



Das Wissenschaftsmagazin

Ausgabe 4 | Mai 2009

Technische Universität München



Schutz-
gebühr
€ 3,-

Faszination Forschung



Wem gehören die Wolken?

Damit Wetter nicht zur Waffe wird

Verpackungskünstler

Frische-Folien aus Freising

Können Roboter lieben?

Zukunft von Mensch und Maschine

Tumoren im Licht · Akaflieg · Die Macht des Wassers · Neue Energie



Zukunftssichere Perspektive gesucht?

AREVA NP sucht 6.000 Persönlichkeiten weltweit.

Stellen Sie sich gemeinsam mit AREVA den großen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts: der Sicherung des wachsenden Energiebedarfs, dem Kampf gegen die globale Erwärmung und der Verantwortung für zukünftige Generationen. Als eines der führenden Energietechnikunternehmen der Welt gehen wir konsequent neue Wege – dies gilt in besonderem Maße für die Förderung unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Wir bieten ihnen vielfältige individuelle Entwicklungschancen, gezielte Qualifizierungsprogramme und anspruchsvolle Aufgaben. Denn wir wissen, dass unsere Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter mit ihren Fähigkeiten unsere Zukunft sind.

Bitte bewerben Sie sich online unter www.aveva-np.com/karriere.

AREVA
PURE ENERGY

Liebe Leserinnen und Leser!

Feuer, Wasser, Luft und Erde – die vier Elemente aus der Mythologie. Mit dem Wasser, in Wohlstandsgesellschaften leichtfertig unterschätzt, wollen wir uns heute im Schwerpunkt von „Faszination Forschung“ befassen. Ohne Wasser gäbe es kein Leben auf der Erde. Chemisch betrachtet ist es ein einfaches Molekül aus zwei Wasserstoff-Atomen und einem Sauerstoff-Atom. Aber Wasser ist einzigartig. Nicht nur, weil es als einzige chemische Verbindung in der Natur in allen drei Aggregatzuständen vorkommt: als Wasser, Eis und Wasserdampf.



Prof. Peter Rutschmann, erst kürzlich an die TUM berufen, bündigt das Wasser in unserer traditionsreichen Forschungsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft in Oberrach. In Modellen und am Computer simuliert er Staudämme und Wasserkraftwerke für Regionen, die unter Problemen mit der Wasserversorgung leiden – Jordanien, Ägypten, Israel oder Palästina. Schon hier wird klar, dass ein Staudambau auch politische Fragen aufwirft, hat er doch meist einschneidende Konsequenzen für eine ganze Region. Diesem Thema geht Prof. Peter Wilderer in seinem Essay nach, der fragt: „Wem gehören die Wolken?“ In einer Zeit, da die Technologien zur künstlichen Beeinflussung des Klimas immer besser werden, muss man kritisch hinterfragen, wie dieses „Geo-Engineering“ rechtlich zu regeln ist, ganz abgesehen von der schwierigen Folgenabschätzung und Risikobewertung der möglichen Maßnahmen.

Die Geo-Ingenieure machen sich auch Gedanken, wie man das klimaschädliche Kohlendioxid aus technischen Prozessen bindet oder nützlich umwandelt. Manche schlagen unterirdische Lagerstätten vor. TUM-Wissenschaftler haben eine kreative Lösung: Der Chemiker Prof. Bernhard Rieger baut aus CO₂ völlig neue Werk- und Wirkstoffe. Dem Klima zugute kommt auch die Forschung unserer Maschinenbauer, indem sie Kraftwerke mit höherem Wirkungsgrad entwickeln. Auf Effizienzsteigerung kommt es auch beim Bauen an. Hier setzt der Forschungsverbund ForBAU an, in dem Wissenschaftler aufs Engste mit der Industrie kooperieren. Sie wollen die virtuelle Baustelle einrichten, auf der perfekte Kommunikation, Planung und Steuerung bisher unerreichte Wertschöpfungseffekte hervorbringen.

„Faszination Forschung“ zeigt auch in dieser Ausgabe wieder, wie interdisziplinäre Forschung bei uns an der TUM gedeiht. Ein besonderes Lesevergnügen bietet das Streitgespräch zwischen dem Ingenieurwissenschaftler Prof. Martin Buss und dem Wissenschaftsphilosophen Prof. Klaus Mainzer: Sie diskutieren die ebenso nachdenkliche wie charmante Frage, ob Roboter eines Tages lieben können – und dürfen.

Viel Vergnügen und Faszination beim Lesen wünscht Ihnen
Ihr

Prof. Wolfgang A. Herrmann
Präsident

In dieser Ausgabe

Seite 30

Ein Stausee in der Halle? Die Macht des Wassers

Grafik: edlundsepp nach Plänen von Lahmeyer International

Seite 6

Die Verpackungs- künstler von Freising

Foto: Fotolia

Seite 84

Den Tumor ans Licht gebracht

Foto: Kurt Bauer

Wem gehören die Wolken?

Seite 44

Bild: edlundsepp

Neue Wege in der Krebsforschung: TUM-Forscher machen Tumoren mit Laserstrahlen sichtbar

Techniken zur Wetterbeeinflussung: Internationale Regelungen sollen Grenzen aufzeigen

Titelgeschichten

Verpackungskünstler	
Frische-Folien aus Freising	6
Wenn Studenten in die Luft gehen	
Mitglieder der Akaflieg konstruieren Flugzeuge	14
Die Macht des Wassers	
TUM-Forscher machen Stauwehre sicherer	30
Wem gehören die Wolken?	
Damit Wetter nicht zur Waffe wird	44
Können Roboter lieben?	
Die Zukunft von Mensch und Maschine	58
Den Tumor ans Licht gebracht	
Laserstrahlen helfen bei der Krebstherapie	84

Forschung und Technik

Wege des Wachstums	
Proteine steuern Pflanzen	13
Peptid-Puzzle	
Erfolge bei der Entwicklung von Medikamenten	22
Schnelles Heizen macht Gold härter	
TUM-Forschern gelingt der Nachweis	29
Gas geben beim Wirkungsgrad	
Mehr Effizienz dank neuer Kraftwerkstechnik	48
Vom Klima-Killer zum Kunststoff-Knüller	
CO ₂ als wertvoller Rohstoff	64
Die Revolution des Bauens	
Wie man Bauprozesse ökonomisieren kann	72
Nippes aus dem alten Rom	
Neutronenforscher untersuchen Merkur-Statuette	90



Das Kraftwerk der Zukunft: Gas geben beim Wirkungsgrad

Seite 48

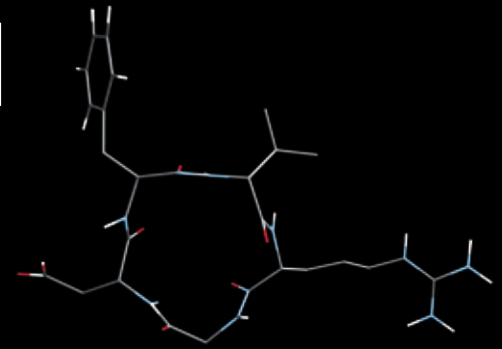
Seite 58



Können Roboter lieben?

Das Streitgespräch: Ein Ingenieurwissenschaftler und ein Philosoph diskutieren

Seite 22



Peptid-Puzzle

Nach jahrelanger Grundlagenforschung: Durchbruch für ein Medikament gegen Krebs

Rubriken

Editorial	3
Autoren	70
Impressum	70

Weise Worte der Wissenschaft

Werner Heisenberg (1901-1976)

Der erste Schluck aus dem Becher der Wissenschaft führt zum Atheismus, aber auf dem Grund des Bechers wartet Gott.

Robert Musil (1880-1942)

In der Wissenschaft kommt es alle paar Jahre vor, dass etwas, das bis dahin als Fehler galt, plötzlich alle Anschauungen umkehrt oder dass ein unscheinbarer und verachteter Gedanke zum Herrscher über ein neues Gedankenreich wird.

Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716)

Nichts geschieht auf einen Schlag; und es ist einer meiner größten und bewährtesten Grundsätze, dass die Natur niemals Sprünge macht.

Link

www.wzw.tum.de/lvt



Foto: Fotolia

Die Verpackungs-künstler von Freising

Im Wissenschaftszentrum Weihenstephan entwickeln TUM-Forscher intelligente Folien: Sie schützen Lebensmittel und halten sie sogar länger frisch

Sie ist ein Produkt, das kaum jemand wirklich beachtet: Man kauft im Supermarkt Obst, Gemüse oder Fleisch, reißt die Verpackung auf und wirft sie dann achtlos weg. Dass hinter der Plastikfolie, die den Apfel, den Brokkoli oder das Schnitzel umgibt, unter Umständen viel Know-how steckt, darüber macht sich niemand ernsthaft Gedanken. Bei Horst-Christian Langowski ist das ganz anders, denn er gehört zu den Menschen, die solche Folien entwickeln und immer weiter verbessern.

„Heutzutage bestehen rund zwei Drittel aller Konsumentenverpackungen aus Folien“, sagt der Professor für Lebensmittel-Verpackungstechnik an der TU München. „Und die Qualitätsansprüche von Verbrauchern und Handel sind in den letzten Jahren gestiegen: Sie erwarten gebrauchsfertig portionierte und möglichst sichtbar präsentierte Lebensmittel, die tage-, ja wochenlang frisch bleiben und ihr gutes Aussehen behalten.“

Es gibt mehrere Ursachen, warum Nahrungsmittel verderben: Die Einwirkung von Sauerstoff oder Licht sowie Schimmelpilze, Hefen und Bakterien sind die wichtigsten. Zu all diesen Themen haben Horst-Christian Langowski und seine Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (IVV) in Freising, dessen Chef er außerdem ist, in den letzten zehn Jahren innovative Lösungen erarbeitet. Dass der Handel bisher auf die Neuentwicklungen recht zurückhaltend reagiert hat, liegt an den Kosten. „Jeder Cent, den die Verpackung mehr kostet, ist ein Hindernis“, weiß Langowski aus leidvoller Erfahrung, „und gerade Lebensmittel stehen heute ja extrem unter Preisdruck. Da soll dann die Verpackung als zusätzliche Komponente besonders preiswert sein.“

Intelligente Folien

Der Forscher gibt aber nicht auf. Sein neuester Coup ist eine intelligente Folie, die zwei sich scheinbar wider- ▶

Verpackungstechnologie

sprechende Dinge gleichzeitig kann: eine relativ hohe Feuchtigkeit in der Verpackung stabilisieren und verhindern, dass Wasser kondensiert. Das ist zum Beispiel wichtig bei Obst, etwa Erdbeeren. „Wenn man nicht will, dass verpackte Früchte schnell anfangen zu schimmeln, muss man etwas unternehmen. Denn an den Kontaktpunkten mit der Folie bildet sich häufig Kondenswasser, besonders bei Temperaturschwankungen. Gleichzeitig produziert die Frucht zusätzlich Wasser durch ihren eigenen Stoffwechsel; sie setzt Sauerstoff und Zucker um zu Kohlendioxid und Wasserdampf.“

Man hat also zwei Wasserquellen in der Packung: erstens das Wasser, das aus der Frucht verdampft, und zweitens das Wasser, das sie ausatmet. Schnell schlagen sich kleine Tropfen auf der Innenseite der Folie nieder. Dort, wo sie die Frucht berühren, setzt meist das Schimmelwachstum ein, weil Schimmelpilze bei hoher Feuchtigkeit besonders gut gedeihen. Und Schimmelsporen sind praktisch immer vorhanden, außer man würde die Früchte sterilisieren. „Um ein vorzeitiges Ver-

derben zu verhindern, müssen wir also versuchen, das Innere der Packung nicht zu feucht werden zu lassen“, erklärt der 54-jährige Physiker. Man könnte nun einfach ein Säckchen mit Silicagel, wie man es aus Verpackungen für Kameras oder Schuhe kennt, in die Packung legen. Das würde dafür sorgen, dass es innen immer schön trocken bleibt. „Aber das ist keine Lösung, weil man so auch den Früchten das Wasser entzöge und sie würden schrumpeln.“

Richtiges Mikroklima

Hier kommt nun eine geniale Idee ins Spiel, die von Forschern an Langowskis Lehrstuhl im Wissenschaftszentrum Weihenstephan derzeit in ein Produkt umgesetzt wird: Baut man in die Folie winzige Partikel aus Salzen ein, dann nehmen diese das überschüssige Wasser auf, im Inneren der Plastikhaut bilden sich kleine „Salzwasser-Pfützen“ im Mikrometermaßstab. Wird es in der Packung zu trocken, geben sie ihr Wasser wieder ab. So stellt sich unter der Folie ein Feuchtigkeits-Gleichgewicht ein, das für jedes Salz ganz charakteristisch ist:

Intelligente Folien

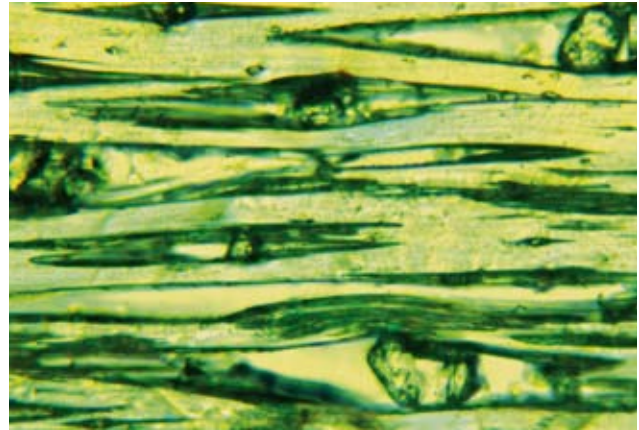
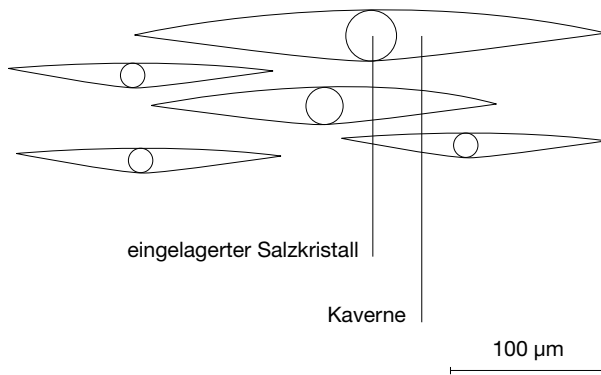
Nahrungsmittel verderben durch die Einwirkung von Sauerstoff oder Licht sowie durch Schimmelpilze, Hefen und Bakterien. Horst-Christian Langowski und seine Mitarbeiter an der TUM und am Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung erforschen Lösungen für solche Probleme.

Beispiel 1

Sauerstoffzehrende Verpackungen, die das Restgas chemisch binden und damit vom Füllgut fernhalten. Man kann die aktiven Stoffe in Form kleiner Kissen begeben. Besser sind aber Sauerstoff-Absorber in innen angebrachten Etiketten oder in der Verpackung selbst.

Beispiel 2

Dem mikrobiellen Verderb versuchen die Wissenschaftler in Freising durch Folien beizukommen, die Konservierungsstoffe enthalten. Benzoesäure oder Sorbinsäure, die beide für Lebensmittel zugelassen sind, werden in die Verpackung eingearbeitet. Die Folien können den Wirkstoff in Mikrokapseln enthalten, oder man bringt ihn in Form einer Lackschicht auf.



Im mikroskopischen Querschnitt durch die Folie zeigt sich, dass in kleinen Hohlräumen Salzkristalle im Kunststoff eingeschlossen sind. Sie nehmen überschüssiges Wasser auf, das Verpackungsgut bleibt deshalb trocken

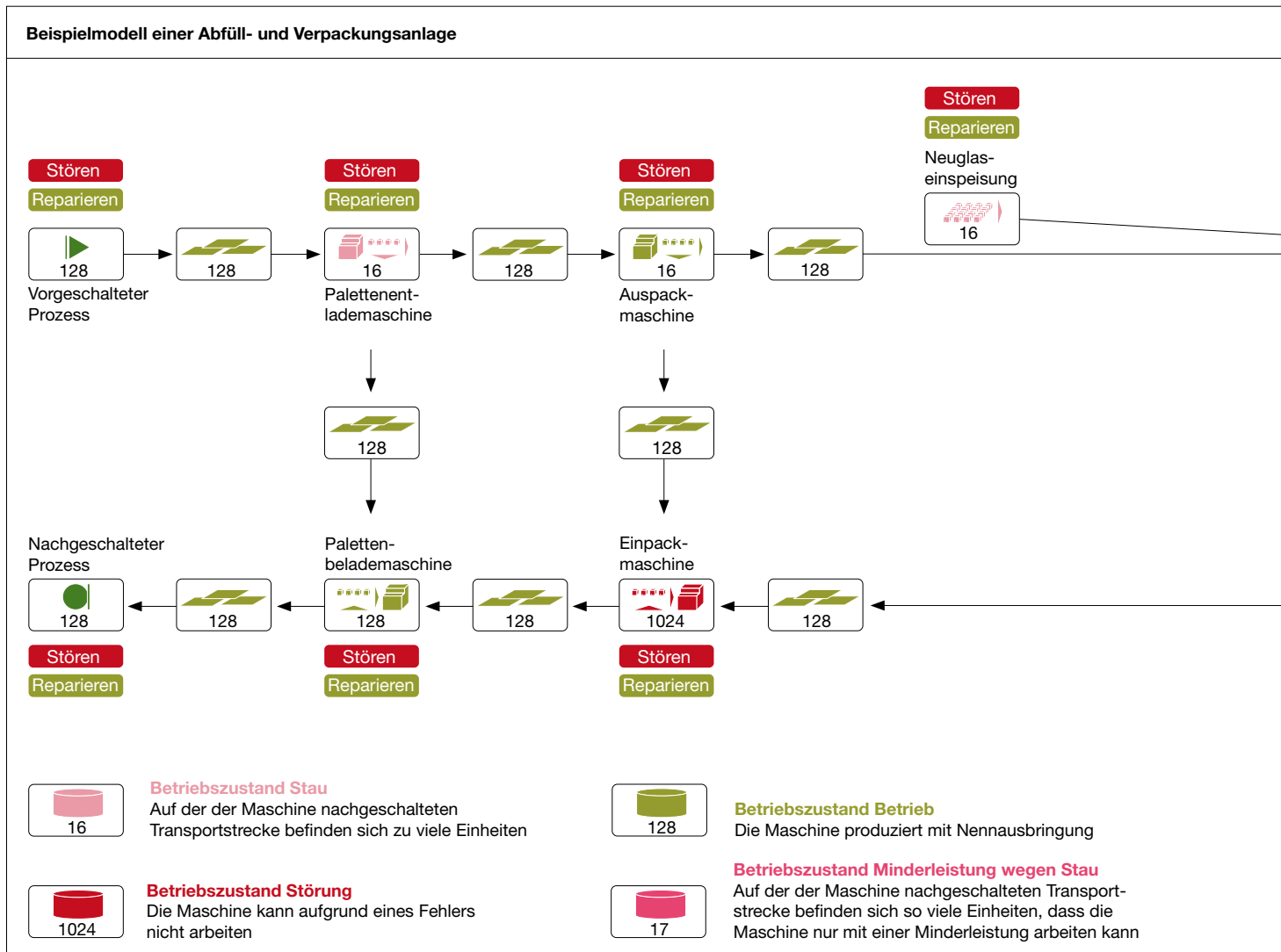
Natriumacetat, ein Zusatzstoff der Lebensmittelindustrie, erzeugt beispielsweise eine relative Feuchtigkeit von 76 Prozent, Natriumcarbonat (Soda) eine von rund 93 Prozent. Gleichzeitig hat die Folie eine gewisse Durchlässigkeit für Gase, sie lässt also einen Teil des Wasserdampfes nach außen dringen. Parallel dazu können Sauerstoff hineinwandern und Kohlendioxid entweichen, was wichtig ist für den Stoffwechsel der Frucht. Ein kleines Wunder: Unter der Folie entsteht durch diese intelligente Regulation ein Mikroklima, das ganz von selbst die richtige Feuchtigkeit und Gaszusammensetzung hat, in der sich die Frucht am wohlsten fühlt und in der sie am längsten frisch bleibt.

Entwicklungsarbeit im Technikum

Bei der Entwicklung der Wunderfolien lassen sich die TUM-Forscher natürlich nicht in die Karten schauen, bevor nicht alle Patente erteilt sind. Im Technikum des IVV, das sie mitbenützen, stehen all jene Maschinen, die auch Folienhersteller haben. Hier entwickeln und erproben die Wissenschaftler die einzelnen Produktionsschritte. „Das Verfahren ist nicht besonders aufwendig“, berichtet Langowski. „Man arbeitet die Salze in den Kunststoff ein und stellt daraus die Folien her.“ Mit einer ganzen Batterie von Messgeräten testen die Forscher unterschiedliche Varianten: Sie untersuchen, wie schnell Wasserdampf, Sauerstoff und CO₂ durch die Folie dringen können, messen die Porengröße, prüfen die Eigenschaften der Folie und stellen sicher, dass sie lebensmittelrechtlich unbedenklich ist. Sie finden beispielsweise auch heraus, welche Porengröße dafür

sorgt, dass der Wasserdampf möglichst schnell an die Salzpartikel herankommt. Wissenschaftlich betrachtet bilden sich rund um die Salzkörnchen kleine Hohlräume, weil die Haftung zwischen Salz und Kunststoff nicht sehr stark ist. „In jedem dieser Hohlräume klappert ein kleines Stück Salz“, schildert Professor Langowski anschaulich den Vorgang. „Dadurch wird die Folie undurchsichtig, irisierend und weiß, gleichzeitig verbraucht man weniger Kunststoff.“ Ähnliche Folien gibt es heute schon als Schmuckverpackungen von Schokoladenriegeln oder -tafeln; sie sehen attraktiv aus und lassen sich leicht bedrucken. Die Partikel in ihrem Inneren dienen bisher jedoch nicht der Feuchtigkeitsregulierung und nehmen auch kein Wasser auf. Wenn man undurchsichtige Folien für Obst, Gemüse oder Fleisch verwenden will, müsste man sie mit durchsichtigen Streifen kombinieren, damit der Verbraucher die Ware sehen kann. Oder man könnte die intelligente Eigenschaft in den schalenförmigen Behälter verlagern, der ohnehin undurchsichtig ist.

Auch wenn die Herstellung im Grunde einfach ist und mit den herkömmlichen Maschinen geschieht, ist die neue Folie ein wenig teurer als normale Plastikfolien. Für Handel und Verbraucher hat sie aber einen großen Vorteil: Der Anteil an verdorbener Ware wird geringer. Wenn der Supermarktbetreiber am Abend nicht mehr jedes zehnte Schälchen mit Erdbeeren aussortieren muss, weil einige Früchte schon zu schimmeln beginnen, spart er eine Menge Geld. „Wenn man es schafft, dass die verpackten Produkte im Laden nur ein bis zwei Tage ▶



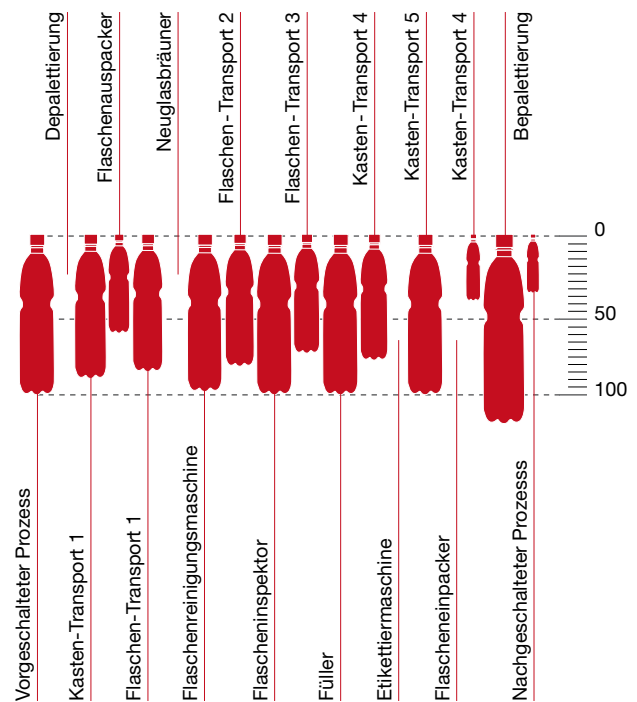
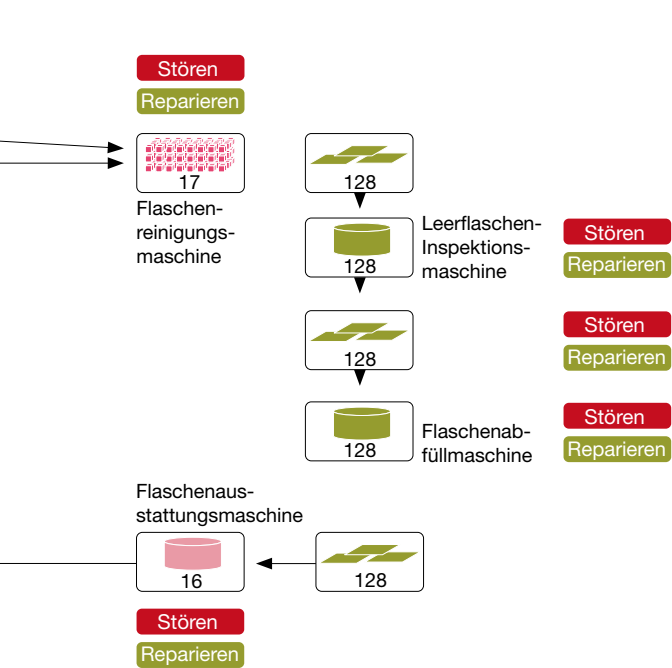
länger halten, wäre das ein echter Kostenfaktor“, betont Langowski. Dann lohnen sich auch ein paar Cent mehr für die Verpackung.

Aber nicht nur bei Obst, Gemüse und Fleisch spielen die Kosten der Verpackung eine große Rolle, auch bei Getränken. Deshalb kümmern sich die Weihenstephaner Forscher darum, wie Bier oder Limo möglichst schnell, sauber und preisgünstig in die Flasche kommen. Dazu haben sie in ihrer Weihenstephaner Technikumshalle eine eigene Abfüllanlage. „Abfüllen heißt immer, sehr schnell und gleichmäßig große Mengen von Flüssigkeit auf Flaschen ziehen“, sagt Horst-Christian Langowski. Eine typische Flaschenabfüllanlage für Bier schleust pro Stunde 60.000 Flaschen durch, also pro Sekunde rund 17 Flaschen. Eine gewaltige Menge, bei der die kleinste Störung in der Anlage schnell große Verzögerungen in

der Produktion nach sich zieht. „Stellen Sie sich das Ganze vor wie eine Autobahn“, so Langowski. „Wenn alles auf maximalen Durchsatz optimiert ist, haben die kleinsten Störungen Folgen, die sich fortpflanzen, es entsteht ein Stau. Dieser ist immer noch vorhanden, auch wenn die Unfallstelle längst geräumt ist. In den Abfüllanlagen passiert genau das Gleiche.“

Störfriede in der Abfüllanlage

Das Bestreben der Brauereien und Getränkeabfüllbetriebe ist es deshalb, Störungen so früh wie möglich zu erkennen und am besten gar nicht erst auftreten zu lassen. Hier sind nun die Weihenstephaner Forscher gefragt. Denn sie versuchen herauszufinden, wo jeweils die Schwachstellen bei einer Anlage stecken, um damit den ganzen Prozess effizienter zu machen. Dazu benö-



Grafik: edlundsepp

Die gezeigte Abfüllanlage ist typisch für eine Mehrweganlage. Im vorgeschalteten Prozess werden Paletten mit dem Leergut aufgesetzt. Die Paletten-Entlademaschine packt dann die Kisten von den Paletten. Danach werden die noch schmutzigen Flaschen aus den Kisten genommen und in der Flaschenreinigungsmaschine ca. 20 Minuten gereinigt. Bevor die Flaschen mit dem Produkt gefüllt werden, schleust der Inspektor Exemplare mit Beschädigung, Fremdfaschen und nicht saubere Flaschen aus. Nach dem Befüllen bringt die Flaschen-Ausstattungsmaschine die Etiketten an. Die Einpackmaschine packt die Flaschen wieder in die Kisten. Im letzten Schritt werden die Kisten auf die Palette gesetzt und vom Stapler im nachgeschalteten Prozess abgeholt. An vielen Stellen können Störungen auftreten, die man rechtzeitig erkennen muss, um sie zu beheben.

tigt man zunächst einmal eine Betriebsdatenerfassung, die angeben kann, ob eine Maschine zuverlässig arbeitet oder wann und warum sie ausfällt. Ist sie vorhanden, kann man anhand der Daten nachträglich versuchen, Ursachen für Störungen zu ermitteln und zu beseitigen. „Wir haben dazu Algorithmen entwickelt, die im Nachhinein feststellen können, wer der wahrscheinlichste Verursacher der Störung war“, erklärt der zuständige Mitarbeiter Dr.-Ing. Tobias Voigt. „Mithilfe eines mathematischen Verhaltensmodells für die Anlage gelingt es uns, die größten Störfriede in einer Abfüllanlage zu identifizieren.“

Um das Vorhersagemodell zu erproben, haben Voigt und sein Team eine Simulation entwickelt, die alle wichtigen Komponenten einer Abfüllanlage auf dem Compu-

ter abbildet. Mit ihr kann man natürlich auch Störungen simulieren und berechnen, wie sie sich im System nach vorne oder hinten fortsetzen. So erkennt man, welche Komponenten eine Engstelle bilden und verbessert werden müssen.

Wie kommt der Ketchup aus der Flasche?

Während im Technikum in Weihenstephan die Forscher rund um Tobias Voigt daran arbeiten, wie Flaschen noch schneller gefüllt werden können, beschäftigt sich Florian Loibl mit dem Gegenteil: Er untersucht, wie die Innenwände von Behältnissen gestalten sein müssen, damit man sie möglichst vollständig entleeren kann. Das A und O dabei ist: eine sehr glatte Oberfläche. „Wir müssen dafür sorgen, dass die Haftung des Produkts an der Wand ganz niedrig ist“, erläutert der Lebensmittel- ▷



Wie muss die Oberfläche einer Flasche beschaffen sein, damit Ketchup nicht an ihr haften kann? Diese Frage wurde am Institut für Lebensmittel-Verpackungstechnik geklärt. Links eine normale Ketchup-Flasche, rechts die Neuentwicklung, die sich fast vollständig entleeren lässt

Bild: Fraunhofer IW

technologie. Teflon wäre ein Beispiel. Es hat eine Oberfläche, die nur wenig mit dem Produkt in Wechselwirkung tritt. Aber Teflon ist teuer und enthält Fluor. Das will kein Lebensmittelproduzent in der Verpackung haben. Florian Loibl hat deshalb eine Vielzahl anderer Beschichtungen getestet, zum Teil mit neu entwickelten Messverfahren, um herauszufinden, wie schnell auf ihnen beispielsweise Ketchup abläuft.

Wasserabstoßende Schicht

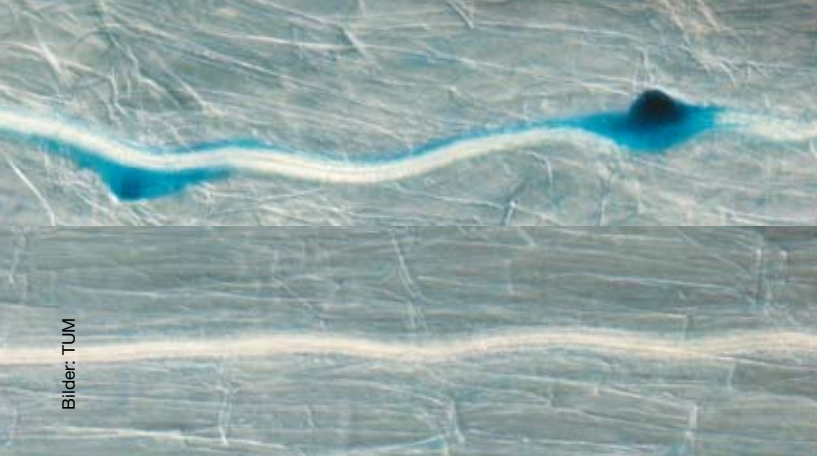
Mit Plasmabedampfung haben Technologen der Fraunhofer-Gesellschaft unterschiedliche Schichten dafür hergestellt. Sie sind nur wenige Nanometer dick und meist silikonartig. Am besten funktionierten die Schichten, die wasserabstoßend wirken. Im extremsten Fall gelang es Loibl, eine Kunststoffflasche, in der vorher 30 Prozent Ketchup hängen geblieben waren, mit Hilfe einer solchen Schicht bis auf vier Prozent zu entleeren. So etwas rechnet sich natürlich für den Verbraucher, und deshalb sind Firmen daran interessiert – nicht nur aus dem Lebensmittelbereich, sondern auch in der Kosmetikindustrie. Eines allerdings haben die Forschungsarbeiten von Florian Loibl auch ergeben: „Es gibt keine Allround-Schicht, die bei allen Packstoffen und jedem Füllgut gleich wirkt. Man muss immer individuelle Lösungen entwickeln.“

Die Forscher des Lehrstuhls für Lebensmittel-Verpackungstechnik sind gefragte Leute bei der einschlägigen Industrie. Denn sie arbeiten nicht im Elfenbeinturm, sondern bringen Ergebnisse, die sowohl dem Verbraucher als auch dem Hersteller messbar nützen. Und sie haben weltweit kaum Konkurrenz. Einen ähnlichen Lehrstuhl gibt es in Deutschland nur noch in Dresden. Dennoch oder vielleicht gerade deswegen bilden die Weihenstephaner im Studiengang Lebensmitteltechnologie zur Zeit die beachtliche Zahl von 480 Studenten aus.

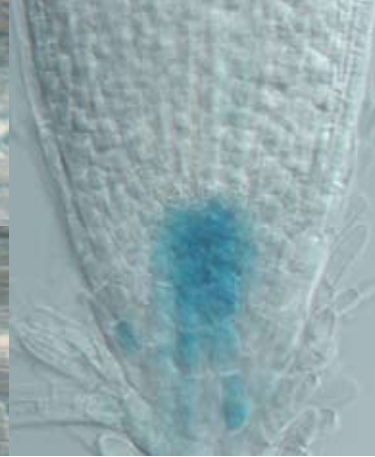
Auch was das Brauwesen anbetrifft, „lebt man wissenschaftlich immer ein wenig in der Diaspora“, wie Horst-Christian Langowski anmerkt. „Entsprechende Universitätsstudiengänge gibt es nur noch in Berlin, im schottischen Edinburgh, im englischen Nottingham, in Gent/Leuven in Belgien und an der University of California in Davis/USA.“

Das hat zwar zur Folge, dass die Weihenstephaner weltweit die meisten Studenten ausbilden – rund 520 studieren zur Zeit im Bereich Brauwesen und Getränketechnologie – aber die Scientific Community ist für das Fach recht klein. Damit haben es die Wissenschaftler schwer, internationale Präsenz zu zeigen. Aber sie können sich mit einem trösten: dass ihre Arbeit uns allen unmittelbar zugute kommt.

Brigitte Röthlein



Bilder: TUM



Überexpression der Proteinkinase verursacht Seitenwurzelbildung (oben). In der Keimlingssprossachse des Wildtyps (unten) fehlt sie

Verteilung des Auxins im Wildtyp (links) und in der Proteinkinase-mutante (rechts), visualisiert mit Hilfe eines Reporterproteins

Wege des Wachstums

Forscher am Wissenschaftszentrum Weihenstephan entdecken ein Protein, das Wachstumsprozesse bei Pflanzen steuert

Hormone steuern nicht nur Entwicklungsprozesse und Stoffwechselfvorgänge bei Mensch und Tier, sondern auch bei Pflanzen. Am wichtigsten ist für sie das Auxin: Ohne dieses Phytohormon würden weder Wurzeln wachsen noch Blüten oder Blätter an der richtigen Stelle sitzen. Die Transportproteine, die Auxin von Zelle zu Zelle transportieren, sind seit längerem bekannt. Forscher der TUM haben jetzt ein zusätzliches Protein entdeckt, das an der Verteilung des Hormons beteiligt ist. Ohne diesen „Regler“ scheinen die Transportproteine nicht richtig zu funktionieren.

Pflanzen stehen beim Wachsen – im Gegensatz zu Mensch und Tier – vor einer besonderen Herausforderung: Sie müssen immer wieder neue Organe wie Wurzeln oder Blütenblätter an der richtigen Stelle bilden und auswachsen. Dass die Pflanze dabei ihr Leben lang einem perfekten und meistens vorhersagbaren Bauprinzip folgt, liegt am Phytohormon Auxin. Es wird von der Pflanze produziert und reichert sich in so genannten Gründerzellen an, aus denen Wurzeln, Blätter oder Blüten entstehen. Wie das Hormon zum Ziel kommt, weiß man bereits: Spezielle Export-Proteine transportieren das Auxin aus der Pflanzenzelle in den Zellzwischenraum und spezielle Import-Proteine tragen es aus dem Zellzwischenraum weiter in die Nachbarzelle – immer im Wechsel, bis zum Bestimmungsort.

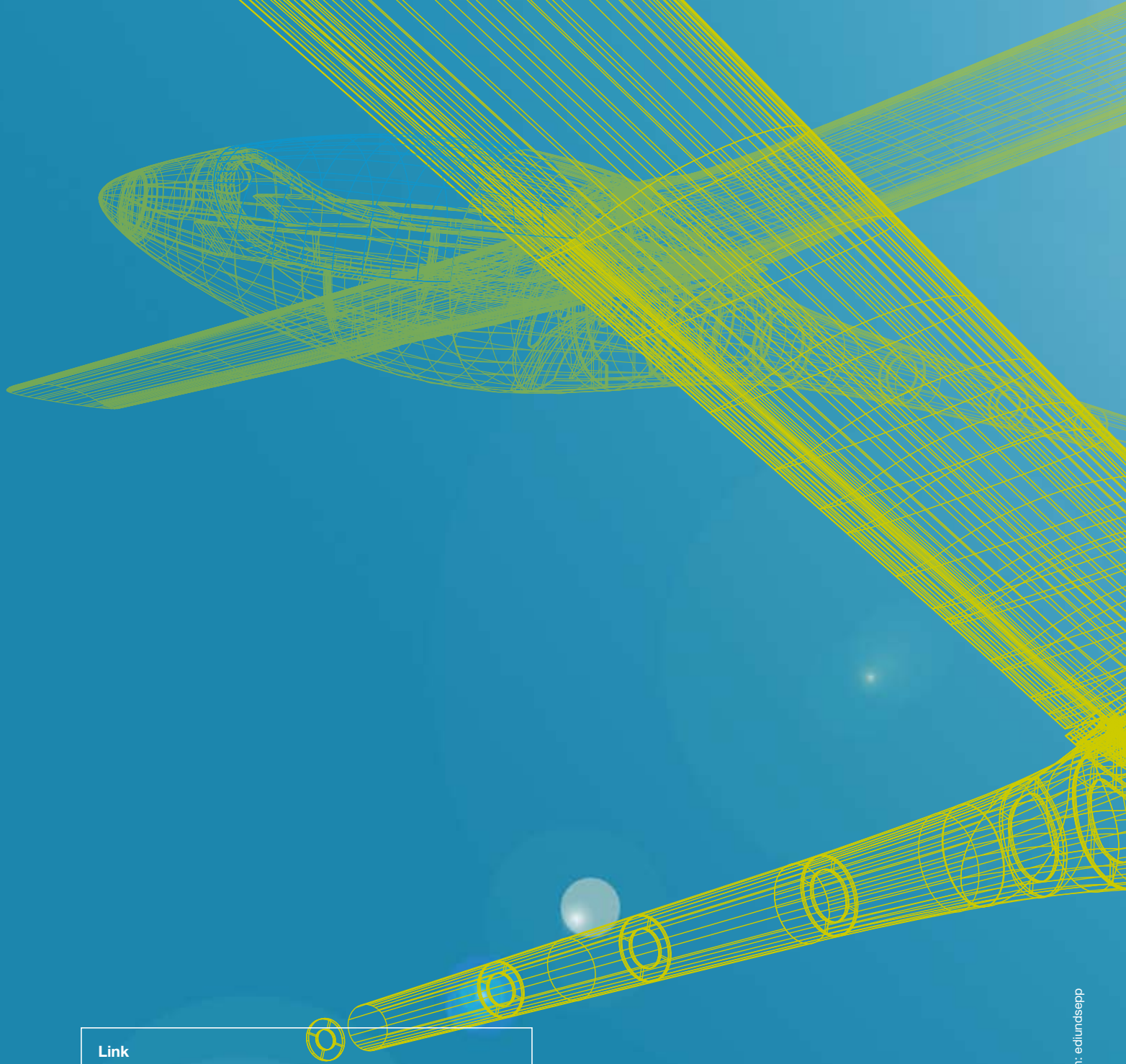
Ein Forscherteam um Prof. Claus Schwechheimer vom Lehrstuhl für Systembiologie der Pflanzen am Wissenschaftszentrum Weihenstephan der TUM hat jetzt ein weiteres am Auxintransport beteiligtes Protein entdeckt. Es fiel den Biologen auf, während sie an der Acker-schmalwand (*Arabidopsis thaliana*) eine Proteinkinase untersuchten. Prof. Schwechheimer erklärt: „Proteinki-

Link
www.wzw.tum.de/sysbiol

nasen regulieren quasi wie ein Kippschalter die Aktivität anderer Proteine, indem sie diese durch Anhängen eines Phosphatrests verändern. Uns fiel im konkreten Fall auf, dass die untersuchte Proteinkinase verblüffend ähnlich in der Pflanzenzelle verteilt war wie das bekannte Export-Protein für Auxin.“


Gleichzeitig konnten die Grundlagenforscher zeigen, dass Pflanzen, denen diese Proteinkinase fehlt, Probleme bei der Ausbildung von Wurzeln und Blüten haben. Umgekehrt wies das Team nach, dass Pflanzen, die zuviel Proteinkinase produzieren, Wurzeln an ungewöhnlichen Stellen ausbilden können. Die logische Schlussfolgerung aus diesen Beobachtungen und der Gleichverteilung beider Substanzen: Die neu entdeckte Proteinkinase kann das Export-Protein für Auxin verändern – und den Transportweg des Hormons somit kontrollieren.

In einem zweiten Schritt untersuchen die Forscher jetzt, an welchen Stellen genau die Proteinkinase das Export-Protein für Auxin verändert. Diese Frage ist relevant für die Praxis: Auxine finden als Wachstumsregulatoren vielfach Anwendung in Gartenbau und Landwirtschaft, zum Beispiel bei der Stecklingsbewurzelung. Claus Schwechheimer ist sich sicher: „Durch ein genaueres molekulares Verständnis des Auxintransports wird es in Zukunft möglich sein, die Auxine bei der Kontrolle des Pflanzenwachstums gezielter einzusetzen.“ □



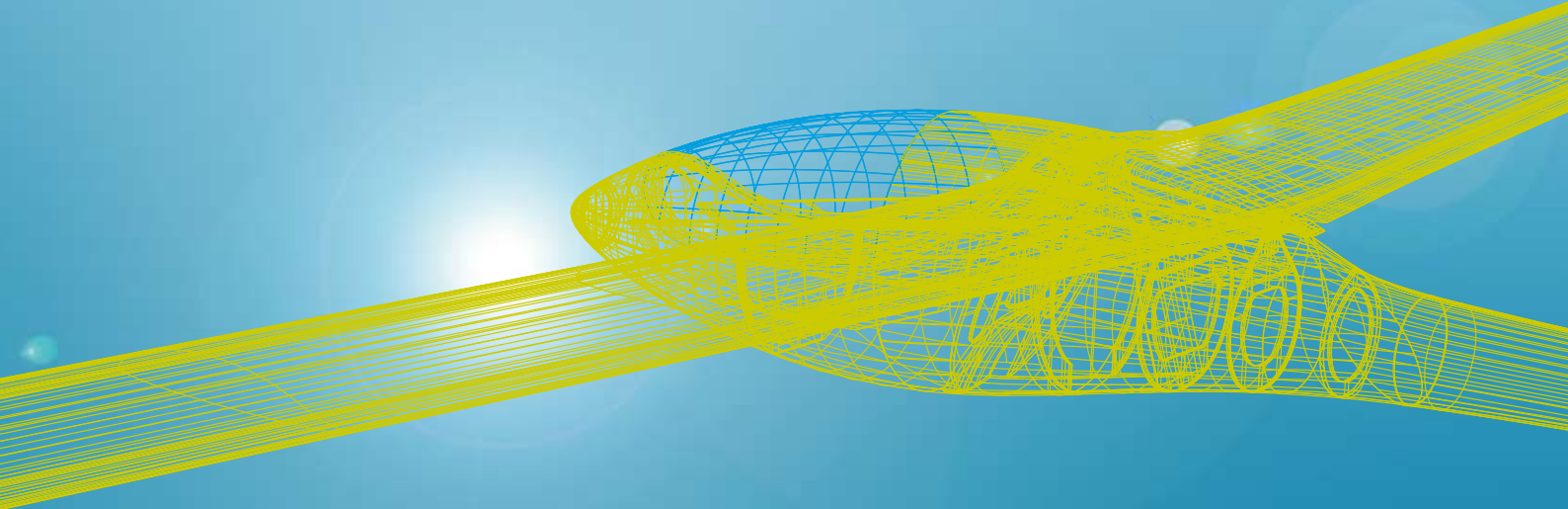
Link

www.akaflieg.vo.tu-muenchen.de

A wireframe illustration of an airplane, rendered in yellow and blue lines, set against a blue background with a sun-like glow. The airplane is shown from a low angle, flying upwards and to the right. The fuselage is blue, while the wings and tail are yellow. The background is a gradient of blue, with a bright sun-like glow in the upper center. The overall aesthetic is clean and technical.

Wenn Studenten in die Luft gehen

Sie tun es mit Begeisterung – und das seit 85 Jahren: Die Mitglieder der Akademischen Fliegergruppe der TUM starten nicht nur in die Lüfte: Sie konstruieren und bauen ihre Flugzeuge sogar mit eigenen Händen



Mit Simulationenmethoden auf dem neusten Stand der Technik haben die Mitglieder der Akademischen Fliegergruppe Akaflieg ihr neues Flugzeug – die Mü31 – am Rechner entwickelt

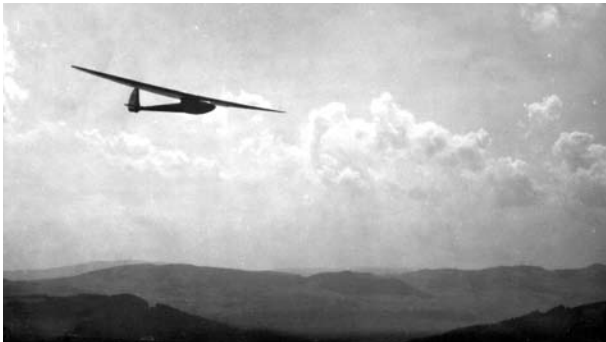
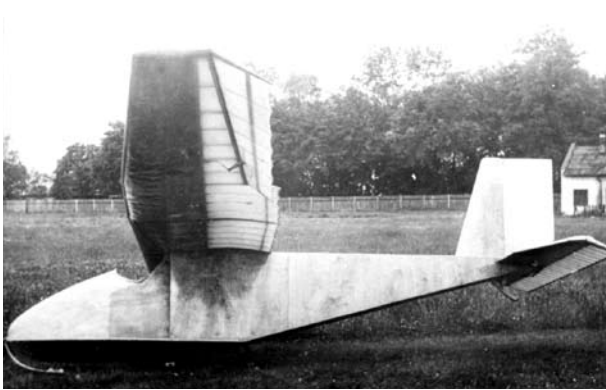
Das nüchterne Licht der Werkstatt beleuchtet den Rumpf, Ansätze von Tragflächen sind erkennbar. Die Flügelspitzen fehlen, genauso wie das Heck. Ein bisschen verloren sieht es aus - das Modell des neuesten Segelflugzeuges Mü31 der Akaflieg. Es steht unvollendet zwischen den Werkzeugen und Materialien in der Halle. Noch lässt sich nur ahnen, dass das Flugzeug eine Spannweite von 15 Metern haben wird. Daneben steht Paulina Sierak, Studentin der Ingenieurwissenschaften im dritten Semester. Sie ist seit ihrem ersten Tag an der Technischen Universität München Mitglied der Akaflieg.

„Es ist anders als bei den üblichen Segelflugvereinen, hier kann man selbst etwas schaffen, etwas verwirkli-

chen“, erklärt sie. Als sie über die glatt polierte Oberfläche des Modells streicht, leuchten ihre Augen. „Wir sind hier alle Segelflieger mit Leib und Seele. Und gerade deswegen ist es toll, selbst ein Flugzeug zu entwickeln und es mit den eigenen Händen zu bauen.“ Im Hintergrund geschäftiges Treiben. Es ist Winter, die Flugzeuge der Akaflieg wollen für die neue Flugsaison gewartet und auf Hochglanz poliert werden, fast so wie in einer Wartungshalle am Flughafen.

31 Studenten allen Studienrichtungen der TUM haben hier die Möglichkeit zu fliegen und einen Segelflugschein zu erwerben. Ehemalige Mitglieder unterstützen sie dabei finanziell. Der traditionsreiche Verein feiert in diesem Jahr sein 85-jähriges Jubiläum. Das Besondere an ▶

Zu den Anfängen der Akaflieg und des Segelflugs



Im Hörsaal 532 der Technischen Hochschule München – heute Technische Universität München – trafen sich am 8. Juli 1924 100 Studenten. Sie folgten dem Aufruf zweier Professoren – Sebastian Finsterwalder und Christian Prinz. So erblickte die „Akademische Fliegergruppe“ das Licht der Welt. Noch im selben Jahr wurde das erste Flugzeug, die Mü1 „Vogel Roch“ fertiggestellt. Die Münchner waren Pioniere, denn den Segelflug, wie er heute betrieben wird, gibt es erst seit 1919.



Otto Lilienthal veröffentlichte 1889 sein Werk „Der Vogelflug als Grundlage der Flugkunst“, welches heute als wichtigste technische Veröffentlichung des 19. Jahrhunderts gilt. Er schuf damit die Grundlage für den Segelflug, doch geriet dieser zunächst in Vergessenheit. Durch die schnell voranschreitende Entwicklung von Ottomotoren mit geringem Gewicht setzte sich zunächst der Motorflug durch. Als er nach dem ersten Weltkrieg im Versailler Vertrag verboten wurde, richteten Flugbegeisterte in ganz Deutschland ihre Aufmerksamkeit wieder auf den Segelflug. So versammelten sie sich ab 1919 auf der Wasserkuppe an der Rhön und tüftelten an immer neuen Konstruktionen. Die Wasserkuppe ist mit 950 m der höchste Berg im Naturpark Hessische Rhön und bietet ideale Bedingungen zum Start der Flugzeuge. Damals wurden sie mit einem Gummiseil regelrecht weggeschossen. Das ist nur am Hang möglich, da geringe Höhen erreicht werden und der Pilot auf günstige Aufwinde angewiesen ist.

Schon fünf Jahre nach der Gründung der Akaflieg war die studentische Gruppe auch auf der Wasserkuppe dabei und startete die Mü2 „Münchner Kindl“.

Zur gleichen Zeit stellte ihnen die damalige TH München in der Arcisstraße ein Geschäfts- und Konstruktionszimmer sowie eine Werkstatt zur Verfügung. Die Akaflieg etablierte sich und ist seitdem fester Bestandteil der TU München. Insgesamt wurden bis jetzt 30 Flugzeuge gebaut, die Nummer 31 ist bereits konstruiert. In der Flugwerft Oberschleißheim ist die Mü10 „Milan“, die 1934 gebaut wurde, ausgestellt. Ihr folgt die Mü27 zum 30jährigen Jubiläum ihres Erstfluges in die Hallen des Deutschen Museums.

Mit der Fakultät für Maschinenwesen zog der Verein vor einigen Jahren auf den TUM-Campus in Garching. Er bekam neue Räume und eine Werkstatt zur Verfügung gestellt.

Die Mü2 „Münchner Kindl“ war das erste Flugzeug der Akaflieg, das auf der Wasserkuppe startete. Sie gewann 1927 mehrere Preise (Bild oben)

Die Mü3 „Kakadu“ aus dem Jahr 1928 war das erste Hochleistungsflugzeug der Gruppe (zweites Bild)

Die Mü3 bei einem ihrer zahlreichen Flüge (drittes Bild)

Die Mü10 „Milan“ steht heute in der Flugwerft Oberschleißheim des Deutschen Museums (viertes Bild)

Bei der Mü22 kam 1954 zum ersten Mal in der Geschichte der Akaflieg ein Laminarprofil zum Einsatz (Bild unten)

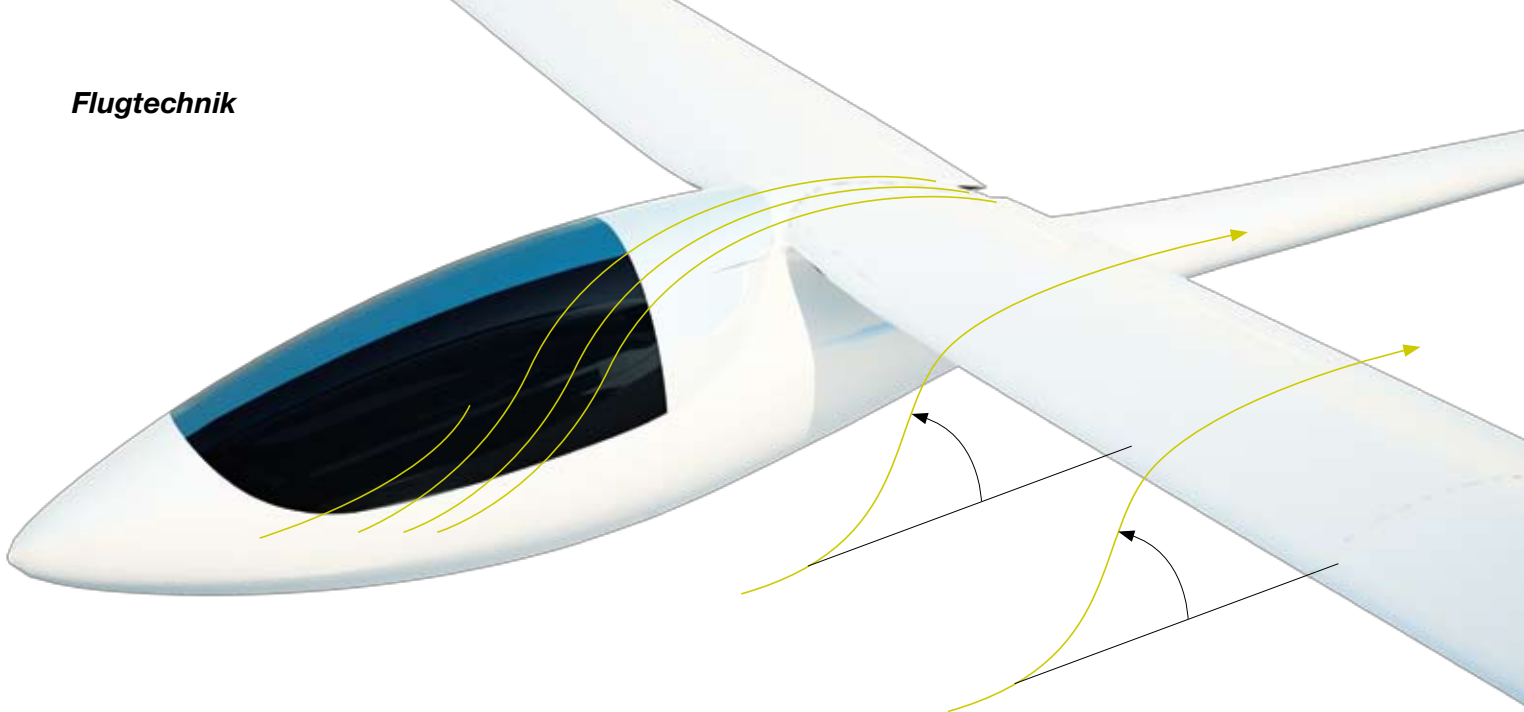


Bild: edlundsepp

Der zusätzliche Aufwind, der durch die neu entwickelte Form des Flugzeugrumpfes erzeugt wird, wirkt sich positiv auf die Auftriebsverteilung des Flügels aus. Der Auftrieb erreicht am Tragflächenansatz seine größten Werte, der induzierte Widerstand wird verringert

der Akaflieg ist, dass die Studenten nicht nur in die Luft gehen, sondern auch selbst entwickeln und bauen, ganz in Eigenregie – von der ersten Idee zu einem neuen Flugzeug bis zum letzten Pinselstrich.

Alles fing 1924 an, dem Gründungsjahr. Das erste selbstgebaute Flugzeug war die Mü1, „Vogel Roch“ genannt. Damals, als der Segelflug noch in den Kinderschuhen steckte, riefen die Professoren ihre Studenten auf, selbst Flugzeuge zu entwickeln und eine eigene Gruppe dafür zu gründen: Die Akademische Fliegergruppe, heute kurz Akaflieg. Seitdem werden an der TUM von Studenten Segelflugzeuge entwickelt. Diese Tradition wird mit dem mittlerweile 31. Modell fortgesetzt. Das Flugzeug trägt den passenden Namen Mü31. An ihm wird gerade getüftelt.

Feintuning für die Gleiteigenschaften

Die Segelflugzeuge, die heute auf dem Markt sind, entsprechen schon dem neuesten Stand der Technik: An ihren Profilen liegt die Strömung gut an und sie sind besonders leicht. Doch ein Student der Akaflieg wollte herausfinden, ob sie sich noch weiter verbessern lassen.

So wurde im Jahr 2000 das Projekt Mü31 geboren. Die Flugeigenschaften eines konventionellen Flugzeugs, der ASW27 der Firma Alexander Schleicher, wurden getestet. Die Studenten tüftelten lange an Möglichkeiten, es zu verbessern. Sie fanden schließlich in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Aerodynamik heraus, dass die Gleiteigenschaften noch ein Feintuning vertragen konnten.

Wie lässt sich ein Flugzeug optimieren?

Worauf es im Segelflug ankommt, sind Aerodynamik und Thermik. Thermik – das sind die Luftströmungen, die im Herbst die Blätter im Wind tanzen lassen. Die Segelflug-Piloten können sie ausnutzen. Der gewonnene Auftrieb ist abhängig davon, wie gut sie die Thermik kennen und auszunutzen wissen. Um den Auftrieb bei der Konstruktion des Flugzeuges zu beeinflussen, bleibt nur die Aerodynamik. Eine ihrer wichtigsten Kenngrößen ist die Gleitzahl. Sie gibt an, wie weit ein Flugzeug waagrecht gleitet, während es um einen Meter sinkt. Errechnet wird sie aus dem Verhältnis von Auftrieb zu Widerstand. Der Auftrieb entspricht dem Druck, der auf die Flügel wirkt. Durch geeignete Profilformen sinkt

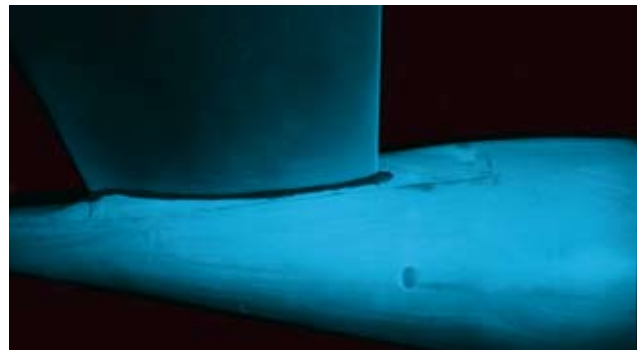


Bild: Akatflieg

Die Bereiche hohen Drucks erscheinen im Windkanalversuch hell, die Regionen niedrigen Drucks dunkel. Die feinen gelben Linien visualisieren den Verlauf der Strömung

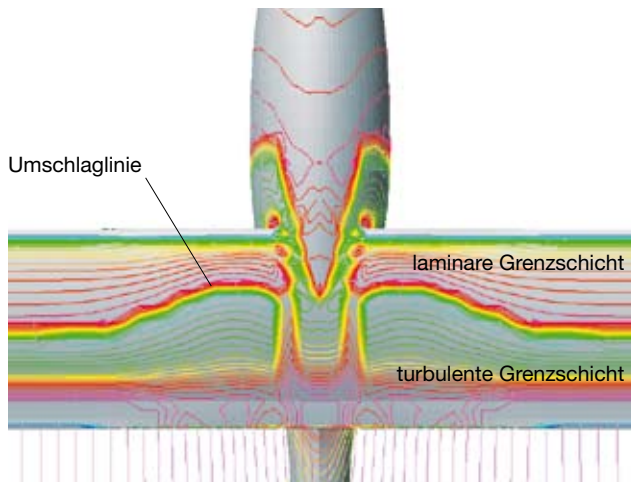
er auf der Oberseite und steigt auf der Unterseite: Der Flügel wird also von den unteren Luftmassen nach oben gedrückt. Vergleichen kann man das mit einem Stück Holz, das auf einem Fluss von der Strömung mitgetragen wird.

Treffen am Flügelende oder an Flügelkanten Gebiete mit hohem und niedrigem Druck aufeinander, kommt es zu einer Ausgleichströmung. Luft mit hohem Druck fließt zum Niederdruckgebiet und erzeugt einen Wirbel, der zu Energieverlust in der Strömung führt. Visualisiert hat er Ähnlichkeit mit den Wirbeln, die sich im aufsteigenden Zigarettenrauch bilden. Das Phänomen wird als induzierter Widerstand bezeichnet. Er ist bauteilabhängig, und kann bereits aufgrund kleinster Veränderungen stark schwanken – etwa bei einem Kratzer im Lack. Werden nun zwei oder mehr Bauteile zusammen betrachtet, ergibt sich eine Art Kombinationswiderstand, auch Interferenzwiderstand genannt. Das kommt daher, dass die Bauteile sich in der Anströmung gegenseitig ▶



Das Windkanalmodell der Mü31, wie es an der Delft University of Technology vermessen wurde

Fotos: Akatflieg



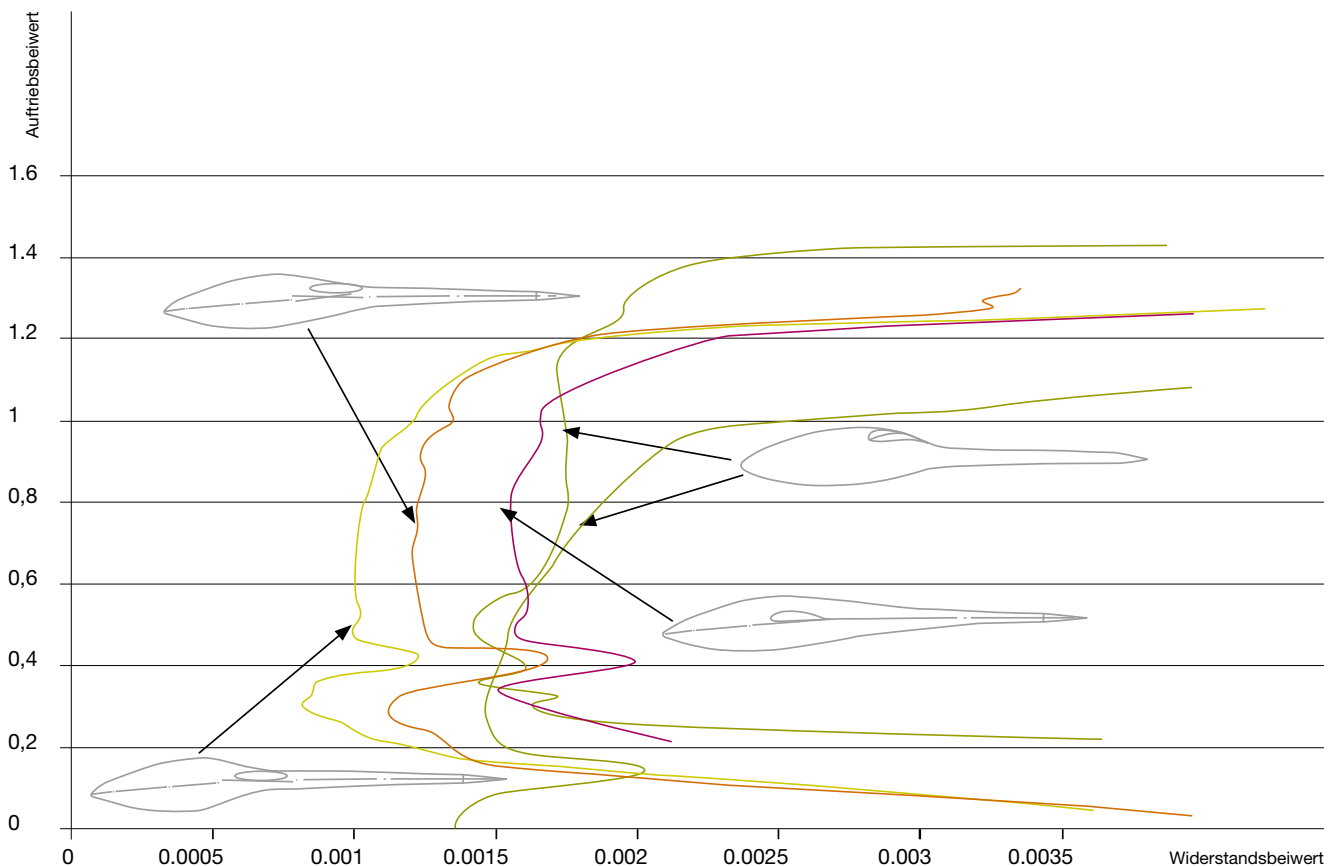
Die Strömung liegt – als laminare Grenzschicht – lange dicht am Flügel an. Erst wenn es zur Transition kommt, dem Umschlag zur turbulenten Grenzschicht, löst die Strömung ab, es entstehen Wirbel und der Widerstand erhöht sich

beeinflussen. Bei einem Flügel ohne Rumpf können sich Wirbel an der Flügelhinterkante und den Flügelenden bilden und in der Umgebungsluft ungestört weiterlaufen. Wird beides kombiniert, kann es zu Interaktionen zwischen den am Flügel entstandenen Wirbeln und der Strömung um den Rumpf kommen. Werden die umströmten Körper gemeinsam – inklusive aller Verbindungselemente – an die Strömung angepasst, können die Gleiteigenschaften verbessert werden.

Genau das setzten sich die Studenten der Akaflieg zum Ziel. Zunächst wurde ein Windkanalmodell der ASW 27 angefertigt, um die Drücke, die auf das Flugzeug wirken, zu untersuchen. Dazu kooperierte der Lehrstuhl für Aerodynamik der TU München mit der Aerodynamics Division der Technischen Universität Delft. Auf diesem Weg entstanden zwei Modelle, bei denen die Aerodynamik Schritt für Schritt verbessert werden konnte. Der Flügel wurde nach oben versetzt, aus einem Mittelde-

Grafik: Akaflieg

Bei einem Polardiagramm werden die auf den Körper wirkenden experimentell gemessenen Kraftkoeffizienten – die sogenannten Beiwerte – für verschiedene Anstellwinkel graphisch dargestellt. Dies ist eine Möglichkeit, verschiedenen Flugzeugkonfigurationen miteinander zu vergleichen, wie beispielsweise einen Hochdecker (Dunkelgrün) mit einem Mitteldecker (Violett)



Grafik: ecludensepp nach Akaflieg

cker wurde ein Hochdecker, von den vier Verschneidungen zwischen Flügel und Rumpf blieben zwei übrig. Dadurch ergab sich eine durchgängige Flügeloberseite. Diese beiden Faktoren führten zu weniger Verwirbelungen und zu einem geringeren Widerstand. Zuletzt wurde das Flügelprofil verändert, was eine Verbesserung des Auftriebs zur Folge hatte.

Vom Modell zum fertigen Flugzeug

Und noch ein Coup gelang den Akafliegern: Sie konstruierten den Übergang zwischen Flügel und Rumpf in Form eines Pylons. Das ist eine scharfe Kante, die die Wirbel, die am Ende der Tragflügel entstehen, vom Flugzeug weggleitet, um eine weitere Interaktion mit der umgebenden Strömung zu verhindern. Die Form des Rumpfes wurde ebenfalls geändert. Er beult sich nun kurz vor dem Flügel etwas ein, und setzt dies noch unter dem Flügel fort. So wird der Interferenzwiderstand der Gesamtkonstruktion verringert. Damit erreichten die

Akaflieger ein stimmiges Gesamtkonzept. Am Rechner ist das Flugzeug schon fertig konstruiert. Was jetzt noch fehlt ist die Innenausstattung. Um diese herzustellen und die Elektronik zu testen, wurde im letzten Sommer das Modell gebaut. Dazu haben die Studenten der Akaflieg in penibler Handarbeit Formen mit Glasfaser ausgelegt und mit Harz laminiert. Das Ziel der Mühe ist klar: „Im Endeffekt wollen wir eine deutliche Verbesserung der Gleitzahl erreichen,“ sagt Paulina Sierak. Und deshalb ist die Akaflieg auch bei den Materialien ganz auf der Höhe der Zeit: Für den Bau des Flugzeugs verwenden sie Kohlefaser. So wird es besonders leicht.

Bis es zum ersten Test kommt und das Flugzeug seinen Erstflug bestreiten wird, vergeht allerdings noch Zeit. „Ich hoffe, den Erstflug noch als Studentin miterleben zu dürfen“, so Sierak. „Wir sind ja alle Studenten und müssen uns auch auf unser Studium konzentrieren“, sagt sie – und lacht.

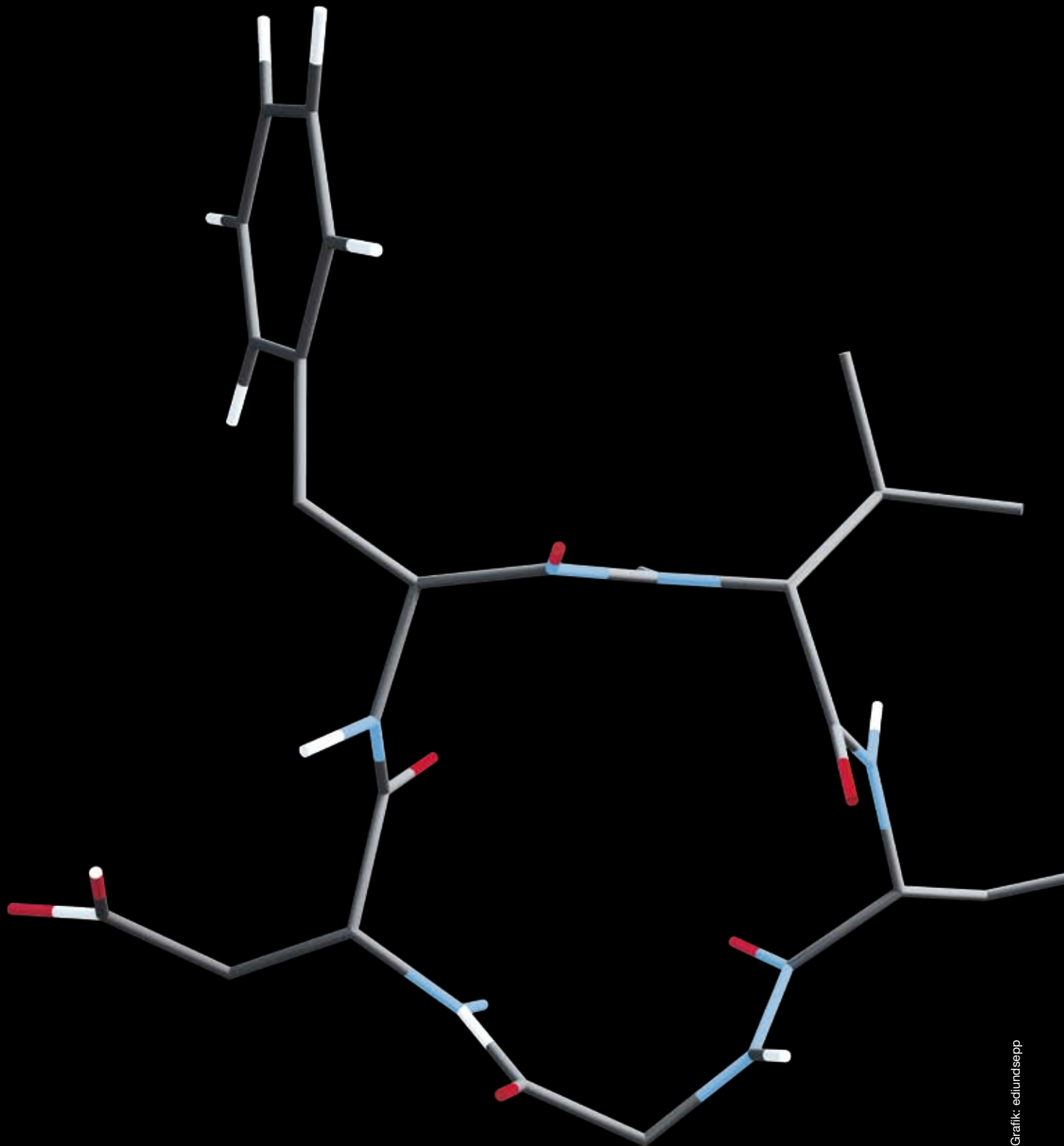
Helen Sedlmeier

Um den Interferenzwiderstand am Übergang Flügel-Rumpf des Modells der Mü31 möglichst gut messen zu können, ist es an den Flügelenden eingespannt. Die normalerweise dort entstehenden Wirbel können vernachlässigt werden



Link

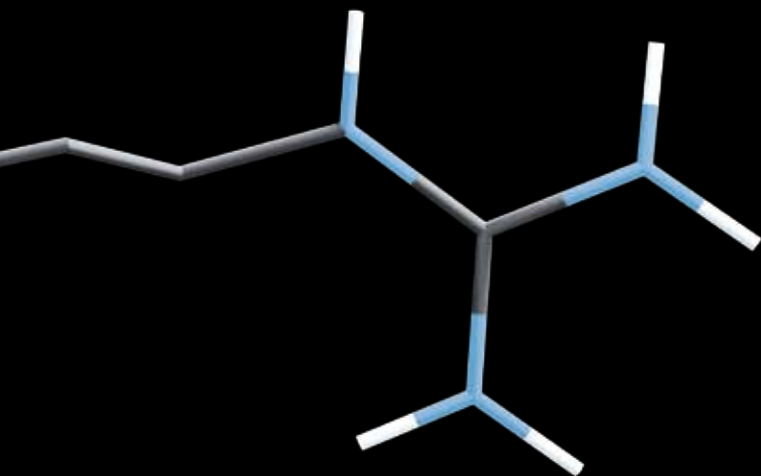
www.org.chemie.tu-muenchen.de



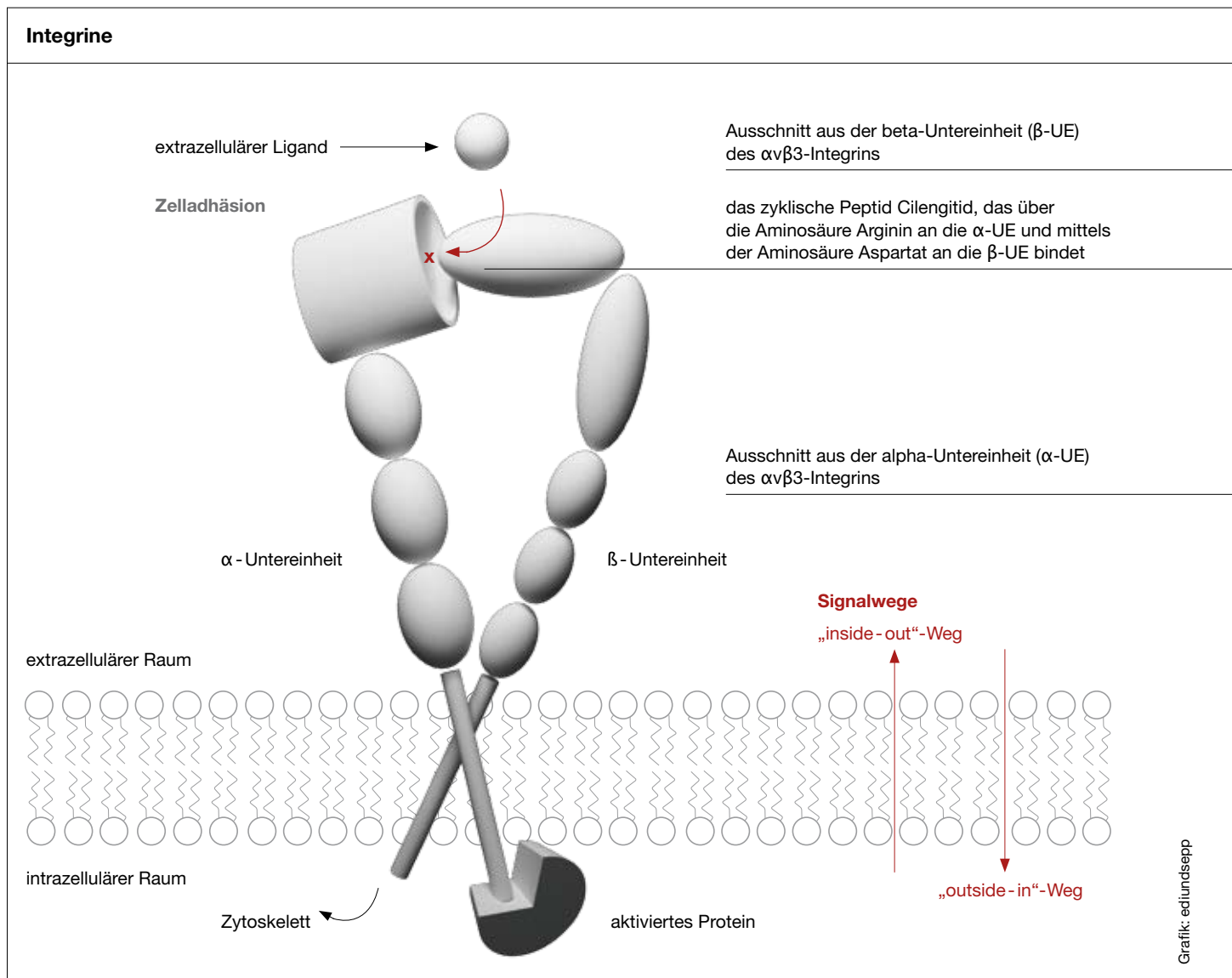
Grafik: eciundsepp

Peptid-Puzzle

Aufs Äußerste reduziert, lässt sich die Arbeit von Professor Horst Kessler mit zweimal drei Buchstaben beschreiben. RGD und NMR sind die Basis für sein „konformationsbasiertes Design“ von Proteinen und Peptiden. Eines der Ergebnisse: ein in wenigen Jahren marktreifes Medikament gegen Krebs



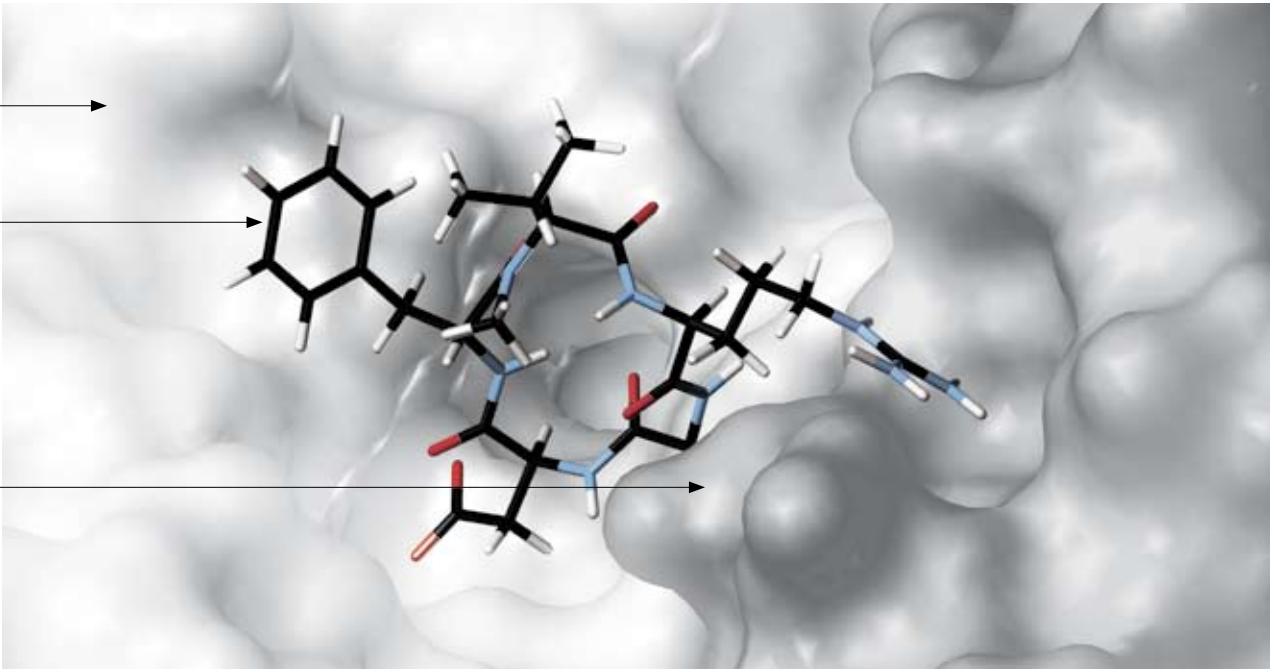
Wer sich als Wissenschaftler der Grundlagenforschung verschrieben hat, erntet selten praktische Früchte seiner Arbeit. In der Medizin vergehen zwischen der ersten Veröffentlichung über eine potenziell wirksame Substanz und der ersten großen klinischen Studie rund 24 Jahre, haben griechische Wissenschaftler kürzlich ermittelt. Auf dem weiten Weg vom Forschungslabor bis in die Apotheke gerät oft in Vergessenheit, wo und bei wem die Erfolgsgeschichte ihren Anfang nahm. So ist es auch bei Cilengitid, einem Krebspräparat, das etwa 2012 seine Zulassung erhalten dürfte. Eine Sequenz aus drei Aminosäuren, unter Chemikern als RGD bekannt, verleiht ihm seine Wirksamkeit. Diese Sequenz und ebenso Cilengitid tauchen in einer großen Zahl wissenschaftlicher Publikationen und auch im Internetlexikon Wikipedia auf. Den Namen ihres „Vaters“ sucht man darin aber meist vergeblich: den Namen Horst Kessler. ▷



Horst Kessler, seit 20 Jahren Ordinarius für Organische Chemie an der TU München, gehört zu den Wissenschaftlern, die ihre Grundlagenforschung erfolgreich mit der Umsetzung in die Praxis verknüpfen können, wenn auch der wirtschaftliche Erfolg („Trotz meiner Beteiligung an 35 Patenten habe ich da noch kein Geld gesehen.“) wegen der sehr langwierigen Prozedur der Medikamentenentwicklung sehr bescheiden ist. Doch vielleicht ändert sich das ja noch. Denn in den nächsten drei Jahren kann sich der 68-Jährige ohne die Lehrverpflichtungen eines Hochschullehrers ganz der Forschung hingeben: Mit einer Carl-von-Linde-Professur bleibt der „Emeritus of Excellence“ an der TUM, genau gesagt am Institute for Advanced Study (IAS). Einige Mitarbeiter, der Zugriff auf alle notwendigen technischen Ressourcen und zusätzlich eingeworbene Drittmittel erlauben ihm, sich weiterhin mit Molekülen zu beschäfti-

gen, die die RGD-Sequenz enthalten. Wichtigstes Werkzeug dabei ist die NMR-Spektroskopie (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, Kernspinresonanzspektroskopie). Ihre Anwendung vor allem zur Aufklärung von Molekülstrukturen ist ebenfalls eng mit dem Namen Kessler verknüpft. Kessler, 1971 mit 31 Jahren als jüngster Chemieprofessor in Deutschland an die Johann Wolfgang Goethe-Universität in Frankfurt berufen, gilt als Pionier auf dem Gebiet der Strukturaufklärung chemischer Verbindungen mittels NMR. Mit dieser analytischen Methode befasst er sich seit Beginn seiner wissenschaftlichen Laufbahn. 2001 baute er in Garching das Bayerische Zentrum für Kernspinresonanzspektroskopie auf.

Er war einer der Ersten, die diese Methode systematisch zum Nachweis innermolekularer Beweglichkeiten anwendete. Moleküle sind keine starren Gebilde, sondern



Integrine sind aus zwei Untereinheiten zusammengesetzte Moleküle, die in allen tierischen Zellen vorkommen – mit Ausnahme der roten Blutkörperchen. Bei Säugetieren sind 24 Kombinationen aus je einer von 18 α -Untereinheiten und einer von 8 β -Untereinheiten bekannt. Als in der Zellmembran verankerte „Transmembranproteine“ verbinden sie das Innere der Zellen, das Zytoskelett, mit Nachbarzellen und mit der extrazellulären Matrix - das sind Stützsubstanzen, an denen sich die Zellen anheften. Integrine ermöglichen die Vermittlung von Signalen in die Zelle hinein und insbesondere auch aus ihr heraus.

Am extrazellulären Teil der Integrine sitzen Bindungsstellen, an denen zum Beispiel das RGD-Merkmal (Sequenz aus den drei

Aminosäuren Arginin-Glycin-Asparaginsäure) ankoppeln kann. Diese Sequenz findet sich etwa in extrazellulären Matrixproteinen wie Fibrinogen, Vitronektin und Fibronektin, die bei Blutgerinnung und Wundheilung eine Rolle spielen. Auch an vielen weiteren – positiven wie negativen – Prozessen sind Integrine maßgeblich beteiligt. So sorgen sie im Embryo für ein reguliertes Zellwachstum, erlauben aber auch das Anheften wandernder, von einem Primärtumor abgespaltener Krebszellen an Matrixproteinen. Und auch bei Thrombose und Osteoporose mischen Integrine mit. Diese Vielseitigkeit macht sie zu einem interessanten Ansatzpunkt für die pharmazeutische Forschung: Gezielte Eingriffe an der Bindung zwischen Integrin und ankoppelnden Liganden lassen viel versprechende neue Medikamente erwarten.

Bild: TUM

ändern ihre Gestalt fortwährend durch thermische Bewegungen von Atomen oder Atomgruppen. Diese Bewegungen erfolgen unterschiedlich schnell – je höher die Energiebarriere zwischen zwei oder mehreren Molekülgestalten ist, desto länger dauert die Umwandlung. Erst die NMR-Spektroskopie ermöglichte es, solche Barrieren zu bestimmen.

Kessler wendete die Methode unter anderem auf Peptidbindungen an. Diese Bindungen existieren in zwei Formen, die sich in der räumlichen Anordnung der Atome unterscheiden: trans- und cis-Form. Da Peptide und Proteine solche Bindungen enthalten, hängt ihre Raumstruktur auch von deren cis-trans-Status ab. Kessler war noch Doktorand, als es ihm gelang, die Umwandlung der einen in die andere Form über eine Energiebarriere hinweg experimentell nachzuweisen. ▷



Foto: Stephan Vavra

„Gleich nach der Promotion habe ich über die Anwendung der Methode der hochauflösenden NMR-Spektroskopie zur Bestimmung der innermolekularen Beweglichkeiten ein Highlight-Paper geschrieben“, erinnert er sich. „Damit bin ich bekannt geworden.“ Zu den herausragendsten Ergebnissen seiner Arbeit zählt die Aufklärung der Raumstruktur des Immunsuppressivums Cyclosporin A im Jahr 1985.

Wirkstoffe gezielt entwickeln

Die Raumstruktur ist ein überaus wichtiger Faktor, bestimmt sie doch auch die Eigenschaften der Moleküle, etwa in Hinsicht auf die biologische Aktivität. Diesen so einflussreichen Parameter mittels NMR-Spektroskopie aufzuklären, zu verändern und damit für die Entwicklung von Wirkstoffen zu optimieren – das zieht sich wie ein roter Faden durch Kesslers wissenschaftliches Lebenswerk. Sein „konformationsbasiertes Design“ von Proteinen und Peptiden berücksichtigt nicht nur die räumliche Lage der einzelnen Aminosäuren, sondern die Gestalt der ganzen Moleküle. Auf diese Weise lassen sich Wirkstoffe rational und gezielt entwickeln.

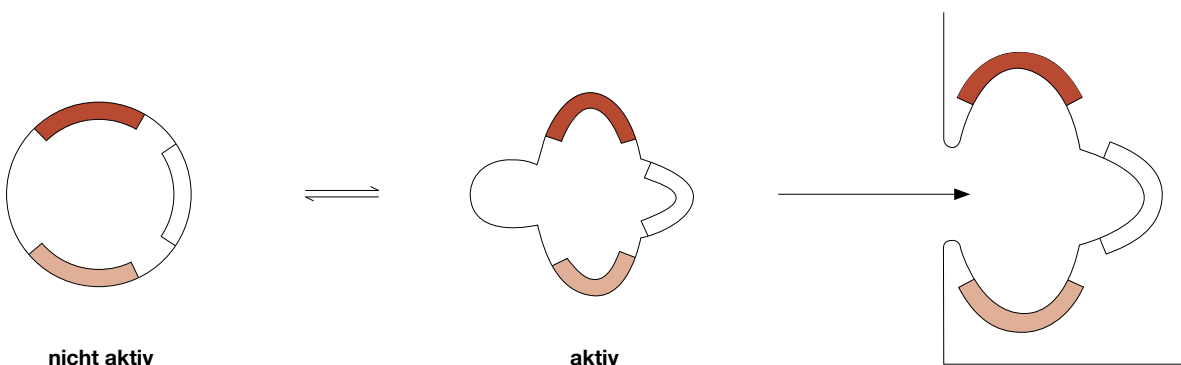
Nachdem Kessler 1989 den Lehrstuhl an der TU München übernommen hatte, wurde die RGD-Sequenz Schwerpunkt seiner Arbeit. RGD ist der Einbuchstaben-code für die Aminosäuren Arginin (R), Glycin (G) und Asparaginsäure (D). In dieser Reihenfolge kommen die drei Aminosäuren besonders in Proteinen der extrazellulären Matrix vor, etwa im Bindegewebe. RGD ist überall da wichtig, wo es um die Vernetzung von Zellen und um ihre Ansiedlung und Anheftung geht. RGD-tragende Moleküle wie Fibrinogen und Fibronectin spielen bei-

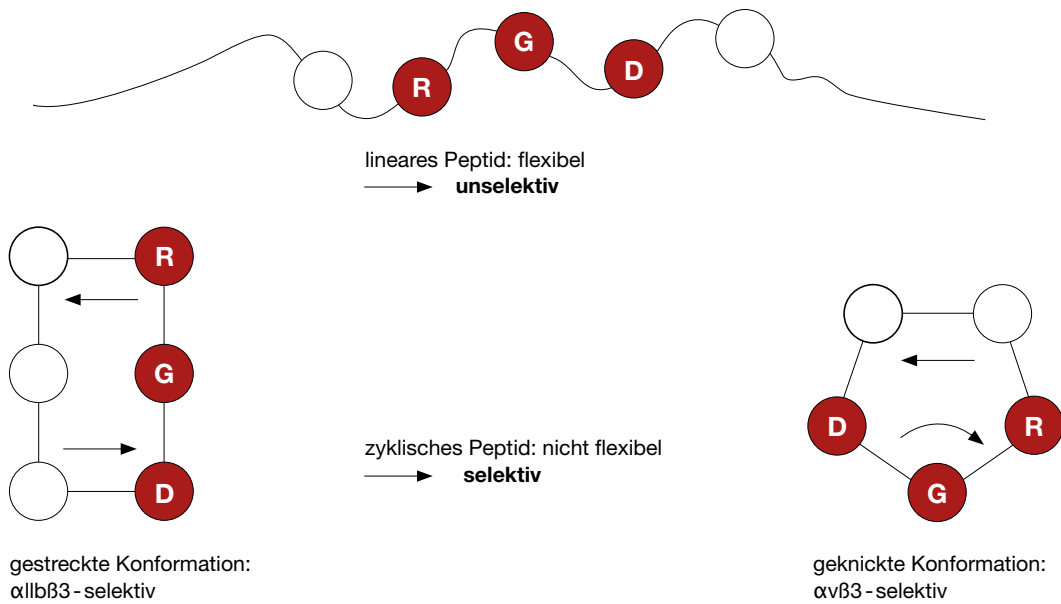
spielsweise bei der Wundheilung eine Rolle. Sie heften sich an bestimmte Rezeptoren in der Zellmembran an, die Integrine (s. Kasten S.24/25). Konkreter Anker ist oft die Sequenz RGD. Sie fungiert als „Ligandenschlüssel“, der in das „Rezeptorschloss“ der Integrine passt. „Das Schlüssel-Schloss-Prinzip ist die Basis biologischer Wirkungen“, erklärt Kessler. „Will man für medizinische Zwecke in eine solche molekulare Erkennung eingreifen, muss man Struktur und Dynamik der Einzelmoleküle und des aus ihnen gebildeten Komplexes kennen. Das ist das wichtige Einsatzgebiet der hochauflösenden NMR-Spektroskopie.“

Anders als beim starren Schlüssel-Schloss-System sind biologische Moleküle allerdings flexibel. Wenn sie nicht auf Anhieb zueinander passen, verformen sie sich entsprechend und gehen dennoch eine Bindung ein. Diese physiologisch sinnvolle Eigenschaft, die es einem Molekül erlaubt, an verschiedene Rezeptoren (unterschiedlich stark) zu binden, ist unter pharmakologischen Gesichtspunkten unerwünscht sollen Wirkstoffe doch möglichst nur an jeweils einen für eine Krankheit ausschlaggebenden Rezeptor binden. Um RGD-Moleküle mit hoher Rezeptorspezifität für die zahlreichen und nur leicht unterschiedlichen Integrine herzustellen, wählten die Wissenschaftler relativ kurze Ketten aus Aminosäuren, die andererseits lang genug sein mussten, um noch Manipulationsmöglichkeiten zu bieten. Diese Ketten schlossen sie dann zum Ring, weil zyklische Peptide viel weniger ihre Gestalt ändern können. Die Ringe sollten möglichst klein sein und bestanden aus fünf oder sechs Aminosäuren (drei davon RGD). Vor allem auf Ringe aus Pentapeptiden fokussierte sich das Interesse.

Flexible Moleküle in Lösung:

Die Gestalt von Biomolekülen in Lösung ist nicht starr. Hierdurch entsteht ein dynamisches Gleichgewicht verschiedener Raumstrukturen. Nur solche Konformationen, die exakt in die Bindungstasche eines Rezeptor passen, weisen eine hohe Affinität zu diesem auf. Mit Hilfe des strukturbasierten Designs versuchen die TUM-Wissenschaftler, aktive Konformationen zu stabilisieren („einzufrieren“)





Selektivität peptidischer Integrin - Antagonisten:

Damit hatten die Wissenschaftler Super-Aktivität und -Selektivität gewonnen. Dieser bereits 1990 gefundene Peptidring aus fünf Aminosäuren erwies sich als besonderer Glücksgriff: Er bildet heute den Kern des Medikaments Cilengitid (in der Abbildung rechts)

Die große Frage war: Wie findet man die richtigen Peptidringe? Das Herzstück der Ringe stand fest: RGD. Die übrigen beiden Positionen wurden mit verschiedenen Aminosäuren besetzt. Prinzipiell können Aminosäuren in zwei Konfigurationen vorliegen: in der natürlichen L-Form und der spiegelbildlichen D-Form. Die Chemiker ersetzten nun die L-Aminosäuren der Peptidringe – immer nur eine – durch die D-Variante und untersuchten die dreidimensionale Struktur der so neu entstandenen Peptide NMR-spektroskopisch. Da die D-Variante in dem Molekürling nicht jede beliebige Position einnehmen kann, zwingt ihr Einfügen die RGD-Sequenz in eine bestimmte räumliche Form. So entstand eine Reihe von RGD-Peptiden aus den gleichen Aminosäuren, aber mit unterschiedlicher Raumstruktur. In den biologischen Tests war ein einziges zyklisches RGD-Peptid gegenüber einem Integrin, dem Integrin $\alpha v \beta 3$, tausendfach stärker aktiv als das lineare Peptid. Dieser Peptidring ist zudem auch selektiv: Auf ein auf Blutplättchen vorkommendes Integrin wirkt er nicht aktivierend. Damit hatten die Wissenschaftler Super-Aktivität und -Selektivität gewonnen.

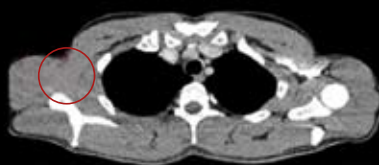
Basis für ein Tumormedikament

Dieser bereits 1990 gefundene Peptidring aus fünf Aminosäuren erwies sich als besonderer Glücksgriff. Er bildet heute den Kern des Medikaments Cilengitid (in der Abbildung oben rechts). Später entwickelten die TUM-Forscher gemeinsam mit dem Unternehmen Merck

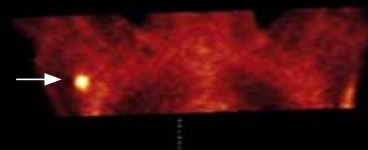
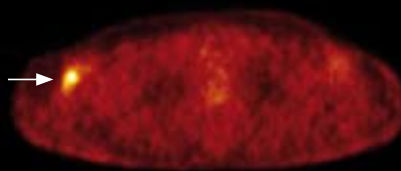
Deutschland dieses Zylopeptid weiter, und 1995 entstand daraus das Medikament Cilengitid. Heute durchläuft Cilengitid die Phase III der Zulassung als Mittel gegen Glioblastome, besonders bösartige Hirntumoren; gegen Prostatakarzinome befindet es sich in Phase II. Cilengitid hemmt die beiden Integrine $\alpha v \beta 3$ und $\alpha v \beta 5$, mit deren Hilfe sich maligne Tumorzellen festsetzen. Zudem senden Tumorzellen Wachstumsfaktoren aus, die benachbarte Endothelzellen – sie kleiden Blutgefäße wie eine Tapete aus – dazu anregen, auf ihrer Oberfläche Integrine zu exprimieren, sich dann in Richtung Tumor zu bewegen und neue Blutgefäße auszubilden, die den wachsenden Tumor ernähren. Blockiert man die Integrine, sterben die Endothelzellen ab und es entstehen keine neuen Gefäße – die Tumorzellen „verhungern“. Krebszellen, die das entsprechende Integrin auf ihrer Oberfläche tragen, reagieren auch direkt auf das Medikament und gehen zugrunde.

Etwa zehn Jahre später konnten Wissenschaftler der Harvard-Universität in Cambridge, USA, die Struktur des Integrins $\alpha v \beta 3$ mit gebundenem Cilengitid bestimmen. Diese eine bekannte Struktur verwenden Kessler und seine Mitstreiter heute, um auf dieser Basis neue, verbesserte Moleküle für dieses Integrin, aber auch für verschiedene andere, verwandte Integrine zu entwickeln. Die im NMR ermittelte Struktur neuer Moleküle versuchen sie in das bekannte Integrin „hinein zu modellieren“. Dabei sehen sie genau, ob der neue ▶

Computer - Tomographie
(CT)



Positronen - Emissions - Tomografie
(PET)



CT/PET
Kombination



Bild: TUM

Einsatz von radiomarkierten Galacto - RGD - Peptiden zur Bildgebung von Lymphknotenmetastasen

„Schlüssel“ passt oder wie er verändert werden muss. So entstehen schrittweise maßgefertigte Moleküle, die nur ganz bestimmte gewünschte Integrin-Rezeptoren erkennen und nur an diese binden.

In der Folgezeit begann Kessler erfolgreich mit der Entwicklung strukturell abgewandelter zyklischer RGD-Peptide für bildgebende Verfahren. Über ein in den Peptidring eingebautes radioaktives Atom werden die Tumorzellen radioaktiv markiert und können durch Positronen-Emissions-Tomografie sichtbar gemacht werden. Auch lässt sich damit vor einer Behandlung feststellen, ob der Patient überhaupt die für die Therapie mit Cilengitid nötigen Rezeptoren besitzt, ob also die Gabe des Medikaments sinnvoll ist. Da die RGD-Peptide grundsätzlich in die Blutbahn injiziert werden und bei Glioblastompatienten die Blut-Hirn-Schranke nicht mehr intakt ist, gelangen die Substanzen auch ins Gehirn, so dass sich auch Hirntumoren darstellen lassen. Entscheidend für die Bildgebung war es, den Kontrast zwischen Tumorgewebe und gesundem Gewebe zu erhöhen. Das erreichten die Wissenschaftler mit den von ihnen erstmals entwickelten „Zucker-Aminosäuren“: Die Moleküle enthalten einen Zuckerrest, der wie eine Aminosäure behandelt werden kann. Das so hergestellte Galacto-RGD ist leicht zu handhaben und bindet sehr spezifisch an Tumorzellen. Mediziner um Prof. Markus Schwaiger, Ordinarius für Nuklearmedizin der TUM, ha-

ben damit schon bei mehreren hundert Patienten Metastasen lokalisiert.

Unter einem ganz anderen Aspekt lässt sich die „verbindliche“ Eigenart der Pentapeptide in der Chirurgie nutzen: Implantate werden mit geeigneten RGD-Ringen beschichtet, die zwischen dem anorganischen Material des Implantats und dem Körpergewebe vermitteln. Dass die Sache funktioniert, bewies zunächst das Verhalten Knochenbildender Zellen auf Plexiglas: Normalerweise siedeln sich die Zellen auf diesem Material nicht an; ist das Plexiglas aber mit RGD-Peptid beschichtet, bilden sie einen dichten Zellrasen.

Davon könnte die Herzchirurgie profitieren. Die hier häufig verwendeten Stents – kleine röhrenförmige Metallnetze, die geschädigte Blutgefäße offen halten – werden heute zumeist mit einer zytotoxischen Substanz ummantelt. Sie verhindert, dass sich Muskelzellen festsetzen und den Stent verstopfen. Bei RGD-Beschichtung kann man auf solche nicht eben schonenden Substanzen verzichten: Die Peptidringe lassen um die kleinen Netze einen fugenlosen Teppich aus Endothelzellen wachsen. Hier macht man sich also die Fähigkeit der RGD-Sequenz zunutze, Einfluss zu nehmen auf Endothelzellen. Das Verfahren wird derzeit für die Anwendung erprobt und hat Horst Kessler ein weiteres Patent beschert. Es wird wahrscheinlich nicht sein letztes sein.

Sibylle Kettembeil

Schnelles Heizen macht Gold härter

TUM-Physiker Ralph Ernstorfer erhitzt Gold mit einem sehr kurzen Laserpuls und weist nach, was Theoretiker bereits vermuteten: Das Gold wird dabei härter statt weicher

Link

www.e11.physik.tu-muenchen.de

Schmiede nutzen die Kraft des Feuers jeden Tag: Erst in glühendem Zustand sind Metalle so weich, dass man sie schmieden kann. Doch wenn man Goldatome mit einem extrem kurzen Laserpuls bestrahlt, geschieht das genaue Gegenteil, das Gold wird härter. Diesen Effekt entdeckte Dr. Ralph Ernstorfer, wissenschaftlicher Mitarbeiter des Physik Departments der TUM, während seines Forschungsaufenthalts im Institute for Optical Sciences der Universität von Toronto.

Der UV-Laser erhitzte das Gold mit einer Rate von etwa eine Milliarde Grad pro Sekunde. Bei dieser Heizgeschwindigkeit nehmen nur die Elektronen die Hitze auf, können die aufgenommene Energie anfangs aber nicht an die Atomkerne abgeben. Die heißen Elektronen haben nun eine andere räumliche Verteilung zwischen den Goldatomen als im kalten Zustand. Dadurch werden die Bindungen der Atome im Gitter stärker und das Gold wird durch die Wärmezufuhr nicht weicher, sondern härter. Theoretiker hatten diesen Effekt bereits vorhergesagt, Ernstorfer konnte ihn erstmals experimentell bestätigen.

„Die Technik nennt sich Femtosekunden-Elektronenbeugung und dient als eine Art Kamera zur Aufnahme von Bildern auf atomarer Ebene. Die Bewegung der Gold-Ionen können wir in Echtzeit während der Aufheizung beobachten“, erläutert Ernstorfer das Verfahren. Die Stabilität des Goldgitters ergibt sich dabei aus der Geschwindigkeit der Aufheizphase und dem – aufgrund der heißen Elektronen – erhöhten Schmelzpunkt des Goldes.

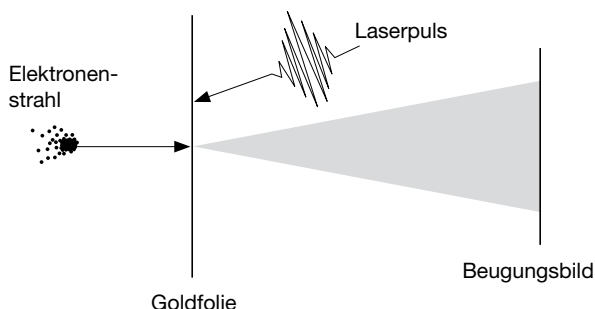
„Warme, dichte Materie“ nennen die Physiker Materie, die so dicht wie ein Festkörper und so heiß wie ein Plasma ist. Dieser Zustand tritt dauerhaft nur im Inneren von

Sternen auf. Auf der Erde ist dieser Zustand extrem kurzlebig, entsteht nur bei der Wechselwirkung zwischen starken Laserpulsen und fester Materie. Nun ist es erstmals gelungen, die Bewegung von Atomen bei der Verwandlung eines Kristalls in ein Plasma direkt zu beobachten.

Wieder zurück in Deutschland arbeitet Ralph Ernstorfer inzwischen mit noch kürzeren Laserpulsen. Mit Attosekunden-Laserpulsen – eine Attosekunde ist eine Trillionstel Sekunde, eine Zahl mit 17 Nullen zwischen dem Komma und der Eins – untersucht der TUM-Physiker am Max-Planck-Institut für Quantenoptik die Bewegung von Elektronen. □

Elektronenbeugung bei gleichzeitiger Erhitzung mit Laserpulsen

Kurzzeitig trifft ein Elektronenstrahl von hinten auf die dünne Goldfolie. Der Elektronenstrahl wird dabei durch die Kristallstruktur gebeugt. Durch Variation der Ankunftszeiten des Laser und des Elektronenpulses können zu einem Film zusammensetzbare Einzelbilder mit Belichtungszeiten von wenigen Billiardstel Sekunden hergestellt werden.



Die Macht des Wassers

Ein Stausee in der Halle? Kein Problem für die Forscher der TUM. Mit ihren Untersuchungen helfen sie Stauwehre sicher zu machen, Naturflüsse zu bändigen – und vielleicht sogar ein wenig Frieden zu stiften

Link
www.wb.bv.tum.de



Foto: istockphoto

Wasserknappheit ist in weiten Teilen der Welt eines der größten Probleme. Forscher der TUM arbeiten eng mit Kollegen aus der MENA-Region (Middle East and North Africa) zusammen, um die knappen Wasservorräte dort bestmöglich auszunutzen

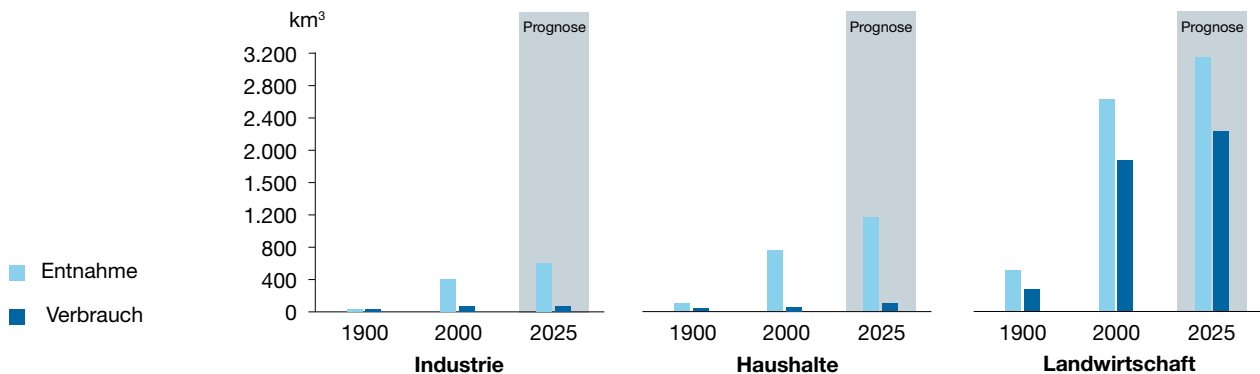
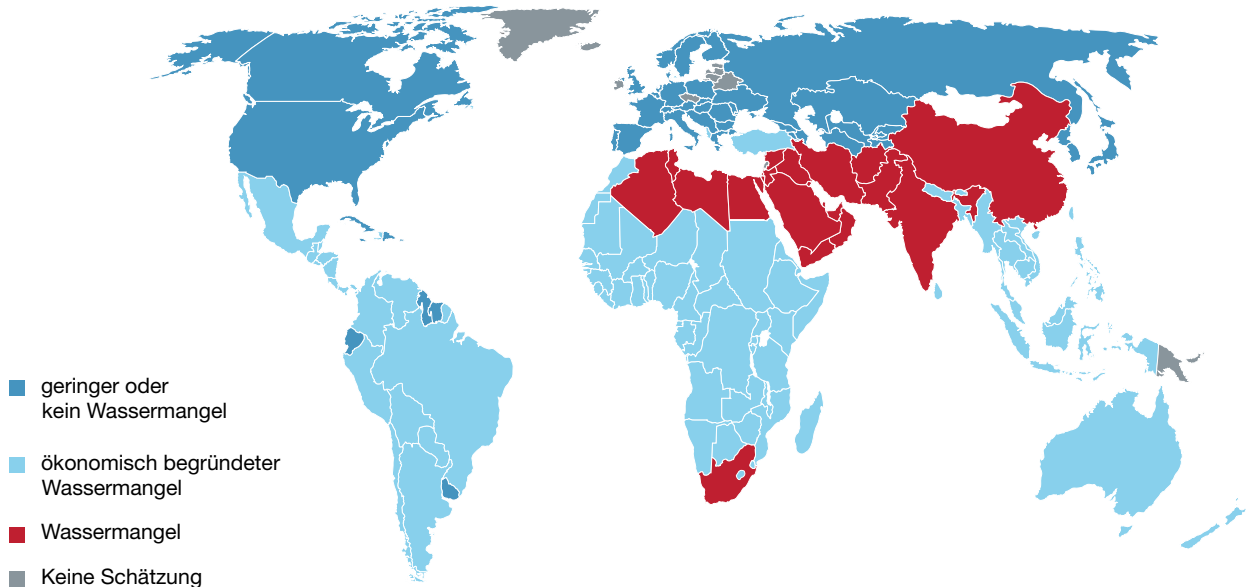
Foto: Fotolia



Heiß brennt die Sonne auf die modernen Gebäude der jordanischen Technischen Hochschule, kurz JUST, in Irbid. Es ist Herbst, aber trotzdem hat es mehr als 30 Grad. Studenten ziehen sich in die begrünten, schattigen Innenhöfe der Universität zurück, in denen Brunnen plätschern. Auch die Hauptstraße des Campus ist gesäumt von Grün: von Palmen, Büschen, Blumen und Rasenflächen, dazwischen Bänke und Springbrunnen. Die grüne Pracht ist nicht selbstverständlich. Das zeigt der Blick über den Universitätszaun: Nur wenige Meter

weiter beginnt die Wüste. Um ihr solch üppige Parkanlagen abzutrotzen, braucht man vor allem eines: Wasser. Aber der Rohstoff ist knapp in Jordanien. Wie man mit den schmalen Ressourcen am besten umgeht, um Industrie, Landwirtschaft und Bevölkerung zu versorgen, ist das Thema der Forscher am Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TUM. Drei Jahre lang haben die Münchner Experten rund um Prof. Peter Rutschmann zusammen mit der JUST das Thema erforscht und Erfahrungen mit Wissenschaftlern aus anderen Ländern der Region ausgetauscht, haben ▶

Entwicklung des globalen Wasserverbrauchs



Wasser – Segen und Fluch

Wassermangel und Wasserüberfluss bedrohen die Menschheit. Weltweit hat mehr als eine Milliarde Menschen keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser, die Wüstenbildung schreitet voran, aber gleichzeitig wächst die Gefahr von Sturmfluten und Überschwemmungen. Der Klimawandel verschärft die Situation.

Besonders viel Wasser schluckt die Landwirtschaft: rund 70 Prozent des gesamten Süßwasserverbrauchs. 20 Prozent fließen in die Industrie, 10 Prozent in die privaten Haushalte. Und der Durst der Landwirtschaft nimmt schneller zu als die Bevölkerung wächst. Weltweit ist der Wasserverbrauch in den vergangenen 50 Jahren doppelt so schnell gestiegen wie die Bevölkerung wuchs. Und mit den Ansprüchen der Menschen an eine hochwertige Ernährung mit Fleisch wächst auch der Wasserbedarf der Landwirtschaft. Zahlreiche Wissenschaftler suchen daher nach Wegen, mehr Nahrungsmittel mit weniger Wasser zu erzeugen. Sei es bei der Zucht von Pflanzen, die mit weniger Wasser mehr Ertrag bringen, oder der Entwicklung neuer Bewässerungsmethoden, die das

Nass schneller an die Wurzeln bringen, ohne dass der Großteil verdunstet.

Nur den Wenigsten ist bewusst, welcher Wasserverbrauch hinter alltäglichen Dingen wie einer Tasse Kaffee oder dem Kauf eines Computers steckt. Um dies transparent zu machen, hat der Wasserexperte John Anthony Allan den Begriff des virtuellen Wassers eingeführt. Mithilfe einer umfassenden Bilanz verdeutlicht er die Wassermenge, die während der gesamten Produktionskette eines bestimmten Produktes verbraucht oder verschmutzt wird und verdunstet. Neben dem Wasserverbrauch bei der Herstellung von Produkten prägt der Lebensstil den Wasserbedarf jedes Einzelnen. Im Schnitt sind 1000 Liter virtuelles Wasser nötig, um eine tägliche Überlebensration zu erzeugen. Ein Vegetarier nimmt bei ausgewogener Kost schon 2600 Liter virtuelles Wasser zu sich, dagegen braucht es 5000 Liter, wenn täglich Fleisch und Wurst auf den Teller kommen. Und die Tasse Kaffee? Sie „kostet“ 140 Liter Wasser.

Alexandria

Nildelta

Nil

Kairo

Luxor

Assuan

1

2

3

4

5

Merowe
Staudamm

Shereik
Staudamm

Grafik: edlundsepp

Ausbildungsinitiativen gestartet und Labors eingerichtet. Nun fassten die 28 Teilnehmer ihre Ergebnisse auf einem Kolloquium zusammen.

Ganz bewusst wählten die Forscher Irbid als Veranstaltungsort. Die Universitätsstadt 85 Kilometer nördlich von Amman ist geprägt vom Wassermangel: Unter blauem Himmel weiße Häuser, staubige Ölbäume und knochentrockener Boden. Das Straßenbild wird bestimmt von den Studenten, die vor allem abends die Bars und Döner-Läden bevölkern. Es ist eine aufstrebende Stadt; die leeren, mit Müll bedeckten Grundstücke werden allmählich weniger. Bars, Videoläden oder Restaurants wachsen aus dem Boden – glanzvolle kleine Paläste aus Naturstein, dunklem Glas und Bronzetüren. Die Armut ist auf dem Rückzug. Was aber immer noch – oder eigentlich mehr denn je – fehlt, ist Wasser.

Nicht nur diskutieren, sondern handeln

Jordanien ist nicht der einzige Staat mit gravierenden Wasser-Versorgungsproblemen; auch Länder wie Ägypten, Sudan, Algerien, Irak und Iran sind betroffen. Peter Rutschmann steht mit seinem Team deshalb schon seit Jahren mit einer ganzen Reihe von Behörden, Firmen und Kollegen in diesen Ländern in Verbindung und arbeitet mit ihnen zusammen, um dort wasserbauliche Projekte auf den Weg zu bringen. So untersuchte er 1980 an der ETH Zürich die Stauanlage von Mosul im Irak. Später an der Universität Innsbruck leistete er Vorarbeiten zum Nil-Staudamm in Merowe. Dieser wird zurzeit im Sudan gebaut. Die Baustelle liegt unterhalb des vierten Kataraktes, knapp 400 Kilometer nördlich der sudanesischen Hauptstadt Khartoum, wo der Weiße und der Blaue Nil zusammenfließen. Die Elektrizität, die in dem Kraftwerk bald gewonnen wird, soll vor allem die Verhältnisse in Khartoum verbessern. In der Stadt leben mehr als acht Millionen Einwohner, die ihren Strombe-

Peter Rutschmann und sein Team an der TUM beteiligen sich mit Modellversuchen und Computersimulationen an der Planung des Nil-Staudamm-Projekts Shereik im Sudan, das aus einem 3 Kilometer langen, 45 Meter hohen Damm und einem 369-Megawatt-Kraftwerk bestehen wird

darf meist mit kleinen Dieselgeneratoren decken. Daraus entsteht eine gewaltige Luftverschmutzung, die man verringern will, indem man den Strom stattdessen durch saubere Wasserkraft in Merowe erzeugt.

20-mal so stark wie die Isar

Jetzt, als Lehrstuhlinhaber an der TUM, führt Rutschmann die Untersuchung einer weiteren Nil-Staustufe in Shereik durch, die ebenfalls im Sudan, oberhalb des Merowe-Damms geplant ist. Das Großprojekt wird voraussichtlich eine halbe Milliarde Euro kosten und aus einem drei Kilometer langen, 45 Meter hohen Damm und einem 369 Megawatt-Kraftwerk mit sechs Turbinen bestehen. „Wenn es fertig ist, werden dort jede Sekunde 2100 Kubikmeter Wasser hindurchjagen, das entspricht etwa der 20-fachen Wassermenge der Isar“, erläutert der 54-jährige Bauingenieur, während er in einer Nachbildung des Stausee-Beckens im Maßstab 1: 35 steht. Das Modell befindet sich in einer der Experimentierhallen der Versuchsanstalt Oberrach, die sein Lehrstuhl nahe dem Walchensee seit über 80 Jahren als Außenstelle betreibt.

Den gesamten Stausee hier als Modell abzubilden, ist nicht möglich. Dazu ist selbst diese Halle zu klein. Deshalb haben die Forscher die wichtigsten Komponenten der Anlage von Shereik in zwei Ausschnitts-Modellen nachgebaut: das Kraftwerk und die Hochwasserentlastung. Nun stehen sie als rote PVC-Nachbildungen in riesigen Becken auf dem modellierten Sandboden. Ein Kilometer realer Breite entspricht rund 30 Metern im Modell, und Bauwerke, die in der Wirklichkeit einmal 15 Meter hoch sein werden, sind hier als 50 Zentimeter hohe Elemente nachgebaut, mit vielen Details und allen wichtigen, auch beweglichen Teilen. Dazu gehört das Kraftwerksgebäude mit den Einläufen zu den Turbinen und den so genannten Spülschützen. Sie dienen dazu,

Sand, die der Nil womöglich vor den Einläufen ablagert, wegzuspülen. Die Wasserbauer nennen das „Geschiebe“. Damit bezeichnen sie Material, das ein Fluss in seinem Bett mit auf die Wanderschaft nimmt. Es verursacht große Probleme, wenn es sich gerade dort ablagert, wo man es am wenigsten brauchen kann, etwa vor den Turbineneinläufen. Da die Anlage im Maßstab 1:30 verkleinert wurde, musste nun natürlich auch das Geschiebe feiner sein. Die Forscher suchten nach geeigneten Materialien und entschieden sich schließlich für feinen Isarsand. „Wir wussten, dass der immer noch viel zu grob ist“, räumt Dr. Arnd Hartlieb ein, Betriebsleiter der Versuchsanstalt Oberrach. „Aber wenn wir zeigen können, dass man verhältnismäßig grobe Körner durchspülen kann, dann kann man feinere eben auch durchspülen. So sind wir auf der sicheren Seite.“

Mehr Fallhöhe für das Wasser

Die Münchner Wasserbauer haben anhand eines numerischen Modells die Form der Turbineneinläufe optimiert, und so schaffen sie es, mehr an Fallhöhe für das Wasser herauszuholen. „Dadurch gelingt es, die zur Verfügung stehende Energie besser auszunützen“, so Peter Rutschmann. „Wenn man den zusätzlichen Energiegewinn bilanziert, macht das viel Geld aus. Allein mit dieser Optimierung haben die Kraftwerksbetreiber unsere Studien innerhalb eines Jahres schon wieder refinanziert.“ Und sein Betriebsleiter ergänzt: „Außerdem haben wir noch untersucht, ob es irgendwelche Stellen gibt, an denen sich Wirbel bilden können und Luft eindringt. Man will ja auf keinen Fall auf den Turbinen Luft haben. Wir konnten tatsächlich zeigen, dass es zwar kleinere Wirbel gibt, dass es aber nie zu Lufteinzug kommt.“

Im zweiten Modell in der Halle ist die so genannte Hochwasserentlastung des Shereik-Staudamms nachge- ▷

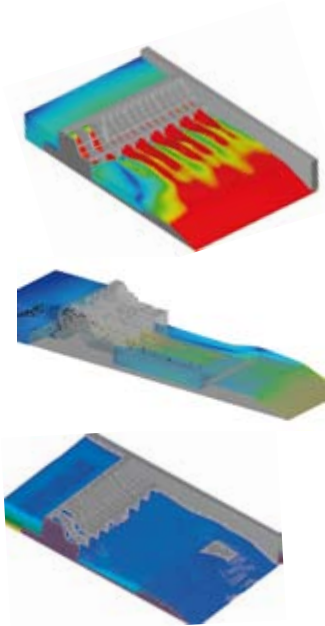
Rechenreinigung

Portalkräne für Ein- / Ausbau
der Turbinen

Einlauf

Turbinenlaufrad (vertikale Achse)

Saugschlauch

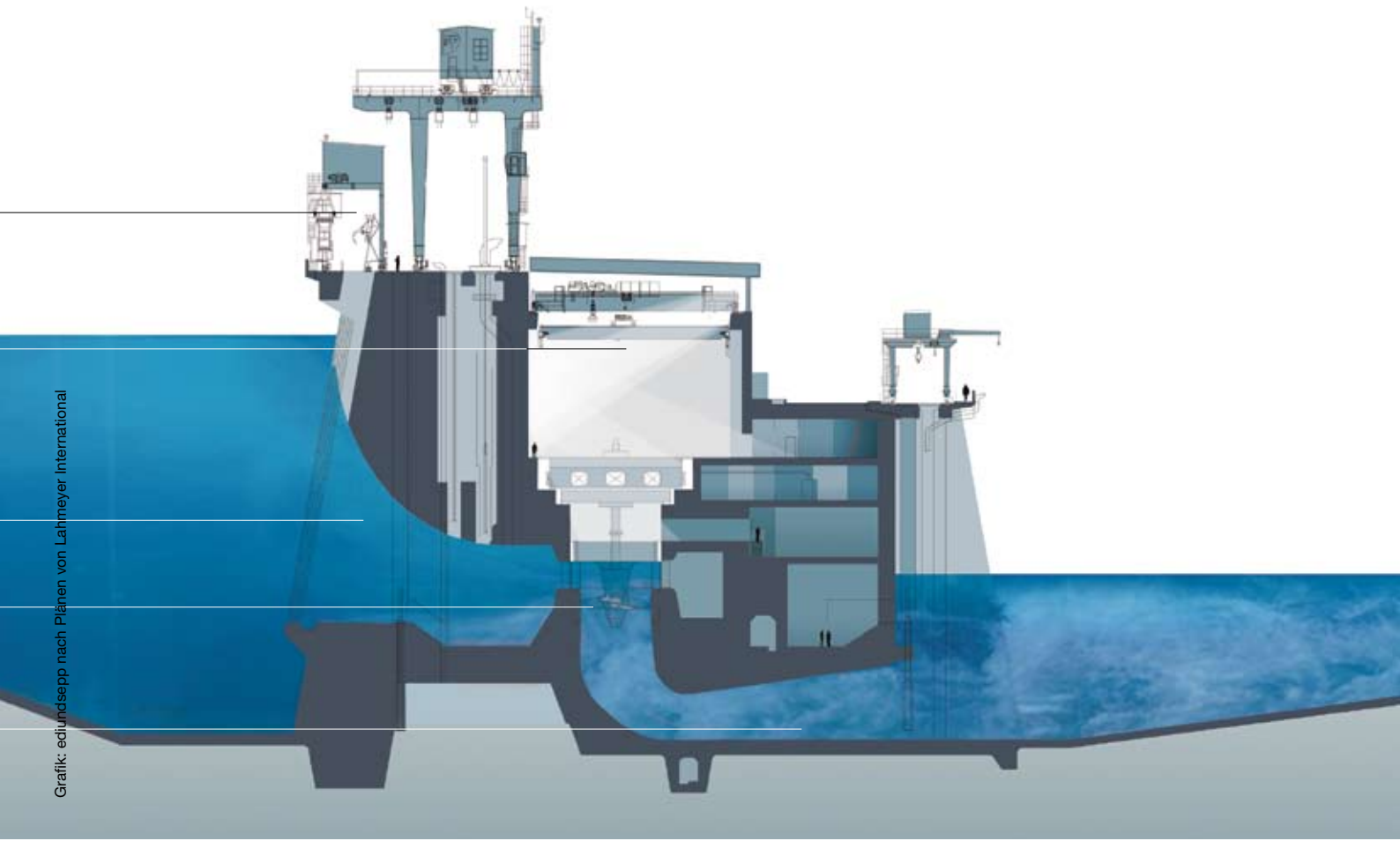


Hier sind drei Momentaufnahmen aus der virtuellen Strömungssimulation rund um den Staudamm zu sehen. Die Farben zeigen die Wassergeschwindigkeit an (blau bedeutet langsam, rot schnell)

baut. Wenn in der Regenzeit mehr Wasser ankommt, als die Turbinen abarbeiten können, werden Abflüsse im Damm geöffnet. Würde man dies nicht tun, flösse das Wasser über die Dammkrone und würde den Damm beschädigen oder gar zum Bersten bringen. Als kontrollierte Abflüsse gibt es einerseits Überfallwehre, über die das Wasser nach Öffnen einer Schütze hinwegfließt, und Tiefauslässe, die sich unter Wasser befinden und ebenfalls durch eine Schütze geöffnet werden.

Tosendes Wasser im Modell

Auf Knopfdruck lassen sich die Modelle mit Wasser füllen. Innerhalb weniger Minuten rauschen ein paar hundert Kubikmeter in die Becken, gespeist aus einem Reservoir außerhalb der Halle. Riesige Pumpen mit einer Kapazität von 650 Litern pro Sekunde befördern eine genau kontrollierte Menge in den Modell-Stausee und pumpen sie nach dem Ablauf wieder ab. Sobald ein gewisser Wasserstand erreicht ist, öffnet Arnd Hartlieb die Klappen des Mini-Staudamms, und tosend stürzen die Wassermassen durch die Wehre. Selbst hier, im Maß-



Den Aufbau des Nil-Kraftwerks Shereik kann man in diesem Schnittbild erkennen. Das Nilwasser kommt von links und wird am Damm aufgestaut. Es fließt dann durch die Einläufe ins Kraftwerk und treibt sechs Turbinen an

stab 1:35, kann man eine Vorstellung davon gewinnen, welche Gewalt das Wasser entwickelt, wenn es unten auftritt. Damit sie nicht zerstörerisch wirkt, muss das Bauwerk richtig gestaltet sein. Die hierfür am besten geeignete Form zu finden, ist eine der Aufgaben dieser Versuche.

An allen wichtigen Punkten des Modells sind Messpunkte angeordnet, über die man den Druck des Wassers ermitteln kann. Das Problem ist dabei nicht ein zu hoher Druck, sondern ein Unterdruck. Löst sich aufgrund der hohen Geschwindigkeit der Wasserstrom von der Unterlage ab, entsteht an dieser Stelle ein Unterdruck, da ein Druckausgleich von außen nicht erfolgen kann. An solchen Stellen beginnt das Wasser augenblicklich zu verdampfen, denn bei starkem Unterdruck genügt schon die Außentemperatur, um den Siedepunkt zu erreichen. Es entstehen Dampfblasen, die dann bei ihrer Implosion Wasserstrahlen auslösen, die mit rasender Geschwindigkeit auf die Betonteile des Bauwerks treffen und die Oberfläche wie ein Presslufthammer zerhacken können. Diese so genannte Kavitation ist

ein gefürchtetes Phänomen im Wasserbau. Sie kann nicht nur Turbinen, sondern ganze Stauwehre zerstören. Um das zu verhindern, hat man bei den aktuellen Versuchen in Oberrach unterschiedliche Formgestaltungen erprobt und experimentiert gerade mit Betonelementen, die im „Tosbecken“ das herabstürzende Wasser möglichst gründlich verwirbeln und seine Kraft entschärfen.

Turbulenzen im Computer

Die Wasserspiele im Saal sind nur ein Teil der Untersuchungen an Peter Rutschmanns Lehrstuhl. Sie gehen Hand in Hand mit Computer-Simulationen, die all das, was im Experiment gemessen wird, durch Berechnungen zu erhärten suchen. Kaum vorstellbar, wie man das wirbelnde Wasser in mathematische Formeln fassen soll, aber mit den heutigen leistungsfähigen Computern eröffnen sich neue Möglichkeiten. Insbesondere numerische Simulationen, in denen die Wassermassen in kleine Zellen eingeteilt werden, in denen der Lauf der Strömung in winzigen Zeitschritten berechnet wird, versprechen Erfolg. Die Vielzahl der Zellen und die Ab- ▶



Im Maßstab 1:35 erproben die TUM-Forscher, wie das Wasser über das Wehr stürzt und unten im Tosbecken ankommt. Damit es dort keine Schäden anrichtet, testen die Forscher unterschiedliche Betonelemente, die die Gewalt des Wassers brechen sollen



Tosbecken mit optimierten Einbauten zur Verbesserung der Energieumwandlung

stimmung zwischen ihnen verursachen allerdings auch heute noch extrem lange Rechenzeiten. In der Tat gibt es Rechenmodelle, mit denen sich das Fließverhalten zuverlässig simulieren lässt. Eindimensionale für grobe Abschätzungen, zwei- und dreidimensionale für detailliertere Aufgaben. Aber sie haben ihre Grenzen, denn es gibt Fragestellungen, die auch heute nur schwer oder gar nicht mathematisch zugänglich sind.

Rechenmodelle zeigen Schwachstellen auf

„Die Turbulenzforschung hat in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht“, sagt Peter Rutschmann. „Um hochgenau turbulente Strömungen zu rechnen, muss man sich aber immer noch auf kleine Ausschnitte beschränken.“ Dennoch gehört sein Institut zu den Wenigen auf der Welt, die Modellversuche und Computer-Simulationen erfolgreich miteinander verbinden: „Was besser numerisch geht, machen wir numerisch, was besser physikalisch geht, machen wir physikalisch. Für ein großes Projekt wie den Sherek-Damm bieten wir den Auftraggebern an, dass wir zuerst numerisch rechnen. Das geht schnell: Nach zwei bis drei Wochen gibt



Stein für Stein bauten die Spezialisten in der Versuchsanstalt Oberrach den Verlauf der Isar maßstäblich nach, um zu erproben, welche Auswirkungen ihre Renaturierung im Münchener Stadtgebiet hat

es erste Resultate. Der Modellbau hingegen dauert mindestens drei Monate. Das heißt, wenn wir bei der numerischen Untersuchung Schwachstellen erkennen, können wir diese im Modellbau bereits vermeiden. So sparen wir Zeit, wenn wir Probleme nicht erst im Modell sehen und anschließend korrigieren müssen.“

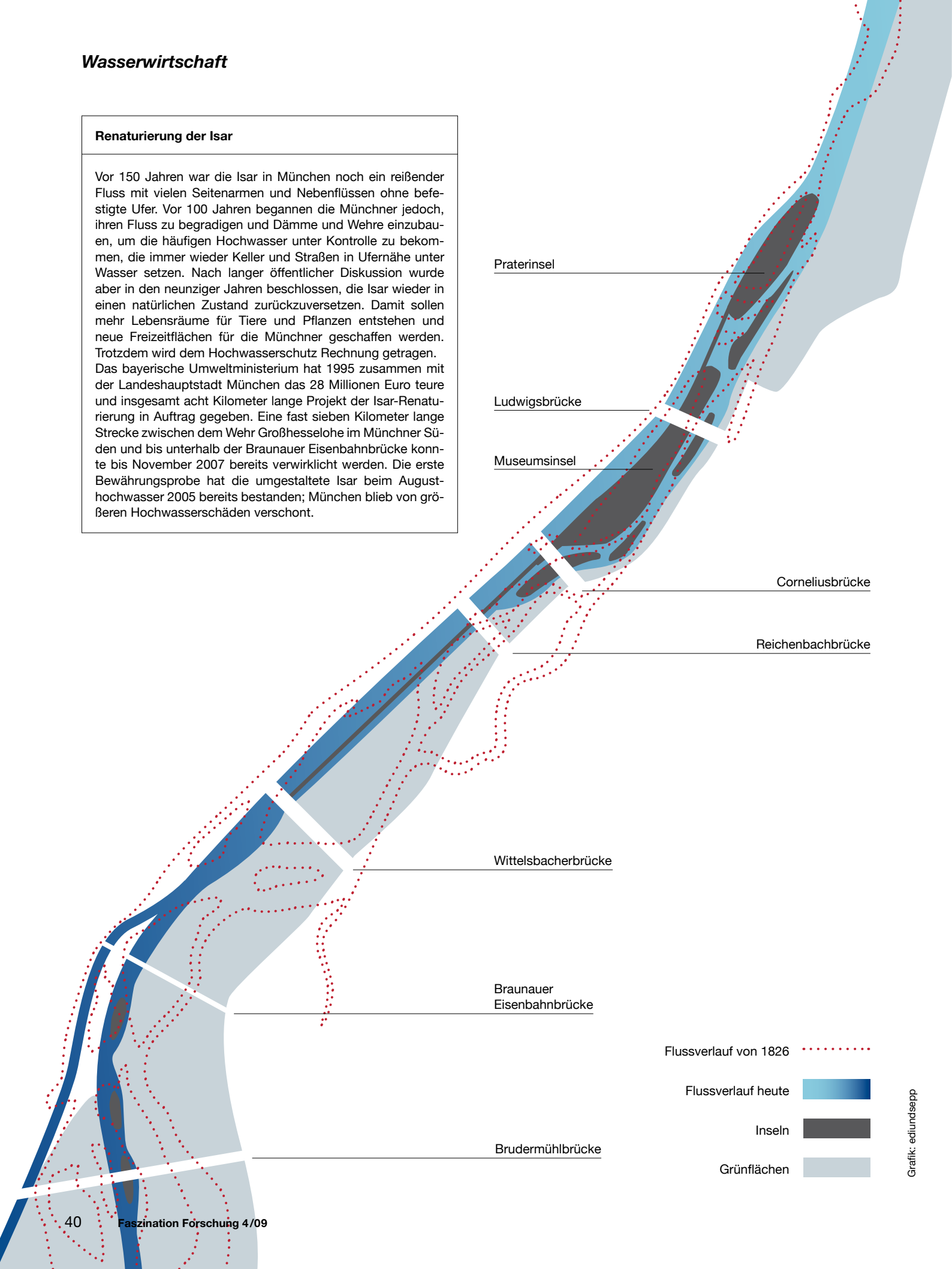
Was die Turbulenzmodelle schon können, steht bei der Simulation des Geschiebetransports noch ganz am Anfang. Bis heute kann man nicht zuverlässig beschreiben, wie sich ein Steinchen im Flussbett bewegt. „Wir haben in Innsbruck Einzelkörner beobachtet, wie sie sich in der Strömung verhalten“, sagt Peter Rutschmann, „aber die Ergebnisse lassen sich noch nicht in mathematische Formeln fassen.“ Wenn man aber nicht einmal die Bewegung eines einzelnen Kornes exakt beschreiben kann, wie soll das dann erst bei einer Milliarde davon gelingen? Doktorand Markus Grünzner ist gerade dabei, das Unmögliche möglich zu machen: Er entwickelt ein numerisches Modell für den Transport von Geschiebe. „Bisher ging man immer von stark vereinfachten Modellen aus“, sagt Peter Rutschmann „aber Grünzner ▶



Selbst die Isarkiesel wurden verkleinert. Die Forscher simulieren sie durch Sand. So sehen sie, wie sich das Flussbett verändert

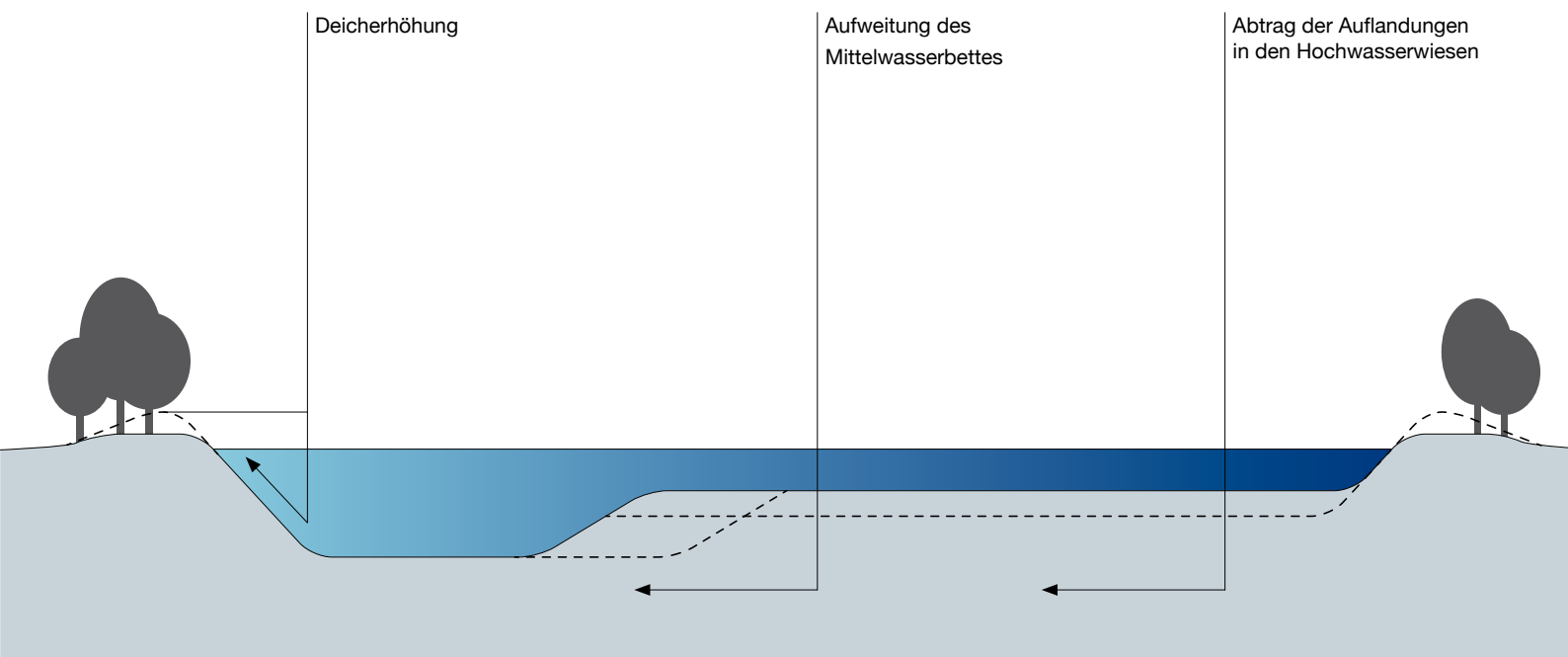
Renaturierung der Isar

Vor 150 Jahren war die Isar in München noch ein reißender Fluss mit vielen Seitenarmen und Nebenflüssen ohne befestigte Ufer. Vor 100 Jahren begannen die Münchner jedoch, ihren Fluss zu begradigen und Dämme und Wehre einzubauen, um die häufigen Hochwasser unter Kontrolle zu bekommen, die immer wieder Keller und Straßen in Ufernähe unter Wasser setzten. Nach langer öffentlicher Diskussion wurde aber in den neunziger Jahren beschlossen, die Isar wieder in einen natürlichen Zustand zurückzusetzen. Damit sollen mehr Lebensräume für Tiere und Pflanzen entstehen und neue Freizeitflächen für die Münchner geschaffen werden. Trotzdem wird dem Hochwasserschutz Rechnung getragen. Das bayerische Umweltministerium hat 1995 zusammen mit der Landeshauptstadt München das 28 Millionen Euro teure und insgesamt acht Kilometer lange Projekt der Isar-Renaturierung in Auftrag gegeben. Eine fast sieben Kilometer lange Strecke zwischen dem Wehr Großhesselohe im Münchner Süden und bis unterhalb der Braunauer Eisenbahnbrücke konnte bis November 2007 bereits verwirklicht werden. Die erste Bewährungsprobe hat die umgestaltete Isar beim Augusthochwasser 2005 bereits bestanden; München blieb von größeren Hochwasserschäden verschont.



- Flussverlauf von 1826
- Flussverlauf heute ————
- Inseln
- Grünflächen

Grafik: eciundsepp



Nach der Renaturierung soll man der Isar ihre Herkunft als voralpiner Wildfluss wieder ansehen. Dafür sorgen Maßnahmen wie die Erweiterung des Flussbettes, das Anlegen flacher, teilweise terrassierter Ufer und Kiesflächen

rechnet nun aus, welche Kräfte auf die unterschiedlich großen Körner wirken und wie sie sich bewegen. Außerdem können sie kollidieren. Eine solche numerische Untersuchung mit Tausenden von kollidierenden Geschiebekörnern ist vielleicht einzigartig auf der Welt.“

Mithilfe der Oberracher Miniflüsse untersuchen die Münchner Wasserbauer nicht nur Bauwerke in fernen Ländern. In über 400 Versuchen haben sie in den letzten Jahren viele, wenngleich in den Abmessungen kleinere Probleme auch für heimische Flüsse geklärt: In den Hallen oberhalb des Walchensees flossen schon Modelle der Salzach, des Inns und des Lechs in verschiedenen Abschnitten. Auch zurzeit strömt hier wieder ein bayerischer Fluss im Miniaturformat: Die Isar. Betriebsleiter Arnd Hartlieb erklärt, worum es geht: „Wir erproben im Auftrag des Wasserwirtschaftsamtes, wie sich die geplante Renaturierung der Isar auf Abfluss und Geschiebetrieb im Bereich des Deutschen Museums auswirkt.“ Der Abschnitt, nachgebaut im Maßstab 1:20, beginnt bei der Wittelsbacher Brücke und endet beim Deutschen Museum. Die Corneliusbrücke und die Reichenbachbrücke stehen da, exakt wie aus einem Modellbaukasten. Hintergrund für die Experimente ist, dass seit 1999 die Isar im Münchner Raum wieder in einen Zustand mit Nebenarmen und unregelmäßigen Ufern zurückversetzt wird.

Nun nähern sich die Arbeiten der letzten Bauphase. Hier handelt es sich um ein heikles Stück, weil sich der Fluss in die kleine und die große Isar verzweigt. „Entscheidend ist die Frage: Wie verändert sich durch die Baumaßnahmen die Flusssohle? Wo werden Anlandungen entstehen, wo Eintiefungen? Wie viel Geschiebe kommt in die kleine Isar, wie viel bleibt in der großen?“, so Hartlieb.

Sand im Modell

Um dies zu untersuchen, wurde auch das Geschiebe im Maßstab 1: 20 verkleinert. „Wir haben Sand genommen anstelle des Kieses in der Isar“, erläutert sein Chef, „das ist genau berechnet. Wenn man die Sandkörner 20-fach vergrößert, erhält man die Größenverteilung des Isarkieses.“ Wenn das Wasser – übrigens original Isarwasser aus dem Oberlauf, der die Versuchsanstalt versorgt – durch die Modell-Isar sprudelt, verhält sie sich also ziemlich exakt so wie der echte Fluss.

Es ist ein langwieriges Geschäft, die Bettgeheimnisse der Isar auszuforschen. Immer wieder lassen die Wissenschaftler das Wasser ab, vermessen die neu entstandene Form des Flussbetts mit Lasern und vergleichen sie mit dem Referenz-Zustand, der im Sommer 2007 aufgenommen wurde. „Die kleine Isar ent- ▷

Wasserwirtschaft

spricht fast dem Leitbild eines voralpinen Flusses“, so Rutschmann. „Seine Arme und Ablagerungen verändern sich immer wieder. Das will man so erhalten.“ Aber damit sich keine unerwünschten Überraschungen einstellen, braucht man eben die Expertise der TUM-Wasserbauer, die mit ihren Modellen in die Zukunft schauen können. Für die Zukunft erhofft sich Professor Rutschmann einen Erfolg im Nahen Osten: Er möchte Experten aus Jordanien, Israel und den palästinensischen Autonomiegebieten an seinen Lehrstuhl einladen, wo sie sich – auf neutralem Boden – über eines der wichtigsten Wasserprojekte der Region verständigen könnten: eine Pipeline zwischen

dem Toten und dem Roten Meer. Durch sie soll Wasser aus dem Roten Meer auf 170 Meter Seehöhe gepumpt werden und in das Tote Meer fließen, das sich 400 Meter unter dem Meeresspiegel befindet. Das Projekt hätte mehrere Vorteile: Es könnte den Wasserspiegel des Toten Meeres, der rund einen Meter pro Jahr sinkt, stabilisieren. Außerdem könnte Strom durch Wasserkraft gewonnen werden. Energie, die auch der Meerwasser-Entsalzung dienen und damit die Wasserversorgung der Region verbessern kann. Das Projekt hat nicht nur technische und wirtschaftliche Bedeutung – sondern auch eine friedenspolitische für die ganze Region. *Brigitte Röthlein*

In der Halle hatte die nachgebaute Isar noch den alten Verlauf – von der Corneliusbrücke aus gesehen. Anschließend wurden die Pläne zur Renaturierung hier im kleinen Maßstab erprobt





Informationen aus **erster Hand!**

Alle wichtigen Informationen zu den Themenfeldern **Wasser, Wasser- und Abfallwirtschaft, Boden sowie Ökologie und Umweltschutz** – komprimiert und auf einen Blick!

Lesen Sie regelmäßig unsere starken Magazine – **jetzt kostenlos anfordern.**



2 Ausgaben „Wasser und Abfall“

2 Ausgaben „WasserWirtschaft“

Einfach ausfüllen und faxen an:
(05241) 809620

JA, ich möchte 2 Ausgaben gratis zum kennenlernen.

- „Wasser und Abfall“ 31109214
 „WasserWirtschaft“ 31109215

Bitte kreuzen Sie das Magazin an, das Sie testen möchten. Sie können auch beide Magazine gratis lesen!

Wenn mir „Wasser und Abfall“ und/oder „WasserWirtschaft“ gefällt, brauche ich nichts weiter zu tun. Ich erhalten dann 10 Ausgaben „Wasser und Abfall“ (149,00 EUR pro Jahr zuzüglich Versand) und/oder „WasserWirtschaft“ (159,00 EUR pro Jahr zuzüglich Versand). Den Bezug kann ich jederzeit zur nächst erreichbaren Ausgabe beenden. Möchte ich „Wasser und Abfall“ und/oder „WasserWirtschaft“ nicht weiter lesen, melde ich mich innerhalb von 10 Tagen nach Erhalt des 2. Probeheftes schriftlich. (Ein Angebot der GVV Fachverlage GmbH, GF: Dr. R. Birkelbach, A.F. Schirmacher, AG Wiesbaden HRB 9754.)

Name, Vorname

Firma, Abteilung

Straße, Nr.

PLZ, Ort

E-Mail, Tel. (für evtl. Rückfragen)

Unterschrift

Versandkosten Abo Inland 18,00 EUR; Ausland 29,00 EUR.

So bestellen Sie:

per E-Mail:
viewegteubner@abo-service.info
www.all4engineers.de/Umwelt

per Telefon:
(05241) 801968

per Fax:
(05241) 809620



Abraham-Lincoln-Str. 46
65189 Wiesbaden
Germany

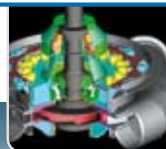
FIRE
▶ WATER
EARTH
AIR

▶ **Wasser ist unser Element.**

Schon sehr früh nutzten unsere Vorfahren die Energie des Wassers. Als naturgegebene Urkraft lässt sie Mühlen rotieren, treibt Sägen an und lässt Glühbirnen leuchten. Die Nutzung der Energie im fließenden Wasser ermöglichte die Industrialisierung und ist heute weltweit die bedeutendste Technologie zur Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen.

Seit mehr als 150 Jahren beschäftigen sich ambitionierte Techniker, Ingenieure, Facharbeiter und Kaufleute bei ANDRITZ Hydro in Ravensburg mit der faszinierenden Kraft des Wassers zum Antrieb von hydraulischen Strömungsmaschinen - und mit der Kraft im Wasser, denn unsere Verstellpropeller stehen weltweit für den zukunftsweisenden Antrieb des Seeverkehrs.

ANDRITZ HYDRO stellt sich heute diesen ebenso spannenden wie wichtigen Aufgaben und leistet so einen wesentlichen Beitrag für eine lebenswerte Zukunft im Einklang mit der Natur. Interessiert? Dann nehmen Sie doch einfach Kontakt zu uns auf!



ANDRITZ
Hydro

ANDRITZ HYDRO GmbH
Escher-Wyss Strasse 25
88212 Ravensburg

Phone: +49 751 295 11 - 230
Fax: +49 751 295 11 - 249

Email: bewerbenservice@vatew.de
www.andritz-hydro.de

Wem gehören die Wolken?

Warum wir internationale Regelungen brauchen, um die Technik zur künstlichen Wetterbeeinflussung in die richtigen Bahnen zu lenken

Von Peter A. Wilderer

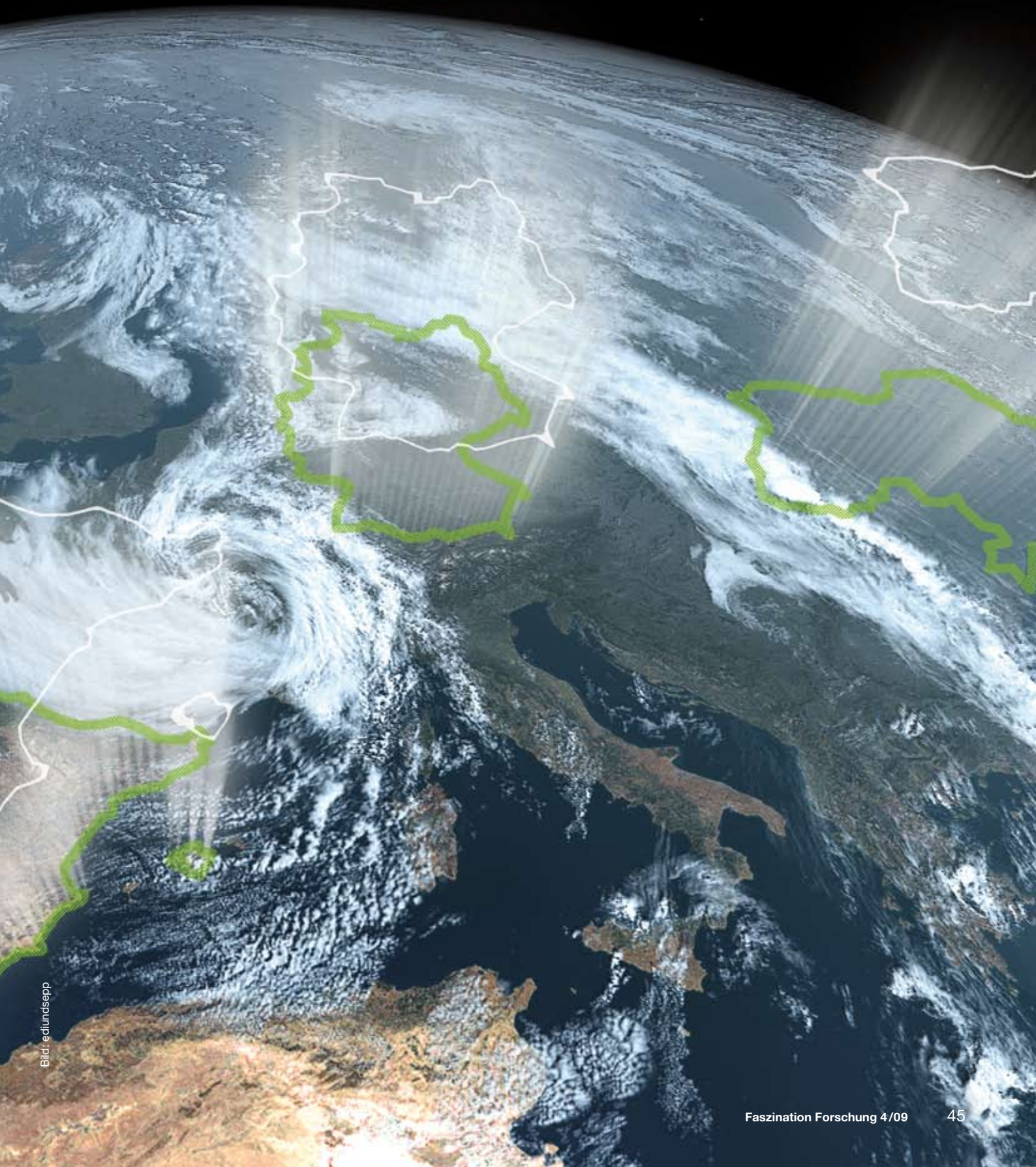


Bild: eciundsepp

Seit Monaten bestimmt die globale Finanzkrise die öffentliche Diskussion. Die Folgen treffen uns in unserem täglichen Handeln ganz direkt. Da wundert es nicht, dass in der öffentlichen Wahrnehmung andere Weltkrisen in den Hintergrund treten, die Ernährungskrise beispielsweise, die Wasserkrise oder die Klimakrise, weil sie räumlich oder zeitlich weit entfernt zuschlagen. Diese Einschätzung ist allerdings trügerisch. Besonders die Klimakrise sollte uns weiterhin ernsthaft beschäftigen, bedroht sie doch nicht nur unseren Geldbeutel, sondern auch die Existenz des Lebens auf Erden insgesamt. Die Diskussionspause, die uns die Finanzkrise verordnet hat, kann aber auch als Chance verstanden werden, gibt sie uns doch die Ruhe, über die bisher nicht zu Ende gedachten Maßnahmen zur Bewältigung der Klimakrise kritisch nachzudenken.

Hierzu ein Beispiel: Wenn exzessive Emissionen von Kohlendioxid für die Klimakrise verantwortlich sind, dann erscheint es folgerichtig, diese Emissionen zu begrenzen und gleichzeitig dafür zu sorgen, dass das Zuviel an Kohlendioxid wieder aus der Atmosphäre verschwindet. Dazu wurden vor kurzem 300 Quadratkilometer Meer im Südatlantik versuchsweise mit Eisen-salzen gedüngt, um auf diese Weise das Algenwachstum anzuregen. Jeder, der einen Teich im Garten angelegt hat, weiß, dass Algen sehr schnell wachsen können, wenn Düngestoffe zur Verfügung stehen – gewollt oder ungewollt. Zum Wachstum entnehmen Algen zudem viel Kohlenstoff aus der Atmosphäre, was uns zum Segen gereichen würde. Das Dumme ist nur, dass Algen nicht ewig leben, sondern absterben und zum Gewässerboden absinken. Auf diesem Weg kommt es zu biologischen Abbauvorgängen. Dabei wird Sauerstoff verbraucht. In Flüssen, Seen und in den Weltmeeren führt dies sehr schnell zu Sauerstoffnot für die Fische. Sie sterben und lösen damit Hungersnöte in all den Gebieten aus, in denen Menschen sich hauptsächlich von Fischen ernähren. Aber es kommt noch schlimmer. Am Meeresboden führen die biologischen Abbauvorgänge zur Bildung von Methan, das in die Atmosphäre ausströmt – ein Treibhausgas, das in seiner Wirkung dem Kohlendioxid nicht nachsteht.

Aus diesem Beispiel lernen wir, dass Gedankenexperimente zur Lösung der Klimakrise erst zielführend sein können, wenn sie bis zum Ende durchdacht sind. Das

Erdsystem, in das wir eingreifen, ist extrem komplex, und es reagiert gemessen an dem Zeittakt unserer schnelllebigen Zeit langsam. Auch wenn wir alle Register ziehen, um Emissionen von Kohlendioxid zu reduzieren, wird der Erfolg in einer Legislaturperiode des Parlaments und im Verlauf eines Arbeitslebens kaum sichtbar. Es kann Jahrzehnte wenn nicht gar Jahrhunderte dauern, bis unser Klima wieder „normal“ wird. Die Anstrengungen lohnen sich für unsere Kinder und Kindeskinde. Aber werden wir als Steuerzahler und als Entscheidungsträger in Wissenschaft, Wirtschaft und Politik den langen Atem haben, Verzicht zu üben im Blick auf eine ferne Zukunft? Auch die enthusiastischsten Optimisten unter uns mögen da ihre Zweifel haben. Was also ist die Alternative? Schauen wir dazu kurz in die Vergangenheit.

Wenn der Leidensdruck hoch genug war, hat der Mensch dank seiner Gabe, erfinderisch zu sein, stets eine Lösung gefunden. So entstanden das Rad, die Brücke, das Auto, das Flugzeug, um uns ohne Mühsal schnell und trockenen Fußes von A nach B zu bringen. Der moderne Leidensdruck resultiert aus dem Mangel an Wasser während lang anhaltender Trockenperioden, aus dem Zuviel an Wasser bei Starkregenereignissen, aus dem Verlust an Leben und Eigentum bei gewaltigen Stürmen. Was liegt da näher, als Techniken zu erfinden und zu praktizieren, mit denen Regen künstlich erzeugt werden kann, Regenfronten abgelenkt, extreme Hitze gemildert und Stürme abgeschwächt werden können? Fiktion oder Realität? Ein Blick in die Trickkiste der Ingenieure zeigt, dass wir bereits voll dabei sind, derartige Techniken anzuwenden.

Auf den ersten Blick mögen solche Techniken als Rettung in der Not verstanden werden. Das sind sie zweifelsohne auch. Sie können uns vor Schäden an Leib und Leben bewahren. Sie können helfen, durch Steigerung der landwirtschaftlichen Erträge in notorischen Trocken-zonen Hunger und Armut zu überwinden. Und durch Beregnung von Wäldern kann das Ausbrechen von Waldbränden und der Verlust an Biodiversität verhindert werden. Also wo liegt das Problem?

Ein Blick in die nationale und internationale Gesetzgebung zeigt, dass sich Handlungen zur künstlichen Beeinflussung des Wettergeschehens weitgehend im

rechtsfreien Raum bewegen. Es gibt lediglich eine Konvention, die am 18. Mai 1977 von dem damaligen Generalsekretär der Vereinten Nationen in Genf unterzeichnet und bisher von 33 Staaten ratifiziert wurde, darunter 1980 auch von den Vereinigten Staaten. Diese Konvention verbietet den Einsatz von Techniken zur Modifikation der Umwelt zu militärischen oder anderen feindlichen Zwecken. Wenn also 1977 eine derartige Konvention unterzeichnet wurde, muss man annehmen, dass Wettermodifikationen zu militärischen Zwecken bis dahin gang und gäbe waren, also nichts Fiktives.

In Artikel II der Konvention wird der Begriff „Modifikation der Umwelt“ definiert als Änderung der Dynamik, Zusammensetzung oder Struktur der Erde, einschließlich der Lebewesen, der Lithosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre und des erdnahen Weltalls durch willentliche Manipulation natürlicher Prozesse. In Artikel III ist festgelegt, dass die Konvention den friedlichen Einsatz von Technologien zur Umweltmodifikation nicht behindern soll, dies in Übereinstimmung und ohne Beeinträchtigung der allgemein anerkannten Prinzipien des internationalen Rechts.

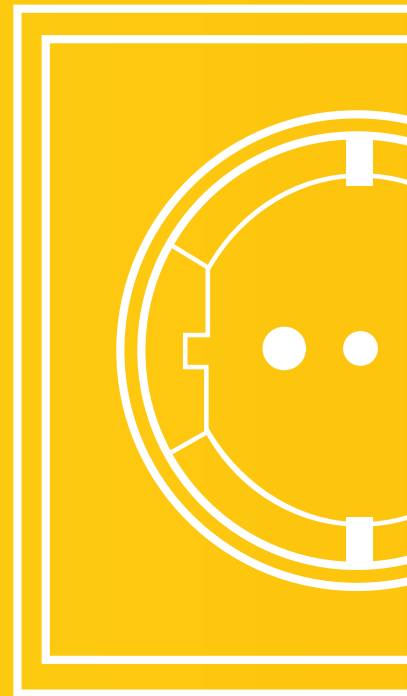
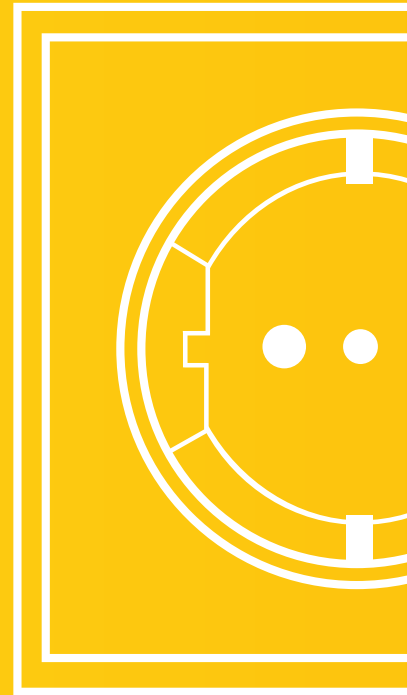
Das bedeutet, dass Wettermanipulationen, ob sie eine lokale oder auch weiträumige Wirkung haben, von jedermann veranlasst werden können, so lange lediglich zivile Zwecke verfolgt werden. Die Wolke kennt demnach keinen Eigentümer und keinen Besitzer. Wenn also Bauern in Palästina Wolken, die vom Meer hereinkommen, auf ihren Ackerflächen abregnen lassen und für die Nachbarregion in Israel keine Regen spendende Feuchtigkeit übrig bleibt, so wäre das zulässig. Oder würde dies von Israel als feindlicher Akt verstanden? Wo liegt die Grenze zwischen ziviler und feindlicher Nutzung? Wer bestimmt, dass eine Maßnahme zur Wetterbeeinflussung durchgeführt wird? Es ist – wie in dem oben beschriebenen potenziellen Konfliktfall zwischen Staaten – doch nicht auszuschließen, dass der Nutzen für eine Region einer anderen Region zum Schaden gereicht. Die Ablenkung einer Starkregenfront, die auf den Voralpenraum zustrebt, kann dort die Überschwemmungsgefahr eindämmen. Ablenkung bedeutet aber, dass der Starkregen eine andere Region überziehen würde und dort Überschwemmungen verursacht. Wer würde in diesem Fall Nutzen und Schaden abwägen und entsprechende Entscheidungen treffen? Bisher wäre rein rechtlich niemand zuständig.

Man kann noch einen Schritt weiter gehen. Angenommen, Regen soll erzeugt werden, damit eine Dürresituation überwunden wird. Die Technik funktioniert und es regnet stark, so dass es auf einem Autobahnabschnitt zu Aquaplaning-Effekten kommt und zu einem Verkehrsunfall. Wäre der Regen natürlicherweise gefallen, läge die Schuld bei den Fahrern. Wenn nun aber der Regen angeordnet wurde, sei es von einer Privatperson, dem Landkreis oder dem Staat, wer trägt dann die Verantwortung?

Die Rechtslage ist ungeklärt, bisher kümmert sich so gut wie keine Institution um die Schaffung von nationalen und internationalen Regelungen. Das Nicht-Handeln resultiert vermutlich aus der Annahme, dass es gar keinen Handlungsbedarf gäbe. Das mag für den Moment so sein. Wie lange dieser Moment aber noch andauert, ist fraglich. Immerhin hat der Kongress der Vereinigten Staaten im Jahre 2007 eine Gesetzesvorlage mit dem Titel: „Gesetz zur Autorisierung von Forschung und Entwicklung zur Schadensbegrenzung durch Wettereinflüsse“ auf den Weg gebracht. Es wird nicht lange dauern, bis innovative Methoden zur künstlichen Wetterbeeinflussung einsetzbar sind. Schon heute verfügen wir über Techniken, die Einfluss auf das Wettergeschehen haben. Deren Effizienz mag noch begrenzt sein. Angesichts des reichhaltigen Wissens im Bereich der Atmosphärenphysik und der Meteorologie werden die Defizite vermutlich schnell überwunden. Also sollten wir auch auf der Ebene der Gesetzgebung schnell handeln, noch bevor das erste Kind in den Brunnen gefallen ist.

Kurzbiografie

Prof. Dr. Peter A. Wilderer ist gelernter Bauingenieur mit Vertiefung in Umweltingenieurwesen. Als akademischer Lehrer und Forscher war er an der Universität Karlsruhe, der University of California Davis, USA, und an der Technischen Universität Hamburg-Harburg tätig, bevor er bis 2004 an der TUM die Leitung des Lehrstuhls für Wassergüte- und Abfallwirtschaft hatte. Als Mitglied des Aufsichtsrats des Institute for Advanced Study ist er bis heute weiterhin mit der TUM eng verbunden. Für seine Leistungen in der Forschung wurde er vielfach ausgezeichnet. Zu nennen ist insbesondere der Stockholm Wasserpreis, der ihm 2003 zuerkannt wurde.

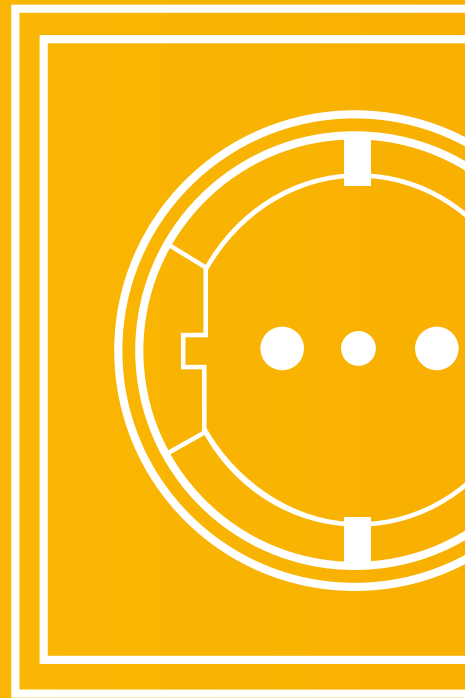
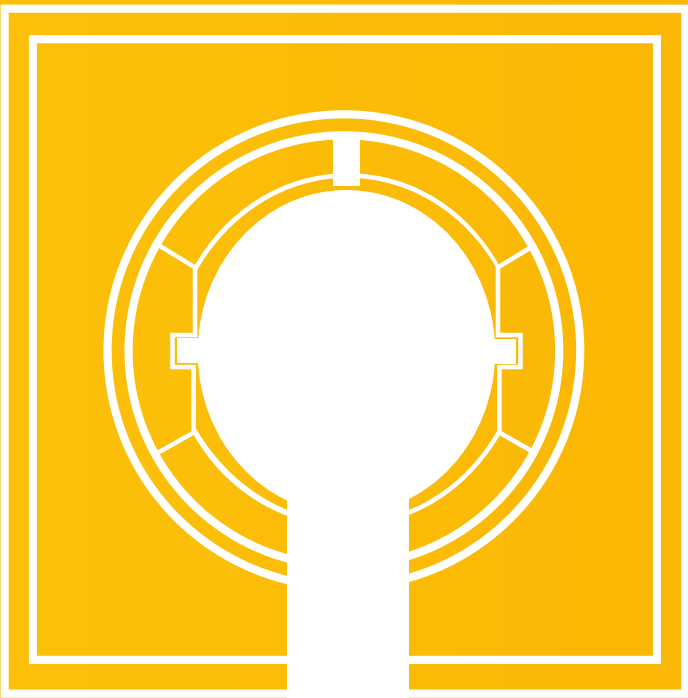
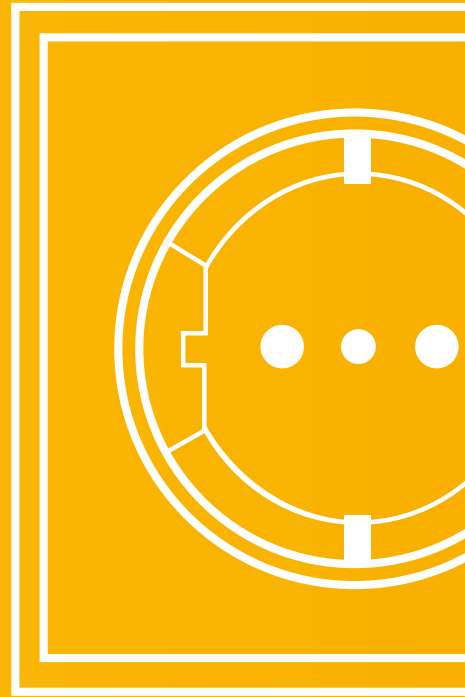
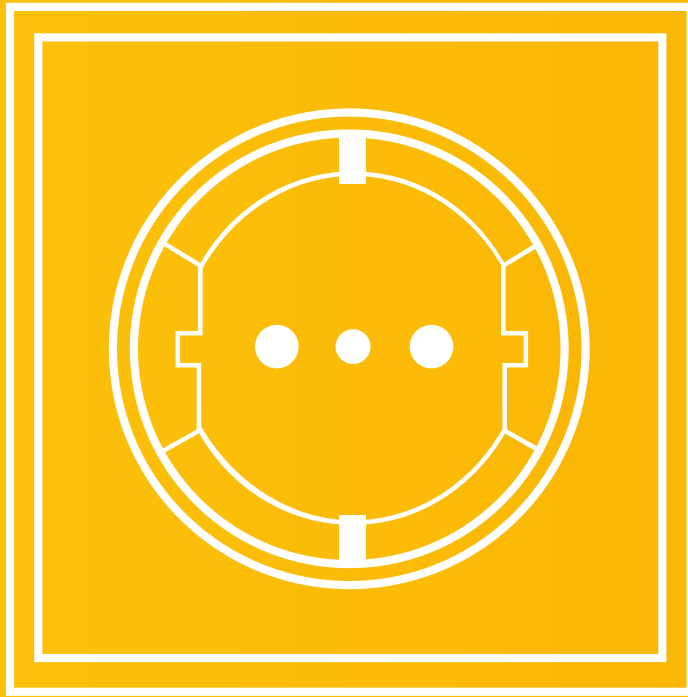


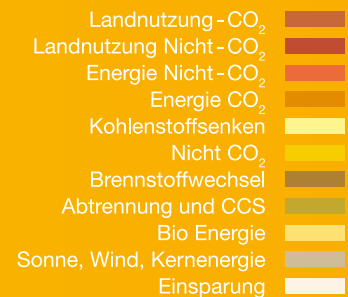
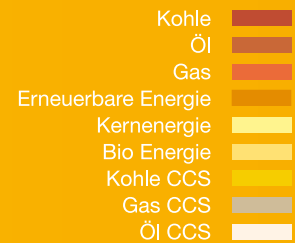
Gas geben beim Wirkungsgrad

Das Kraftwerk der Zukunft verbrennt Gas aus Kohle oder Biomasse. TUM-Forscher arbeiten an effizienteren Technologien und an Methoden zur Kohlendioxidabscheidung

Link

www.es.mw.tum.de





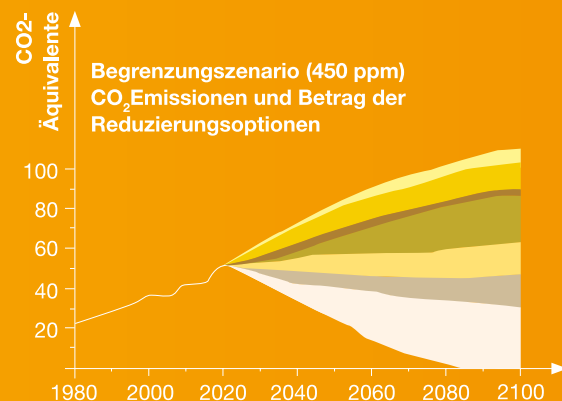
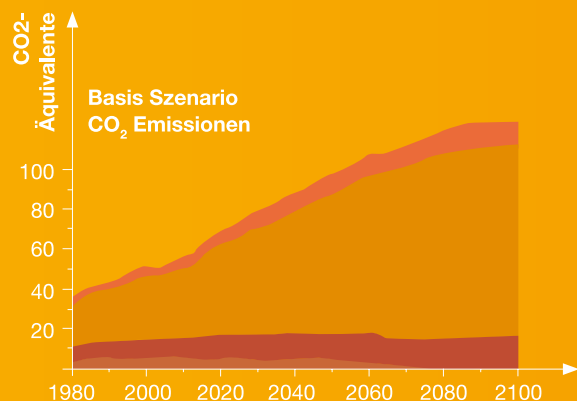
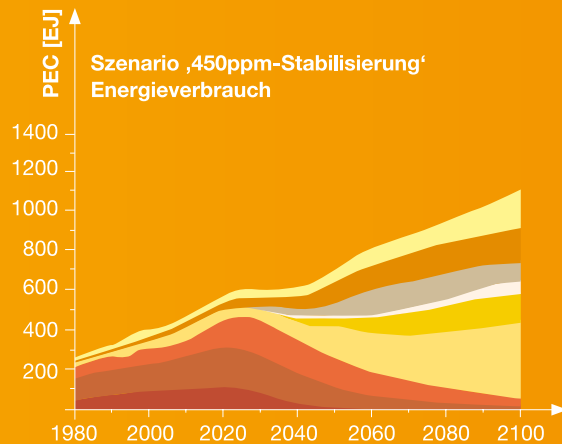
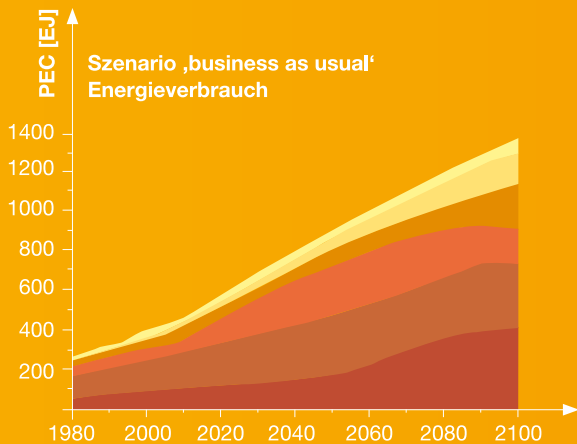
Auf die Frage nach dem drängendsten Thema der Menschheit würden die meisten Befragten derzeit wohl die „weltweite Finanz- und Wirtschaftskrise“ nennen. Vor gut einem Jahr dagegen lautete die Antwort mehrheitlich: „der Klimawandel“. Und es braucht nicht viel Phantasie um sich auszumalen, dass dieses Thema die Öffentlichkeit in Zukunft wieder stärker beschäftigen wird. Denn der Ausstoß von Kohlendioxid und anderer Treibhausgasen gefährdet das Klima weltweit – und langfristig die ganze Menschheit. Fakt ist: Der Energiebedarf der Menschheit steigt weiter – nicht nur in Ländern wie China und Indien. Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) geht davon aus, dass sich der weltweite Energieverbrauch bis 2050 verdoppeln wird, wenn nicht massiv gegengesteuert wird. Und: Ein Großteil dieses Bedarfs wird auch in Zukunft aus der Verbrennung fossiler Rohstoffe gedeckt werden – mit der bekannten Folge, dass immer mehr Kohlendioxid in die Luft gelangt. Fakt ist aber auch, dass der Gehalt an Kohlendioxid in der Atmo-

sphäre nicht noch weiter steigen darf: Das IPCC empfiehlt eine Stabilisierung auf 450 ppm (parts per million), damit die weltweite Erwärmung auf zwei Grad Celsius begrenzt wird. Dies gilt unter Wissenschaftlern als ein noch beherrschbares Maß.

Energie: effizient und ohne Kohlendioxid

Um die 450-ppm-Grenze einzuhalten, gilt es zunächst, die Steigerung des Energieverbrauchs soweit möglich zu reduzieren. „Eine unserer wichtigsten Energiequellen ist die Energieeinsparung“, sagt Prof. Hartmut Spliethoff, Inhaber des Lehrstuhls für Energiesysteme an der Technischen Universität München. „Allein das Einsparpotenzial durch Effizienzverbesserungen ist enorm.“ Spliethoff muss es wissen: Ein Forschungsgebiet seines Lehrstuhls ist die Effizienzsteigerung von Kohlekraftwerken. „Auf die Kohle als günstigen und im Vergleich zu Öl und Gas noch erheblich länger verfügbaren Energieträger wird die Menschheit vorerst noch nicht verzichten können“, sagt Spliethoff. „Ziel muss es deshalb sein,

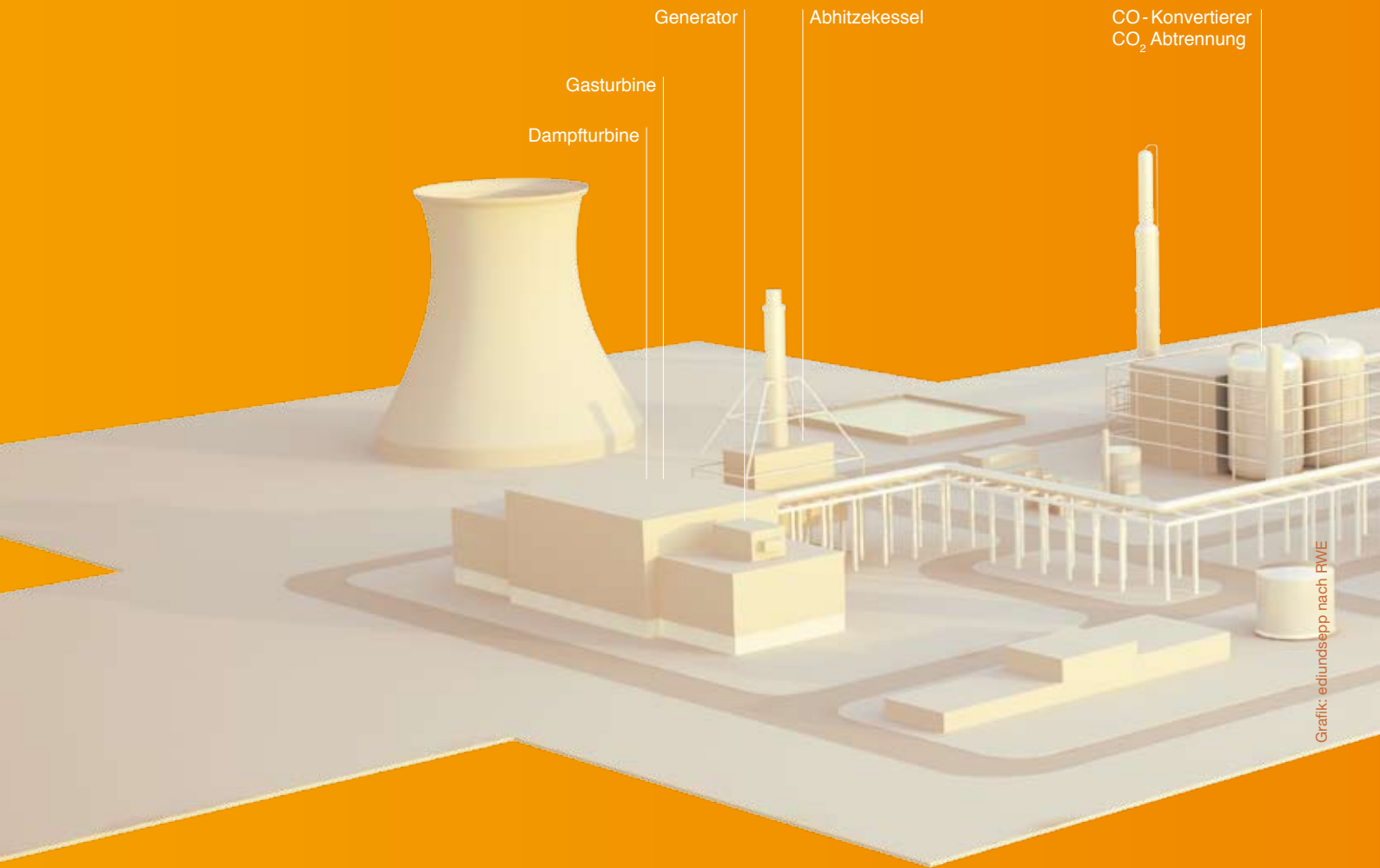
Szenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) zur Entwicklung von Energieverbrauch und Kohlendioxid ausstoß weltweit



Grafik: edlundsepp nach IPCC

den Brennstoff möglichst gut auszunutzen.“ Doch Effizienzsteigerungen alleine reichen nicht. Das IPCC geht in seinem „450-ppm-Szenario“ zwar davon aus, dass sich der Anstieg des Energieverbrauchs mit entsprechenden Anstrengungen bremsen lässt, aber für das Jahr 2050 rechnen die Wissenschaftler auch dann noch mit einem gegenüber heute um rund die Hälfte gewachsenen weltweiten Energieverbrauch. Das bedeutet: Um das gesteckte 450-ppm-Ziel zu erreichen, muss nicht nur gespart werden, sondern die Energie muss ohne oder zumindest mit geringerem Ausstoß von Kohlendioxid erzeugt werden. „Deshalb suchen wir nicht nur nach Lösungen zur Effizienzsteigerung, sondern wir forschen auch an der Technik für das Kohlendioxid-arme Kraftwerk“, sagt Spliethoff. Das Stichwort lautet: Integrated Gasification Combined Cycle, kurz IGCC, kombiniert mit Carbon Capture and Storage, kurz CCS. Ein IGCC-Kraftwerk ist zunächst ein normales Gas- und Dampfkraftwerk. Das heißt, es besteht aus einer Gasturbine und zusätzlich einem Dampfkreislauf, der die Ener-

gie des heißen Abgases der Gasturbine nutzt. Allerdings wird das IGCC-Kraftwerk nicht mit Erdgas befeuert, sondern mit Kohle oder anderen festen Brennstoffen, etwa Biomasse. Diese müssen dazu in einem vorge-schalteten Prozess zunächst vergast werden. Das dabei entstehende Rohgas besteht im Wesentlichen aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid, außerdem enthält es je nach Prozessbedingungen Aschenpartikel, Teer, Schwefel und andere Spurenstoffe. Diese Stoffe müssen aus dem Gas entfernt werden, bevor es in der Gasturbine verbrannt werden kann. Zusätzlich kann in Zukunft an dieser Stelle CCS ins Spiel kommen: Dabei wird das Kohlendioxid aus dem Gas abgetrennt und einer sicheren Lagerung zugeführt, zum Beispiel in ausgedienten Erdgaslagerstätten, so dass es nicht in die Atmosphäre entweicht. Auf diese Weise kann die Kohlendioxid-Bilanz des Brennstoffs deutlich verbessert werden. Im Fall von Biomasse wäre sie sogar negativ, das heißt, der Atmosphäre wird durch den Prozess Kohlendioxid entzogen. ▸



Grafik: edlundsepp nach RWE

Stromerzeugung der Zukunft – das IGCC-Kraftwerk mit Kohlendioxidabscheidung: Die kombinierte Gas- und Dampftechnologie ermöglicht einen hohen Wirkungsgrad, während die Kohlendioxidabscheidung und -endlagerung eine klimafreundliche Nutzung des reichlich vorhandenen Rohstoffs Kohle ermöglicht

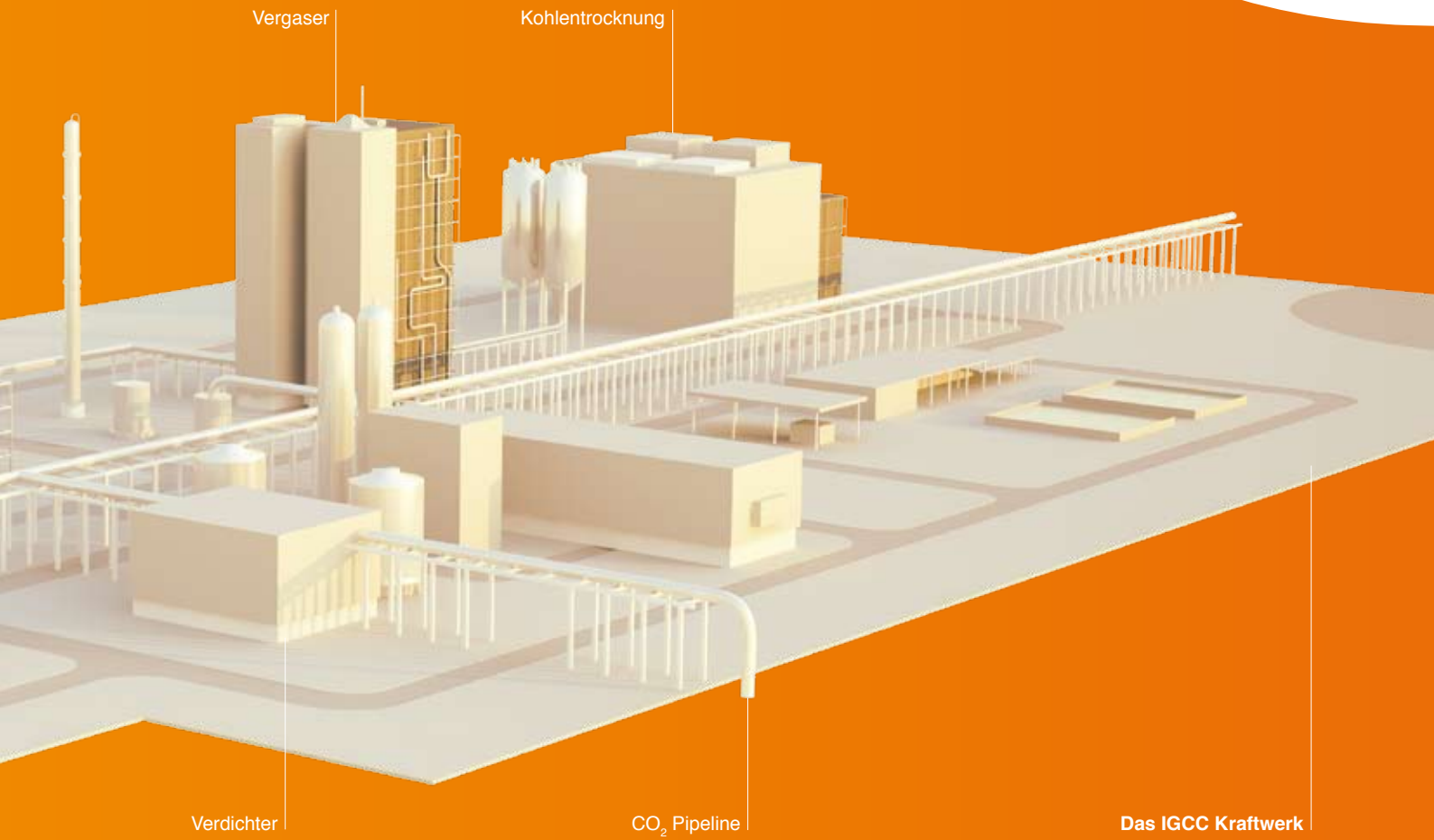
IGCC-Kraftwerke haben einen deutlich höheren elektrischen Wirkungsgrad als normale Kohlekraftwerke: Derzeit liegt er bei etwa 45 Prozent (ohne CCS). „Durch eine weitere Verbesserung der klassischen Einzelkomponenten eines Gas- und Dampfkraftwerks können wir in einigen Jahren auf über 50 Prozent kommen“, sagt Prof. Spliethoff. „Zusätzlich besteht großes Verbesserungspotenzial in der gesamten Prozesskette - von der Vergasung über die Reinigung des Rohgases bis hin zur effizienten Abscheidung des Kohlendioxids.“

Wie wird aus Biomasse Gas?

Genau daran arbeiten Spliethoff und seine Mitarbeiter: Das Institut für Energiesysteme der TUM hat die Federführung bei dem vom Bundesforschungsministerium

und sechs Industriepartnern finanzierten Verbundforschungsprojekt „HotVeGas“. Die Abkürzung steht für „Grundlegende Untersuchungen zur Entwicklung zukünftiger Hochtemperaturvergasungs- und -gasreinigungsprozesse für IGCC-Kraftwerke und zur Herstellung synthetischer Energieträger“. Denn die Technik zur Vergasung von Kohle und anderen Festbrennstoffen ist zwar schon alt, doch die grundlegenden Prozesse der Vergasung sind bis heute nicht ausreichend wissenschaftlich erforscht.

Neben den TUM-Wissenschaftlern sind die TU Freiberg sowie das Forschungszentrum Jülich an „HotVeGas“ beteiligt, Industriepartner sind EON, RWE, EnBW, Vattenfall sowie Siemens und GTT. Damit ist „HotVeGas“ gegenwärtig das größte Forschungsprojekt zur Ver- ▶



Brennstoffzuführung

Reaktionsrohr

optische Zugänge

Heizer

Isolierung

Abkühlstrecke



Experimente im großtechnischen Maßstab

Der TUM-Versuchsreaktor: Mit ihren Messinstrumenten können die Forscher „zuschauen“, wie bei 1800 Grad Celsius und 50 Bar aus Kohle Gas entsteht

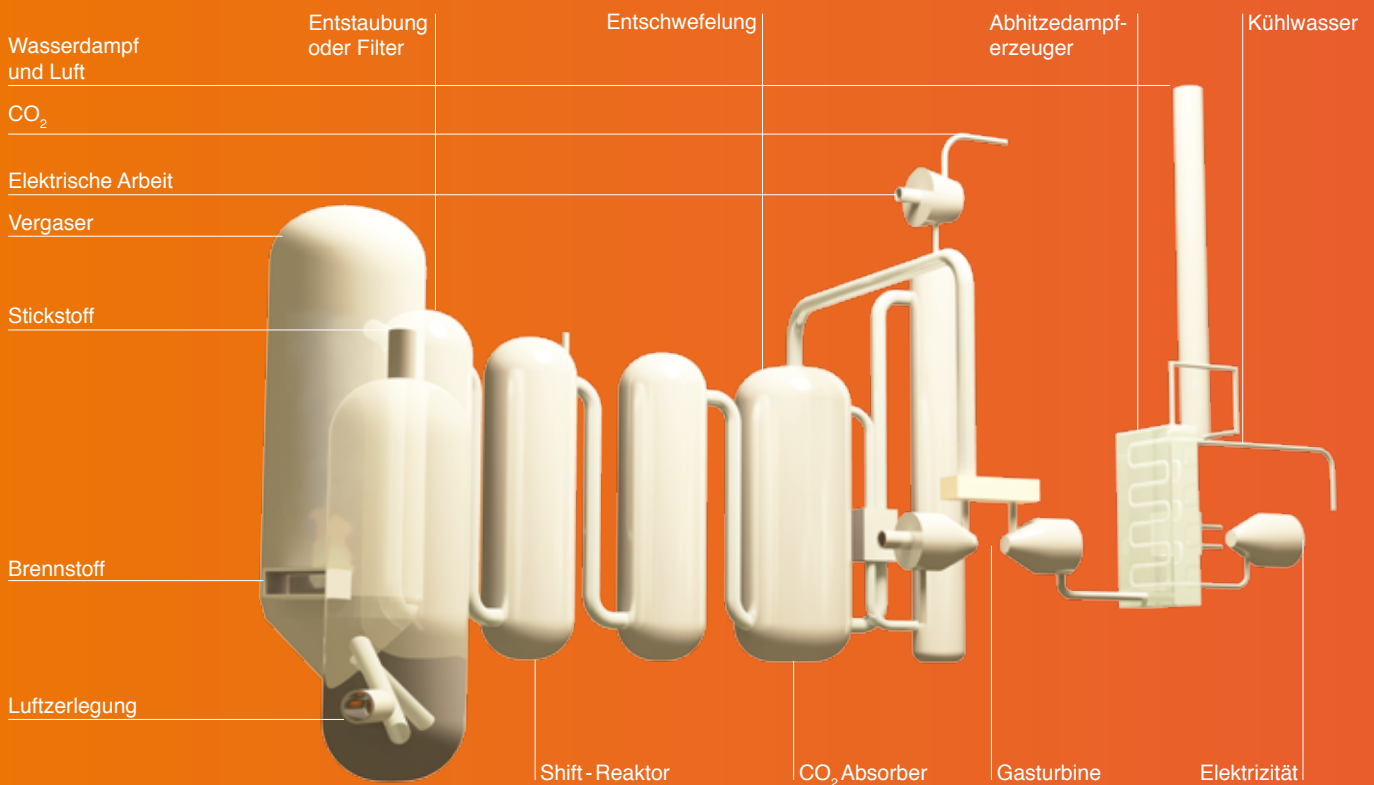
gasung in Deutschland. Es soll die notwendigen wissenschaftlichen Grundlagen schaffen, auf deren Basis praxistaugliche Technologien zur Vergasung, Gasreinigung, Kohlendioxidabscheidung und zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe entwickelt werden können.

Am Institut für Energiesysteme hat man mehrjährige Erfahrungen mit einem Vergasungsreaktor im Versuchsmaßstab. Hier forschen die Wissenschaftler an der Vergasung von Biomasse und ihrer Anwendung für dezentrale Anlagen zur Energie- und Wasserstoffversorgung. Für „HotVeGas“ hat das Institut 2009 einen neuen, erheblich größeren Hochtemperaturflugstromvergaser installiert. Damit werden physikalische und chemische Vorgänge bei der Vergasung unterschiedlicher Kohlearten und bei unterschiedlichen Temperaturen und Drücken untersucht werden – experimentell,

aber im großtechnischen Maßstab. Zur Untersuchung der Vorgänge innerhalb des Reaktors kommen optische Messverfahren zum Einsatz, da die Prozesse möglichst ungestört durch Messtechnik ablaufen sollen.

Sauberkeit kontra Wirkungsgrad

Mit Hilfe einer an den Reaktor angeschlossenen Abkühlstrecke untersuchen die Wissenschaftler zudem das Verhalten von Spurenstoffen bei der Abkühlung des Gases. „Das Verständnis dieser Prozesse ist eine wichtige Voraussetzung, um die Gasaufbereitung zu optimieren“, sagt Spliethoff. Bisher durchläuft das Rohgas zur Reinigung von Aschepartikeln, Schwefel und anderen unerwünschten Spurenstoffen ein aufwendiges Verfahren, in dessen Verlauf es mehrfach abgekühlt und wieder aufgeheizt wird. „Das kostet Energie und senkt ▶



Grafik: edlundsepp nach Vattenfall

Komplexes Verfahren – von der Kohle zum Strom: Im IGCC-Kraftwerk wird Kohle zunächst vergast; den dazu nötigen reinen Sauerstoff liefert eine Luftzerlegungsanlage. Das Rohgas wird in mehreren Prozessen von Schwefel, Staub und Kohlendioxid befreit und dann in einer Gasturbine verbrannt. Deren Abgas erhitzt zusätzlich Dampf, der eine Dampfturbine antreibt. Beide Turbinen sind mit Stromgeneratoren gekoppelt



E.ON Future Award 2009

Wissenschaftspreis für herausragende Dissertationen und Abschlussarbeiten an der Technischen Universität München.

Bei uns wird Kreativität und Innovation belohnt:

Die drei besten Dissertationen werden mit je 10.000 Euro prämiert!

Für die sechs besten Abschlussarbeiten gibt es 5.000 Euro!

Der E.ON Future Award wird in Kooperation mit der TU München verliehen. Schirmherren sind Prof. Dr. Dr. h. c. Wolfgang A. Herrmann, Präsident der TU München, und Bernhard Fischer, Mitglied des Vorstands der E.ON Energie AG.

Ihre Energie gestaltet Zukunft.



Bewerben Sie sich jetzt bis zum

31. August 2009

unter: www.eon-future-award.com

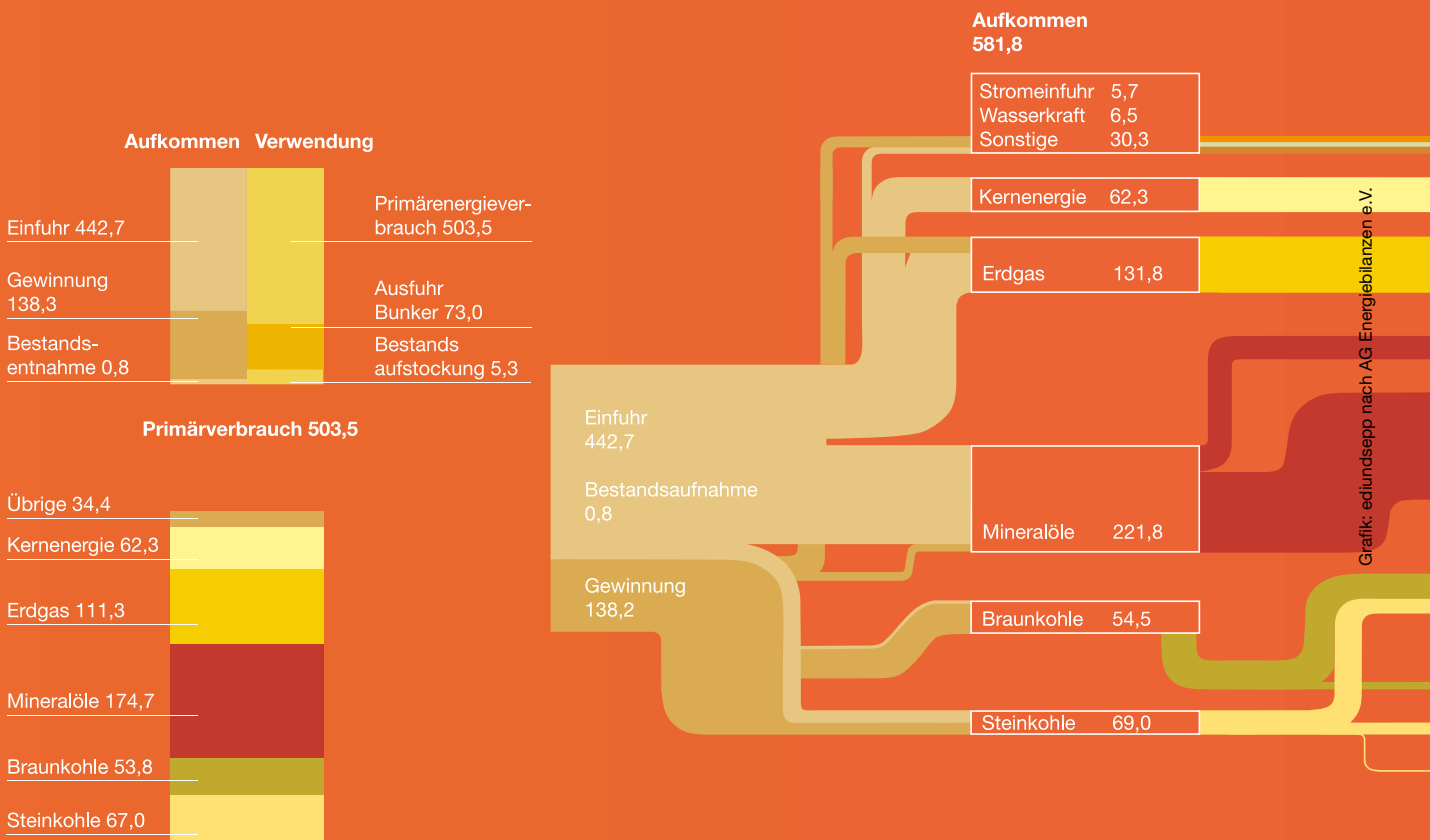
In Kooperation mit:





Illustration: edlundsapp

Energieflussbild der Bundesrepublik Deutschland



den Wirkungsgrad des Gesamtsystems. Deshalb suchen wir nach neuen Methoden, um das Gas ohne größere Temperaturänderungen zu reinigen.“

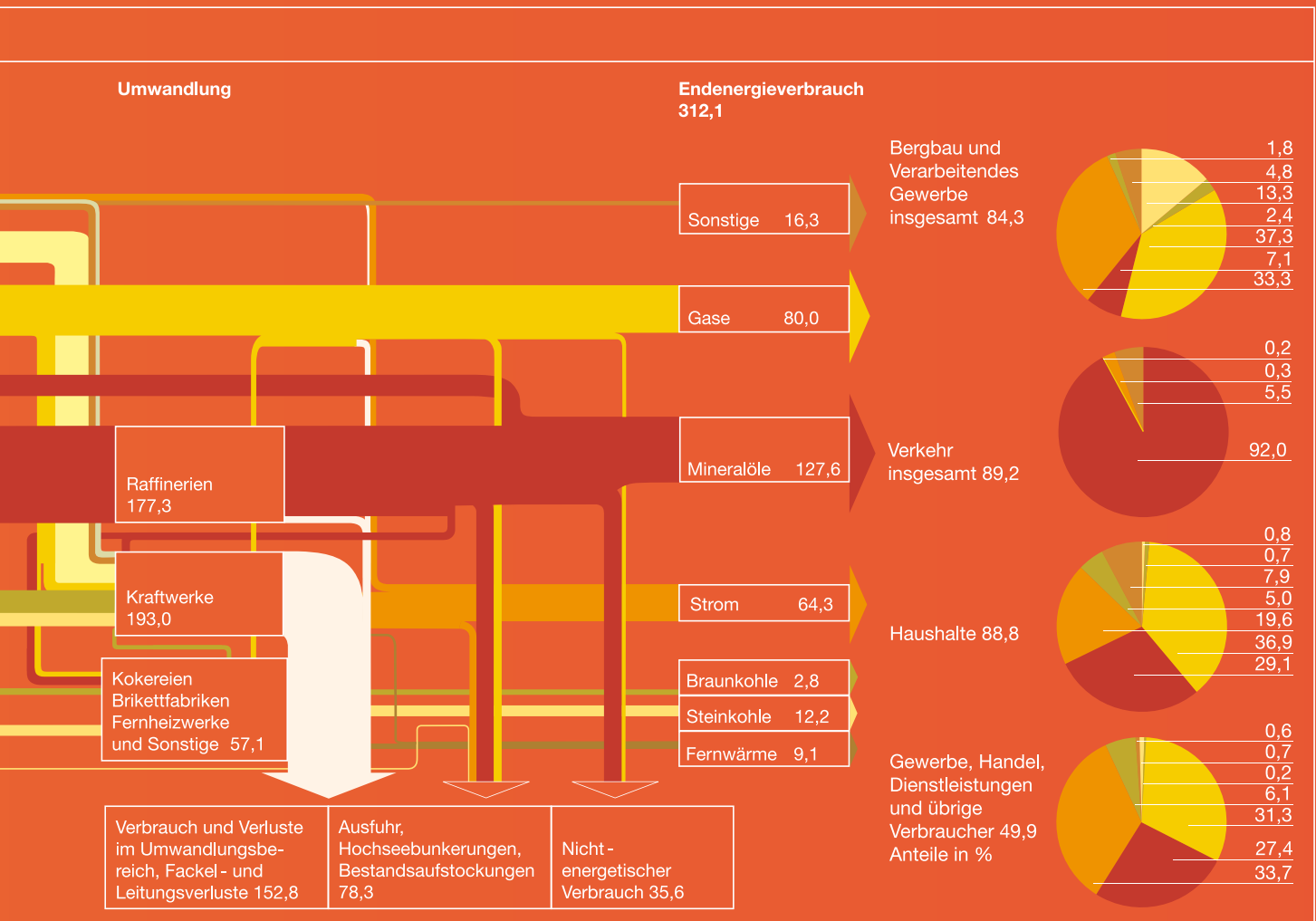
Effizientere Technologien

Auch die Kohlendioxidabscheidung kostet derzeit noch massiv Wirkungsgrad. „Ein IGCC-Kraftwerk mit CCS hat einen um rund zehn Prozentpunkte schlechteren Wirkungsgrad als das gleiche Kraftwerk ohne CCS“, sagt Spliethoff. Deshalb sucht die „HotVeGas“-Forschungsgruppe auch hier nach effizienteren Technologien, etwa Heißgasreinigung und Membranen. Um ihre Forschungsergebnisse für die Praxis verwertbar zu machen, entwickeln die Forscher zudem Computational Fluid Dynamics (CFD)-Modelle, mit denen sich die Prozesse bei der Vergasung sowie das Verhalten von Partikeln und Spurenstoffen im Vergaser und bei der Abkühlung des Rohgases berechnen lassen. Anhand der experimentell ermittelten Daten werden diese Modelle dann auf Richtigkeit überprüft. Ziel ist es, die komplexen Wechselwirkungen zwischen dem Feststoff und dem

entstehenden Gas sowie die Strömungen innerhalb des Vergasers nachbilden zu können, damit die Computermodelle für großtechnische Vergasungsprozesse eingesetzt werden können.

Last but not least befasst sich „HotVeGas“ nicht nur mit der Vergasung, sondern betrachtet auch den komplexen Gesamtprozess des IGCC-Kraftwerks. Denn um den Wirkungsgrad zu verbessern, müssen alle Komponenten der Anlage optimal aufeinander abgestimmt sein. Auch über zusätzliche Verwendungsmöglichkeiten für das Gas denken die Wissenschaftler nach: So könnten IGCC-Kraftwerke in Zukunft nicht nur Strom erzeugen, sondern nebenbei auch synthetische Kraftstoffe für die Nutzung in Kraftfahrzeug-Verbrennungsmotoren produzieren.

Sofern dies in Kombination mit CCS passiert oder statt Kohle Biomasse als Rohstoff dient, ließe sich so ein Teil der Kohlendioxid-Emissionen des Individualverkehrs vermeiden – und das ehrgeizige Klimaziel des IPCC würde dank der Forschungen der TUM-Wissenschaftler wieder ein Stück näher rücken. *Matthias Hopfmüller*





Prof. Martin Buss: „Wir müssen auch fragen, ob ein Roboter eines Tages lieben darf und wer das entscheidet“

Können Roboter lieben?

Noch nicht. Aber vielleicht bald? Ein Philosoph und ein Ingenieurwissenschaftler im Gespräch über Chancen und Grenzen des Verhältnisses von Mensch und Maschine

Erst durch Fähigkeiten wie Wahrnehmung, Überlegung, Lernen und Planen werden komplexe technische Systeme zu Maschinen, „die wissen, was sie tun.“ Der Exzellenzcluster Kognition für Technische Systeme, kurz: CoTeSys, untersucht, wie Roboter mit solchen kognitiven Fähigkeiten ausgestattet werden können. Ziel ist es, Maschinen zu entwickeln, die in komplexen Situationen „richtig“ handeln. Wie autonom werden solche Maschinen sein? Werden Menschen die technischen Neuerungen akzeptieren? Und können Roboter irgendwann lieben? Christiane Haupt im Gespräch mit dem Sprecher des Clusters CoTeSys Prof. Dr. Martin Buss und dem Wissenschaftsphilosophen Prof. Dr. Klaus Mainzer.

Herr Prof. Buss, Herr Prof. Mainzer, ein britischer Sketch: Auf einer Einkaufsstraße steht eine Personenwaage, die angeblich sprechen kann. Als ein Passant Münzen einwirft, sagt sie allerdings nicht nur sein Gewicht in Kilo und Gramm, sondern ge-

steht ihm auch ihre Liebe. Der Passant, dem das peinlich ist, versucht die Waage zum Schweigen zu bringen, doch die Waage beteuert immer lautstärker, dass sie ihn liebt. Schließlich ist es dem Mann so unangenehm, dass er sie mit nach Hause nimmt. Herr Prof. Buss, müssen wir uns darauf einstellen, dass uns so etwas eines Tages mit Robotern passiert? Können Roboter Gefühle haben, ja sogar lieben?

Buss: Das ist eine interessante Frage. Doch eigentlich müssten wir sie anders stellen: Die Frage ist vielmehr, ob Roboter eines Tages lieben dürfen und wer das entscheidet. Ist das Zusammenleben mit einer Maschine religiös, ethisch und philosophisch überhaupt vertretbar? Momentan beschäftigen uns solche Fragen in der Robotik tatsächlich und das Zusammenleben von Mensch und Roboter in der Zukunft wird weltweit diskutiert. Aber vielleicht sollte Herr Mainzer diese Frage beantworten...

Prof. Klaus Mainzer: „Wir sind heute dabei, mit der Technik die Evolution fortzusetzen“

Link
www.cvl-a.de www.cotesys.org

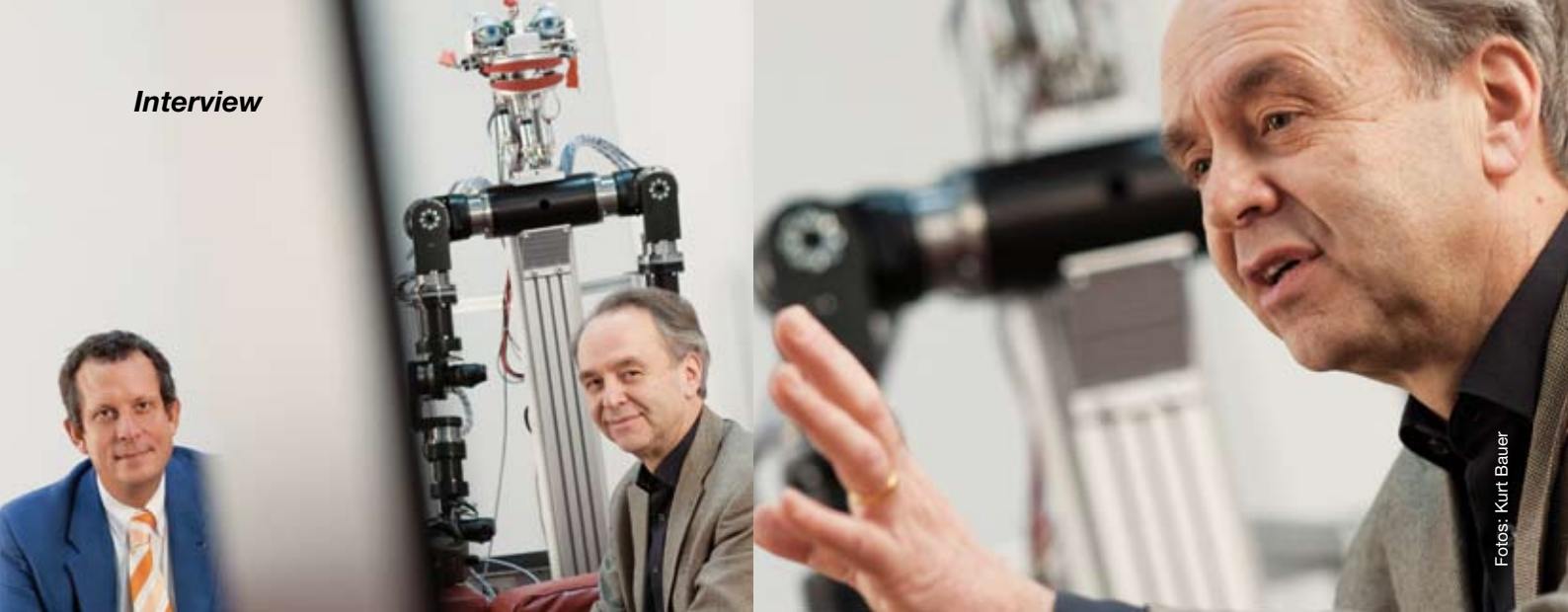
Mainzer: Dieses Jahr feiern wir den 200. Geburtstag von Charles Darwin und die Entdeckung der Evolution. Meiner Meinung nach sind wir heute dabei, mit der Technik die Evolution fortzusetzen. Ein Roboter als Lebenspartner mag eine Vision sein, die für unsere Generation schockierend ist. Aber ich kann mir vorstellen, dass es in späteren Jahrhunderten denkbar und möglich sein wird, dass Maschinen Bewusstsein und damit auch Gefühle haben. Die Sensorik bei Robotern ist schon recht weit fortgeschritten. Und das sind die ersten Schritte hin zu Empfindungen. Denken sie an die Evolution: Die hat mit einfachsten Mikroben angefangen und daraus hat sich relativ schnell unsere Lebensform entwickelt. Das kann man auch auf die Robotik übertragen. Hier forscht man erst seit 20 Jahren. Was die Wissenschaft in dieser Zeit entwickelt hat, ist erstaunlich.

Buss: Das Bild der Evolution gefällt mir nicht so gut, weil ich dabei immer Hollywood vor Augen habe. Nehmen Sie zum Beispiel die Filme Terminator oder Ma-

trix, da geht es darum, dass Roboter den Menschen eliminieren oder als Energiequelle anzapfen. Darum kann es in der Robotik nicht gehen, und es ist auch nicht meine Vision, dass Menschen von Maschinen verdrängt werden. In meiner fachlichen Heimat, der Automatisierungstechnik, gab es auch lange Zeit die Angst, dass der Mensch durch Maschinen ersetzbar ist. Das ist natürlich nicht der Fall. Vielmehr war das Ziel der Ingenieure, die Qualität der Arbeit für den Menschen zu erhöhen und unangenehme Aufgaben an Maschinen zu delegieren. Die Robotik folgt der gleichen Vision. Es geht uns darum, die Lebensqualität des Menschen zu steigern, nicht darum, den Menschen zu ersetzen.

CoTeSys forscht an den so genannten „denkenden“ Maschinen. Herr Buss, um was geht es in diesem Exzellenzcluster genau?

Buss: Wir beschäftigen uns in der Forschung mit dem geschlossenen Regelkreis Perzeption – Kognition – ▷



Fotos: Kurt Bauer

Kurzbiografien

Prof. Dr. Martin Buss studierte in Darmstadt Elektrotechnik und wurde an der kaiserlichen Universität Tokio promoviert. 2000 habilitierte Buss sich an der TUM und folgte dann dem Ruf an die TU Berlin auf den Lehrstuhl für Regelungssysteme. Seit 2003 hat er den Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik der TUM inne. Neben der Weiterentwicklung von klassischen Methoden der Regelungs-, Steuerungs- und Systemtheorie ist Buss besonders am praktischen Einsatz der regelungssystemtechnischen Entwurfs- und Analyseverfahren in Mechatronik, Robotik, Medizintechnik, Kommunikationstechnik, Telepräsenz- und Mensch-Maschine-Systemen interessiert. Er ist Koordinator des Exzellenz-Clusters Kognition für Technische Systeme (CoTeSys) und Sprecher des Sonderforschungsbereichs Wirklichkeitsnahe Telepräsenz und Teleaktion.

Prof. Dr. Klaus Mainzer studierte Mathematik, Physik und Philosophie an der Universität Münster und habilitierte sich dort 1979 im Fach Philosophie. 1980 erhielt er ein Heisenberg-Stipendium und wurde 1981 auf den Lehrstuhl Grundlagen und Geschichte der exakten Wissenschaften der Universität Konstanz berufen. Von 1988 bis 2008 war er Professor für Wissenschaftsphilosophie an der Universität Augsburg. Dann wurde er zum wissenschaftlichen Direktor der neu gegründeten Carl von Linde-Akademie der TUM ernannt und gleichzeitig auf den neu gegründeten Lehrstuhl für Philosophie und Wissenschaftstheorie berufen. Er beschäftigt sich aus philosophischer Perspektive mit komplexen Systemen, dem Paradigma der Selbstorganisation, der Chaostheorie und künstlicher Intelligenz.

Aktion. Wir studieren den Menschen, der in der Lage ist, mit Sensorik die Welt wahrzunehmen, darüber zu reflektieren und auf Basis dieser Wahrnehmung und auf der Grundlage seines Wissens Entscheidungen zu fällen, die schließlich zu einer Aktion in der physikalischen Welt führen. Das geht zurück auf das Gebiet der Künstlichen Intelligenz (KI). Die KI hatte zwar große Erfolge in der theoretischen Forschung, aber wenig Erfolg in der praktischen Umsetzung. Heute verfolgen wir die These, dass es einen Körper braucht, damit sich Intelligenz entwickeln kann. Man spricht von der „embodied intelligence“. Das heißt, dass man nur durch Anfassen und Wahrnehmung der Umgebung und durch Aktion in dieser Umgebung Intelligenz entwickeln kann.

Mainzer: In der klassischen KI ist man lange Zeit von der falschen Hypothese ausgegangen, dass der Geist vom menschlichen Körper separierbar ist. Und man dachte, dass man den Geist formal in einer Software abbilden könnte. Inzwischen hat man festgestellt, dass das Denken sehr stark von der Sensorik abhängt. Und das bei jeder Art von Denken! Selbst wenn wir Mathe-

matik betreiben, ist das bei uns emotional unterfüttert. So funktioniert der menschliche Geist und deswegen kommen wir auch so gut zurecht. Unsere Sensorik und unsere Erfahrungen helfen uns in hochkomplexen Situationen, die wir überhaupt nicht als komplex empfinden. Eine Maschine hat zum Beispiel große Schwierigkeiten, einen Bleistift auf den Fingern zu balancieren. Die Freiheitsgrade sind physikalisch so groß, dass dies in keinem Programm umgesetzt werden kann.

Buss: Normalerweise sind in einem klassischen automatisierungstechnischen System Entscheidungen fest vorprogrammiert. Ingenieure überlegen sich die möglichen Abfolgen eines Prozesses sowie Randbedingungen, die den Prozess negativ beeinflussen. Jede Eventualität wird vorher durchdacht. Das führt zu einem Programm für diesen fest vorgegebenen Ablauf. Mögliche Probleme, die den Prozess behindern könnten, werden mit wenn-dann-Abläufen in diesem Programmcode verzweigt. Das funktioniert für den Autobau oder für eine Rakete, die in die Erdumlaufbahn geschossen werden soll. Eine Küche zum Beispiel ist wesentlich



komplexer. Bisher ist es nicht gelungen, ein Programm für das Ein- und Ausräumen einer Spülmaschine zu schreiben. Das versuchen Forscher schon seit 20, 30 Jahren, aber sie sind bisher kläglich gescheitert. Wir möchten weg von diesen deterministischen Sequenzen, hin zu einer statistischen Erfolgswahrscheinlichkeit. Ziel ist, dass es in einer Mehrheit der Fälle gut funktioniert.

Mainzer: Das ist ja bei uns Menschen auch der Fall. Wir sind auch nicht die perfekten Spülmaschineneinräumer. Vielmehr lösen wir die Aufgaben mehr oder weniger gut. Aber das reicht ja, um in der Welt zurechtzukommen.

CoTeSys entwickelt ja auch Roboter, die zum Beispiel das Ausräumen einer Spülmaschine planen und lernen können. Wie autonom können Roboter werden?

Buss: Das ist eine sehr komplexe Frage, die sich eigentlich auf unser ganzes Gespräch bezieht. Die Frage ist: Wie autonom soll er sein? Was ist technisch möglich? Und wie autonom darf er sein? Ich beantworte es mal von der technischen Seite. Ich bin sehr stolz auf die zwei Postdocs Dr. Kolja Kühnlenz und Dr. Dirk Wollherr an meinem Lehrstuhl. Die waren in der Lage, einen Roboter zu bauen, der allein den Weg von der Uni zum Marienplatz gefunden hat. Er fand den Weg ohne Karte oder GPS, nur durch Befragung der Passanten. Für diesen Weg brauchte er zwar fünf Stunden, aber das Tolle war, dass er in dieser Zeit völlig autonome Entscheidungen aufgrund der Aussagen der Passanten getroffen hat.

Das klingt noch weit entfernt davon, dass Roboter tatsächlich Aufgaben in unserer Welt übernehmen können. Von welchem Zeitraum sprechen wir, wenn wir darüber nachdenken, Roboter zu Hause einzusetzen?

Mainzer: Ich habe über Zielvorgaben gelesen, die das japanische Technologieministerium herausgegeben hat: Das Ziel ist, bis 2010 einen Roboter zu bauen, der wie ein Mensch gehen kann. Bis 2015 soll ein Roboter Greifaufgaben wie ein Mensch lösen können. Für 2020 ist die Zielvorgabe, dass Roboter mit Menschen zusammenleben können. Das sind schon sehr realistische Zeiträume, die wir alle vermutlich noch miterleben können.

Buss: Im akademischen Umfeld werden wir in fünf bis zehn Jahren deutliche Fortschritte erleben. Wie sich das in Produkte umsetzen lässt, die bezahlbar sind, das ist noch eine andere Frage. Die Japaner wollen 2050 mit einer Robotermannschaft gegen den amtierenden Weltmeister im Fußball antreten. Dafür müssen noch deutliche technologische und theoretische Fortschritte erzielt werden.

Denken dann Roboter genauso wie Menschen, wenn sie auch wie Menschen Fußball spielen können?

Buss: Aus meiner Sicht ist es ein Glück, dass wir das Prinzip des menschlichen Gehirns noch nicht kennen. Sonst könnte man es einfach in Halbleiter gießen und man hätte eine Maschine, die eine Millionen Mal schneller denken kann als der Mensch. Wenn das Prinzip mal bekannt ist, dann müssen wir wohl wirklich aufpassen. Allerdings wird es in den Rechenleistungen enorme Fortschritte geben. Der handelsübliche Computer wird schon 2051 mehr Rechenleistung als ein menschliches Gehirn haben und 2057 mehr als alle lebenden Menschen zusammen.

Mainzer: Tatsächlich lässt sich die Rechenkapazität des Gehirns abschätzen: Wenn wir von ca. 10^{11} Neuronen pro Gehirn und im Durchschnitt 10^3 synap- ▷

Interview

tischen Verbindungen pro Neuron ausgehen, sind wir bei 10^{14} synaptischen Verbindungen im Gehirn. Leider ist das Gehirn mit 200 Rechenoperationen pro Sekunde relativ langsam. Jedenfalls erhalten wir dann etwa 2×10^{16} Operationen für das gesamte Gehirn als Rechenkapazität.

Nun kommt das Mooresche Gesetz ins Spiel, nach dem sich die Rechenkapazität unserer Computer alle zwölf Monate – manche sagen 18 Monate – verdoppelt. Je nachdem wie man dieses Wachstumsgesetz ansetzt, könnte die Rechenkapazität des Gehirns bereits in den zwanziger Jahren von einem normalen Laptop überholt werden. Aber man darf nicht vergessen, dass im menschlichen Gehirn nicht alles Rechenleistung ist. Unsere Gefühls- und Vorstellungswelt ist durch die menschliche Gehirntätigkeit möglich. Das in einem Computer umzusetzen, ist noch mal ein Quantensprung.

Buss: Schwierig ist auch der Bereich der Aktorik, der künstlichen Muskeln. Ein ungelöstes Problem ist das Eigengewicht zum Tragfähigkeitsverhältnis. Beim Menschen ist das super. Unsere Beine wiegen nur einen kleinen Teil unseres Körpergewichts, aber wir können unseren Körper damit tragen. In der Robotik ist das genau anders herum. Der Roboter wiegt zehnmal so viel,



Helfer im Alltag: Nicht nur im Haushalt könnten schon bald intelligente Roboter arbeiten. Auch ihr Einsatz in der Altenpflege wird bereits getestet

wie er tragen kann. Da müssen wir noch einen Faktor 100 überwinden. Das wird eine der großen technologischen Herausforderungen.

Wenn das so schwierig ist, warum möchte man dann überhaupt den Roboter immer menschenähnlicher machen?

Mainzer: Es gibt natürlich Roboter, die haben keine Ähnlichkeit mit dem Menschen. Das hängt immer mit der Funktion zusammen, für die sie gebaut werden. Wenn ein Roboter Kanäle säubern soll, dann braucht er keine menschliche Gestalt. Vielmehr sind sein Aussehen und sein Reaktionsvermögen dieser Funktion angepasst. Die Vorentscheidung, Roboter menschenähnlich zu bauen, hängt nicht davon ab, dass man den Menschen ersetzen möchte. Man baut sie deshalb ähnlich wie den Menschen, weil es einfacher ist, solche Geräte in die Lebenswelt des Menschen einzupassen. Nehmen Sie ein einfaches Beispiel: Ein Roboter, der auf zwei Beinen laufen kann anstatt auf irgendwelchen Rollen oder Schienen, kann unsere Treppen benutzen und braucht keine extra gebaute Rampe, um sich fortzubewegen.

Wie ähnlich kann ein Roboter dem Menschen werden? Werden wir in einigen Jahrzehnten womöglich gar nicht mehr erkennen können, ob es sich um einen Menschen oder eine Maschine handelt?

Buss: Es gibt die wissenschaftliche Hypothese des Uncanny Valley – zu Deutsch „unheimliches Tal“. Wenn Sie ein Koordinatensystem haben, auf der einen Achse die Menschenähnlichkeit und auf der anderen Achse die Akzeptanz, dann kommt es zu einem spannenden Phänomen: Die Akzeptanz der Maschine steigt, je menschenähnlicher sie wird. Aber irgendwann, kurz bevor der Roboter dem Menschen ganz ähnlich ist, gibt es einen Einbruch, der in negativer Akzeptanz endet. Was man daraus lernt, ist, dass man im Bestreben um Anthropomorphologie, um Ähnlichkeit mit dem Menschen, nicht zu weit gehen sollte. Sonst kehrt sich Akzeptanz ins Gegenteil um.

Mainzer: Mein Eindruck ist, man sollte kein Design vortäuschen, das nicht durch Funktion gerechtfertigt ist. Beispielsweise ein Roboter, der die Funktion hat, bettlägerige Patienten zu wenden, wird mit einem Gesicht ausgestattet. Das Gesicht könnte beim Patienten die Illusion wecken, dass er mit diesem Gerät kommunizieren kann wie mit dem Pflegepersonal. Die Enttäuschung könnte dann groß sein, wenn die Maschine nicht adäquat reagiert. Das Design soll ansprechend sein, natürlich, auch kein martialischer Apparat, vor



dem man Ängste entwickelt, aber andererseits so, dass nicht falsche Hoffnungen entstehen.

Roboter als Pflegepersonal – Japaner sind stark an solchen Maschinen für die Pflege von alten Menschen interessiert. Ist die Technikbegeisterung in Japan so viel ausgeprägter?

Mainzer: Das müssten Sie einen Japanologen fragen! Aber ich habe gelesen, dass es in Japan bis vor kurzem kein ausländisches Pflegepersonal gab. Es war ein ungeschriebenes Gesetz, dass Japaner nur von Japanern gepflegt werden dürfen. In Japan kommt es – ähnlich wie bei uns in Deutschland – zu einem Mangel an Pflegepersonal. Vielleicht daher die Motivation, technische Geräte zum Einsatz zu bringen.

Buss: Ich denke, dass hat nicht allein etwas mit der kulturellen Prägung zu tun. Ich habe von einer Umfrage unter älteren Menschen in Deutschland gehört, die allein ohne Familienanschluss zu Hause leben. Von den Befragten konnten sich dreiviertel der Personen vorstellen, mit einem Roboter zusammenzuleben. Das fand ich schon ein überraschendes Ergebnis.

Mainzer: In der Not vergisst der Mensch schon mal seine kulturelle Prägung. Aber ich denke mir: Wenn die Geräte qualitativ gut funktionieren, in der Mensch-Maschine-Aktion akzeptabel sind und dazu das Leben erleichtern, dann werden das die Menschen sicher akzeptieren.

„Viele Menschen haben ein ungutes Gefühl, wenn sie an die Folgen der Technologie für die Zukunft denken. Es besteht die Gefahr, dass die Gesellschaft ohne ausreichende Vorbereitung nur sehr

schlecht damit umgehen wird“ – was halten Sie von der These?

Mainzer: Dieses Zitat würde ich mit einem Fragezeichen versehen! Die Mehrheit der Menschheit ist leider nicht daran interessiert, wie etwas funktioniert. Wer ist schon heute in der Lage, ein Telefon zu erklären? Wichtig ist es, dass es funktioniert. Wir Menschen vertrauen auf Technik. Deswegen ist es so wichtig, dass gute Produkte mit hoher Qualität entwickelt werden. Dann fühlen sich Menschen auch nicht überfordert.

Buss: Ich glaube auch an den ökonomischen Erfolg. Wenn Technik das Leben erleichtert und bezahlbar ist, werden die Menschen sie verwenden. Und ganz ehrlich: Wenn es billiger sein wird, den Patienten mit gut funktionierenden Robotern im Krankenhaus oder im Altenheim zu versorgen als mit Pflegekräften, werden die Pflegekassen nicht lange überlegen.

Herr Buss, Hand aufs Herz: Möchten Sie mit einem Roboter zusammenleben?

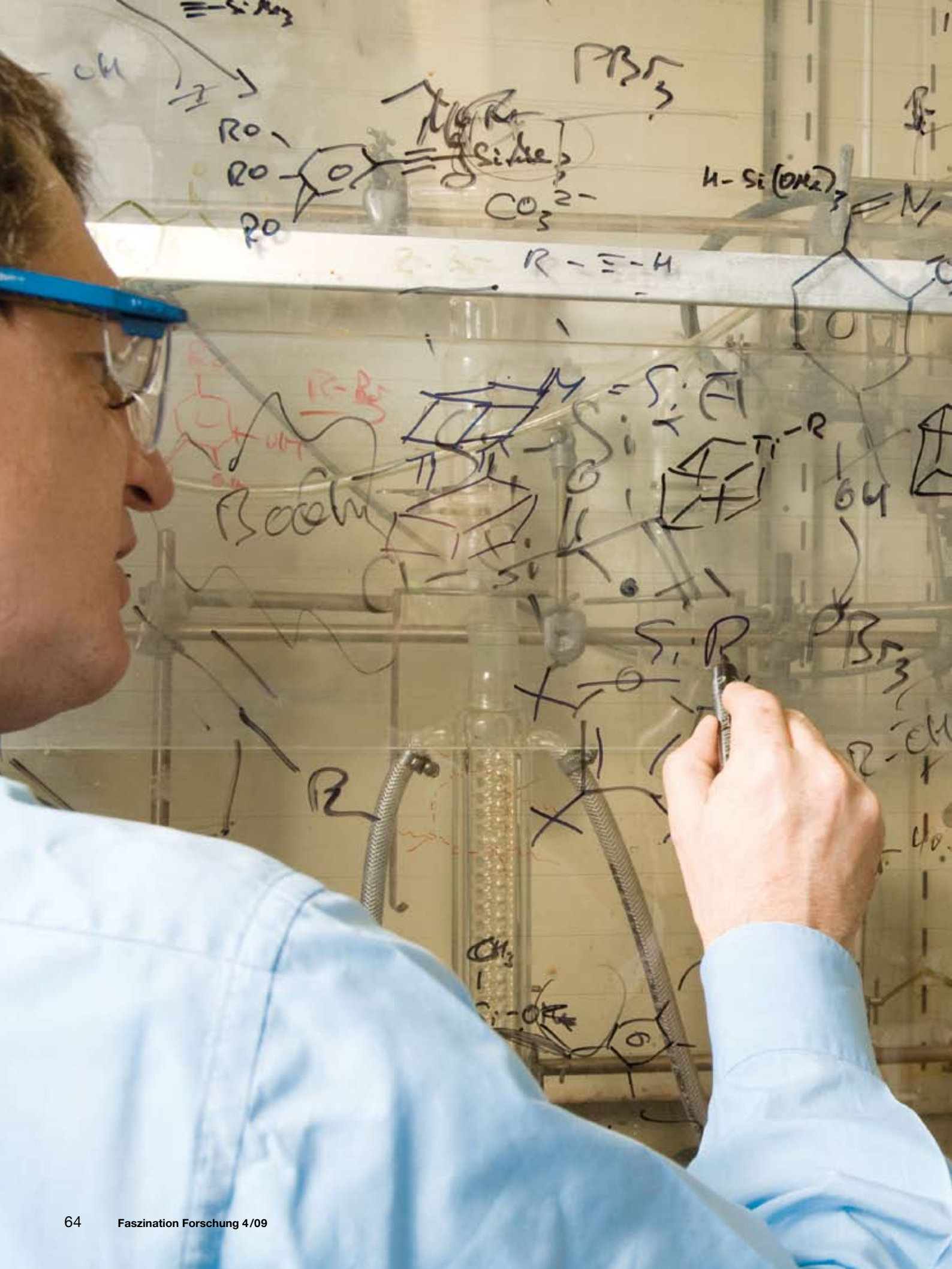
Buss: Ach, ich habe jeden Tag so viele Roboter um mich! Ich glaube, zusammenleben möchte ich frühestens mit einem, wenn ich mal pensioniert bin.

Und was machen Sie dann, wenn er zu Ihnen sagt: „Ich liebe dich!“?

Buss (lacht): Ich würde nachschauen, wer das programmiert hat.

Herr Prof. Buss, Herr Prof. Mainzer, vielen Dank für das Gespräch.

Interview: Christiane Haupt



Vom Klima-Killer zum Kunststoff-Knüller

Was macht man mit CO₂? Am Wacker-Lehrstuhl für Makromolekulare Chemie der TUM entwickeln Prof. Rieger und sein Team daraus kurzerhand hochwertige Kunststoffe. Sie sparen so nicht nur den Rohstoff Erdöl, sondern bieten zudem einen Weg, CO₂ als Rohstoff wiederzuverwenden



Illustration: edlundsepp

Die Moleküle, mit denen er arbeitet, brauchen Energie von außen, um zu reagieren – Bernhard Rieger ist da völlig anders. Während er von seiner Suche nach maßgeschneiderten Katalysatoren erzählt, mit denen er neue Werkstoffe schafft, bleibt Rieger keinen Augenblick still sitzen. Skizziert er eben noch chemische Reaktionen an der Tafel, so steht er im nächsten Moment am Rechner, um ein Diagramm an die Wand zu werfen. Ein paar Augenblicke später kramt er im Schrank und fördert aus seiner Kunststoffsammlung von der Babywindel über die Klarsichtfolie bis zum Blutbeutel verschiedene skurrile Gegenstände zu Tage.

Kunststoffe finden sich fast überall. Ihre Stärke sind ihre vielfältigen Eigenschaften, die sich gezielt produzieren lassen. Durch die Entwicklung neuer Materialien und durch Mischen vorhandener Kunststoffe ist es möglich, für jeden Zweck den passenden Kunststoff zu herzustellen – zum Beispiel besonders schlagfestes Material für Karosserien oder sehr feuchtebeständige Stoffe für Elektronikgehäuse. Die Forschung an neuen Werkstoffen ist immens wichtig, denn sie sind die Grundlage für immer weitere Innovationen. Holger Hanselka, der Leiter des Fraunhofer Instituts für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit, führt heute zwei Drittel aller tech-

nologischen Neuerungen auf neu entwickelte Materialien zurück.

Genau das ist Riegers Forschungsgebiet. Im Jahr 2006 hat er – zu der Zeit noch Professor in Ulm – für die Entwicklung eines biologisch abbaubaren Kunststoffes den hochdotierten Philip-Morris Forschungspreis erhalten. Damals nutzten er und seine Kollegen Kohlenmonoxid und Propylenoxid als Ausgangsstoffe, um das in der Natur vorkommende Polymer Polyhydroxybutyrat (PHB) synthetisch herzustellen. Ein großer Durchbruch, denn PHB ist kompostierbar, und man kann es gezielt mit unterschiedlichen Eigenschaften erzeugen. Durch kleine Veränderungen in der Synthese entstehen zum Beispiel harte oder weiche PHB-Materialien, die wiederum zu so verschiedenen Produkten wie Tüten oder Autoteilen führen.

Mittlerweile leitet Rieger den Wacker Lehrstuhl für Makromolekulare Chemie an der TUM und hat einen neuen Rohstoff im Visier: Kohlendioxid (CO_2). Es treibt ihn vor allem die Neugier: Was für eine Art Polymer könnte aus diesem neuen Ausgangsmaterial entstehen? Was passiert, wenn man CO_2 mit diesem oder jenem Katalysator zusammenbringt? Was wird man mit dem entstandenen Stoff machen können? Hinzu kommen ökologische und

Neue Werkstoffe und ihr Potential

Kohlenstoff war in der Vergangenheit vor allem in zwei Formen bekannt – Graphit und Diamant. In den letzten 25 Jahren haben Wissenschaftler immer neue Kohlenstoffformen entdeckt. Fullere, die aus riesigen fußballförmigen Molekülen bestehen, und Nanoröhrchen, winzige Strukturen aus 100 - 10000 Atomen.

Nanoröhren sind heute eines der interessantesten Forschungsgebiete. Je nachdem, zu welchen Netzformen die Wissenschaftler sie zusammenfügen und wie sie chemisch bearbeitet sind, leiten sie elektrischen Strom wie Metalle oder verhalten sich wie der Halbleiter Silicium.

Anders als Silicium sind sie durchsichtig und biegsam – und schon lassen sich elastische Solarzellen und dergleichen mehr denken.

Noch steckt die industrielle Verwertung von Kohlenstoff-Nanonetzen in den Kinderschuhen.

Prof. Bernhard Rieger vom Wacker Lehrstuhl für Makromolekulare Chemie macht sich unterdessen im neu gegründeten „Institut für Siliciumchemie“ daran, neue Formen von Silicium und seinen Verbindungen zu synthetisieren – und erwartet ähnlich revolutionäre neue Werkstoffe. Rieger hält Silicium für eines der vielversprechendsten Elemente. Zum einen, weil es – anders als Kohlenstoff – in großer Menge als Rohstoff vorhanden ist, zum anderen weil es wegen seiner herausragenden elektrischen und optoelektronischen Eigenschaften ein überaus breites Anwendungsspektrum verspricht.

ökonomische Aspekte: Kunststoffe werden heute zu 100 Prozent aus Erdöl hergestellt. Obwohl nur ca. sechs Prozent des deutschen Erdölverbrauchs auf die Kunststoffproduktion entfallen, ist Rieger überzeugt, dass Europa bei der Entwicklung ölfreier Kunststoffe ganz vorne mit dabei sein muss. Reines CO₂, wie er es zur Polymerherstellung braucht, gibt es genug. Es fällt in bestimmten Industriezweigen an, die es seit den weltweiten Bestrebungen, den CO₂-Ausstoß zu verringern, abtrennen müssen. Anstatt es zu lagern, kann man es auch – wie Rieger – als Rohstoff betrachten und wiederverwerten.

Wie entsteht ein neuer Werkstoff?

Kunststoffe sind Polymere. Das bedeutet: Sie bestehen aus langen Ketten der immer gleichen Molekülbausteine. Neue Ausgangsstoffe – wie CO₂ – liefern neue Einzelbausteine, während die Reaktionsbedingungen und die Art der Katalysatoren die Struktur des neu geschaffenen Polymers beeinflussen. Kohlendioxid ist ein stabiles Produkt von Verbrennungsprozessen. Es reagiert nur, wenn es Energie von außen bekommt. Dafür nutzt Rieger das Epoxid Propylenoxid. Epoxide sind ringförmige Moleküle, die extrem gespannt sind und sehr leicht reagieren. Sie lagern sich an CO₂ an und schaffen eine offene Stelle, die ein weiteres Molekül binden kann. Epoxid und CO₂ alleine ergeben allerdings noch kein Polymer

– sie brauchen Katalysatoren, mit denen die Reaktion schneller abläuft. Ihnen fällt eine Schlüsselrolle zu: Die Form und die Art des Katalysators beeinflussen die Form der Molekülkette und damit die Eigenschaften des entstandenen Stoffs. Einen neuen Werkstoff zu schaffen, heißt für Rieger, sich einen Katalysator zu überlegen, der dem Endprodukt die gewünschten Eigenschaften verleiht.

Rieger ist zudem ein ausgewiesener Experte für Metallocene – die neuste Generation von Katalysatoren für die großtechnische Kunststoffherstellung. „Gedanken materialisieren“ nennt er es, wenn er Stoffe, die es seiner Vorstellung nach geben könnte, im Labor schafft. Solche Synthesen brauchen viel Gespür und sind nie exakt planbar. Ihr Resultat ist letztendlich immer ein unbekannter Stoff.

Damit beginnt die Arbeit in Riegers Analyselabor. Wie sieht die neue Substanz aus? Wo hat sich der Katalysator angelagert, welche Molekülbausteine sind entstanden? Und mit welchen Materialeigenschaften geht diese Struktur einher? Je besser man diese Zusammenhänge versteht, desto gezielter kann man neue Materialien entwickeln. Ein Flüssigkeitschromatograph zerlegt den neuen Stoff in seine einzelnen Bestandteile. Mit ▶

Druckreaktoren für die Polymerisation kann Riegers Team bis zu einigen Kilo Kunststoff herstellen und in der eigenen Spritzgussanlage in Form gießen. Ein Rasterelektronenmikroskop liefert hochgenaue Daten über deren Oberflächenbeschaffenheit und die Verteilung der chemischen Elemente. Letztere gibt Aufschluss über die Struktur des Kunststoffs, ob die Materie klumpt oder wie sich die einzelnen Molekülgruppen verteilen. Zusätzlich wird die Materialbeschaffenheit, wie zum Beispiel Schlagfestigkeit und Temperaturstabilität untersucht.

Schlagfest oder biegsam

Oft sind die Eigenschaften der entstandenen Kunststoffe im Vergleich mit Standardmaterialien – zum Beispiel PVC oder Polypropylen (PP) – noch nicht perfekt. Dann überlegt Riegers Team, wie sie dem Material die gewünschte Eigenschaft verleihen könnten. Ein anderer Katalysator, der anders eingebaut wird? Wie müsste der aussehen? Kleinere Ausgangsmoleküle? Weichmacher, die nachträglich ins Plastik eingetragen werden?

Erste Erfolge gibt es schon: Rieger legt eine transparente, harte, einige Millimeter dicke Plastikplatte auf den Tisch. Sie besteht aus Polypropylencarbonat (PPC), einem Kunststoff, den er aus CO_2 und Propylenoxid synthetisiert hat. Der Stoff ist eine Abwandlung des be-

kannteren Polycarbonats, hat aber ganz neue Eigenschaften: Während Polycarbonat extrem schlagfest ist, kann Rieger seine Platte biegen, wenn er sie mit den Händen anwärmt. Die Glasübergangstemperatur, bei der ein Kunststoff biegsam wird, liegt für PPC schon bei einigen 30°C . Die Industrie bekundet bereits Interesse, weil sich mit einem solchen Material ganz neue Anwendungen und Verarbeitungsmöglichkeiten denken lassen.

Im Fall von PPC ist Rieger am Ziel angekommen. Als Grundlagenforscher mit Leib und Seele wendet er sich, sobald die Machbarkeit eines neuen Polymers sich zeigt, neuen Ideen zu. Er möchte sein Labor zu einem Zentrum für die katalytische Herstellung von Werk- und Wirkstoffen aus CO_2 entwickeln – auch als Anlaufstelle für die internationale Industrie, mit der er seit Jahren eng zusammenarbeitet.

Weil man viel Energie aufwenden muss, um aus CO_2 Werkstoffe zu schaffen, ist das Verfahren nur sinnvoll, wenn dabei hochwertige Produkte entstehen. Dass er derer noch viele finden wird, davon ist Rieger überzeugt, nicht zuletzt wegen seiner Doktoranden, die ihm besonders am Herzen liegen: „Es gibt mehr als genug Ideen zu CO_2 , und man braucht viele gute Leute, um diese Ideen zu testen und zu erforschen“, so der Professor. Und seine Augen leuchten dabei.

Christine Rüth





Lieblingslehrer gesucht!

Die Zukunft der Schule beginnt bei uns.

Leuchtet bei Mathe

Lächelt bei Chemie

Pocht bei Bio

$P = 2l +$
 xr

Je begeisterter der Lehrer, desto besser die Schüler! Studiere jetzt an der neuen TUM School of Education. In der praxisnahen Lehrerausbildung in Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik kannst du deine Ideen schon ab dem ersten Semester in einer Schule ausprobieren. Abschluss: Bachelor und Master of Education für das berufliche und gymnasiale Lehramt.

Schreib dich ein und mach Schule:

www.edu.tum.de | Telefon-Hotline: 089-28924333



Impressum

Faszination Forschung

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

Herausgeber:

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

Chefredakteurin: Tina Heun, Technische Universität München, Corporate Communications Center

Lektorat: Marianne Waas-Frey

Art Direction: Florian Hugger, Susanne Schmid, ediundsepp Gestaltungsgesellschaft, München

Infografik und Layout:

Alexandra Bankel, Charlotte Binder, Kiril Damyanov, Vladislav Gorolov, Nina Hürlimann,

ediundsepp Gestaltungsgesellschaft, München

Autoren dieser Ausgabe: Dr. Markus Bernards, Dr. Christiane Haupt, Matthias Hopfmüller, Florian Hugger, Sibylle Kettembeil, Dr. Brigitte Röthlein, Christine Rüth, Helen Sedlmeier

Journalistische Beratung: Prof. Dr. Christoph Fasel, fasel! Medien-Kommunikation-Beratung, Tübingen

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: 30.000; **ISSN:** 1865-3022

Erscheinungsweise: zweimal jährlich

Verantwortlich für den redaktionellen Inhalt:

Tina Heun

Verantwortlich für die Anzeigen: Tina Heun

Titelbild: ediundsepp

© 2009 für alle Beiträge Technische Universität München, Presse & Kommunikation, 80290 München. Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, Aufnahme in Onlinedienste und Internet, Vervielfältigung auf Datenträgern nur mit ausdrücklicher Nennung der Quelle: „Faszination Forschung. Das Wissenschaftsmagazin der Technischen Universität München.“

Anmerkungen zu den Bildnachweisen: Wir haben uns bemüht, sämtliche Inhaber der Bildrechte zu ermitteln. Sollte der Redaktion gegenüber dennoch nachgewiesen werden, dass eine Rechtsinhaberschaft besteht, entrichten wir das branchenübliche Honorar nachträglich.

Die Autoren

Dr. Markus Bernards wurde im Fach Genetik promoviert und ist seit 11 Jahren Wissenschaftsjournalist. Er schreibt für Magazine, Tageszeitungen und Internetseiten und hat als Projektleiter verschiedene populärwissenschaftliche Magazine, unter anderem des Bundesforschungsministeriums und der Firma Bayer, konzipiert und betreut. Seit 2008 arbeitet er als PR-Referent an der Technischen Universität München.

Dr. Christiane Haupt ist seit 2008 PR-Referentin an der Technischen Universität München. Nach einem Zeitungsvolontariat studierte sie an der Ludwig-Maximilians-Universität München und an der Xiamen University China Sinologie und Religionswissenschaft und wurde mit einer Arbeit über Konfuzius promoviert.

Matthias Hopfmüller ist Diplomgeograph und ausgebildeter Redakteur. Zunächst als freier Autor für den Wissenschaftsteil der Süddeutschen Zeitung tätig, wechselte er 2001 in die Konzernzentrale der MAN Gruppe. Dort war er Chefredakteur des Wirtschafts- und Technik-Magazins „MAN Forum“ sowie Pressereferent für Technik- und Nachhaltigkeitsthemen. Seit Juli 2008 arbeitet er als selbstständiger Redakteur und Pressereferent vor allem für die Unternehmensberatung Roland Berger Strategy Consultants. Seine Themenschwerpunkte sind Energie, Green Technology und Klimaforschung.

Florian Hugger, hat nach seiner Schulzeit in Bayern und Finnland Architektur studiert und seine Lehrjahre als Assistent für Gestaltung und Darstellung an der Technischen Universität München verlängert. Er ist Mitinhaber der ediundsepp Gestaltungsgesellschaft und des Architekturbüros Lang Hugger Rampp, was zu einem breit gefächerten Tätigkeitsfeld in den Bereichen Kommunikation, Architektur und Gestaltung führt.

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

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

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

Helen Sedlmeier studiert an der Technischen Universität München Luft- und Raumfahrttechnik. Neben dem Studium ist sie als freie Wissenschaftsjournalistin tätig.

FleetCompetence eCO₂

Momente für die Zukunft.



Die neue Dimension des Leasings – www.fleetcompetence-ecoz.de

Profitieren Sie mit FleetCompetence eCO₂ von besonders attraktiven Leasing-Konditionen für schadstoffarme und effiziente Fahrzeugmodelle von Volkswagen. Sie unterstützen damit gleichzeitig Klimaschutzprojekte in Kooperation mit dem NABU und erhalten die Möglichkeit, ECO-Fahrtrainings zu außerordentlich günstigen Konditionen zu nutzen. FleetCompetence eCO₂ – Kombinationen, die überzeugen.



VOLKSWAGEN LEASING

G M B H

Die Revolution des Bauens

Warum entstehen Autos am Fließband – und Bauwerke nicht? Professor Willibald Günthner hat mit seiner Vision, den Bauprozess zu ökonomisieren, ein Forschungsprojekt ins Leben gerufen, das die Erstellung von Bauwerken revolutionieren könnte



Pos 48° 26'11"N - 10° 56'10"E
+543,28 GNM
34,4 m/s, 54,83°
Ankunftszeit 15 Uhr 12



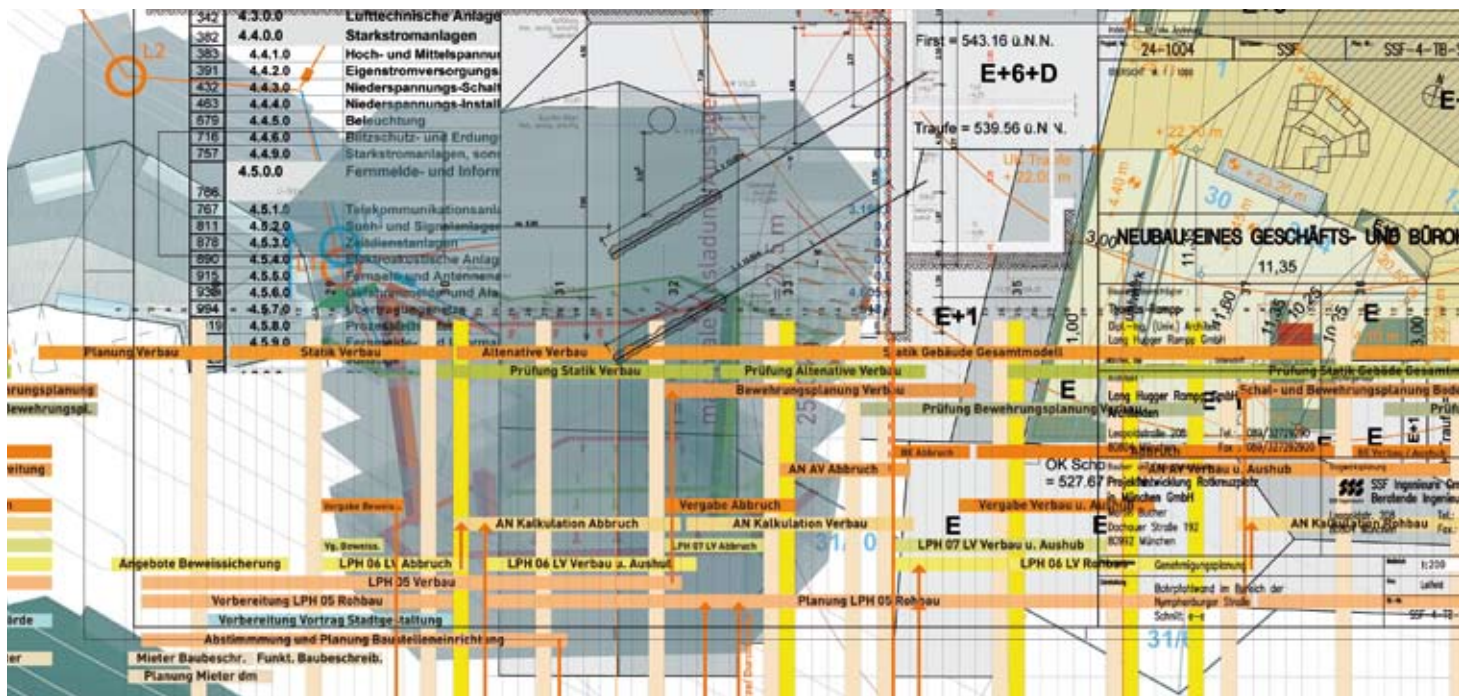
Blitzsaubere Werkzeuge, vollautomatische Fertigungsstraßen, Förderanlagen und Roboter; Bauteile gleiten auf die Facharbeiter zu. Die haben nur Zugriff auf automatisch bereitgestellte Bauteile, was die Fehlerquote dramatisch vermindert. Hier fließt alles, bewegt sich alles, es gibt weder Stillstand noch Schmutz – es herrscht konzentrierte Arbeitsatmosphäre: Der Blick auf eine Produktionsstraße eines Automobilherstellers zeigt uns, dass hochökonomisch, nahezu perfekt und fehlerfrei gearbeitet werden kann.

Wie anders das Bild auf vielen Baustellen! Die häufigsten Probleme, die bei Großprojekten auftauchen: Das Warten auf Spezialisten, die einen wichtigen Arbeitsschritt leisten müssen; fehlendes oder falsch geliefertes Material; falsche Taktung von einzelnen Leistungen und fehlerhafte Planung bis hin zum handfesten Pfusch am Bau. Nicht erfüllte Verträge und Budgetüberschreitungen sind weitere Gründe für das Image der Bauindustrie. ▶



Nachtbaustelle BMW-Welt: Die Luftaufnahme zeigt eine hochkomplexe Baustelle. Das Projekt weist in architektonischer, wirtschaftlicher und technischer Hinsicht höchste Schwierigkeitsgrade auf. Umso wichtiger ist eine gute Ablaufplanung der Baustelle

Datenvielfalt im Planungsprozess



Vorhaben:

Grundlagenermittlung / Vorentwurf

Bauplanung

Der Logistik-Professor Willibald Günthner von der TU München stellte sich deshalb die Frage: Ist es denn wirklich so schwer, eine Baustelle zu koordinieren? Die Antwort lautet: Ja, es ist wirklich schwer. Denn mit der Industrialisierung begann auch im Bauwesen ein Spezialisierungsprozess, der bis heute anhält. Die an einer Bauausführung beteiligten Gewerke nehmen zu, die Präzision der Ausführung, die Anforderungen und die Vorgaben durch Gesetzgebung und Normung erschweren die Ausführung. Kosten- und Termindruck kommen hinzu. Das ist kein branchentypisches Phänomen – denn die Gesetze der Ökonomie gelten für alle Wirtschaftszweige. Andere Branchen aber, wie zum Beispiel die erwähnte Automobilbranche haben sich in Organisation und Logistik flexibler gezeigt und schneller entwickelt. Dabei ist eines wichtig, im Auge zu behalten: Auch das Auto ist kein Produkt von der Stange. Gerade 1,5 VW Golf unter einer Million hergestellter Autos sind identisch – Individualisierung und Modellvielfalt haben zur Folge, dass jedes Auto ähnlich einzigartig ist, wie Bauwerke es auch sind.

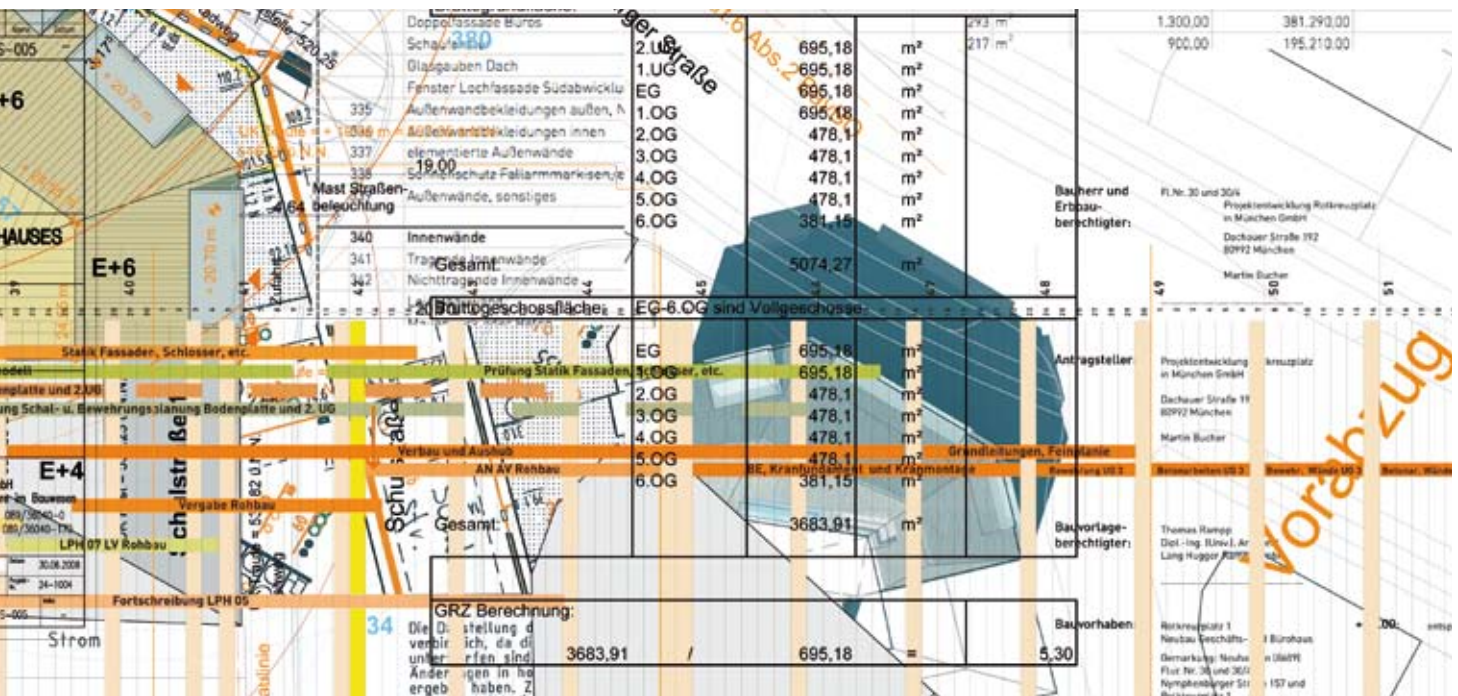
Seit Anfang des vergangenen Jahrhunderts gibt es verstärkte Bestrebungen, die erfolgreichen Prozesse aus der industriellen Produktion ins Bauwesen zu übertragen. Die Architekten träumen seither von Vorfertigung und Baukastensystemen, die Industrie von Fertigungs-

dukten mit Individualisierungsmöglichkeiten, die Hersteller von der weiteren Verbreitung industriell vorgefertigter Produkte.

Automobilkonzerne als Vorbild

Die Effektivität der Automobilbranche kann als Vorbild für Bauprojekte dienen – nicht nur in der technischen, sondern auch in der wirtschaftlichen Bedeutung. 18 Prozent des deutschen Bruttoinlandsproduktes werden im Bau und seinen Folgewerken generiert. Damit ist die Baubranche fast so bedeutend wie die Automobilbranche. In der Automobilbranche werden Optimierungsergebnisse von 25 bis 40 Prozent im Bereich Logistik und Fertigungsorganisation bei Modellwechseln angestrebt. Im Bau nicht – es fehlte bislang an Visionen und an einer erforderlichen, sehr breit angelegten Kompetenz, radikale Veränderungen durchzusetzen, wie sie zum Beispiel in der Automobilbranche, die großen Konzerne aufweisen.

Ein Grund dafür ist der Markt der Baufirmen in Deutschland, der von unzähligen Klein- und Kleinstunternehmen und von nur sehr wenigen Branchengrößen besetzt wird. Man stelle sich im Vergleich vor, dass in jeder Kleinstadt einige Automobilzulieferer und kleinere Automobilbauer ansässig wären. In Deutschland gäbe es nach diesem Modell weit über 10 000 Automarken und ebenso viele



**Realisierung:
Vorbereitung / Ausführung**

Planungsbüros für Automobilbau. Die Zulieferer wären nicht auf einige Abnehmer spezialisiert, sondern würden jeden einzelnen Auftrag für ein Auto neu anbieten, jeden Auftrag neu akquirieren und müssten sich dabei auf immer neue Projektpartner einstellen. Die Folge wäre ein Verlust an Effizienz und Struktur aller Prozesse der Branche.

Professor Günthner entwickelt daraus seine Vision: Wenn eine feste Bindung vieler Gewerke und die Vereinheitlichung der Produkte durch wenige, sehr potente Hersteller einen hochspezialisierten, ausgefeilten und effizienten Herstellungsprozess im Automobilbau entstehen ließ – warum sollte das nicht auch in der Baubranche möglich sein?

In Günthners Vision werden auf der Baustelle der Zukunft Materialien mit hohem Präzisionsgrad vorgefertigt und erst im Moment der Montage geliefert. Die Produkte tragen Informationen mit sich, sie stehen im Datenaustausch mit der interaktiven Planung, die im dreidimensionalen Konstruktionssystem Kosten und Zeit integriert und sich deshalb stets auf die aktuelle Situation einstellen kann. Es entsteht ein Planungssystem, das intelligent und dynamisch reagiert.

Das Projekt „ForBAU“ könnte ein Meilenstein dieser Bestrebungen werden. Das Forschungsprojekt ist im Tiefbau richtig angesiedelt, denn hier ist die Anzahl der be-

teiligten Gewerke geringer und es gilt nicht, einem höheren Gestaltungsanspruch gerecht zu werden wie im Hochbau. Hier setzt die Forschung von Professor Günthner und seinen Mitstreitern an. Die Verbesserungen im Tiefbau sollen nicht durch neue Tiefbautechniken erzielt werden: Es geht vielmehr um Logistik, um Information, Kommunikation und Organisation. Verbessert man diese durch gezielte Forschung und Entwicklung, kann mittelfristig der Straßenbau zum Beispiel über 30 Prozent effizienter werden.

Die ForBAU-Idee: Vereinfachung

Ein Beispiel für diesen Forschungsansatz ist die radikale Vereinfachung der Informationsstruktur. So werden heute für jedes Bauwerk unzählige Plansysteme in z. T. völlig verschiedenen Informationsebenen generiert, es existieren dazu Parallelwelten an Schriftverkehr, unglaubliche Mengen an Bildmaterial von Baustellen und deren Zuständen. Geht es nach ForBAU, so steht zukünftig vor allem die Zusammenführung der Information im Mittelpunkt. Gäbe es zum Beispiel ein zentrales Modell, in das alle Projektpartner ihre Daten einspeisen und aus dem alle Beteiligten lesen, wären viele Arbeiten überflüssig und die Fehlerquellen minimiert. Diese Mutterdatei wird im Projekt ForBAU entwickelt. Sie ist dreidimensional angelegt und kann viele Din- ▶

Bauprozesse

ge, die bisherige Planungswerkzeuge nicht können. Es gibt zukünftig nicht weniger, sondern mehr Daten – aber sie fließen an einer sinnvollen Stelle zusammen. Das Modell ist auf vielen Ebenen vernetzt und bildet das Kernstück des Projekts: Ein solches parametrisches Modell ist dreidimensional, schnell anpassbar und mit zusätzlichen Informationen für nachgelagerte Bereiche versehen. Im Bauwesen bilden ausgedruckte Pläne hingegen zumeist noch immer die Planungsgrundlage, die gelegentlich durch dreidimensionale Zusatzinformation unterstützt wird.

Der Vorteil des produktmodellbasierten Ansatzes ist, dass im Falle einer Bauteiländerung sämtliche Folgeänderungen im System aufgezeigt und sofort simuliert

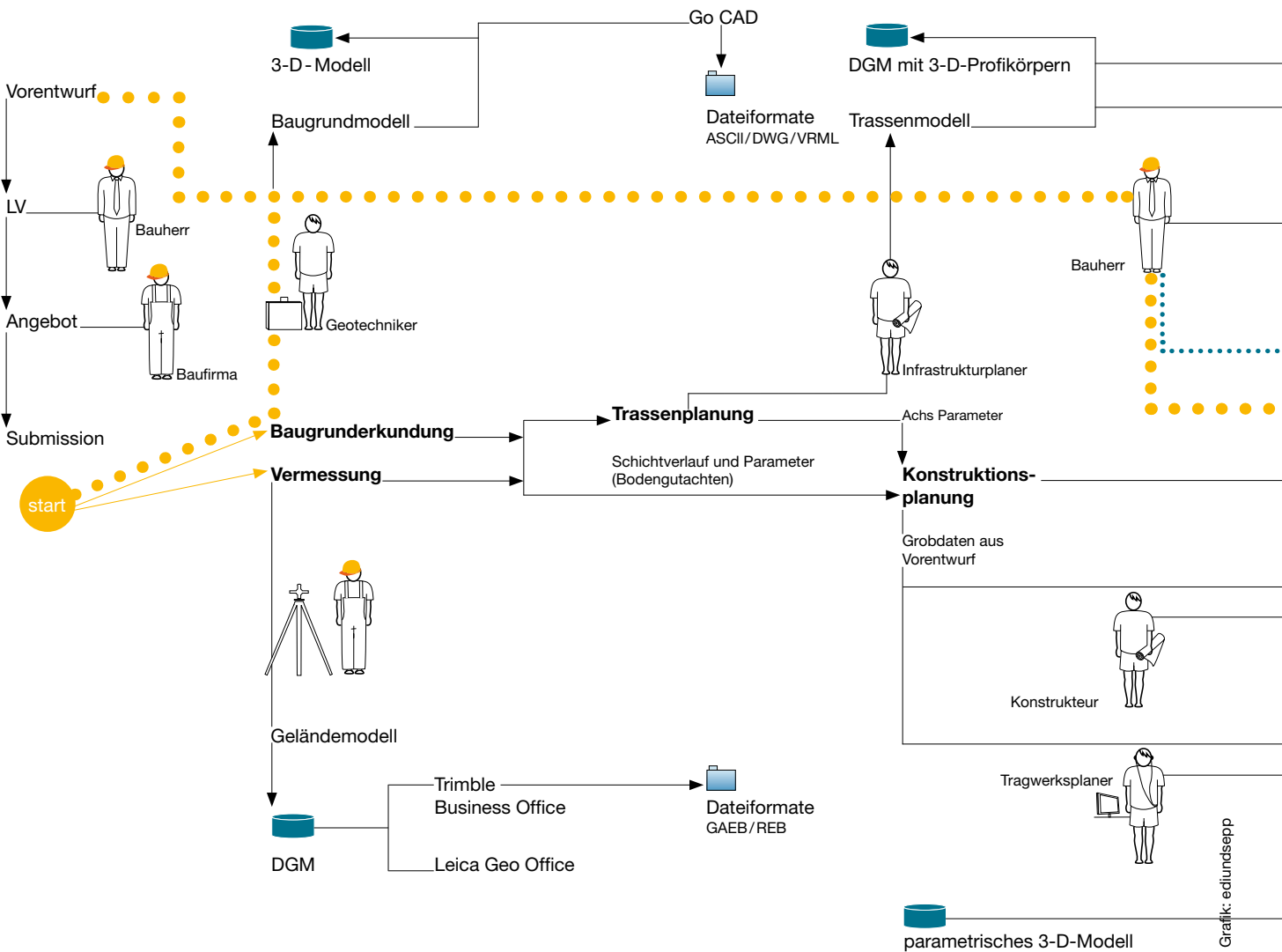
werden können. Somit lassen sich Baustelle und Produkt stets realitätsnah darstellen. Unsicherheiten und Vermutungen, menschliches Versagen und das Vergessen funktionaler oder kausaler Zusammenhänge werden deutlich reduziert. Darin sehen sämtliche 32 Industriepartner, die hohes Engagement für das Projekt aufbringen, besonders viel Potenzial.

Von großer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang die Vernetzung und das Management des zentralen Modells. Jeder am Bau Beteiligte sollte abhängig von seinen Aufgaben auf bestimmte Datensätze via Internet zugreifen können. Dieses Vorhaben soll mithilfe von Produktdatenmanagement-Systemen (PDM) realisiert werden. Das PDM kann mehr als alle bisher gebräuchlichen

Der Bauablauf als Schema

Vorhaben: Grundlagenermittlung/Vorentwurf

Bauplanung

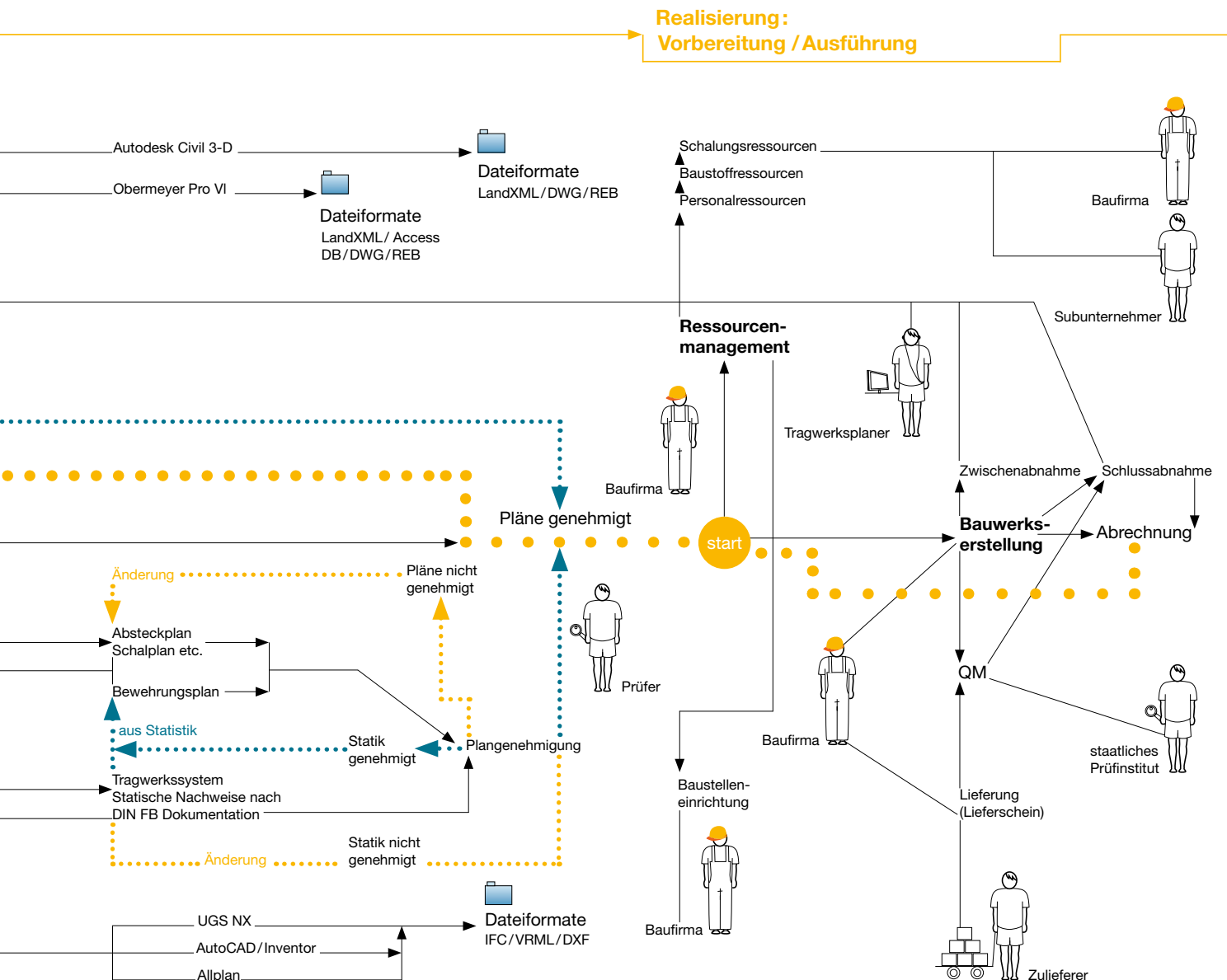


3-D-Modelle. Die Mitglieder des Forschungsverbands sprechen von 4- und 5-D-Lösungen, die erarbeitet werden können. Einfach ist die Vieldimensionalität des Bauens nicht, hat man doch weiterhin nur drei Dimensionen des Raums zur baulichen Entfaltung zur Verfügung. Die weiteren Dimensionen sind die Begleitgrößen Kosten und Zeit. Beide können mit den gewünschten Taktungen, Staffellungen und Kosten in die Simulationsprozesse integriert werden.

Bei der Simulation einer Baustelle ist die zeitliche Abfolge der Arbeitsschritte wesentlich. Dazu gehören die Rhythmen der Be- und Entlieferung, die Zwischenlagerung von Material, die Schichtwechsel und Freizeitregelungen der Teams ebenso wie Schwierigkeiten, die sich

aus Dunkelheit, Witterung, Verkehrssituation und technischen Pannen ergeben. Cornelia Klaubert, Assistentin am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (FML) der TUM und Projektleiterin bei Professor Günthner, veranschaulicht dies mit einem Szenario, das aus den Daten der Ablaufsimulation einer innerstädtischen U-Bahn-Baustelle generiert wird:

Liegt ein Laster defekt in der Baustellenzufahrt, ruhen weite Teile des Betriebs. Anderer Lieferverkehr ist nicht möglich, der Aushub aus den Schächten, der die Aufzugsanlage und die knappen Zwischenlagerungsflächen blockiert, verhindert größere Aktivität. Nun können Szenarien in Echtzeit geprüft werden: Reparatur vor Ort, Abtransport, das Errichten einer Ersatzzufahrt usw. ▶





Gründungsarbeiten für eine neue ICE-Trasse: Bohrpfahlgründungen halten die „Feste Fahrbahn“, ein Stahlbetonträgersystem, in das Geleise verschraubt werden. Nach der Bohrung werden die zylindrischen Bewehrungskörbe eingesetzt, die mit Beton vergossen werden

Die Beteiligten können sich auf alle Fälle sicher sein, die jeweils beste Lösung auf Basis von Fakten ausgewählt zu haben. Dieter Stumpf, Geschäftsführer des im Forschungsverbund agierenden Planungsbüros SSF Ingenieure, nennt ein anderes Beispiel: „Nehmen sie die räumlich beengte Situation in einem Bahnhof: Nächtliche Sperrungen einzelner Hochspannungsleitungen etwa zum Einbau einer Fußgängerbrücke sind teuer und meist nur für kurze Zeitspannen realisierbar sowie aufwendig in der Vorbereitung. Auf Basis eines Produktmodells könnten wir mithilfe der Ablaufsimulation die Einfahrt, das Entladen, Einheben und Einrichten großer Fertigteile simulieren.“ Somit könnten Bauablauf und -zeiten geplant werden. Vermutungen über Abläufe und Zeitdauer sind ausgeschlossen.

Zukünftig könnten die Steuerungsbefehle für die Simulation als Lenkkommandos gespeichert und im Realisie-

rungsfall neuerlich eingesetzt werden. Bisher sind solche komplexe Datensysteme an den unterschiedlichen Anforderungen sowie an einer schwer in den Griff zu bekommenden Rechteverwaltung gescheitert. Die Verwaltung von Rechten und Pflichten innerhalb der Planungsprozesse ist auch beim Projekt ForBAU eine der größeren Herausforderungen.

Die vier Teilprojekte von ForBAU

Professor Günthner erläutert die Bandbreite so: „Das Projekt ist sehr groß, deshalb haben wir es in vier Teilprojekte zerlegt: BAU-IT erzeugt das 3-D-Modell, BAU-SIM generiert den Prozess, BAU-LOG dessen Logistik und BAU-IDENT entwickelt Informationssysteme für Rückmeldungen von der Baustelle.“

BAU-IT, das Projektmodul zur Datensammlung, bedient sich vieler in anderen Disziplinen verbreiteter Technolo-



Foto: Fotolia

Koordination: Der Baustellenzustand muss fortlaufend überprüft werden, Einzelarbeiten müssen koordiniert und eingetaktet werden, um Wartezeiten zu vermeiden. Terminsicherheit und die Einhaltung gegebener Budgets hängen wesentlich vom Baustellenmanagement ab

gien. Das beginnt beim Aufmaß und der geologischen Voruntersuchung. Die Bohrungen für die Baugrundausswertung ergeben Punktwolken der Menge 10^{12} . Die neuesten Näherungsmethoden aus der Robotik und die Generierung so genannter neuronaler Netze erlauben die Übersetzung der Punkte in Flächen- und Volumenelemente, die in 3-D-Modellen erfasst sind. Die Datensätze speisen die Forscher direkt in das Produktdatenmanagement-System ein. Ergänzt werden diese Aufnahmen durch Maße aus der Laserscantechnik.

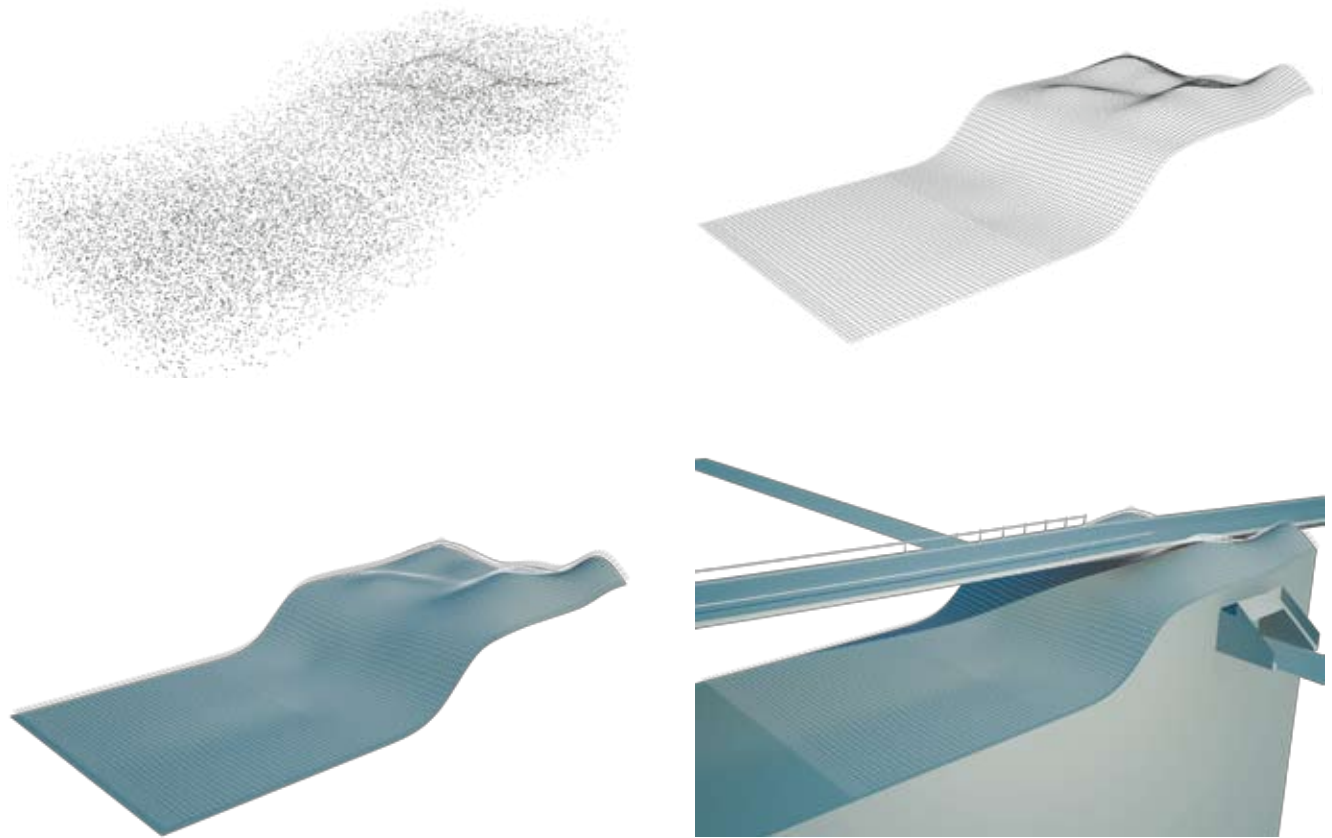
Die damit generierten Punktwolken werden über ein ebenfalls aus der Robotik stammendes Vermaschungssystem als Modell benutzbar gemacht. Weitere Informationen gewinnt BAU-IT aus den zum Teil intelligent vernetzt arbeitenden Baumaschinen: Tiefbohrgeräte, Walzen und andere Maschinen auf der Baustelle nehmen bereits jetzt viele Informationen zu Untergrund, Po-

sition und zum Teil zu Materialeigenschaften auf. Diese Informationen müssen nur richtig aufbereitet und gepflegt werden.

Schlanke Lagerhaltung

BAU-SIM veranschaulicht und simuliert alle Aspekte und Phasen des Bauablaufs. Deshalb sind neben den harten Daten der Baustelle bzw. all ihrer Zustände auch die Maschinendaten wie Geschwindigkeiten, Wenderradien und mehr hinterlegt. So werden Abläufe realitätsnah simuliert und Ergebnisse prognostizierbar.

BAU-LOG beschäftigt sich mit der Logistik und deren Anwendungen für eine Baustelle mit möglichst schlanker Lagerhaltung. Wesentlich für die Effizienzsteigerung ist die Regelung der Baustelleneinrichtung, der Lagerhaltung und des Nachschubs. Schwer zu transportierende Elemente wie Brückenträger müssen auf dem ▶



Entstehung des 3-D-Modells: Aus der ermittelten Punktwolke wird ein Flächenmodell errechnet. Dieses wird durch 3-D-Vorplanung und Bodendaten zum Volumenmodell ausgebaut. Daraus entsteht im weiteren Planungsprozess ein verfeinertes Fertigungsmodell

Weg zur Baustelle und vor Ort sehr intensiv betreut werden. Auch deshalb sollen künftig viele Bauteile mit kleinen Chips versehen sein – so genannte „RFID“-s, auf denen Materialeigenschaften, Einbauer oder Hersteller gespeichert werden, um spätere Maßnahmen wie die Sanierung zu unterstützen. Die Chips können geortet, ihre Informationen ausgelesen werden. So können zum Beispiel Mitteilungen als SMS an die Bauleitung gesendet werden, wenn der angefragte Brückenträger das Werkstor passiert hat oder sich in bestimmtem Abstand zur Baustelle befindet. Straßensperrungen und Maschineneinsatz sind effektiv planbar, Wartezeiten werden auf ein Mindestmaß reduziert. Das Modul BAU-IDENT beschäftigt sich intensiv mit der Realisierbarkeit dieser kleinen Informationsträger.

Im Projekt gibt es bereits eine Reihe von Erfolgen: Probebaustellen laufen, die projektierten Teilvorhaben sind bisher mit großem Erfolg umgesetzt. Viele Beteiligte wie die Planer können die Realisierung des Projekts kaum

abwarten – denn es geht nur noch um das Zusammenfügen der Ideen. Das ist der Kern der Problemstellung und die Hauptschwierigkeit im Projekt. Erst wenn alle Planungs- und Realisierungsschritte gleichberechtigt und sicher eingebunden sind, kann eine Vision wie diese für so komplexe Abläufe wie das Bauen umgesetzt werden. Vielleicht sieht es auf Baustellen bald ähnlich aus wie heute schon bei BMW oder VW in der Fertigungsstraße: Große Brückenträger gleiten gleichmäßig zum Einbau, werden in der richtigen Reihenfolge und fehlerlos montiert, verarbeitet und integriert; es gibt keinen Stillstand mehr, weniger Schmutz, weniger Lärm, weniger Pfusch, weniger Kosten – und auch weniger Diskussion über Verantwortlichkeiten.

Der chaotische Charme ineffektiver Kleinbaustellen geht dann allerdings verloren. Und das Berufsfeld der Baujuristen wird kleiner. Denn dann wird mehr gebaut und weniger gestritten werden. Eine schöne Vision.

Florian Hugger

Dialog ist der Anfang von allem

Deutschlands erste voll verschweißte, integrale Verbundbrücke aus Rohren großer Abmessung

Wir setzen die Phantasie ein, um über unsere Erfahrung und unser Wissen hinaus, im Dialog mit Bauherrn und Baubeteiligten Ingenieurbauwerke zu entwerfen und auszuführen.

Rohrstrukturen dieser Größenordnung wurden bisher mit Gussknoten ausgeführt, die neben den Knoten geschweißte Vollstöße aller Stäbe bedingen. Bei dieser Brücke wurden alle Rohre mit Durchmessern bis 800 mm und Wandstärken bis 50 mm direkt miteinander verschweißt und die Anzahl der erforderlichen Schweißstöße halbiert.

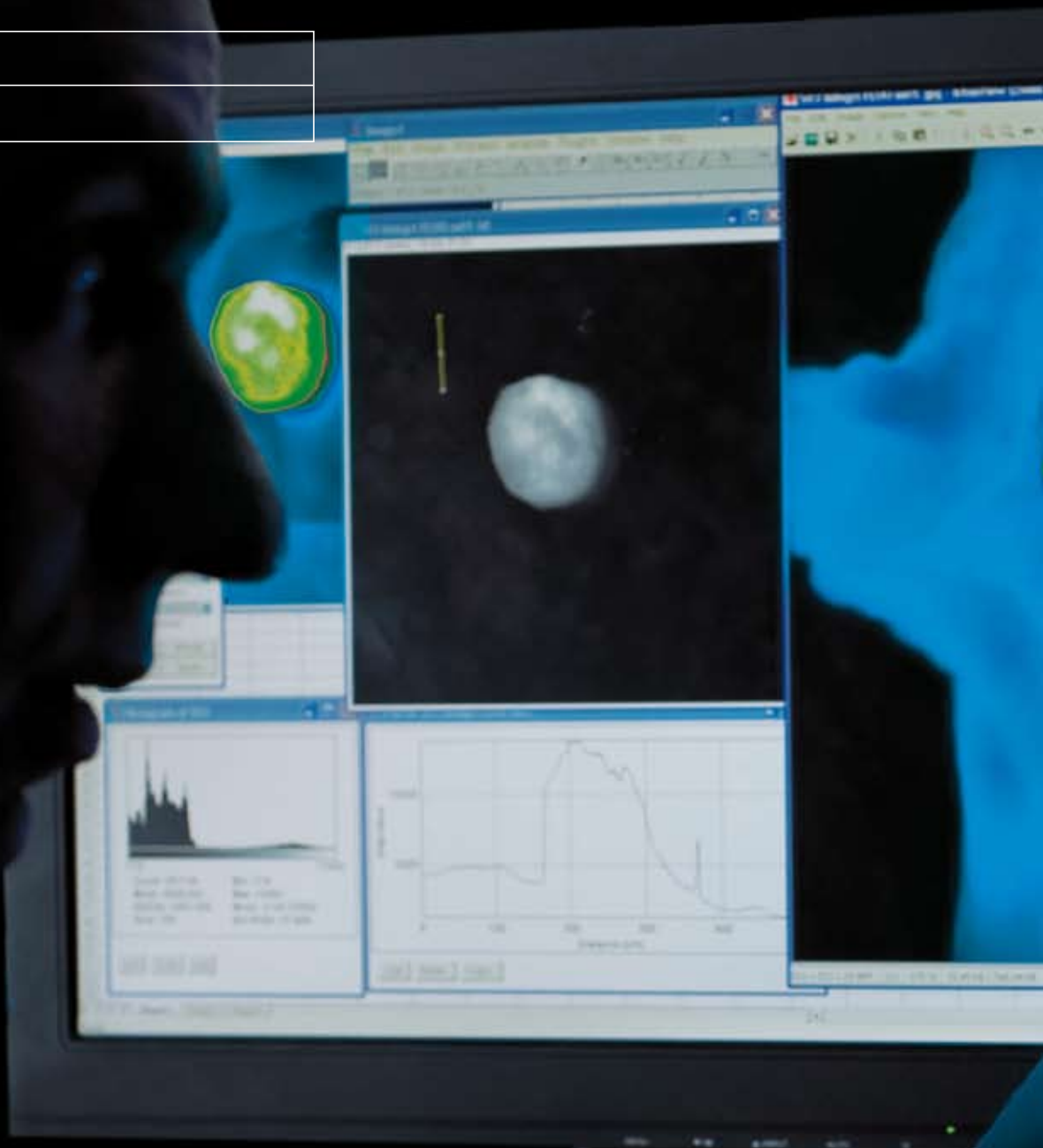
Die Wirtschaftlichkeit und die Dauerhaftigkeit von Rohrbrücken wird durch diese Bauweise erheblich verbessert und der Unterhalt vereinfacht. Die Autobahndirektion Nordbayern als Bauherr hat mit diesem Prototyp einer neuen Bauweise den Weg geebnet.



Die Natur und die Kulturlandschaft, die wir verbauen oder verbauen müssen, verpflichten uns zu einer Gegenleistung, zu guten Entwürfen – zu Baukultur.

Link

www.cbi.ei.tum.de



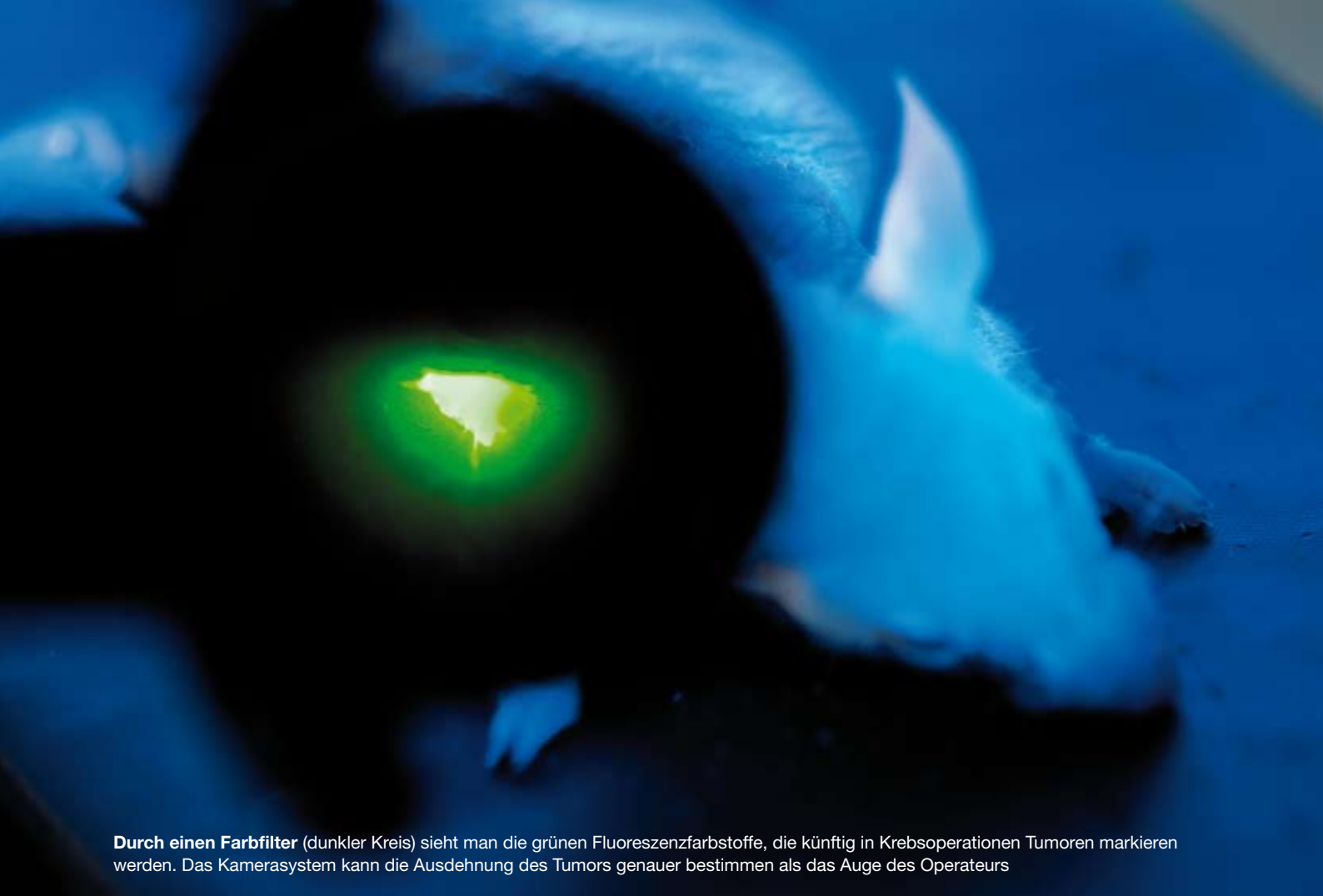
Der Physiker George Themelis testet an einer krebserkrankten Maus ein neues Kamerasystem, mit dem während einer Operation die exakte Ausdehnung von Tumoren (grün) bestimmt werden kann

Foto: Kurt Bauer



Den Tumor ans Licht gebracht

Mit Laserlicht bringen Forscher von TUM und Helmholtz Zentrum Tumoren zum Leuchten – auch Geschwulste, die zentimetertief im Gewebe verborgen sind. Dem Team gelingt es sogar, ein Echo von Laserblitzen zu hören



Durch einen Farbfilter (dunkler Kreis) sieht man die grünen Fluoreszenzfarbstoffe, die künftig in Krebsoperationen Tumoren markieren werden. Das Kamerasystem kann die Ausdehnung des Tumors genauer bestimmen als das Auge des Operateurs



Wer sich eine helle Lichtquelle – wie zum Beispiel einen Laser - an den Finger hält, kann sehen, dass Gewebe in begrenztem Ausmaß durchlässig für Licht ist

Die Spannung im Labor des TUM-Klinikums rechts der Isar ist mit Händen zu greifen. Vier Menschen beugen sich über einen Tisch, die Gesichter hochkonzentriert. Auf dem Tisch eine Maus, über ihr eine Kamera, an Metallstäben verschraubt, Kabel, Schläuche, eine Steckerleiste. Daneben zwei Computerbildschirme mit Tastaturen. Die Maus liegt in tiefem Narkose-Schlaf, die Nagezähne lugen durch das leicht geöffnete Mäulchen, fast erwartet man ein Schnarchen.

„Keine Hektik, nehmt Euch Zeit“, sagt Laborleiter George Themelis zu seinen beiden Kolleginnen. „Setzt die Spritzen erstmal nur an. Ihr müsst den Farbstoff exakt gleichzeitig injizieren.“ Wendy Kelder, Ärztin, und Claudia Mayerhofer, chemisch-technische Assistentin, pieksen in jeweils ein Mäusebein. Themelis zieht ein mattschwarzes Tuch über den Aufbau mit der Kamera. „Ist der Laser an, Thanos?“, fragt er den Doktoranden Athanasios Sarantopoulos. „Ja.“ – „Dann mach' bitte das Deckenlicht aus.“

Nur noch wenig Helligkeit sickert durch die Jalousien. Themelis klickt auf einen der beiden Bildschirme, der schwache Schatten der Maus erscheint. „Noch eine Minute... 30 Sekunden... zehn... drei, zwei, eins, jetzt!“ Auf dem Umriss der Maus entstehen zwei winzige helle Flecken, die langsam wachsen. Wendy Kelder deutet auf den Bauch der Maus: „Ich glaube, ich sehe auch hier etwas.“ Die Spannung in dem dunklen Raum löst sich langsam. George Themelis ist zufrieden: „Das hat gut funktioniert.“

Den Tumor sichtbar machen

20 Minuten später gibt es Espresso im Nebenraum, eine kurze Nachbesprechung des Teams. „In diesem Experiment wollten wir testen, wie sich der Farbstoff im Körper der narkotisierten Maus verteilt und ob wir das fluoreszente Leuchten mit unserem Kamerasystem verfolgen können“, erklärt Themelis. Wendy Kelder, eine niederländische Chirurgin und Gastwissenschaftlerin in Themelis' Labor, ergänzt: „Wir haben einen Farbstoff gespritzt, den wir normalerweise während Brustkrebsoperationen verwenden, um die Lymphknoten blau anzufärben und damit für das bloße Auge besser sichtbar zu machen.“ Die an den Tumor angrenzenden Lymphknoten werden gefärbt und entfernt, weil sich Krebszellen häufig über das Lymphgefäßsystem verbreiten und dabei in den Lymphknoten hängen bleiben. Ob und in welchen Lymphknoten tatsächlich Krebszellen sitzen, kann allerdings erst nach der Operation festgestellt werden.

Denn hierfür müssen im Pathologie-Labor Dünnschnitte des Gewebes untersucht werden. Die Dünnschnitte werden mit chemischen Substanzen oder Antikörpern

markiert, an die fluoreszierende Farbstoffe gebunden sind. Wenn ein Laserstrahl die Farbstoffe zum Leuchten bringt, kann die charakteristische Biomolekül-Ausstattung des Tumors bestimmt werden. Allerdings sind gleichzeitig mehrere Markierungen in unterschiedlichen Farben nötig, denn bislang gibt es noch keine Substanz, die ausschließlich entartetes Gewebe zum Leuchten bringt und gesundes im Dunkeln lässt. Ein weiteres Problem stellt die natürliche Fluoreszenz einiger Gewebetypen dar: Eine solche Autofluoreszenz kann zu falschen Eindrücken führen.

Mobile Handkamera für den Chirurgen

Doch wenn Themelis' Tests weiterhin erfolgreich verlaufen, wird das neue Kamerasystem diese Probleme lösen: Es kann gleichzeitig viele Farben erkennen und rechnet den Einfluss der Autofluoreszenz heraus. Außerdem berücksichtigt es, wie stark das reflektierte Laserlicht durch verschiedene Gewebe gefiltert wird. Das Kamerasystem wird zusätzlich in eine Handkamera umgebaut werden, die der Chirurg während der Operation benutzt. Er kann nun erkennen, wie weit er schneiden muss, um einerseits den Tumor komplett zu entfernen und andererseits nicht zu viel gesundes Gewebe herauszunehmen. Lymphknoten könnten so geschont werden. Und auch der Sicherheitsrand rund um den Tumor ließe sich auf ein Minimum beschränken – ein unschätzbare Vorteil etwa bei der Operation von Hirntumoren. Schon bald wollen die Forscher das System erstmals bei Operationen an Patienten erproben. Bis dahin sind noch eine ganze Reihe von Tests mit neuen Linsen und Änderungen am Aufbau des Kamerasystems nötig.

Mit Licht ins Gewebe schauen

Ortswechsel: Das Helmholtz Zentrum München in Neuherberg. In einem lang gestreckten Gebäude 200 Meter hinter dem Sicherheitszaun liegt eines der beiden Büros von George Themelis' Chef: Vasilis Ntziachristos. Der 39-jährige Grieche wirkt ruhig, fast gemütlich: Jeans, dicker blauer Wollpullover, gestutzter Vollbart, freundliches Lächeln. Doch durch seine Forschungen hat der heutige Inhaber des Lehrstuhls für biologische Bildgebung der TU München und Direktor des Helmholtz-Instituts für biologische und medizinische Bildgebung in eben dieser Bildgebung eine ganze Reihe kleiner Revolutionen angezettelt. Seine 45 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus Mathematik, Physik, Chemie, Ingenieurwesen, Biologie und Medizin arbeiten nicht nur an Kamera-Computersystemen für Krebsoperationen. Es gelingt ihnen sogar, mit Licht mehrere Zentimeter tief in Körpergewebe hineinzusehen, mit den Reflexionen dreidimensionale Bilder zu erzeugen und eine Art Licht- ▶

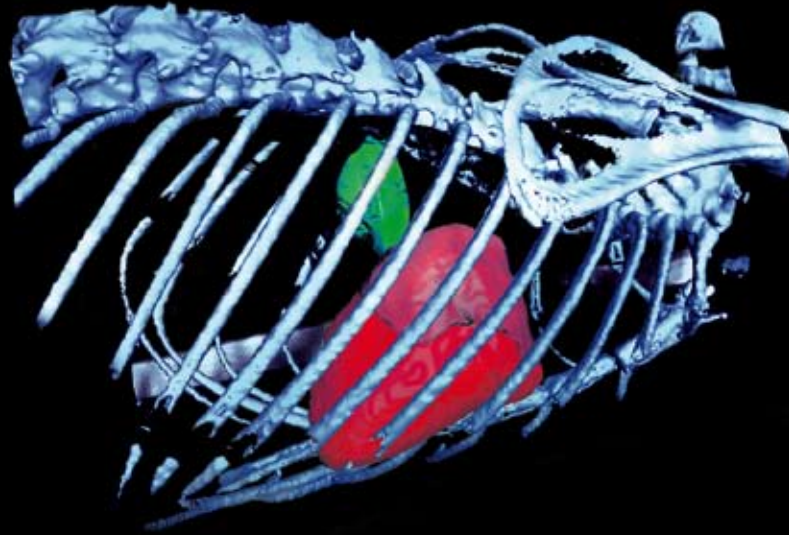


Bild: Ntziachristos

Die Licht-Tomographie kann eine lebende Maus vollkommen durchleuchten und damit das Wachstum eines Lungenkrebstumors (grün) an ein und derselben Maus verfolgen. Bald könnte die Technologie die Entwicklung von Krebsmedikamenten beschleunigen (rot: Herz)

Echo zu hören, das einmal in der Diagnose von Arterienverkalkungen in Herzkranzgefäßen eine Rolle spielen könnte.

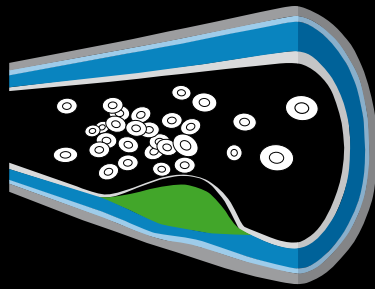
Aussagekräftige Bilder für die Diagnose

Mit Licht in Gewebe hineinsehen, um 3-D-Bilder zu erzeugen? Das war bislang den Röntgenstrahlen der Computertomographie oder den Magnetfeldern der Kernspintomographie vorbehalten. „Wenn Sie Ihre Fingerspitze vor eine helle Lampe halten, können Sie sehen, dass Gewebe lichtdurchlässig ist. Licht kann einige Zentimeter tief in Gewebe eindringen“, erläutert Vasilis Ntziachristos. „Die Schwierigkeit liegt allerdings darin, aus den Lichtreflexionen aussagekräftige Bilder zu gewinnen.“

Denn Gewebe streut und absorbiert Licht sehr stark, und unterschiedliche Gewebearten haben unterschiedliche Effekte. Deshalb eignen sich zur Untersuchung mit Licht normalerweise nur die hauchdünnen Gewebeschnitte, die etwa der Pathologe unter sein Lichtmikroskop legt. Hier jedoch steht eine breite Palette verschiedenster Farbmoleküle zur Verfügung, die detailliert zeigen können, ob eine Zelle gesund oder entartet ist,

oder wie sie mit ihrer Umgebung kommuniziert. Und: „Licht ist sicher und einfach zu handhaben. Jeder Wissenschaftler kann es nutzen. Und mit verschiedenen Wellenlängen kann man mehrere Farben und damit mehrere molekulare Phänomene gleichzeitig beobachten“, schwärmt Ntziachristos.

So begann der gelernte Elektroingenieur und Computerwissenschaftler vor 15 Jahren, mit Filtern und Laserpulsen zu experimentieren, Kernspin- und Computertomographen umzubauen und komplexe mathematische Gleichungssysteme so zu reduzieren, dass Computer mit ihrer Hilfe das aus dem Gewebe dringende Licht in hochpräzise Bilder umwandeln können, eine Art mathematischer Ingenieursarbeit. „Wir probieren und prüfen und vergleichen, und je besser wir den Prozess verstehen, desto bessere Bilder erhalten wir.“ Das Ergebnis sind ein halbes Dutzend Verfahren der biologischen Bildgebung, die nicht nur in der Operation von Tumoren eingesetzt werden sollen. Ntziachristos und sein Team können kleine Organismen wie Mäuse, Fische oder Fliegen komplett durchleuchten und durch Licht-Tomographie dreidimensionale Bilder erzeugen. Bei der „Fluo-

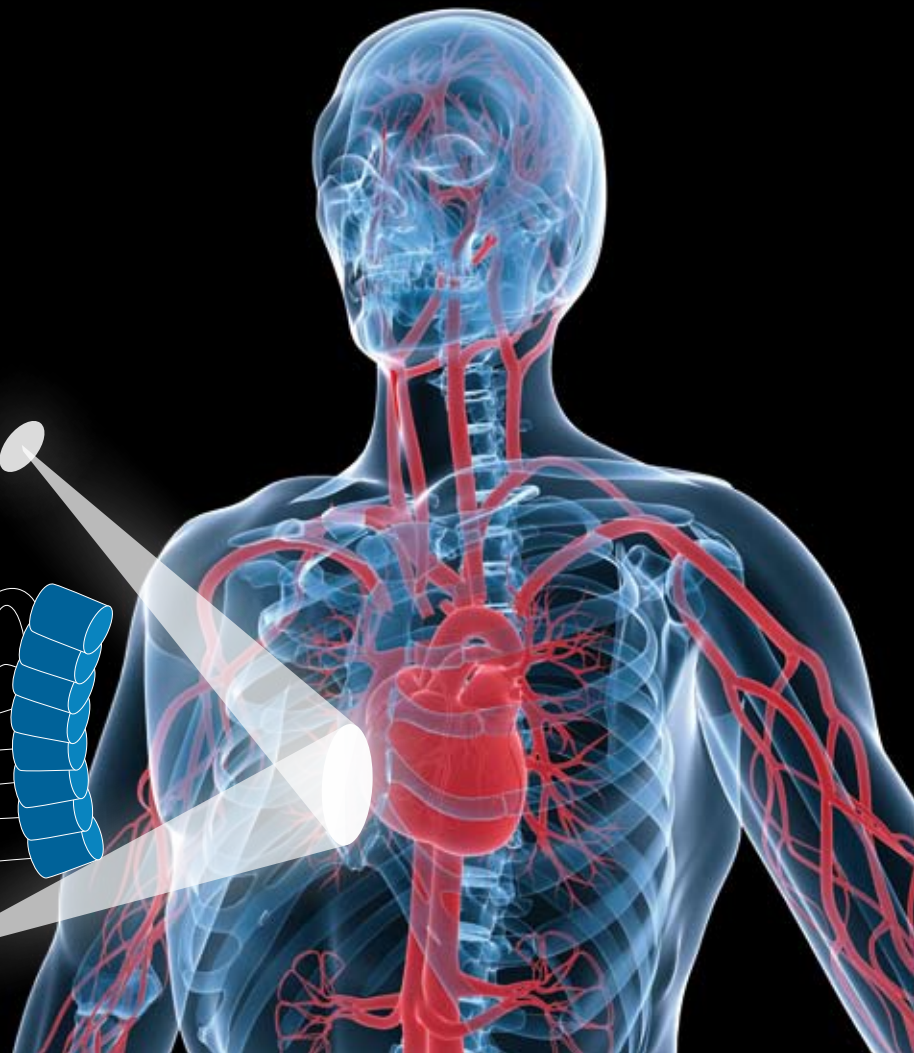


Lichtquelle

Steuerung

Detektoren
(Mikrophone)

Lichtquelle



Laserblitze könnten die Diagnose von Erkrankungen der Herzkranzgefäße unterstützen. Sie erzeugen Ultraschallwellen, die von Mikrofonen eingefangen und später zu dreidimensionalen Bildern verarbeitet werden (Ausschnitt oben mit grün markierter Arteriosklerose)

reszenz-Tomographie“ wird der Körper in verschiedenen Winkeln angestrahlt. Die Reflexionen der fluoreszenzmarkierten Strukturen setzt der Computer dann zu Querschnittsbildern zusammen. „Heute ist die Auflösung unserer Methode vergleichbar mit der der Kernspintomographie. Gleichzeitig können wir molekulare Strukturen so spezifisch erkennen wie mit der klassischen Fluoreszenzmikroskopie“, fasst Ntziachristos zusammen.

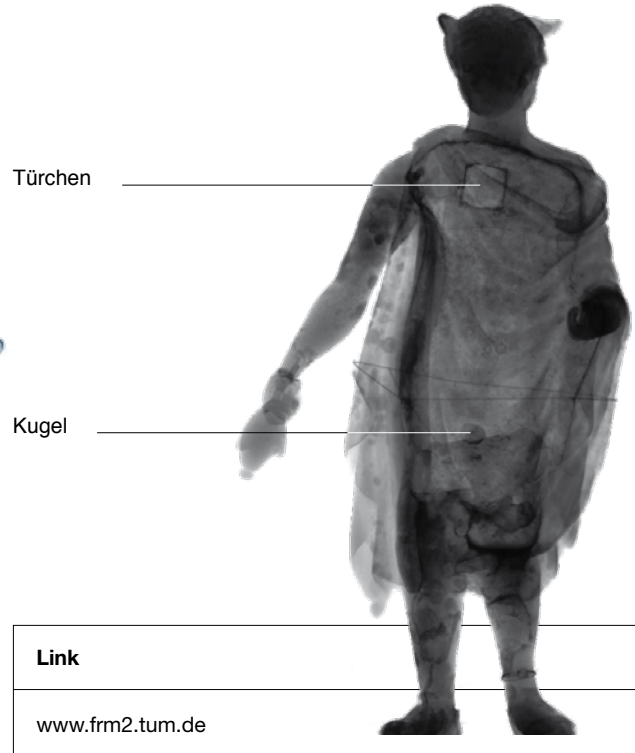
Neue Methoden für die Pharmaforschung

Erstmals konnte mit der Licht-Tomographie in Ntziachristos' Team an lebenden Fruchtfliegenlarven beobachtet werden, wie sich ein Flügel entwickelt – bislang war es nötig gewesen, Tiere in verschiedenen Entwicklungsstadien zu töten und Gewebe-Dünnschnitte anzufertigen. Ähnliches wird künftig auch in der Pharmaforschung möglich sein: Wenn in den gesetzlich vorgeschriebenen Tierversuchen an krebserkrankten Mäusen neue Wirkstoffe getestet werden, lassen sich nun das Tumorstadium und die Wirksamkeit der neuen Substanzen in der lebenden Maus über einen längeren Zeitraum hinweg verfolgen.

Ein weiteres von Ntziachristos' optischen Systemen macht Licht sogar hörbar – eine Entwicklung, die im Oktober 2008 mit dem Preis für innovative Medizintechnik des Bundesforschungsministeriums ausgezeichnet wurde. Die „Multi-spektrale opto-akustische Tomographie“ nutzt eine Eigenschaft kurzer Laserblitze: Wenn solche Lichtblitze auf Fluoreszenzfarbstoffe treffen, erwärmen sie deren Umgebung, die sich ein wenig ausdehnt. Weil dies extrem schnell geschieht, entsteht eine Druckwelle. Ein kurzer Laserimpuls erzeugt so eine Art Ultraschall-Echo, das sich von einem Ultraschall-Mikrofon einfangen lässt. Ntziachristos plant, das System für die Untersuchung von Herzkranzgefäßen im menschlichen Brustkorb weiterzuentwickeln. Seine Vision ist ein tragbares Gerät, das eine Untersuchung verkalkter Gefäße praktisch in jeder Hausarztpraxis ermöglicht. „Unsere Technologien werden ein breites Spektrum an Anwendungen haben, von der biologischen Forschung bis zur Diagnose“, ist Ntziachristos überzeugt. „Bei manchen Herz-Kreislauf- oder Krebserkrankungen wird es sogar möglich sein, mit einem unserer Systeme die Entwicklung eines Medikaments von Tierexperimenten bis hin zu klinischen Studien zu verfolgen.“ *Markus Bernards*

Nippes aus dem alten Rom

Physiker untersuchten eine Merkur-Statuette und stellten fest: Sie ist hohl, die Beine wurden nachträglich angesetzt. Das lässt auf antike Massenproduktion schließen



Mit Hilfe von Neutronen erzeugen die Wissenschaftler ein Schattenbild, das Einblicke in das Innere der 1800 Jahre alten Bronze-Statuette gewährt

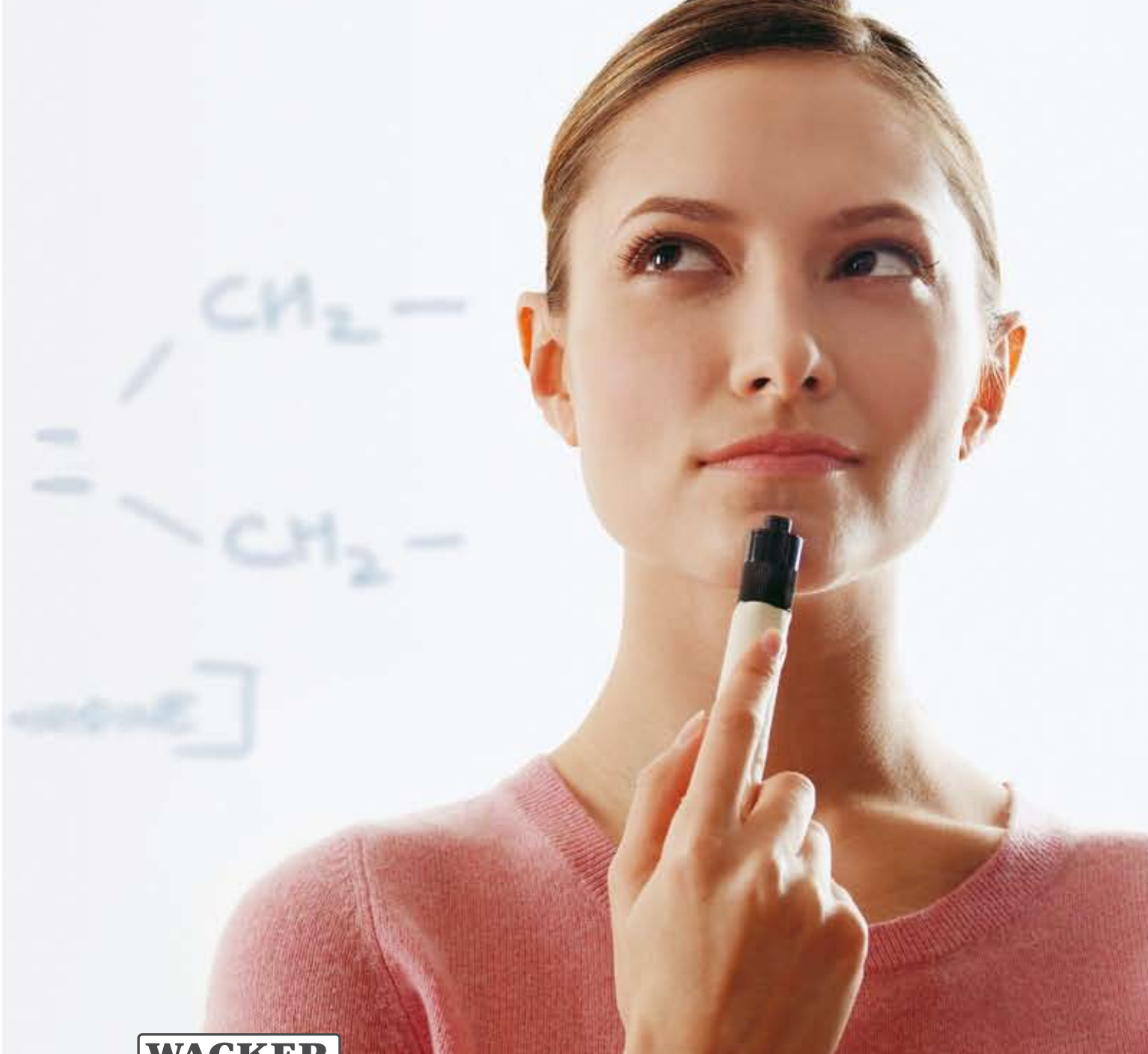
Das Geheimnis der 28 Zentimeter hohen Merkur-Statuette wurde am Instrument ANTARES an der Forschungs-Neutronenquelle der TUM gelüftet. ANTARES steht für Advanced Neutron Tomography and Radiography Experimental System. „Mit Neutronen können wir die meisten Metalle besser durchleuchten als mit Röntgenstrahlen“, erklärt Doktorand Martin Mühlbauer.

Röntgenstrahlen werden bereits durch wenige Millimeter Blei völlig gestoppt. Ein Strahl langsamer Neutronen wird von zehn Zentimeter Blei nur um 60 Prozent abgeschwächt.

Die meisten Neutronen, die durch ein zwölf Meter langes Flugrohr von der Neutronenquelle zum untersuchten Objekt auf dem Proben Tisch gelangen, durchdringen das Metall. Abhängig vom Material und dessen Dicke werden einige Neutronen von den Atomkernen gestreut oder absorbiert. So entsteht im Detektor von ANTARES hinter dem Objekt ein Schattenbild (Radiographie) desselben. Während der Untersuchung dreht sich der Proben Tisch um 360 Grad, so dass unter verschiedenen Winkeln Radiographien aufgenommen werden können. Die etwa 200 bis 800 Projektionen werden nach einem Rekonstruktionsprozess zur 3-D-Ansicht des Objekts, der Tomographie, zusammengesetzt.

Link
www.frm2.tum.de

Die untersuchte Merkur-Statuette stammt aus einer Ausgrabung der Archäologischen Staatssammlung in Obernburg am Main im Landkreis Miltenberg. Sie entstand wohl im zweiten Jahrhundert nach Christus. Der zuständige Landeskonservator von der Archäologischen Staatssammlung München Prof. Rupert Gebhard hat die Figur untersuchen lassen, um herauszufinden, wie sie hergestellt wurde. Die Tomographie-Aufnahmen interpretiert der Regensburger Vorgeschichtspräsident so: In der Statuette befindet sich ein Hohlraum und ein loses Kügelchen, das vom ursprünglichen Gusskern stammen könnte. Dieser ist durch ein Türchen entfernt worden, das nach dem Gießen in den Rücken des Merkurs gestemmt wurde und mit Blech abgedeckt ist. Das Blech ist bei Schnitten durch die Neutronen-Aufnahme deutlich zu erkennen. An der Figur außen ist es jedoch gut versteckt. Außerdem wird in der Tomographie der TUM-Wissenschaftler sichtbar, dass die Beine des Merkurs getrennt gefertigt und nur im Überfangguss mit dem Körper verbunden sind. „All das lässt auf eine antike Serienproduktion schließen“, sagt Gebhard. Denn der Hohlraum half Kupfer sparen und die angestückelten Beine waren weniger zerbrechlich als bei Figuren, die aus einem Stück gegossen wurden. □



WACKER

FÜR FORSCHER, DIE DIE PRODUKTE VON MORGEN ENTWICKELN

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

CREATING TOMORROW'S SOLUTIONS



Jeder darf mal Fehler machen. Wir nicht.

Als Deutschlands führender Triebwerkshersteller ist die MTU Aero Engines ein weltweit gefragter Partner der Luftfahrtindustrie. Unsere Spitzenstellung verdanken wir erstklassigen Mitarbeitern und innovativen Antriebstechnologien für alle Schub- und Leistungsklassen. Zur Verstärkung unserer Standorte suchen wir

Ingenieure (m/w)

für die Bereiche Entwicklung, Erprobung, Fertigung, Qualitätsmanagement, Instandsetzung, Vertrieb, Einkauf und Logistik.

Interessiert? Detaillierte Aufgaben- und Anforderungsprofile der offenen Stellen in München, Hannover und Berlin finden Sie im Internet unter www.mtu.de/karriere. Wir freuen uns auf Ihre Bewerbung!

Wir bieten auch attraktive Praktikumsplätze, Werkstudententätigkeiten und Diplomarbeitsthemen oder einen interessanten Einstieg über unser Junior Einstiegs- und Traineeprogramm JET an.

