Technologie und Innovationen bei einem internationalen Industrieunternehmen.

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



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

Chefredaktion:

Tina Heun-Rattei (Chefredakteurin),
 Dr. Christine Rüth (Chefin vom Dienst)

Lektorat: Angela Obermaier

Gestaltung: ediundsepp Gestaltungsgesellschaft, München

Autoren dieser Ausgabe: Dr. Bernhard Epping, Birgit Fenzel, Axel Fischer, Dr. Brigitte Röthlein, Dr. Evdoxía Tsakiridou, Dr. Karsten Werth

Redaktionsanschrift:

Technische Universität München, Corporate Communications Center, 80290 München

E-Mail: faszination-forschung@zv.tum.de

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

Auflage: 40.000

ISSN: 1865-3022

Erscheinungsweise: zweimal jährlich

Verantwortlich für den redaktionellen Inhalt:

Tina Heun-Rattei

Verantwortlich für die Anzeigen:

Tina Heun-Rattei

Titelbild: Astrid Eckert/TUM

Editorialbild: Heddergott/TUM

© 2012 für alle Beiträge Technische Universität München, Corporate Communications Center, 80290 München. Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, Aufnahme in Onlinedienste und Internet, Vervielfältigung auf Datenträgern nur mit ausdrücklicher Nennung der Quelle: „Faszination Forschung. Das Wissenschaftsmagazin der Technischen Universität München.“ Anmerkungen zu den Bildnachweisen: Wir haben uns bemüht, sämtliche Inhaber der Bildrechte zu ermitteln. Sollte der Redaktion gegenüber dennoch nachgewiesen werden, dass eine Rechtsinhaberschaft besteht, entrichten wir das branchenübliche Honorar nachträglich.



Ersparen Sie sich Überraschungen bei der Partnersuche. Kommen Sie lieber gleich zu uns.

We love your problems.

Konkretes Problem – konkrete Lösung: Wir sind der richtige Partner für eine strategische Pharma-Partnerschaft. Denn wir arbeiten über alle Organisationsgrenzen hinweg eng mit unseren Kunden zusammen. Durch die partnerschaftliche Verzahnung aller Abteilungen entsteht ein außergewöhnlich tiefes Verständnis für die Bedürfnisse unserer Kunden. So können wir gemeinsam tragfähige Schritt-für-Schritt-Lösungen entwickeln. Noch mehr gute Gründe für eine langfristige Partnerschaft mit uns finden Sie unter www.evonik.com/pharma.

Evonik. Kraft für Neues.



EVONIK
INDUSTRIES

Neutronen zeigen Anreicherung von Antidepressivum im Gehirn

TUM Physiker Josef Lichtinger zeigt mit Neutronenmessungen an Gewebeproben, dass sich das Antidepressivum Lithium in bestimmten Hirnregionen stärker anreichert und dass es anders wirken könnte als synthetische Psychopharmaka. Ziel ist, die Wirkung des Stoffs auf die menschliche Psyche besser verstehen zu können

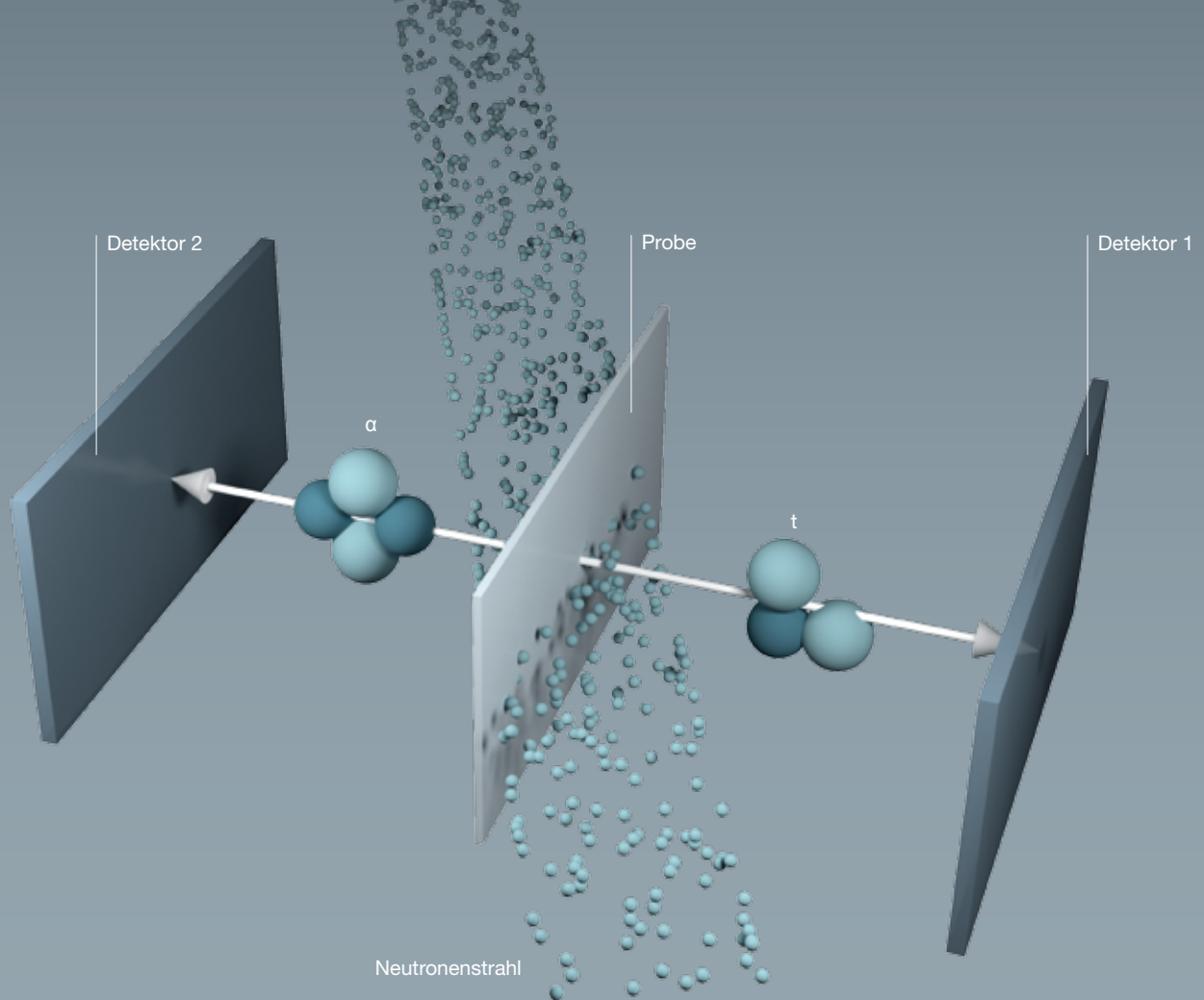
Seit Jahrzehnten wird Lithium in der Behandlung bei so verschiedenen psychischen Erkrankungen wie Depressionen, Manien und bipolaren Störungen eingesetzt. Die genaue biologische Wirkungsweise ist jedoch nur teilweise verstanden. Bekannt ist, dass Lithium die Stimmung aufhellt und das Aggressionspotenzial senkt. Weil es sehr schwer zu dosieren ist, scheuen sich Ärzte aber, dieses „Universalmedikament“ einzusetzen. Mehrere Studien haben jedoch einen Zusammenhang von Lithiumgehalt im Trinkwasser und Suizid- sowie Kriminalitätsrate in der Bevölkerung gezeigt. Deshalb könnte Lithium, das bisher noch als relativ unbedeutend angesehen wurde, ein essenzielles Spurenelement für den Menschen sein.

Dem geht Josef Lichtinger in seiner Doktorarbeit am Lehrstuhl E12 des Physikdepartments der TU München nach. Von der Rechtsmedizin der Ludwig-Maximilians-Universität München erhielt er Gewebeproben. Diese setzte der Physi-

ker am Messplatz der Prompt Gamma Aktivierungs-Analyse an der Forschungs-Neutronenquelle FRM II einem fokussierten kalten Neutronenstrahl höchster Intensität aus. Lithium reagiert sehr spezifisch mit Neutronen und zerfällt in ein Alphateilchen und einen Tritiumkern. Mit einem speziellen Detektor, den Lichtinger entwickelt hat, können so geringe Mengen wie 0,45 Nanogramm Lithium pro Gramm Gewebe gemessen werden. „So genau wie mit Neutronen kann man das mit keiner anderen Methode nachweisen“, sagt Rechtsmedizinerin Dr. Jutta Schöpfer, die mehrere Forschungsprojekte zur Lithiumverteilung im menschlichen Körper betreut.

Wo wirkt Lithium

Lichtingers Ergebnisse erstaunen: Nur bei den Proben eines depressiven Patienten, der mit Lithium behandelt worden war, beobachtete er eine höhere Anreicherung des Lithiums in der sogenannten weißen Substanz. Das ist der Bereich



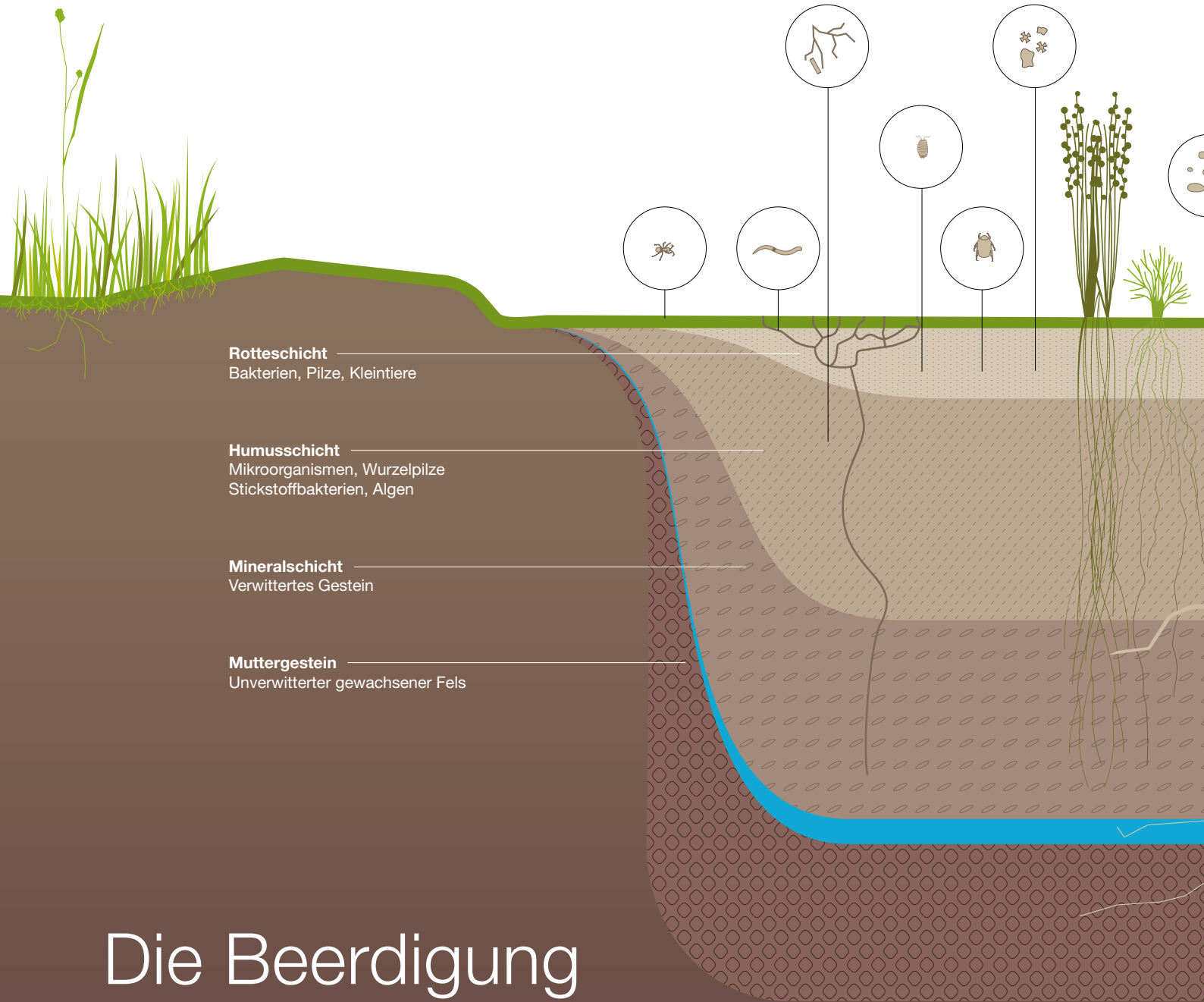
Grundsätzliches Konzept der Messmethode: Der Probenhalter mit dem Gehirnschnitt wird zwischen zwei positionsempfindlichen Siliziumdioden (PSD) befestigt. Das Gehirngewebe wird mit kalten Neutronen bestrahlt. Dabei zerfallen Lithiumkerne (${}^6\text{Li}$) durch Neutroneneinfang in Alphateilchen und Tritiumkerne, die unter 180 Grad zueinander emittiert werden. Diese Teilchen werden gleichzeitig von beiden Detektoren aufgezeichnet. Die Teilchenidentifikation erfolgt anhand der in den Detektoren deponierten Energie. Aus den Einschlagorten der Teilchen in den Detektoren werden ihre Flugbahnen rekonstruiert und daraus wird die Position der Lithiumkerne in der Gewebeprobe berechnet

im menschlichen Gehirn, in dem die Nervenbahnen laufen. Der Lithiumgehalt in der benachbarten grauen Substanz war drei- bis viermal geringer. Die Lithiumanreicherung in der weißen Substanz konnte bei mehreren unbehandelten depressiven Patienten dagegen nicht festgestellt werden. Das könnte darauf hinweisen, dass Lithium nicht wie andere Psychopharmaka im Zwischenraum der Nervenzellen wirkt, sondern in den Nervenbahnen selbst. Nun untersucht Josef Lichtinger weitere Gewebeproben an der Forschungs-Neutronenquelle in Garching, um seine Ergebnisse zu bestätigen und zu erweitern. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft fördert die Arbeit (DFG2295/1). Am Ende des Projekts steht eine Landkarte des Gehirns eines Gesunden und eines depressiven Patienten, die orts aufgelöst die Lithiumanreicherung zeigt. So könnte man das Universalmedikament Lithium zukünftig noch zielgenauer und kontrollierter gegen psychische Erkrankungen einsetzen. □

3-D-Grafik: edlundsepp nach TUM

Affektive Störungen	Fakten
Affektive Störung ist – wie Depression, Manie, Bipolare Störung – eine weitverbreitete Krankheit. Ca. 9,5 Prozent der amerikanischen Bevölkerung leiden an Affektiven Störungen. Die Suizidrate beträgt 12 pro 100.000 Menschen (Centers for Disease Control and Prevention, 2008). Affektive Störungen sind die Hauptursache für Arbeitsunfähigkeit. Die biologische Ursache für Affektive Störungen ist noch nicht vollständig bekannt.	

Link
www.e12.ph.tum.de



Rotteschicht
Bakterien, Pilze, Kleintiere

Humusschicht
Mikroorganismen, Wurzelpilze
Stickstoffbakterien, Algen

Mineralschicht
Verwittertes Gestein

Muttergestein
Unverwitterter gewachsener Fels

Die Beerdigung des Klimakillers

Wie können wir die Fruchtbarkeit unserer Böden verbessern? Lassen sich durch Eingriffe in die Bodenarchitektur die Folgen von Naturkatastrophen abschwächen? Was können wir tun, um Kohlenstoff aus dem Treibhausgas CO₂ im Boden zu binden? Auf der Suche nach Antworten bringen Prof. Ingrid Kögel-Knabner und ihr Team mit neuen Mess- und Analysemethoden ihre Disziplin voran

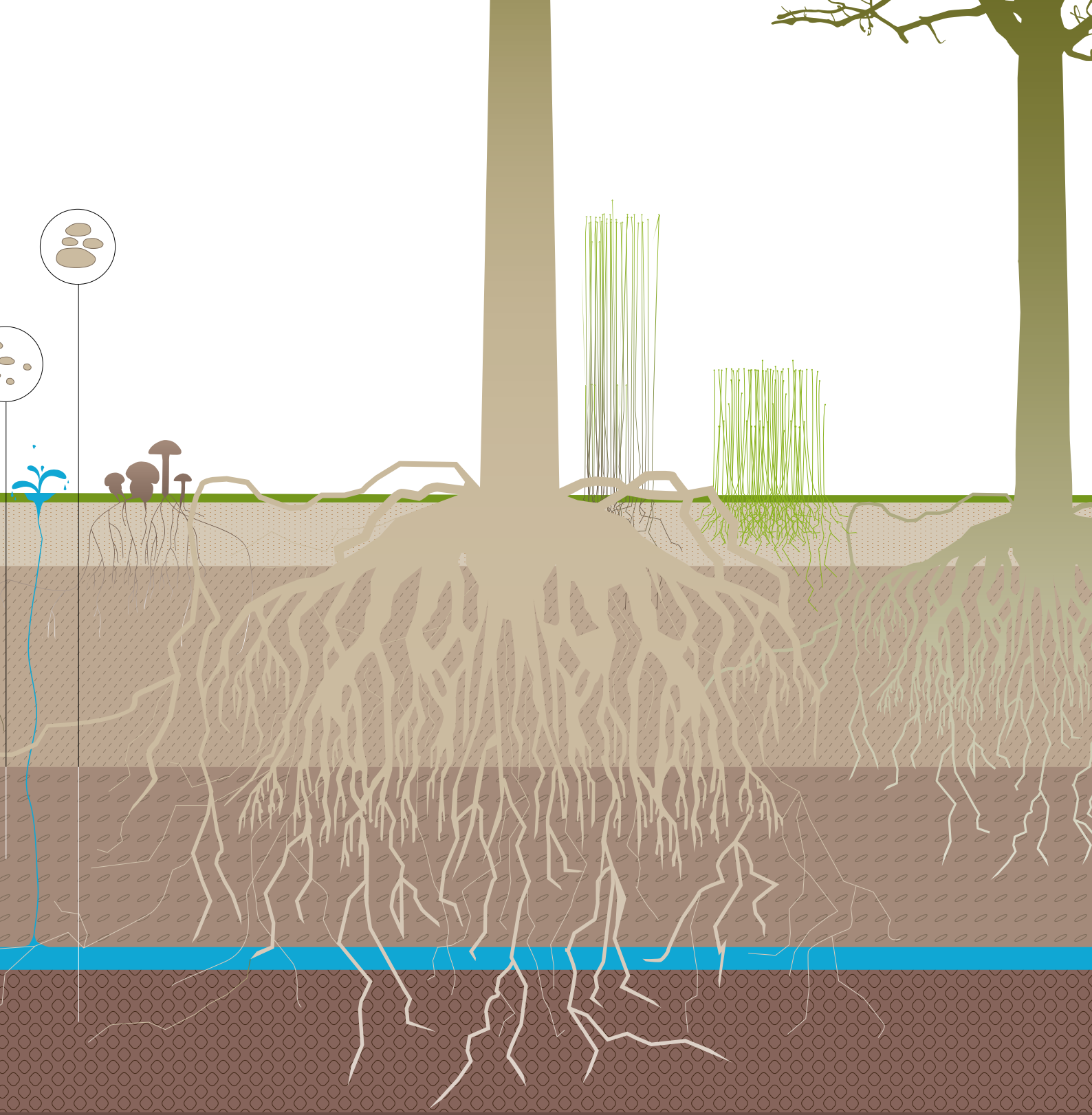
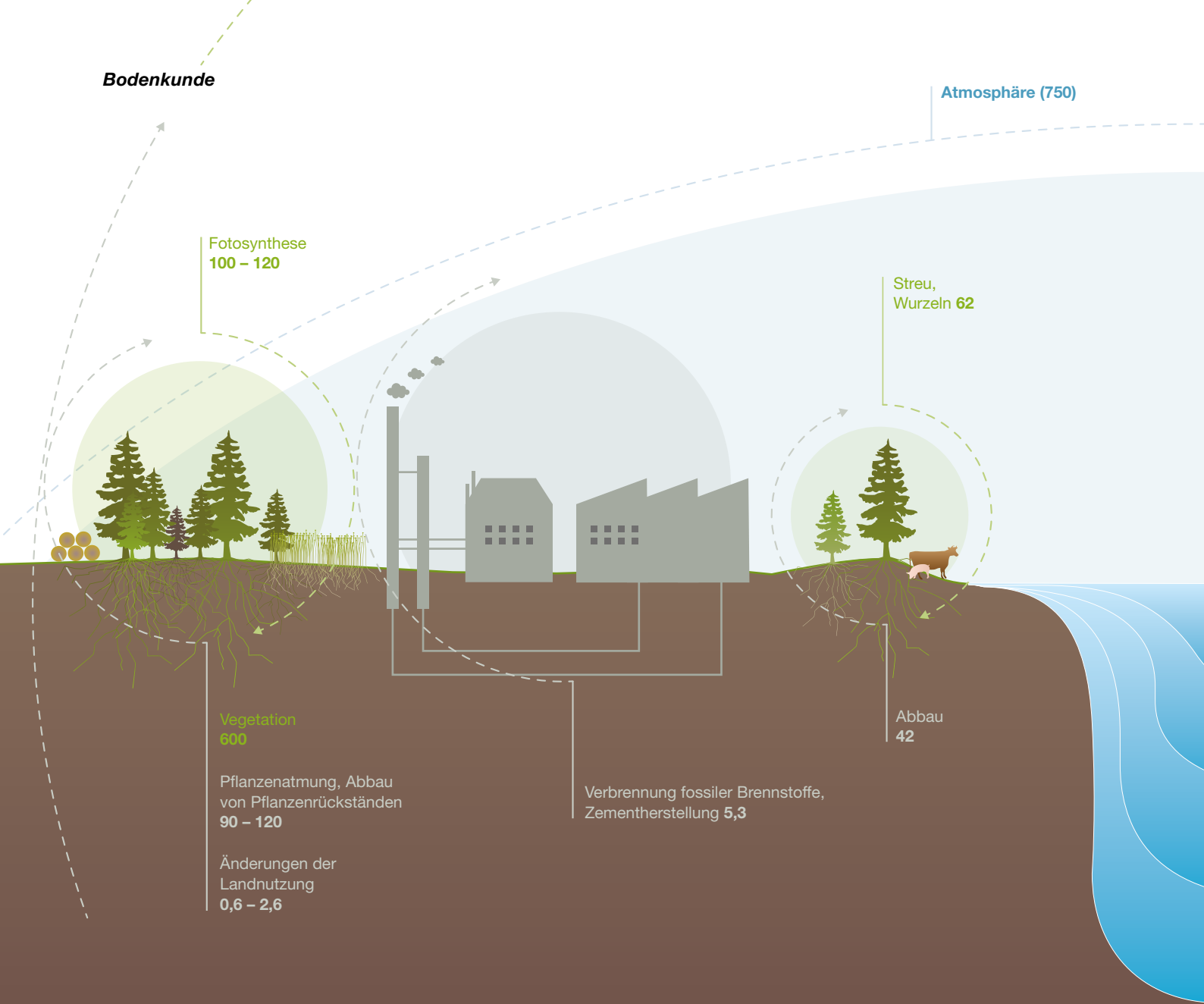


Illustration: eckundsepp

Link

www.soil-science.com



Boden. Wir leben nicht nur auf ihm, sondern buchstäblich von ihm – eine dünne Humusschicht ist unsere Lebensgrundlage. Trotzdem interessieren sich die meisten Menschen nicht sonderlich für ihn. Vielen Städtern ist er gar einfach nur lästig, weil schmutzig. Doch das allgemeine Interesse könnte bald wachsen, denn ein besseres wissenschaftliches Verständnis für die unter unseren Füßen ablaufenden Vorgänge ist vielleicht ein Schlüssel zur Rettung unserer Existenz auf diesem Planeten. „Wie faszinierend Boden ist, zeigt sich, wenn man ihn aufgräbt und genauer betrachtet“, sagt Ingrid Kögel-Knabner, Inhaberin des Lehrstuhls für Bodenkunde am Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt in Freising. Die rund 20 Bodenkundler, die hier arbeiten, denken in riesigen und winzigen Maßstäben zugleich. Mit ihrer Grundlagenforschung verfolgen sie Lösungsansätze für Fragen von globaler Relevanz und un-

tersuchen dabei Objekte, die so klein sind, dass sie ohne Hightech-Hilfsmittel nicht zu sehen wären. Kögel-Knabner beschreibt die Schwierigkeit der Aufgabe so: „Bodenprozesse wie die Stabilisierung von organischer Substanz, die Anreicherung von Nähr- und Schadstoffen sowie die Bildung von organisch-mineralischen Verbindungen spielen sich auf der Mikrometer- bis Submikrometerskala ab. Die Abbildung und Messung dieser Prozesse ist trotz langjähriger Forschung noch immer eine Herausforderung.“

Gewaltige Kohlenstoffspeicher

Was ist eigentlich Boden? Als Boden bezeichnet die Wissenschaft die obersten, meist stark belebten und porösen Dezimeter der Erdoberfläche, in denen Pflanzen wurzeln und die aus dem darunterliegenden Gestein durch Verwitterung und Bodenlebewesen entstehen. Der organische Teil kommt überwiegend aus Pflanzenresten, nur ein >

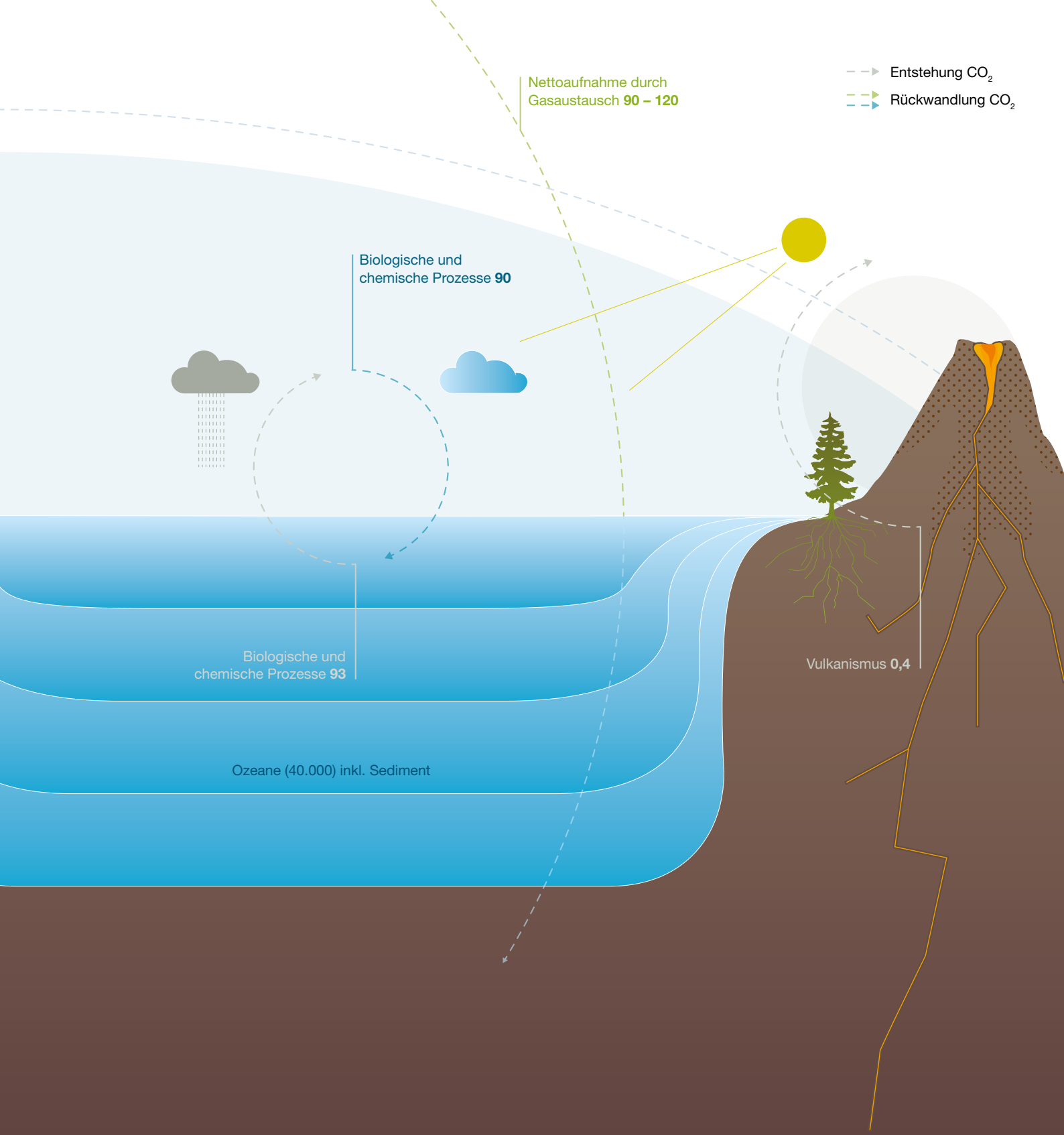
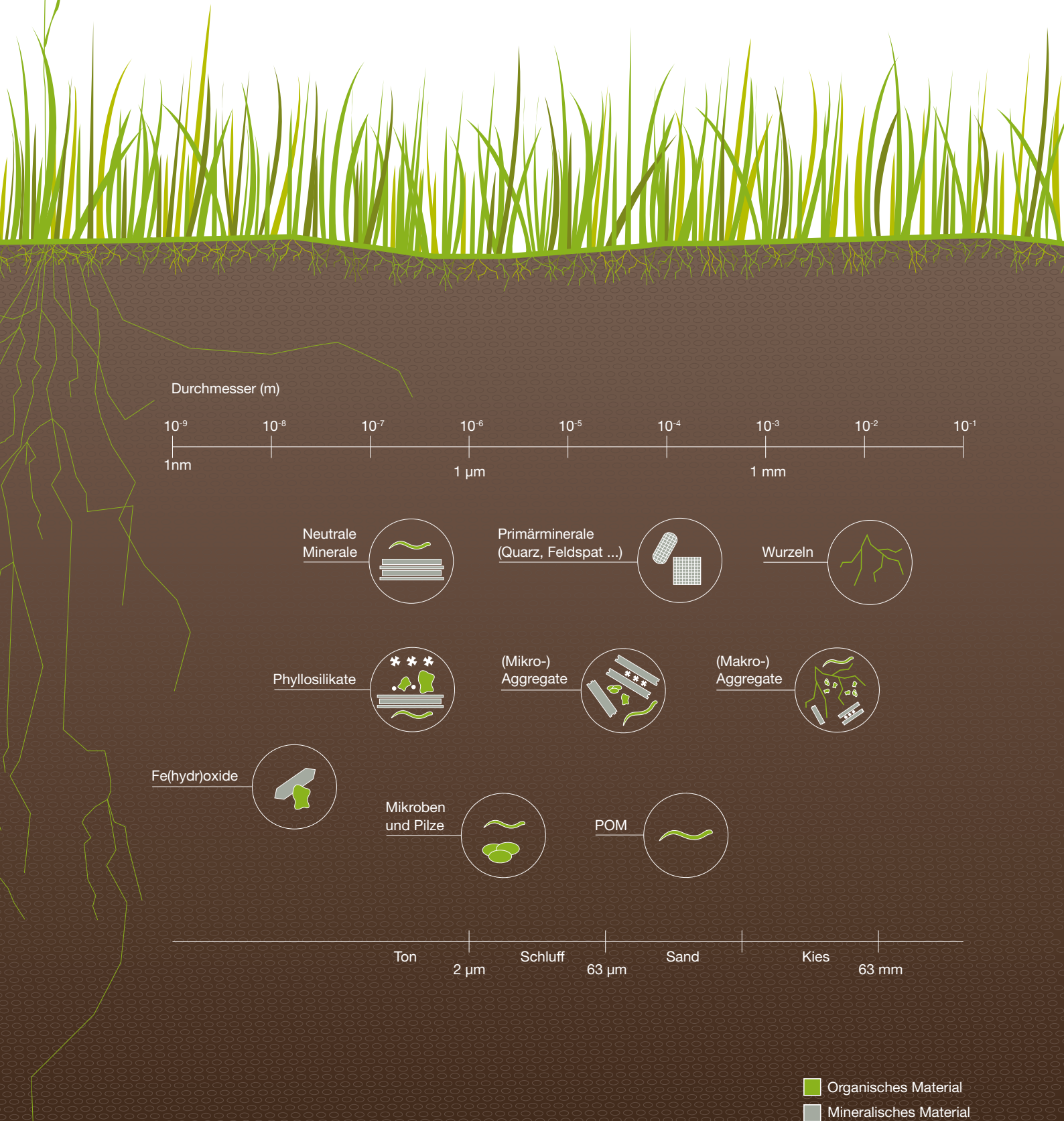


Illustration: edlundsepp

Der globale Kohlenstoffkreislauf mit Kohlenstoffflüssen (Pfeile, Angabe in Gigatonnen pro Jahr) und Kohlenstoffreservoirs (Angabe in Klammern in Gigatonnen). Etwa 70 bis 80 Prozent der terrestrischen organischen Kohlenstoffvorräte, die am aktiven Kohlenstoffkreislauf teilnehmen, sind in Böden gebunden (nach Post et al., 1990, American Scientist 78, Batjes 1996, European Journal of Soil Science 47; Perez et al. 2011, geology 39)

Verbindungen von organischem mit mineralischem Material in Böden gemäßigter Breiten



kleiner Anteil ist tierisches Material. Böden untersuchte man bis vor wenigen Jahren vor allem im Hinblick auf ihre Eignung als land- und forstwirtschaftliche Standorte, oder man betrachtete ihre Filterfunktion für Schadstoffe. Seit sich die Frage nach den Ursachen und Folgen der globalen Erwärmung immer drängender stellt, rückt auch die Kapazität der Böden als Quellen und Senken im globalen Kohlenstoffhaushalt stärker in den Fokus.

Böden sind wichtige Kohlenstoffsinken

Böden sind gewaltige Kohlenstoffspeicher. Mehr als 3000 Gigatonnen (3000 Milliarden Tonnen!) davon halten sie in Form von unterschiedlichen organischen Molekülen fest. Dass sie damit im Klimageschehen eine entscheidende Rolle spielen, belegen folgende Zahlen: Der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC), ein vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und der Weltor-

ganisation für Meteorologie (WMO) gebildetes Gremium, rechnet mit einem Anstieg des Kohlenstoffgehalts der Atmosphäre in Form von Kohlendioxid von derzeit rund 3,3 Gigatonnen pro Jahr. Die CO₂-Quellen für diesen Anstieg sind menschengemacht, vor allem durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, aber auch durch die Änderung der Landnutzung, und stoßen etwa 6,3 Gigatonnen jährlich aus. Die Differenz von drei Gigatonnen nehmen im Kohlenstoffkreislauf andere Teilsysteme der Erde wieder auf. Die wichtigsten Kohlenstoffsinken für anthropogenes CO₂ sind die Ozeane, danach kommen die Böden. Sie speichern dreimal so viel von dem Element, wie es die Vegetation und die Atmosphäre tun.

In den oberen Bodenschichten bauen Mikroorganismen einen Teil des über Pflanzenstreu und Wurzeln dem Boden zugeführten Kohlenstoffs ab. Der durch diese mikrobiellen Oxidationsprozesse „veratmete“ Kohlenstoff gelangt ▷

Eine Reihe von Bodenprofilen zeigt auf, wie unterschiedlich Böden sind. Die mannigfache Färbung entsteht durch Unterschiede im Gehalt an Eisen- und Manganoxiden, Karbonaten und organischer Bodensubstanz. Zudem wird die Bodenfarbe von der Partikelgrößenverteilung und dem Wasserhaushalt beeinflusst







Über ein komplexes Linsensystem können bis zu sieben unterschiedliche chemische Elemente gleichzeitig detektiert werden. Die einzelnen Proben werden in den Probenträger eingesetzt



Der Probenträger wird exakt auf den Schlitten gesetzt und in das Gerät eingefahren. Im Inneren des NanoSIMS herrschen extreme Bedingungen – ein Ultrahochvakuum mit einem Druck von 10 bis 11 mbar



Das Sekundärionenspektrometer beschießt die Proben mit einem besonders feinen Primärionenstrahl. So erzielen die Wissenschaftler hochauflösende Bilder, die bei optimalen Bedingungen die Bodenarchitektur auf 50 bis 100 Nanometer genau abbilden



Seit März 2010 haben die Forscher ein Instrument zur Verfügung, mit dessen Hilfe sie neue Mess- und Analysemethoden einsetzen können: das Sekundärionenspektrometer NanoSIMS 50L. Johann Lugmeier beschickt es mit einem Probenträger

wieder in die Atmosphäre. Geschätzte 100 Gigatonnen entweichen jährlich in Form von Kohlendioxid, ein geringerer Teil als Methan. Der im Boden verbleibende nicht mineralisierte Anteil wird durch Stabilisierungsprozesse langfristig in der organischen Bodensubstanz gebunden. Unter konstanten Umwelt- und Vegetationsbedingungen stellt sich in Böden ein Gleichgewicht zwischen Anlieferung und Abbau der organischen Substanz ein, was sich in charakteristischen, gleichbleibenden Humusgehalten widerspiegelt. Seit der Industrialisierung hat das Handeln des Menschen einen spürbaren Einfluss auf Natur und Klima genommen. Natur- wie Geisteswissenschaften diskutieren derzeit das Ende des Holozäns und den Beginn des „Menschenzeitalters“ Anthropozän (Paul J. Crutzen) oder der Kohlenstoffzeit (Jeremy Rifkin), in der wir uns seit der Industrialisierung befinden. Sie ist nicht zuletzt gekennzeichnet durch den gewaltigen Verbrauch ausgegrabener Kohlenstoffablagerungen aus dem Karbon und den negativen Effekt unserer Abgase auf die Umwelt.

Wie kommt der Kohlenstoff in den Boden?

Lässt sich der Kreislauf durch den Menschen aber auch positiv beeinflussen? Wie können wir Boden bewirtschaften, damit er mehr Humus behält? Justus von Liebig, der Begründer der Agrikulturchemie – Mitte des 19. Jahrhunderts selbst in München tätig –, entwickelte den Mineraldünger und half so, die landwirtschaftliche Produktion zu revolutionieren. Heute wissen wir, dass mineralische Düngung allein nicht nachhaltig ist und auf die Dauer Bodenstrukturen zerstört. Was also ist zu tun?

„Eines ist klar“, betont Kögel-Knabner, „entscheidend dafür, ob Böden mehr Kohlenstoff aufnehmen als sie in Form klimaschädlicher Gase abgeben, sind die Auf- und Abbauarbeiten organischen Materials.“ Warum jedoch einige der kohlenstoffhaltigen Moleküle schnell zerlegt werden, während andere in organisch-mineralischen Verbindungen Jahrhunderte oder Jahrtausende überdauern, konnten Wissenschaftler bisher nicht klären. „Eine Lösung dieses

So funktioniert die Oberflächenanalyse mit dem NanoSIMS

SIMS steht für Secondary Ion Mass Spectrometry und ist eine physikalische Messmethode zur Analyse von Oberflächen. Ionen, elektrisch geladene Atome oder Moleküle, können mit elektrischen und magnetischen Feldern beschleunigt, verzögert und abgelenkt werden. NanoSIMS setzt eine Kanone ein, um Ionen gezielt auf eine Oberfläche zu schießen. Der Aufprall der energiereichen Primärionen reißt aus der Oberfläche Fragmente heraus, die in die Gasphase übergehen. Diese Fragmente sind elektrisch geladen – sogenannte Sekundärionen – und können ihrerseits bewegt werden. Ihre Flugbahn ist dabei von den verwendeten Feldern, ihrer elektrischen Ladung und ihrer Masse abhängig. Daran kann man sie unterscheiden. Wird der Primärstrahl als Raster über eine Probe geführt, lässt sich damit ein Bild der abgehenden Sekundärionen erzeugen, und es wird deutlich, wie die detektierten Sekundärionen auf der Probe verteilt waren.

Das Diagramm zeigt den Prozess der NanoSIMS-Analyse. Ein Raster aus Primärionen (gelbe Kreise mit Minuszeichen) trifft auf eine Probe (graue Kreise). Dies führt zur Emission von Sekundärionen (graue Kreise mit Plus- und Minuszeichen), die teilweise geladen sind.

Rätsels würde zum einen viel realistischere Klimamodelle ermöglichen und uns zum anderen langfristig aufzeigen, was wir tun können, damit mehr Kohlenstoff in den Boden kommt“, gibt die Professorin zu bedenken. Sie argumentiert, dass die Abbaugeschwindigkeit in erster Linie von den Wechselwirkungen zwischen den organischen Verbindungen und dem umliegenden Ökosystem abhängt, nicht wie bisher vermutet von der Molekülstruktur. „Diese sogenannte Aggregation an den Grenzflächen ist es, was uns ▶

Ingrid Kögel-Knabner: „Wir wollen mit unserer Grundlagenforschung weiterkommen und das Fenster zum Verstehen des Bodens weiter öffnen“





Fotos: Heddergott / TUM

Die in Kunstharz fixierten, glatt geschliffenen Proben sind staubkorngroß und werden in verschiedenen Probenträgern angeordnet, bevor sie im NanoSIMS genau analysiert werden können

Forscher besonders interessiert“, betont Kögel-Knabner. Der Vorgang gibt dem Boden Struktur, macht ihn tragfähig, bildet ein Porensystem aus, das Luft und Wasser und damit organische Substanz hält. Wie das genau funktioniert, war bisher unklar. „Das Problem ist die Auflösung: Wir konnten nur beobachten und Hypothesen aufstellen, aber nicht genau sehen, was da abläuft. Das organo-mineralische Zusammenspiel beruht auf der Verknüpfung geladener Teilchen, und alles spielt sich im Nanobereich ab. Herkömmliche Elektronenmikroskope reichen da nicht aus.“

Nanodetektive mit Ionenkanone

Seit März 2010 haben die Forscher in Freising ein Instrument zur Verfügung, mit dessen Hilfe sie neue Mess- und Analysemethoden einsetzen können: das Sekundärionen-spektrometer NanoSIMS 50L. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft förderte die Anschaffung des rund drei Millionen Euro teuren Geräts, das weltweit erstmals für die Analyse bodenkundlicher Proben verwendet wird. Bislang nutzten vor allem die Materialwissenschaft, die Geologie

oder die Mikrobiologie Massenspektrometer dieser Art. „Unser NanoSIMS beschießt die Proben mit einem besonders feinen Primärionenstrahl“, sagt Johann Lugmeier, der Ingenieur, der das Gerät einstellt, bedient und wartet. „Der präzise Beschuss liefert dementsprechend hochauflösende Bilder, die bei optimalen Bedingungen die Bodenarchitektur auf 50 bis 100 Nanometer genau abbilden.“

Über ein komplexes Linsensystem können bis zu sieben unterschiedliche chemische Elemente gleichzeitig detektiert und somit korrespondierende „Element“-Karten vom Probenort gemessen werden. Zum Beispiel ist der räumlich hochaufgelöste Nachweis organischer Bodensubstanz als $^{12}\text{C}^{14}\text{N}$ -Ion auf Tonmineralen ein entscheidender Schritt bei der Beantwortung bodenkundlicher Fragen. Dadurch können die Wissenschaftler Prozesse, die zur Stabilisierung des atmosphärischen CO_2 im Boden führen, endlich näher charakterisieren.

Die NanoSIMS-Messungen laufen unter extremen Bedingungen ab. Die in Kunstharz fixierten, glatt geschliffenen-Proben sind staubkorngroß und befinden sich senkrecht



Die Aufbereitung der Bodenproben erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst werden die Brocken in einer Mühle grob zerkleinert und dann immer weiter gesiebt, bis nur noch staubgroße Körner übrig bleiben

angeordnet in nur 300 Mikrometer Entfernung zur ersten Linse in einem Ultrahochvakuum unter einem Druck von 10 bis 11 mbar. „Hier legt ein Teilchen theoretisch durchschnittlich 1000 Kilometer zurück, bevor es auf ein anderes trifft“, erklärt Lugmeier. „Zum Vergleich: In der Luft ist ein Gasmolekül nur 58 Nanometer unterwegs, bevor es eine Wechselwirkung mit anderen Teilchen abbekommt.“

Im Keller eines Gebäudes der Forstwirtschaftler, in dem die Bodenkundler zu Gast sind, nimmt der 1,8 Tonnen schwere Instrumentenkoloss fast einen ganzen Raum ein. Er steht schwingungsfrei, unabhängig vom Gebäude, auf einem eigenen Fundament, angeschlossen an eine unterbrechungsfreie Stromversorgung. Es ist laut. Pumpen, Kühlung und Stromversorgung erzeugen ein konstantes Surren. „Wenn ich denken muss, trage ich Gehörschutz“, sagt Lugmeier trocken. Für Routinearbeiten braucht er ihn nicht, wohl aber, wenn er längere Zeit neben dem Gerät am angeschlossenen Rechner sitzt und am Bildschirm Sekundärionenverteilungen und Isotopenverhältniskarten interpretiert. Die Arbeit mit dem besonderen Massenspekt-

rometer ist für ihn und das Forscherteam eine Herausforderung, da man ständig neue Erfahrungen sammelt und zum Beispiel die Software ständig selbst optimieren muss. Der TUM Lehrstuhl für Bodenkunde will den NanoSIMS für die Bodenwissenschaften allgemein nutzbar machen. „Ich verbringe viel Zeit damit, auf Tagungen Werbung für unser Gerät zu machen“, sagt Kögel-Knabner. „Wir bekommen auch schon zahlreiche internationale Anfragen. Die Messzeiten sind natürlich begehrt.“

Schmelzendes Eis, wachsende Erkenntnis

Beispielhaft für die Arbeit mit dem NanoSIMS ist ein Projekt, in dem die TUM Wissenschaftler die Bodenbildung im Vorfeld eines Gletschers beobachten. Für ihre Zwecke erweisen sich dabei die zunehmende Erderwärmung und der damit einhergehende Rückgang der Gletscher in Europa als vorteilhaft. Schauplatz der Feldstudie ist der Dammagletscher am Winterbergmassiv im Schweizer Kanton Uri. Der Rückzug des Eises legt dort kontinuierlich neues Ausgangsmaterial für die Bodenentwicklung frei – ein ▶

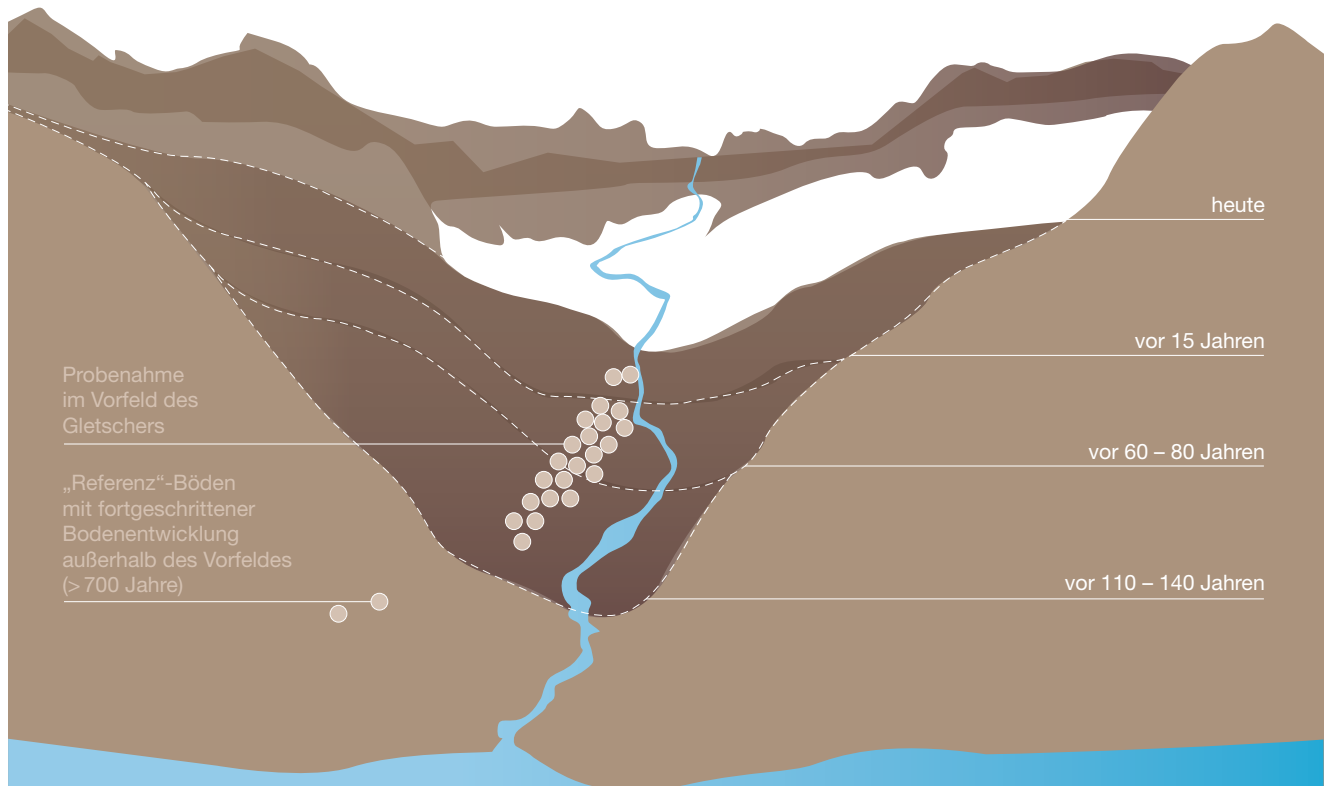


Illustration: edlundsepp

Am Dammagletscher in der Schweiz lassen sich Bodenbildungsprozesse ideal untersuchen. Von der Gletscherzunge talwärts gehend, können Wissenschaftler relativ leicht analysieren, wie sich Böden über die Jahrzehnte verändern (Jahre nach Gletscherrückzug laut Forschungsprojekt BIGLINK)

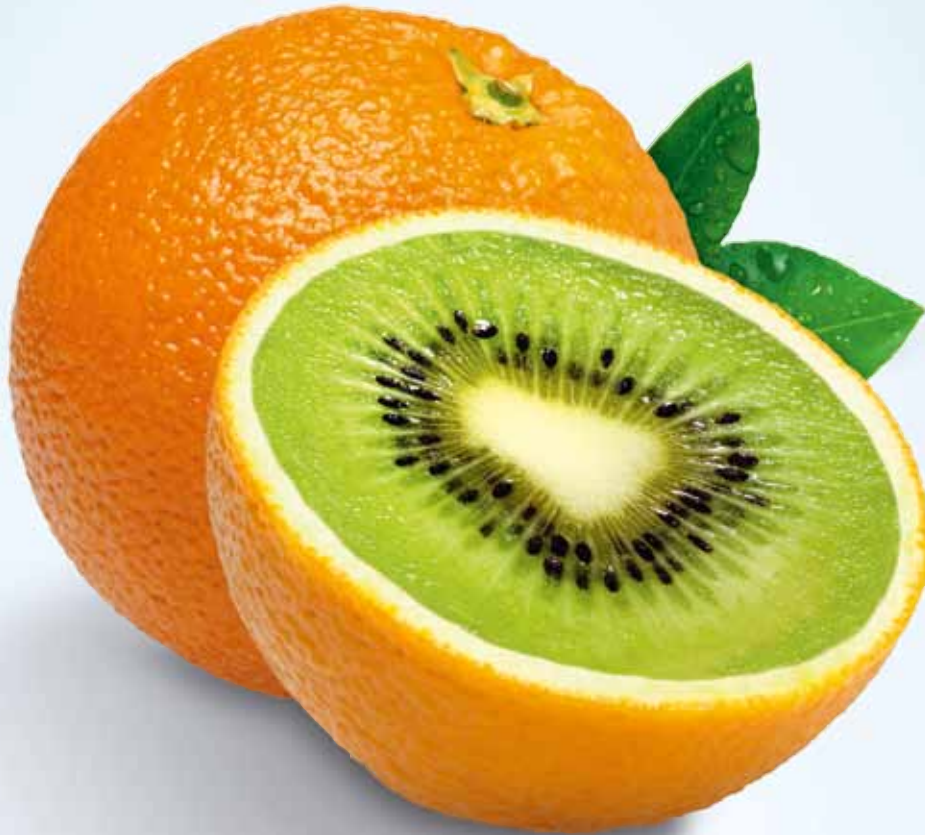
Paradies für Bodenkundler. Kögel-Knabner: „Anhand der zeitlichen Abfolge der Bodenbildung mit zunehmender Entfernung zum Gletschereis ist es uns möglich, die Anfänge der Bodenentwicklung im Zuge der Vegetationssukzession zu untersuchen.“ Die Bedingungen sind ideal: Alle bodenbildenden Faktoren, mit Ausnahme der Zeit, sind überwiegend konstant, und so können durch den Vergleich verschiedener Zonen im Gletschervorfeld Aussagen zu den Zusammenhängen zwischen der Bodenbildungszeit und der Bedeutung einzelner Teilprozesse, zum Beispiel Verwitterung, Mineralneubildung und Humusanreicherung, getroffen werden. Außerdem lässt sich aufgrund der Untersuchungen eine Vorhersage über die langfristige Entwicklung von Böden treffen, und die Funktion von Böden als Kohlenstoffsенке kann genauer spezifiziert werden.

„Am Dammagletscher konnten wir entlang der Chronosequenz mit zunehmendem Bodenalter beziehungsweise zunehmender Entfernung zum Gletschereis eine schnellere Anreicherung von Kohlenstoff im Mineralboden verzeichnen“, berichtet Kögel-Knabner. „In den sauren

Böden waren schwach kristalline Eisenoxide die maßgeblichen Lieferanten von mineralischen Oberflächen und folglich wichtig für die Stabilisierung von organischer Bodensubstanz.“ Die Untersuchung der Tonfraktion mit dem NanoSIMS zeigte, dass sich organo-mineralische Verbindungen bereits in frühen Phasen der Bodenentwicklung bilden, wobei Mineralverwitterung und Kohlenstoffakkumulation in unterschiedlichen Zeitskalen vorschreiten. Mit Proben vom Dammagletscher wie auch aus zahlreichen anderen Projekten ergründen die Forscher, wie wichtig der Bodentyp und sein Entwicklungszustand für die Kohlenstoffspeicherung sind und wie tief man graben muss. „Auch die Unterböden sind wichtig. Wir lernen hier viel über mineralogische Geschichte“, resümiert Kögel-Knabner. „Über die Jahre ist uns klar geworden, dass wir unbedingt beides betrachten müssen, organische und anorganische Chemie, wenn wir mit unserer Grundlagenforschung weiterkommen und das Fenster zum Verstehen des Bodens weiter öffnen wollen.“

Karsten Werth

Alles außer gewöhnlich.



Ihr Einstieg bei Lidl – mehr Informationen
unter www.karriere-bei-lidl.de/trainee

Wir haben mehr zu bieten. Auch für Sie!

Möchten Sie Führungsverantwortung, überdurchschnittliches Gehalt und viel Abwechslung – direkt nach dem Studium? Dann kommen Sie doch zu Lidl! Als Trainee (w/m) zum Verkaufsleiter bekommen Sie von Anfang an 63.000 € Einstiegsgehalt mit attraktiver Entwicklung und einen neutralen Firmenwagen, den Sie auch privat nutzen können. Individuell zugeschnittene Weiterbildungsprogramme unterstützen Sie bei Ihrer Karriereplanung. Ein iPad mit spezieller Software hilft Ihnen, die tägliche Arbeit zu organisieren. Wenn Sie ausgeprägte Kommunikationsfähigkeit, ein vorbildliches Auftreten und Spaß an neuen Herausforderungen mitbringen, sind Sie bei uns genau richtig. Worauf warten Sie noch? Wir freuen uns auf Sie!

Mehr Informationen unter www.karriere-bei-lidl.de/trainee



EINSTIEG BEI LIDL

Lidl lohnt sich.

Eine molekulare Nanosolarzelle

Forscher der Technischen Universität München und der Tel Aviv University haben eine Methode entwickelt, um den Photostrom eines einzelnen Moleküls zu messen. Die Physiker zeigten damit, dass ein einzelnes Photosystem-Protein als Baustein in photoaktive Nanoschaltkreise integriert und direkt angesteuert werden kann. Dabei fungiert das Protein als lichtgetriebene hocheffiziente Elektronenpumpe und kann als Stromgenerator in winzigen elektrischen Bauelementen dienen

Links

www.e20.ph.tum.de
www.wsi.tum.de

Die TUM Wissenschaftler um Dr. Joachim Reichert und Prof. Johannes Barth (Exzellenzcluster Munich-Centre for Advanced Photonics) sowie Prof. Alexander Holleitner (Exzellenzcluster Nanosystems Initiative Munich) untersuchten zusammen mit Dr. Itai Carmeli aus Tel Aviv das Chlorophyll-Protein Photosystem I, welches in den Membranen von Chloroplasten in Blaualgen vorkommt. Pflanzen, Algen und Bakterien benutzen Photosynthese, um Sonnenenergie in chemische Energie umzuwandeln. Zu Beginn dieses Prozesses absorbiert das System Licht und überträgt die aufgenommene Energie in eine Elektronenbewegung, also einen Stromfluss.

Diese Vorgänge finden in photosynthetischen aktiven Proteinen statt, die sich aus Chlorophyllen und Carotinoiden zusammensetzen. Nach der Absorption eines Photons wird ein Elektron mit einer Effizienz von nahezu 100 Prozent von der einen Seite des Proteins zur anderen übertragen. Durch die winzigen Dimensionen eignet sich dieses System auf der Nanometerskala für Anwendungen in der Optoelektronik, bei denen Licht in elektrischen Strom umgewandelt werden soll.

Bisher gab es kein Messsystem, mit dem man einzelne Moleküle elektrisch kontaktieren und sie gleichzeitig sehr starken optischen Feldern aussetzen konnte und das empfindlich genug war, um diesen winzigen Strom aus einem einzelnen Protein zu messen. Die Forscher suchten deshalb zunächst eine geeignete Methode für die Kontaktierung. Zentrales Element ihrer Messvorrichtung sind Proteine, die sich selbst auf einer Oberfläche anordnen und kovalent über eine Cysteingruppe an diese anbinden. Der Photostrom wird dann mit einem sehr dünn mit Metall be-

schichteten Glasfragment gemessen, wie es in der Nahfeldmikroskopie benutzt wird. Dieses Glasfragment dient gleichzeitig als elektrischer Kontakt und als Lichtquelle. Licht wird durch die Innenseite des Glasfragments zum Protein geleitet, und die sehr kleinen optisch angeregten Ströme können gemessen werden. □

Das Photosystem I (hier grün) wird über die Elektrode (ganz oben) optisch angeregt. Ein Elektron wird dann Schritt für Schritt in nur 16 Nanosekunden übertragen

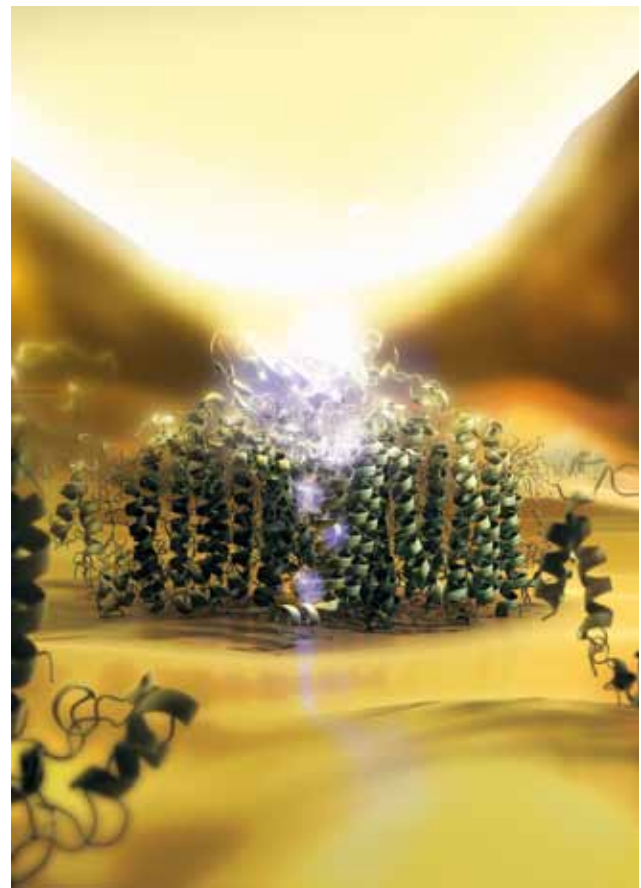


Bild: Hohmann (NIM)



Wir sind das **GE** in **GE**räuscharm,

weil unsere GENx-Triebwerke nicht nur weniger CO₂, sondern auch weniger Lärm verursachen.

Unsere neuen GENx-Triebwerke verbrauchen deutlich weniger Kerosin und sind leiser im Vergleich zu den GE-Triebwerken, die sie ersetzen. Perfekt für die neuen Boeing 747-8-Maschinen der Lufthansa und ein weiterer Grund für unsere langjährige Partnerschaft.

Aktuelle Jobs unter: ge.com/karriere

Wir sind das **GE** in **GE**rmany.



GE imagination at work

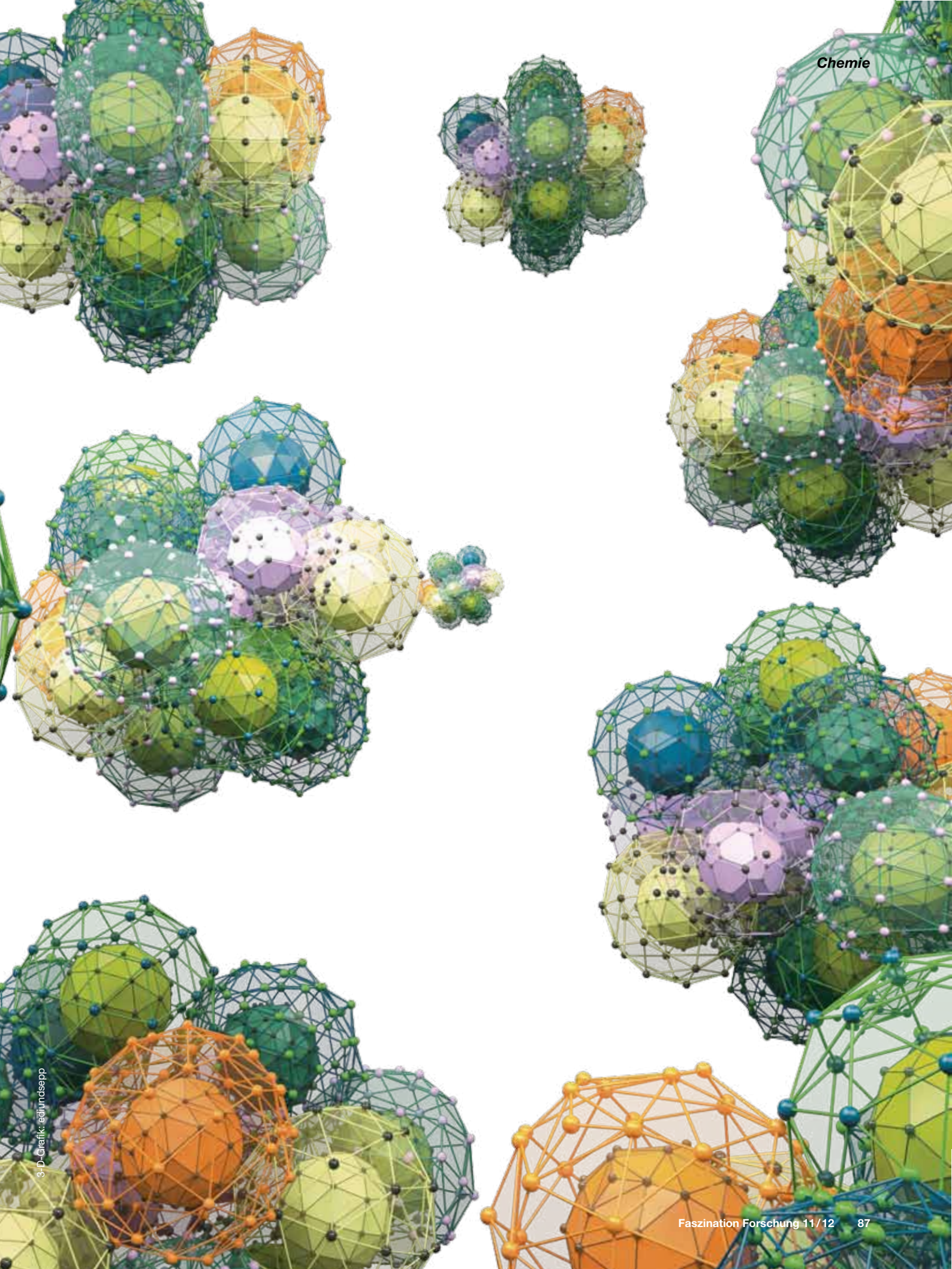


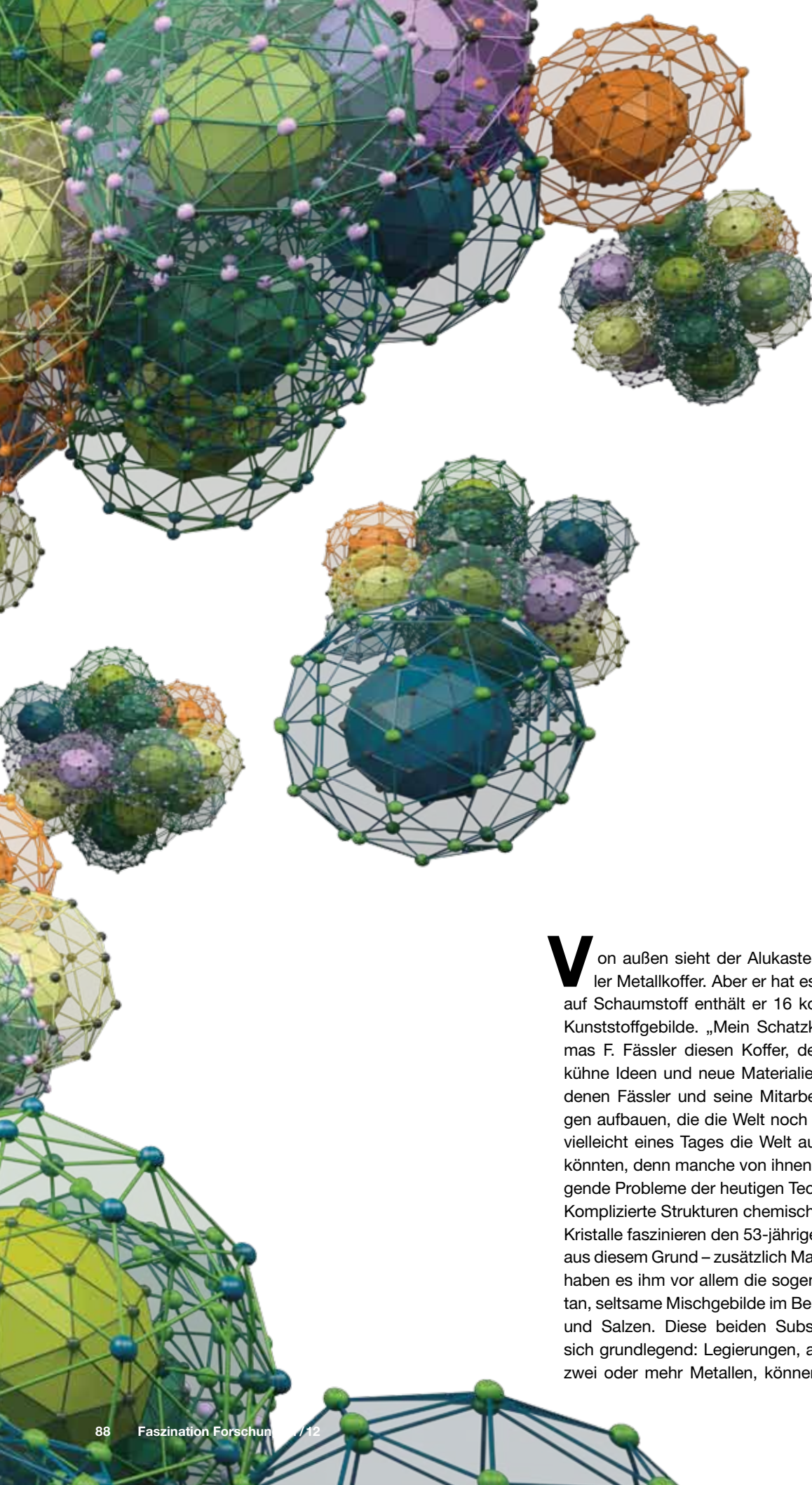
Link

www.ch.tum.de/faessler

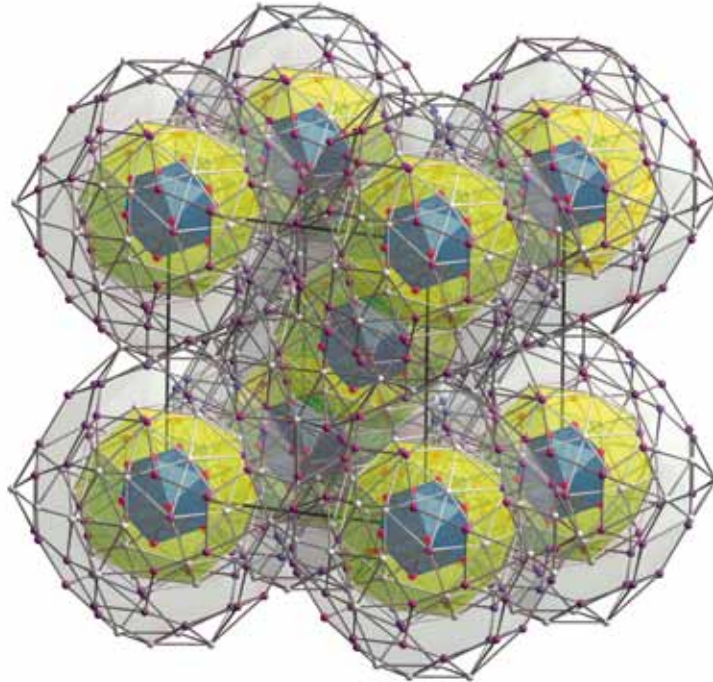
Im Grenzbereich der Metalle

Dass auch reine Grundlagenforschung zu aufsehenerregenden praktischen Anwendungen führen kann, beweisen Chemiker der TUM. Sie entwickeln völlig neue Substanzklassen, die bei der Energiewende noch große Bedeutung erlangen könnten





Von außen sieht der Alukasten aus wie ein ganz normaler Metallkoffer. Aber er hat es in sich: Sorgfältig gebettet auf Schaumstoff enthält er 16 kompliziert geformte, farbige Kunststoffgebilde. „Mein Schatzkästchen“ nennt Prof. Thomas F. Fässler diesen Koffer, denn er enthält Vorlagen für kühne Ideen und neue Materialien. Sie zeigen Muster, nach denen Fässler und seine Mitarbeiter chemische Verbindungen aufbauen, die die Welt noch nicht gesehen hat. Und die vielleicht eines Tages die Welt auch grundlegend verändern könnten, denn manche von ihnen haben das Potenzial, drängende Probleme der heutigen Technik zu lösen. Komplizierte Strukturen chemischer Verbindungen oder auch Kristalle faszinieren den 53-jährigen Chemiker, der – vielleicht aus diesem Grund – zusätzlich Mathematik studiert hat. Dabei haben es ihm vor allem die sogenannten Zintl-Phasen angetan, seltsame Mischgebilde im Bereich zwischen Legierungen und Salzen. Diese beiden Substanzklassen unterscheiden sich grundlegend: Legierungen, also die Verschmelzung von zwei oder mehr Metallen, können in der Regel elektrischen



Legierungen sind aus unterschiedlichen Metallen wie Kupfer, Zinn, Aluminium oder Magnesium aufgebaut und bilden komplexe Strukturen aus Atomclustern, die sich gegenseitig durchdringen

Strom leiten und bilden nicht wasserlösliche Festkörper. Salze hingegen, eine chemische Verbindung zwischen Metallen und Nichtmetallen, leiten den Strom als Festkörper nicht, lassen sich aber meist in Wasser auflösen, wobei sie Ionen bilden, die die Lösung leitfähig machen. Der deutsche Chemiker Eduard Zintl hatte nun in den 30er-Jahren erkannt, dass auch bestimmte Legierungen in flüssigem Ammoniak löslich sind und sich dabei komplexe Ionen bilden, die aus mehreren Metallatomen bestehen. Entsprechende Verbindungen aus diesen Metallen, die nach Eduard Zintl benannt sind, zeigen salzartiges Verhalten. Als Beispiel führt Fässler Verbindungen mit dem Metall Natrium an, welches als Element äußerst heftig mit Wasser reagiert. „In seiner Verbindung mit Chlor entpuppt sich Natrium als harmloses Ion im Kochsalz. Verbindet man Natrium dagegen mit einem zweiten Metall wie Zinn, verknüpfen sich die Zinnatome zu einem Atomkäfig aus vier Atomen. Das Natrium liegt wieder als Ion vor, doch reagiert die salzartige Verbindung aus Natrium und Zinn nun heftig mit Wasser.“

Genau diese Zintl-Phasen nimmt sich das Team an Fässlers Lehrstuhl vor, und es gelang kürzlich, diese Substanzklasse durch Einbau von weiteren Metallatomen zum Beispiel in Käfige aus neun Zinnatomen zu erweitern. Allerdings sind die Substanzen, die man herstellt, extrem kompliziert. In der Regel setzen sich deren Bausteine aus Metallen wie Kobalt, Iridium, Germanium oder Zinn zusammen, die sich zu regelmäßigen Gebilden gruppieren: zu Tetraedern, Oktaedern, Dodekaedern oder anderen Formen, die eng aufeinander sitzen. So gelang es Fässlers Forschergruppe beispielsweise im Jahr 2007, einen Komplex aus drei Gold- und – sage und schreibe – 45 Germaniumatomen zu bilden. Fachleute nennen solche Strukturen „intermetalloide Cluster“ – den Begriff hat Fässler 2004 für diese Spezies eingeführt.

Know-how im Labor

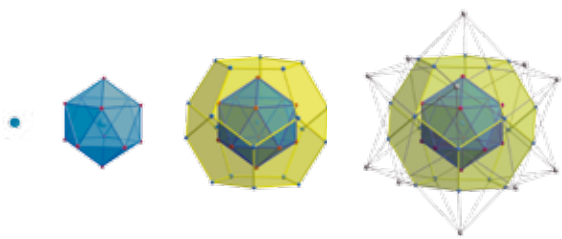
Der Entstehungsprozess dieser Cluster wirkt auf den Außenstehenden geheimnisvoll, fast wie Alchemie: Da wird gemischt, geschmolzen, abgekühlt, gemahlen, wieder ▶



Links: Mit einem Röntgendiffraktometer ermitteln Forscher die Struktur der Kristalle. Hier wird die Probe justiert: Auf einem dünnen Glasfaden sitzt der Kristall im Zentrum. Er wird mit einem Röntgenstrahl von rechts beleuchtet

Eine chemische Matroschka

Wie bei dem russischen Holzspielzeug sitzt ganz im Inneren des Moleküls ein einzelnes Zinnatom, eingepackt in eine Hülle aus zwölf Kupferatomen, und diese ist nochmals umgeben von weiteren 20 Zinnatomen. In der Arbeitsgruppe von Thomas Fässler am Institut für Anorganische Chemie der TUM gelangen solche aus drei Schalen aufgebauten räumlichen Strukturen als „isolierte“ Metallcluster in Legierungen zum ersten Mal.



gemischt und wieder geheizt und abgekühlt, bis am Ende ein Material entsteht, das es vorher noch nie gab. „Wir haben jahrelang gebraucht, bis wir Zugang zu diesen Synthesen gefunden haben“, sagt Fässler. So schmolz beispielsweise Dr. Saskia Stegmaier als Doktorandin zunächst Kupferdraht und Zinnkörnchen zusammen, und zwar unter besonderen Bedingungen: vor Luft und Feuchtigkeit geschützt, mit einem Lichtbogen in einer Argonatmosphäre. Die so erhaltene Bronze schweißte sie dann zusammen mit einem Alkalimetall wie Natrium in eine Ampulle aus Tantal ein. Dieses Metall schmilzt erst bei etwa 3000 Grad Celsius und eignet sich deshalb besonders, um darin sehr reaktionsfreudige Metalle ungestört miteinander in Kontakt zu bringen. In diesem Fall entstanden neuartige, ineinander geschachtelte Metallcluster aus Kupfer- und Zinnatomen, die aufgebaut sind wie eine Matroschka: eine Puppe in der Puppe und noch eine drum herum. Übersetzt in die Chemie heißt das: Ein Atom sitzt in einem molekularen Käfig, der von einem weiteren umgeben ist usw. Da solche Cluster eine extrem große Oberfläche be-

sitzen, könnten sie als hocheffiziente Katalysatoren dienen. Dazu müssen sie aber in einem Pulver isoliert vorliegen.

In der Industrie will man Katalysatoren in Nanoform herstellen, also als Pulver mit einer Korngröße von wenigen Nanometern, um so eine möglichst große Oberfläche zu erhalten. „Das Problem dabei ist, dass die Partikel sehr unterschiedlich in ihrer Ausdehnung sind“, sagt Fässler. „Für bestimmte Reaktionen ist aber häufig eine genau definierte Korngröße nötig. Man hat also Verluste in der Effizienz.“ Mit den neuen Metallclustern lässt sich dieses Problem prinzipiell lösen: Sie haben alle exakt die gleiche Größe. Es sind kleine Einheiten, quasi Atomhaufen ohne Verbindung zu ihren Nachbarn. „Wenn es uns gelingt, unsere Verbindungen in Lösung zu bringen, können wir mit diesen Metallclustern den richtigen Katalysator quasi maßschneidern. Da unsere Verbindungen eben salzartig sind, haben wir die besten Voraussetzungen, die Metallcluster so nutzbar zu machen.“ Zum Beispiel für Hydrierungsreaktionen, bei denen Wasserstoffatome an organische Molekülketten mit Sauerstoff- ▶



Das sorgfältige Abwiegen der Bestandteile für eine neue Legierung erfolgt in einem Handschuhkasten unter Schutzgas, damit die Substanzen nicht ungewollt oxidieren

atomen angedockt werden. Dieses Verfahren nutzt man im Prinzip bei der Synthese von Aromastoffen, Pharmazeutika, aber auch zur Polymersynthese. Üblich ist hier der Einsatz teurer Edelmetalle wie Rhodium – doch auch polare neuartige Legierungen aus Magnesium, Kobalt und Zinn können Erfolge liefern. „Man kann damit zum Beispiel neue Gerüche erzeugen, das ist interessant für die Parfümindustrie“, sagt Fässler.

Neuartige Materialien

Nun geht es Fässler und seinen Mitstreitern aber nicht in erster Linie um neue Parfüms, sondern darum, salzartige Substanzen aus Metallen gezielt herzustellen und ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften zu erforschen. Nicht umsonst hat sein Lehrstuhl am Institut für Anorganische Chemie der TUM den Zusatz „Neue Materialien“. Den Aufbau der produzierten Stoffe herauszufinden, ist nicht trivial, es erfordert eine Menge Erfahrung und einiges an experimentellem Geschick. Zunächst charakterisieren die

Forscher ihre Produkte mithilfe von Röntgenstrahlung, die Auskunft über das Kristallgitter und die genaue Anordnung der Atome gibt. Auch Neutronenstreuung hilft weiter, die man direkt am benachbarten Forschungsreaktor in Garching anwenden kann.

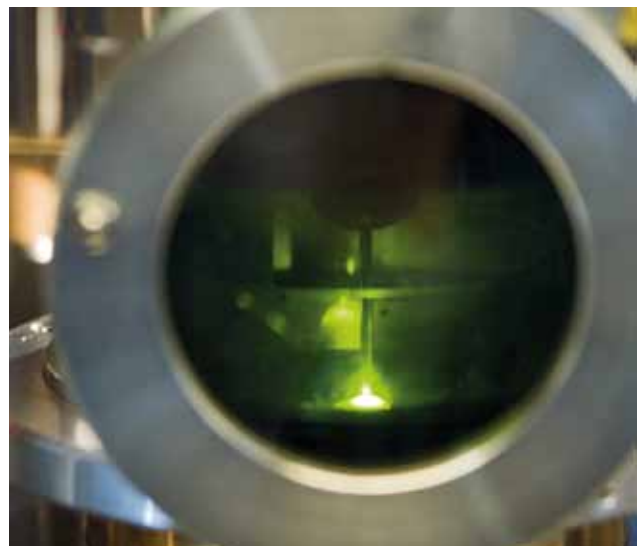
In Garching und in Zusammenarbeit mit anderen Universitätsinstituten messen die Wissenschaftler außerdem das thermische und magnetische Verhalten der Substanzen sowie deren elektrische Eigenschaften. So stellt man sich beispielsweise die Frage, ob eine Legierung supraleitend sein könnte, denn aus Versäumnissen in der Vergangenheit ist man schlau geworden: „Es gibt Verbindungen, die seit Jahrzehnten in Labors geschlummert haben, und man hat ihre supraleitenden Eigenschaften nicht erkannt, weil man nie danach gesucht hat“, so Fässler. Liegen die Resultate vor, kümmern sich Theoretiker darum, die neuen Substanzklassen mit Formeln zu beschreiben. Klassische Physik hilft da nicht weiter; für das ungewöhnliche Verhalten der Elektronen in solchen Kristallen muss man schon die Quanten-



In einem Hochfrequenzofen werden mithilfe der elektrischen Wendel Temperaturen von über 1000 Grad erreicht, die die Ampulle im Quarzglas zum Glühen und ihren Inhalt zum Schmelzen bringen

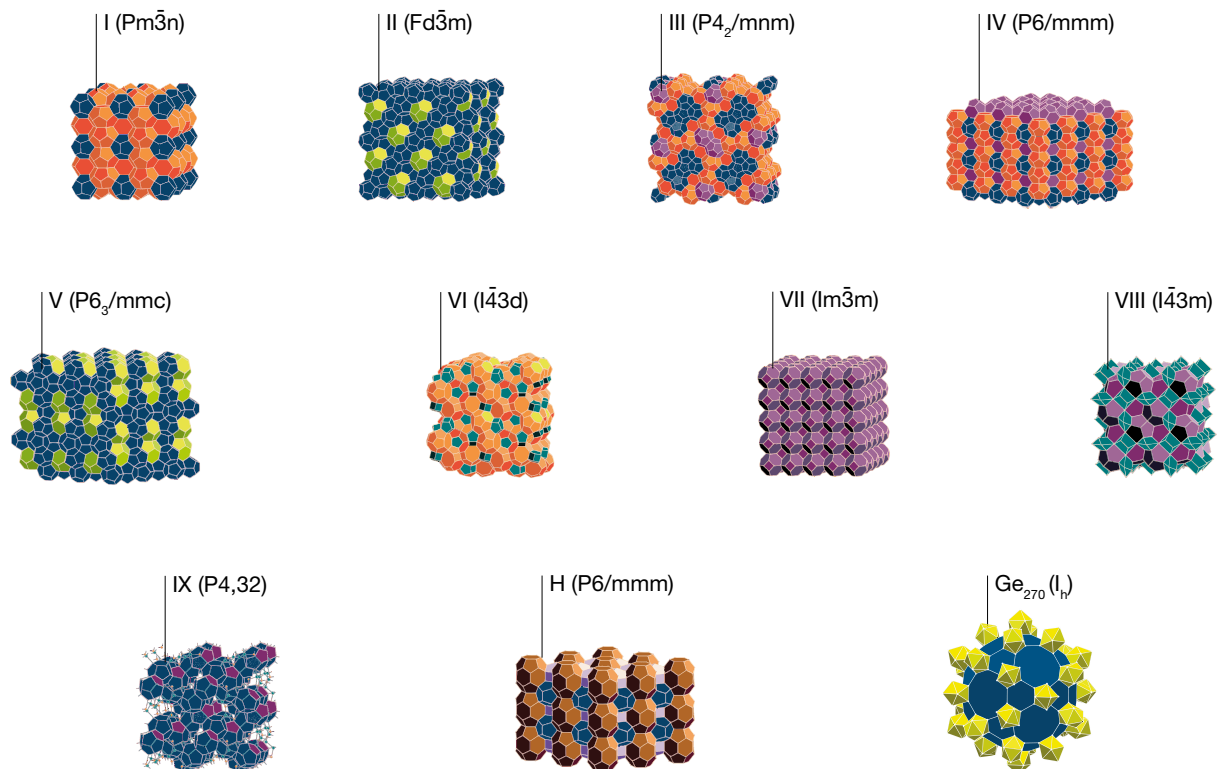
physik bemühen. Parallel dazu sucht das Forscherteam um Fässler nach passenden Lösungsmitteln, in denen sich die Legierung in gleichmäßige Cluster aufspaltet. Schon Eduard Zintl ahnte, dass seine Erkenntnisse für die Praxis wichtig sein könnten. „Damit aber wird alle Grundlagenforschung zur Zweckforschung auf weite Sicht“, sagte er bereits 1932 auf der Konferenz der Deutschen Chemischen Gesellschaft. Und genau so kommt es nun wohl auch. Vor allem die Energiewende hat das Interesse an neuen Materialien belebt. Thomas Fässler und seine Leute haben in diesem Zusammenhang einiges zu bieten, das sie unter anderem auch im Rahmen des Forschungsnetzwerks Regenerative Energien der TUM erforschen.

Beispielsweise arbeiten sie an Materialien, mit denen man die Effizienz der Photovoltaik verbessern könnte. Denn sie können mit derselben Methode auch lösliche Atomcluster aus Silizium herstellen, dem Basismaterial der meisten Solarzellen. Interessant sind jedoch nur diejenigen, deren Struktur es zulässt, dass Elektronen angeregt werden, ▶



Derartig hohe Temperaturen zum Aufschmelzen von Metallen lassen sich auch in einem elektrischen Lichtbogen erreichen

Derartige hypothetische Elementstrukturen aus Silizium und Germanium dienen als Modelle für neuartige Cluster, die Thomas Fässler (rechts) und seine Mitarbeiter herstellen. Sie könnten als neue Materialien für Solarzellen oder in Kombination mit anderen Elementen als Thermoelektrika dienen. Die Beschriftung gibt die Symbole für die Kristallstruktur an

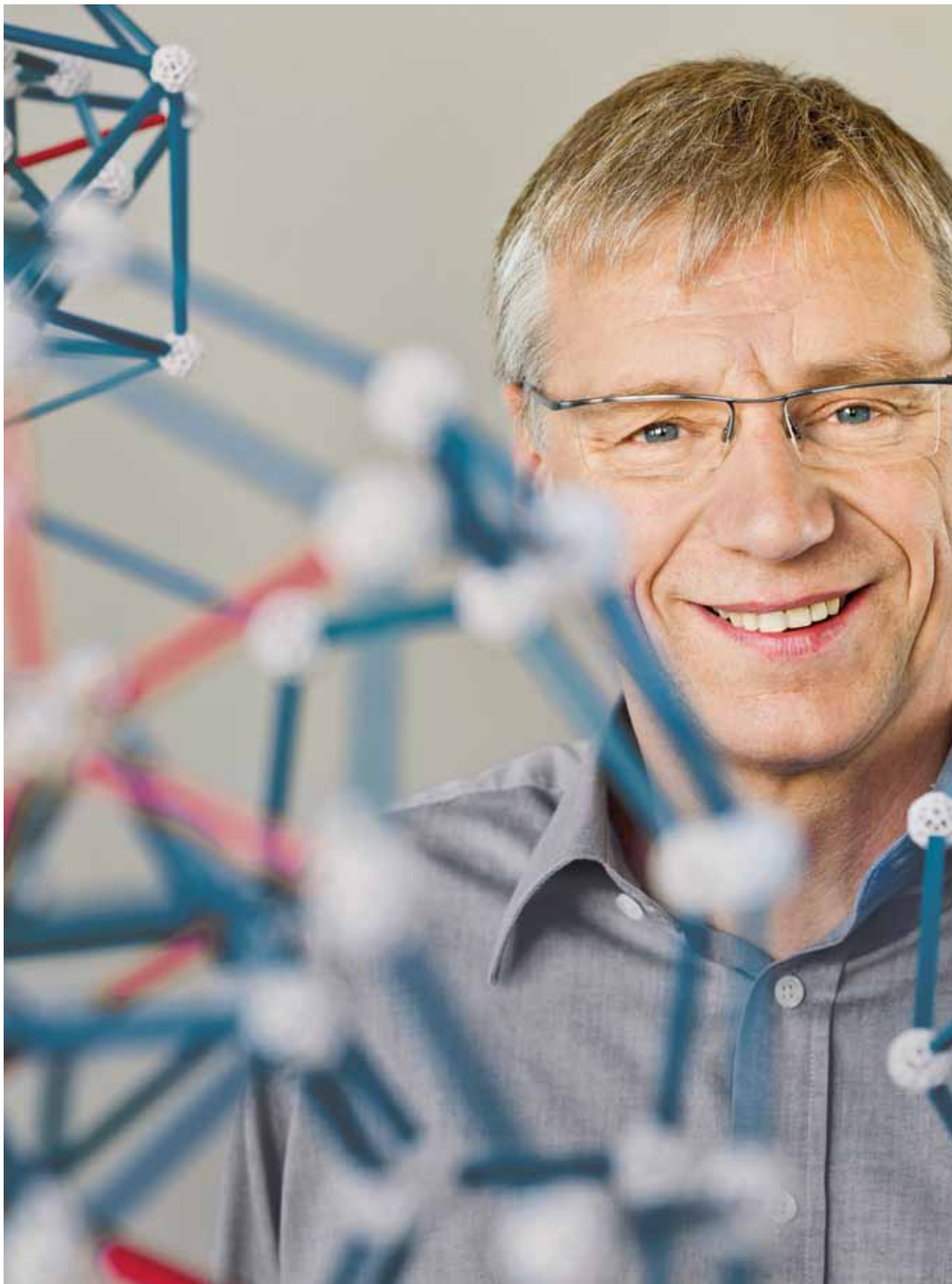


damit letztlich eine Spannung entsteht. Solche Konfigurationen muss man erst einmal finden und entsprechende Herstellungsverfahren für sie entwickeln. Denkbar wären auch schwammartige Silizium- oder Germaniumstrukturen, in deren nanometerkleinen Hohlräumen zusätzlich organische Moleküle sitzen. Derartige Hybridsolarzellen wandeln Sonnenlicht mit viel größerer Effizienz um – ein Projekt, das derzeit vom Freistaat Bayern unter dem Titel „Solar Technologies go Hybrid“ mit vielen Millionen gefördert wird. Leistungsfähige Batterien und Akkus spielen eine zunehmend wichtige Rolle in der Energielandschaft, vor allem bei der Elektromobilität. Fässler und seine Mitarbeiter entwickeln in diesem Zusammenhang verbesserte Anoden für Lithiumbatterien. Üblicherweise verwendet man dafür heute Graphit, in den sich beim Laden des Akkus Lithiumatome einlagern. Leider ist hierfür die Kapazität beschränkt. Andere Anodenmaterialien wie Silizium könnten bis zu zehnmal so viel Lithiumatome speichern. Fässler und sein Team arbeiten zurzeit intensiv daran, Silizium in eine Nanoform oder

schichtartige Struktur zu überführen, die als Anodenmaterial geeignet wäre. „Da gibt es noch viele ungelöste Fragen“, so der Chemiker, „in einem BMBF-Projekt zusammen mit einschlägigen Industrieunternehmen entwickeln wir dennoch bereits eine Testzelle auf Siliziumbasis.“

Thermoelektrische Substanzen

Nicht nur mit Sonnenlicht, sondern auch mit einer Temperaturdifferenz lässt sich elektrische Spannung erzeugen. Träger der Energieumwandlung von sogenannten thermoelektrischen Bauelementen sind besondere Halbleitermaterialien. Sie sind heute schon in der Lage, auch kleine Temperaturunterschiede zur elektrischen Versorgung beispielsweise von Sensoren zu nutzen, umgekehrt kann mit Strom gekühlt werden, ohne dass man Kompressoren mit umstrittenen Kühlmitteln benötigt. Solche Anwendungen gibt es heute schon in Campingkühlboxen. Das Potenzial dieser Technologie reicht aber weiter: Überall dort, wo ungenutzte Wärme entsteht und in die kühlere Umgebung ▷





In einer verschweißten Ampulle aus Quarzglas befindet sich ein kleiner Tiegel aus Tantal, in dem die Legierung erzeugt wird. Das geschieht unter Ausschluss von Luft und bei Temperaturen über 1000 Grad Celsius



Die entstandenen Substanzen dürfen möglichst nicht mit Sauerstoff in Berührung kommen. Hier wird unter dem Mikroskop aus den Kristallen, die kleiner sind als ein Millimeter, ein geeigneter Kandidat für die Röntgenstrukturanalyse ausgewählt

Fotos: Eckert / TUM

abgeleitet wird, könnte Thermoelektrik dazu dienen, die Wärme in Elektrizität umzusetzen: seien es die Auspuffgase eines Autos, einer Lokomotive oder die Abwärme eines Kraftwerks. Als thermoelektrische Substanzen werden zum Beispiel Legierungen aus Blei und Tellur eingesetzt, doch wird auch an Substanzen mit käfigartigen Strukturen geforscht, wobei Silizium eine wichtige Rolle spielt.

„Man braucht Mitarbeiter, die daran glauben, dass so etwas möglich ist, und systematisch daran arbeiten“, sagt Thomas Fässler. Trotzdem erleben seine Chemiker manchmal auch Überraschungen. So erging es etwa Saskia Stegmaier bei ihren Synthesen: Als sie ein besonderes Mischungsverhältnis ausprobierte, entstand plötzlich ein faserartiges Material, das Faserbündel aus dünnen, teilweise gebogenen Nadeln enthielt. „Wir haben gehäht“, sagt Stegmaier, „dass da noch etwas Spannendes drin sein muss.“ Inzwischen konnte die Ausbeute dieser Fasern verbessert werden. Mit dem genau passenden Anteil an Natrium als Schere zum Auftrennen der Legierung entstehen anstelle von Kugeln mehrschalige

Röhren: in der Mitte ein Strang von Zinnatomen, darum eine Röhre aus Kupferatomen, um diese wieder ein Röhrchen aus Zinnatomen. Sie erinnern in ihrem Aufbau ein wenig an Kohlenstoff-Nanoröhrchen. Entsprechend könnten solche Fasern einmal als molekulare Drähte mit besonderen elektrischen Eigenschaften Anwendung finden. Saskia Stegmaier hat für diese Arbeiten 2012 den Starck-Promotionspreis erhalten. Er wird von der Gesellschaft Deutscher Chemiker vergeben für die beste Doktorarbeit der letzten zwei Jahre auf dem Gebiet der Festkörper- und Materialforschung. Wie schnell sich das Gebiet entwickelt, davon zeugen auch zwei Bücher über Zintl-Phasen und Zintl-Ionen, die Thomas Fässler soeben als Herausgeber vollendet hat. Aber nicht nur wegen dieser Monografien schauen Kollegen aus der ganzen Welt aufmerksam nach München. „Wir sind international gut sichtbar“, meint der Lehrstuhlinhaber vorsichtig. Das liegt sicherlich auch an der intensiven Verbindung von absoluter Grundlagenforschung mit hochaktuellen Anwendungen.

Brigitte Röthlein

Wir suchen m/w

PROFESSIONALS | ABSOLVENTEN | PRAKTIKANTEN VERFASSEN VON ABSCHLUSSARBEITEN

in den Fachrichtungen

Kunststoff-/Verfahrenstechnik, Elektro-/Informationstechnik, Mechatronik,
Maschinenbau, Produktions-/Automatisierungstechnik, Technische Informatik,
Wirtschaftsinformatik

WIR BIETEN:

- Abwechslungsreiche Aufgaben
- Anspruchsvolle Projekte auf allen Kontinenten
- Sehr gute Sozialleistungen, Firmenkindergarten, Sportgruppen
- Leistungsgerechte Bezahlung
- Entwicklungsmöglichkeiten
- Standorte in attraktiver Nähe zum Chiemsee, zu Salzburg und zu Zürich,
in weiteren europäischen Ländern sowie in Nord- und Südamerika und Asien
- Internationales Umfeld
- Ideale Work-Life-Balance mit hoher Lebensqualität

WIR ERWARTEN:

- Fundierte Ausbildung
- Bereitschaft zu längeren Auslandsreisen
- Gute Englischkenntnisse

Weitere Stellenangebote unter www.brueckner.com

Brückner Maschinenbau GmbH & Co. KG
Königsberger Str. 5-7 | D-83313 Siegsdorf

Tel.: +49 8662 63 9061 oder +49 8662 63 9106 | hr@brueckner.com



Welcome
Home

Erfahren Sie mehr
über Ihren Arbeits-
und Wohnort!

www.brueckner.siegsdorf.direxio.de

Die Brückner-Gruppe ist ein mittelständisches Familienunternehmen mit 1.400 Beschäftigten. Die attraktiven Standorte zwischen München, Salzburg und Zürich bieten flexibles Arbeiten mit viel Eigenverantwortung und Projekten auf allen Kontinenten.

BRÜCKNER

BRÜCKNER
SERVTEC

KIEFEL
A Member of Brückner Group

PSG
PackSys Global





Ulrich Wilhelm

Wissenschaft in den Medien

Themen aus Umwelt, Medizin, Wissenschaft und Technik beherrschen immer häufiger die Schlagzeilen. Sie liefern überdies reichlich Stoff für Reportagen, Analysen, Interviews und Kommentare. Grund dafür sind drei Trends, die im Wissenschaftsjournalismus zu beobachten sind.

„Der Kitt des Universums“ oder „Forscher finden Spuren von Gottesteilchen“: Wer hätte gedacht, dass solche Schlagzeilen einmal Aufmacher der „B5 aktuell Nachrichten“ sein oder auf Seite eins der „Süddeutschen Zeitung“ gedruckt würden? Doch es ist nicht zu übersehen: Ob es die Spuren des Higgs-Teilchens sind, das im Sommer 2012 entdeckt wurde, oder die ökologischen Folgen der Ölpest im Golf von Mexiko – Themen aus Umwelt, Medizin, Wissenschaft und Technik beherrschen immer häufiger die Schlagzeilen. Sie liefern überdies reichlich Stoff für Reportagen, Analysen, Interviews und Kommentare.

Wissenschaftsthemen haben sich in den vergangenen Jahrzehnten ihren Platz in den Medien erobert und sie liegen weiterhin im Trend. Weil sie spannend, oft sogar unterhaltsam sind. Weil Menschen in einer vernetzten und komplizierten Welt nach Wissen und Orientierung suchen. Und weil der Neuigkeitswert von Wissensthemen oft unübertroffen ist. Ein neues Medikament gegen Multiple Sklerose, ein neuer Suchalgorithmus, eine neue Stereo-Technik für Hörgeräte können Leben verändern. Sie tun das vielleicht nicht ganz so schnell wie eine Finanzkrise – möglicherweise aber nachhaltiger.

Auch die Forschungsergebnisse der TU München liefern wichtige Impulse für den wissenschaftlichen Fortschritt, die Hochschule belegt zu Recht hervorragende Plätze in nationalen und internationalen Hochschul-Rankings. Entsprechend häufig greifen Medien Ergebnisse aus den Laboren und Instituten der TUM auf.

Drei Trends sind im Wissenschaftsjournalismus zu beobachten – und begrüßenswert: Erstens ist das Angebot für Journalisten reichhaltiger geworden und durch das Internet leicht zugänglich. Zahllose Newsdienste liefern täglich Ergebnisse aus Laboren und Instituten, Pressestellen versorgen Medienmacher mit Stoff. Hochschulen haben erkannt, dass sie ihre Forschungsergebnisse vermarkten müssen und liefern sich sogar einen regelrechten Wettbewerb der Aufmerksamkeit. Auch Wissenschaftler sind mehr als früher gewillt, mit Journalisten über ihre Arbeit zu sprechen. Wissenschaftliche Reputation und Medienprominenz, das schließt sich heute nicht mehr zwangsläufig aus. Der Konflikt zwischen den auf Genauigkeit zielenden Experten und den Journalisten, die schnell und vielseitig arbeiten müs-

sen, hat sich weitgehend aufgelöst. Beide Seiten gehen in der Regel sehr professionell miteinander um.

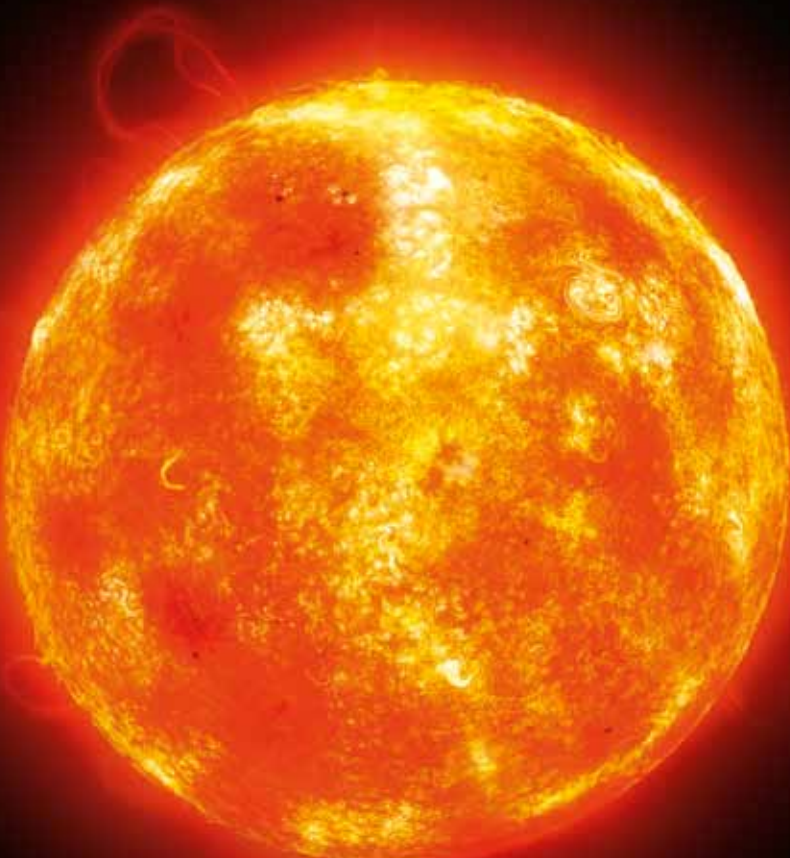
Zweitens nimmt der Anteil an Wissensthemen zu, sie haben sich ihren Platz zwischen den „klassischen“ Themen aus Politik, Feuilleton, Wirtschaft und Sport erobert. Wissen, das ist heute ein gewichtiges Ressort, und die Themen werden auch auf Seite eins platziert oder zur besten Sendezeit ausgestrahlt. Drittens wollen Journalisten Wissenschaft möglichst unterhaltsam – und damit meine ich nicht oberflächlich! – präsentieren. Wissen, das ist im besten Sinne Bildung, Einordnung und Unterhaltung.

Als öffentlich-rechtlicher Sender hat der Bayerische Rundfunk den Auftrag, seinen Hörern und Zuschauern Erklärung und Orientierung zu bieten. Das ist nicht einfach, weil die Gesellschaft fragmentierter ist als früher. Menschen konsumieren Medien längst nicht mehr ausschließlich linear, sie lesen nicht mehr die eine Zeitung oder schauen das eine Programm, sondern sie suchen sich ihr eigenes Angebot unter der Vielzahl der Angebote heraus. Umso mehr bemüht sich der Bayerische Rundfunk, ein umfassendes Wissensangebot zu machen – mit klassischen Bildungsinhalten, Hintergrundinformationen, aktuellen Wissenschaftsmagazinen und einem ansprechenden Online-Auftritt, der die Sendungen begleitet und eine Plattform für alle bietet, die nach Wissen suchen. In einer schnelllebigen Welt liefert die Wissenschaft jene Themen, die über den Tag und über die Schlagzeile hinaus lange nachwirken. □

Ulrich Wilhelm

Ulrich Wilhelm ist seit 1. Februar 2011 Intendant des Bayerischen Rundfunks. Zuvor war er fünf Jahre lang Sprecher der Bundesregierung und Chef des Bundespresseamtes. Wilhelm ist Absolvent der Deutschen Journalistenschule in München und studierter Jurist. Ab 1983 war er für acht Jahre als Journalist für den Bayerischen Rundfunk (Hörfunk und Fernsehen) tätig. 1991 trat er beim Bayerischen Staatsministerium des Innern in den Staatsdienst ein, 1993 wechselte Wilhelm in die Bayerische Staatskanzlei. Von 1999 bis 2003 war er Sprecher des Ministerpräsidenten und der Staatsregierung. 2004 wurde er Amtschef des Wissenschaftsministeriums, bevor er 2005 als Sprecher der Bundesregierung nach Berlin wechselte.

Kann man das Sonnenfeuer auf die Erde holen? MAN kann.



100 Millionen Grad Celsius – so heiß wird es im Inneren einer Testanlage zur Erforschung des Energieprinzips unserer Sonne. Mit diesem Verfahren könnte man umweltschonend unendlich viel Strom produzieren. Dagegen ist die echte Sonne mit nur 16 Millionen Grad geradezu angenehm mild. Das Max-Planck-Institut baut zurzeit so eine Testanlage – die größte ihrer Art. MAN Diesel & Turbo liefert für „Wendelstein 7-X“, so der Name des Projektes, unter anderem das Plasmagefäß, ein äußeres Vakuumgefäß und weitere Komponenten für die thermische Isolierung. So hilft MAN kräftig mit, alternative und saubere Energien noch weiter voranzubringen.

Was MAN noch alles für die Energiewende tun kann: www.man-kann.eu

Engineering the Future –
since 1758.
MAN Gruppe





www.bmwgroup.jobs

LEIDENSCHAFT SCHAFFT ZUKUNFT.

JETZT BEI DER BMW GROUP EINSTEIGEN UND DIE ZUKUNFT DER MOBILITÄT GESTALTEN.

Man kann viel über die Zukunft der Mobilität reden. Im Team der BMW Group wird sie gemacht. Mit innovativen Technologien für mehr Nachhaltigkeit, Effizienz, Sicherheit, Umweltverträglichkeit und natürlich Fahrspaß. Um diese Innovationen zu entwickeln und auf die Straße zu bringen, brauchen wir Menschen wie Sie. Menschen mit einem eigenen Kopf und einem klaren Ziel: So schnell wie möglich die Theorie mit der Praxis zu verbinden und mit viel Freiheit und Gestaltungsspielraum für große Ideen die Welt der Mobilität zu verändern. Wenn Sie diese Leidenschaft antreibt, sind Sie bei uns genau richtig. Wir suchen

Studenten und Absolventen aus dem Ingenieurbereich sowie anderen Fachbereichen.

Informieren Sie sich jetzt über die vielfältigen Einstiegsmöglichkeiten und Herausforderungen bei der BMW Group für unser Team in München, Leipzig oder einem anderen Standort. Egal ob Sie über ein Praktikum, Ihren Studienabschluss- bzw. Doktorarbeit, als Trainee oder Direkteinsteiger zu uns kommen: Wir planen mit Ihnen zusammen Ihre individuelle Erfolgsgeschichte bei der BMW Group. Wir freuen uns auf Sie. Machen Sie jetzt den ersten Schritt.



Details, konkrete Stellenangebote und die Möglichkeit zur Online-Bewerbung finden Sie auf www.bmwgroup.jobs. Oder direkt über den QR Code.



www.facebook.com/bmwkarriere

**BMW
GROUP**
Recruiting



Rolls-Royce
Motor Cars Limited