

FORSCHUNG TUT NOT? FORSCHUNG IN NOT?

Von Herbert Henzler



Deutschland braucht einen „Aufbruch in die Zukunft“. Das gilt auch für Forschung, deren Fokus mehr als bisher auf Effizienzsteigerung und Output gerichtet sein muss. Auch Forschung ist eingebettet in die Entwicklungen der Globalisierung und muss ihren Beitrag für unsere Wirtschaft und Gesellschaft leisten. Sie steht, ebenso wie die Produkte der deutschen Industrie und Dienstleistung, im zunehmend harten internationalen Wettbewerb. Deshalb sind Reflektion und Neuausrichtung dringend erforderlich. Um Deutschland nach vorne zu bringen werden wir massiv investieren müssen, Sparen alleine zerstört eine Volkswirtschaft. Wir brauchen mehr Einzelprojektfinanzierungen anstelle bürokratischer Einrichtungen mit Dauersubventionen. Das reichlich vorhandene und nur spekulativ zirkulierende Kapital muss wieder in Ideen fließen, die zu weltmarktfähigen Produkten Deutschlands werden. Unsere Stärke sind die Menschen, nutzen wir diesen Geist und schaffen wir Freiraum für die Umsetzung neuer Gedanken. Wir haben die Chance und noch eine gute Grundlage, mit Innovationen und mit Neuem, auf allen Ebenen die Zukunft unseres Landes mit zu gestalten. Fangen wir jetzt an!

Diese Fragen stellt man, wenn man die Daten Deutschlands mit anderen führenden Wirtschaftsnationen der Welt vergleicht. Mit knapp 2,6 % FuE-Ausgaben unseres Bruttoinlandsproduktes geben wir zwar jährlich rund 54 Mrd. Euro aus, im Vergleich zu anderen Staaten bewegen wir uns aber nur im Mittelfeld (Schweden 4,27 %, Finnland 3,46 %, Japan 3,12 %, USA 2,60 %). Von den angepeilten 3,0 %, die der Bundeskanzler im Jahr der Innovationen 2004 gefordert hat, sind wir noch weit entfernt. Umso mehr müssen wir dieses Ziel konsequent verfolgen und nachdrücklich dafür eintreten.

Warum brauchen wir noch Forschung in Deutschland? Wandert auch sie wie die Produktion von Massengütern in billigere und bessere Konkurrenzstandorte ab? Die Gefahr der Verlagerung auch hochqualifizierter Forschungs- und Entwick-

lungsarbeitsplätze ist in der Tat groß. Der Braindrain junger Wissenschaftler ist heute bereits riesig. Die deutschen Unternehmen wollen zwar ihre Forschungsausgaben in den nächsten Jahren weiter steigern, der Zuwachs bleibt nicht alleine in Deutschland, er kommt den Investitionen im Ausland zu Gute: 15 % der befragten forschungsintensiven Firmen haben dort bereits Forschungsaktivitäten, weitere 17 % planen eine Verlagerung. Dies ist für unseren Standort höchst bedrohlich, da die Forschung der Fertigung folgt, Forschungsarbeitsplätze den industriellen Arbeitsplätzen.

Ohne Forschung und Entwicklung entstehen aber keine Innovationen, ohne Innovationen keine neuen Produkte und ohne Produkte keine Arbeitsplätze. Es ist eine Illusion zu glauben, wir könnten den Verlust an industrieller Beschäftigung mit

Dienstleistungen ausgleichen oder Aktivitäten aus den aufstrebenden Industrienationen zu uns importieren. Jede Volkswirtschaft unseres Ausmaßes braucht eine industrielle Basis. Das gilt gerade auch für Deutschland als rohstoffarmes und „teures“ Land. 2,3 Mio. Industriearbeitsplätze gingen in den letzten zehn Jahren bereits verloren, noch etliche werden folgen, wenn wir diesen Trend nicht stoppen und weiter „aus unserer Substanz der Vergangenheit“ leben ohne die Zeichen der Zeit zu erkennen.

Da die asiatischen Industriestaaten und die osteuropäischen Schwellenländer mit 5 % bis 10 % unserer Personalkosten und einer inzwischen vergleichbar guten Qualität konkurrenzlos billig produzieren können, muss sich unsere Gesellschaft auf ihre Stärken besinnen und „um so vieles besser sein als die Anderen billiger sind“. Die Herausforderung der Globalisierung besteht in einer bisher nicht gekannten „Beschleunigung aller Prozesse“, einer ungehinderten sofortigen weltweiten Informationsverbreitung und einer Aufbruchstimmung in den Wettbewerbsnationen, die wir bisher nur im Ansatz erlebt haben. Die jungen Leute zum Beispiel in Asien – alleine in China verlassen jährlich 350 000 Ingenieure die Hochschulen – streben auch nach „unserem“ hohen Wohlstand, denken dabei aber nicht an geregelte Arbeitszeiten, überzeugenden Kündigungsschutz, soziale Absicherungen und Mitbestimmung in den Betrieben durch außenstehende Gewerkschaftsvertreter. Deutschland muss aus seiner Lethargie der

letzten Jahre erwachen, auch der Bereich Forschung, wo intelligente Menschen wieder Freiraum für die Umsetzung ihrer Ideen brauchen und nicht in hinderliche Rahmen gezwängt sein dürfen. Die im Ausland herrschende Aufbruchstimmung muss „re-importiert“ werden wie in den 50er-Jahren. Wir haben vieles zu bieten, wir haben – noch – gute Grundlagen, wir müssen die Stärken nur nutzen: gute Bildung, gute Infrastruktur, hervorragende Forschungsstätten, viele Ideen, Erfindergeist und Kreativität der Menschen.

Ein kleiner Lichtblick ist die Lage bei weltmarktrelevanten Patenten, bei denen Deutschland nach Japan nun an zweiter Stelle liegt. In einigen Bereichen halten die deutschen Zukunftsbranchen mit die Welt- bzw. europäische Spitze, so zum Beispiel die Laser- und optische Technik, Materialverarbeitung, Biotechnik. Insgesamt nehmen wir bei den so genannten „forschungsintensiven Gütern“ mit 14,9 % Weltmarktanteil nach USA (19,4 %) zwar den zweiten Platz ein, bei der so genannten „Spitzentechnik“ ist Deutschland aber in keinem der wachsenden Sektoren überdurchschnittlich stark mit FuE-Kapazitäten vertreten. 90 % der industriellen FuE-Ressourcen werden nur bei „hochwertiger“ Technik eingesetzt, vor allem bei Automobil- und Maschinenbau, Chemie und Elektrotechnik. Das begrenzt natürlich die Wachstumsmöglichkeiten im weltweiten Strukturwandel hin zur „Spitzentechnologie“. Nicht die Produkte von heute, sondern der Bedarf von morgen sichert Beschäftigung und Wohlstand. Wir müssen die Be-

deutung und die Zusammenhänge von Technologie, Unternehmertum, Weltmarkt und Finanzierung endlich erkennen.

Ich rufe deshalb auf zu einer Ideenoffensive. Nur wer Visionen hat, wird Ziele definieren und diese über Zwischenziele erreichen. Dazu bedarf es einer „neuen Offenheit“, einem das Ganze begreifenden Denken über die eigenen Spezialkenntnisse und über kleinräumige Zuständigkeitsgrenzen hinaus. Die Wissens- und Erkenntnisgewinne dieses Jahrhunderts werden nur noch an den Schnittstellen der bisherigen Disziplinen entstehen, der Bereich Nanoforschung oder die Biomedizin sind solche multidisziplinären Beispiele. Forschung und Fortschritt kann man nicht planen wie eine Straße oder ein Haus, aber ohne Visionen, ohne aktives Voranschreiten kann auch nichts Neues entstehen. Die wirklich großen Erfindungen der Neuzeit basieren auf der Zähigkeit der Forscher, ihre Idee zu beweisen, dem Ausprobieren und auch dem Quäntchen Zufall. Wir müssen neue Wege gehen, auch unbequeme, die eingetretenen Pfade der „abgesicherten und versicherten“ Lebens- und Arbeitswelt verlassen. Stand früher der Geist des Individuums im Vordergrund, sehen wir heute die Notwendigkeit der Bündelung des Wissens vieler in Netzwerken und Kooperationen. Verbände im ursprünglichen Wortsinn des Verbindens sind ein wichtiger Ansatz hierbei. Die in Bayern entstandenen Forschungsverbände, also die enge Zusammenarbeit von Unternehmern und Wissenschaftlern, zeigt, wie er-

folgreich solche gemeinsamen Projektarbeiten sein können. Nur der intensive und dauernde Austausch von Spezialisten und Generalisten, Geistes- und Naturwissenschaftlern, in- und ausländischen Kulturträgern, Praktikern und Theoretikern schafft die gegenseitige geistige Befruchtung und Motivation mit einem „Mehrwert“, der am Ende in ein marktfähiges Produkt mündet. Ich beziehe ausdrücklich die Geisteswissenschaften mit ein, da philosophisch-ethische, kulturelle und volks- und betriebswirtschaftliche Fragestellungen das Zusammenwirken und die Fortentwicklung einer Gesellschaft mit entscheidend beeinflussen.

Forscher in Staat und Unternehmen leben nicht mehr im „Elfenbeinturm“, auch sie sind eingebettet in und abhängig von den Erfordernissen der Zeit, von den verfügbaren Ressourcen, von den wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Wettbewerbern im In- und Ausland. Der Blick über die Grenzen Deutschlands hinaus zeigt, wie effizient Forschung und Entwicklung zum Wohle einer Volkswirtschaft betrieben werden kann. Unsere Konkurrenten in der Welt holen schneller auf als wir es wahrhaben wollen. Wir sind nicht schlecht, die Wettbewerber werden aber immer besser.

Letztlich werden die Ressourcen für Forschung durch die Volkswirtschaft zur Verfügung gestellt, also von Wirtschaft und Staat, d. h. durch den Verkauf innovativer, weltmarktgerechter Produkte und Dienstleistungen. Was wir uns an Forschung

leisten, müssen wir verdienen. Daher ist es auch legitim zu fordern, dass Forschung die Umsetzung eines wissenschaftlichen Zieles in die reale Verwertung beinhalten muss, also einen „Nutzen“ in Form der Neuentwicklung oder Verbesserung von Produkten und Prozessen. Das geht auch einig mit den Gedanken temporärer oder exemplarischer „freier Forschung“, auch sie muss im Ergebnis einen „Nutzen“ bringen, der ein Gesamtziel anpeilt. Primat von Forschung darf nicht „Forschen um der Forschung willen“ sein, sondern Projektorientierung. Hier ist in manchen Kreisen ein Umdenken erforderlich. Wir können es uns nicht mehr leisten wie bisher große bürokratisch arbeitende Forschungstanke mit wenig verwertbarem Output zu finanzieren. Schnelle und kleine Projekte und Teilprojekte sind die Zukunft. Jahrelange Beschäftigung eines akribischen Wissenschaftlers an einem untergeordneten Teilproblem ist nicht mehr darstellbar. Auch wenn für die staatlich besoldeten Wissenschaftler – noch – nicht das Produkt im Vordergrund steht, so werden auch sie umsteuern und verinnerlichen müssen, dass sie eine Verpflichtung gegenüber der sie finanzierenden Gesellschaft haben und ihre Leistungen vergleichen lassen müssen. Wenn Deutschland den weltweiten Wettbewerb bestehen will, was wir durchaus können, müssen alle reflektieren, was sie konkret dazu beitragen können, um in einen Vorwärtspfad „Richtung Zukunft“ einzuschwenken. Das wird zum Teil Anpassung heißen, an Arbeits- und

Lebensbedingungen der Jetzt-Zeit und Verabschiedung von der so genannten „goldenen“ Vergangenheit, aber auch die Entwicklung eines „eigenen deutschen Weges“, wenn dieser zur Wiederherstellung unserer internationalen Wettbewerbsfähigkeit und Führungsfähigkeit führt.

Wir brauchen für Forschung und Innovation kritische Finanzmassen, um ein gutes und schnelles Ergebnis zu gewährleisten. Es kann nicht sein, dass Tausende guter Ideen in den Köpfen nicht realisiert werden können, weil die Finanzmärkte aus Risikoscheu lieber täglich eintausend Milliarden US-Dollar spekulativ um den Globus schicken, statt aussichtsreiche Innovations- und Entwicklungsprojekte zu finanzieren. Die Auswirkungen der nicht durch Waren und Dienstleistungen hinreichend unterlegten Geld- und Kapitalströme auf die betroffenen Regionen und auf die gesamte Weltwirtschaft haben uns die beiden Krisen in Asien und Lateinamerika gezeigt. Auch Finanzinstitute tragen eine gesamtgesellschaftliche Verantwortung. Wenn sie vor allem den bereits unterkapitalisierten deutschen Mittelstand mit Finanzierungen nicht zur Seite stehen, jungen Firmen Betriebsmittel verweigern und Start-ups kein Risikokapital mehr geben, untergraben sie ihre eigene Klientel und längerfristig ihre eigene Geschäftsbasis. Andere Organisationsformen werden zwangsläufig die Finanzierungsaufgaben übernehmen müssen, zum Beispiel Kapitalsammelstellen, die nach fundierter Bewertung des Technologieportfolios eines Unternehmens

projektorientiert Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten finanzieren. Ich plädiere dafür, dass gerade Finanzdienstleister die Chancen von Ideen, Technologien und FuE-Aktivitäten zur mittel- und längerfristigen Sicherung eines Unternehmens mehr als bisher erkennen und auch berücksichtigen.

Forschung tut Not! - Forschung darf nicht in Not kommen! Wir haben die Möglichkeiten, in Deutschland mit positiver Einstellung das „Ruder zur Zukunft“ herum zu reißen: In Richtung Aufbruch statt Rückzug, in Richtung Anpacken statt Jammern und Zerreden, in Richtung mehr Freiheit und Umsetzung anstelle Kleingeist und Zögern, in Richtung Öffnung und Offenheit gegenüber Neuem. Machen wir es einfach und fangen jetzt an ...



Prof. Dr. Herbert Henzler (63) setzt sich für Innovationsförderung in Deutschland ein. Er ist Vorsitzender des Wissenschaftlich-Technischen Beirats der Bayerischen Staatsregierung und der Bayerischen Forschungsstiftung. Von 1984 bis 1998 stand er an der Spitze von McKinsey Deutschland. 2002 wurde er in den Advisory Council von McKinsey und zum Vice Chairman des Advisory Board der Credit Suisse berufen. Heute hält er mehrere Aufsichtsratsmandate sowie eine Honorarprofessur an der Münchener Ludwig-Maximilians-Universität.

INHALT

Herbert Henzler 2
Forschung tut Not? Forschung in Not?



WELT DER KULTUR 9

Torsten M. Kühlmann 11
Grenzenlose Karrieren

Herbert Küpper 15
Das Recht und sein Vollzug in Osteuropa

Horst Wildemann 19
Die Quantifizierung des logistischen Nutzens

Willibald Günthner, Julia Boppert
und Michael Schedlbauer 25
RFID – Es funkt gewaltig



WELT DER INFORMATION 31

Kamen N. Beronov 33
Turbulente Simulation

Erich Schneider, Klaus Bartl, Stanislavs Bardins,
Thomas Dera, Guido Böning und Thomas Brandt 41
Moderne Zyklopen: Drei Augen und keines zu viel



WELT DES LEBENS

47

Ulf Rapp und Ivaylo Gentshev
Bakterien gegen Krebs

49

Michael A. Klein und Eckhard Flechsig
Prionen: Infektiöse Proteine auf dem Weg ins Gehirn

53

Andrea Spangenberg, Stephan Prechtl,
Doris Schieder und Martin Faulstich
„Grünes Gold“ für die Mobilität

59



WELT DER MATERIE

67

Hans Roth, Ulrich Wagner, Stefan Richter
und Serafin von Roon
Damit weiter Strom aus der Steckdose kommt

69

Lothar Frey und Bernd Fischer
Stempel für Mikrochips

75

Stefan M. Rosiwal
Diamant: Zu schade für den Hals

79

Klaus Feldmann, Agus Sutanto und Matthias Brossog
Der virtuelle Darwin

85

DIE FORSCHUNGSVERBÜNDE DER ABAYFOR

91

Zukunft im Brennpunkt

92

Liste der Forschungsverbünde

94

Impressum

GRENZENLOSE KARRIEREN



Torsten M. Kühlmann

Ein Reservoir an Mitarbeitern, die fähig und willens sind, Arbeitsaufgaben in Kooperation mit Partnern aus anderen Ländern und Kulturen zu erfüllen, verschafft grenzüberschreitend tätigen Unternehmen einen Wettbewerbsvorteil. Daher verfolgen immer mehr Unternehmen mit dem Mitarbeiterereinsatz in internationalen Aufgabengebieten auch das Ziel, einen Stamm in Sachaufgaben der grenzüberschreitenden Geschäftstätigkeit erfahrener Mitarbeiter aufzubauen. Allerdings ist dieses Ziel zunehmend gefährdet.



Das typische Unternehmen in westlichen Industrieländern betätigt sich heute grenzüberschreitend: Ein lebhafter Tauschhandel von Gütern, Kapital, Dienstleistungen und Wissen über die nationalen Grenzen hinweg ist die Regel. Offene oder zumindest durchlässige Grenzen sind die größten Erfolge der europäischen Einigung und anderer internationaler (Wirtschafts-) Abkommen. Neugründungen von Tochtergesellschaften im Ausland, Akquisitionen ausländischer Unternehmen oder vielfältige Formen der Kooperation mit internationalen Partnern ergänzen heute die traditionellen Exportstrategien.

Die Internationalisierung oder gar Globalisierung der Unternehmen hat Folgen für die Mitarbeiterkarrieren: Immer öfter gehen Mitarbeiter für einige Jahre ins Ausland – teilweise freiwillig, wenn sie sich einen Karriereprung erhoffen, zum Teil gezwungen, weil ihr Arbeitsplatz ins Ausland wandert. Andere übernehmen Positionen in internationalen Projektteams, erweitern ihre Fachaufgaben um die Verantwortung für verschiedene Länder oder bewerben sich bei ausländischen Unternehmen. Diese Entwicklungen beschränken sich nicht mehr auf Fach- und Führungskräfte, sondern betreffen alle Mitarbeitergruppen in international tätigen Unternehmen.

„Grenzenlose Karriere“

In wissenschaftlichen Diskussionen über den Zusammenhang internationaler Unternehmenstätigkeit und individueller Karriere macht seit eini-

gen Jahren das Konzept der „grenzenlosen Karriere“ die Runde. Es steht für zwei Trends in den Karrieremustern von Fach- und Führungskräften. Zum einen beschränken Mitarbeiter ihre Erwerbstätigkeit nicht mehr nur auf das Heimatland: Sie erfüllen ihre Aufgabe zunehmend auf ausländischen Arbeitsplätzen und im Kontakt mit Partnern aus anderen Ländern (Kollegen, Vorgesetzte, Kunden, Lieferanten, Amtsträger).

Zum anderen bedeutet „grenzenlose Karriere“, dass Mitarbeiter – anders als früher – ihr „Heil“ nicht mehr bei einem einzigen Unternehmen suchen, sondern auch die Karriere selbst Grenzen überschreitet, nämlich die des Unternehmens. Die berufliche Entwicklung ist nicht mehr vorrangig mit einer langfristigen Beschäftigung bei einem Unternehmen und einem unternehmensinternen Aufstieg verknüpft. Vielmehr betrachten Mitarbeiter die Zugehörigkeit zu ihrem Unternehmen von vornherein als zeitlich eng befristet und wechseln zwischen verschiedenen Unternehmen, um individuelle Karrierepläne zu verwirklichen. Mitarbeiter suchen demnach vor allem nach Qualifikationen und Erfahrungen, die ihre Attraktivität auf dem Arbeitsmarkt steigern. Kompetenzen, die auf internationalen Tätigkeitsfeldern erworben werden, fördern erwiesenermaßen den Marktwert der Mitarbeiter. Untersuchungen in den USA bestätigen, dass etwa 20% der ehemaligen Auslandsentsandten binnen eines Jahres nach der Rückkehr den Arbeitgeber wechseln.

Dieser Trend zur „grenzenlosen Karriere“ gefährdet das Ziel einer internationalen Personalentwicklung von Unternehmen. Wenn international erfahrene Mitarbeiter verstärkt bereit sind, ihr Unternehmen zu verlassen, weil andere mit attraktiven Karriereoptionen locken, ist das internationale Personalmanagement aufgefordert, der Laufbahnplanung und Anreizgestaltung für international tätige Fach- und Führungskräfte mehr Beachtung als bisher zu schenken.

Die ungeschriebenen Regeln

Grund für das veränderte subjektive Karriereverständnis der Mitarbeiter ist der gewandelte implizite oder psychologische Vertrag zwischen Unternehmen und Mitarbeiter. Dieser nicht justiziable, ungeschriebene Teil eines Arbeitsvertrages umfasst detaillierte Erwartungen des Unternehmens zum Arbeitsverhalten des Mitarbeiters (etwa Mobilität, Ideenfindung, Pflichtbewusstsein, Fortbildung). Auf der Seite des Mitarbeiters bestehen Ansprüche an das Unternehmen bezüglich Arbeitsplatzsicherheit, Fürsorge, Arbeitsklima und Aufstiegsmöglichkeiten. Internationalisierungsprozesse stellen insbesondere den Anspruch der Mitarbeiter auf Arbeitsplatzsicherheit in Frage. Mitarbeiter reagieren auf dieses Missverhältnis in den wechselseitigen Ansprüchen von Unternehmen und Mitarbeitern hauptsächlich auf zwei Arten und Weisen: Während sich ein Teil der Mitarbeiter „in das Unternehmensschicksal“ fügt und Verschlechterungen des impliziten Arbeitsvertrages genauso ak-

zeptiert wie Verschlechterungen der explizit geregelten Arbeitsbedingungen (zum Beispiel den Abbau von Zulagen oder längere Arbeitszeiten), intensivieren andere Mitarbeiter ihre Bemühungen, die eigenen Arbeitsmarktchancen durch systematische Erweiterung ihres Wissens- und Erfahrungshorizontes zu verbessern.

Wenn sich Leistung nicht mehr lohnt ...

Eine eigene Untersuchung bei 490 Auslandsentsandten aus 30 deutschen Unternehmen bestätigt, dass Unternehmen und Karriere auch bei deutschen Fach- und Führungskräften oft nur noch locker gekoppelt sind. Mehrheitlich geben die Befragten an, dass sie mit dem laufenden Auslandseinsatz vor allem das Ziel verfolgen, ihre persönliche und berufliche Weiterentwicklung zu fördern. Knapp 90% der Befragten sind der Überzeugung, dass der mit einem Auslandseinsatz verknüpfte Zuwachs an internationaler Kompetenz die eigenen Karrierechancen in anderen Unternehmen erhöhen wird. Dagegen erwarten deutlich weniger Befragte, dass das eigene Unternehmen den Auslandseinsatz mit einem internen Aufstieg honoriert. Angesichts der wahrgenommenen Unterschiede in den Karrierechancen auf dem internen und dem externen Arbeitsmarkt verwundert es nicht, dass 50% der befragten Entsandten ihre Bereitschaft äußern, nach der Rückkehr ihr Unternehmen zu verlassen, um in einem anderen die Karriere fortzusetzen. Offensichtlich sind diese Mitarbeiter bestrebt, ihren gestie-

genen Wert auf dem Arbeitsmarkt durch einen Wechsel des Arbeitgebers zu nutzen.

Was tun mit der Erfahrung?

In einer Umfrage bei 150 US-amerikanischen Unternehmen bestätigten 75% der Befragten, dass die Nutzung der Auslandserfahrung des Rückkehrers am Arbeitsplatz die wirkungsvollste Maßnahme gegen die hohe Fluktuationsrate unter den Rückkehrern darstelle. Aber genau diese Nutzung der Erfahrung kann das Unternehmen bei der Wiedereingliederung der zurückkehrenden Mitarbeiter vor eine Reihe von Problemen stellen:

- Der Entsandte hat im Ausland Qualifikationen und Erfahrungen erworben, die das Heimatunternehmen nicht selten in dieser Form gar nicht benötigt, zum Beispiel Improvisationsvermögen und Sprachkenntnisse.
- Durch den Auslandsaufenthalt sind im Heimatland benötigte Kompetenzen möglicherweise veraltet oder es sind in der Zwischenzeit neue Anforderungen entstanden, auf die der Heimkehrer nicht vorbereitet ist.
- Die Entwicklung vieler Unternehmen war in den letzten Jahren durch Downsizing, Outsourcing oder Fusionen charakterisiert, so dass häufig viel zu wenige oder gar keine attraktiven Positionen für Rückkehrer zur Verfügung stehen.

Zuschauen oder Handeln?

Durch die geänderte Einstellung der Beschäftigten droht den Unternehmen eine rasche Abwanderung von Mitar-



beitern, die vielfältige Erfahrungen und Qualifikationen in der internationalen Unternehmenstätigkeit erworben haben. Damit verliert das Unternehmen eine Kernkompetenz, die seine Position im internationalen Wettbewerb sichert. Die Ausbildung solcher Mitarbeiter ist teuer und sie sind ein wertvoller „Besitz“, den andere Unternehmen gerne übernehmen.

Die internationale Personalarbeit steht deshalb vor zwei Herausforderungen:

(1) Wie identifiziert sie Kandidaten für internationale Einsätze, deren persönliche Karriereansprüche auch mit den Karrieremöglichkeiten im Unternehmen harmonieren?

Zur Klärung der Karrierewünsche des Mitarbeiters verfügt die Personalarbeit über eine Reihe von – meist gesprächsbasierten – Instrumenten. Dagegen kann ein Abgleich von persönlichem Karrierewunsch und tatsächlicher Möglichkeit im Unternehmen allenfalls rudimentär erfolgen, denn die geläufigen Inhaltstheorien zur Arbeitsmotivation liefern nur allgemeine Angaben darüber, wie sehr spezifische Arbeitsbedingungen und -aufgaben die Bedürfnisse des Mitarbeiters befriedigen können. Die verbreiteten Instrumente „Anforderungsanalyse“ und „Stellenbe-

schreibung“ beschreiben lediglich die Qualifikationen und Verhaltensweisen der Position, nicht aber die Anreize, die sie für die Bedürfnisbefriedigung des Mitarbeiters bereithält. Eine der bedürfnisorientierten Personaldiagnostik analoge Situationsdiagnostik fehlt bislang. Als Notbehelf sind Karriereworkshops denkbar, in denen der Mitarbeiter seine Qualifikation und seine Entwicklungswünsche selbst analysiert und das Unternehmen diese mit einer realistischen Tätigkeitsvorschau auf mögliche Entwicklungspositionen im individuellen Laufbahnkorridor des Mitarbeiters kombiniert.

(2) Mit welchen Angeboten kann ein Unternehmen international erfahrene Mitarbeiter an sich binden?

Mitarbeiter erwarten nach einem Einsatz in einem internationalen Tätigkeitsfeld, dass die nächste Position den hinzugewonnenen Kompetenzen Rechnung trägt. Eine zentrale Voraussetzung zur Verwirklichung dieses Anspruchs ist die transparente und langfristig angelegte Karriereplanung im Unternehmen, die vorab inländische und ausländische Positionen ebenso wie notwendige Qualifizierungsmaßnahmen über die Zeit hinweg zu einem individuellen Karriereplan verknüpft.

Karriereplanung im Wandel

Die Personalabteilung muss den Mitarbeiter vor der Übernahme einer Position in einem internationalen Tätigkeitsfeld auf Basis dieser Planung informieren, welche Bedeutung diese Tätigkeit für seine weitere Karriere im Unternehmen haben kann und wie die vorgesehene Folgeposition aussieht. Während der internationalen Arbeitstätigkeit sind die Mitarbeiter rasch und offen über mögliche Entwicklungen zu informieren, die Änderungen der Karriereplanung erfordern. Das können Umstrukturierungen im Unternehmen oder die vorzeitige Rückkehr aus dem Ausland sein.

Viele Unternehmen folgen den aktuellen Trends und bauen Führungsebenen ab (Lean Management), führen autonome Teams ein, schließen sich mit anderen Unternehmen zusammen und lagern Stufen im Wertschöpfungsprozess aus. Die „klassische“ Karriere im Sinne eines Aufstiegs in der Hierarchie und einer Zunahme von Führungsverantwortung wird seltener, traditionelle Führungspositionen sind rar. Alternative Laufbahnmodelle wie die Fach- oder die Projektlaufbahn dagegen gewinnen an Bedeutung.

Fachlaufbahnen bilden neben der Führungshierarchie eine zweite Hie-

Prof. Dr. Torsten M. Kühlmann (Jahrgang 1952) ist Inhaber des Lehrstuhls für Personalwesen und Führungslehre an der Universität Bayreuth und Sprecher des Bayerischen Forschungsverbunds Transnationale Netzwerke (FORTRANS). Seine Forschungsschwerpunkte umfassen das Management von Auslandsentsendungen, transnationale Unternehmenskooperationen und Netzwerke sowie Korruption in internationalen Geschäftsbeziehungen.



rarchie auf Basis der Fachkompetenz: Der Mitarbeiter übernimmt zunehmend anspruchsvollere Fachaufgaben, die aber nicht zwingend mit mehr Personalverantwortung gekoppelt sind.

Projektlaufbahnen beruhen auf einer gezielten Abfolge von verschiedenen Tätigkeiten in zunehmend bedeutsameren Projekten. Je mehr ein Mitarbeiter in der Projektlaufbahn vorangekommen ist, desto stärker gestaltet er in seiner Projektfunktion die Arbeit an umfangreichen, strategisch wichtigen Projekten. Im Gegensatz zur Führungs- und Fachlaufbahn empfinden Mitarbeiter die Projektlaufbahn aber selten als Karriere, sondern eher als „Warteschleife“ oder „Entsorgungsstation“. Unternehmen sollten Projektlaufbahnen daher zeitlich befristen und klare Übergangsmöglichkeiten zu Führungs- und Fachlaufbahnen definieren.

Integration statt Ignoranz

Weitere Maßnahmen wirken einer verbreiteten Enttäuschung bei Auslandsrückkehrern entgegen, die dem Unternehmen vorwerfen, es schenke dem Zugewinn an Erfahrung und Wissen nur geringe Aufmerksamkeit. Die Rückkehrer wollen ihre gewonnene Erfahrung dem Unternehmen zur Verfügung stellen und fühlen sich geschätzt, wenn das Unternehmen die Erfahrung positiv für sich nutzt. Dieser Interessenlage entsprechen Unternehmen bislang nur vereinzelt durch Maßnahmen wie:

- Rückkehrer wirken bei der Auswahl, Vorbereitung und Betreuung von Entsendungskandidaten beratend mit.

- Sie konzipieren und realisieren Weiterbildungsmaßnahmen für Entsendungskandidaten, deren Familien und für Mitarbeiter, die mit ausländischen Partnern kooperieren.

- In schwierigen Geschäftssituationen vermitteln Rückkehrer rasch und wirksam Auswege durch ihr Netzwerk zu ausländischen Kollegen, Behördenvertretern, Lieferanten.

- Sie analysieren in Arbeitsgruppen, ob und wie Instrumente der Unternehmensführung, die sie im Ausland kennen gelernt haben, auf das Heimatunternehmen übertragbar sind.

- Sie beteiligen sich als lokale Experten bei der Analyse von Risiken und Chancen auf ausländischen Märkten sowie von Stärken und Schwächen des eigenen Unternehmens bei der Bearbeitung dieser Märkte.

- Das Unternehmen erfasst die Kenntnisse und Erfahrungen der Mitarbeiter im Ausland, bereitet sie auf, speichert sie in Datenbanken und stellt sie dann über das Intranet allen Unternehmensmitgliedern zur Verfügung.

Den grenzüberschreitend tätigen Unternehmen ist der Wettbewerbsvorteil, den sie mit einem Stamm international erfahrener Mitarbeiter haben, zunehmend bewusst. Sie verfolgen daher nicht mehr allein das Ziel, die Sachaufgaben der internationalen Geschäftstätigkeit zu erfüllen, sondern gleichzeitig Mitarbeiter an sich zu binden, die in internationalen Tätigkeitsfeldern erfolgreich gewesen sind.

DAS RECHT UND SEIN VOLLZUG IN OSTEUROPA

Neue Gesetze, vorsichtige Gerichtsvollzieher und empfängliche Beamte

Herbert Küpper

West- und Osteuropa wachsen zusammen, auch auf rechtlichem Gebiet. Das gilt verstärkt für die Staaten, die der EU bereits beigetreten sind oder demnächst beitreten werden. Sie sind bzw. werden Teil eines gemeinsamen Rechtsraums. Auch die Staaten, die zu einem späteren Termin auf einen Beitritt hoffen, passen ihre Rechtsordnungen an die Standards des Europarechts an. Schließlich orientieren sich auch die Länder der GUS beim Umbau ihrer Staatsordnungen an westeuropäischen Rechtsvorbildern, obwohl ihr Beitritt langfristig gar nicht in Sicht ist oder von den Ländern selbst nicht gewünscht wird. Nach einem jahrzehntelangen Leben im sozialistischen Rechtskreis fällt die Anpassung an demokratische Rechtsnormen nicht immer leicht und ist gekennzeichnet von großen Unterschieden zwischen dem geschriebenen Gesetz und dem gelebten Recht.

Mit dem Zusammenwachsen der ehemals durch den Eisernen Vorhang getrennten Teile Europas kommen auch einzelne Bürger mit dem Recht und der Rechtswirklichkeit in Osteuropa in Kontakt. Das betrifft den Westtouristen, der von einem russischen Polizisten kostenpflichtig verwarnt wird, weil er die Straße trotz roter Ampel überquert hat, genauso wie den deutschen Patienten, der sich in Ungarn einer zahnärztlichen Behandlung unterzieht und mit der Klinik über die Bezahlung streitet. Vor allem ist davon die deutsche und hier besonders die bayerische Wirtschaft betroffen, die zunehmend auf den Märkten Osteuropas präsent ist. Umgekehrt wächst die Zahl der osteuropäischen Unternehmen, die in Deutschland und wiederum vor allem in Bayern tätig sind. Für den Erfolg dieser Aktivitäten entscheidend ist das rechtliche Umfeld und wie es umgesetzt wird.

Über das Recht und die Rechtswirklichkeit in den Ländern Osteuropas herrschen hierzulande oft noch Vorurteile. Seit 1957 erforscht das Institut für Ostrecht München (IOR) die Rechtsentwicklung in Osteuropa und verbreitet als außeruniversitäre Forschungseinrichtung dieses Wissen in Deutschland. Im Forschungsverbund Ost- und Südosteuropa (forost) befasst sich das IOR mit dem geschriebenen und dem gelebten Recht in zwei für den grenzüberschreitenden Rechtsverkehr wichtigen Feldern: der Vollstreckung von Urteilen deutscher Gerichte gegen ausländische Unternehmen oder Per-

sonen, die in deren osteuropäischem Heimatland durchgesetzt werden sollen, und der Bekämpfung von Korruption, vor allem, aber nicht nur, im öffentlichen Sektor.

Kein Kuckuck in Osteuropa ...

Das Vollstreckungsrecht in seiner heutigen Form ist in Osteuropa ein Produkt der nachsozialistischen Rechtsentwicklung. Während des Sozialismus waren die Regelungen wie auch die Institutionen zur Vollstreckung von Gerichtsurteilen unterentwickelt, weil es kein praktisches Bedürfnis gab: Der Sozialismus hatte andere Methoden, Urteile durchzusetzen. Dem Staat gehörten fast alle Unternehmen, sodass er kraft seiner Eigentümerstellung die Beachtung eines Urteils gegen ein Unternehmen anordnen konnte. Bei Urteilen gegen Privatpersonen standen hinter dem Gerichtsurteil je nach Land mehr oder weniger offen die Repressionsapparate von Staat und Partei, deren bloße Existenz dem Bürger den Gehorsam gegenüber Gerichtsurteilen nahe legte. Diese Methoden sind mit einer Demokratie aber nicht nur inkompatibel, sondern unter den neuen Bedingungen auch wenig praktikabel, sodass nach der Wende schnell Bedarf nach einem effektiven Instrumentarium der Vollstreckung entstand. Es fehlte sowohl ein materielles Vollstreckungsrecht als auch eine Organisation zur Durchführung: der Beruf des Gerichtsvollziehers war gänzlich unbekannt.

Die einzelnen Staaten gingen dabei durchaus unterschiedliche Wege. Das Spektrum im geschriebenen Recht

reicht von sehr schuldnerfreundlichen Regelungen, die die Durchsetzung gerichtlich titulierter Ansprüche erschweren (wie in Bulgarien), bis zu einem sehr gläubigerfreundlichen Recht, das dem Schuldner nur wenig Schutz vor den Ansprüchen des Gläubigers einräumt (beispielsweise in Ungarn). Für diese Unterschiede sind sowohl die vorsozialistischen Traditionen wie auch rechtspolitische Grundentscheidungen verantwortlich.

...dafür Kreativität

Auch die institutionelle Seite zeigt eine große Vielfalt an nationalen Lösungen. Einige Staaten haben die Zwangsvollstreckung durch die Gerichte mit recht geringen Modifikationen beibehalten. Andere haben einen staatlichen Gerichtsvollzieherdienst aufgebaut, während eine dritte Gruppe sich für die Einrichtung eines freien, aber staatlich gebundenen Berufs (vergleichbar mit den deutschen Notaren) entschieden hat. Auch Mischsysteme kommen vor, besonders ausgeprägt in Tschechien und der Slowakei.

Auf der Ebene der praktischen Durchsetzung verringern sich allerdings die Differenzen. Auch in Staaten, die ein grundsätzlich gläubigerfreundliches Zwangsvollstreckungsrecht „mit Biss“ haben, laufen die Bemühungen des Gläubigers oft ins Leere. Die Gründe für das Vollzugsdefizit sind vielfältig: Den älteren, noch zu sozialistischen Zeiten sozialisierten Richtern mangelt es manchmal an Problembewusstsein. Die Tradition einer sehr am Wortlaut des Gesetzestextes klebenden Rechtsauslegung

kann den Vollstreckungsorganen den Mut zum Ausschöpfen von gesetzlichen Spielräumen nehmen. Oder die fehlenden Anreize ermuntern sie nicht genug, um sich mit voller Kraft für die Belange des Gläubigers einzusetzen.

EU-Recht für Alle? Im Prinzip „Ja“!

Ein weiteres Problem des postsozialistischen Rechtswandels war die Vollstreckung ausländischer Gerichtsurteile. Während sozialistischer Zeiten war die Frage nach der Anerkennung und Vollstreckung ausländischer Urteile, insbesondere solcher aus nicht-sozialistischen Staaten, eher theoretisch und – wenn überhaupt – auf den familienrechtlichen Bereich beschränkt (Unterhaltszahlungen). Mit dem Wegfall der sozialistischen Abschottung des innerstaatlichen Rechtsraums gegenüber dem Ausland und der Einbindung der osteuropäischen Staaten in den Weltmarkt wurde eine Regelung für die Durchsetzung ausländischer Urteile nötig. Die Zahl der Fälle stieg, in denen osteuropäische Unternehmen vor ausländischen Gerichten verklagt und verurteilt wurden, das Urteil aber im Heimatland des Unternehmens vollstreckt werden musste, weil sich dort das Vermögen des Unternehmens befindet.

Bei den EU-Mitgliedstaaten regelt das EU-Recht diese Frage: Kraft gemeinschaftsrechtlicher Regelungen stehen zahlreiche Urteile und vollstreckbare Urkunden aus anderen EU-Mitgliedstaaten dem innerstaatlichen Recht gleich. Dies ist aber nur eine „Scheinlösung“: Die Gleichstel-

lung mit innerstaatlichen Urteilen bewirkt nämlich, dass die bereits erwähnten Schwierigkeiten bei der Durchsetzung einheimischer Urteile auf die Vollstreckung ausländischer Urteile durchschlagen. Das deutsche Urteil hat im Vollstreckungsverfahren gegen säumige Schuldner vor Ort die gleichen Probleme wie ein tschechisches, slowenisches oder litauisches Urteil, nämlich ein in manchen Ländern sehr schuldnerfreundliches Recht sowie überall ein deutliches Vollzugsdefizit. Hinzu kommt, dass die Vollstreckungsorgane einiger EU-Neumitglieder Urteile aus anderen Mitgliedstaaten trotz Gleichbehandlungsgebots spürbar schlechter behandeln (ein Beispiel ist Polen).

Kein Vertrauensvorschuss – Vollstreckung nur mit Vertrag

Nicht-EU-Staaten errichten bereits auf der Ebene des geschriebenen Rechts gewisse Hürden für die Anerkennung und Vollstreckung ausländischer Urteile. Insbesondere Russland und die Ukraine sind sehr restriktiv und erlauben die Vollstreckung ausländischer Urteile nur, wenn dies in einem völkerrechtlichen Vertrag vereinbart ist. Das in vielen Rechtsordnungen der Welt zu findende Kriterium der Gegenseitigkeit reicht in diesen Ländern regelmäßig nicht aus. Diese beiden Staaten haben auch die gängigen multilateralen Verträge über die gegenseitige Anerkennung und Vollstreckung von Gerichtsurteilen bis auf wenige Ausnahmen nicht ratifiziert; nur im Verhältnis der GUS-Staa-



Gerichtsgebäude in Warschau: Wie viele osteuropäische Staaten hat Polen sein Rechtssystem nach dem Vorbild der EU modernisiert. Bei der Vollstreckung wirken altvertraute Mentalitäten vergangener Tage immer noch nach. (Foto: transit)

ten untereinander sind völkervertragliche Vereinbarungen über die gegenseitige Vollstreckung von Urteilen häufiger. Ein deutsches Urteil wird daher in Russland oder der Ukraine nur in seltenen Ausnahmefällen vollstreckbar sein.

Korruptionsbekämpfung in Osteuropa

Die Zwangsvollstreckung zielt auf die Durchsetzung legaler – da von einem Gericht anerkannter – Interessen ab; die Korruptionsbekämpfung dagegen richtet sich gegen die Durchsetzung an sich schon illegaler Interessen. Alle internationalen Vergleiche zeigen für die osteuropäischen Staaten schlechtere Korruptionsindices auf als für die EU-Altmitglieder. Nicht nur quantitativ ist Korruption in Osteuropa ein gravierenderes Problem als in Westeuropa, die Korruption tritt dort auch in vielfältigeren Formen auf. Die europäischen Behörden haben eine wirksame Korruptionsbekämpfung zu einer Beitrittsbedingung von hoher Priorität gemacht. Deshalb haben die damaligen und heutigen Kandidaten Anstrengungen gegen Korruption unternommen. Aber auch in den anderen Staaten Osteuropas ist das Bewusstsein vorhanden, dass die Korruption in ihrer jetzigen Gestalt nicht akzeptabel ist.

Bestechung im Amt

Auf die unterschiedlichen Formen der Korruption reagieren die einzelnen Staaten Osteuropas mit sehr unterschiedlichen Regelungen. Grundsätzlich gilt, dass der Erlass von Rechtsvorschriften alleine dem Phänomen Korruption nicht Herr wird, aber ohne ein entsprechendes rechtliches Umfeld bleiben alle tatsächlichen Ansätze vergebens.

Diese Rechtsvorschriften bilden kein zusammenhängendes „Antikorruptionsrecht“, sondern bestehen vielmehr aus einzelnen Regelungen im Strafrecht, Vergabe- und Beschaffungsrecht, allgemeinen Verwaltungsrecht, öffentlichen Dienstrecht, Zivilrecht, Finanzrecht ...

Besonders weit entwickelt ist bei den neuen Mitgliedern und den Beitrittskandidaten aufgrund der europarechtlichen Vorgaben das Recht der öffentlichen Auftragsvergabe und Beschaffung. Ausgefeilte materielle Regeln und Verfahrensvorschriften stellen sicher, dass beim Ausgeben öffentlicher Gelder das beste Angebot und nicht die persönliche Beziehung den Ausschlag gibt. Wie bereits im Zusammenhang mit der Zwangsvollstreckung beschrieben, werden die teils qualitativ guten Rechtsvorschriften durch ein weit verbreitetes Vollzugsdefizit entwertet.

Leistung gegen Obolus

In etlichen osteuropäischen Staaten dienten die Reformen des öffentlichen Dienst- und Arbeitsrechts in einem für uns Deutsche ungewöhnlich starken Maße auch der Bekämpfung der Korruption. Höhere Löhne im öffentlichen Dienst, verbunden mit einem transparenten Laufbahn- und Beförderungssystem, sollen den Anreiz – oder die Notwendigkeit – für den einzelnen Beamten verringern, auf außerdienstliche Einkommensquellen zuzugreifen. Trotzdem gibt es in praktisch allen osteuropäischen Staaten nach wie vor viele Beschäftigte des öffentlichen Dienstes, die unterbezahlt sind und deshalb Leistung nur gegen Zahlung eines Obolus verteilen. Zu diesen unterfinanzierten und unterbezahlten Bereichen gehören oft das öffentliche Gesundheitswesen, die kommunale und staatliche Innenverwaltung – wo der Antragsteller in vielen Ländern nur gegen Entlohnung des zuständigen Beamten die ihm zustehende Baugenehmigung oder den Reisepass erhält – oder auch das Hochschulwesen. Neben dieser „Kleinkorruption im Massengeschäft“ sind auch nach den Reformen die Verwaltungen korruptionsanfällig, die über bedeutende wirtschaftliche Werte entscheiden, wie zum Beispiel die Wirtschafts- oder Bankenaufsicht. Nach der allenthalben durchgeführten grundlegenden Reform des Gerichtswesens und des richterlichen Dienstrechts ist in vielen Staaten die Justiz vergleichsweise korruptionsfrei, kann sich dafür allerdings mancherorts der politischen Einflussnahme nicht immer erwehren. Die Intervention des

Priv.-Doz. Dr. Herbert Küpper (Jahrgang 1964) ist Geschäftsführer des Instituts für Ostrecht München und Referent für Ungarisches Recht. Als Forschungsgruppenleiter im Forschungsverbund FOROST beschäftigen er und die übrigen Länderreferenten des IOR sich mit der Korruptionsbekämpfung und den Problemen bei der Vollstreckung von Gerichtsurteilen in osteuropäischen Ländern.

ukrainischen Präsidenten in anhängige Gerichtsverfahren zu Lasten eines russischen Unternehmens (Sovtransavto) hat bereits den Europäischen Menschenrechtsgerichtshof in Straßburg beschäftigt, und auch die Instrumentalisierung der russischen Justiz gegen Yukos und seine Führungspersonlichkeiten durch Präsident Putin weist in dieselbe Richtung.

Der Geldwäsche auf der Spur

Die rasante internationale Entwicklung im Bereich der Geldwäsche spiegelt sich auch in osteuropäischen Gesetzen. Viele Staaten haben präzise Straftatbestände eingeführt und im Bank- und Finanzrecht Mechanismen zur Erkennung und Verhinderung von Geldwäsche geschaffen. Diese zur Bekämpfung der organisierten Kriminalität entwickelten Vorschriften werden auch dazu genutzt, Geldströme aus Korruptionstaten auszutrocknen. Flankierend verbessern Reformen im Strafprozessrecht die Ermittlungsmöglichkeiten der Strafverfolgungsbehörden.

Das Strafrecht wurde nicht nur in Bezug auf die Geldwäsche, sondern allgemein für die Korruptionstatbestände präzisiert. In sozialistischer Zeit fehlten solche Strafbestimmungen ganz oder waren so allgemein formuliert, dass sie die heutigen Formen korrupten Handelns nicht erfassen. Daher war eine detaillierte Neuregelung unumgänglich, um den neuen – aber auch manchen alten – Formen der Korruption strafrechtlich begegnen zu können. Die Verurtei-

lungszahlen aus diesen Tatbeständen sind aber in fast allen osteuropäischen Staaten äußerst gering.

Gegen die genannten Missstände gibt es kein Patentrezept, weder für den osteuropäischen Bürger noch für den westlichen Unternehmer. Einige der Probleme kann der deutsche Unternehmer besser bewältigen, wenn er vor Ort einen schlagkräftigen Rechtsanwalt engagiert. Dieser kann auf Vollstreckungsorgane den manchmal notwendigen Druck ausüben, und in einigen Ländern lassen korrupte Beamte bei der Beteiligung eines Rechtsanwalts größere Vorsicht walten. In manchen Fällen hat sich gegen einen korrupten Beamten ein Gespräch mit dessen Vorgesetzten – sofern man an ihn herankommt – als probates Mittel erwiesen; auch hierbei kann ein Rechtsanwalt vor Ort von Nutzen sein.

Insgesamt ergeben die Untersuchungen sowohl zur Vollstreckung deutscher Urteile als auch zur Korruptionsbekämpfung ein buntes Bild. In manchen Fragen haben die osteuropäischen Staaten im Zuge des kompletten Umbaus ihrer Rechtsordnungen originelle und effektive Lösungen gefunden, die durchaus als Modell für Modernisierungen veralteter Regelungen in Westeuropa dienen können. Das im Vergleich zu westlichen Rechtsordnungen stärker spürbare Vollzugsdefizit ist und bleibt das Hauptproblem des gelebten Rechts in Osteuropa.

DIE QUANTIFIZIERUNG DES LOGISTISCHEN NUTZENS

Kostenausgleich und Nutzenverteilung in Supply Chains

Horst Wildemann

Hersteller, Lieferanten und Logistikdienstleister arbeiten zusammen an der Erstellung von Produkten und beteiligen sich auch gemeinsam an der Schaffung von Wertpotenzialen. Aber es ist nicht untypisch, dass sich die Akteure bei der Einführung logistischer Konzepte zur Effizienzverbesserung der Supply Chain immer gleichgültiger gegenüberstehen. Grund hierfür ist vor allem in mangelndem Vertrauen untereinander und in der ungleichen Nutzenverteilung zu sehen. Dieser Beitrag untersucht den Kostenausgleich auf Basis der Nutzenverteilung und zeigt auf, wie Transparenz über den logistischen Nutzen in Wertschöpfungsnetzwerken die Zusammenarbeit fördern kann.

Supply Chain Management ist eine Organisations- und Managementphilosophie, die alle Aktivitäten der am Wertschöpfungs-system beteiligten Unternehmen prozessoptimierend integriert. Sie zielt auf eine unternehmensübergreifende Koordination und Synchronisierung der Informations- und Materialflüsse, um Kosten, Zeitabläufe und Qualität zu optimieren. In der Theorie ist dieses Konzept mehr als hinreichend analysiert und beschrieben worden, doch die praktische Umsetzung weicht oft erheblich von der wissenschaftlichen Betrachtungsweise ab. Was ist der Grund dafür?

Eigeninteressen verhindern Systemoptimum

Die isolierte und funktionsbezogene Sichtweise von Unternehmen führte in der Vergangenheit oftmals zu opportunistischem Verhalten unter den

Wertschöpfungspartnern. Das bedeutet, dass jede Seite Maßnahmen ergriffen hat, die Eigeninteressen zur individuellen Nutzenmaximierung verfolgen. Diese verhindern in dieser Situation jedoch die volle Ausschöpfung von Potenzialen und führen in vielen Bereichen zu Suboptima. Der „Lopez-Effekt“ der Kostenabwälzung vom OEM („Original Equipment Manufacturer“ sind Hersteller, die zugekaufte Teile unter eigenem Namen auf den Markt bringen) auf Lieferanten und die daraus folgende Negativstimmung bei der Erwähnung des Wortes „Partnerschaft“ in der Automobilzulieferindustrie verhindert so beispielsweise die Erzielung gemeinsamer Systemoptima.

Dass die Praxis dieses Thema auch aktuell brisant diskutiert, zeigen die Kostensteigerungen bei Stahl, Kunststoffen, Aluminium, Rhodium oder Kupfer, vom Verarbeiter auf den allerersten Stufen der Supply Chain bis hin zum Fahrzeughersteller. In diesem Zusammenhang spricht Gottschalk, Präsident des Verbandes der Automobilindustrie, von einer „Zerreißprobe“ der Wertschöpfungsketten. Der oft strapazierte Begriff der Partnerschaft bekommt gerade in dieser heutigen, von steigender Komplexität und Volatilität gekennzeichneten Zeit eine ganz neue Bedeutung. Der Ansatz des einfachen „Durchreichens“ der Kosten an Akteure der vorderen Wertschöpfungsstufen ist dabei keine sinnvolle zukunftsfähige Lösung. Es ist mittlerweile unstrittig, dass zur fairen Teilung der Lasten auch Kosten- und Nutzentransparenz gehören.



Die Quantifizierung des logistischen Nutzens

Zusammenarbeit erfordert Transparenz

Dass die Akteure der Wertschöpfungskette näher zusammenrücken müssen und dieser Weg über mehr Transparenz führt, zeigt auch das aktuelle Beispiel des elektronischen Kapazitätsmanagements im Hause Audi. Audi hinterlegt hierbei auf einem Internetportal seine Bedarfspläne, Zulieferer ihre Produktionskapazitäten. Eine Software errechnet dann mögliche Kapazitätslücken und weist auf Engpässe hin. Die Umsetzung dieses Konzeptes setzt voraus, dass die Beteiligten einen individuellen Nutzen für sich sehen. Nur so können auch zukunftsfähige logistische Konzepte reaktionsschnell und wirkungsvoll Eingang in die Supply Chain finden. Die Frage der Identifikation und Quantifizierung von Nut-

zen stellt somit ein zentrales Thema dar. Die Antwort auf die oben beschriebene Problematik beschäftigt sich mit der Quantifizierung von logistischem Nutzen und der darauf aufbauenden Verteilung von Kosten und dem Vorteilsausgleich in Supply Chains. Die Fragestellungen lauten:

■ Wie ist der logistische Nutzen in der Supply Chain definiert? – Es wird untersucht, wie logistischer Nutzen in Supply Chains beschrieben werden kann, welche Kennzahlen und welche Softfacts (zum Beispiel Vertrauen) herangezogen werden müssen, um den logistischen Nutzen realitätstreu abzubilden.

■ Wie kann der logistische Nutzen gemessen und bewertet werden? – Die Fragestellung beschäftigt sich mit den für die Quantifizierung von logistischem Nutzen notwendigen

Instrumenten und Methoden. Diese sind zu einem sinnvollen und effizienten Instrumentenmix zusammenzuführen.

■ Wie kann ein Vorteilsausgleich vor dem Hintergrund der Nutzenverteilung umgesetzt werden? – Ist der logistische Nutzen erst einmal quantifiziert und beschrieben, geht es darum, das Verteilungsmodell auf Basis der Anteile auszugestalten.

Logistik und Supply Chain Management

Im Rahmen des Forschungsverbundes Supra-adaptive Logistiksysteme (ForLog), der von der Bayerischen Forschungstiftung gefördert wird, beschäftigt sich das Teilprojekt „Vorteilsausgleich – Nutzenverteilung“ unter der wissenschaftlichen Leitung des Autors mit der Quanti-



Foto: avenue images/FRESH!



Foto: Russel Gordon/Das Fotoarchiv



Logistikpotenzial bzw. logistischer Nutzen im Netzwerk

Anforderungsgerechte und gewichtete Maßgrößen bzw. Key Performance Indicators (KPIs) verschiedener Dimensionen, die dazu dienen, die (logistische) Effektivität und Effizienz von Unternehmenskooperationen in Netzwerken zu quantifizieren.

Quantifizierung der Wirkung auf ...												
Bereich Ebene	Logistische Kosten				Logistische Leistungen				Kooperationsqualität			
	Kennzahl	POTENZIAL		Wsch. Ø	Kennzahl	POTENZIAL		Wsch. Ø	Kennzahl	POTENZIAL		Wsch. Ø
Unternehmen	Transportkosten			1,67	Liefertreue			1,67	Vertrauensrate			1,67
	Planungskosten			2,08	Lieferflexibilität			2,08	Kompatibilität			2,08
	Lagerkosten			5,33	Durchlaufzeit			5,33	Geschwindigkeit			5,33
	EDV-Kosten			2,50	Bearbeitungszeit			2,50	Flexibilität			2,50
Netzwerk				3,17				3,17				3,17
				4,67				4,67				4,67
				4,67				4,67				4,67
	Kennzahl n			3,03	Kennzahl n			3,03	Kennzahl n			3,03

Abb. 1: Größen des logistischen Nutzens.

fizierung des logistischen Nutzens in Supply Chains und dem darauf basierenden Vorteils- und Kostenausgleich zwischen den Partnern. Eine effiziente Nutzenverteilung ermöglicht eine wirkungsvolle Zusammenarbeit und damit eine Supra-

Adaptivität (schnelle Wandlungs- und Anpassungsfähigkeit), die den gestiegenen Anforderungen des Marktes in Bezug auf Zeit, Qualität und Kosten gerecht wird. Es geht um die Schaffung eines Anwendungskonzeptes, das den logisti-

schen Nutzen an Hand von messbaren als auch schwer messbaren Größen wie Transparenz und Geschwindigkeit identifiziert und quantifiziert (vgl. Abb. 1).

Die Vorgehensweise fußt auf einem weit reichenden Logistikverständnis. Danach wird unter Logistik die material- und informationsbezogene Überbrückung von Zeit- und Raumdisparitäten verstanden. Während unter dem Begriff „Logistik“ lediglich die einzelwirtschaftliche Sichtweise eines Unternehmens zu verstehen ist, umfasst der Begriff „Supply Chain Management“ die gesamte Lieferkette vom Lieferanten bis zum Kunden. Um sowohl die „einzelwirtschaftliche“ Logistik als auch das „gesamtwirtschaftliche“ Supply Chain Management in seiner Gesamtheit abzudecken, ist es erforder-



Foto: vario-press/Ulrich Baumgarten

Die Quantifizierung des logistischen Nutzens

derlich, logistische Aktivitäten von anderen Aktivitäten im Unternehmen abzugrenzen und mittels nachvollziehbarer Kriterien zu kategorisieren.

Die Effizienz logistischer Prozessketten

Die erste Arbeitshypothese für das Forschungsprojekt lautet deshalb:

„Logistikaktivitäten in Unternehmen lassen sich nach aufzustellenden Kriterien eindeutig klassifizieren.“

Zur Kategorisierung von Logistikaktivitäten stehen in Praxis und Wissenschaft verschiedene Ansätze zur Verfügung, denen jeweils spezifische Motivationen zugrunde liegen. Die Logistikkosten- und Logistikleistungsrechnung ist ein elementarer Bestandteil der Planung und Steuerung logistischer Prozesse. Die Kategorisierung von Logistikaktivitäten erfolgt nach Kosten- und Leistungsarten. Eine Bewertung der Leistung sowie eine wertorientierte Betrachtung erlaubt sie dagegen nicht. Die Effizienz logistischer Prozessketten lässt sich auch mit Hilfe von Logistikbilanzen abbilden, denn sie stellen den Logistikkostenkategorien die logistischen Leistungsgrößen gegenüber. Die „Aktivseite“ der Logistikbilanz bildet die Logistikkosten, die Passivseite die Logistikleistungen ab. Sie ermöglichen damit eine integrale Beurteilung der Leistungsfähigkeit, leistet allerdings keine quantitative Bewertung der Leistung und keine wertorientierte Betrachtung des logistischen Nutzens. Logistikaktivitäten erstrecken sich über nahezu alle Teile der Wertschöpfungskette

von der Lieferanten- bis zur Kunden- seite. Aus diesem Grund sind auch die Auswirkungen der Logistik und des Supply Chain Managements auf den Unternehmenswert entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu untersuchen, denn nur so lässt sich der logistische Nutzen in seiner Gesamtheit ermitteln und das darauf aufbauende Nutzenverteilungskonzept realisieren.

Messkonzepte und Kennzahlen

Die zweite Arbeitshypothese lautet:

„Logistikaktivitäten können wertsteigernde oder -mindernde Wirkungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette haben, das heißt beim Lieferanten, im eigenen Unternehmen oder beim Kunden, und lassen sich an Hand von logistischen Prozessen einer beliebigen Supply Chain erfassen.“

Um die Logistikaktivitäten in ihrer Wirkung entlang der gesamten Wertschöpfungskette umfassend ermitteln zu können, sind Messkonzepte und Kennzahlensysteme erforderlich. Auch hierzu liegen in Wissenschaft und Praxis verschiedene Methoden vor.

Die Balanced Scorecard (BSC) ist in enger Kooperation zwischen Wissenschaft und Unternehmenspraxis entstanden. Ziel ist es, durch die multidimensionale Betrachtung eines Sachverhaltes ein ausgewogenes Bild zu erhalten. Allerdings ist eine quantitative Bewertung des logistischen Nutzens nicht möglich. Insbesondere ist auch die Kopplung der

Balanced Scorecard mit der Größe des logistischen Nutzens nur bedingt vorhanden.

Die European Foundation for Quality Management (EFQM) entwickelte ein weiteres etabliertes Kennzahlensystem. Das EFQM-Modell ist ein Instrument zur Planung, Steuerung und Überwachung eines umfassenden unternehmensspezifischen Qualitätsmanagement-Systems. Es fokussiert nicht nur auf eine Steigerung der Prozessqualität, sondern auch auf die Verbesserung weiterer erfolgsrelevanter Parameter wie etwa der Kundenzufriedenheit. Die Logistik übt durch ihren querschnittsorientierten Charakter einen erheblichen Einfluss auf die Bewertung aus. Wie die BSC stößt jedoch auch das EFQM-Modell an seine Grenzen, wenn es um eine konkrete Quantifizierung des logistischen Nutzens geht.

Messbare Effekte auf den Unternehmenswert

Die Wirkungsanalyse von Logistikkonzeptionen basiert auf dem Untersuchungsobjekt „Logistikprozess Supply Chain“. Logistische Verbesserungsmaßnahmen sind in erster Linie danach zu beurteilen, ob sie einen positiven und/oder negativen Effekt auf den Unternehmenswert ausüben. Dazu werden im Forschungsprojekt Instrumente entwickelt, die eine Quantifizierung der Wirkung von einzelnen logistischen Verbesserungsmaßnahmen ermöglichen.

Die Formulierung der dritten Arbeitshypothese lautet:

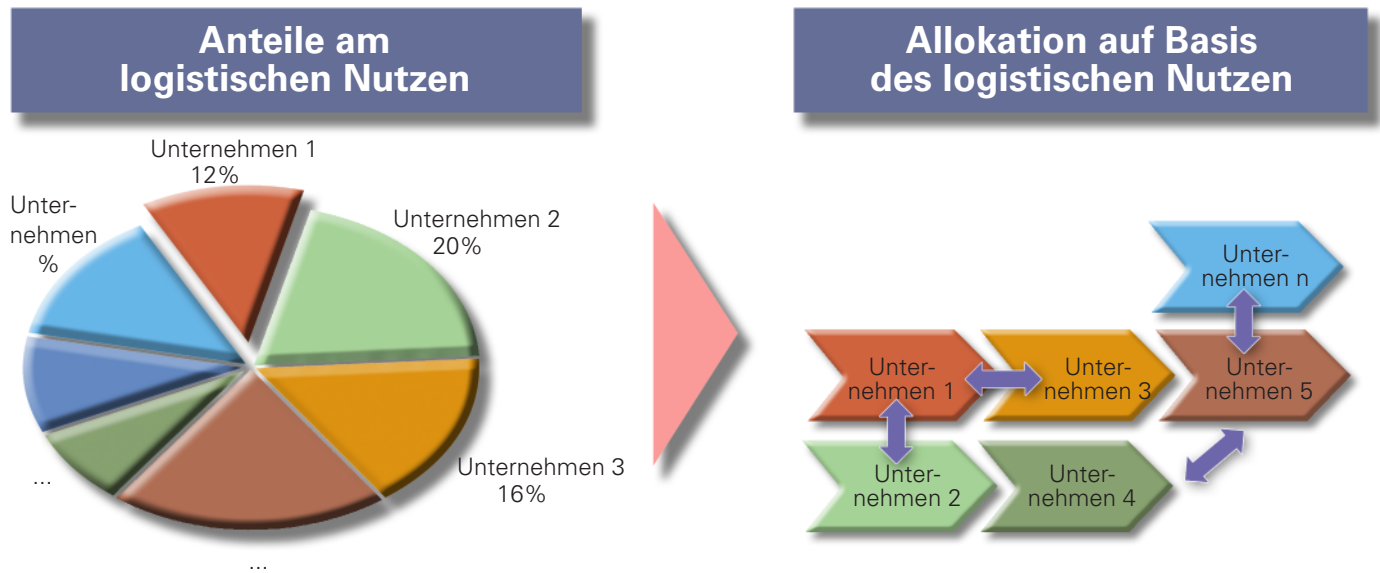


Abb. 2: Allokation auf Basis des logistischen Nutzens.

„Eine logistische Nutzengröße kann die Wirkungen von logistischen Verbesserungsmaßnahmen auf den Unternehmenswert abbilden.“

Die bestehenden Methoden sind kaum in der Lage, Nutzen zu quantifizieren, deshalb müssen sie entweder erweitert werden oder es ist notwendig, neue Managementmethoden zu entwickeln. Die Ermittlung der unternehmensinternen Logistikleistung als auch die unternehmensübergreifende Logistikleistung ermöglichen beide eine Quantifizierung des Nutzens. Das Logistiknetzwerk erfordert folglich sowohl die Ermittlung der Leistung des jeweiligen Unternehmens als auch die des gesamten Wertschöpfungsprozesses. Wesentlich dafür sind die Nutzentreiber, die ermittelt und in ein Messkonzept integriert werden müssen. Die Wirkungsbe-

ziehungen zwischen den einzelnen Leistungsgrößen bilden die Basis für eine Quantifizierung der Logistikleistung.

Das Ergebnis des Forschungsprojekts soll ein modulares Modell sein, das die Wirkungsbeziehungen abbildet. Den Test des Modells führen die Wissenschaftler zusammen mit den beteiligten Industrieunternehmen durch. Den Unternehmen ermöglicht das Modell die Quantifizierung des logistischen Nutzens. Damit können sie die Wettbewerbsfähigkeit ihrer Logistik überprüfen und im Vergleich der Akteure bewerten. Die Gewichtung und Aggregation von Kenngrößen zu einer logistischen Nutzengröße ermöglicht eine nachvollziehbare Transparenz zwischen den Akteuren, die die gemeinsame Diskussion über entstehende Kosten- und Nutzenverteilung erleichtert (siehe Abbildung 2).

Damit sichergestellt ist, dass die erarbeiteten Ergebnisse praxistauglich sind, testen die Forscher die identifizierten und analysierten Instrumente und Methoden sowie die Erkenntnisse, Wirkungszusammenhänge und Vorgehensweisen in einem Pilotprojekt. Die beteiligten Automobilhersteller und Zulieferunternehmen gewährleisten die Übertragung der Ergebnisse auf die Netzwerkstrukturen der Automobilbranche.

Die effiziente Ausgestaltung unternehmensübergreifender Supply Chains ist einer der wesentlichen Stellhebel für den langfristigen Erfolg von Unternehmen in wettbewerbsintensiven, volatilen und komplexen Märkten. Der integrierende Ansatz des Supply Chain Managements stellt dafür die Methoden, Instrumente und Kontrollmechanismen zur optimalen Ausgestaltung der Wertschöpfungsketten und -netzwerke

Die Quantifizierung des logistischen Nutzens

Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Horst Wildemann

(Jahrgang 1942) ist Forschungsgruppenleiter bei FORLOG und Inhaber des Lehrstuhls für Betriebswirtschaftslehre – Unternehmensführung, Logistik und Produktion an der Technischen Universität München. Seine Forschungsschwerpunkte sind Einkauf, Logistik, strategische Investitionsplanung, Fertigungsorganisation und Technikmanagement. Für führende Industrieunternehmen ist Prof. Wildemann als Berater, Aufsichtsrats- und Beiratsmitglied tätig.

zur Verfügung. Die Ermittlung und Quantifizierung des logistischen Nutzens muss in diesem Zusammenhang als ein innovatives und leistungsfähiges Werkzeug zur Schaffung wettbewerbsfähiger Wertschöpfungspartnerschaften verstanden werden. Eine valide Messung und Bewertung des logistischen Nutzens erlaubt tragfähige Aussagen über Nutzen- und Kostenallokationen. Auf deren Basis lassen sich Modelle des Vorteilsausgleichs zwischen kooperierenden Unternehmen definieren und vereinbaren. Die Transparenz über den logistischen Nutzen und die sich daraus ableitenden Implikationen für die Ausgestaltung von Supply Chains verlangt nach einem Paradigmenwechsel und erfordert von den Akteuren innerhalb der Wertschöpfungskette ein Umdenken hin zu einer partnerschaftlichen Erlangung des Systemoptimums anstelle der isolierten – und langfristig nicht praktikablen – Orientierung auf die jeweils individuelle Nutzenmaximierung.

RFID – ES FUNKT GEWALTIG



Willibald Günthner, Julia Boppert
und Michael Schedlbauer

*„Der Erfolgreichste im Leben ist der,
der am besten informiert wird.“*
Benjamin Disraeli, britischer Politiker
und Schriftsteller

Was haben Kleidungsstücke, Haustiere, Autoschlüssel, Firmenausweise, WM-Eintrittskarten, Autoreifen, Reisepässe, Paletten, Kreditkarten, Arzneimittel, Mietfahrzeuge und Schiffscontainer gemeinsam mit dem österreichischen Mautsystem, britischen Nummernschildern oder vatikanischen Büchern? Alle diese Dinge besitzen einen individuellen „Personalausweis“ in Form eines Transponders mit RFID-Technologie. Im Gegensatz zum altbekannten Barcode ist dabei nicht einmal eine Sichtverbindung zum Lesen der hinterlegten Daten notwendig, sodass Transponder oft gar nicht als Bestandteil des jeweiligen Gegenstands wahrgenommen werden. Doch Identifikation ist bei weitem nicht alles, was sie können ...

Die vatikanische Bibliothek: Transpondersysteme auf der Basis der RFID-Technologie erleichtern die Suche und schützen die Bücher vor Diebstahl.
(Foto: Texas Instruments Incorporated)

RFID – Radio Frequency Identification ist eine berührungslose Identifikationstechnologie, die Daten mit Hilfe elektromagnetischer Wechselfelder überträgt. Ein RFID-System besteht dabei prinzipiell aus einer Schreib-/Leseinheit und dem Transponder, der sich wiederum aus einem Mikrochip als Datenträger und einer Spule als Antenne zusammensetzt. Transponder – in Abhängigkeit von ihrer Bauform oft auch Tags genannt – gibt es in vielen verschiedenen Varianten. Die grundsätzliche Unterteilung erfolgt in aktive (mit eigener Energieversorgung) und passive Elemente (ohne eigene Energieversorgung) sowie an Hand der verschiedenen verwendeten Arbeitsfrequenzbereiche. Diese Faktoren sind ausschlaggebend für die Lesereichweite (zwischen einem Zentimeter und mehreren 100 Metern), für die Geschwin-

digkeit der Datenübertragung und für die Störanfälligkeit gegenüber äußeren Einflüssen. Für logistische Aufgaben zeigt sich beispielsweise das Frequenzband um 13,56 MHz als besonders geeignet. Zum Einsatz kommen hier in der Regel Smart Label genannte Transponderbauformen, die als eine Art „Aufkleber“ das Gut kennzeichnen.

Gegenüber etablierten und bereits lange Zeit im Einsatz befindlichen Identverfahren wie dem Barcode, zeichnet sich die Transpondertechnologie durch eine Reihe von Vorteilen aus: Die Leseeinrichtung braucht keinen Sichtkontakt, um die Daten auf dem Transponder zu lesen, auch nicht über größere Entfernungen und im Pulk. Spediteure müssen deshalb beim Packen und Laden der Güter nicht mehr wie bei den Barcodes darauf achten, dass alle Etiketten



sichtbar sind und keines etwa im Innern der Palette verschwindet. Transponder fassen auch größere Datenmengen und können immer wieder neu beschrieben werden. Damit ermöglichen sie zum ersten Mal eine effiziente dezentrale Datenhaltung direkt am Transportgut. Die RFID-Technologie eignet sich deshalb ideal zur effizienteren Verfolgung, Steuerung und Begleitung logistischer Objekte und Prozesse in Wertschöpfungsnetzen. Das Transportgut gewinnt durch das Smart Label an „Intelligenz“, die neben einer durchgängigen Informationslogistik neue dezentrale und hochflexible Steuerungsstrukturen ermöglicht. Die komplexen, anfälligen und kaum noch zu überschauenden IT-Systeme zur Steuerung und Optimierung logistischer Abläufe könnten damit der Vergangenheit angehören.

Ähnlich vielfältig wie die unterschiedlichen Transpondertypen sind auch deren Einsatzfelder: Sie reichen von den passiven 1-Bit-Transpondern zur Diebstahlsicherung – zum Beispiel als Hartplastikscheiben an noch nicht bezahlter Bekleidung – bis hin

zu aktiven, mit Sensoren kombinierten Exemplaren zur Aufzeichnung von Temperaturverläufen, die sicherstellen, dass die Kühlkette für Lebensmittel eingehalten wird.

Die schnelle und eindeutige Identifizierung per Smart Label vereinfacht die Verfolgbarkeit einzelner Objekte und damit die logistischen Systeme und Prozesse, sichert aber auch die Waren, ordnet Eigentum zu und hilft beim Marken- und Plagiatenschutz.

Future Shopping

Neu ist die RFID-Technologie nicht, denn sie wurde bereits im Zweiten Weltkrieg zur Freund-Feind-Kennung von Flugzeugen entwickelt.

Auch zur Tieridentifikation wird die Technologie bereits seit einigen Jahren eingesetzt, sei es, um teure Zuchttiere eindeutig ihren Besitzern zuzuordnen oder um vor dem Hintergrund von BSE die Rückverfolgung von Rindfleisch von der Theke bis zum Bauernhof sicherzustellen.

Viele „kennen“ RFID von der Liftschranke im Skigebiet, wenn sie das Ticket nicht mehr mühsam mit dicken Handschuhen in den Leseau-

tomat stecken müssen, sondern problemlos und elegant durch das Drehkreuz gleiten können. Nach dem gleichen Prinzip kontrollieren viele Unternehmen und öffentliche Einrichtungen die Zugangsberechtigung von Besuchern und Personal oder vermerken Arbeitsbeginn und Arbeitsende ihrer Mitarbeiter mit Hilfe Transponder bestückter Ausweise.

Auch die Bücher der vatikanischen Bibliothek sind mit Transpondern versehen, damit ihr Standort jederzeit bekannt ist – um die Suche zu erleichtern, aber auch um ein „Verschwinden“ der teils unbezahlbaren Stücke zu verhindern.

In den letzten fünf Jahren erlebt RFID jedoch vor allem im Handelssektor einen regelrechten Boom. In aller Munde ist der Future Store der Metro AG: Als Vorzeigebispiel für innovatives Einkaufen zeigt er den Endkunden bereits heute viele neue Möglichkeiten der Technologie. Der Kunde gibt mit Hilfe einer RFID-Kundenkarte seine Wünsche in das Terminal seines Einkaufswagens ein, das System bestimmt daraus seine „Shopping-Route“ und zeigt ihm



Foto: Schreiner Group GmbH & Co. KG



Foto: Schreiner Group GmbH & Co. KG



über ein Display kontinuierlich den Weg zu Waren seiner Einkaufsliste an. Entnimmt er eine Ware – die natürlich mit einem Transponder versehen ist – aus dem Regal, verbucht der Kunde diese in seinem Wagen. Das mit Lesegeräten ausgerüstete Regal selbst ist im Gegenzug kontinuierlich über seinen Befüllungsstand informiert und bestellt bei Bedarf selbstständig Ware nach. Auf dem Weg durch den Supermarkt gibt das System dem Kunden ferner Einkaufstipps, informiert auf Wunsch über Sonderangebote und kann sich sogar an Produkte erinnern, die er beim letzten Einkauf mitgenommen und heute eventuell vergessen hat.

Hat der Kunde seinen Einkauf beendet, fährt er mit seinem Wagen durch ein so genanntes Gate – eine torförmige Leseinheit. Das System vergleicht dabei den Wageninhalt mit der vorher verbuchten Liste und ist sogar in der Lage, den fälligen Betrag automatisch von der Geldkarte des Kunden abzubuchen. Langes Anstehen an der Kasse gehört damit der Vergangenheit an.

Im Future Store laufen viele Prozesse durch die nahezu lückenlose „Ortung“ der Waren automatisch ab. Die schnelle Erfassung aller Produkte über die Lesestationen und der automatische Zahlungsvorgang erhöhen den Kundendurchsatz. Der elektronische Nachfüllauftrag der Regalfächer verhindert, dass die gewünschte Ware im Regal fehlt und der Kunde auf ein Alternativprodukt zurückgreifen muss – und beim nächsten Einkauf vielleicht gleich zum „neuen“ Produkt greift. Statistiken zeigen, dass über 7% des erwarteten Gewinns ausbleiben, weil das Regal nicht rechtzeitig mit der gewünschten Ware gefüllt werden konnte. Ein weiterer Vorteil – vor allem bei verderblichen Produkten – ist, dass das System kontinuierlich über die Haltbarkeit der Waren informiert ist. Produkte, deren Haltbarkeitsdatum früher abläuft, werden weiter vorne positioniert, abgelaufene Waren rechtzeitig aus den Regalen entfernt.

Eine entscheidende Rolle spielt im Handel zudem die Warensicherung: Diebe suchen sich am liebsten kleine, aber teure Produkte aus. So ist

es nicht verwunderlich, dass beispielsweise der Hersteller Gillette für den absoluten Favoriten aller Langfinger, Klingen für Venus-Rasierer, Transponder zur Diebstahlsicherung einsetzt – und sich dadurch Millionen an Schwund erspart.

Weniger Fehler im Pulk

Während der Endkunde nur den Supermarkt als letztes Glied einer langen Kette kennt, entfaltet die RFID-Technologie ihr größte Wirkung bei den vorgelagerten Prozessen, beispielsweise bei der Lieferabwicklung zwischen Herstellern und Verteilzentren. Häufige Fehler bei der Zusammenstellung der bestellten Positionen entstehen, weil die Daten bei der Kommissionierung der Waren nicht synchronisiert sind. Müssen Positionen manuell oder über umständliche Datentransformationen beim Zwischenhändler eingegeben werden, entstehen unvermeidbar Fehler. Barcode-Lösungen erfordern beim Eintreffen von Lieferungen am Wareneingang, die Sendungen mit einem Barcode-Scanner Stück für Stück einzulesen. Herrscht am Wa-



Foto: Quelle: BMW AG



Foto: Volkswagen AG



Foto: Skidata AG

reneingang im Lager des Kunden zu Stoßzeiten Gedränge, ist eine 100%ige Eingangskontrolle nicht sofort möglich, und die Lageristen bemerken Über- oder auch Unterlieferungen erst, wenn der liefernde LKW das Gelände schon lange wieder verlassen hat. Rücksendungen oder Nachlieferungen sind aufwändig und kosten viel Geld.

Die so genannte Pulklesefähigkeit einiger RFID-Lösungen verhindert derartige Fehler, weil sie einerseits die (Gesamt-)Auslesezeit verringert und andererseits die Qualität der Informationen steigert. Haben die ankommenden Güter Transponder, genügt es, die Palette direkt bei der Anlieferung durch ein Gate zu fahren: Alle Produkte melden hier über Funk die notwendigen Daten (wie Identnummer, Anzahl der Güter etc.) an das übergeordnete System, das sie nahezu gleichzeitig erfasst und automatisch verbucht. Sollte eine Lieferung fehlerhaft sein, merkt das System das sehr schnell und schickt die Ware sofort zurück.

Große Datenmengen parallel im Pulk fehlerfrei zu lesen, ist jedoch

nicht trivial. So genannte Antikollisionsalgorithmen erfassen beispielsweise zunächst alle Tags innerhalb des Lesefeldes der Station und schalten sie anschließend auf „stumm“. Im nächsten Moment aktivieren sie sie wieder einzeln nacheinander und fragen dabei die jeweiligen Informationen ab. Trotz seiner Komplexität dauert dieser Prozess in der Realität nur wenige Zehntelsekunden.

Der Logistikraum

Die RFID-Technologie eröffnet den Logistiksystemen der Zukunft zahlreiche neue Möglichkeiten. Vor allem im Hochlohnland Deutschland liegt die Zukunft in automatisierten Systemen, da sich durch den Wegfall von Handlingtätigkeiten hohe Personalkosten einsparen lassen. Dazu ist es allerdings erforderlich, die heute noch „dummen“ und „stummen“ Güter und Produkte mit einem geeigneten Maß an „Eigenintelligenz“ auszustatten, sodass sie sich selbstständig im logistischen System der Zukunft zu rechtfinden. Die Vision überschreitet die Grenzen eines einzelnen Unter-

nehmens: Ziel ist es, von „der Wiege bis zur Bahre“, vom Lieferanten des Lieferanten bis zum Kunden des Kunden und am besten bis hin zur Entsorgung alle Güter mit den relevanten Informationen zu verknüpfen und so ein durchgängiges Waren-Informations-Produkt zu schaffen, das für alle Beteiligten im Wertschöpfungsnetzwerk brauchbare und echtzeitfähige Daten liefert.

Wissendes und kommunikationsfähiges Fördergut meldet sich – so der Traum der Logistiker – automatisch beim System an und kommuniziert mit ihm fortlaufend auf seinem Weg entlang der Stufen der Wertschöpfungskette. Das Gut kennt durch die von ihm mitgeführten Daten seine Herkunft, sein Ziel, seine Historie und vieles mehr. Es verfügt über Zusatzinformationen, beispielsweise über den bisherigen Herstellungsprozess, ist in der Lage, selbst-





ständig seinen Transport vom Lager in die Produktion in Auftrag zu geben oder dem Werker am Band zu sagen, wie es sich am besten montieren lässt.

Für die Förder- und Lagersysteme bedeuten die Transponder an den Gütern eine höhere Flexibilität: Die am Gut selbst festgemachten Informationen ermöglichen automatisierte und doch hochflexible Systeme, die Steuerungsinformationen müssen nicht mehr von zentraler Stelle geholt werden, sondern sind jederzeit bedarfsbezogen lokal verfügbar. Dies macht Förder- und Lagersysteme autark handlungsfähig und befähigt sie, selbstständige Entscheidungen und Optimierungen auf Basis kurzer Regelkreise und auf niedriger Ebene direkt am Gut durchzuführen. Automatisch erfasste Fördergüter verbessern die Kontrolle und Dokumentation der Prozesse für alle Beteiligten, minimieren Transportfehler und schöpfen die Systemverfügbarkeiten bestmöglich aus. Entsprechend profitiert auch die Lagerhaltung: Die kontinuierliche Vollinventur erkennt in Echtzeit alle Be-

standsveränderungen und Güter können nicht mehr einfach spurlos verschwinden.

Die Vision der selbststeuernden Netze könnte tatsächlich bald Wirklichkeit werden, denn dezentrale Datenhaltung und Befugnisse lassen schnelle Entscheidungen auf Basis flacher Hierarchien zu. Netzwerkpartner müssen sich dafür nicht aufwändig absprechen, sondern binden sich flexibel an die dafür vorgesehenen Schnittstellen an. Einfache, schlanke und dezentrale Systeme ersetzen die derzeit großen und empfindlichen zentralen Systeme. Die entlang der Wertschöpfungskette ständig aktuell generierten Daten versprechen ein besseres Informationsmanagement und eine höhere Transparenz der Supply Chain.

Einmal Zukunft...

Für den Kunden hat die Vision heute schon einen Namen: das Internet der Dinge. Gemeint sind sprechende, intelligente Waren und Produkte, die nicht nur untereinander kommunizieren, sondern auch mit ihren Besitzern. Jedes Ding der realen Welt be-

sitzt ein eindeutiges Gegenstück in der digitalen Welt. Ein Kühlschrank, der dem Monteur meldet „Mein Aggregat leckt“, eine Milchtüte, die darauf hinweist, dass ihr Inhalt demnächst sauer wird, ein Fernseher, der selbst sagt, wie er am besten zerlegt und entsorgt wird – theoretisch ist alles möglich.

...und zurück

Vieles davon ist noch Zukunftsmusik, manches aber bereits Realität. Doch wie so oft ist der Weg in die Zukunft auch mit Fragen und Hindernissen gepflastert.

Chancen und Nutzen der RFID-Technologie sind offensichtlich, doch die Praxis hat noch offene Fragen. Welches ist die richtige Hardware? Wie verhalten sich die eingesetzten Systeme unter realen Einsatzbedingungen? Um nachher nicht unangenehm überrascht zu werden, sind bei der Planung und Einführung eines RFID-Systems viele Punkte zu beach-



Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Willibald A.

Günthner (Jahrgang 1953) leitet den Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik an der TU München und ist Sprecher des Bayerischen Forschungsverbunds Supra-adaptive Logistiksysteme, ForLog. Von der klassischen Fördertechnik ausgehend liegen seine Forschungsschwerpunkte neben der Entwicklung und Planung von Materialfluss- und Logistiksystemen in den Bereichen Kranbau und Schüttgutförderung.

Dipl.-Ing. Julia Boppert (Jahrgang 1979) ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik und Geschäftsführerin von ForLog. Ihre Forschungsgebiete liegen im Bereich der Supply Chain Strategien und der Weiterentwicklung von Logistiksystemen.

Dipl.-Ing. Michael Schedlbauer (Jahrgang 1977) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik und bearbeitet das Teilprojekt PlanLog des Forschungsverbundes ForLog. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der Logistikplanung und Ablaufsimulation.

ten; schließlich wird nicht auf der grünen Wiese geplant, sondern mitten in bestehende Systemwelten hinein, die – oft über Jahrzehnte gewachsen – leider in den wenigsten Fällen einfach zu integrieren sind. Auch funktioniert die RFID-Technologie bisher nur unter gewissen Voraussetzungen einwandfrei. Metallische Umgebungen oder Flüssigkeiten beispielsweise beeinträchtigen (je nach Transpondertyp) die Funksignale zum Teil extrem und machen so das Auslesen oder Beschreiben unmöglich. Nachteilig sind derzeit außerdem noch die hohen Stückkosten, denn ein preiswertes Massenprodukt sind die Transponder noch nicht.

Großes Echo findet in der Presse derzeit auch die durch den Einsatz der RFID-Technologie im Handel hervorgerufene Besorgnis um den Datenschutz. Das „verfolgbare“ Produkt führe, so die Befürchtung, leicht zum „gläsernen“ Kunden – und das ohne sein Wissen oder gar Wollen. Bei vielen Waren sei sich der Kunde oftmals gar nicht über die Existenz eines Transponders bewusst. Kaufe er dann ein derartiges Produkt und bezahle beispielsweise mit seiner EC-Karte, wäre es ohne großen Mehraufwand möglich, die Daten des Transponders dauerhaft mit den personenbezogenen Daten des Kunden zusammenzuführen. Bedenken bestehen vor allem darin, dass jeder Umgang mit den gespeicherten Daten sich für den Kunden unsichtbar, intransparent und ohne seine Einwilligung vollziehen könnte. Vor allem in den Vereinigten Staaten machen die Datenschützer mobil und agieren in

großem Stil gegen Firmen, die ihre Waren mit Transpondern ausstatten – Gillette oder Benetton stehen dabei ganz besonders im Kreuzfeuer der Kritiker. Um einen Missbrauch zu verhindern, ist daher auch der Gesetzgeber gefragt, damit das Recht des Kunden auf informationelle Selbstbestimmung auch bei Verwendung der RFID-Transponder gewährleistet bleibt. Erreicht werden kann dies am besten durch einen transparenten Umgang mit der Technologie, sodass die Forderungen der Zweckbindung und Vertraulichkeit personenbezogener Daten auch in Zukunft geschützt bleiben.

Ohne etablierte internationale Standards konnten sich Transponder bis jetzt überwiegend in isolierten Projekten bewähren. Dies trübt natürlich wieder die zunächst sonnigen Aussichten für die Zukunft, doch eines ist sicher: RFID wird durch die großen Vorteile in den nächsten Jahren verstärkt in der Industrie wie auch in unserem Alltag Einzug halten. Eine gesamtheitliche Betrachtung von Nutzen und Aufwand ist jedoch notwendig, um diese doch mit hohen Investitionen und Prozessumstellungen verbundene Technologie nicht allzu leichtfertig einzusetzen, da sich vermeintliche Vorteile sonst schnell in Nachteile umkehren.

„Es genügt eben nicht, dass Technik gut funktioniert. Sie muss auch in die Welt passen.“

Gero von Randow,
Wissenschaftsjournalist

TURBULENTE SIMULATION



Kamen N. Beronov

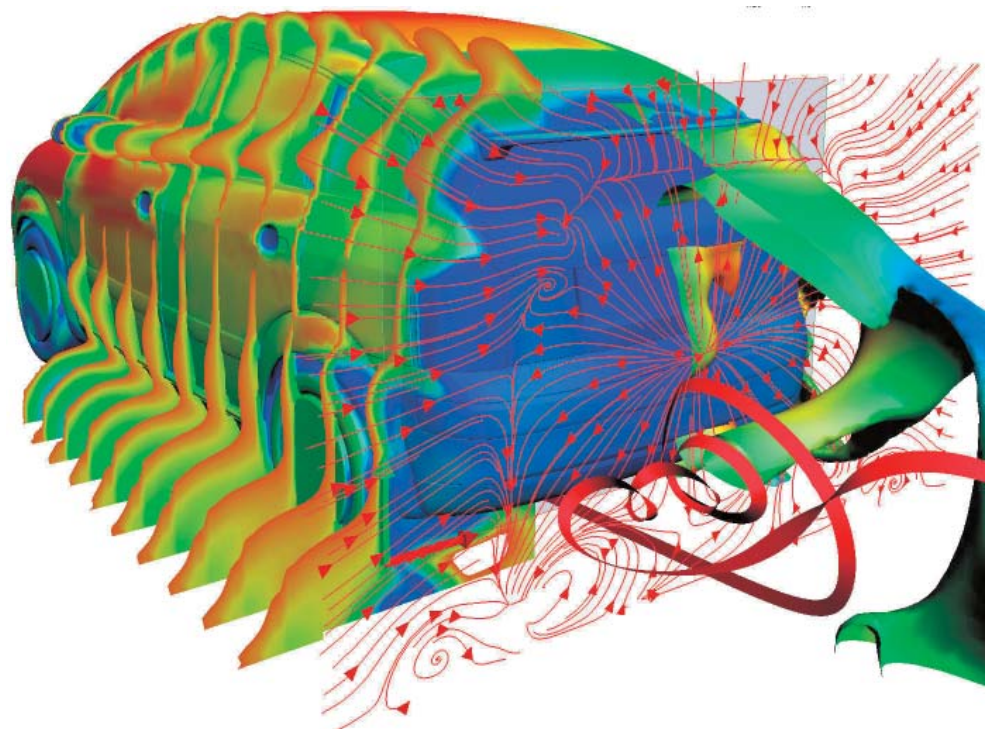
Medizintechnik, Transporttechnik, Umweltschutz, Wasserversorgung und Energieerzeugung sind typische Branchen, die in unserer Wirtschaft eine zentrale Rolle spielen und für ihre Wettbewerbsfähigkeit immer bessere Technologien und Innovationen suchen. Sie haben auch anderes gemeinsam: einen kontrollierten Umgang mit Strömungen von Flüssigkeiten oder Gasen. Viele dieser „alten deutschen Technologiebereiche“ bewegen sich in „menschlichen“ bis etwas größeren Dimensionen, zwischen 100 Meter langen Flugzeugen und Schiffen und millimeterbreiten Adern. Mitten im Zeitalter von Mikro- und Nanotechnologie erwartet jedermann, dass alles in dieser makroskopischen Größenordnung schon längst gemessen, berechnet und verstanden ist. Ein Irrtum, denn sonst hätten die Ingenieure längst ein wirtschaftliches 2-Liter-Auto konstruiert und die Ärzte unsere Herz- und Kreislaufstörungen im Griff. Große Schwierigkeiten bereiten dabei die turbulenten Strömungen. Sie sind komplex und verursachen Effekte, die nicht genau vorhersehbar sind – ob im menschlichen Körper in verengten Blutbahnen, bei Sturm auf See und im Flug oder im tagtäglichen Betrieb von Lüftungs- und Heizsystemen oder Turbinen.

Auswertung von Lattice-Boltzmann-Simulationen der Strömungsgeschwindigkeiten in Teilquerschnitten entgegen der Bewegungsrichtung des Fahrzeugs bei Audi. (Quelle: Science+Computing AG und Audi AG)

Strömungsrechnungen sind nur vermeintlich ein „alter Hut“. Je komplexer ein System, je schneller die Bewegung, je größer die dabei auftretenden Kräfte und je weiter das Verhalten seiner Einzellelemente von dem eines starren Körpers abweicht, je „weicher“ oder „flüssiger“ es also ist, desto schwieriger lässt es sich berechnen. Solange die Strömung nur laminar (lat. lamina – die Platte) verläuft, das heißt in Schichten, die sich nicht vermischen und verwirbeln, sind Strömungsrechnungen verhältnismäßig einfach. Flüssigkeiten und Gase strömen aber bereits ab ziemlich niedriger Geschwindigkeit turbulent, das heißt auch chaotisch und mit starken Verwirbelungen. Oder es steht ein Widerstand, zum Beispiel ein porö-

ser Filter, der Flüssigkeit oder dem Gas im Weg, sodass die laminare Strömung unterbrochen und turbulent wird.

Sieht man einmal von der gewollten Turbulenz beim Mischen von Milch in Kaffee ab, sind Turbulenzen in den meisten technischen Bereichen unerwünscht. So erzeugen turbulente Luftströme bei der Autofahrt den größten Anteil am Energieverlust und viel Lärm. Daher versuchen die Konstrukteure, die Turbulenz so gut es geht zu vermeiden oder wenigstens vorhersagen und kontrollieren zu können und berechnen deshalb nicht nur die im Durchschnitt entstehenden Strömungen, sondern auch die Intensität und Verteilung der Strömungsfuktuationen, also der Turbulenz der zu entwickelnden Konstruktion.



Strömungen, Modelle und Simulationen

Der Physiker Osborne Reynolds machte 1883 den Unterschied zwischen laminaren und turbulenten Strömungen durch einen Färbeversuch mit Wasser in einer Rohrleitung sichtbar. Er wies nach, dass sich die Verwirbelung in der Rohrleitung erst ab einer gewissen Grenzgeschwindigkeit einstellt. Als Beurteilungskriterium für die Turbulenz einer Strömung dient die Reynoldszahl. Sie wächst linear mit der Strömungsgeschwindigkeit und der Viskosität (Zähigkeit) des strömenden Mediums. Überschreitet die Reynoldszahl einen kritischen Wert, schlägt die laminare Strömung in eine turbulente um.

Unregelmäßige oder weiche Körper, aber auch Turbulenz, die bei schnellen Strömungsgeschwindigkeiten entsteht, erschweren also die Berechnungen. Die Strömungsmechanik nähert sich der Komplexität von solchen dynamischen Systemen über zwei Methoden: Modelle und Simulationen. Modelle abstrahieren, vernachlässigen also bewusst bestimmte Merkmale und vereinfachen andere, wobei sie sich auf die als wichtig empfundenen Eigenschaften konzentrieren. Simulationen dagegen versuchen, über möglichst realitätsnahe Experimente an einem Modell unmittelbare Erkenntnisse über das reale System zu gewinnen. Zum Beispiel simuliert ein Windkanal unterschiedliche Windgeschwindigkeiten.

Turbulenzforschung

Turbulente Strömungen lassen sich nur über statistische Methoden er-

fassen. Um technisch brauchbare Aussagen zu erhalten, müssen die Strömungsverhältnisse jedes einzeln untersuchten Vorgangs entweder direkt vermessen, was in den meisten Fällen viel zu teuer ist, oder aber berechnet werden. Zur Berechnung wird die Turbulenz teilweise modelliert und teilweise simuliert, also möglichst naturgetreu, mit guter räumlicher und zeitlicher Auflösung numerisch nachberechnet. Je größer der Anteil der Modellierung, desto schneller die Rechnung, desto größer ist aber auch die Abweichung von den realen Parametern des untersuchten dynamischen Systems.

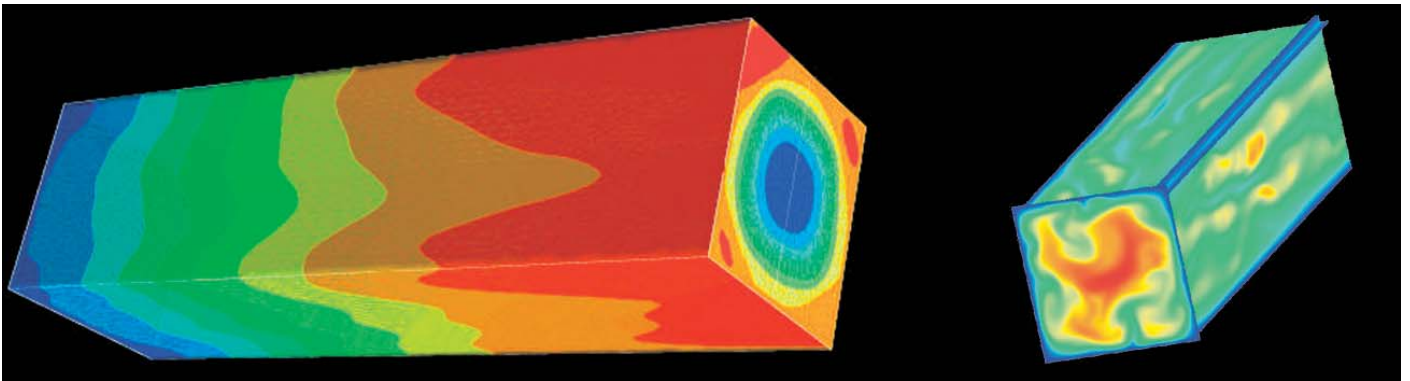
Die Turbulenzforschung und -modellierung hat bereits eine mehr als 100jährige Geschichte von Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt, dem Schiff-, Auto- und Maschinenbau, der Verfahrenstechnik, der Klima- und Wetterforschung, der Energetik und vielen anderen Bereichen. Dennoch ist der Wissensstand immer noch unvollkommen und unbefriedigend, denn Turbulenz entsteht aus gekoppelten, teilweise sehr komplexen Mechanismen. Was die Ingenieure mit Faustregeln erreichen konnten, war zum Großteil bereits nach dem Zweiten Weltkrieg bekannt.

Formeln statt Faustregeln

Die Navier-Stokes-Gleichungen beschreiben das Verhalten von strömenden Fluiden (Flüssigkeiten, Gasen oder Gemischen). Das mathematische Gleichungssystem enthält gekoppelte nichtlineare partielle Differentialgleichungen (wegen der

Zeit- und Ortsabhängigkeit) und damit unendlich viele Freiheitsgrade. Davon sind im Allgemeinen so viele wichtig für die Dynamik, dass eine brauchbare, mathematisch exakte Lösung unmöglich ist. Die Ingenieure helfen sich durch vereinfachende Annahmen, die sie in die Gleichungen einsetzen, das heißt, sie konstruieren physikalische Spezialfälle, für die eine überschaubare Lösung wenigstens näherungsweise gefunden werden kann.

Seit den 1980er Jahren hat sich die so genannte numerische Strömungssimulation (englisch: Computational Fluid Dynamics, CFD) als Methode etabliert, wenn strömungsmechanische Probleme zu lösen sind. Hinter dem Begriff CFD verbergen sich unterschiedliche Ansätze und Methoden. Seit den 90er Jahren nutzen viele größere Firmen kommerzielle CFD-Software als Standardwerkzeug zur numerischen Simulation technischer Strömungen. Diese sind aber viel häufiger turbulent als laminar, da die Maße der untersuchten Objekte, zum Beispiel von Anlagen und Fahrzeugen, und die von ihnen verursachten Strömungsgeschwindigkeiten immer weiter wachsen. Diese Strömungen können nicht im vollen Umfang und nur unter Verwendung von Turbulenzmodellen berechnet werden, deshalb kommen so genannte RANS-(Reynolds Averaged Navier-Stokes) Modelle zum Einsatz. Sie beruhen auf einem zeitlichen Mittelwert, der so genannten Reynolds-Mittelung der Navier-Stokes-Gleichung. Zwar lassen sie sich robust



RANS- (links) und LES-Rechnungen (rechts) für eine einfache Strömung. Sichtbar ist der Unterschied im Informationsinhalt über den Strömungsverlauf zwischen der zeitlich gemittelten RANS-Berechnung (links: dunkelblau entspricht der höchsten Geschwindigkeit) und der zeitaufgelösten LES-Simulation (rechts: rot ist die höchste Geschwindigkeit). (Quelle: LSTM)

und relativ einfach berechnen, sind aber je nach Modell nur unter bestimmten Umständen brauchbar. Bei der theoretischen Entwicklung des Verfahrens wird über alle „turbulenzbehafteten“ Zeit- und Längenskalen gemittelt. Für die CFD-Praxis bedeutet dies, keine turbulenten Schwankungen auf dem Rechengitter darzustellen, sondern deren Gesamtwirkung in bestimmten Eigenschaften der einzelnen Gitterpunkte unterzubringen, als wären diese Schwankungen so rein zufällig und winzig wie die Bewegungen einzelner Moleküle des Fluids. Das Resultat zeigt dennoch eine räumlich (und oft auch zeitlich) ungleich verteilte Strömung. Diese Vorgehensweise enthält einen grundsätzlichen Widerspruch, da die technisch relevanten Skalen, die mit der Gerätegröße und der durchschnittlichen Geschwindigkeit der durchströmenden Fluide vergleichbar sind, von denen der Turbulenz in den meisten Anwendungen nicht deutlich getrennt werden können. Jede Krümmung oder Ecke, jede Beschleunigung oder Wandschwankung verursacht Auf-

wirbelungen, die nur teilweise direkt in noch kleinere Wirbel übergehen, um dann durch Dissipation (unumkehrbarer Übergang von kinetischer Energie in Wärme, Reibungsverlust im Fluid) zu verschwinden. Ein erheblicher Teil dieser Störungen breitet sich erst über ein großes Volumen aus und trägt viel Energie mit sich: Sturmböen, aber auch die Spuren eines großen Flugzeugs sind dafür beeindruckende Beispiele. Jeder der vielen unterschiedlichen Wege bei der Turbulenzentstehung und Umwandlung muss individuell modelliert werden.

Gratwanderung Modellierung – Simulation

Die Erfahrung hat gezeigt, dass bei vielen Anwendungen eine von der Modellierung weniger beeinflusste Art der Simulation notwendig ist, besonders, wenn ausgeprägte Effekte wie Zeitabhängigkeit oder Wandkrümmung, Drall oder Übergänge von laminarer zu turbulenter Strömung die Prozesse prägen. Die Automobil- und Flugzeugindustrie untersucht beispielsweise intensiv den

durch Strömung verursachten Lärm. Dafür sind Strömungsdaten mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung nötig, um die Entstehung von Schallwellen an den untersuchten Konstruktionen verstehen und beeinflussen zu können. Entsprechende Experimente sind schwierig und teuer, deshalb setzen die Entwickler immer öfter auf detaillierte Simulationen. Ähnlich gehen auch die Entwickler von Benzin- und Dieselmotoren vor, wenn sie die Zufuhr von Brennstoff, den Verbrennungsvorgang und die Abfuhr von Gasen bei neuen Motoren berechnen.

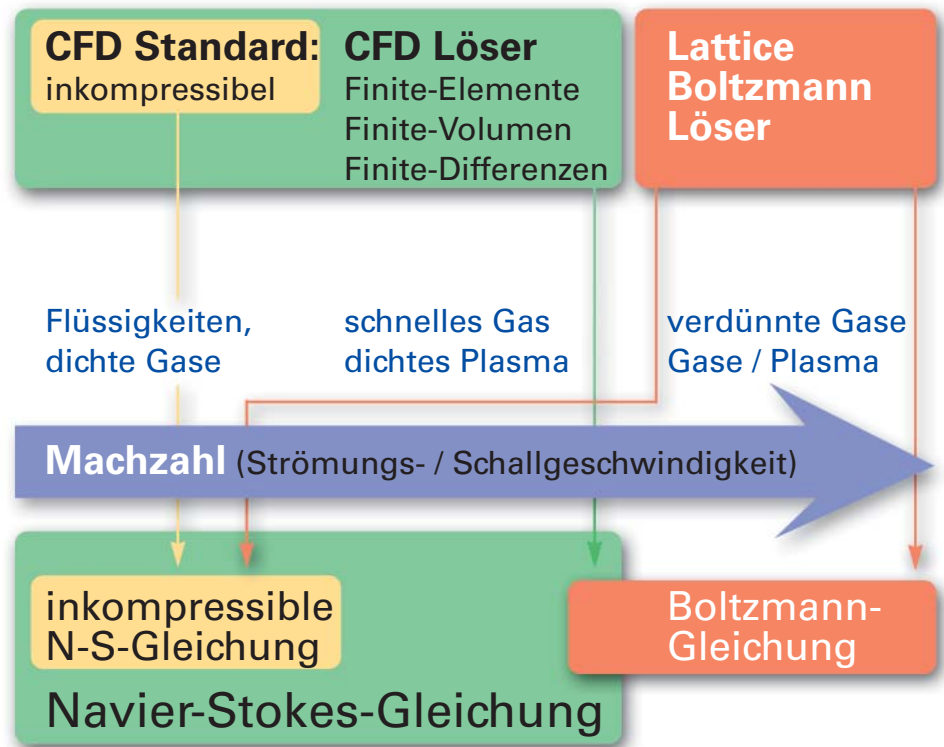
Dabei bewegen sie sich auf einem schmalen Grat zwischen technischer Genauigkeit und verfügbarer Rechnerkapazität. Die Auflösung feiner Turbulenzen ist rechnerisch korrekt nur mit Supercomputern und nur bis

zu mäßigen Reynoldszahlen möglich. Die turbulente Strömung wird deshalb mit Hilfe der so genannten Large-Eddy-Simulationen (LES) berechnet: Sie stellt nur den Teil der Bewegungen direkt dar, der die meiste Energie und die wesentlichen Merkmale der Strömung in sich vereint (technisch relevante Skalen), alle restlichen Bewegungen (turbulente Schwankungen auf kleiner Ebene in den „Subgitter“-Skalen) werden modelliert. Dabei werden aber die als wichtig betrachteten „makroskopischen“ Skalen von den modellierten kleinen Skalen klar getrennt. Im Vergleich zu RANS-Rechnungen sind Large-Eddy-Simulationen aber sehr aufwändig, weil sie eine große Bandbreite von Zwischenskalen berechnen müssen.

Software für komplexe Strömungen

Die verfügbaren Softwareprodukte zur numerischen Simulation (CFD), die auf klassischen Rechenverfahren basieren und sich bei RANS-Rechnungen auf Einzelrechnern gut bewährt haben, rechnen auch heute mehrere Wochen und Monate an einer einzigen Large-Eddy-Simulation (LES). Die Industrie jedoch würde gern mehrere Varianten in einer Woche durchrechnen können! Gefragt ist also ein Verfahren, das für große LES auf Parallelrechnern mit acht bis zu über 100 Einzelprozessoren geeignet ist.

Ende der 80er Jahre entstand die Lattice-Boltzmann-Methode (LBM), ausgehend von Überlegungen der statistischen Physik zur Beschreibung von verdünnten Gasen. Sie be-



Verbindung zwischen Navier-Stokes-, Boltzmann- und LB-Gleichungen mit Bezug auf die Kompressibilität.

rechnet die Bewegung einzelner Teilchen (ursprünglich die Gasmoleküle) unter einer stark vereinfachten Teilchen-Mikrodynamik. Die Boltzmann-Gleichung überträgt die Beschreibung der Wechselwirkungen der mikroskopischen Teilchen untereinander und mit der Umgebung auf die makroskopische Ebene und beschreibt damit die räumliche und zeitliche Wahrscheinlichkeitsverteilung von Partikeldichten. Aus dieser Gleichung lässt sich unter geeigneten Annahmen auch die rein makroskopische Navier-Stokes-Gleichung (NSG) herleiten. Dieser Ansatz wurde bei der LBM so vereinfacht, dass einerseits die Herleitung der NSG erhalten bleibt und andererseits Rechenver-

fahren möglich werden, die viel weniger aufwändig als die direkte Lösung der Boltzmann-Gleichung und sogar gegenüber CFD-Standardverfahren stabiler und effizienter sind.

Die Verfahren sind in der Lage, robust und einfach selbst sehr komplexe Randformationen zu behandeln, zum Beispiel CT- oder MRT-Aufnahmen (Computertomografie oder Magnetresonanz). Sie liefern – im Gegensatz zu allen herkömmlichen Verfahren der numerischen Strömungssimulation (CFD) – selbst dann noch genaue Daten, wenn die Topologie des durchströmten Volumens äußerst kompliziert und nur ungenau bekannt ist, zum Beispiel bei porösen Körpern.



Inkompressible Strömungen

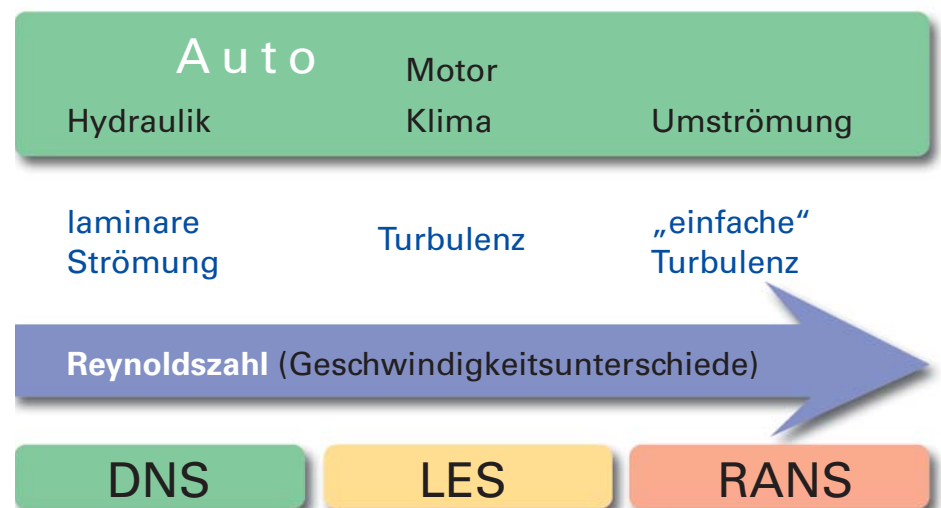
Die Lattice-Boltzmann-Methode (LBM) kommt mit einem geringen Speicher- und Rechenbedarf aus und eignet sich deshalb zur Berechnung von Strömungen in komplexen Geometrien – zumindest bei Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 15% der Schallgeschwindigkeit in dem Fluid.

Die Methode funktioniert optimal auf Parallelrechnern, Computern, in denen eine Rechnung gleichzeitig auf mehreren Einzelprozessoren abläuft. Eine LBM-Berechnung besteht aus einer Vielzahl „lokaler“ Einzelrechnungen, die jeweils einen einzigen Gitterpunkt beschreiben. Jede Einzelrechnung erfolgt in Zeitschritten, die der physikalischen Zeit direkt entsprechen, und jeder Rechenschritt an einem Gitterpunkt benötigt nur Informationen von seinen unmittelbar benachbarten Punkten. Diese Eigenschaften haben auch andere CFD-Verfahren, die für kompressible Strömungen (mit Geschwindigkeitsunterschieden nahe oder über der Schallgeschwindigkeit) verwendet werden. Sie basieren auf Finite-Differenzen- oder Finite-Volumen-Methoden. Bei den so genannten inkompressiblen Strömungen (bei denen sich die physikalisch auftretenden Druckschwankungen praktisch ohne Verzögerung über das gesamte Strömungsgebiet ausbreiten) sind diese Verfahren aber ineffizient. CFD-Standardverfahren, die besonders für inkompressible Strömungen entwickelt wurden, beziehen aber für jeden Gitterpunkt bei jedem Schritt Information aus dem ganzen Rechengebiet ein und sind dementsprechend sehr aufwändig. LBM ist für die Simulation von inkompressiblen Strömungen geeignet, denn sie benötigt nur „lokale“ Informationen an jedem Gitterpunkt. Im Gegensatz zu allen anderen Verfahren lassen sich dabei die Spannungen an einem Punkt ohne Zugriff auf Nachbarpunkte errechnen. Diese Vorteile von LBM legen eine spezifische Implementierung von klassischen RANS- und LES-Turbulenzmodellen nahe, die stabiler und effizienter funktioniert als die bekannten der selben Modelle mit CFD-Standardverfahren.

Es gibt nur eine einzige kommerzielle CFD-Software, die auf einer Variante der LBM aufgebaut ist. In Verbindung mit einem fortgeschrittenen RANS-Modell, ursprünglich speziell auf die Berechnung turbulenter Außenströmungen angepasst, liefert sie im Vergleich zu konkurrierenden CFD-Produkten bei der Umströmung von Autokarosserien die besten Ergebnisse. Vor kurzem wurde sie für Spezialanwendungen in der Industrie um physikalische Modelle wie gekoppelte akustische Simulationen erweitert. Noch fehlen ihr aber wichtige Modelle und technische Verbesserungen wie zum Beispiel Mehrgitter-Verfahren und deformierte Rechengitter, die für die vielseitige Anwendung von Standard-Software zur numerischen Strömungssimulation von entscheidender Bedeutung sind. Zudem besteht ein dringender Bedarf nach einer neuen, konkurrenzfähigen LBM-Software, die wenigstens die Bereiche der Turbulenz-Simulation inklusive LES, gekoppeltem Wärmetransport und Akustik abdeckt, denn die aktuelle Monopolstellung des Anbieters treibt den Preis für die LBM-Software in die Höhe.

Von der Theorie in die Praxis

Es gibt nur eine einzige kommerzielle CFD-Software, die auf einer Variante der LBM aufgebaut ist. In Verbindung mit einem fortgeschrittenen RANS-Modell, ursprünglich speziell auf die Berechnung turbulenter Außenströmungen angepasst, liefert sie im Vergleich zu konkurrierenden CFD-Produkten bei der Umströmung von Autokarosserien die besten Ergebnisse. Vor kurzem wurde sie für Spezialanwendungen in der Industrie um physikalische Modelle wie gekoppelte akustische Simulationen erweitert. Noch fehlen ihr aber wichtige Modelle und technische Verbesserungen wie zum Beispiel Mehrgitter-Verfahren und deformierte Rechengitter, die für die vielseitige Anwendung von Standard-Software zur numerischen Strömungssimulation von entscheidender Bedeutung sind. Zudem besteht ein dringender Bedarf nach einer neuen, konkurrenzfähigen LBM-Software, die wenigstens die Bereiche der Turbulenz-Simulation inklusive LES, gekoppeltem Wärmetransport und Akustik abdeckt, denn die aktuelle Monopolstellung des Anbieters treibt den Preis für die LBM-Software in die Höhe.



Reynoldszahl und Turbulenz, CFD und Modelle.

Erlangen hat die Nase vorn

Derzeit gibt es zwei Forschergruppen in Deutschland, die mit dem Lattice-Boltzmann-Verfahren und auch mit Large-Eddy-Simulationen mittels LBM arbeiten: das Institut für Computer-Anwendungen im Bauwesen (CAB) an der TU Braunschweig und der Lehrstuhl für Strömungsmechanik in Erlangen (LSTM). Sie sind in der Lage, eine solche Entwicklung zu unterstützen. Die Erlanger Gruppe verfügt über viel Know-How bei Turbulenzsimulationen, nicht nur mit LBM, und arbeitet im Bereich der LES eng mit mehreren Industriepartnern zusammen. Nur wenige Forschergruppen weltweit (in den USA, Japan, Hongkong) sind in der Lage, vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Die Erlanger Forschergruppe hat jedoch die Nase vorn: Sie führt die größten Turbulenzsimulationen auf dem bayerischen Höchstleistungsrechner am Leibniz-Rechenzentrum in München durch und konnte durch Vergleiche mit klassischen Verfahren sowohl die Zuverlässigkeit wie auch die Effizienz der LBM beweisen. Um neue Erkenntnisse für die Turbulenzmodellierung zu gewinnen und konkrete Designfragen beantworten zu können, simuliert sie seit 2003 Turbulenzen in komplexeren Geometrien mit hoher Auflösung, für die andere Rechenverfahren einen wesentlich höheren Aufwand erfordern.

Strömungsmessung im Menschen

Der Mensch ist, strömungsmechanisch gesehen, ein sehr komplexes

System. Die Luftströmungen im Atemsystem, die Ventilation der Lungen, die Stimme, die Durchströmung der Nase und alle damit eventuell verbundenen Beschwerden können – im Prinzip – mathematisch und numerisch berechnet werden.

Herzinfarkte und Schlaganfälle sind zwei der drei wichtigsten Todesursachen in den Industrieländern. Messungen der Strömungsverhältnisse im Blutkreislauf sind derzeit die einzige praktikable Möglichkeit, um die Gefährdung durch brüchige Gefäßwandabschnitte oder die Funktion von Implantaten (Herzklappen, Kranzgefäß- und Aorten-Bypässe, „Stents“ und „Grafts“ zur Stützung, Umformung oder Abdichtung von Gefäßen usw.) quantitativ einzuschätzen. Direkte Messungen sind aber kompliziert, erfordern sehr teure Geräte, Materialien und hoch qualifizierte Mitarbeiter: Für die klinische Praxis sind daher direkte Messungen aller Voraussicht nach auch in Zukunft nicht rentabel. Nun fließt Blut beileibe nicht immer laminar. Die flexiblen Gefäße, Ablagerungen, Verengungen und Erweiterungen lassen unberechenbare Turbulenzen erwarten.

Durch den Fortschritt der medizinischen Aufnahme- und Messtechnik ist es endlich möglich, die wichtigsten Blutgefäße im menschlichen Körper mit größerer Genauigkeit darzustellen. Auf dieser Basis aufbauend haben Strömungsmessungen im Blut erst vor etwa zwei Jahren einen Technologiestand erreicht, der eine individuelle und präzise Beurteilung der Strömungsverhältnisse wenigstens eines kleinen

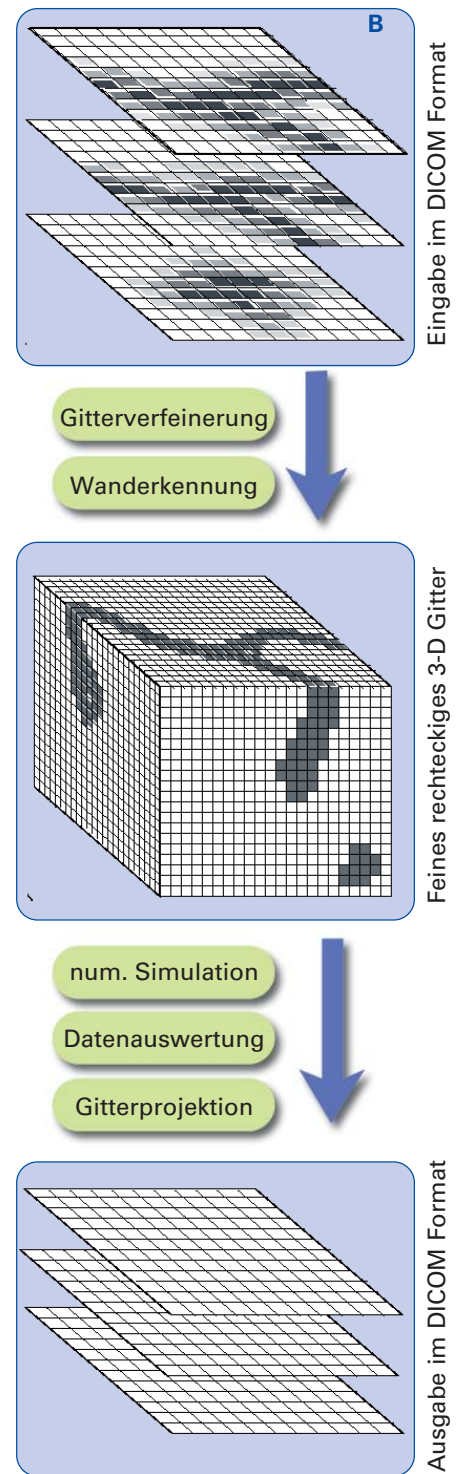
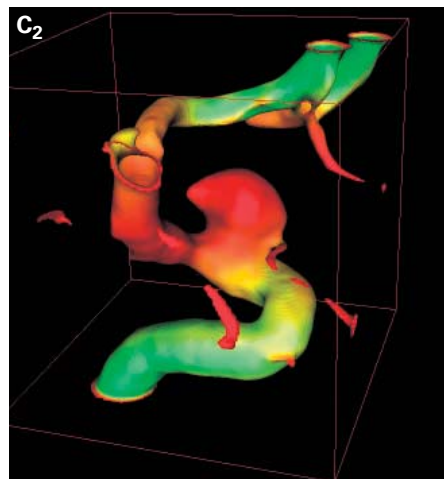
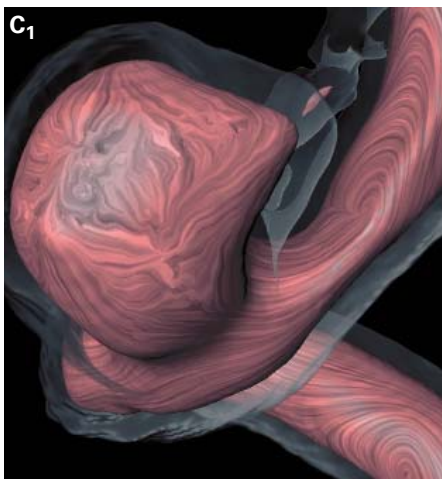
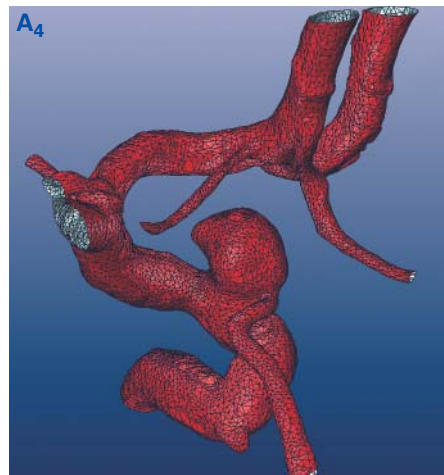
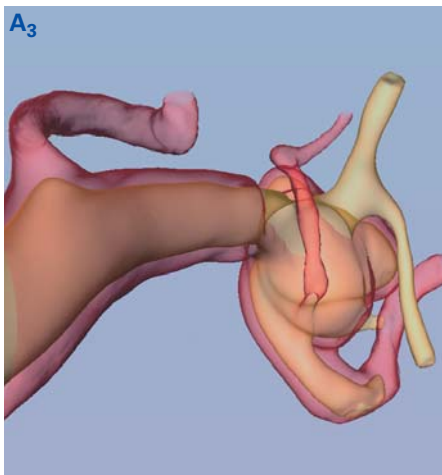
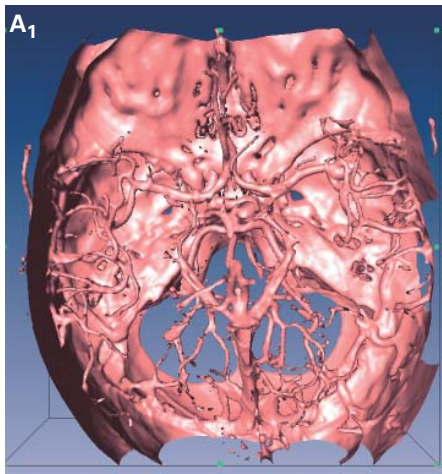
Teils des Kreislaufsystems erlaubt. Drei voneinander unabhängige Entwicklungen haben den Fortschritt ermöglicht: die hohe Auflösung der neuen Tomografiegeräte, leistungsfähige Computer zu erschwinglichen Preisen und das Lattice-Boltzmann-Rechenverfahren.

Simulation statt Messung

Viele der so genannten Zivilisationskrankheiten sind direkt mit mechanischen Belastungen verbunden, zum Beispiel bei Blutgefäßen oder Gelenken. Die numerische Simulation einer mechanischen Belastung ist viel billiger und oft sogar zuverlässiger als die direkte Messung. Eine Lösung zur Vereinfachung der komplizierten Simulationen – und damit ein bedeutender Zukunftsmarkt – zeichnet sich durch den Rückgriff auf die altbekannten mechanischen Prinzipien ab, denn mechanische Belastungen lassen sich mathematisch berechnen. Bilder aus medizinischen Untersuchungen wie Röntgen, Computertomografie, Kernspin-Resonanz oder Ultraschall mit innovativen Rechenverfahren zu interpretieren, erhöht den Wert vieler bestehender Produkte der Medizintechnik beträchtlich.

Schnell und flexibel

Der Erlanger Forschergruppe gelang es in Kooperation mit Siemens Medical Solutions mit Hilfe der Lattice-Boltzmann-Methode, pulsierende Strömungen in deformierten Blutgefäßen detailliert zu berechnen. Für die Neurochirurgen liefert LBM eine



Datenbearbeitung bei Blutgefäß-Anwendungen: Gefäßwandverlauf aus bearbeiteten Tomografiedaten (A), Vorgehensweise bei der Simulation mit LBM-Rechengittern (B) und das grafische Ergebnis der LBM-Simulation (C). Von größtem Interesse sind die Strömungsverhältnisse in unmittelbarer Nähe der Gefäßwände (links: Stromlinien entlang der Wand, rechts: Scherspannung, wobei Rot einem niedrigen Wert und damit einer typischerweise schwächeren Wand entspricht). (Quelle: LSTM)

Dr. Kamen Beronov (Jahrgang 1963) war über neun Jahre in Japan als Mathematiker und Physiker an der Universität und in der Industrie tätig, bevor er im September 2001 an den Lehrstuhl für Strömungsmechanik (LSTM) der Universität Erlangen-Nürnberg kam. Er leitet den Bereich „Medizinische Entwicklungen“ am Lehrstuhl des stellvertretenden KONWIHR-Sprechers und KW 21-Forschungsgruppenleiters Prof. Dr. Dr. h. c. Franz Durst.

entscheidende Vereinfachung, denn das Verfahren funktioniert auch mit nur mäßig aufgelösten Tomografie-Aufnahmen (3-D-Grauwert-Daten) und erspart viele Arbeitsschritte, die bei den konventionellen CFD-Verfahren ein hohes Maß an Ingenieurwissen voraussetzen. Die mit LBM errechneten Werte für Druck und Geschwindigkeit sind zuverlässig und – am wichtigsten – bei der Berechnung eines Pulszyklus ist ein spezialisierter LBM-Algorithmus schon bis zu 30 mal schneller als eine CFD-Standardlösung mit der selben einfachen Testgeometrie.

So entsteht eine neue CFD-Software, die genauso wie bisherige CFD-Produkte den ganzen dynamischen Bereich zwischen zähen Strömungen in porösen Körpern (Reynoldszahl „gleich Null“) und schnellen, turbulenten Strömungen wie etwa um einen Tragflügel oder um ein U-Boot (Reynoldszahl „unendlich“) deckt und dabei einfacher, zuverlässiger und oft auch wesentlich schneller ist.

Fit für Höchstleistungsrechner

Dass der LBM-Lösungsansatz auf Hochleistungsrechenanlagen gut funktioniert und mit zunehmender Anzahl von Prozessoren nahezu perfekt skaliert, ist bei großen Aufgaben ein entscheidender Vorteil. Höchstleistungsrechner stellen völlig andere Anforderungen an eine Software als ein herkömmlicher Computer und keine kommerzielle Software für numerische Strömungssimulation ist für den Einsatz auf Großrechnern optimal

ausgelegt. Mit LBM lassen sich die wochenlangen Large-Eddy-Simulationen der Autoindustrie bald auf wenige Tage verkürzen.

Erst vor wenigen Monaten lösten die Erlanger Wissenschaftler am LSTM mit Einsatz von LBM-LES ein Problem bei der Motorentwicklung eines bayerischen Autobauers nachdem mehrere Experimente, Simulationen und Analysen in Großbritannien, Frankreich und Italien keine eindeutigen Erkenntnisse lieferten. Ein neuartiges Einspritzsystem für Benzinmotoren zeigte eine komplizierte und empfindliche Abhängigkeit von kleinen Variationen in der Auslegung einer Hochdruck-Einspritzdüse. Turbulente Aufwirbelungen verursachten die bereits beobachteten Unregelmäßigkeiten im Düsenstrahl. Mit Hilfe der LBM-LES gelang es, den Entstehungsmechanismus zu analysieren und mögliche Lösungswege aufzuzeichnen. Bei einer der Simulationsstudien benötigte ein Student weniger als einen Monat, bis er ein Programm zur parameterabhängigen Erzeugung der komplexen Geometrie des Strömungsgebiets erstellt, mehrere LES-LBM-Simulationen zur Parameterstudie durchgeführt und die Ergebnisse vollständig bearbeitet hatte! Das im Vergleich mit der derzeitigen CFD-Software einfachere, flexiblere und effizientere Werkzeug für LBM-LES spart nicht nur viel Zeit und Arbeit, es ermöglicht auch ganz neue Erkenntnisse.

MODERNE ZYKLOPEN: DREI AUGEN UND KEINES ZU VIEL



Erich Schneider, Klaus Bartl,
Stanislavs Bardins, Thomas Dera,
Guido Böning und Thomas Brandt

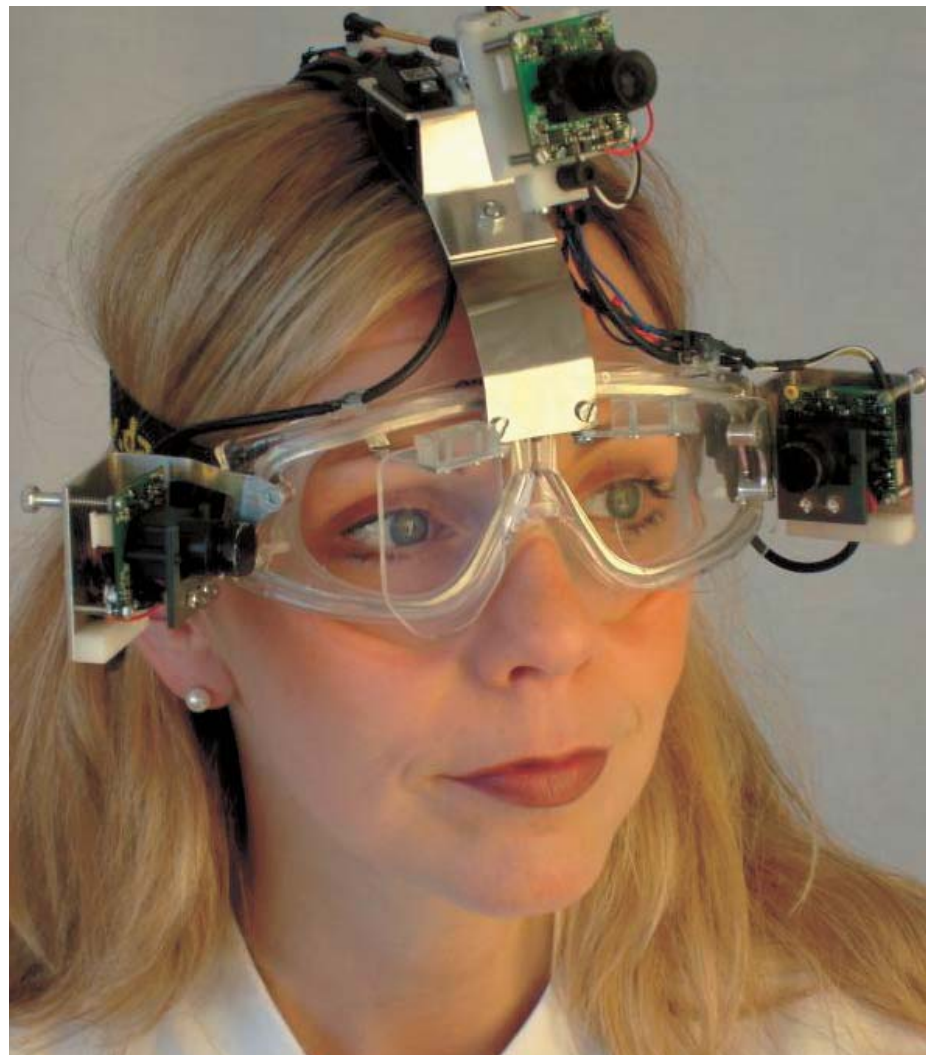
Ärztlicher Kunstfehler oder unabänderliches Schicksal? Im Gerichtssaal streiten sich Experten der Anklage und der Verteidigung um den tragischen Tod eines Patienten, der dem angeklagten Chirurgen auf dem OP-Tisch angeblich ohne Grund verblutet war. War es die Unachtsamkeit des Arztes, der versehentlich die große Bauchschlagader schwer verletzte, weil er einen Augenblick unkonzentriert war, oder hatte der Mann einfach Pech, weil die Aderwand brüchig war? Ein Film bringt die Wahrheit an den Tag: Der Chirurg trug bei der OP die neue blickgesteuerte Kopfkamera, die jede seiner Augenbewegungen während der OP aufzeichnete und eindeutig bewies, dass der Chirurg konzentriert sein Operationsfeld im Blick hatte und die Aorta nicht berührte, als sie plötzlich riss.

Blickgesteuerte Kopfkamera:
Eine bewegliche Videokamera über der Stirn reagiert auf Augenbewegungen und bildet deshalb immer das ab, was die Trägerin sieht. Die Augenbewegungen werden über zwei seitliche Infrarotkameras registriert, in Echtzeit analysiert und als Steuersignal für die Motoren der Kopfkamera genutzt.
(Foto: Schneider, Brandt)

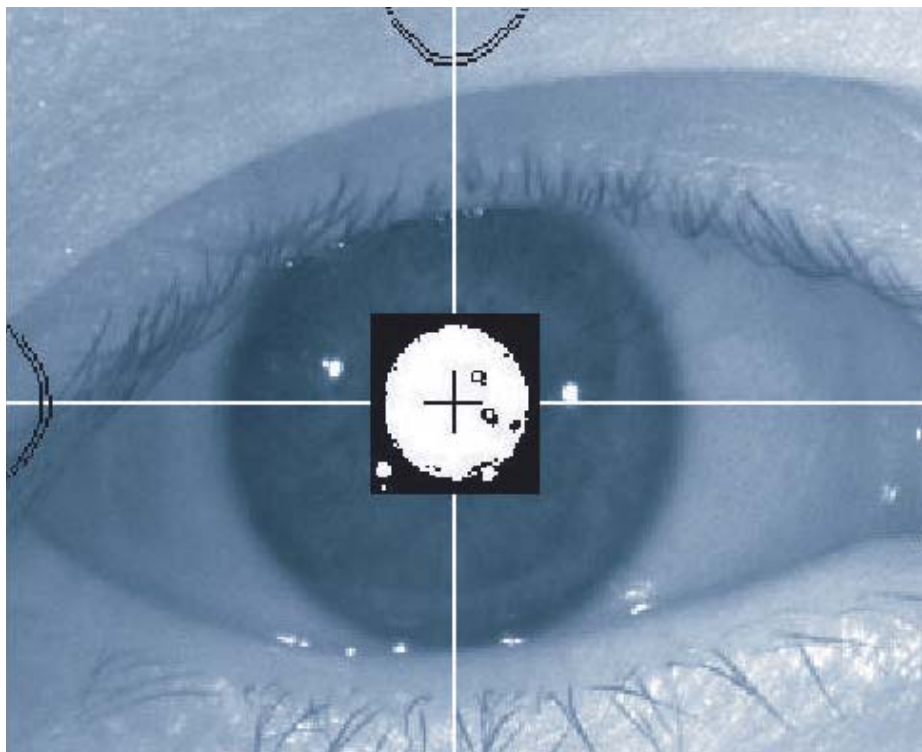
Naturwissenschaftler, Ingenieure und Neurologen im Forschungsverbund Bioanaloge Sensomotorische Assistenz (FOR-BIAS) entwickeln die blickgesteuerte Kopfkamera. Ziel der Wissenschaftler ist es, das menschliche Sehen als biologisches Gesamtsystem technisch nachzubilden.

Dazu gehört auch die ungeheure Gehirnleistung, die aus Kamerabilddern erst wirkliches „Sehen“ macht.

Ein Beispiel: Wer je ein Spiel zwischen Steffi Graf und Martina Navratilova mit den rasanten Ballwechseln verfolgt hat, wird sich selbst dabei erwischt haben, dass er wegen mangelnder Konzentration irgendwann den Ball „aus dem Auge verliert“. Der Tatsache, dass er den Ball nach einigen Sekunden wieder mit dem Blick „findet“, liegt technisch ein aufwändiger Rechenvorgang mit höchst kompliziertem Algorithmus zugrunde.



Moderne Zyklopen: Drei Augen und keines zu viel



Video-Okulografie: Bildverarbeitungsalgorithmen berechnen die Augenposition aus Pupille und Irismerkmalen. (Foto: Schneider, Brandt)

Technisches Sehen besteht nicht nur aus der Aufnahme von dreidimensionalen Bildern über Kameras und deren Wiedergabe und Interpretation auf dem Computer. Bewusstes Sehen, die Wahrnehmung der Umgebung, entsteht durch viele Bilder, die willkürliche und unwillkürliche Augenbewegungen in schneller Abfolge liefern. Das Gleichgewichtsorgan unterstützt diesen Prozess, so dass die Bilder auch beim Laufen und Kopfdrehen nicht verwackeln. Die technische Übersetzung durch zwei Kameras, die Stereobilder liefert, wäre viel zu statisch und könnte Objekte und Bewegungen in der Umgebung und relativ zum Beobachter nicht erfassen. Dies ist aber notwendig, um zum Beispiel ein führerloses Auto zu konstruieren, das in ferner Zu-

kunft vielleicht Blinden das Autofahren ermöglicht.

Drei Kameras für zwei Augen

Die blickgesteuerte Kopfkamera besteht aus einer kompakten Kopftragevorrichtung mit Brille und einer kleinen beweglichen Videokamera auf der Stirn. Zwei seitlich angebrachte Infrarotkameras registrieren die Augenbewegungen des Kamera-trägers und geben die Information an einen Rechner weiter. Dieser steuert den kleinen Motor der Videokamera, so dass sie die Augenbewegung exakt nachvollzieht und dabei das erfasst, was der Mensch gerade sieht. Besonders wichtig sind bei dem Prozess zwei Dinge: Die Vorrichtung darf das Gesichtsfeld und die Bewegungsfreiheit des Trägers nicht einengen und die Augenbewegung

muss ohne Verzögerung, das heißt in Echtzeit, auf die Videokamera übertragen werden. Die besondere Herausforderung ist also, das menschliche Sehen in einem technischen Kamerasystem naturgetreu nachzubilden, denn ein technisches System bewegt sich erheblich langsamer als das natürliche Vorbild und braucht viel mehr Zwischenschritte, bis es aus einem Signal eine Reaktion der Kamera erzeugt hat.

Sehen ist eine faszinierende Fähigkeit. Augen und Gehirn müssen blitzschnell und hoch präzise zusammen arbeiten, um trotz schneller Bewegungen mit dem Kopf oder bei 200 km/h auf der Autobahn noch ein stabiles Bild von der Umgebung zu erzeugen. Manche mechanischen Systeme der Videotechnik haben versucht, die Funktionsweisen des biologischen bildstabilisierenden Systems zu übernehmen, können aber der Natur an Präzision und Funktionsvielfalt nicht annähernd „das Wasser reichen“.

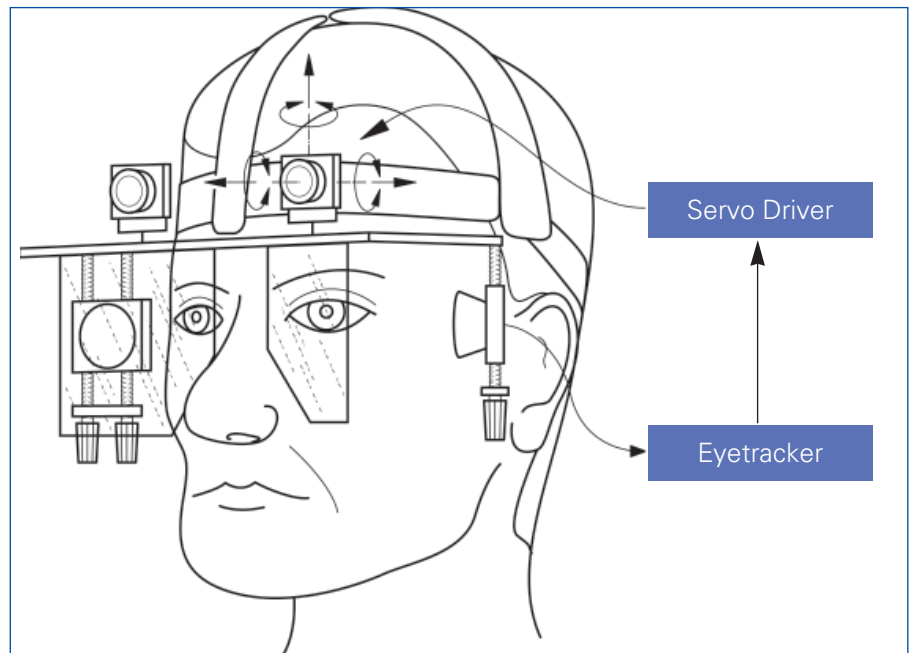
Autofokus ...

Eine Schlüsselrolle bei der Bildstabilisierung spielt der so genannte vestibulo-okuläre Reflex (VOR). Seine Aufgabe ist es, das Bild auf der Netzhaut stabil zu halten, damit es bei Kopfbewegungen nicht „verwackelt“. Das Gleichgewichtsorgan im Innenohr von Wirbeltieren übernimmt die Rolle eines Bewegungssensors, der Informationen über Beschleunigung und Drehgeschwindigkeit des Kopfes an das Gehirn liefert. Das Gehirn wandelt die Geschwindigkeitsinformation „mathe-



matisch“ in ein Positionssignal um, das – mit umgekehrtem Vorzeichen – an die Augenmuskeln weitergeleitet wird. Dadurch bewegen sich die Augen immer entgegen der Kopfbewegung und kompensieren diese, so dass die Blickrichtung der Augen im Raum konstant bleibt und der Mensch die Umwelt trotz der Bewegung stabil wahrnimmt. Der VOR gewährleistet, dass wir Gesichter auch beim Laufen erkennen und Straßenschilder im Vorbeifahren lesen können.

Schwieriger wird es, wenn sich die Umgebung großflächig und schnell ändert, zum Beispiel, wenn man aus dem Fenster eines fahrenden Zuges blickt. Das Gehirn extrahiert aus der Bewegung (optokinetischer Reiz) eine Geschwindigkeitsinformation und leitet diese – wie beim VOR – an den Augenmuskel. Allerdings setzt jetzt ein zweistufiger Mechanismus ein: Die kompensatorische Bewegung wird ergänzt von einer schnellen Rückstellbewegung der Augen zum nächsten Ziel, die so genannten Sakkaden. Beide Bewegungen zusammen liefern dem Betrachter ein unverwaschenes Bild der Umgebung. Die Abfolge von langsamen, kompensatorischen Augenbewegungen und schnellen Rückstellbewegungen der Augen fasst der Fachbegriff „optokinetischer Nystagmus“ (OKN) zusammen. Nystagmus bedeutet eine unwillkürliche, rhythmische Bewegung der Augen, so dass Nystagmus auch mit „Augenzittern“ übersetzt werden kann. Kopfdrehungen führen hingegen im Rahmen des VOR zu



Ein „Eyetracker“ erhält Bilder von jeweils einer Videokamera des linken und rechten Auges und berechnet daraus ein 3D-Stellsignal für Servomotoren, die wiederum eine oder zwei Kopfkameras parallel zur Blickrichtung des Trägers ausrichten.

(Bild: Schneider, Brandt)

einem vestibulären Nystagmus, das heißt, das Gleichgewichtsorgan ist an der Bewegung beteiligt.

... und manuelles Scharfstellen

Neben diesen unwillkürlichen Augenbewegungen bewegen Menschen und Wirbeltiere ihre Augen natürlich auch willentlich: Langsame Augenfolgebewegungen verfolgen bewegte Sehziele, zum Beispiel einen fliegenden Vogel. Schnelle Blicksprünge (Sakkaden) fixieren nacheinander verschiedene Sehziele. Jeder kennt die Situation, wenn die Augen zwischen mehreren Gesprächspartnern hin und her springen. Die anatomischen Strukturen sowie die quantitativen Beziehungen zwischen Reizeingang und Augenbewegungsausgang

sind seit langem bekannt und in mathematische Modelle umgesetzt, die die Funktion der dabei beteiligten Hirnstammregionen quantitativ beschreiben. Um das betrachtete Objekt wirklich scharf zu sehen, nehmen die beiden Augen einen vom Objektabstand abhängigen Winkel zueinander ein, so dass jedes Auge das Objekt auf der Netzhaut an der Stelle des schärfsten Sehens, der Fovea, betrachten kann. An der Fovea hat die Netzhaut das größte Auflösungsvermögen, dort zeigt sie das schärfste Bild.

Der technische Doppelgänger

Die Evolution hat den Sehvorgang über Millionen von Jahren als sensorisches System optimiert: Ob

Moderne Zyklopen: Drei Augen und keines zu viel

schnelle Augenbewegungen zu unterschiedlichen Zielen oder Bewegungsverfolgung, ob wir den Kopf drehen oder sich die gesamte Umgebung ändert: Das Bild, das wir wahrnehmen, ist immer stabil. Das natürliche Vorbild technisch zu kopieren, wäre ohne die Mikrosystemtechnik und die leistungsfähigen Computer nicht möglich.

Um stabile Bilder aufzunehmen, reicht es nicht aus, nur die willentlichen Augenbewegungen zu erfassen und nachzuahmen. Um Augenfolgebewegung und Blicksprünge nachzuahmen, genügen zwei Freiheitsgrade: Die Kamera muss sich in senkrechter (Nicken) und waagrechter (Gieren) Richtung bewegen kön-

nen. Für die Bildstabilisation unerlässlich sind aber die reflexiven Augenbewegungen, die Komponenten entlang des dritten Freiheitsgrades (Rollen) enthalten. Alle Augenbewegungen lassen sich mit videogestützten Messsystemen verfolgen und messen (Video-Okulografie). Bei der blickgesteuerten Kopfkamera übernehmen diese Aufgabe die Infrarotkameras, die fest am Trägergestell montiert sind. Sie übermitteln die Videobilder der Augenbewegung an einen Rechner, der die horizontalen und vertikalen Augenbewegungen vergleichsweise einfach aus dem Mittelpunkt des als Pupille detektierten Bereiches berechnet. Um die dritte Raumrichtung aus der Augen-

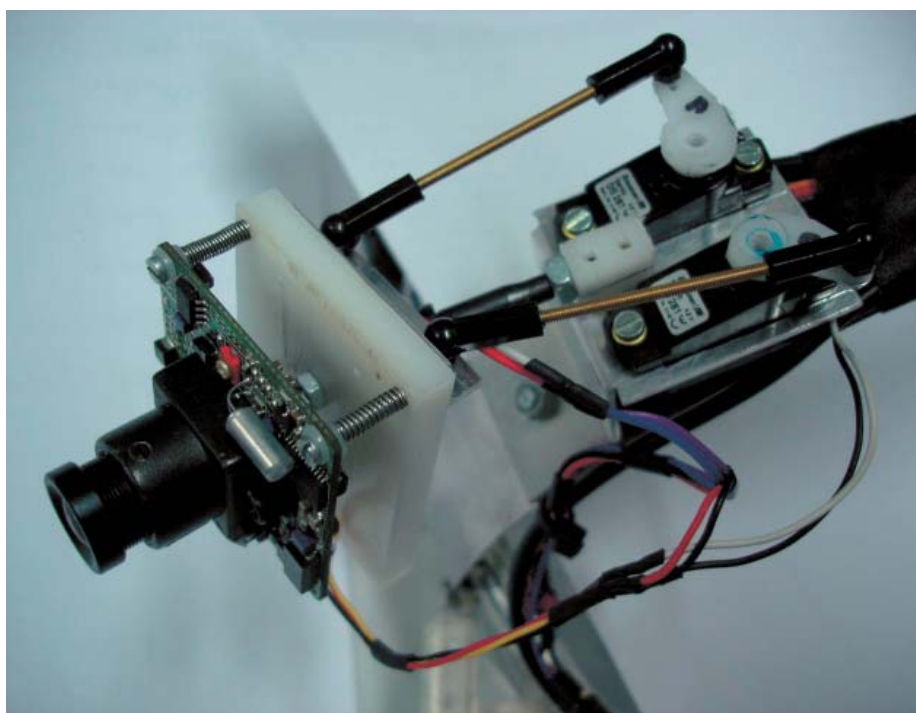
torsion, also die Drehung um die Blickrichtung zu berechnen, benötigt der Computer markante Muster in der Netzhaut, der Iris. Im Vergleich zu einer 2D-Messung über den Pupillenmittelpunkt ist jedoch die 3D-Analyse unter Einbeziehung der Irisstruktur wesentlich aufwändiger. Sie erfordert präzise Bildbearbeitungsalgorithmen und eine sehr hohe Rechenleistung.

Die Realzeitanalyse der Augenbewegungen erzeugt das Steuersignal für die Motoren der Stirnkamera und ermöglicht so die Aufnahme der vom menschlichen Auge wahrgenommenen Bilder und ihre exakte Wiedergabe.

Die technische Steuerung nutzt dabei gleichzeitig die Biologie: Das zentrale Nervensystem setzt alle Reize, die über Kopf-, Augen- und Umweltbewegungen informieren, um in motorische Signale, das heißt in Bewegungen des Betrachters. Diese erfassen die Kameras technisch und imitieren eine natürliche visuelle Erkundung der Umwelt: Während der vestibulo-okuläre Reflex bei Kopfbewegungen die Blickrichtung im Raum stabilisiert, bleibt gleichzeitig das Bild der Kopfkamera scharf, selbst bei Kopfbewegungen oder bei freier Fortbewegung des Trägers.

Die Innovation: frei und scharfsichtig

Kein künstliches Auge oder Kamerasystem konnte bisher Bildstabilisation, freie Beweglichkeit des Benutzers und einen freien Blick auf die Umwelt in einer Einheit integrieren. Bildstabilisationssysteme wurden



Ansicht des miniaturisierten Schwenkkopfes der Videokamera: Der Schwenkkopf ist kardanisch aufgehängt und zwei kleine Servomotoren richten ihn entsprechend der Blickrichtung des Benutzers aus. Dieser Demonstrator enthält nur handelsübliche und preiswerte Bauteile aus dem Modellbaubedarf. (Foto: Schneider, Brandt)



vorwiegend für die Foto- und Videotechnik entwickelt und patentiert. Sie werden in Kameras eingesetzt, die der Benutzer meist mit einer Hand vor sein Auge hält, um durch ein Okular ein Ziel in der visuellen Umgebung zu erfassen. Unter diesen Umständen ist das Bild zwar frei von großen Verwackelungen, der Benutzer kann sich aber weder frei bewegen noch kann er seine Umwelt in allen biologisch möglichen Freiheitsgraden wahrnehmen.

Kopffeste Kamerasysteme mit blickgesteuerter Achse ermöglichen bisher dem Träger zwar Bewegungsfreiheit, konnten aber nicht die Bilder stabilisieren und lieferten deshalb nur schlechte Bildqualität.

Das hier vorgestellte neue System wird allen Anforderungen gerecht: Sein Benutzer kann sich frei bewegen und sein Gesichtsfeld wird durch keine Technik eingeschränkt. Die Videokamera an der Stirn ist so angebracht, dass sich die optische Achse der Kamera problemlos auf das Ziel ausrichtet, auf das auch der Benutzer gerade blickt.

Die fünfte Dimension

Die neue Technik ist breit einsetzbar: im Kino- und Dokumentarfilm, in der Sicherheitstechnik, bei der Dokumentation von chirurgischen Eingriffen oder in der psychologischen Forschung.

Im medizinischen Bereich sind Ärzte zunehmend mit Klagen über Kunstfehler konfrontiert. In den USA müssen Operationen aufgrund von Haftungsregelungen immer lückenlos dokumentiert werden. Die blick-



Treppensteigen (links) und Tennisspielen (rechts) aufgenommen mit einer blickgesteuerten Kopfkamera. Die Aufnahmen geben die subjektive Sicht des Trägers wieder, ohne dessen Bewegungsfreiheit und Gesichtsfeld einzuschränken. (Foto: Glasauer, Braun, Bardins, Brandt)

gesteuerte Kamera erfasst das visuelle Blickfeld des Chirurgen und kann in Prozessen helfen, die Lage zu klären und die Wahrheit sichtbar zu machen.

Dokumentarfilme liegen im Trend der Zeit, und auch hier ist die neue Technik interessant. Szenen, die die authentische, subjektive Sicht des Kameramanns wiedergeben, sind hier erwünscht: Sie dokumentieren einen ganz persönlichen Blickwinkel und lassen den Zuschauer unmittelbar und ungefiltert am Geschehen teilhaben. Die häufigen, spontanen Kopf- und Augenbewegungen eines Individuums lassen Filmprodukte erwarten, die mehr dem „natürlichen“ (spontanen) Beobachtungsverhalten der Menschen entsprechen als die gestaltende, regiegesteuerte Kameraführung. Möglich würde zum Beispiel eine neue Art von Sportberichterstattung, bei der die Sportler während des Wettkampfgeschehens, beim Skifahren, Skispringen oder Tanzen, klare Bilder und Eindrücke quasi aus der „Innensicht“

liefern. Ein blickgesteuertes Kamerasystem nutzt auch dem Amateurfilmer: bei wichtigen Familienergebnissen, Veranstaltungen oder Besichtigungen kann er ungehindert selbst am Geschehen teilnehmen und ganz nebenbei die Geschehnisse im Bild festhalten.

Auch der sicherheitstechnische Bereich ist ein potenzieller Nutzer der neuen Technik. Solche Sichtgeräte, können bereits im Training von Einsatzkräften (Feuerwehr, Minenräumung, Sprengkommandos, Einsatztrupps) die Ausbildungsqualität sichern. Im realen Einsatz ermöglichen sie der Zentrale eine effizientere Koordinierung, weil sie die Bilder aus Sicht der Einsatzkräfte vor Ort erhält.

Die neurowissenschaftliche Forschung kann das System nutzen, um das Explorationsverhalten von Probanden oder Patienten zu analysieren. Die Bilder helfen, zum Beispiel Verhaltensstörungen bei psychiatrischen, neurologischen oder ophthalmologischen Erkrankungen zu analysieren.

Moderne Zyklopen: Drei Augen und keines zu viel

Dr. Erich Schneider (Jahrgang 1968) ist Physiker und leitet die FORBIAS-Teilprojekte „Blickgesteuerte Kopfkamera“ und „Mobile Video-Okulographie“ am Klinikum der Universität München-Großhadern, Abt. Neurologie. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Messung und Modellierung von Augenbewegungen in der Diagnose von Erkrankungen des Gleichgewichtssystems.

Dipl.-Ing. Klaus Bartl (Jahrgang 1967) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Klinikum der Universität München-Großhadern, Abt. Neurologie. Er modelliert torsionelle Augenbewegungen bei physiologischen Stimulationen des Gleichgewichtssystems.

Dipl.-Inf. Stanislavs Bardins (Jahrgang 1975) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Klinikum der Universität München-Großhadern, Abt. Neurologie. Sein Forschungsschwerpunkt ist die technische Umsetzung der Adaptierbarkeit von Augenbewegungen durch visuelle Reize.

Dipl.-Phys. Thomas Dera (Jahrgang 1969) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Klinikum der Universität München-Großhadern, Abt. Neurologie. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Modellierung von Nystagmus.

Dr. Guido Böning (Jahrgang 1967) ist Physiker und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Klinikum der Universität München-Großhadern, Abt. Neurologie. Er beschäftigt sich mit der digitalen Bildverarbeitung zur Messung von Augenbewegungen.

Prof. Dr. med. Dr. h. c. Thomas Brandt (Jahrgang 1943) ist stellvertretender Sprecher des Bayerischen Forschungsverbundes Bioanaloge Sensomotorische Assistenz, FORBIAS, und Inhaber des Lehrstuhls für Neurologie am Klinikum der Universität München-Großhadern. Sein Forschungsschwerpunkt ist das Gleichgewichtssystem sowie die Diagnose und Behandlung von Patienten mit dem Leitsymptom Schwindel.

sieren. Mit der blickgesteuerten Kopfkamera lässt sich aber auch die Wirkung von Werbung analysieren (Marketing), die ergonomische Einrichtung eines Arbeitsplatzes prüfen oder die Bedienung komplexer Geräte überwachen (Arbeitssicherheit).

Der erste funktionsfähige Prototyp der blickgesteuerten Kopfkamera steht seit kurzem zur Verfügung: Die Träger können sich ohne Einschränkung der Sicht frei bewegen und dabei Videoaufnahmen aus der eigenen subjektiven Perspektive aufnehmen. Die erste Kopfkamera dieses Typs wurde auf der Cebit 2005 mit großem Erfolg vorgestellt.

BAKTERIEN GEGEN KREBS



Ulf Rapp und Ivaylo Gentshev

„Krebs“. Allein das Wort löst Schauern und Ängste aus. Krebserkrankungen sind nach Infektions- und Herz-Kreislaufferkrankungen weltweit die dritthäufigste Todesursache beim Menschen. Seit vielen Jahren suchen Wissenschaftler fieberhaft nach neuen Methoden, um den Kampf gegen die schreckliche Krankheit zu gewinnen.

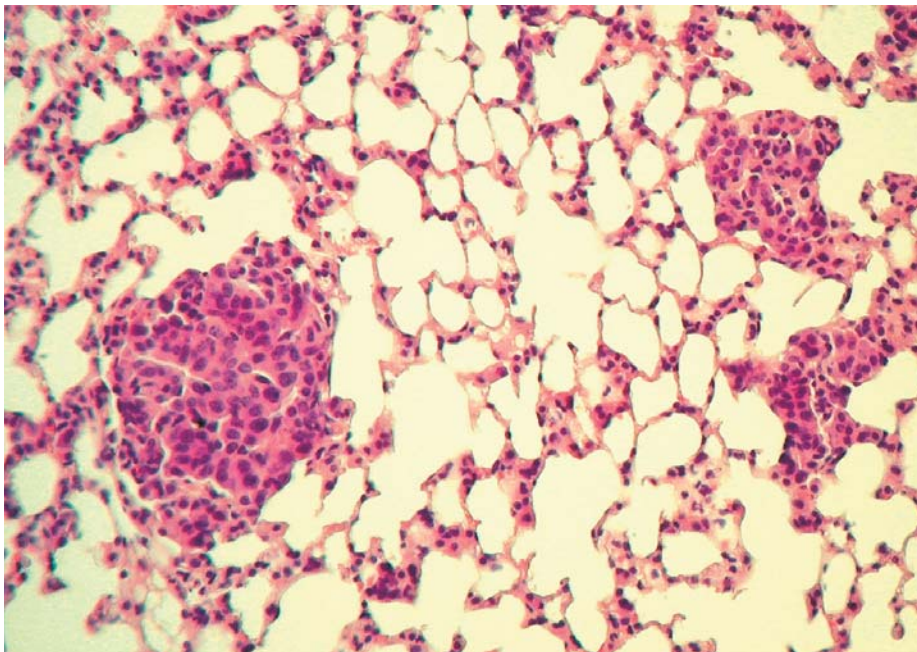
Krebserkrankungen treten immer häufiger auf. Hauptgrund hierfür ist die steigende Lebenserwartung des Menschen. Moderne, verbesserte Techniken erleichtern die Diagnose und bringen Tumore immer schneller und früher ans Licht. Trotz einer verbesserten Diagnostik gibt es noch keine therapeutischen Ansätze, die den Krebs „für immer“ besiegen. Hauptziel einer Tumorthherapie ist sowohl den Primärtumor als auch Metastasen vollständig zu entfernen. Gegenwärtig rücken die Mediziner den Tumoren chirurgisch und/oder mit Chemo- und Radiotherapie zu Leibe. Nahezu alle Methoden greifen dabei auch gesundes Gewebe an und haben schwer erträgliche Nebenwir-

kungen für den Patienten. Deshalb suchen die Wissenschaftler nach schonenderen Methoden, die bösartige Zellen selektiv erkennen und zerstören. Die meisten Tumorzellen entziehen sich solchen Versuchen, indem sie sich schnell verändern.

Eine faszinierende Möglichkeit, veränderliche Tumoren „auszutricksen“ sind Bakterien, die in der Lage sind, sich selektiv und bevorzugt im Tumorgewebe anzureichern. In der letzten Zeit häuften sich Berichte über eine Anti-Tumorwirkung von verschiedenen Bakterienstämmen. Die Beobachtung ist allerdings nicht neu: Bereits gegen Ende des 19. Jahrhunderts berichtete der New Yorker Chirurg William Coley, dass sich der Gesundheitszustand von Krebspatienten nach einer gezielten Infektion mit Bakterien verbesserte. Erst jetzt aber haben Wissenschaftler die technischen Mittel und die experimentellen Modellsysteme, nach solchen Bakterienstämmen zu suchen und deren Anti-Tumorwirkung durch gentechnische Änderungen gezielt zu steigern.

Bakterielle Detektive

Bakterien, die das Enzym Luziferase zum blaugrünen Leuchten bringt, übernehmen die Detektivarbeit bei der Tumorsuche. Selbst die kleinsten Metastasen im menschlichen Körper entgehen ihnen nicht. Die ersten Experimente an Mäusen haben die leuchtenden Einzeller bereits bestanden; die Anwendung der Methode beim Menschen steht kurz bevor. Konkret sieht der Einsatz folgendes Vorgehen vor: Be-



Lungentumor in der Maus. Tumore des Lungengewebes sind im Vergleich mit normalem Gewebe gut zu unterscheiden.
(Foto: Dr. J. Fensterle Universität Würzburg)

steht der Verdacht auf Krebs, bekommt der Patient Bakterien verabreicht, die blaugrünes Licht aussenden, ihm aber nicht schaden. Das Lichtsignal ist aber so schwach, dass kein Patient fürchten muss, tagelang wie ein „Alien“ blaugrün leuchtend herumzulaufen. Die Bakterien breiten sich zunächst über das Blutkreislaufsystem im Körper aus. Innerhalb weniger Tage entdeckt sie das Immunsystem und vernichtet die „Eindringlinge“. Aber nicht alle: Bakterien im Innern eines Tumors entkommen faszinierenderweise der Immunattacke und vermehren sich ungestört in den Krebszellen weiter. Eine spezielle Kamera, die auch äußerst schwache Lichtsignale erfasst, zeigt den Primärtumor samt den Metastasen in seinen Ausmaßen als blaugrüne Flächen.



Dieser Maus-Brusttumor wurde mit Hilfe von blaugrün-leuchtenden Bakterien identifiziert. (Foto: Dr. J. Fensterle, Prof. Dr. A. Szalay, Universität Würzburg)

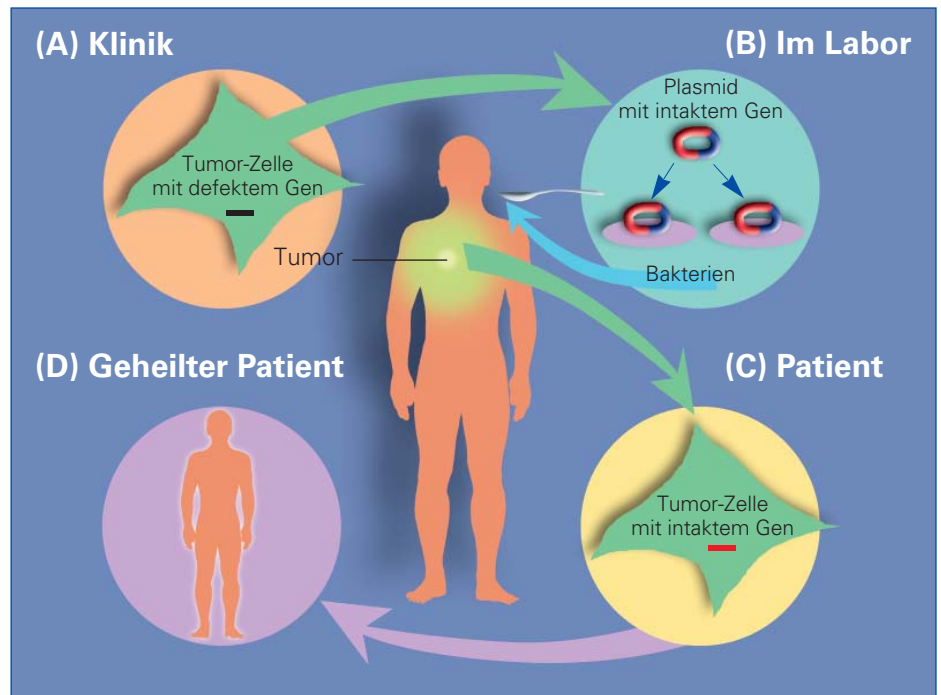


Abb. 1: Tumorthherapie mit Hilfe von Bakterien. (A) Nach der Diagnose „Krebs“ identifiziert das Labor das fehlerhafte Krebsgen. (B) Die Wissenschaftler übertragen eine intakte, das heißt gesunde Kopie des defekten Gens mit Hilfe eines Plasmid-Vektors als „Genfähre“ in Bakterien. Der Patient schluckt die Plasmid tragenden Bakterien. (C) In der Tumorzelle wird das defekte Gen gegen das intakte Gen ausgetauscht: Die Tumorzelle wird wieder normal. Dies ist ein Prozess, den die hohe Konzentration des eingeschleusten gesunden Gens besonders stark fördert. (D) Der Patient ist geheilt.

Trojanische Pferde im Miniformat

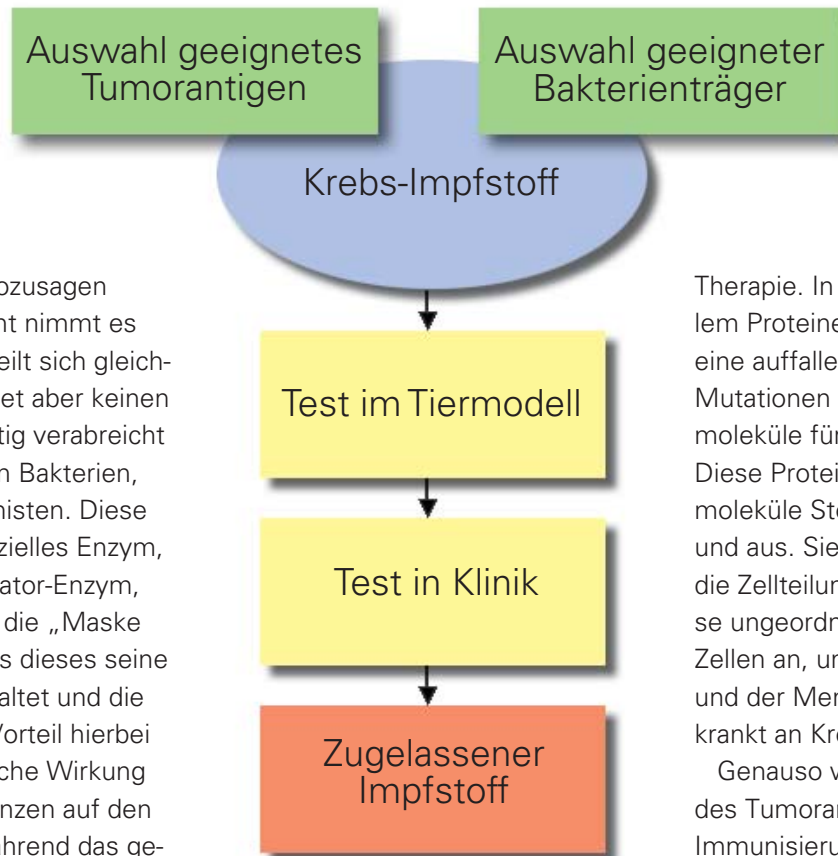
Viel Hoffnung ruht auf dem genteherapeutischen Angriff gegen Krebs. Die entscheidende Rolle spielen hierbei DNA-Stücke, die in die Krebszelle eingeschleust werden und dort wirkungsvolle Proteine produzieren oder krankmachende hemmen. Ein Ansatz zielt beispielsweise auf ein krebsverursachendes Protein (Onkoprotein): Die eingeschleuste DNA soll die Biosynthese des Onkoproteins hemmen und dadurch die Krebszellen schnell töten.

Eine weitere Möglichkeit zur Gentherapie besteht in der Korrektur des Erbguts der „fehlerhaften“ Krebszellen (siehe Abb. 1). Dies erweist sich aber als sehr schwierig, weil es derzeit technisch nicht gelingt, die DNA ausschließlich in Krebszellen zu schleusen. Eine nahe liegende Lösung sind Bakterien, die sich nur in Tumorzellen vermehren können. Sie könnten quasi als „Trojanische Pferde“ die gewünschten DNA-Stücke aufnehmen, sie gezielt

in die Tumorzellen bringen und schließlich die genetischen Schäden dieser Zellen beheben.

Bakterielle Zünder

Bakterien eignen sich auch als Katalysatoren, um harmlose Substanzen in toxische zu verwandeln. Dies machen sich die Wissenschaftler bei der Bekämpfung von Krebs gezielt zunutze. Krebsmittel wirken vor allem bei sich teilenden Zellen und daher besonders in Tumoren, weil deren Zellen sich schnell und unkontrolliert teilen. Die Mittel greifen aber auch gesunde Zellen an, die sich gerade teilen oder wachsen und verursachen so die oft für den Patienten schlimmen Nebenwirkungen. Ein großer Schritt wäre getan, würde das Krebsmedikament seine toxische Wirkung nur im Tumor entfalten, und genau dort setzen die Wissenschaftler auf das bakterielle Potenzial. Das Medikament wird chemisch zunächst so verändert, dass es harmlos für die Zellen – und damit auch nicht als Medikament



wirksam – ist. Es ist sozusagen „maskiert“. Der Patient nimmt es ein, der Wirkstoff verteilt sich gleichmäßig im Körper, richtet aber keinen Schaden an. Gleichzeitig verabreicht der Arzt dem Patienten Bakterien, die sich im Tumor einnisten. Diese verfügen über ein spezielles Enzym, das so genannte Aktivator-Enzym, das dem Medikament die „Maske herunterreißt“, so dass dieses seine toxische Wirkung entfaltet und die Krebszelle tötet. Der Vorteil hierbei ist, dass sich die toxische Wirkung der gelieferten Substanzen auf den Tumor beschränkt, während das gesunde Gewebe verschont wird. Der Patient leidet weitaus weniger unter den bekannten Nebenwirkungen einer Chemotherapie; gleichzeitig steigen die Chancen der Heilung, weil die Konzentration des Therapeutikums im Tumorgewebe viel höher ist als bei herkömmlichen Verfahren.

Die ersten Tierversuche entsprechend diesem Szenarium sind viel versprechend. Nach etwa 3 Wochen Behandlungszeit sind die Tumore stark geschrumpft und die meisten noch übrig gebliebenen Tumorzellen tot.

Derzeit testen weltweit viele wissenschaftliche Labors unterschiedliche Bakterien wie Listerien, Salmonellen und Shigellen als Träger für verschiedene Medikamente zur bakteriellen Chemotherapie.

Bakterielle Impfung gegen Krebs

Seit einiger Zeit erproben die Forscher spezifische Immuntherapien gegen Krebs. Spezifische Immunthe-

Strategie zur Herstellung von bakteriellen Tumorimpfstoffen gegen Krebs.

rapie bedeutet, dass das Immunsystem gezielt gegen einzelne Proteine vorgeht, die in Krebszellen verstärkt vorhanden oder verändert sind. Ziel ist die Bekämpfung des Tumors durch das Immunsystem selbst. Zwei Fragen stehen dabei im Mittelpunkt der Forschung: Welche Tumorantigene eignen sich für eine „Impfung“ besonders gut und welche Immunisierungsstrategie ist die erfolgreichste?

Antigene sind Moleküle, die der Körper als Fremdstoffe erkennt und durch Antikörper (Immunglobuline) des Immunsystems bekämpft. Tumorzellen bringen eine Reihe von Antigenen hervor, die dort entweder gehäuft vorkommen oder gegenüber „normalen“, das heißt gesunden Proteinen in ihrer Gestalt oder chemischen Zusammensetzung verändert sind. Grundsätzlich eignet sich jedes Antigen für eine spezifische

Therapie. In der Praxis zeigen vor allem Proteine von Signalkaskaden eine auffallend hohe Häufung oder Mutationen und bieten sich als Zielmoleküle für die Tumorthherapie an. Diese Proteine schalten als Signalmoleküle Stoffwechselprozesse an und aus. Sie kontrollieren aber auch die Zellteilung im Körper. Wenn diese ungeordnet abläuft, fangen die Zellen an, ungebremst zu wachsen und der Mensch oder das Tier erkrankt an Krebs.

Genauso wesentlich wie die Wahl des Tumorantigens ist die optimale Immunisierungsstrategie. Bei einer Immuntherapie gegen Krebs ist entscheidend, dass die körpereigene Toleranz gegenüber dem Antigen herabgesetzt wird, sonst produziert das Immunsystem nicht genügend tumorspezifische Abwehrzellen.

So genannte intrazelluläre Bakterien wie Listerien und Salmonellen sind Keime, die sich ausschließlich innerhalb einer Wirtszelle vermehren können. Sie eignen sich sehr gut, um die Toleranz gegen die Antigene zu durchbrechen. Tierversuche zeigen erste Erfolge: Bei Mäusen stimulierten bakterielle Krebsimpfstämme eine deutliche und vorbeugende Immunantwort gegen Krebs. Der Einsatz von abgeschwächten intrazellulären Bakterien als Träger für Tumorantigene zur therapeutischen oder prophylaktischen Immunisierung von Menschen gegen Krebs ist bereits geplant.

Risiken und Perspektiven

Freud und Leid liegen eng beieinander. Immungeschwächte Krebspati-

Prof. Dr. med. Ulf R. Rapp ist Vorstand des Instituts für Medizinische Strahlenkunde und Zellforschung an der Universität Würzburg, Vorstandsmitglied der Deutschen Krebsgesellschaft und Forschungsgruppenleiter im Forschungsverbund Neue Strategien der Immuntherapie (FORIMMUN). Seine Forschungsschwerpunkte sind die molekulare Onkologie und die Entwicklung neuer Diagnose- und Therapieverfahren gegen Krebs.

PD. Dr. Ivaylo Gentshev ist Gruppenleiter im Institut für Medizinische Strahlenkunde und Zellforschung (MSZ) der Universität Würzburg. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Untersuchung des Proteintransportes in gramnegativen Bakterien und die Entwicklung von Lebendimpfstoffen auf der Basis attenuierter intrazellulärer Bakterien zur Tumorthherapie und -prophylaxe.



Der abgeschwächte *S. typhi* Ty21a Stamm ist bereits millionenfach mit Erfolg als oraler Impfstoff gegen Typhus eingesetzt worden. (Foto: Dr. G. Dietrich, Berna Biotech Ltd, Schweiz)

enten mit lebenden Bakterien zu behandeln, birgt immer auch das Risiko einer plötzlich auftretenden Infektion. Allerdings sind die verwendeten Bakterienstämme kaum pathogen und durch Antibiotika gut kontrollierbar. Lebendimpfungen, das heißt die Impfung mit abgeschwächten Erregern, sind seit Jahrzehnten ohne nennenswerte Komplikationen beim Menschen im täglichen Einsatz.

Bei der Krebstherapie bieten Bakterien einen grundlegenden Vorteil gegenüber den derzeitigen Methoden, weil sich die Antitumorwirkung der Keime beziehungsweise der bakteriell mitgelieferten Krebsmedikamente strikt auf den Tumor beschränkt. Die Wissenschaftler hoffen, dass sich dadurch die starken Nebenwirkungen der gegenwärtigen Therapien erheblich reduzieren lassen. Darüber hinaus lässt sich die bakterielle Krebstherapie mit den klassischen Methoden wie der chirurgischen Entfernung des Tumors, Chemotherapie und Radiotherapie kombinieren. Ob Bakterien die Waffe der Zukunft gegen Krebs werden, kann derzeit noch niemand versprechen. Ein riesiges Potenzial haben die Einzeller auf alle Fälle.

PRIONEN: INFEKTIÖSE PROTEINE AUF DEM WEG INS GEHIRN



Michael A. Klein
und Eckhard Flechsig

Das Prion, der Erreger des Rinderwahnsinns und der Creutzfeldt-Jakob-Krankheit, stellt die Wissenschaft immer noch vor zahlreiche Rätsel. Es besteht aus einem körpereigenen Protein mit veränderter Gestalt. Gelangt es in einen Wirtsorganismus, vermehrt es sich, indem es körpereigene normale Prion-Proteine in eine fehlgefaltete Form umwandelt. Wie der Erreger nach Aufnahme aus dem Magen in das Gehirn gelangt und dort die schwammartigen Zersetzen verursacht, interessiert die Prionenforscher brennend.

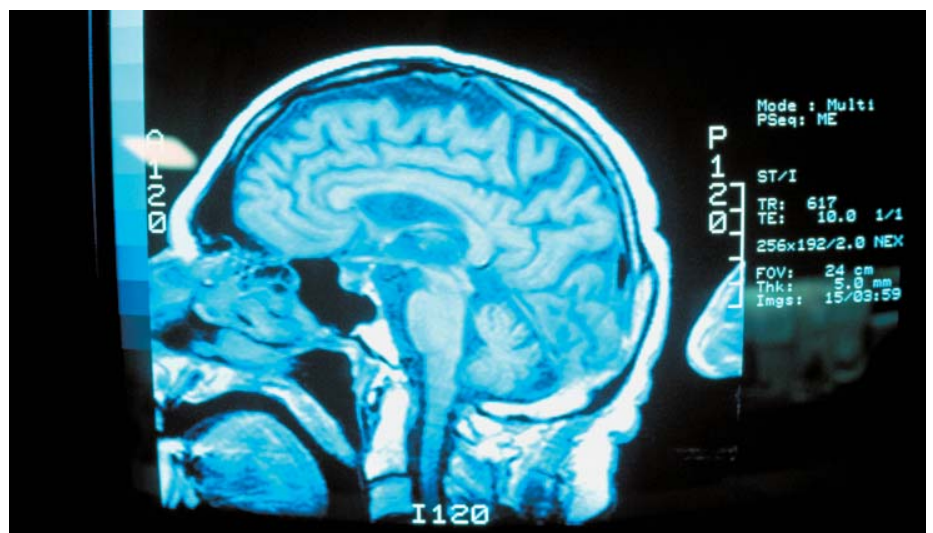
P rionkrankheiten oder Transmissible Spongiforme Enzephalopathien (TSE) sind Erkrankungen des Nervensystems mit bislang tödlichem Ausgang. Im Gehirn treten charakteristische schwammartige (spongiforme) Veränderungen auf. Prionkrankheiten sind auf verschiedene Organismen übertragbar und unterscheiden sich deshalb von anderen Krankheiten mit Proteinablagerungen wie der Alzheimerschen oder der Parkinsonschen Krankheit. Der Rinderwahnsinn oder die BSE (Bovine Spongiforme Enzephalopathie) ist die bekannteste Krankheit. BSE trat erstmals Mitte der 80er Jahre bei Rindern in Großbritannien auf. Prionkrankheiten sind jedoch schon seit vielen Jahren als Scrapie bei Schafen und Ziegen sowie beim Menschen als Creutzfeldt-Jakob-Krankheit (CJD) bekannt. Der Verzehr von BSE-infizierten Lebensmitteln führte 1995 zum Ausbruch einer neuen Variante von CJD (vCJD). Bisher sind mehr

als 150 Fälle von vCJD überwiegend in Großbritannien und vereinzelt in anderen europäischen Ländern beschrieben worden. Noch ist unklar, wie das Prion nach vermutlich oraler Aufnahme bis in das Gehirn gelangt. Um zuverlässige diagnostische und erfolgreiche therapeutische Ansatzpunkte zu entwickeln, ist es jedoch sehr wichtig, diesen Prozess zu kennen.

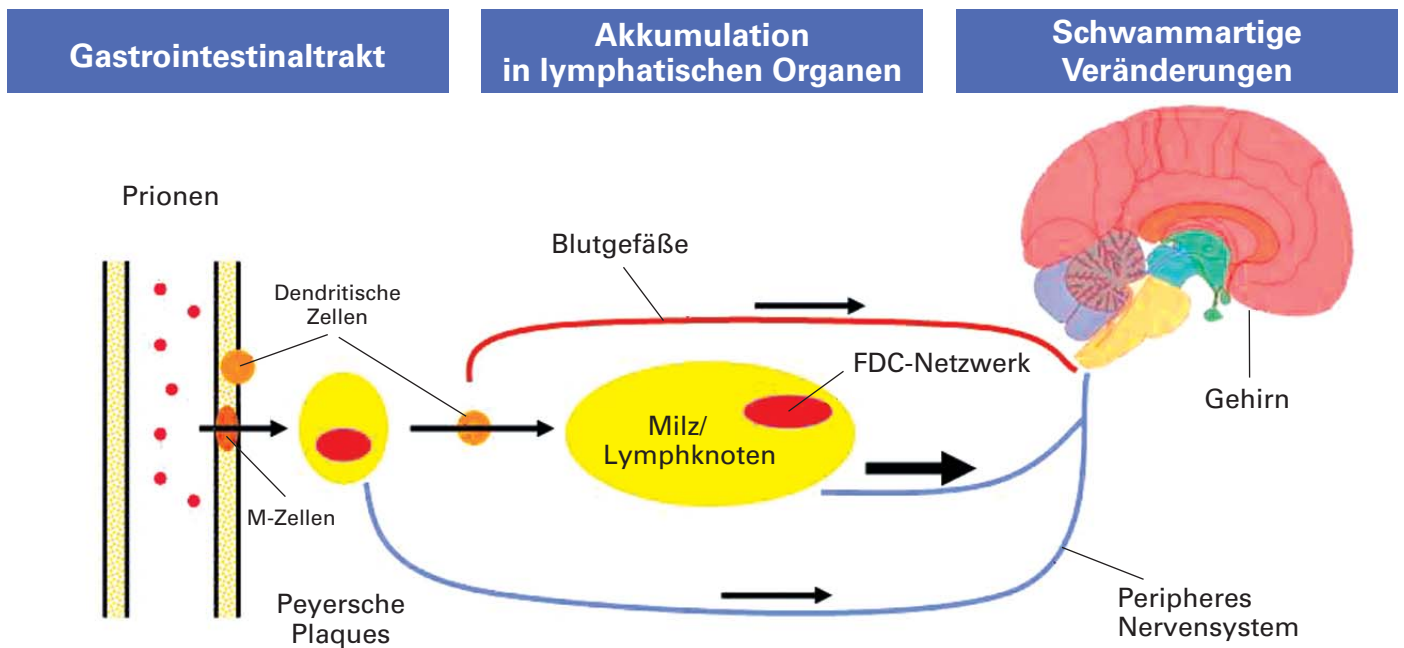
Proteine als Krankheitserreger

Die Vermutung, dass ein Protein der infektiöse Erreger für diese Krankheiten sein könnte, wurde 1967 erstmals von Griffith beschrieben. 1982 formulierte Stanley Prusiner dann die so genannte Prionhypothese (protein only Hypothese): Er postulierte, dass die fehlgefaltete Proteinform mit dem infektiösen Erreger identisch ist und sich ohne eigene Gene vermehren kann. Wird eine Zelle mit der fehlgefalteten Form infiziert, veran-

Kernspintomogramm mit typischen Veränderungen (Gehirnatrophie) bei Patienten mit Creutzfeldt-Jakob-Krankheit.
(Bild: Fotodisk)



Prionen: Infektiöse Proteine auf dem Weg ins Gehirn



Schematische Darstellung für die Aufnahme und die Ausbreitung von Prionen im lymphatischen System und die Transportwege ins Nervensystem. (Quelle: Flechsig/Klein)

lasst diese die normale, gesunde zelluläre Form sich in die falsch gefaltete Form umzuwandeln. Zur Abgrenzung von anderen Erregern führte Prusiner den Ausdruck „Prion“ ein, der sich von der Beschreibung „proteinaceous infectious particle“ ableitet. Das fehlgefaltete Prionprotein, die Scrapieform PrP^{Sc}, konnten Wissenschaftler aus infizierten Gehirnen isolieren und seine Aminosäuresequenz bestimmen. Das führte zur Entdeckung des zellulären Prionproteins, PrP^C. Eine Vielzahl von Daten bestätigen zwar die Prionhypothese, aber der endgültige Beweis dafür steht noch aus.

Ein Protein mit zwei Gesichtern

Im Sinne dieser Hypothese sind tatsächlich zwei Formen des Prionproteins bekannt. Das pathologische Molekül hat die gleiche Aminosäuresequenz wie das zelluläre Molekül, unterscheidet sich jedoch in Gestalt und biochemischen Eigenschaften. Das fehlgefaltete PrP^{Sc} ist in milden Detergenzien (Detergenzien setzen die Wasseroberflächenspannung herab und binden Fett) unlöslich und bildet Aggregate. Proteasen, die das natürliche Protein vollständig abbauen, können diese Aggregate nicht zerlegen. Unklar ist, wie das zelluläre

PrP^C Molekül in die fehlgefaltete Form überführt wird. Verschiedene Modelle versuchen die Umfaltung zu erklären. Ein Meilenstein für die Hypothese war der Nachweis, dass Mäuse ohne PrP^C nach Infektion mit der fehlgefalteten Form vollständig resistent gegenüber der Erkrankung sind. Das Prion benötigt also für seine Vermehrung das zelluläre Molekül, dessen physiologische Funktion noch unklar ist, denn Mäuse ohne das zelluläre Prionprotein entwickeln sich bis auf geringe Veränderungen im Schlaf-Wach-Rhythmus normal. Die fehlgefaltete Form verleiht dem Prion eine ungewöhnlich hohe Stabi-



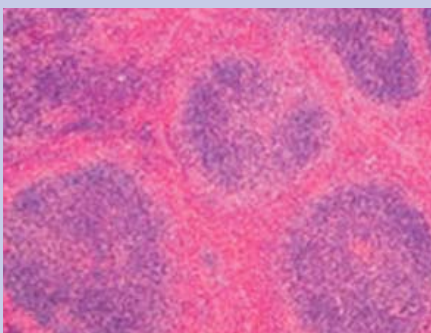
lität. Im Gegensatz zu Bakterien, Viren oder Pilzen sind Prionen resistent gegenüber konventionellen Inaktivierungsverfahren wie Abkochen bei 100°C, UV-Bestrahlung oder Behandlung mit Nukleinsäure-abbauenden Enzymen. Nur Chemikalien, die Proteine denaturieren wie Natronlauge oder Harnstoff, inaktivieren den Erreger. Autoklavieren bei über 134°C für mindestens 20 Minuten inaktiviert ihn ebenfalls, besonders in Gegenwart von Natronlauge als Sterilisations- und Dekontaminationsverfahren.

Übertragungswege von Prionen

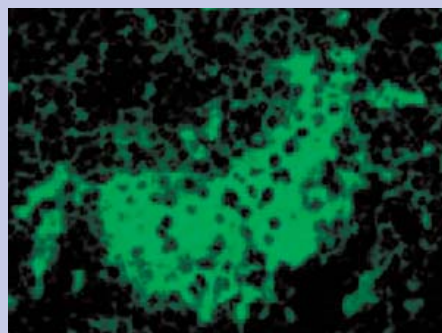
Die ungewöhnliche Resistenz von Prionen verursachte nach medizinischen Eingriffen zahlreiche Übertragungen der Creutzfeldt-Jakob-

Krankheit von Mensch zu Mensch. Eine mangelhaft sterilisierte Hirnelektrode, Wachstumshormone aus dem Hirngewebe verstorbener Patienten oder Transplantationen von Hornhaut führten zur Übertragung der Krankheit. Die hohe Temperaturresistenz des Erregers begünstigte 1986 auch den Ausbruch von BSE in Großbritannien, denn die Produzenten von Tiermehl senkten die Herstellungstemperatur zu Beginn der 80er Jahre in Großbritannien auf unter 100°C. Eine Übertragung von BSE durch kontaminiertes Tiermehl erfolgte dadurch auch auf verschiedene andere Tierarten und der Verzehr von BSE-infizierten Lebensmitteln führte 1995 zur Entstehung der vCJD. Im Gegensatz zu CJD sind vCJD-Prionen nicht nur im

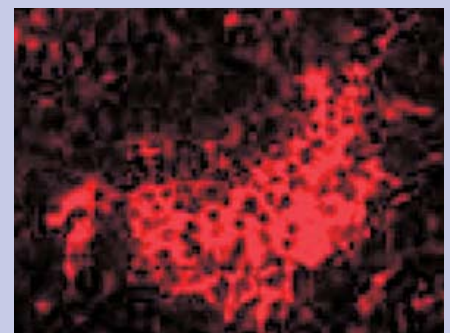
Zentralnervensystem, sondern auch im lymphatischen System nachweisbar: Bluttransfusionen sind deshalb nicht mehr vollkommen sicher. Kürzlich haben Mediziner bereits erste Fälle von vCJD beschrieben, die vermutlich durch die Übertragung von Blut oder Blutprodukten von Spendern entstanden, die später an vCJD erkrankten. Wie hoch das Infektionspotenzial für den Menschen bei oraler Aufnahme ist, lässt sich nur schwer abschätzen, denn neben Faktoren wie der minimalen Dosis und Häufigkeit sind vermutlich nicht alle Menschen gleich anfällig für den BSE-Erreger. Vom zellulären Prionprotein existieren bekannte Unterklassen, die möglicherweise die Übertragung beeinflussen.



Lymphfollikel der Milz



FDC-Netzwerk



Prion-Protein

Lymphfollikel und ein follikulär dendritisches Netzwerk der Milz, in dem sich Prionen in einer frühen Phase nach der Infektion ansammeln. (Bilder: Flechsig/Klein)

Prionen: Infektiöse Proteine auf dem Weg ins Gehirn

Vom Darm ins Lymphsystem

Die Übertragung von BSE erfolgt mit großer Wahrscheinlichkeit über die Nahrung. Wie dabei Prionen aus dem Verdauungstrakt in das Nervensystem gelangen und dort Schädigungen hervorrufen, sind wichtige, aber noch ungeklärte Fragen. Im Tiermodell lassen sich zwei Phasen der Neuroinvasion unterscheiden. In der ersten Phase vermehren sich Prionen nur in den lymphatischen Organen wie Milz und Lymphknoten und nicht im Gehirn. In der zweiten Phase kommt es zur Einwanderung von Prionen entlang der peripheren Nerven über das Rückenmark in das Gehirn. Welche Komponenten für die orale Aufnahme und den Transport von Prionen aus dem Darm in das lymphatische System verantwortlich sind und beide Phasen verbinden, wissen die Forscher noch nicht. Für die Aufnahme von Prionen aus dem Darm diskutieren sie zwei Möglichkeiten:

Einerseits könnten so genannte M-Zellen im Darmepithel beteiligt sein, denn M-Zellen sind in vitro in der Lage, Prionen über einen transzytotischen Mechanismus aufzunehmen. Andererseits könnten dendritische Zellen (lat. dendriticus = verzweigt) eine wichtige Rolle spielen. Diese Zellen, die sich durch ihre hohe Mobilität und Aufnahmekapazität von Antigenen und Pathogenen auszeichnen, könnten Prionen direkt aus dem Darmlumen aufnehmen und in das lymphatische System transportieren. Eine dendritische Zelle, die Prionen aufgenommen hat, könnte den Erreger in lymphatische Organe, einem wesentlichen Teil des Immunsystems transportieren. In den primär lymphatischen Organen (Knochenmark, Thymus) entstehen und reifen die Immunzellen. Erst in den sekundär lymphatischen Organen werden sie dann aktiv (Lymphknoten, Mandeln, Milz und lymphatisches Gewebe auf Schleimhäuten wie die Peyer-

schen Plaques (Peyer-Platten) im Darm). Nach oraler Aufnahme sind Prionen in den Peyerschen Plaques, dem Darm-assoziierten Lymphgewebe sowie in den Nervenganglien nachweisbar und gelangen von dort in weitere lymphatische Organe. Innerhalb der lymphatischen Strukturen sammeln sich Prionen in den so genannten follikulär dendritischen Netzwerken an, einem Zusammenschluss aus follikulär dendritischen Zellen (FDC) und B-Zellen, einer Leukozytenart. Fehlen diese FDC-Netzwerke, können sich Prionen im lymphatischen System nicht mehr vermehren und verhindern die weitere Ausbreitung des Erregers.

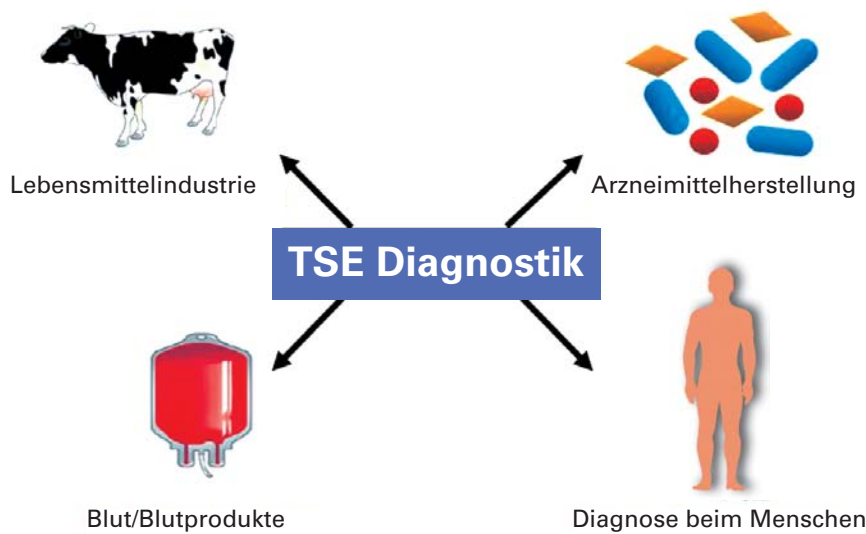
Vom Lymphsystem über die Nerven ins Gehirn

Die erste Ausbreitungsphase endet, wenn die Infektiosität in den follikulär dendritischen Netzwerken der Milz nicht mehr ansteigt. Pathologische Veränderungen sind in diesem Stadium nicht nachweisbar. Die Bindung oder Ansammlung von Prionen an die Zellen des follikulär dendritischen Netzwerkes folgt offenbar den gleichen Prinzipien wie bei Antigenen, zum Beispiel durch Faktoren des Komplementsystems, einem wesentlichen Teil der angeborenen Immunabwehr mit über 30 verschie-



Landwirt bereitet das Futter für sein Vieh vor.

(Foto: Caro Fotoagentur/A.Bastian)



Anwendungsbereiche der Prionendiagnostik. (Quelle: Flechsig/Klein)

denen Proteinen. Infektionsstudien mit Tieren, denen Faktoren des Komplementsystems fehlen, zeigten eine Verzögerung bei der Ansammlung von Prionen in lymphatischen Organen in der ersten Phase und verhindern den Transport ins Nervensystem und die Erkrankung. Diese Entkopplung der beiden Phasen zeigt, dass das Komplementsystem direkt oder indirekt an der Schnittstelle zwischen den lymphatischen Organen und dem Nervensystem eine wichtige Rolle spielt. Wie die Prionen aus den follikulär dendritischen Netzwerken der lymphatischen Organe die Nerven infizieren können, ist bisher unbekannt. In der zweiten Phase gelangen die Prionen entlang der Nervenbahnen in das

Rückenmark und das Gehirn. Die Geschwindigkeit ist mit etwa 1 mm pro Tag jedoch langsamer als der klassische axonale Transport von Proteinen. Die Mechanismen, wie Prionen entlang den Nervenbahnen in das Gehirn transportiert und eine klinische Erkrankung hervorrufen können, sind nach wie vor nicht vollständig aufgeklärt, aber enorm wichtig für die Entwicklung von diagnostischen und therapeutischen Verfahren.

Diagnostik und Therapie

Ein neues Nachweisverfahren, das die Vermehrung von Prionen im Reagenzglas nachahmt, verbessert die Diagnostik und erhöht damit die Empfindlichkeit der derzeit verfügba-

ren Tests zum Nachweis von PrP^{Sc} wesentlich. Bisher ist diese Methode, mit der auch geringste Mengen von Prionen nachzuweisen sind, jedoch für BSE-Prionen nicht etabliert und auch sehr zeitaufwändig. Ein weiterer neuer Test bestimmt in der Zellkultur Maus-Prionen mit der gleichen Sensitivität, wie bei der direkten Übertragung von potenziell infektiösen Proben auf empfindliche Empfängertiere. Ob sich dieses Testverfahren für den Nachweis von BSE- und CJD-Prionen eignet, ist derzeit noch nicht klar. Entscheidend für eine routinemäßige Kontrolle von Produkten für die menschliche Nahrungskette ist der Lebendtest. Die Europäische Gemeinschaft initiiert und unterstützt zahlreiche Forschungsvorhaben zur Entwicklung eines solchen Tests. Einen ersten möglichen Durchbruch für BSE-Lebendtestverfahren hat kürzlich eine Göttinger Arbeitsgruppe beschrieben, die im Blutserum von BSE-infizierten Rindern geschädigte Erbgutinformationen nachweisen konnte.

Auf der Suche nach dem Impfstoff

Das grundlegende Verständnis der Krankheitsprozesse ist entscheidend, um neue Therapieansätze zu entwickeln. Gegenwärtig ist eine

Prionen: Infektiöse Proteine auf dem Weg ins Gehirn

Prof. Dr. med. Michael A. Klein (Jahrgang 1965) leitet die Arbeitsgruppe für Prionenforschung am Institut für Virologie und Immunbiologie an der Bayerischen Julius-Maximilians-Universität Würzburg und ist Mitglied des Bayerischen Forschungsverbands Prionen, FORPRION. Seine Forschungsschwerpunkte sind Prionenkrankheiten und andere neurodegenerative Erkrankungen.

Dr. Eckhard Flechsig (Jahrgang 1969) leitet eine Forschungsgruppe im Rahmen des Emmy-Noether-Programms der Deutschen Forschungsgemeinschaft am Institut für Virologie und Immunbiologie an der Bayerischen Julius-Maximilians-Universität Würzburg und ist Mitglied des Bayerischen Forschungsverbands Prionen, FORPRION. Er beschäftigt sich mit molekularen und zellulären Mechanismen bei der Neurodegeneration von Prionen.

Therapie gegen Prionenkrankheiten gar nicht und auch eine Prophylaxe nur sehr begrenzt möglich. Eine Impfung gegen neurodegenerative Erkrankungen könnte ein neuer Ansatz sein. Verschiedene Forschergruppen zeigten, dass Antikörper, die an beide Formen des Prionproteins binden können, die Krankheit im Tier zumindest dann aufhalten kann, wenn Prionen das Nervensystem noch nicht erreicht haben. Eine Impfung könnte also die beste und sicherste Methode sein, um BSE auszurotten. Das Immunsystem erkennt jedoch das fehlgefaltete Protein nicht als fremdes Antigen, deshalb ist zurzeit eine aktive Immunisierung noch nicht möglich. Gegenwärtig versuchen viele Arbeitsgruppen den Mechanismus dieser Antikörper vermittelten Hemmung der Prionvermehrung zu verstehen, um mit diesem Wissen Impfstoffe gegen Prionenkrankheiten zu entwickeln.

„GRÜNES GOLD“ FÜR DIE MOBILITÄT



Andrea Spangenberg,
Stephan Prechtel, Doris Schieder
und Martin Faulstich

Mobilität ermöglicht einen nahezu unbegrenzten internationalen Warenstrom und begründet einen hohen Lebensstandard. Fast undenkbar sind in der heutigen Zeit die während der ersten Ölkrise in den 70er Jahren zeitweise eingeführten „autofreien“ Sonntage. In der Gesellschaft des 21. Jahrhunderts gilt die individuelle Mobilität mit dem eigenen PKW vielen als Sinnbild für Unabhängigkeit und Lebensqualität. Aber die lieb gewonnene Freiheit ist gefährdet: Die jüngsten politischen und wirtschaftlichen Entwicklungen zeigen, dass hohe Rohölpreise keine vorübergehende Erscheinung und dass die fossilen Ressourcen begrenzt sind.

Im Jahr 2003 wurden in Deutschland rund 56,3 Millionen Tonnen Kraftstoff verbraucht, wobei der Anteil regenerativer Flüssigkraftstoffe lediglich 1,43% betrug (s. Abb. 1).

Die Vorräte an fossilen Energieträgern wie Erdöl, Kohle oder Erdgas sind jedoch begrenzt. Neuen Prognosen der UN zufolge werden bis zum Jahr 2030 über 8 Milliarden Menschen auf der Erde leben. Damit einher geht ein weltweit um 60% steigender Energieverbrauch. Zwei Drittel davon entfallen auf die derzeitigen Entwicklungsländer. Eine Studie des Bundeswirtschaftsministeriums rechnet 2030 mit einem Gesamtenergieverbrauch von 16 Milliarden Tonnen Öläquivalenten (vgl. 2002 ca. 11 Mia. t). Die heute bekannten Erdölreserven reichen kaum noch für 60 Jahre. Auch wenn Spitzenpreise von über 65 US-Dollar pro

Barrel Rohöl zu etwa einem Drittel auf das Konto von Hurrikan „Katrina“ und anderen aktuellen Ereignissen gehen, ist der restliche Preisanstieg der letzten Jahre ein eindeutiges Indiz für den beginnenden Kampf um die endlichen Ressourcen. Erdgas und Kohle sind bei gleichbleibendem Verbrauch noch für einige Jahrhunderte vorhanden. Auch 2030 – so die Prognosen – decken die fossilen Energieträger immer noch 4/5 des Weltenergieverbrauchs. Angesichts des Bedarfs und der knappen Ressourcen gebieten Vernunft und Weitsicht dennoch, intensiv nach alternativen Energieträgern zu suchen: nicht nur um unsere Mobilität zu erhalten und den steigenden Energiebedarf zu decken, sondern auch um der zunehmenden Umweltverschmutzung und der Klimaveränderung Einhalt zu gebieten.

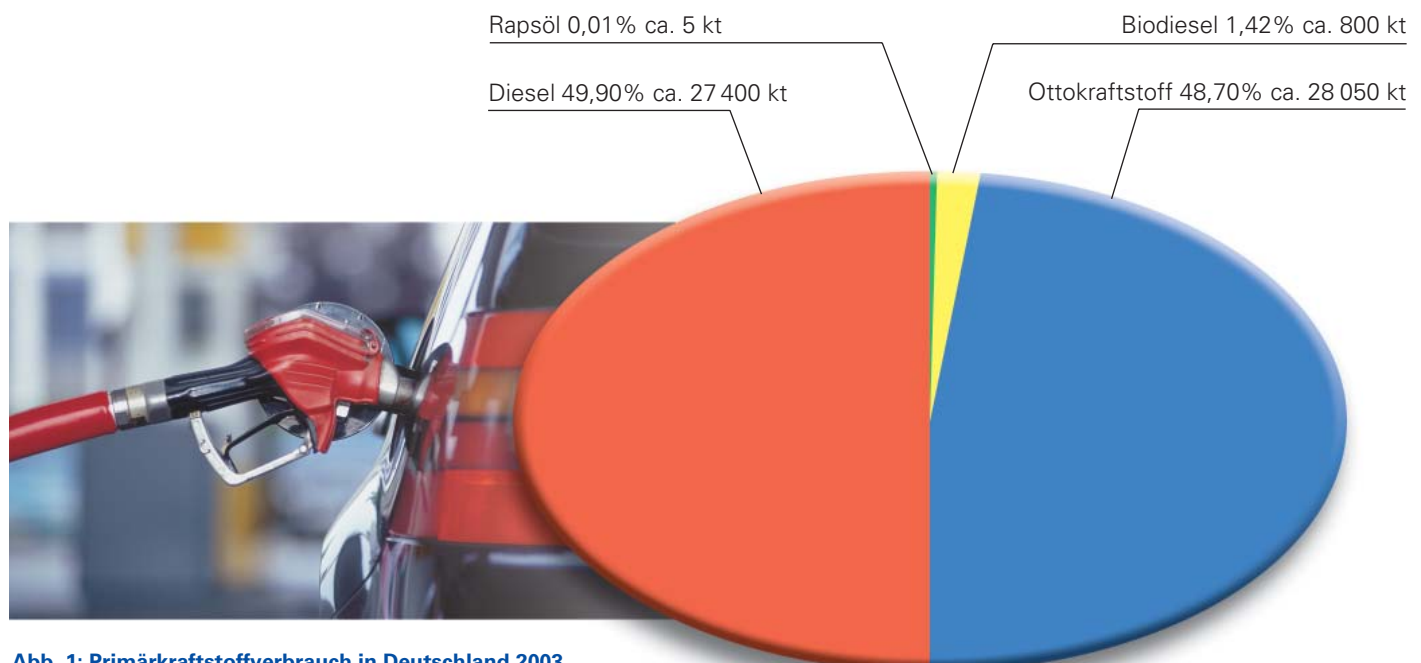


Abb. 1: Primärkraftstoffverbrauch in Deutschland 2003.

„Grünes Gold“ für die Mobilität

Mehr Gesetz für mehr Klimaschutz

Regenerative Treibstoffe sind Pflanzenprodukte. Sie sind klimaneutral, das heißt, die CO₂-Emission bei der Verbrennung ist genauso hoch wie die CO₂-Aufnahme aus der Atmosphäre während der Wachstumsphase. Damit entsteht ein weitgehend

geschlossener CO₂-Kreislauf, auch wenn oft noch zusätzliche Energie notwendig ist, um regenerative Kraftstoffe herzustellen.

Sowohl die Bundesrepublik Deutschland als auch die Europäische Union wollen die Emissionen von Schadstoffen senken. Das Europäische Parlament hat am 8. Mai 2003

für alle Mitgliedsstaaten verpflichtend die Richtlinie 2003/30/EG zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor erlassen: Bis 2010 soll der Anteil an regenerativen Treibstoffen zunächst auf 5,75% des Kraftstoffverbrauchs steigen. Gleichzeitig ermöglicht die Richt-

Technische Energiepotenziale

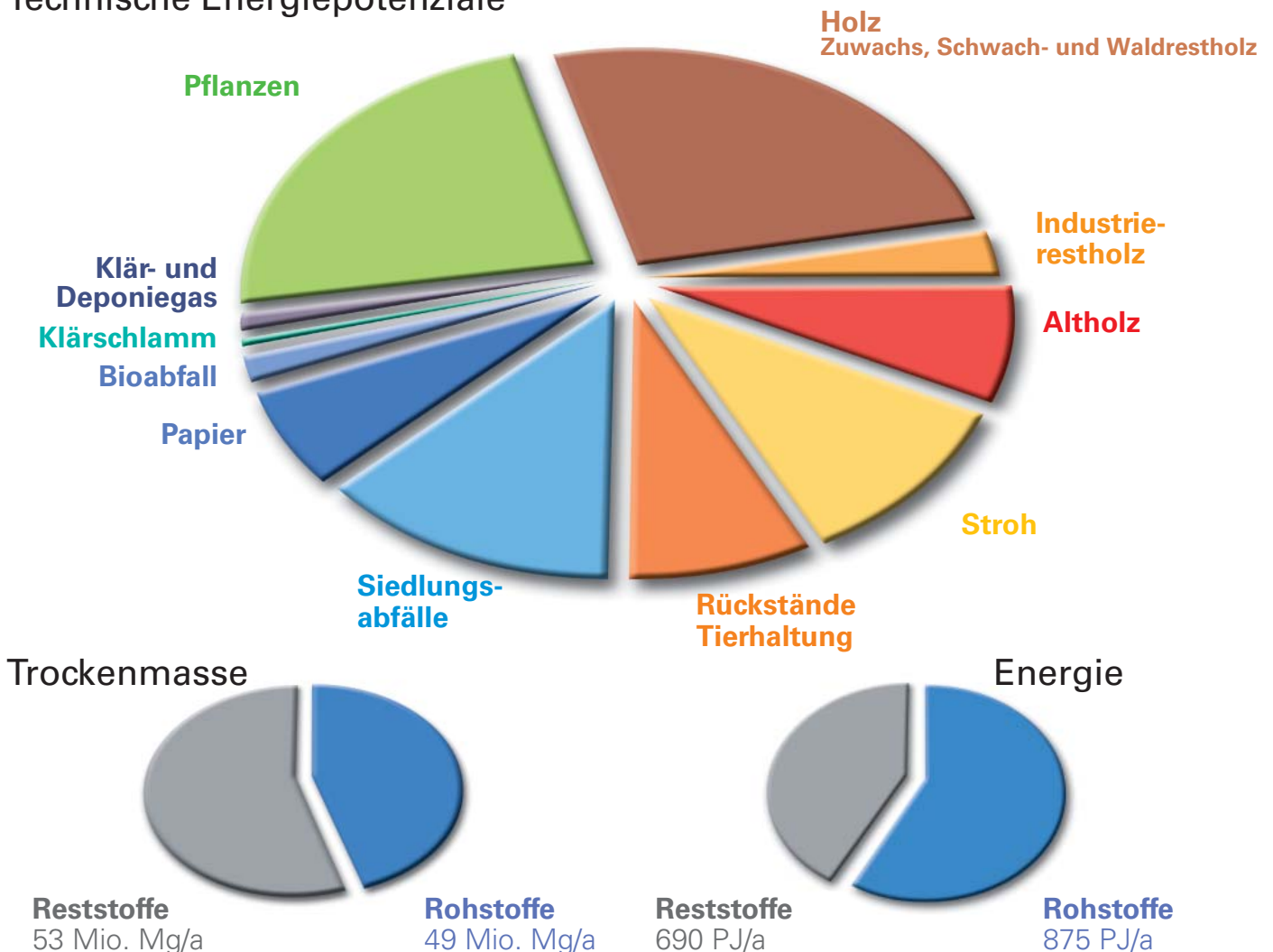


Abb. 2: Nutzungspotenziale von Biomasse in Deutschland.



linie den EU-Mitgliedsstaaten, alle Biokraftstoffe von der Mineralölsteuer zu befreien – unabhängig davon, ob sie als Reinkraftstoffe oder Zumischung eingesetzt werden.

Als Biokraftstoffe entsprechend der Richtlinie gelten momentan Bioethanol, Biodiesel, Biogas, Biomethanol, Biodimethylether, Bio-ETBE (Ethyl-Tertiär-Buthylether), Bio-MTBE (Methyl-Tertiär-Buthylether), synthetische Biokraftstoffe (BTL „Biomass-To-Liquid“, GTL „Gas-To-Liquid“), Biowasserstoff und reines Pflanzenöl. Regenerative Reinkraftstoffe sind in Deutschland bereits seit den 90er Jahren von der Mineralölsteuer befreit, das Gleiche gilt jetzt auch für Beimischungen.

Ein Fußballfeld Raps pro PKW

Aus heutiger Sicht bieten sich viele nachwachsende Rohstoffe wie Raps, Sonnenblumen, Holz, Mais, Zuckerrüben und Getreide als Ausgangssubstanzen für regenerative Flüssigtreibstoffe an.

Was aber sollte wo und wie zum Einsatz kommen? Deutschland ist ein flächenmäßig kleines Land, seine Platzressourcen sind begrenzt. Zum Beispiel liefert ein Hektar (ha) Raps rund 3t Rapssamen, die 1t Rapsöl und damit rund 1t Biodiesel ergeben. Das heißt, dass ein Fußballfeld angebaute Raps den Treibstoffbedarf eines PKW bei einer durchschnittlichen Jahresleistung von 16 000 km deckt. Hochgerechnet auf den Jahrestreibstoffverbrauch in Deutschland (2003: 56,3 Mio. t) müsste Raps auf einer Fläche so groß wie Nordrhein-Westfalen ange-

baut werden, wenn 2010 die vorgeschriebenen 5,75% des Gesamtkraftstoffverbrauchs über Raps gedeckt werden müssten. Ein weiterer Lösungsansatz steckt in dem erheblichen und bisher größtenteils noch ungenutzten Energiepotenzial der so genannten biogenen Reststoffe aus der Land- und Forstwirtschaft (s. Abb. 2).

Positive Energiebilanz für Pflanzenöl

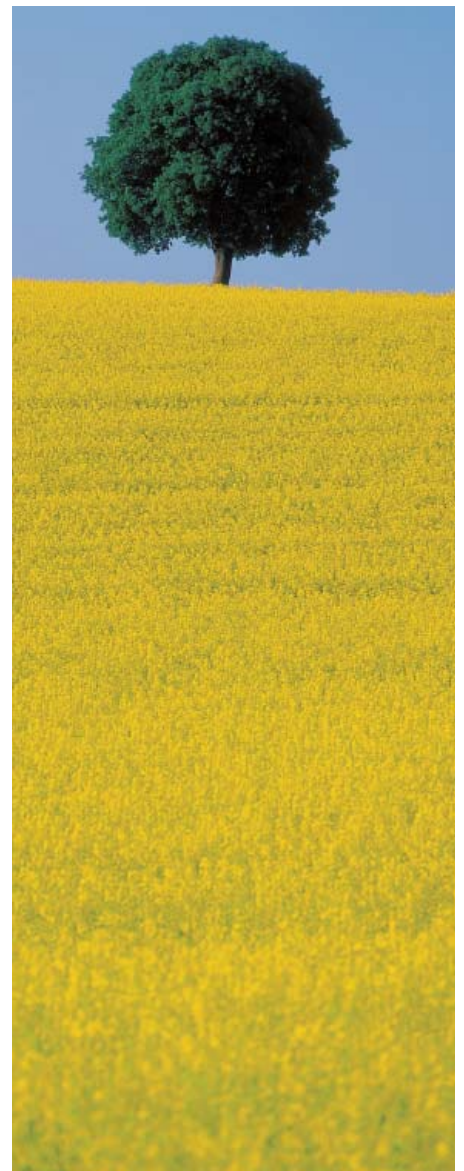
Pflanzenöle dienen als Ausgangsmaterial für Biodiesel, können aber speziell umgerüstete Dieselmotoren auch direkt antreiben. Bereits Rudolf Diesel experimentierte 1895 mit Erdnussöl als Treibstoff – zu einem Zeitpunkt, als Klimaveränderung, Ozonloch und Energiekrisen noch in weiter Ferne lagen.

Für die Produktion von reinen Pflanzenölen stehen weltweit etliche Pflanzen zur Wahl, an erster Stelle Palmen. Deutschland setzt zu über 90% auf Raps, der mit einem Ölgehalt von durchschnittlich 43% eine hohe Ausbeute verspricht.

Die landwirtschaftlichen Betriebe oder Genossenschaften reinigen die Ölsaaten und gewinnen das Öl durch Kaltpressung und Filterung. Der Presskuchen enthält immer noch mehr als 10% Restöl, das als Tierfutter vermarktet oder alternativ in einer

Biogasanlage verwendet werden kann. Großtechnische Hersteller von Pflanzenölen pressen und extrahieren das Öl mit organischen Lösemitteln, beispielsweise Hexan bei Temperaturen bis 80°C.

Reines Pflanzenöl ist besonders bei niedrigen Temperaturen wesentlich viskoser (zähflüssiger) als fossiler Die-



Hochgerechnet auf den Jahrestreibstoffverbrauch in Deutschland (2003: 56,3 Mio. t) müsste Raps auf einer Fläche so groß wie Nordrhein-Westfalen angebaut werden, wenn 2010 die vorgeschriebenen 5,75% des Gesamtkraftstoffverbrauchs über Raps gedeckt werden müssen. (Foto: MEV)

„Grünes Gold“ für die Mobilität



(Fotos: C.A.R.M.E.N. e.V.)

selkraftstoff, deshalb ist eine Umrüstung der Motoren erforderlich (Kosten je nach Konzept bis zu mehreren tausend Euro). Da sich Rapsöl erst bei 317°C entzündet (normaler Diesel bei 80°C), sind keine besonderen Sicherheitsvorkehrungen bei Transport und Lagerung nötig. Pflanzenöl ist biologisch gut abbaubar und für das Grundwasser ungefährlich (Wassergefährdungsklasse 0). Die Bayerische Landesanstalt für Landtechnik hat zur Gewährleistung einer gleich bleibenden Qualität den so genannten RK-Qualitätsstandard 5/2000 für Rapsöl als Kraftstoff veröffentlicht.

Trotz der einfachen Herstellung und der positiven Energiebilanz hat Pflanzenöl bisher nur einen geringen Marktanteil. Ein Hauptgrund ist die fehlende Infrastruktur (öffentliche Pflanzenöltankstellen). Für ländliche Regionen dagegen lohnt sich der Einsatz von reinem Pflanzenöl: Die Schulbusflotte des Landkreises Amberg-Sulzbach fährt mit Pflanzenöl wirtschaftlich.

Bereits etabliert: Biodiesel

Biodiesel ist der bekannteste regenerative Kraftstoff in Deutschland und im Gegensatz zu reinem Pflanzenöl sehr

gut an die technischen Anforderungen des Dieselmotors angepasst. Er war der erste regenerative Kraftstoff, der als „handelsüblich“ anerkannt wurde. Die Kraftstoffqualität regelt und sichert die EU-weite Norm DIN EN 14214 und in Deutschland die Kraftstoffqualitäts- und Kennzeichnungsverordnung (10. BimSchV). Viele Automobilhersteller bieten bereits eine Reihe von Fahrzeugen direkt ab Werk für den Betrieb mit Biodiesel an.

In Deutschland dient hauptsächlich Rapsöl als Ausgangsbasis für Biodiesel. Pflanzenöl besteht zum überwiegenden Teil aus so genannten Triglyceriden, Fettsäuren, die über eine Esterbindung an Glycerin gebunden sind. Bei Normaldruck, Temperaturen um 60°C und einem Katalysator zerfallen diese Esterbindungen der Triglyceride und die „freigesetzten“ Fettsäuren knüpfen anschließend neue mit Methanol. Pharma- und Lebensmittelindustrie verwenden das abgetrennte Glycerin zum Beispiel in Hautcremes oder als Weichmacher; Biogasanlagen nutzen es als Energieträger. Neben Raps lassen sich auch andere Pflanzenöle und sogar Abfallprodukte wie Speise- und Tierfette verwenden.

Biodiesel weist lösungsmittelähnliche Eigenschaften auf, die bei Fahrzeugen, die nicht für die Biodieselnutzung ausgelegt sind, Probleme an Dichtungen und Benzinleitungen verursachen können. Die Abgasgrenzwerte der EU-Abgasnorm Euro IV einzuhalten, ist inzwischen problemlos möglich.

Der Anteil an Biodiesel am gesamten Kraftstoffmarkt hat innerhalb der



(Foto: MEV)

letzten 12 Jahre stark zugenommen. Biodiesel ist wegen der Steuervergünstigung preiswerter als fossiler Diesel und über ein ausgebautes Tankstellennetz ausreichend verfügbar. Er ist in die Wassergefährdungsklasse 1 (schwach wassergefährdend) eingestuft und ist innerhalb von 21 Tagen zu 98% biologisch abbaubar.

Designer-Biokraftstoffe

Das Design der Biomass-To-Liquid (BTL) Kraftstoffe (auch Synfuel oder Sunfuel® genannt) ist exakt an die Anforderungen moderner Motoren-

konzepte angepasst. Für die Produktion von synthetischen Biokraftstoffen steht eine breite Palette von Rohstoffen zur Verfügung: Energiepflanzen, Holz, aber auch Abfälle. Im Gegensatz zu Biodiesel und Pflanzenöl, die lediglich die Saat zur Kraftstoffproduktion nutzen, steckt in BTL-Kraftstoffen die ganze Pflanze. Die Vielzahl der nutzbaren Ausgangsstoffe für die BTL-Produktion lässt auf eine Erhöhung des BTL-Anteils an den Kraftstoffen in der Zukunft hoffen, obwohl es bislang noch keine Technologien zur großtechnischen Herstellung gibt. Vor allem die

Automobilindustrie ist begeistert, wenn sich der Kraftstoff dem Motor anpasst und nicht umgekehrt – spart sie sich doch teure Entwicklungs- und Umrüstkosten. Zudem stoßen die „Designerkraftstoffe“ deutlich weniger Schadstoffe aus (NO_x, Partikel) und tragen damit zur Einhaltung von Grenzwerten für Abgasemissionen bei.

Hergestellt wird der regenerative Flüssigkraftstoff aus fester Biomasse über gasförmige Zwischenschritte. In einem thermochemischen Umwandlungsprozess entsteht aus der festen Biomasse unter hoher Tem-



Die Pilotanlage in Schwandorf stellt nach dem ATZ-Thermodruckhydrolyseverfahren Substrate für die Biogas- oder Bioethanolerzeugung her. (Foto: ATZ Entwicklungszentrum Sulzbach-Rosenberg)

peratur, Druck und einem Vergasungsmittel, beispielsweise Sauerstoff, das Synthesegas, ein Gemisch aus Kohlenmonoxid, Wasserstoff, Methan, Kohlendioxid und Wasser. Stör- und Schadstoffkomponenten, beispielsweise Schwefel- und Stickstoffverbindungen, müssen vor einer weiteren Nutzung entfernt werden. Erst dann beginnt die Umwandlung zum flüssigen Kraftstoff. Mehrere Verfahren sind möglich:

Die Fischer-Tropsch-Synthese ist ein 1925 von Franz Fischer und Hans Tropsch entwickeltes großtechnisches Verfahren zur Umwandlung von Synthesegas (CO/H₂) in flüssige Kohlenwasserstoffe. Beim Methanol-To-Gasoline-Verfahren (MTG) entsteht zunächst Methanol als Zwischenprodukt. Die gewünschten BTL-Kraft-

stoffe mit entweder Ottokraftstoff- oder Diesellokstoff-Eigenschaften lassen sich durch „Verschneiden“ der verschiedenen erzeugten Kohlenwasserstofffraktionen designen.

Zu den entwickelten Herstellungsverfahren von BTL-Kraftstoffen liegen bisher noch keine belastbaren Energiebilanzen vor. Auch die Ökobilanz steht noch aus. Nach Angaben der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. gehen Schätzungen davon aus, dass auf einem Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche umgerechnet etwa 4 000 l BTL-Kraftstoffe erzeugt werden können.

Bioethanol und Diesohol

Bioethanol kann – in Grenzen – Benzin- und Superkraftstoffe ersetzen: entweder als direkte Beimischung

von Bioethanol zum fossilen Kraftstoff (nach gesetzlicher Vorgabe max. 5%) entsprechend der Kraftstoffnorm für Ottokraftstoffe DIN EN 228 oder als Additiv in Form von Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether (ETBE, max. 15%). ETBE ist eine chemische Verbindung aus Bioethanol und Isobuten, einem Nebenprodukt der Kraftstoffherstellung aus fossilen Energieträgern. Es erhöht die Oktanzahl und soll zunehmend das bisher verwendete, aber gesundheitsgefährdende Antiklopffmittel Methyl-Tertiär-Butyl-Ether (MTBE) ersetzen.

Obwohl der Markt für Diesellokstoffe stetig wächst, ist eine Beimischung von Bioethanol zum „Diesohol“ noch nicht bis an die Zapfsäulen vorgedrungen. Bioethanol besitzt eine höhere Oktanzahl als fossile Ottokraftstoffe und verbessert damit deren Klopfestigkeit und Qualität. Allerdings hat Bioethanol einen um etwa 30% geringeren Energieinhalt.

Eine weitere Option bieten Flexible-Fuel-Vehicles (FFV), die Kraftstoffmischungen mit einem Anteil von bis zu 85% Ethanol (E 85) vertragen und beispielsweise in Brasilien bereits seit längerem im Einsatz sind.

Bioethanol entsteht bei der Vergärung von Zucker durch Hefepilze oder andere Ethanol produzierende Mikroorganismen. Obwohl sich prinzipiell alle zucker-, stärke- und cellulose- bzw. lignocellulosehaltigen Pflanzen zur Herstellung von Bioethanol eignen, dienen momentan weltweit hauptsächlich Zuckerrohr und Mais, vor allem in Brasilien und den USA, als Ausgangsbasis. Brasilien ist der



Treibstoffart	Verwendeter Rohstoff	Jahresertrag je Hektar	Kraftstoff Äquivalent	Marktpreis	CO ₂ -Minderung	Technische Hinweise
Pflanzenöl	Rapsöl, Sonnenblumenöl	ca. 1 300 l/ha	1 l Rapsöl ersetzt ca. 0,96 l Diesel	0,55 - 0,665 €/l (Stand 11/2004)	> 80% im Vergleich zu Diesel	Umrüstung des Motors erforderlich
Biodiesel	Rapsöl und andere Pflanzenöle	ca. 1 300 l/ha	1 l Biodiesel ersetzt ca. 0,91 l Diesel	0,75 - 0,85 €/l (Stand 11/2004)	ca. 70% im Vergleich zu Diesel	Freigabe des Herstellers für den Einsatz in Reinform nötig; in Mischungen bis 5% ohne Motoranpassung einsetzbar
Synthetische Biokraftstoffe (BTL-Kraftstoffe)	Energiepflanzen und Holz	ca. 4 050 l/ha (berechneter Wert)	1 l BTL-Kraftstoff ersetzt ca. 0,93 l Diesel (berechneter Wert)	0,50 - 0,70 €/l (Herstellungskosten)	> 90% im Vergleich zu Diesel (berechneter Wert)	
Bioethanol	Getreide, Zucker	2 500 l/ha auf Grundlage von Getreide	1 l Ethanol ersetzt ca. 0,66 l Benzin	ca. 0,50 €/l	ca. 30% im Vergleich zu Ottokraftstoff	Beimischung in Ottokraftstoff bis 5% ohne Probleme; Flexible-Fuel-Vehicles (FFV) ermöglichen Beimischungen bis 85%

Charakteristische Kenndaten verschiedener regenerativer Treibstoffe.

weltgrößte Hersteller von Bioethanol und nutzt dabei nur 5,6 Mio. Hektar der 320 Mio. Hektar zur Verfügung stehenden landwirtschaftlichen Nutzfläche für den Zuckerrohranbau. Etwa 400 Konversionsanlagen stellen dort pro Jahr circa 18 Mio. m³ Ethanol her. Deutschland nutzt vor allem Zuckerrüben, Weizen und Roggen als Rohstoffe für die Ethanolherzeugung. Im Jahr 2003 wurden in Deutschland etwa 280 000 m³ Ethanol als Agrar- und Synthesekraftstoff erzeugt.

Nicht nur Stroh

Neben Zuckerrohr, Mais, Weizen und Roggen bieten Rohstoffe auf der Basis von Lignocellulose (LCB, beispielsweise Ganzpflanzen) und landwirtschaftliche Reststoffe sowie Ab-

fallstoffe eine interessante Alternative als Bioethanolquelle. Lignocellulose kommt überall und in großen Mengen vor und ist eine nahezu unerschöpfliche regenerative Energiequelle für die Produktion von Bioethanol. Damit könnten Brennereien neben den auf Stilllegungsflächen produzierten schnell wachsenden Pflanzen wie beispielsweise Miscanthus („Elefanten- oder Chinagrass“) auch landwirtschaftliche Nebenprodukte oder Grüngut nutzen und somit die Rohstoff- und Erzeugungskosten reduzieren – eine potenzielle zusätzliche Einnahmequelle nachdem die Auslastung nach der Reform des Branntweinmonopols seit 1999 drastisch sank. In Bayern fallen jährlich etwa 8 Mio. m³ landwirtschaftlich nicht genutztes Grüngut

vorwiegend aus Brachflächen an. Die zur Produktion von Bioethanol eingesetzten Rohstoffe wie Mais oder verschiedene Getreidesorten lassen sich zudem nicht nur als Korn, sondern auch als Ganzpflanzen und damit zu niedrigeren Gestehungskosten einsetzen. Das ATZ Entwicklungszentrum arbeitet zusammen mit dem Lehrstuhl für Technologie Biogener Rohstoffe, TU München, bereits seit mehreren Jahren an einem Verfahren zur dezentralen Erzeugung von Bioethanol aus Lignocellulose, aktuell in einer landwirtschaftlichen Brennerei in der Oberpfalz.

Forschen für die Zukunft?

Regenerative Flüssigtreibstoffe bieten eine nachhaltige Alternative zu den fossilen Kraftstoffen. Trotzdem

Dr. Andrea Spangenberg (Jahrgang 1967) ist Geschäftsführerin des Wissenschaftszentrums Straubing im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe und leitet den Bereich Strategien und Anwendung von erneuerbaren Energien.

Dr. Stephan Prechtl (Jahrgang 1965) ist Abteilungsleiter Biologische Verfahrenstechnik am ATZ Entwicklungszentrum, Sulzbach-Rosenberg. Arbeitsschwerpunkte sind anaerobe Verfahren zur Abfall- und Abwasserbehandlung, die energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe sowie die mikrobiologische Biogasreinigung.

Dr. Doris Schieder (Jahrgang 1965) ist Leiterin der Abteilung Biologische Verfahren am Lehrstuhl für Technologie Biogener Rohstoffe der TU München. Ihr Forschungsgebiet umfasst den Aufschluss und die Nutzung cellulosehaltiger Biomasse sowie die Produktion von flüssigen Biokraftstoffen und Biogas.

Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich (Jahrgang 1957) ist Sprecher des Bayerischen Forschungsverbands für Abfallforschung und Reststoffverwertung (BayFORREST) und Vorstandsmitglied bei abayfor. Er hat den Lehrstuhl für Technologie Biogener Rohstoffe an der TU München inne und ist Vorstandsvorsitzender des ATZ Entwicklungszentrums in Sulzbach-Rosenberg. Sein Forschungsgebiet umfasst die stoffliche und energetische Nutzung von Biomasse und Abfällen.

lässt sich der horrende Bedarf an Otto- und Dieseldieselkraftstoff weder jetzt noch künftig durch regenerative Flüssigtreibstoffe vollständig decken – zu dicht sind die Länder Mitteleuropas besiedelt. Bis 2020 rechnen die Experten aber mit einem Anteil von bis zu 25% der in Deutschland produzierten regenerativen Treibstoffe an der gesamten Kraftstoffversorgung. Bis dahin muss die Wissenschaft noch große Herausforderungen bestehen:

Wie können biogene Reststoffe effizient verwertet werden? Diese Frage beschäftigt auch den Lehrstuhl für Technologie Biogener Rohstoffe am Wissenschaftszentrum Straubing. Ab 2007 forschen dort acht Lehrstühle an Fragen der energetischen und stofflichen Nutzung sowie im Bereich Marketing und Management von nachwachsenden Rohstoffen. Zusammen mit dem ATZ-Entwicklungszentrum in Sulzbach-Rosenberg entwickeln die Wissenschaftler Verfahren und Pilotanlagen, zum Beispiel eine Anlage, die den Klärschlamm von über 100 000 Einwohnern thermisch verwertet und damit zugleich Hunderte Haushalte mit Strom versorgt.

Biodiesel und Pflanzenöl erfüllen bisher die neuen Abgasnormen EU IV (ab 2005) und EU V (ab 2008) zwar bei der CO₂-Emission, halten aber die NO_x-Grenzwerte noch nicht ein. Hier besteht noch Forschungsbedarf, um die Schadstoffe zu entfernen.

Welcher Standort eignet sich für welchen Rohstoff? Wie lassen sich bei der regenerativen Energieerzeugung und -nutzung die Ressourcen

schonen und gleichzeitig der Wirkungsgrad steigern? Neue Erkenntnisse aus der Land- und Forstwirtschaft sowie innovative und bessere Technologien sollen bayerischen Unternehmen einen Vorsprung auf dem Weltmarkt der regenerativen Energietechnik verschaffen. Effizientere Diesel- und Ottomotoren oder neue Motorenkonzepte wie Hybridantriebe müssen helfen, den Bedarf an fossilen Kraftstoffen zu senken.

Wie gut sich die Biokraftstoffe durchsetzen entscheidet ihre Wirtschaftlichkeit. Je preiswerter sie werden, umso eher ersetzen sie das Erdöl. Die bestehenden und geplanten Großanlagen zur Biodiesel- und Bioethanol-Kraftstoffproduktion leisten bereits heute einen wichtigen Beitrag zur schrittweisen Substitution fossiler Kraftstoffe. Für die BTL-Kraftstoff-Produktion fehlen jedoch noch rentable Verfahren.

Ländlich strukturierte Räume betreiben bereits jetzt dezentrale Anlagen zur Herstellung regenerativer Flüssigkraftstoffe. Ein Großteil der Brennereien könnte dadurch eigene Tankstellen betreiben und teure Zwischenhändler entfallen: Die Wertschöpfung bleibt vollständig in der Region.

Dennoch muss privat wie in der technischen Entwicklung neben der effizienten Energieherstellung und -verwendung das Motto lauten: Treibstoff und Energie sparen!

DAMIT WEITER STROM AUS DER STECKDOSE KOMMT



Hans Roth, Ulrich Wagner, Stefan Richter und Serafin von Roon

Bisher bestimmten der gut prognostizierbare Energiebedarf der Verbraucher (die so genannte Verbraucherlast) sowie mögliche Totalausfälle von Kraftwerken und Netzstörungen die elektrische Leistung, die ein Kraftwerkspark decken und vorhalten muss. Den überwiegenden Teil der Energieerzeugung tragen thermische Kraftwerke und zuverlässig vorhersagbare Erzeugungsmengen aus Wasserkraftwerken bei; dezentrale Systeme wie Blockheizkraftwerke stellen nur einen geringen Teil der Energie bereit. Zuverlässigkeit, maximaler Wirkungsgrad bei Nennlast und eine der Netzstruktur angepasste Leistungsgröße sind die technischen Anforderungen an den Kraftwerksverbund. Durch rechtliche und politische Vorgaben nahm seit Mitte der neunziger Jahre die Stromeinspeisung aus Wasserkraft, Geothermie, Fotovoltaik, Biomassenutzung und Windkraftanlagen (WEA) stetig zu. Insbesondere die Windenergienutzung erlebte in Deutschland einen dynamischen Aufschwung: 2004 stammten rund zehn Prozent der gesamten Stromerzeugung aus regenerativen Quellen, wobei die Windenergie knapp die Hälfte beitrug. Dadurch entsteht für die Energieversorger eine schwierig zu kalkulierende, so genannte fluktuierende Einspeisung, denn der Wind weht weder auf Befehl noch immer gleich.

Viele Versorgungsunternehmen haben sich seit der Liberalisierung des deutschen Strommarktes und dem unbestimmten politischen Umfeld beim Kraftwerksneubau zurückgehalten, weil die Strompreise durch den Wettbewerb zunächst fielen. Jetzt besteht ein erheblicher Investitionsbedarf. Ohne Investitionen würde die heute installierte Kraftwerksleistung bis zum Jahr 2020 um etwa 40 GW_{el} abnehmen, weil viele fossil befeuerte Kraftwerke aus den 60er und 70er Jahren altersbedingt stillgelegt und Kernkraftwerke durch das Gesetz zum Ausstieg aus der Kernenergie vom Netz genommen werden (siehe Abb. 1).

Die Kapazität bei den Wasserkraftwerken bleibt aufgrund ihrer langen Lebensdauer konstant; die installier-

te Leistung der Kohlekraftwerke hingegen sinkt altersbedingt um rund 35 % und der Bestand an Windenergieanlagen (WEA) von derzeit 16,5 GW wäre komplett abgebaut, weil sie nur eine Lebensdauer von rund 20 Jahren haben. Um eine sichere Energieversorgung in Deutschland auch im Jahr 2025 zu gewährleisten, sind also erhebliche Investitionen erforderlich.

Baden-Württemberg und Bayern treffen die politischen Vorgaben besonders hart, weil sie derzeit 60 % ihres Bedarfs an elektrischer Energie aus Kernenergie erzeugen. Sie haben die Forschungsinitiative „Kraftwerke des 21. Jahrhunderts“ (KW 21) ins Leben gerufen, um die Energieforschung zu vernetzen. 20 Forschergruppen arbeiten zusammen mit Kraftwerksbetreibern, -bauern und

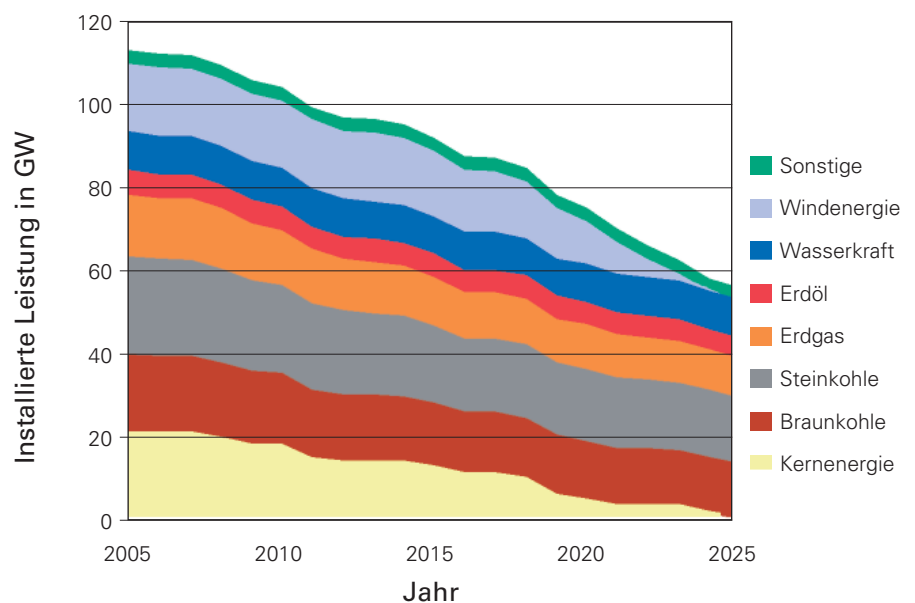
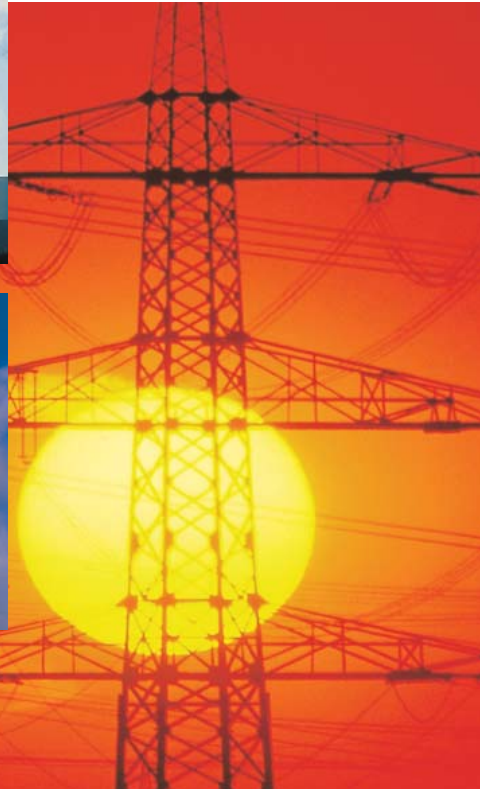


Abb. 1: Entwicklung der installierten Kraftwerksleistung in Deutschland ohne Neuinvestitionen. (Quellen: IfE, FfE, VDEW)

Damit weiter Strom aus der Steckdose kommt



Die zunehmende Ergänzung der zentralen Energieversorgung durch eine wachsende Zahl dezentraler Einspeiser erfordert schnell regelbare Kraftwerkskapazitäten, denn Sonne und Wind stehen nicht kontinuierlich zur Verfügung. (Fotos: MEV)

Zulieferern an neuen Konzepten für effiziente, kostengünstige und umweltfreundliche Kraftwerke und für eine gesicherte Energieversorgung.

Energieversorgung – ein komplexes System

Energieversorger müssen heute eine Fülle von Gesetzen und Verordnungen beachten. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen: Hat ein privater Verbraucher ein Blockheizkraftwerk installiert, produziert dieses nicht nur die benötigte Wärme, sondern zeitgleich rund 50 % Strom (gemessen an der thermischen Leistung). Findet sich im Gebäude kein Abnehmer für den produzierten Strom, wird dieser ins öffentliche Stromnetz eingespeist. Das „Gesetz für den Vorrang

erneuerbarer Energien“ (kurz: Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG) verpflichtet die Energieversorger, überschüssige elektrische Energie der privaten Betreiber durch Fotovoltaikanlagen, Windräder, Biomasse etc. in das allgemeine Stromnetz aufzunehmen und zu vergüten.

Für den Energieversorger, der jederzeit Strom in der gewünschten Höhe zur Verfügung stellen muss, haben diese zahlreichen, fluktuierenden Einspeisequellen weit reichende technische Konsequenzen. Je mehr schwer prognostizierbare Kleinerzeuger im Netz sind, umso mehr schnell regelbare Kraftwerksleistung benötigt er, zum Beispiel aus Gasturbinenkraftwerken. Die Regelleistung muss bei einem unerwarteten Aus-

fall schnell Strom liefern. Andererseits sind Kraftwerke gezwungen, sofort die Energieproduktion zu reduzieren, wenn die privaten Betreiber oder Windparks mehr Energie ins Netz einspeisen als erwartet. Diese Situation könnte im Extremfall Energieversorger sogar dazu zwingen, beispielsweise ein hochrentables Kernkraftwerk zurückzufahren. Zusätzlich wird das Energieversorgungssystem durch die zunehmende europäische Vernetzung der Energieversorger immer komplexer.

Schwankende Stromerzeugung bei der Windenergie

Kurzfristige Leistungsschwankungen durch unbeständige Windgeschwindigkeit oder Ausfälle einzelner Wind-



Technische Parameter		Ökonomische Parameter	Ökologische Parameter
Wirkungsgrad über Leistung	Leistungsgradient	Spezifische Stromgestehungskosten	Spezifische CO ₂ -Emission
Typische Blockgröße Stromkennzahl ...	Regelbarer Leistungsbereich Tot- und Verzugszeiten Anfahrzeit Anfahrtdynamik ...	Investitionskosten Verbrauchsgebundene Kosten Betriebskosten Nutzungsdauer ...	NO _x -, SO ₂ -, VOC-, Staub-Emissionen Spezifische KEA ...
Dampfparameter Turbinen-Eintrittstemperatur Eigenverbrauch Temperaturniveau Abwärme ...	Speicherwärme im Kraftwerk Ausköhlkonstanten Wahrscheinlichkeit eines Startversagens ...	Stillstandskosten Revisionszyklen Planungs- und Bauzeit Flächenbedarf ...	Reststoffe Abfälle ...

Tabelle 1: Kraftwerksparameter unterschiedlicher Art und Relevanz.

räder eines flächig verteilten Windrad-Kollektivs können größtenteils ausgeglichen werden: Bei vielen Anlagen mit jeweils kleiner Leistung, die zudem auch noch großräumig über eine Region verteilt sind, spielen kurzfristige Leistungsschwankungen keine große Rolle.

Schwierig wird die Prognose für die Energieerzeugung durch Windparks im Zeitbereich von 15 Minuten bis etwa vier Stunden. Schnell regelbare Kraftwerke müssen die auftretenden Leistungsdefizite oder -überschüsse ausgleichen. Halten Leistungsdefizite längere Zeit an, greifen die Energieversorger aus Kostengründen auf betriebsbereite thermische Kraftwerke als Dauerreserve zurück.

Planung des Kraftwerksparks

Durch die fluktuierenden Einspeisungen entsteht der bereits erwähnte Mehrbedarf an Regelleistung. Mehr (Regel-)Kraftwerke mit geeigneter Regelfähigkeit, Leistungsgradient und Anfahrverhalten müssen das Defizit auffüllen. Die dynamischen Parameter eines Kraftwerkes bei der Planung ergeben sich aus der Abwägung von Wirkungsgrad, Lastgradient und Kosten (s. Tabelle 1).

Bei allen Überlegungen steht die Sicherheit der allgemeinen Stromversorgung an erster Stelle. Kraftwerke mit hohem Wirkungsgrad über einen möglichst großen Leistungsbereich und Anlagen mit kurzen Anfahrzeiten bei geringen Anfahrtsverlusten sind

besonders geeignet, Schwankungen vor allem der Windenergiepark-Leistung im Stundenbereich auszugleichen.

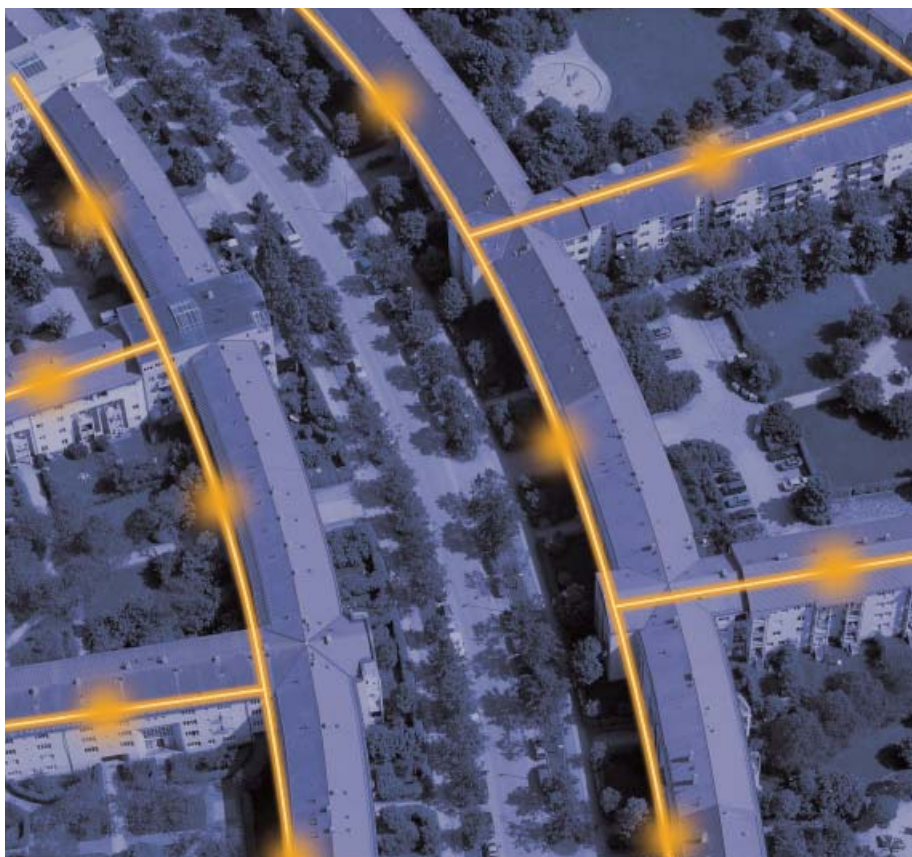
Simulationen: Klarheit im komplexen System

Viele Fragen treiben die Forscher am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München und bei der Forschungsstelle Energiewirtschaft um: „Welche Auswirkungen hat eine dezentrale Stromeinspeisung auf die Zuverlässigkeit der Stromversorgung? Unter welchen Bedingungen ist eine vorzeitige Kraftwerkserneuerung zur CO₂-Reduzierung rentabel? Welche Rolle wird die Kernenergie künftig energiewirtschaftlich spielen? Wie

Damit weiter Strom aus der Steckdose kommt

kann die Elektrizitätsversorgung auch langfristig zuverlässig organisiert werden?“ Technik- und Kostenmodellierung sind die Kernbestandteile des Simulationsmodells ifeon, mit dem sie – ausgehend vom aktuellen Bestand – die Entwicklung des zukünftigen Kraftwerksparks betriebswirtschaftlich optimiert und kraftwerksscharf für verschiedene Szenarien bis zum Jahr 2040 berechnen. Die Grundlage bildet eine Datenbank mit ökonomischen und technischen Daten von rund 350 thermischen und hydraulischen Kraftwerksanlagen. Sie wird ständig aktualisiert und erweitert.

Die Wissenschaftler arbeiten mit Szenarien und geben verschiedene Rahmenbedingungen für die Entwicklung des Kraftwerksparks und den Kraftwerksbetrieb vor. Einflussgrößen sind zum Beispiel die Höhe der dezentralen Stromeinspeisung durch private Energieanlagenbetreiber, die dadurch ersetzbare Kraftwerksleistung und die Reserveleistung, die der Energieversorger zum Abfedern von unerwarteten Bedarfs- und Einspeisungsspitzen oder Überlasten vorhalten muss. Eine nicht zu vernachlässigende ökonomische Rolle spielt natürlich auch der größere Wartungs- und Instandsetzungsaufwand durch erhöhten Verschleiß bei den Reservekraftwerken. Die zeitlich hoch aufgelöste Simulation des Kraftwerkseinsatzes zeigt die Auswirkungen fluktuierender Einspeisung auf die Betriebsweise der konventionellen Kraftwerke und deren Veränderung. So führt zum Beispiel eine hohe Windstromeinspeisung zu



Die Vision: Das vernetzte Kraftwerk durch Kraft-Wärmekopplung.

einer geringeren Ausnutzungsdauer bei anderen Kraftwerken, vor allem bei Steinkohle- und Gaskraftwerken.

Ziel der Untersuchungen ist es, die Kosten, die Brennstoffmenge, die Emissionen und die erreichbare Systemzuverlässigkeit der zukünftigen Stromerzeugung zu analysieren und zu bewerten. Aus den Ergebnissen der einzelnen Szenarien lässt sich ableiten, unter welchen Bedingungen definierte Ziele, beispielsweise der CO₂-Ausstoß oder der Strompreis, erreicht werden und welcher Parameter welchen Einfluss auf das System ausübt.

Strom und Wärme aus dem eigenen Kraftwerk

Strom und Wärme entstehen aus den gleichen Energieträgern, aber oft in getrennten Prozessen. Haushalte und Gewerbe beziehen Strom meist von einem Energieversorgungsunternehmen und erzeugen die Wärme zum Heizen von Räumen mit eigenen Heizkesseln im Gebäude. Energetisch betrachtet, ist die Kopplung

der Erzeugung von Elektrizität und Wärme günstig, weil die Abwärme in einem Kraftwerk für die Wärmeerzeugung genutzt werden kann.

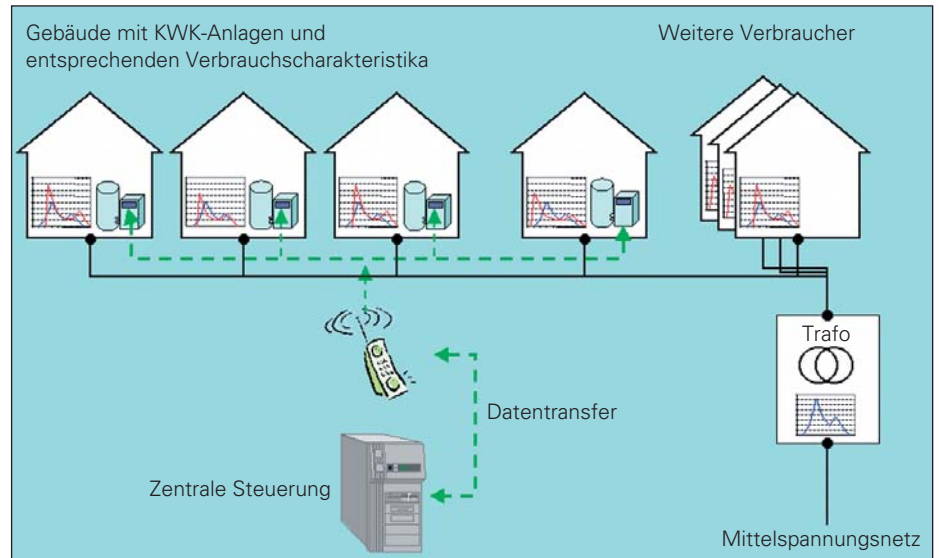
Eine mögliche Option, die auch heute schon vereinzelt zur Anwendung kommt, sind eigene Heizkraftwerke für Wohngebäude und Einfamilienhäuser: Heizkraftwerke im „Kleinformat“ mit geringer Leistung erzeugen Strom und verwenden die entstehende Abwärme der Turbinen oder Motoren als Wärmequelle zum Heizen (Kraft-Wärme-Kopplung, KWK). Die Kraft-Wärme-Kopplung erhöht den Wirkungsgrad einer Anlage, weil sie die eingesetzten Brennstoffe besser ausnutzt als bei der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme. Sie belastet auch die Umwelt weniger, da im Vergleich zu herkömmlichen Kraftwerken und Heizungsanlagen die CO₂-Emissionen und die Emissionen anderer Schadstoffe wie Schwefeldioxid und Stickoxiden deutlich gesenkt werden kann. Für die Gebäudeenergieversorgung kommen grundsätzlich Block-



heizkraftwerke mit herkömmlichen Gas- oder Dieselmotoren, Mikrogas-turbinen, Brennstoffzellen, Stirling-Motoren und weitere, in der Ent-wicklung steckende Technologien in Frage. Wesentlich für den ökonomi-schen Einsatz von KWK-Systemen ist die vollständige und sinnvolle Nut-zung der erzeugten Wärme im Ge-bäude.

Virtuelle Kraftwerke

Konsequent weitergedacht, ließen sich viele kleine einzelne Gebäude-Kraftwerke zu einem dezentralen, virtuellen Großkraftwerk koppeln. Die Anlagen wären untereinander vernetzt und würden von außen per Computer gesteuert. Damit entsteht allerdings ein Widerspruch zwischen den Anforderungen an die Einzelanlage und dem Versorgungsauftrag ei-nes Energieanbieters: Die Einzelanlage ist so dimensioniert, dass sie nur



Aufbau eines virtuellen Kraftwerks. (Quelle: wiba-Studie 3)

so viel Wärme produziert wie das Gebäude und seine Bewohner ver-brauchen. Das Energieunternehmen ist verpflichtet, die Energieversor-gung großräumig sicherzustellen. Dazu benötigt es aber den Zugriff auf die Einzelanlagen, es muss sie also von außen für den Betrieb des virtu-ellen Kraftwerks steuern können.

Trotzdem schaffen auch viele kleine Anlagen im Verbund keine Sicherheit bei der Stromversorgung, weil die Leistungsabgabe und -aufnahme zu stark schwankt. Der KWK-Verbund muss deshalb mit herkömmlichen Kraftwerken zu einem Gesamtsystem kombiniert werden.

Ob und wie KWK-Systeme im Ver-bund als virtuelles Kraftwerk funk-tionieren können, ist derzeit noch ein Forschungsfeld. Das System ist komplex, denn die Zahl der Einfluss-größen ist durch die unterschiedli-chen Gebäudegrößen (vom Einfamilienhaus bis zum Bürogebäude), die zeitabhängigen Nutzungsunterschie-de (Produktionsanlage oder Seni-orenheim) und die Interaktion mit an-deren KWK-Anlagen sehr groß.

Auf dem Prüfstand am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwen-dungstechnik der TU München tes-



Prüfstand am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München. (Foto: IfE)

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner (Jahrgang 1955)

ist Inhaber des Lehrstuhls für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik an der TU München und wissenschaftlicher Leiter der Forschungsstelle für Energiewirtschaft.

In der Forschungsinitiative Kraftwerke des 21. Jahrhunderts (KW 21) beschäftigt er sich mit der Technik- und Kostenmodellierung.

Dipl.-Ing. Hans Roth (Jahrgang 1977) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für

Energiewirtschaft und Anwendungstechnik.

Im Rahmen von KW 21 beschäftigt er sich mit der Struktur des zukünftigen Kraftwerksparks und der Zuverlässigkeit der Stromversorgung.

Dipl.-Ing. Stefan Richter (Jahrgang 1975) ist

Wissenschaftler an der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. in München. Neben Projekten zur zukünftigen Kraftwerkstechnik ist er im Bereich Wasserstofftechnologie und regenerative Energienutzung tätig.

Dipl.-Ing. Serafin von Roon (Jahrgang 1975)

arbeitet an der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. auf den Gebieten innovative KWK-Anlagen, Strukturanalysen und Prognosen sowie am Thema Gebäudetechnik.

ten die Wissenschaftler unterschiedliche Anforderungen der Gebäude und Regel- und Steuerungsstrategien für den Einsatz des KWK als Knoten im Stromversorgungsnetz unter realitätsnahen Bedingungen. Die Ergebnisse gehen in die Simulation verschiedener Varianten von virtuellen Kraftwerken ein und ergeben so eine belastbare Grundlage für die energiewirtschaftliche Bewertung von KWK-Clustern als virtuelle Kraftwerke. In die Bewertung fließen sowohl Umweltfaktoren wie die Energieausnutzung und Schadstoffemission ein, als auch ökonomische Überlegungen zu den Kosten für ein virtuelles Kraftwerk gegenüber konventionellen Technologien oder die Einsparpotenziale beim Netzausbau.

Kluge Entscheidung trotz ungewisser Basis

Die deutsche Energiewirtschaft steht vor einer großen Herausforderung. Niemand kann genau vorhersagen, wie sich die Brennstoffpreise künftig entwickeln werden, welche politischen Vorgaben zum Klimaschutz sowie zum Ausbau der erneuerbaren Energien auf uns zukommen. Trotz unsicherer Rahmen-

bedingungen müssen die Energieversorger in den nächsten Jahren langfristige Entscheidungen treffen ohne ihre Wettbewerbsfähigkeit im europäischen Energiemarkt zu gefährden. Moderne Energieforschung, die neue technische Entwicklungen im europäischen Kontext einbezieht, hilft überlegte und nachhaltige Entscheidungen zu treffen.

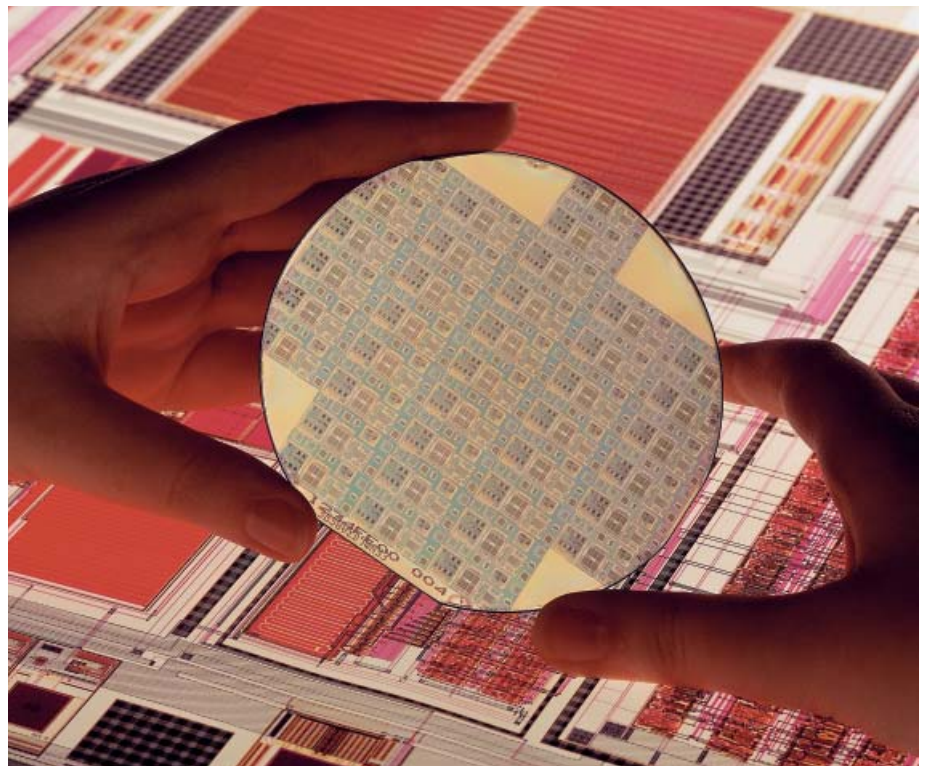
STEMPEL FÜR MIKROCHIPS

Lothar Frey und Bernd Fischer

Ob Handy, Computer oder Digitalkamera – die Anwendungen der Mikro- und Nanoelektronik sind aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken. Der Markt gibt die Entwicklung vor, und die heißt: Immer kleiner und leistungsfähiger und auf keinen Fall teurer als vorher! Der Verbraucher wünscht sich zwar immer mehr Komfort und Leistung, ahnt aber nicht, vor welche Herausforderungen er damit die Entwickler stellt. Die immer kleineren Abmessungen gehen natürlich einher mit einem immer komplexeren Innenleben der Wundergeräte, denn oft müssen Hunderte Millionen von Bauelementen auf einem Chip Platz finden. Wo die Kosten steigen und selbst Tricks auf Dauer versagen, greifen auch Wissenschaftler gerne auf Altbewährtes zurück: Die Nanoimprint-Technologie überträgt ein altbekanntes Prägeverfahren in die Zwergenwelt der Chips und Transistoren mit einer wirtschaftlich attraktiven Perspektive.

Schnelle, effektive Verfahren zur Herstellung kleinster Strukturen sind die Voraussetzung für Nanotechnologie in der Elektronik. Optische Lithographiesysteme nutzen die so genannten Excimer-Laser. Diese arbeiten mit einer Lichtwellenlänge von 193 nm (Ultraviolettpektrum). Über aufwändige optische Aufbauten und Linsensysteme produzieren die Excimer-Laser auch kommerzielle integrierte Schaltungen (ICs) mit einer minimalen Strukturgröße von 65 nm. In Zukunft werden die Strukturen noch kleiner (45 nm, 32 nm, 22 nm) und das Rennen um die beste Herstellungsmethode ist noch offen, zusammengefasst unter dem Begriff „Next Generation Lithography“ (NGL). Ein Kandidat

für die NGL ist die „Extreme Ultraviolet“ (EUV)-Lithografie, die mit einer Wellenlänge von 13 nm arbeitet. Die meisten Materialien absorbieren dieses sehr kurzwellige Licht vollständig, also auch die herkömmlichen Linsen. Deshalb ist für EUV-Lithografie eine spezielle Spiegeloptik erforderlich und die erheblichen Anforderungen an Lichtquelle, Optik und Masken führen zu extrem hohen Kosten. Die zweite Möglichkeit, die Elektronenstrahl-Lithografie, ist wegen ihres seriellen Schreibvorgangs und des dadurch zu geringen Durchsatzes für die Massenproduktion eher ungeeignet. Der Bedarf für eine schnelle und kostengünstige Nanostrukturierungstechnik steigt.



Mikrochips mit Nanostrukturen auf einer Siliziumscheibe.
(Foto: MEV)

Zurück in die Zukunft

Die Prägetechnik, deren Grundprinzip schon aus dem Altertum bekannt ist, könnte auch zukünftigen Anforderungen im Nanobereich gerecht werden. Wissenschaftler des Fraunhofer IISB in Erlangen arbeiten seit Mitte 2004 gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente (LEB) an der Universität Erlangen-Nürnberg und der Garching-Firma SÜSS MicroTec Lithography GmbH im Bayerischen Forschungsverbund für Nanoelektronik (FORNEL) intensiv an der Nanoimprint-Technologie, um eine kostengünstige Nanostrukturierung mit hohem Durchsatz zu erreichen.

Bei der Präge- oder Imprint-Lithografie entsteht die Struktur durch eine Prägeform, die in ein viskoses Polymer gedrückt wird (Abb. 1). Beim so genannten „Hot Embossing“-Verfahren ist diese Polymerschicht zunächst heiß und fließfähig

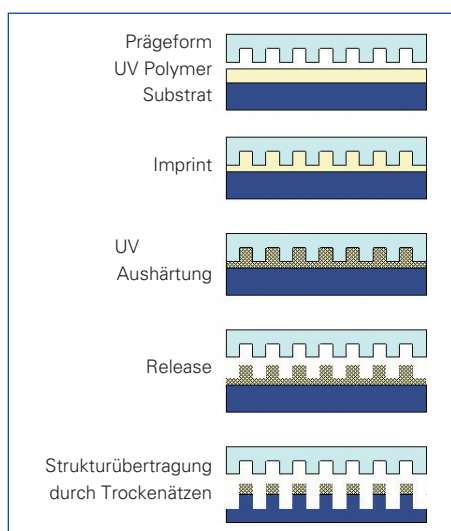


Abb. 1: Prinzip des Nanoimprint-Verfahrens mit UV-Aushärtung („Cold Embossing“).
(Quelle: FORNEL)

und zeigt nach dem Abkühlen die übertragene Struktur – wie ein Siegelring, der in heißes Siegelwachs gedrückt wurde. Der Temperaturwechsel durch das notwendige Aufheizen und Abkühlen schafft jedoch Probleme für bereits vorhandene benachbarte Strukturen und erschwert die präzise Justage. Das so genannte „Cold Embossing“-Verfahren dreht den Spieß um: Die Polymerschicht ist bei Raumtemperatur fließfähig und lichtempfindlich. Die Prägeform ist für UV-Licht transparent und kann ohne Störung benachbarter Strukturen genau eingepasst werden. Durch anschließende UV-Flutbelichtung härtet die Schicht an den transparenten Stellen aus und die Struktur ist damit „eingebrennt“. Diese Polymerschicht dient dann meist als Ätzmaske, um die Strukturen in ein Substrat zu übertragen.

Prägeformen aus Quarz ...

Imprint ist eine Abbildungstechnik, die die Strukturen des Stempels eins zu eins in das Substrat überträgt: Jeder Fehler im Stempel wirkt sich unmittelbar auf das Resultat aus! Ein perfekter Stempel ist deshalb die Basis für den erfolgreichen Einsatz der Imprint-Technik, die Wahl des richtigen Stempelmaterials entscheidend. Die Wissenschaftler am IISB testen deshalb Prägeformen aus Quarz, Siliziumcarbid (SiC) und flexible Prägeformen aus Polydimethylsiloxan (PDMS).

Quarz zeichnet sich gegenüber PDMS vor allem dadurch aus, dass er signifikant mechanisch und chemisch beständiger ist. Quarz ist des-

halb der Favorit im Bereich von Strukturgrößen unter 300 nm, trotz aufwändigerer Technologie. Mit Quarz-Prägeformen können die Forscher kleinste Strukturbreiten erzeugen, aber dieses Material stellt auch die größten Anforderungen an die Technologie.

Bei der optischen Lithografie oder, für Strukturen kleiner als 100 nm bei der Elektronenstrahl-Lithografie, entsteht die Struktur zunächst auf einer Fotolackschicht oder einem Elektronen empfindlichen Lack. Dieser belichtete Lack (Resist) überzieht eine dünne Metallschicht aus Chrom, die nicht nur Aufladungen durch die Elektronen reduziert, sondern später die eigentliche Ätzmaske für das Quarzsubstrat liefert. Ein konventioneller Ätzgang überträgt die Struktur des Resists in die 10 bis 30 nm dicke Metallschicht. Die strukturierte Chromschicht dient anschließend als Ätzmaske für die Herstellung der eigentlichen Prägeform (aus Quarz). Dabei ätzt ein Fluorplasma in einer geschlossenen Kammer das Quarzsubstrat an den offen liegenden Stellen. Besonders eingestellte Plasmabedingungen erlauben einen anisotropen Ätzangriff senkrecht zur Oberfläche, während die laterale Ätzung unterdrückt wird: Dies ist so aufwändig, dass die Wissenschaftler an einem Verfahren arbeiten, das die Strukturen mit Hilfe eines fokussierten Ionenstrahls (FIB) direkt in die Quarz-Prägeform schreibt. Der auf wenige Nanometer fokussierte Ionenstrahl rastert die zu ätzenden Flächen der Prägeform ab. Die Zugabe eines Ätzgases erhöht den Mate-

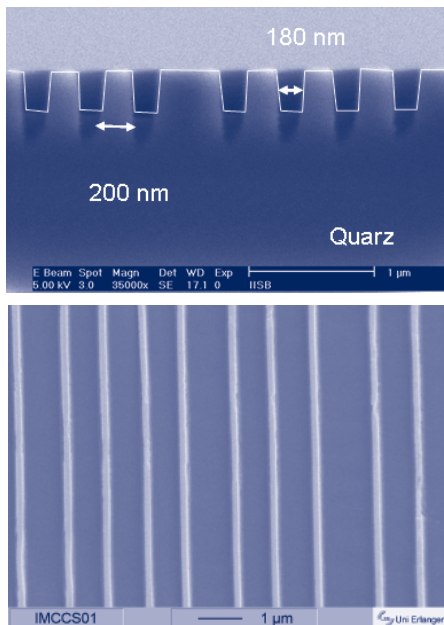


Abb. 2: Mittels fokussierter Ionenstrahlen erstellte Prägeform aus Quarz (oben) und damit geprägte Strukturen (180 nm breit) in der Fotopolymerschicht auf einer Siliziumscheibe (unten). (Quelle: FORNEL)

rialabtrag. Abbildung 2 oben zeigt einen mittels fokussierter Ionenstrahlen strukturierten Quarzstempel im Querschnitt. Die Strukturen haben eine Breite von 180 nm. Im unteren Teil von Abbildung 2 sind mit dieser Quarzform geprägte Linienstrukturen zu erkennen.

... und Kunststoff

Für Prägeformen aus dem gummiartigen PDMS erzeugen die Wissenschaftler zunächst eine Negativform in Silizium, die sie dann, nach einer geeigneten Behandlung der Siliziumoberfläche, beinahe beliebig oft abformen können. Abbildung 3 zeigt einen Silizium-Master und einen davon abgeformten PDMS-Stempel. Die Strukturgröße beträgt hier 1,2 µm. Die Stabilität der PDMS-Strukturen ist im Wesentlichen ausschlaggebend für die möglichen Strukturgrößen. Bei kleinen Strukturbreiten und großen Aspektverhältnissen (Verhältnis von Tiefe zu Breite) ist das Material zu „wabbelig“ und die PDMS-Strukturen kollabieren, das heißt sie berühren sich willkürlich und sind nur noch schwer voneinander zu trennen. Während des Prägevorgangs füllt das flüssige Polymer die Strukturen der Prägeformen voll-

ständig aus. Nach dem Aushärten muss es sich auch leicht davon trennen lassen. Dieser Vorgang erfordert eine geeignete Vorbehandlung der Prägeform: Sie erhält mittels eines Plasmaverfahrens oder einer Dampfphasenbeschichtung eine monomolekulare, teflonähnliche Schicht, die auch in tiefen Strukturen eine Trennung ermöglicht. Die Optimierung solcher „Release Layer“ ist ein besonders kritischer Punkt bei den hochdichten Strukturen.

Von der Forschung in die Praxis

Dass das Verfahren funktioniert, haben die Wissenschaftler grundsätzlich bewiesen. Zum industriellen Einsatz wird es aber nur kommen, wenn es gelingt, Zuverlässigkeit und

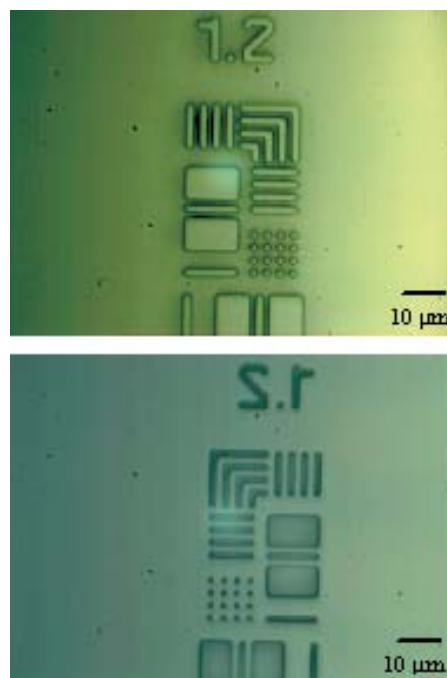


Abb. 3: Silizium-Masterform (oben) und abgeformte transparente PDMS-Prägeform (unten). (Quelle: FORNEL)

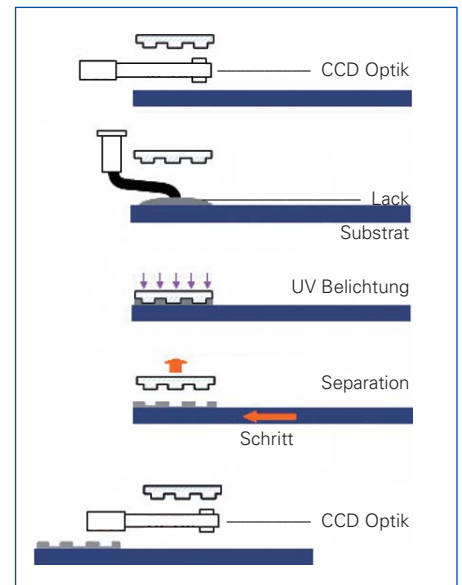


Abb. 4: Prinzip des „Step & Repeat“ Imprint-Prozesses. (Quelle: FORNEL)

Reproduzierbarkeit des Verfahrens zu erhöhen. Dazu gehört zum einen eine etablierte Technik für die Herstellung von geeigneten Prägeformen, die eine hohe Anzahl fehlerfreier Imprintvorgänge ermöglichen. Zum zweiten sind Imprintgeräte erforderlich, die reproduzierbar und mit ausreichendem Durchsatz prägen können. Die dazu nötige Maschine entwickeln die Verbundpartner aus Forschung und Industrie gemeinsam, einen Prototyp zeigen sie bereits auf Messen.

Der Imprintvorgang erfolgt im „Step and Repeat“ Modus; Abbildung 4 zeigt die Abfolge. Eine Prägeform mit Kantenlängen von bis zu 50 mm überträgt die Struktur schrittweise auf Substrate mit Durchmessern von bis zu 300 mm. Die Prägeform wird mittels optischer Verfahren zu bereits existierenden Strukturen justiert. Die Maschine bringt das Foto-

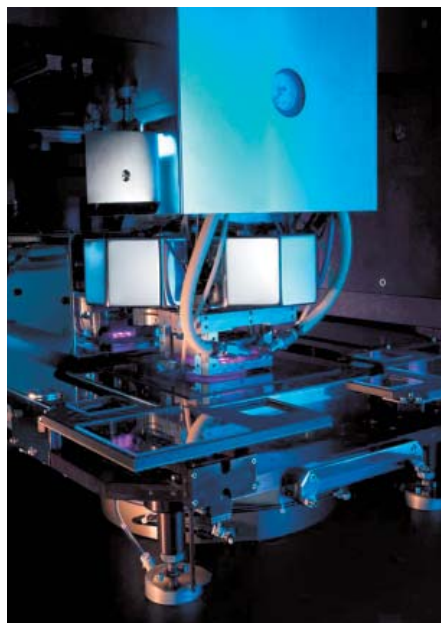
PD Dr. rer. nat. Lothar Frey (Jahrgang 1958) ist Akademischer Direktor am Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente der Universität Erlangen-Nürnberg und Leiter des Reinraumlabors der Universität. In Nebentätigkeit leitet er am Erlanger Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB) die Abteilung „Technologie“. Dr. Frey ist Wissenschaftler im Bayerischen Forschungsverbund für Nanoelektronik (FORNEL).

Dr.-Ing. Bernd Fischer (Jahrgang 1972) ist seit 2000 Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB) in Erlangen. Er ist zuständig für den Bereich Strategische Planung und betreut den 2004 ins Leben gerufenen Bayerischen Forschungsverbund für Nanoelektronik (FORNEL) als Geschäftsführer.

polymer auf. Es muss für die Strukturdichte und -größe optimiert sein und darf nur das zu prägende Feld überdecken, damit im Randbereich kein stark überhöhter Rand entsteht. Ein Prägekopf drückt die Prägeform mit einem optimierten Kraftverlauf in das Polymer, das auch kleinste Strukturen ausfüllen muss. Problematisch sind dabei luftgefüllte Hohlräume. Die Aushärtung erfolgt mit UV-Licht. Bei sehr kleinen Strukturen kommt es durch Beugungsvorgänge und stehende Wellen zu strukturabhängigen Intensitätsverteilungen, die bei der Belichtung berücksichtigt werden müssen. Ist der Aushärtvorgang abgeschlossen, so wird die Prägeform gelöst und der Vorgang im nächsten Feld fortgeführt. Abbildung 5 zeigt Prägekopf und Substratisch des neu entwickelten Imprintsystems der SÜSS MicroTec

Lithography GmbH während des UV-Aushärteschritts. Mit diesem System führen die Wissenschaftler von FORNEL Untersuchungen durch, um Nanoimprint als stabiles und marktaugliches technologisches Verfahren für die Nanostrukturierung elektronischer Bauelemente und Komponenten der Mikrosystemtechnik zu etablieren. Eine Erweiterung des Nanoimprint-Verfahrens zu einem Nanoprint-Verfahren, das heißt zum Drucken auf Nanoskala, ist in Vorbereitung. Damit lassen sich weitere Anwendungen im Bereich der Bioverfahrenstechnik erschließen, wie zum Beispiel das Drucken von Biosensoren für den Glucosenachweis.

Abb. 5:
Nanoimprint-Anlage
für Siliziumsubstrate
mit Durchmesser
bis 300 mm.
Der Prägekopf befindet
sich in der Position
des Prägens – Prozessschritt
UV-Aushärtung.
(Foto: SÜSS MicroTec
Lithography GmbH)



DIAMANT: ZU SCHADE FÜR DEN HALS

Stefan M. Rosiwal

Kristalliner Diamant ist seit Urzeiten ein begehrter Stoff: Sein hoher Wert beruht dabei auf den einzigartigen physikalisch-chemischen Eigenschaften und der Tatsache, dass die gefundenen Stücke selten und meist nur sehr klein sind. Die ersten Funde von „natürlichen“ Diamanten datieren aus dem 4. Jahrtausend v. Chr. in Indien und seitdem dienen sie weltweit als Sakral- oder Schmuckgegenstände. Daher gibt es in nahezu allen Kulturkreisen ein eigenständiges Wort für Diamant. Mit der Erfindung der künstlichen Diamantherstellung wurde ein alter Traum der Menschheit Wirklichkeit. Die Verwendung von Diamanten als einzigartigen Werkstoff für innovative Technologien ermöglicht jetzt ein ganz neu entwickeltes Herstellungsverfahren.

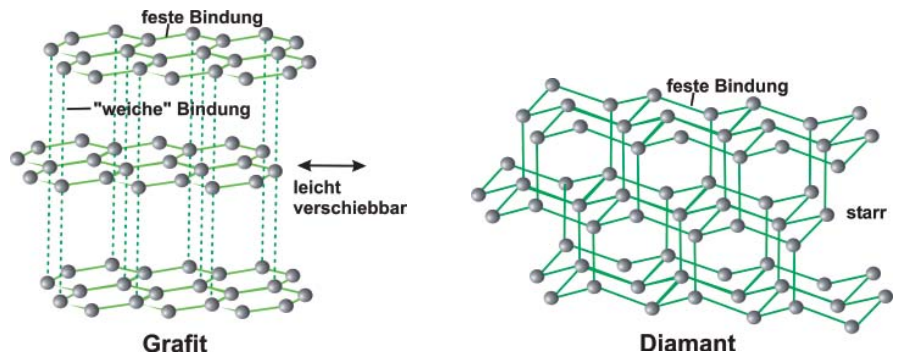


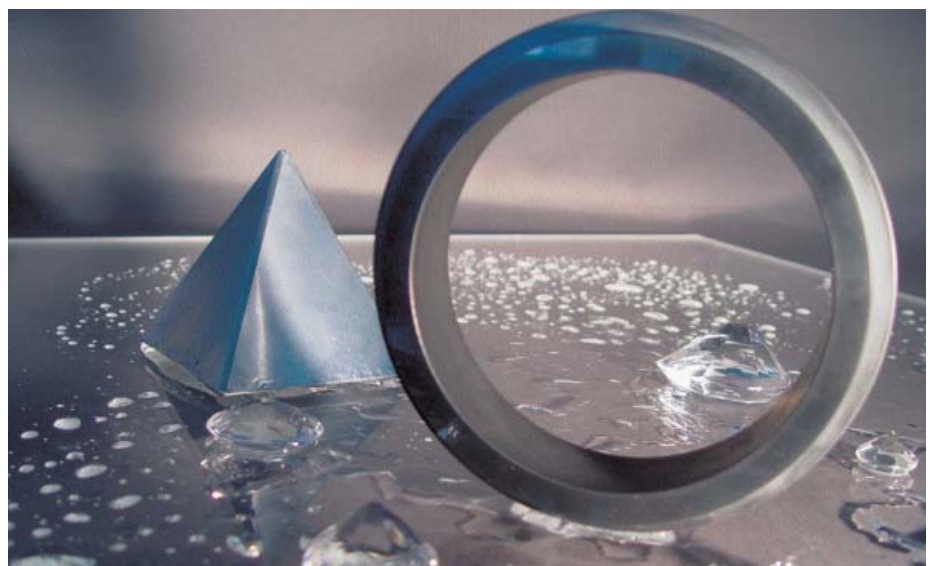
Bild 1: Unterschied Graphit – Diamant.

Was ist Diamant?

Diamant besteht wie Graphit zu 100% aus reinem Kohlenstoff. Von dem sehr weichen, fast schmierigen Graphit unterscheidet ihn nur die Art der Bindungen (Bild 1). Graphit besitzt drei sehr feste und eine „weiche“ Bindung, was zu einer plattenförmigen Anordnung der Kohlenstoffatome in einer Ebene führt. Stabil werden die Platten durch die

festen Bindungen. Die „weichen“ Bindungen dagegen halten die verschiedenen Platten nur schwach zusammen, man kann sie immer noch sehr leicht gegeneinander verschieben: Das ist der Grund, warum ein Graphitstift schreibt. Im Diamant dagegen besitzt der Kohlenstoff vier gleich starke Bindungen. Dadurch entsteht eine sehr symmetrische Anordnung der Kohlenstoffatome

Bild 2:
Diamant als hochwertiger Werkstoff:
z.B. in Diamantbeschichtungen auf
keramischen Bauteilen, wie diesem
Gleitring, die dünner als
ein menschliches Haar sind.
(Foto: DiaCCon)



diamant

δαίμωνδε

ΔΔΑΜΑΣ

Diamant: Zu schade für den Hals

יהלום

adimantem

금강석

und ein extrem stabiles Kristallgitter, in dem die Atome nicht gegeneinander verschoben werden können. Dieses spezielle Diamantgitter erzeugt die besonderen Eigenschaften von Diamant, die ihn zu einem faszinierenden Werkstoff für die Technik machen.

- Diamant ist das mit Abstand härteste Material der Welt. Er ist mehr als zehnmal härter als der härteste Stahl.
- Diamant besitzt die höchste Wärmeleitfähigkeit aller Werkstoffe (fünffmal höher als die am besten leitenden Metalle).
- Diamant ist bei chemischer Belastung etwa durch Säuren oder bei mechanischer Belastung durch Reibung äußerst beständig.

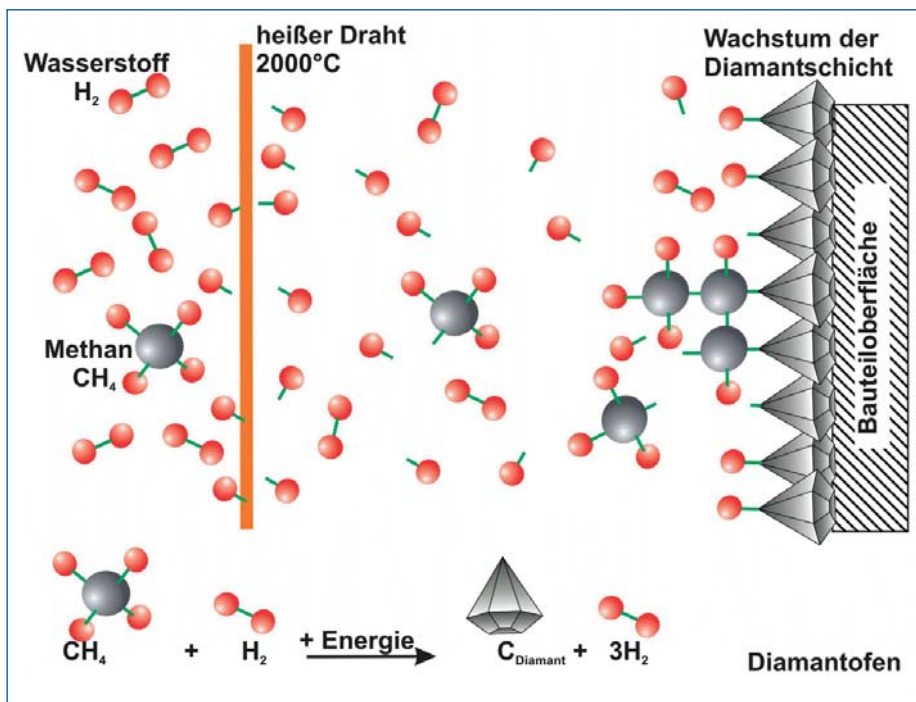


Bild 3: CVD-Diamantsynthese aus der Gasphase.

Wie entsteht Diamant?

Leider ist Diamant thermodynamisch bei den auf der Erde normalerweise herrschenden Bedingungen (Temperatur etwa 20°C, Atmosphärendruck) nicht beständig und will sich eigentlich in den hier stabilen Grafit umwandeln. Die Angst, dass der Einkaräter im Ehering vor Ablauf derselben in schwarzen Grafit übergeht, ist glücklicherweise unbegründet, weil diese Umwandlung aus kinetischen Gründen „unendlich“ lange dauert, auf jeden Fall länger als die Existenz der Menschheit. Allerdings sollte man Diamant nicht auf Temperaturen über 600°C erhitzen, sonst verbrennt er wie Grafit und Kohle.

Natürlicher Diamant entstand vor Millionen Jahren, als Kohlenstoffablagerungen am Meeresboden durch

die Verschiebung der Kontinentalplatten in tiefe Erdschichten gelangten. In 150 bis 200 km Tiefe herrschen Temperaturen von über 1000°C und sehr hohe Drücke von über 40 000 Atmosphären. Unter diesen extremen Bedingungen wandelt sich Grafit in Diamant um. Vulkanausbrüche transportieren diese – tief im „Erldlabor“ hergestellten – Diamanten an die Erdoberfläche. Vor etwa 50 Jahren stellten amerikanische und russische Forscher erstmals Diamant künstlich im Labor an der Erdoberfläche her, indem sie den natürlichen Diamantentstehungsprozess mit hohen Drücken und Temperaturen nachahmten. Allerdings sind diese künstlichen Diamanten auf „Fingernagel“-Größe beschränkt und dienen in der Technik

vor allem als Schleifpulver und als Schneidspitzen. Neuerdings ist es sogar möglich, die Asche verstorbener Verwandter als Diamanten aufzubewahren.

In den letzten 20 Jahren gelang es verschiedenen Forschungsgruppen, ein völlig neues und revolutionäres Herstellungsverfahren für kristallinen Diamant zu entwickeln. Dieses basiert auf der Abscheidung von Diamant aus der Gasphase (CVD – Chemical Vapour Deposition). Ein Gasgemisch aus Wasserstoff (99%) und Methan (1%) wird durch Energiezuführung (heißer Draht oder Plasma) in einem Vakuumofen aktiviert (Bild 3). Es entstehen gasförmige Kohlenstoff-Wasserstoff-Verbindungen, die sich auf einer kälteren Oberfläche als kristalliner Diamant niederschlagen.



diamenty

الماس

دایمے

Bei moderaten Temperaturen unter 1000°C und extrem niedrigen Drücken von unter einer Atmosphäre ist es so möglich, feinkristalline Diamantschichten herzustellen, zum Beispiel „Fenster“, deren Größe allein durch die Reaktorgröße beschränkt sind.

Der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten am Lehrstuhl Werkstoffkunde und Technologie der Metalle (Universität Erlangen-Nürnberg) liegt auf der Abscheidung dünner Diamantschichten (meist dünner als ein menschliches Haar) auf metallischen und keramischen Bauteilen. Damit lassen sich die einzigartigen Diamanteigenschaften für innovative technische Anwendungen nutzen, ohne dass das komplette Bauteil aus dem teuren Diamant bestehen muss.

Wie kommt der Diamant auf die Bauteiloberfläche?

Im CVD-Prozess wächst der Diamant auf der gesamten Bauteiloberfläche, die von der angeregten Gasphase umgeben ist. Das Wachstum benötigt im Anfangsstadium eine Art Bekimung, deshalb erhält die Oberfläche des Bauteils einzelne Nanodiamanten (1000 mal dünner als ein menschliches Haar), die im Ultraschallbad an der Bauteiloberfläche „festgeklebt“ werden. Die Bauteiltemperatur beträgt während der CVD-Diamantbeschichtung etwa 800°C, sodass die Kohlenstoff- und Wasserstoffgase in das Bauteilmaterial eindringen und mit diesem reagieren können. Dies hat positive und negative Folgen. Positiv ist, dass die chemische Reaktion mit dem Grund-

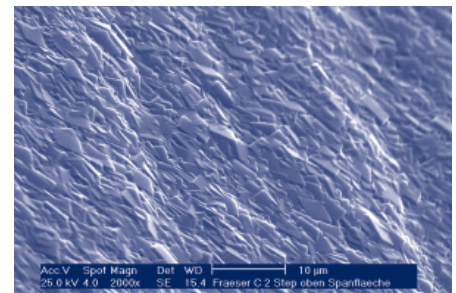
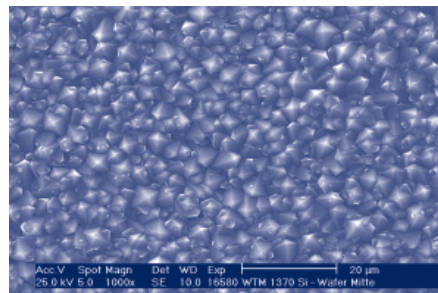


Bild 4: Diamantoberflächen unter dem Rasterelektronenmikroskop.

werkstoff zu stabilen chemischen Bindungen zwischen Diamant und Grundwerkstoff führt, was die Haftfestigkeit der Diamantschicht stark erhöht. Negativ schlägt die Verschlechterung der „inneren“, hauptsächlich mechanischen Eigenschaften des Grundwerkstoffes zu Buche (zum Beispiel geringere Festigkeit), die eine nachträgliche Wärmebehandlung jedoch wieder regenerieren kann. Ein anderes zentrales Problem bei der Diamantbeschichtung von Metallen ist der Ausgleich der Spannungen, die sich beim Abkühlen von der Beschichtungstemperatur (800°C) auf Gebrauchstemperatur (20°C) zwischen der Diamant-„Keramik“ und dem Metall bilden. Die Spannung kann zum Abplatzen der Diamantschicht führen. Zu den bestgehüteten Geheimnissen von Diamantbeschichtern gehört die spezielle Vor- und Nachbehandlung der Bauteile, damit die Diamantschicht hält und zuverlässig funktioniert. Eine Variation der Beschichtungsparameter wie Temperatur und Gaszusammensetzung erzeugt sehr unterschiedliche Diamantschichten. So sind sehr feine nanokristalline Schichten ebenso wie grobe Schich-

ten mit 1000 mal größeren „Klunkern“ (Diamantkristallen) möglich (Bild 4). Der jeweilige Anwendungsfall mit seinen speziellen Anforderungen bestimmt, welche Eigenschaften die Diamantschicht haben muss. Leider lassen sich nicht alle Werkstoffe gleich gut mit Diamant beschichten. Liegt der Schmelzpunkt bei Metallen unterhalb der notwendigen Beschichtungstemperatur, schmilzt das Bauteil während der Beschichtung. Stahl, der wichtigste Werkstoff im Maschinenbau, hat zwar eine ausreichend hohe Schmelztemperatur, leider aber führt das im Stahl enthaltene Eisen zu einer Abscheidung von Graphit und verhindert damit die Diamantbildung.

Diamant für Werkzeuge

Verschleißschutz für Werkzeuge wie Bohrer und Fräser ist das am besten erforschte und gegenwärtig am erfolgreichsten umgesetzte Anwendungsgebiet für CVD-Diamantschichten. Erfreulicherweise hat Deutschland auf diesem Gebiet einen deutlichen Technologievorsprung: Beispielsweise hält die CemeCon AG, ein junger deutscher Mittelständler aus Aachen, mehr als 50% Anteil am

Diamant: Zu schade für den Hals

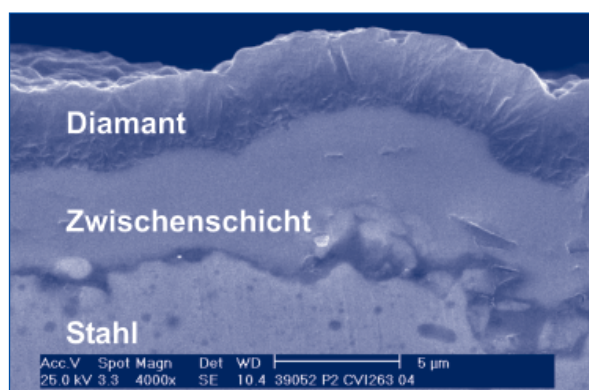


Bild 5: Diamantbeschichtetes Stahlwerkzeug.

globalen Diamantbeschichtungsmarkt von Werkzeugen. Zurzeit beschränken sich die industriellen Beschichtungen noch auf das leicht zu beschichtende, aber sehr teure „Hartmetall“ aus Wolframcarbid mit Kobalt. Diamantbeschichtete Hartmetallwerkzeuge verbessern – zum Beispiel beim Fräsen von Grafitelektroden oder bei der Bearbeitung von faserverstärkten Leichtmetallwerkstoffen – die Lebensdauer des Werkzeugs bis zum Hundertfachen. Ein Highlight ist zweifelsohne die Bearbeitung der hochfesten kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffe (CFK) des neuen Großraumflugzeuges AIRBUS A380. Den Wissenschaftlern des Forschungsverbunds FORCARBON gelang ein wichtiger Schritt zur weiteren Verbreitung der Diamantbeschichtung von Werkzeugen: Sie konnten weltweit als Erste Stahl-

werkzeuge mit Hilfe einer neu entwickelten Technologie mit haftfesten kristallinen Diamantschichten überziehen (Bild 5)! Das erweitert den Markt für die CVD-Diamanttechnologie im Werkzeugbereich deutlich.

Diamant für medizinische Implantate

Dank seiner sehr guten chemischen Beständigkeit erweist sich Diamant als sehr verträglich für den menschlichen Körper. Der große Widerstand gegen Verschleiß und die geringen Reibwerte bei mechanischer Belastung prädestinieren ihn dazu, dauerhaft die Funktion von lebenden Oberflächen in menschlichen Gelenken zu übernehmen. Schon während eines früheren Forschungsverbunds (FORBIOMAT) gelang den Erlanger Materialwissenschaftlern die Beschichtung eines Kniegelenkes aus Titan mit CVD-Diamant (Bild 6). Laborversuche zeigen in Reibversuchen die Überlegenheit der Diamantober-



**Bild 6:
Diamantbeschichtetes
Implantat eines
Kniegelenks.**
(Foto: DiaCCon)



flächen gegenüber konventionell verwendeten Verschleißpaarungen (z.B. Kobalt-Chrom gegen hochfestes Polyethylen). Auch im nicht bewegten, direkten Knochenkontakt besitzt Diamant sehr günstige Eigenschaften: Sowohl „in-vitro“-Zellversuche (im Reagenzglas) als auch „in-vivo“ (im lebenden Organismus)-Versuche zeigten, dass die Knochen bildenden Zellen sehr gut auf den Diamantkristallen anwachsen (Bild 7). Der höhere Preis und die aufwändige medizi-

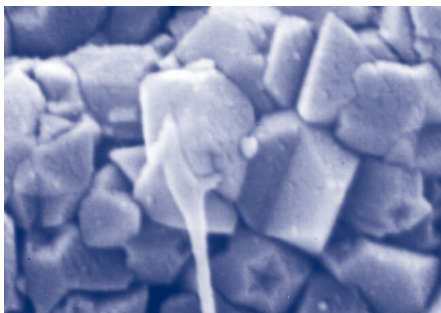


Bild 7: Anwachsen von Zellärmchen (Focal-Adhesion) an Diamantkristall.

nisch-technische Qualifizierung der diamantbeschichteten Implantate verhindern bisher jedoch den Einsatz im Menschen.

Diamant als Verschleißschutz im Maschinenbau

Forschungsarbeiten von FOROB (Bayerischer Forschungsverbund für Oberflächentechnik) zeigen, dass Diamantschichten ein riesiges Anwendungsgebiet im Verschleißschutz von hoch belasteten Gleitringen in Pumpen und Kompressoren haben. Ist zum Beispiel ein Kessel leer gepumpt und die Pumpe läuft trocken, können sich die Gleitringe in

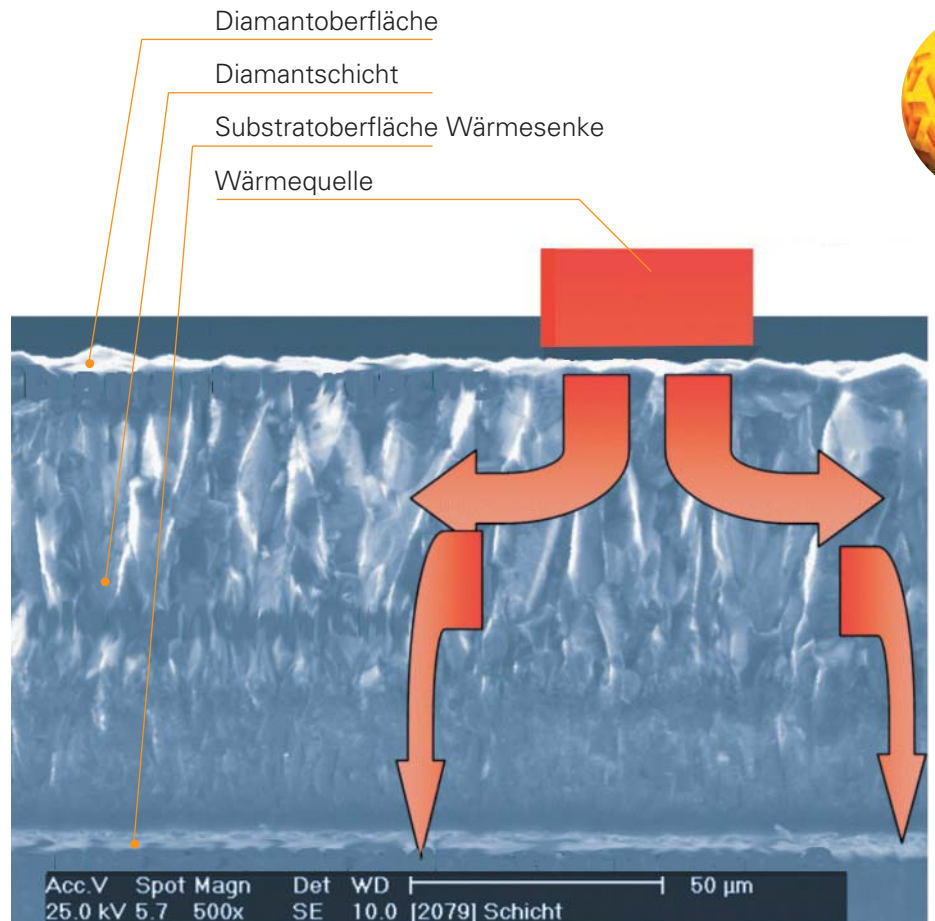


Bild 8: Schema eines Diamantwärmeverteilers, Wärmesenke.

kürzester Zeit überhitzen und dadurch zerbrechen. Diamantbeschichtete Gleitringe verhindern dies und die Pumpen überleben den „tödlichen“ Trockenlauf immerhin mehrere Stunden. Die DiaCCon GmbH, ein Spin-off des Erlanger Instituts, bietet weltweit als erste Firma Diamantschichten für Gleitringe (Bild 2) an und öffnet damit einen 7 Milliarden Euro schweren Markt.

Diamant zur Kühlung in der Leistungselektronik

Kristalliner Diamant besitzt neben seiner höchsten Härte auch – etwas überraschend – die höchste Wärmeleitfähigkeit aller Werkstoffe und bietet sich deshalb als leistungsstarkes Passiv-Kühlelement für die Elektronik oder für Halbleiterlaser an. Während der Laufzeit von FOROB und FOR-CARBON gelang bereits die Herstel-

lung von effizienten Wärmeverteilerschichten aus Diamant: Liegen Diamantschichten unterhalb der Wärmequelle (zum Beispiel Halbleiterlaser), verteilen sie die Hitze schnell über ihre Oberfläche und führen sie ab. Es entsteht eine Wärmesenke (Bild 8). Intensiv geforscht wird heute an der Herstellung von Diamant-Metall-Verbundwerkstoffen als Wärmesenken: Sie sollen die Wärmeleitfähigkeit gegenüber konventionell verfügbaren Werkstoffen deutlich verbessern und die mechanische Kompatibilität des Diamant-Kühlungswerkstoffes zum Werkstoff der Wärmequelle sicherstellen. Diese neuartigen Materialien verdoppeln die Lebensdauer, zum Beispiel von Halbleiterlasern, bei gleichzeitig verbesserter Strahlqualität, wenn die mittlere Laserbetriebstemperatur um 10 Grad absinkt.

Diamant: Zu schade für den Hals



Bild 9: Mit Hilfe von Diamantelektroden kann Brauchwasser zu Trinkwasser aufbereitet werden. (Foto MEV)

Dr.-Ing. Stefan M. Rosiwal (Jahrgang 1961)

Forschungsgruppenleiter Diamant am Lehrstuhl Werkstoffkunde und Technologie der Metalle, Universität Erlangen-Nürnberg und Geschäftsführer des Bayerischen Forschungsverbundes für Werkstoffe auf der Basis von Kohlenstoff (FORCARBON). Zudem ist er Mitgründer der Firma DiaCCon GmbH, Fürth. Seine Forschungsschwerpunkte sind ultraharte Schichten und Oberflächentechnik.

Diamant für die Elektrochemie

Kristalline Diamantschichten haben auch als Elektrodenmaterial für die elektrochemische Synthese oder für die Abwasserreinigung ein großes Marktpotenzial. Durch eine Dotierung mit Bor wird der ursprünglich elektrisch isolierende Diamant leitfähig. In diesem Zustand besitzt er bei Stromdurchgang in wässriger Lösung eine höhere, so genannte Überspannung als das normal verwendete und sehr teure Edelmetall Platin. Durch diese hohe Überspannung erzeugt die Diamantoberfläche in der wässrigen Lösung äußerst reaktive Hydroxidradikale. Diese Radikale lösen chemische Reaktionen aus, ohne das Wasser zu zersetzen. Sie zerstören in Brauchwasser durch Oxidation von Kohlenstoffverbindungen Keime und organische Verbindungen, zum Beispiel Hormone, die biologisch nicht abbaubar sind. Wenn es gelingt, ausreichend stabile Diamantoberflächen zu einem akzeptablen Preis herzustellen, haben Diamantelektroden glänzende Zukunftsaussichten. Sehr lukrative Anwendungsfelder sind die Aufbereitung von schwer belasteten und damit teuren Industrieabwässern oder die chlorfreie Desinfektion von Schwimmbädern (Bild 9). In Verbindung mit Solarzellen könnten Diamantelektroden zur dezentralen, automatischen Aufbereitung von Brunnen- oder Zisternenwasser dienen, eine Einsatzmöglichkeit, die

besonders nach Naturkatastrophen oder bei Mangel an sauberem Trinkwasser enorm wichtig sein kann.

Ausblick

Die oben aufgezeigten Anwendungen stellen nur die am Lehrstuhl Werkstoffkunde und Technologie der Metalle in Erlangen erforschten Themenbereiche der Diamantforschung dar. Unsere Forschungen, großzügig finanziert durch die Bayerische Forschungsförderung in verschiedenen Forschungsverbänden, finden durch beteiligte Partnerfirmen eine direkte Umsetzung in die industrielle Fertigung. Weitere Forschungsgruppen erwarten in Flachbildschirmen, in der Mikroelektronik oder für Diamantfenster völlig andere, aber mindestens ebenso Erfolg versprechende Anwendungen von künstlichen Diamantschichten. Die intensive öffentliche Förderung der Diamantforschung in den letzten Jahren, vor allem im deutschsprachigen Europa, trägt nun erste Früchte: Mehr als fünf junge Hochtechnologie-Gründungen entstanden und erkämpften sich auf dem Gebiet der Diamantbearbeitung vordere Ränge im Weltmarkt. Sie erhalten die erarbeitete Technologie und schaffen neue Arbeitsplätze in Deutschland, Österreich und in der Schweiz.

ZUKUNFT IM BRENNPUNKT

Die Arbeitsgemeinschaft der Bayerischen Forschungsverbände, abayfor

„Das Wichtigste im Leben ist nicht aufzuhören,
Fragen zu stellen.“ Albert Einstein

Wie sieht der Mensch in der Zukunft aus? Und wie seine Umgebung?

Die Freiheit, über alle Grenzen zu denken, den Raum der Möglichkeiten zu nutzen, dafür stand schon Albert Einstein am Anfang des letzten Jahrhunderts. Dieser Tradition fühlen sich auch die Wissenschaftler in den Bayerischen Forschungsverbänden verbunden.

Komplexe Fragestellungen sind in den engen Grenzen der wissenschaftlichen Disziplinen nicht lösbar. Forschen im Verbund ist notwendig und eine große Herausforderung, denn jeder Wissenschaftler muss Denkweise und Sprache des Anderen im Verbundprojekt verstehen. Interdisziplinäre Zusammenarbeit, unabhängig von Ort und Zeit setzt mehr Kreativität und Erfindergeist frei. Dies

treibt auch Wissenschaftsmäzene wie Hasso Plattner (SAP-Mitgründer) dazu, disziplinenübergreifende Institute zu gründen. In Bayern leisten dies die Forschungsverbände.

„Gemeinsam über Grenzen“ ist die Leitidee der bayerischen Forschungsverbände; Innovationen und Perspektiven zu schaffen sind die Ziele. Die Partner aus der Wirtschaft setzen die Forschungsergebnisse zügig in die wirtschaftliche Anwendung um; sie sichern damit Arbeitsplätze oder schaffen neue. Aber auch mehr als 40 Spin-off-Unternehmen aus den Forschungsverbänden haben den Schritt in den Markt gewagt und zahlreiche Patente sind entstanden. Die wissenschaftlichen Meriten der Verbände erhöhen die Attraktivität des Wissenschaftsstandorts Bayern. Die wirtschaft-

lichen Erfolge helfen, der bayerischen Wirtschaft auch in der globalen Vernetzung nicht nur den Platz zu sichern, sondern sie auch für die Zukunft fit zu machen.

Unter einem Dach

Die gemeinsame Plattform nach außen, die Wissenschaft mit Wirtschaft, Politik und Gesellschaft in Kontakt bringt und die unterschiedlichen Themen der Forschungsverbände transportiert, ist abayfor, die Arbeitsgemeinschaft der Bayerischen Forschungsverbände. abayfor ist zentraler Dienstleister und strategischer Partner für die Forschungsverbände und die Fördermittelgeber. In abayfor fließt Wissen aus den Forschungsverbänden und damit aus vielen unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen zusammen. abayfor ist ein

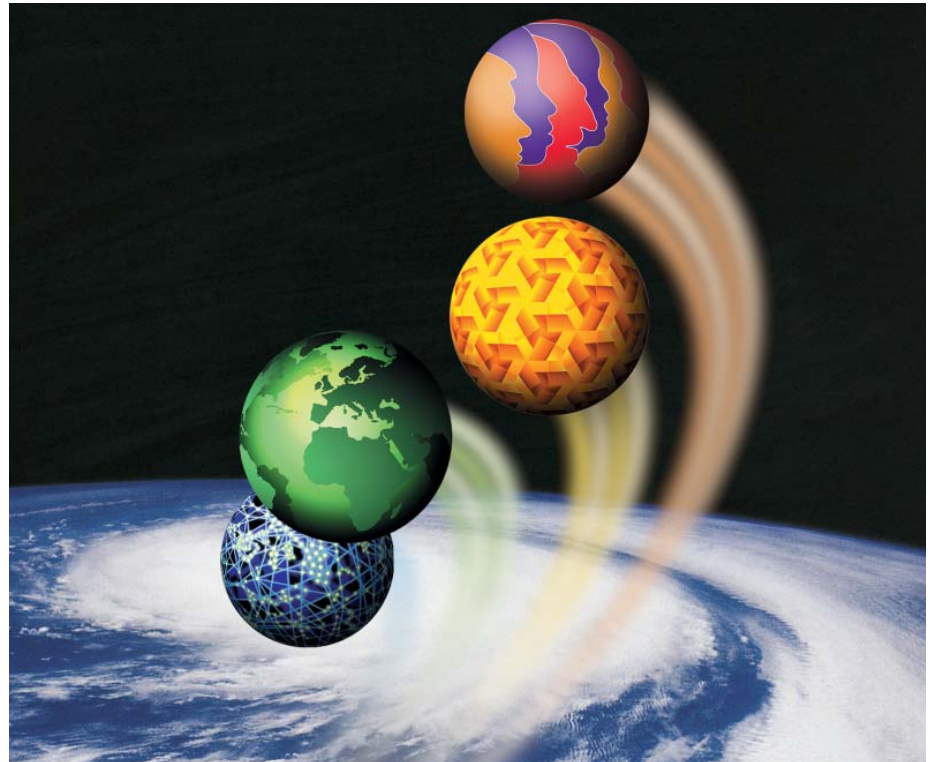
Informationspool und ein Ideenlieferant für die Schlüsseltechnologien von morgen. Die abayfor-Mitarbeiter vermitteln als Wissenschaftsmanager zwischen Wissenschaft, Politik und Wirtschaft, zunehmend auch im internationalen Umfeld.

Die „Welten der Wissenschaft“ ...

... sind spannend, bunt und innovativ.

Vom Stoff zum Werk: Neue Materialien und entsprechende Produktionstechniken und -verfahren entwerfen Forscher aus der „Welt der Materie“. Mit dem Überschreiten der Grenzen zum Nano-Maßstab leiten sie das nächste Zeitalter ein.

Der Mensch und seine Umwelt: Die Verbesserung der Lebens- und Umweltbedingungen ist das zentrale Thema in der „Welt des Lebens“:



Schwindende Ressourcen, das Auftreten neuer und/oder gefährlicher Krankheiten sind die Themen. Der Umgang miteinander und im wirtschaftlichen Alltag: Wissenschaftler aus der „Welt der Kultur“ überschreiten neue und alte Grenzen, geografische und die in Unternehmen. Sie begleiten die zeitgeschichtlichen Ereignisse, die Globalisierung und die Mobilität mit wissenschaftlicher Erkenntnis und praktischem Tun.

Informations- und Kommunikationstechnik: In der „Welt der Infor-

mation“ bauen Mathematiker, Informatiker, Ingenieure und Wirtschaftsexperten Roboter für gefährliche und „virtuelle Diener“ für ungeliebte Aufgaben. Sie versuchen, das Wunderwerk „Mensch“ zu kopieren, sei es virtuell oder in seinen Funktionen.

Wissenschaft braucht Visionen und mutige, helle Köpfe. Forschungsverbände haben das Denken in wissenschaftlichen Disziplinen verlassen, um über alle Grenzen hinaus zu forschen und zu arbeiten.

Kontakte

Die Forschungsverbände der abayfor

BayFORREST

Bayerischer Forschungsverbund Abfallforschung
und Reststoffverwertung
TU München
Lehrstuhl für Technologie biogener Rohstoffe
Schulgasse 18
94315 Straubing
Tel (09421) 30 00-30
Fax (09421) 30 00-33
Internet www.abayfor.de/bayforrest

FORBIAS

Forschungsverbund Bioanaloge
Sensomotorische Assistenz
TU München
Arcisstr. 21
80333 München
Tel (089) 2 89-2 37 33
Fax (089) 2 89-2 35 55
Internet www.abayfor.de/forbias
www.forbias.de

FORCARBON

Bayerischer Forschungsverbund für Werkstoffe
auf der Basis von Kohlenstoff
Universität Erlangen-Nürnberg
Martensstraße 5
91058 Erlangen
Tel (09131) 85-2 75 17
Fax (09131) 85-2 75 15
Internet www.abayfor.de/forcarbon

FORIMMUN

Forschungsverbund Neue Strategien
der Immuntherapie
Genzentrum München
Feodor-Lynen-Straße 25
81377 München
Tel (089) 21 80- 7 67 71
Fax (089) 21 80- 7 67 67
Internet www.abayfor.de/forimmun
www.forimmun.de

FORLOG

Bayerischer Forschungsverbund
Supra-Adaptive Logistiksysteme
TU München
Boltzmannstr. 15
85748 Garching
Tel (089) 2 89-1 59 14
Fax (089) 2 89-1 59 22
Internet www.abayfor.de/forlog

FORMAT

Bayerischer Forschungsverbund
Materialwissenschaften
TU München
Arcisstraße 21
80333 München
Tel (089) 2 89-2 54 81 (Sekretariat)
Fax (089) 2 89-2 25 33
Internet www.abayfor.de/format
www.werkstoffe.de

FORMIKROPROD

Bayerischer Forschungsverbund
Mikroproduktionstechnik
Konrad-Zuse-Straße 4-6
91052 Erlangen
Tel (09131) 9 77 90-13
Fax (09131) 9 77 90-11
Internet www.abayfor.de/formikroprod

FORNANO

Bayerischer Forschungsverbund Miniaturisierte
Analyseverfahren durch Nanotechnologie in
Biochemie, Chemie und Physik
LMU München
Sektion Physik
Geschwister-Scholl-Platz 1
80539 München
Tel (089) 21 80-7 75 59
Fax (089) 21 80-7 75 60
Internet www.abayfor.de/fornano

FORNEL

Bayerischer Forschungsverbund
für Nanoelektronik
Universität Erlangen-Nürnberg
Cauerstr. 6
91058 Erlangen
Tel (09131) 7 61-1 00
Fax (09131) 7 61-1 02
Internet www.abayfor.de/fornel
www.fornel.de

FOROST II

Forschungsverbund Ost- und Südosteuropa
LMU München
Güllstraße 7
80336 München
Tel (089) 74 61 33-21
Fax (089) 74 61 33-33
Internet www.abayfor.de/forost
www.forost.de

FORPRION

Bayerischer Forschungsverbund Prionen
LMU München
Zentrum für Neuropathologie und Prionforschung
Feodor-Lynen-Straße 23
81377 München
Tel (089) 21 80-7 80 41
Fax (089) 21 80-7 80 37
Internet www.abayfor.de/forprion

FORSIP

Bayerischer Forschungsverbund für Situierung,
Individualisierung und Personalisierung in der
Mensch-Maschine-Interaktion
Universität Augsburg
Institut für Informatik
Universitätsstr. 14
86159 Augsburg
Tel (0821) 5 98-21 34
Fax (0821) 5 98-22 74
Internet www.abayfor.de/forsip
www.forsip.de

FORTEPRO

Bayerischer Forschungsverbund für
Tissue Engineering und Rapid Prototyping
TU München
Hightech-Forschungs-Zentrum am
Klinikum rechts der Isar
Ismaninger Str. 22
81675 München
Tel (089) 41 40-63 10
Fax (089) 41 40-63 11
Internet www.abayfor.de/fortepro
www.fortepro.de

FORTVER

Bayerischer Forschungsverbund
für Turbulente Verbrennung
Universität Bayreuth
Lehrstuhl für Technische Thermodynamik
und Transportsysteme
Universitätsstr. 30
95440 Bayreuth
Tel (0921) 55-71 60
Fax (0921) 55-71 65
Internet www.abayfor.de/fortver

FORWIN

Bayerischer Forschungsverbund
Wirtschaftsinformatik
Universität Erlangen-Nürnberg
Lange Gasse 20
90403 Nürnberg
Tel (0911) 53 02-1 51
Fax (0911) 53 02-1 49
Internet www.abayfor.de/forwin
www.forwin.de

FORWISS

Bayerisches Forschungszentrum
für Wissensbasierte Systeme
TU München
Institut für Informatik
Boltzmannstraße 3
85748 Garching
Tel (089) 2 89-1 77 54
Fax (089) 2 89-1 77 57
Internet www.abayfor.de/forwiss
www.forwiss.de

KONWIHR

Kompetenznetzwerk für Technisch-
Wissenschaftliches Hoch- und
Höchstleistungsrechnen in Bayern
TU München
Lehrstuhl für Rechnerarchitektur und
Rechnerorganisation
Arcisstraße 21
80333 München
Tel (089) 2 89-1 76 80
Fax (089) 2 89-1 76 82
Internet www.abayfor.de/konwihr
<http://konwihr.in.tum.de>

KW 21

Forschungsinitiative
Kraftwerke des 21. Jahrhunderts
Kontakt Bayern:
abayfor c/o TU München
Arcisstr. 21
80333 München
Tel (089) 2 89-2 25 38
Fax (089) 2 89-2 25 89
Kontakt Baden-Württemberg:
Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum
Institut für Verbrennungstechnik
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart
Tel (0711) 68 62-3 97
Fax (0711) 68 62-5 78
Internet www.abayfor.de/kw21

Assoziierte Mitglieder:

FORAREA
Kompetenznetzwerk für
interkulturelle Kommunikation e.V.
Universität Erlangen-Nürnberg
Kochstraße 4/4
91054 Erlangen
Tel (09131) 85-2 20 11
Fax (09131) 85-2 20 13
Internet www.abayfor.de/forarea
www.forarea.de

Bayerisches Laserzentrum gGmbH
Konrad-Zuse-Straße 4-6
91052 Erlangen
Tel (09131) 9 77 90-13
Fax (09131) 9 77 90-11
Internet www.blz.org

Fördermittelgeber aus Bayern für Forschungsverbände:

Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft,
Forschung und Kunst

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft,
Infrastruktur, Verkehr und Technologie

Bayerisches Staatsministerium
für Landwirtschaft und Forsten

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt,
Gesundheit und Verbraucherschutz

Bayerische Forschungsstiftung

Impressum

Alle Beiträge geben grundsätzlich die Meinung
des Autors wider, nicht die des Herausgebers.

Herausgeber ©:

abayfor, Arbeitsgemeinschaft der Bayerischen
Forschungsverbände

Arcisstraße 21

80333 München

Tel (089) 2 89-2 25 87

Fax (089) 2 89-2 25 89

E-Mail abayfor@abayfor.de

Internet www.abayfor.de

Copyright: 2005 abayfor

Redaktion:

Dr. Ute Berger, abayfor (verantwort.)

Christine Kortenbruck, abayfor (verantwort.)

Erscheinungshinweis:

„Zukunft im Brennpunkt“ erscheint einmal pro Jahr

1. Band Juni 2002 (ISBN 3 98 10 219-0-8)

2. Band Juli 2003 (ISBN 3 98 10 219-1-6)

3. Band November 2004 (ISBN 3 98 10 219-2-4)

4. Band November 2005 (ISBN 3 98 10 219-3-2)

Layout:

Hans Gärtner Kommunikation, 82515 Wolfratshausen

Druck:

Bentrup Druckdienste, Bielefeld



Wir danken dem Bayerischen Staatsministerium für
Wissenschaft, Forschung und Kunst herzlich für die
großzügige Unterstützung.