



# Was ist das bayerische Geheimnis?

Von Hans-Olaf Henkel

*Deutschlands Süden liegt vorn. In Bayern und Baden-Württemberg ist die Arbeitslosigkeit beinahe nur halb so hoch wie im Rest der Republik. Die Wirtschaft ist kräftiger, die Menschen sind erfindungsreicher, die Industrie exportiert mehr als anderswo in Deutschland. Sogar das Wetter ist besser. Im Jahr scheint die Sonne in München über 100 Stunden länger als in Hamburg. Aber was ist das bayerische Geheimnis wirklich? Was machen die Menschen in Bayern anders? Liegt es tatsächlich am Wetter?*

*Schauen wir uns die Ressourcen für Forschung und Entwicklung an, nach etablierter (und durchaus zutreffender) Ansicht diejenigen Zukunftsinvestitionen, die die Grundlage für den deutschen Wohlstand schaffen. Beim ersten Hinsehen ist da nichts Besonderes zu entdecken. Bayerns Staatsregierung ist jeder Student im Schnitt 8 000 Euro pro Jahr wert. Ein Durchschnittsabsolvent kostet also von der ersten Immatrikulation bis zum Diplom oder Magister insgesamt 60 000 Euro. Das liegt knapp über dem Durchschnitt der alten Flächenländer. In den Stadtstaaten und den neuen Ländern sind diese Ausgaben mit 80 000 bzw. 100 000 Euro weit höher.*

*Auch bei den öffentlichen Wissenschaftsausgaben ist Bayern eigent-*

*lich nichts Besonderes. Nordrhein-Westfalen gibt 190 Euro pro Einwohner aus. In Bayern sind es nur zehn Euro mehr pro Kopf und Jahr. Lediglich den Badenern und den Schwaben ist staatliche Wissenschaft noch ein Stück teurer (260 Euro).*

*Aber jetzt kommt's. Während von den rund 31 000 Forscherinnen und Forschern, Laborassistenten und Technikern in Berlin nur rund 13 000 in der Wirtschaft beschäftigt sind, sind es von den 500 000 in Bayern ganze 320 000, also 64 Prozent. Die Industrie macht den Unterschied. Das mag auch erklären, warum Bayern gemeinsam mit Baden-Württemberg Spitze ist bei der Einwerbung von Drittmitteln pro Professor (80 000 Euro pro Lehrstuhl und Jahr). Das Resultat: Bayerns wirtschaftliches Gesamtergebnis kann sich sehen lassen: Von 1995 bis 2001 wuchs die Wirtschaft um 15 Prozent, in Deutschland waren es insgesamt nur 9,9 Prozent. Bayerns Bruttoinlandsprodukt pro Kopf liegt um 21 Prozent über dem EU-Durchschnitt, dasjenige von Gesamtdeutschland nur um vier Prozent. Das „bayerische Bündnis mit dem Fortschritt“ (Wissenschaftsminister Hans Zehetmair) zahlt sich offenbar aus.*

*In der Bundeshauptstadt hingegen wird (wie in den ostdeutschen Bundesländern insgesamt) die industrielle High-Tech-Basis schmerzlich*

vermisst. Wenn das produzierende Gewerbe fehlt, gibt es niemanden, der sich Dienstleistungen leisten kann. Ohne Dienstleistungssektor ist der Standort für Ansiedlungen nicht attraktiv. Ohne Industrieansiedlungen gibt es keine Nachfrage nach Dienstleistungen. Der Kreis schließt sich. Das Ergebnis ist Lähmung.

Meine Absicht ist es nun allerdings nicht, Bayerns Gegenwart und Zukunft in den schönsten Farben zu malen und als Kontrast die Lage in Ostdeutschland daneben zu stellen, damit diese Farben um so heller leuchten. Ich frage mich vielmehr, ob man aus dem Weg Bayerns in den letzten Jahrzehnten nicht Rezepte ableiten kann, wie Ostdeutschland im Besonderen und das rezessionsgeplagte und reformschwache Deutschland insgesamt sich im globalen Wettbewerb behaupten können. Da gibt es ein paar Merkmale.

Bayern hat einen erfolgreichen Strukturwandel vom Agrarland zur Hochtechnologieregion hinter sich. Bis 1989 gehörte Bayern zu den Empfängerländern des Länderfinanzausgleichs und konnte auf die Solidarität der anderen Länder zählen. Aber Bayern hat das Geld nicht in den sozialen Konsum gesteckt, sondern investiert. Die Staatsregierung hat der Versuchung widerstanden, die Steuern vor allem für die Interessen der heutigen Wähler auszugeben. Sie hat stattdessen eine gute öffentliche Forschungsinfrastruktur geschaffen und für attraktive Bedingungen für Industrieansiedlungen gesorgt. Sie

hat gleichzeitig darauf geachtet, dass es zu engen Kontakten zwischen Wirtschaft und staatlich finanzierter Forschung kommt, damit die Ergebnisse der Grundlagenforschung später auch Profit abwerfen. Ein Paradebeispiel sind die Forschungsverbände, die sich in abayfor zusammengetan haben. Da es die Wissenschaft gerade darauf anlegt, Neuland zu betreten, ist Forschung immer ein Risiko und trägt die Möglichkeit des Fehlschlags in sich. Aber wo, wie bei abayfor, Forschungsthemen gemeinsam mit der Wirtschaft ausgewählt werden, ist die spätere Nutzenanwendung soweit möglich garantiert.

Ich ziehe aus dem bayerischen Beispiel vier Lehren. Erstens, schaffe ein forschungsfreundliches Klima im Land. Zweitens, fördere die Grundlagenforschung intensiv und stelle gleichzeitig Kontakte zu den Anwendern her. Setze drittens auf Klasse statt Masse und hole die besten Wissenschaftler an die Hochschulen und außeruniversitären Institute. Kümmere dich viertens um die Bildung. Diese Woche startete unter der Leitung von Professor Manfred Prenzel vom Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften in Kiel die neue PISA-Runde, in der die naturwissenschaftlichen Fähigkeiten der 15-jährigen Schülerinnen und Schüler getestet werden. Ob Bayern da auch wieder vorn liegt? In den Schulen werde jedenfalls schon geübt, war in der Zeitung zu lesen. Aber das ist ein eigenes Thema, dem ich mich heute nicht zuwenden will.

Vielleicht liegt das bayerische Geheimnis ja tatsächlich in der Kombination aus Traditionsverbundenheit und Modernität. Oder wie manche sagen: Bayern – das ist eben Laptop plus Lederhose.

---

**Hans-Olaf Henkel** (63) ist Präsident der Leibniz-Gemeinschaft und stand zuvor sechs Jahre an der Spitze des Bundesverbandes der Deutschen Industrie. Zur Organisation gehören 80 außeruniversitäre Forschungsinstitute und Serviceeinrichtungen für die Forschung, fünf davon in Bayern. Das Spektrum der Leibniz-Institute ist breit und reicht von den Natur-, Ingenieur- und Umweltwissenschaften über die Wirtschafts-, Sozial- und Raumwissenschaften bis hin zu den Geisteswissenschaften und Forschungsmuseen. Die Institute beschäftigen rund 12 500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und haben einen Gesamtetat von 950 Millionen Euro. Sie arbeiten nachfrageorientiert und interdisziplinär und sind von überregionaler Bedeutung. Da sie Vorhaben im gesamtstaatlichen Interesse betreiben, werden sie von Bund und Ländern gemeinsam gefördert. Näheres unter: [www.wgl.de](http://www.wgl.de).

---

# INHALT

Hans-Olaf Henkel 2  
**Was ist das bayerische Geheimnis?**



---

## WELT DER KULTUR 7

Horst Kopp 9  
**Der neue Irak-Krieg:  
Geschichte, Ursachen und mögliche Folgen**

Torsten M. Kühlmann 17  
**Selbstorganisation im Dschungel der Weltmärkte**



---

## WELT DER INFORMATION 23

Andrew J. Zeller 25  
**Computer lenken – Menschen denken**

Hans Ulrich Buhl, Veronica Winkler 29  
**Produkte und Kunden: Das Ringen um Balance**

Harald Meier, Arndt Bode 33  
**Dem Geheimnis des Lebens auf der Spur**



## WELT DES LEBENS

39

Udo Lindemann 41  
**Individuelle Produkte – in Serienfertigung**

Peter Schröder, Jean Charles Munch, Beate Huber 47  
**Stall und Feld, Natur und Geld**

Peter Köpke, Sabine Gaube,  
Joachim Reuder, Marianne Placzek 53  
**Klimawandel geht unter die Haut**

Hans A. Kretzschmar 59  
**Prionen: Vermehrung ohne eigene Gene**

Ralf Wagner, Jens Wild 63  
**Der Lockruf der Chemokine**



## WELT DER MATERIE

67

Michael Nerlich, Peter Angele, Richard Kujat 69  
**„Ersatzteile“ aus der Retorte**

Hans-Florian Zeilhofer 73  
**Maßgeschneiderte Implantate aus körpereigenen Zellen**

Michael Behr 77  
**Der Regensburger Kausimulator**

Thomas Sattelmayer, Christoph Hirsch, Jochen R. Kalb 79  
**Am Anfang war das Feuer**

Otto Vostrowsky, Andreas Hirsch 85  
**Forscher gucken durch die Nano-Röhre**

Manfred Geiger, Gerd Eßer 89  
**Mikroproduktionstechnik: Minibauteile mit Größe**

---

### DIE FORSCHUNGSVERBÜNDE DER ABAYFOR 93

**Zukunft im Brennpunkt 94**

Liste der Forschungsverbünde 96  
Impressum 97

# DER NEUE IRAK-KRIEG: GESCHICHTE, URSACHEN UND MÖGLICHE FOLGEN

Interkulturelle Missverständnisse oder Machtpolitik?

Horst Kopp

## Anmerkung der Redaktion:

Der folgende Artikel entstand wenige Tage nach Ausbruch des Irak-Krieges am 20. März 2003 und ist unverändert aktuell.

**Montag, 24. März 2003: Seit vier Tagen tobt der 3. Irak-Krieg. Präsident Bush hat seine am 18. März angekündigte Drohung wahr gemacht, den Irak „mit Gewalt zu entwaffnen“, falls Präsident Hussein nicht in den nächsten 48 Stunden das Land verlässt. Letzteres war auszuschließen, so dass erneut ein Irak-Krieg begonnen hat, der dritte innerhalb von 22 Jahren. Warum gibt es dort immer wieder Krieg? Lassen sich die Kriege miteinander vergleichen? Liegt es immer am Diktator Saddam Hussein? Gibt es wirklich keine friedlichen Möglichkeiten, das „Problem Irak“ zu lösen? Und: Kann mit dem jetzt vor der Tür stehenden Krieg endlich das Krisengebiet auf Dauer befriedet werden? Was kommt nach dem Krieg? Fragen über Fragen. Der folgende Beitrag versucht, einige Breschen in den wild wuchernden Dschungel von Meinungen zu schlagen, indem Hintergründe aufgedeckt und Zusammenhänge analysiert werden. Immer wird sich zeigen, dass die regionalen Ereignisse nur im Zusammenhang mit globalen Prozessen erklärbar sind.**

**9. April 2003: Vorgerückte amerikanische Truppen demontieren im Zentrum von Bagdad ein Standbild von Saddam Hussein.**

Foto: Markus Matzel/Das Fotoarchiv



## Die strategische Bedeutung der Region

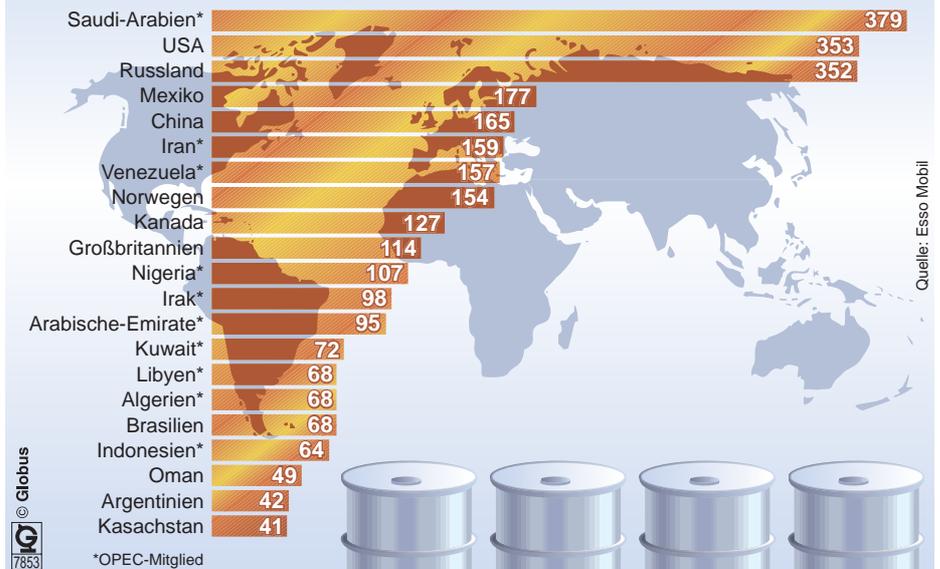
Der Raum des Persisch/Arabischen Golfes ist die mit Abstand erdölreichste Region der Erde. Allein in den Staaten Saudi-Arabien, Irak, Vereinigte Arabische Emirate, Kuwait und Iran lagern 63% der gesicherten und unter heutigen Preisen wirtschaftlich nutzbaren Ölreserven der Welt. Nach Saudi-Arabien (25% Anteil) hält Irak mit 11% die weltweit zweitgrößten Reserven. 1996 kamen lediglich 26% der Weltölproduktion aus dieser Region, doch ist aufgrund

des Versiegens von Ölquellen in anderen Teilen der Welt fest damit zu rechnen, dass bis 2020 bereits mehr als die Hälfte der Weltölproduktion von dort kommen wird. Die größten Ölverbraucher (USA, Westeuropa, Japan) werden also in immer stärkerem Maße auf das Rohöl aus der Golfregion angewiesen sein, sofern sie nicht Alternativen zum Öl entwickeln.

Betrug der Anteil Iraks an der Weltölproduktion in den 80er Jahren noch 5%, so ist er mittlerweile auf 2,5% gesunken. Die Embargo-

### Die größten Erdöl-Produzenten

Rohölförderung im Jahr 2001 in Millionen Tonnen



Politik hat also zur „Schonung“ der irakischen Reserven beigetragen mit dem Ergebnis, dass die relative Bedeutung Iraks für den Ölmarkt der Zukunft deutlich zugenommen hat. Trotzdem: Die Stellung Iraks ist nicht absolut wichtig. Ein kompletter Ausfall der irakischen Produktion bzw. des irakischen Exports könnte binnen kürzester Zeit durch eine moderate Erhöhung der saudischen Produktion aufgefangen werden, um den Ölpreis stabil zu halten. Saudi-Arabien besitzt eben nicht nur mit Abstand die größten Reserven, sondern auch eine enorm hohe ex-

cess capacity, d.h. die Möglichkeit, die eigene Produktion kurzfristig erheblich zu steigern. Allein im Ghawar-Ölfeld lagern Reserven (83 Mrd. Fass), die deutlich größer sind als alle Reserven Europas und Nordamerikas zusammen (58 Mrd. Fass). Damit ist dieses Land strate-

gisch viel wichtiger als alle anderen in der Golfregion zusammen, und ein Ausfall der saudischen Ölproduktion würde den Ölpreis in exorbitante Höhen treiben; der „Ölpreisschock“ des Jahres 1973 wäre dagegen eine harmlose Angelegenheit.

### Der Irak und sein Öl



### Die Entwicklung des Irak und die Golf-Kriege

Nach dem Zusammenbruch des Osmanischen Reiches am Ende des 1. Weltkrieges erhält Großbritannien vom Völkerbund das Mandat über das Gebiet der ehemaligen osmanischen Provinzen Mossul, Bagdad und Basra. 1932 wird aus dem Mandatsgebiet der unabhängige Staat Irak unter der Führung eines von den Briten etablierten Hashemiten-Königshauses, das mit einem Staatsstreich der Armee 1958 gestürzt wird. Bis 1979 folgen mehrere Regierungen, Umstürze und Staatsstrieche durch die Armee und/oder die Baath-Partei, wobei die Frage der Kurdenpolitik stets eine wichtige Rolle spielt. Insgesamt entwickelt sich der Irak zu einem säkularen Staat mit deutlich autokratisch-sozialistischen Zügen. Die rasch steigenden Einnahmen aus dem Ölgeschäft nutzt der Staat zum Aufbau einer Grundstoffindustrie und zum Ausbau der Infra-



struktur. 1979 kommt Saddam Hussein nach dem Rücktritt von Präsident al-Baqr an die Macht. Im gleichen Jahr übernimmt Khomeini die Macht im Nachbarland Iran, das sich zur Islamischen Republik erklärt, eindeutig eine antiwestliche Politik verfolgt, im regionalen Kontext aber nach einer Vormachtstellung im Golfgebiet strebt und damit die Politik des Schah-Regimes fortsetzt.

1980 marschieren irakische Truppen in Iran ein, der erste Golfkrieg beginnt und dauert acht Jahre (über eine Million Opfer). Irak wird von der Sowjetunion, später in zunehmendem Maße vom Westen unterstützt, kann sich aber nicht entscheidend durchsetzen. Auch die Eröffnung einer zweiten Front im Norden (durch Iran mit Unterstützung kurdischer Truppen) bringt zunächst keine Entscheidung. Erst als es Irak gelingt, einen iranischen Brückenkopf bei Basra stark zu bedrängen, akzeptiert der Iran 1988 einen von der UNO ausgearbeiteten Waffenstillstand. Jetzt erst wird bekannt, dass Irak im Kurdengebiet und an anderen Frontabschnitten Giftgas eingesetzt hat.

In den Kriegsjahren verfolgt Saddam Hussein im Inneren eine Politik von „Zuckerbrot und Peitsche“: Jegliche Opposition wird von mehreren sich ergänzenden Geheimdiensten rigoros verfolgt, unterdrückt und umgebracht. Folter ist in den Gefängnissen an der Tagesordnung, die Medien sind gleichgeschaltet, freie Berichterstattung unmöglich. Der Personenkult um den Präsidenten nimmt erste groteske Züge der Übertreibung an. Zugleich wird aber das Gesundheitswesen aus-



gebaut, der Bildungssektor verbessert; die Grundversorgung mit Nahrungsmitteln, Wohnung und Kleidung wird erheblich subventioniert. Auch der Ausbau von Industrie und Infrastruktur geht weiter, allerdings zunehmend mit militärischer Zielrichtung. In jenen Jahren entstehen mit erheblicher Unterstützung westlicher Experten und Firmen jene industriellen Kapazitäten, die den Irak in die Lage versetzen, biologische, chemische und atomare Massenvernichtungsmittel herzustellen und mit Hilfe von Mittelstreckenraketen eigener Produktion auch über größere Reichweiten hinweg einzusetzen. Dadurch verschuldet sich das Land enorm – im Wesentlichen bei westlichen Gläubigern. Zum ersten Mal wird die Doppelmoral westlicher Politik in der Golfregion deutlich: Das diktatorische, menschenverachtende Regime Saddams wird gestützt, weil es gegen den „bösen Iran“ Krieg führt.

**1980 führt Saddam Hussein mit Unterstützung der US-Regierung einen achtjährigen Krieg gegen den Iran mit über einer Million Opfern. Foto dpa**

Mit dem Einmarsch irakischer Truppen in Kuwait am 2. August 1990 beginnt der zweite Golfkrieg. Saddam Hussein, vom Westen bis dahin gehiebt, greift – in einer Zeit weltpolitischer Veränderungen (Zusammenbruch des Ostblocks) – nach den Ölfeldern der Region und trifft damit den Nerv westlicher Interessen. Da sich die konservativ-autokratischen Regime der Golf-Anrainerstaaten vom säkularen Irak bedroht fühlen, gehen sie eine Koalition mit den USA zur Befreiung Kuwaits ein. Diese Koalition hält auch dann noch, als Saddam Hussein den Islam für seine machtpolitischen Ziele instrumentalisiert und nun eindeutig so argumentiert wie elf Jahre zuvor das Khomeini-Regime in Iran. Seitdem setzt der irakische Diktator immer dann auf die religiöse Karte, wenn ihm dies aus strategischen Gründen opportun erscheint. Kuwait wird von den Alliierten befreit, das irakische Regime ist stark angeschlagen.

Jetzt sehen die Schiiten im Süden des Landes und die Kurden im Norden eine Chance, den Despoten in Bagdad loszuwerden. Aber die Aufstände brechen spontan und unkoordiniert aus; so gelingt es Saddam, mit seinen Resttruppen und wiederum brutaler Gewalt die Aufstände zuerst im Süden niederzuschlagen und danach im Norden Hunderttausende von Kurden in die Flucht zu schlagen. Es bleibt unklar, warum



**Zerstörte Panzer und brennende Ölquellen – weder der Golfkrieg von 1991 noch massive UN-Sanktionen vermochten den in Ungnade gefallenen Diktator zu stürzen.** Fotos images.de/Alre

der Westen in dieser Phase recht passiv reagiert. Saddam Hussein jedenfalls bleibt an der Macht, wenngleich auf (im Norden) eingeschränktem Territorium. Und seiner Propaganda-Maschinerie gelingt es, das vor allem von den USA durchgesetzte UNO-Embargo so zu „verkaufen“, dass sich der Zorn der Massen, die nun unter sich stets verschlimmernden Bedingungen leben müssen, gegen Amerika und nicht gegen den eigenen Herrscher wendet. Das Embargo verfehlt somit vollkommen seine beabsichtigte Wirkung – im Gegenteil: Da die Herrscher-Clique über alle Macht- und Steuerungsmittel verfügt, kann sie die verbleibenden

**Auch im Dritten Golfkrieg ist die Zivilbevölkerung das Opfer einer fragwürdigen internationalen Politik. Eine Bewohnerin verlässt am 30.03.2003 ihr zerstörtes Haus in Bagdad nach einem Angriff auf die benachbarte Telekommunikationszentrale.**

Foto: Markus Matzel/Das Fotoarchiv

Ressourcen gezielt zum Machterhalt einsetzen, zuletzt durch Kooptation der wichtigsten Stammesführer. Das Volk verarmt weiter, der Irak fällt beim Human Development Index von Rang 91 (1990) auf Rang 126 (1998) zurück. Bis zuletzt bleibt ungeklärt, ob der Irak über Massenvernichtungswaffen verfügt und ob konkrete Beziehungen zu international

operierenden Terrorgruppen bestehen. Trotz massiver Proteste der Kirchen, weiten Teilen der Öffentlichkeit (auch der US-amerikanischen) und trotz erheblicher Widerstände im UN-Sicherheitsrat beginnt der dritte Golfkrieg.

### **Die Golf-Kriege: Gemeinsamkeiten und Unterschiede**

Weltweit besteht weitgehend Einigkeit in der Meinung, dass die skizzierte strategische Lage der Golfregion bei allen drei Kriegen eine wichtige, wenn nicht sogar die entscheidende Rolle gespielt hat. Alle involvierten Akteure haben dies mehr oder weniger offen zugegeben. Dabei geht es nicht etwa nur um das irakische Öl, sondern um die Kontrolle der gesamten Golfregion, also besonders auch um die Ölvorkommen Saudi-Arabiens. Außer in Irak und Iran herrscht in den anderen Golf-





staaten eine unermesslich reiche, autokratische Oberschicht, die alles tut, zivilgesellschaftliche Strukturen schon im Keim zu ersticken. Ihren Machterhalt erkaufen sich diese Cliquen mit einer Wohlfahrtspolitik, die freilich regelmäßige Öleinnahmen voraussetzt. So bestehen gleichgerichtete Interessen bei Ölproduzenten wie Ölkonsumenten: Beide sind am stabilen Ölmarkt und am Erhalt des Status quo in der Region interessiert.

Der erste Golfkrieg drehte sich letzten Endes um die Frage, welche der beiden mittleren Regionalmächte (Irak oder Iran) aus dem Zusammenspiel Ölproduzenten – Ölkonsumenten den größeren Profit für sich selbst ziehen könnte. Die religiöse Begründung der Kriegsziele auf iranischer Seite war genauso „aufgesetzt“ wie die säkulare auf irakischer Seite; in Wirklichkeit ging es um nationale Interessen. Der Einsatz der (damals noch zwei) Großmächte war letztlich so dosiert, dass kein Sieger vom Schlachtfeld ging – der Status quo blieb erhalten, die Regionalmächte waren geschwächt.

Der zweite Golfkrieg stellte den Versuch Saddam Husseins dar, in einer Zeit weltpolitischer Verschiebungen handstreichartig die regionalen Kräfteverhältnisse zu seinen Gunsten zu verändern. Er fand dabei als „starker Mann“ durchaus offene und versteckte Unterstützung in großen Teilen der arabischen Welt, weil er unter geschicktem Rückgriff auf die Floskel des Panarabismus vorgab, das Öl für alle Araber unter seine Kontrolle bringen zu wollen. Die ein-



zig übrig gebliebene Weltmacht erkannte darin sicher zu Recht eine erhebliche Gefahr und handelte schnell. Sie fand vor Ort willige Verbündete, um den Status quo wieder herzustellen. Dass sie dabei Koalitionen mit ganz und gar nicht demokratischen Herrschern einging, störte wenig. Spätestens jetzt war klar und wurde auch offen ausgesprochen: Am Golf geht es um essentielle amerikanische Wirtschaftsinteressen, nicht um die Etablierung demokratischer Strukturen.

Bemerkenswerterweise tauchte das letztere Argument besonders häufig im Vorfeld des dritten Golfkrieges auf: Wenn erst das Regime des Saddam Hussein beseitigt sei, könne überall in der Region mit der Neuordnung und Demokratisierung der Staaten vorangeschritten werden, auch das Problem Palästina – Israel ließe sich dann auf Dauer lö-

**Außer in Irak und Iran herrscht in den Golfstaaten eine unermesslich reiche und autokratisch regierende Oberschicht, die demokratische Strukturen schon im Ansatz erstickt.**

Foto: Ulrich Baumgarten/Variopress

sen. Wie das ohne zivilgesellschaftliche Strukturen und weithin ohne demokratische Traditionen glücken soll, ist auch wohlmeinenden Beobachtern reichlich unklar. In der Region selbst sehen viele Intellektuelle hierin eine Neuauflage des Sykes-Picot-Abkommens von 1916, als schon einmal eine Neuordnung von außen mit eindeutig imperialistischem Impetus vorgenommen wurde. In diesem Zusammenhang macht derzeit das Wort vom Bush-Sharon-Plan die Runde. Und dass die Einführung von Demokratie und Menschenrechten dem irakischen Volk mit militärischer Gewalt gerade jetzt gebracht werden soll, empfinden viele als zynisch.

### Die Frage nach den Ursachen

Selbstverständlich besteht eine enorme Gefahr für die Weltgemeinschaft und besonders für die unmittelbaren Nachbarn Iraks, wenn ein skrupelloser Herrscher wie Saddam Hussein über Massenvernichtungswaffen verfügt. Letzteres ist zwar nicht bewiesen, aber auch nicht auszuschließen. Die in den letzten Monaten diskutierte Frage war – genauso wie beim Kampf gegen den Terrorismus seit dem 11. September 2001 – jedoch immer nur, auf welche Weise solche Gefahren „ausgeschaltet“ werden können. Viel zu selten wurde gefragt, warum sie überhaupt entstehen konnten. Anhänger von Huntingtons These vom „Kampf der Kulturen“ sehen selbstverständlich im Islam, der dabei meist mit Islamismus und/oder Fundamentalismus gleichgesetzt wird, den Auslöser, die „Bedrohung des Westens“. Diese Interpretation trifft für das Regime in Irak nicht zu. Saddam Hussein ist ein zutiefst säkularer, skrupelloser und höchst areligiöser Machtpolitiker (mit sozialistischer Vergangenheit), der den Islam stets nur propagandistisch-demagogisch zur Durchsetzung eigener Interessen eingesetzt hat. Und in den 80er Jahren störte sich niemand im Westen an den menschenverachtenden Praktiken des Herrschers von Bagdad ...

Aber auch die These vom „Terror aus Ohnmacht“, die damit argumentiert, dass es sich bei den Terroristen um Ausgegrenzte, Perspektivlose, Entrechtete und Arme handele, die für religiös eifernde Demagogen



**Unterschiedliche Wahrnehmung internationaler Krisen aus unterschiedlichen geschichtlichen Erfahrungen: Übersteigter Patriotismus in Amerika, ...**

leicht zu gewinnen seien, greift zu kurz. Vielmehr muss die Frage gestellt werden, welche moralischen Positionen eigentlich im Blickfeld der „Kämpfer“ stehen, was mithin die Wahrnehmung vom „Feind im Westen“ beherrscht. Die Geschichte der afghanischen Taliban zeigt ebenso wie der Fall Saddam Hussein, dass es „dem Westen“ (überwiegend verkörpert von den USA) in dieser Wahrnehmung stets nur um die Machtfrage ging, die seit dem Zusammenbruch des Ostblocks offener und eindeutiger formuliert und von einer zunehmend liberalisierten und globalisierten Weltwirtschaft unterstützend begleitet wird. Moralische Argumente (Durchsetzung von Demokratie und universalen Menschenrechten) werden als vorgeschoben und doppelbödig erkannt, auch wenn es im Westen ganz sicher viele gibt, die sich ehrlich diesen Anliegen verschreiben.

Eine besondere Steigerung erfährt die differenzierte Wahrnehmung der Weltsituation seit den Anschlägen des 11. September 2001. In den USA mit einem Volk von Einwanderern, die Bedrückung, Not und Unfreiheit entkommen wollten und tatsächlich eine (fast unbegrenzte) Freiheit vorfanden, führt das Gefühl der Verletzbarkeit dieser Grundwerte zu übersteigertem Patriotismus.

Christliche Grundströmungen tendieren in einem vollkommen veränderten politischen Klima zu Radikalisierungen, die sich durchaus als „christlicher Fundamentalismus“ charakterisieren lassen. Und nicht wenige Amerikaner treibt die Sorge um, der im Zuge der Terrorismusbekämpfung eingeschlagene Weg eingeschränkter bürgerlicher Freiheiten könnte in Formen des Faschismus umschlagen. Der geradezu missionarische Eifer, mit dem der dritte Golfkrieg auch von den amerikanischen Medien begleitet wird, erinnert in vielen Einzelheiten an die Stimmung in Europa zu Beginn des 1. Weltkriegs.

Gerade die leidvolle Erfahrung der Weltkriege mit hunderten Millionen von Opfern und unwiederbringlichen Verlusten an kulturellen Werten ist es aber, die in Europa eine andere Wahrnehmung der Krisen der Gegenwart und ihrer Lösungsstrategien provoziert. Deshalb wird hier überwiegend der diplomatische Weg bevorzugt, was aus amerikanischer Sicht unverständlich ist und wie „Feigheit vor dem Feind“ interpretiert, ja als Verrat apostrophiert wird, denn die Sicherung der Ölversorgung sei auch für den Erhalt unseres Wohlstandes essenziell. Wieder anders sehen die Massen in der arabisch-islamischen Welt die gegen-



... Vorbehalte gegen den Krieg als politische Lösung in Europa. Fotos dpa

## Der neue Irak-Krieg

**Proteste an der Rhein/Main-Air-Base gegen den Irak-Krieg am 15. März 2003.**

Foto: Mario Vedder  
pictureNEWS

den Gegensätzen im Irak zwischen Schiiten, Sunniten und Kurden, zumal offensichtlich nur wenig konkrete Vorstellungen über die politische Gestaltung des Landes „danach“ bestehen.

Im Schatten des Irak-Krieges wird sicher auch das Hauptproblem der Region, der Streit zwischen Israel und Palästina, eine neue Phase erreichen, die sich jetzt schon andeutet. Die Marginalisierung der palästinensischen Bevölkerung wird sich fortsetzen und ständig neuen Terror (auch in anderen Teilen der Welt) provozieren. Die den Krieg unterstützenden arabischen Golf-Anrainerstaaten werden es noch schwerer haben, innerhalb der Arabischen Liga glaubwürdig zu bleiben, die Kräfte innenpolitischer Opposition erhalten dadurch Auftrieb und destabilisieren die Regimes.

Neben einem solchen „wahrscheinlichen“ Szenario lassen sich aber auch Extremfälle konstruieren, die selbstverständlich nur „maximal denkbare“ Alternativen darstellen:

Die „Pax Bush“ sorgt nach der Beseitigung des Hussein-Clans mit Hilfe der Europäer für stabile innere Verhältnisse, Demokratie, Föderalismus und Wohlstand zunächst im Irak. Dann färbt dieses Modell ab auf andere Staaten der Region, die sich demokratisieren. Der Ölreichtum wird solidarisch unter den Staaten geteilt, „Wohlstand für Alle“ ist die Devise. Der säkulare Rechtsstaat mit Gleichberechtigung der Frau setzt sich durch. Damit kann das Bevölkerungswachstum endlich entscheidend gebremst werden. Israel unterbindet

wärtige Situation. Gerade die Behandlung des Israel-Palästina-Problems durch die offizielle amerikanische Politik mit einer seit Jahrzehnten sehr einseitigen Parteinahme für Israel erbost in zunehmendem Maße. Doch nicht nur die widersprüchliche Doppelbödigkeit politischer Argumentation und politischen Handelns, sondern auch der Widerspruch zwischen propagierten christlich-abendländisch-westlichen Grundwerten und den über die inzwischen weltweit verbreiteten Massenmedien transportierten (manchmal auch nur vermeintlichen) Lebenswirklichkeiten stößt immer mehr Menschen im Orient vor den Kopf. Die Kluft zwischen der westlichen Gesellschaft mit dem Ziel von „Selbstverwirklichung“ auf der Basis individueller Freiheiten und der segmentären orientalischen Gesellschaft auf solidarischer Grundlage wird immer größer. Das Dilemma unserer Zeit liegt darin, dass jede Seite ihre Lebensauffassung für die bessere hält. Und da es um moralische Kategorien geht, ist der Rückgriff auf religiöse Diskursformeln und Argumentationen nicht weit.

### Wohin geht der Weg?

Bereits in den ersten Kriegstagen schon über dessen Folgen zu spekulieren, mag vermessen sein. Den-

noch sei es versucht, indem die aufgezeigten Entwicklungslinien konsequent fortgedacht werden. Ganz sicher ist, dass sich das Image der USA in der Region weiter verschlechtern wird – und damit alle durch „den Westen“ verkörperten Grundwerte. Auch ein kurzer Krieg wird viele Opfer unter der Zivilbevölkerung kosten, und es besteht wenig Hoffnung auf danach folgende demokratische Verhältnisse. Aber auch bei einer solchen Argumentation muss klar bleiben, was Ursache und was Wirkung ist. Nicht die Unfähigkeit der Menschen im Orient oder gar ein wie auch immer gefärbter Islam verhindert demokratische Strukturen, sondern das amerikanische „Vorbild“ desavouiert sich selbst. Denn sicher ist, dass die „amerikanischen Interessen“ (am Öl) weiterhin ohne Rücksicht auf politische und gesellschaftliche Strukturen in der Golfregion durchgesetzt werden.

Wahrscheinlich werden sich die Europäer aus schlechtem Gewissen und weil sie letztlich die gleichen Interessen haben, am Wiederaufbau des Irak beteiligen und dabei (wie derzeit in Afghanistan) treuerherzig-ehrlich versuchen, demokratische Strukturen zu etablieren. Dies dürfte wohl scheitern – ganz abgesehen von den sicher wieder aufflammenden

---

**Prof. Dr. Horst Kopp** (geb. 1943) ist Inhaber des Lehrstuhls für Kulturgeographie und Orientforschung an der Universität Erlangen-Nürnberg und war Sprecher des Forschungsverbundes Area-Studies FORAREA. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Wirtschaftsentwicklung im Vorderen Orient, Tourismus und die Wasserproblematik.

---

die Siedlungspolitik und fördert die Entstehung eines unabhängigen, demokratischen Palästina mit vollen staatlichen Rechten. Jerusalem wird zur Doppelhauptstadt beider Staaten. Daraufhin stellen alle Terrororganisationen ihre Tätigkeit ein und erklären, sich nur noch über demokratische Wahlen am politischen Leben beteiligen zu wollen. Parallel dazu investieren amerikanische und europäische Firmen in der Region, nutzen die billige Energie und die gut ausgebildeten Arbeitskräfte. Die Märkte der MENA öffnen sich für den Massenimport westlicher Konsumgüter. – Dieses Szenario entspricht der naiv-optimistischen Sichtweise mancher amerikanischen Institute, ist aber eher von Wunschen getragen.

Oder: Der Krieg zieht sich in die Länge, weil überall auf der Welt amerikanische Einrichtungen von Anschlägen betroffen sind. Der Terror sucht sich neue Ziele (Internet, Schaltstellen der Welt-Infrastruktur).

Auch der Israel-Palästina-Konflikt eskaliert in bisher ungekanntem Ausmaß, aus „Sicherheitsgründen“ wird ein Großteil der palästinensischen Bevölkerung nach Jordanien deportiert. Im Irak kommt es zu unkontrollierbaren Aufständen von Schiiten, Kurden, Resten der Armee, wobei auf allen Seiten auch Massenvernichtungswaffen eingesetzt werden. In den Golf-Anrainerstaaten breiten sich fundamentalistisch-islamisch gesteuerte innere Unruhen aus, Ölproduktion und -export kommen ins Stocken. Der Ölpreis steigt auf 100 \$ pro Fass, die Weltwirtschaft gerät in eine schwere Krise. In den Industriestaaten und in Ostasien steigt die Arbeitslosigkeit auf 40%, überall wird der Sozialstaat massiv abgebaut, demokratische Parteien verlieren an Glaubwürdigkeit, faschistoide Strömungen erhalten deutlichen Zulauf. In den Entwicklungsländern sterben Millionen an Hunger und/oder sich ausbreitenden Epidemien, viele Staaten versinken in Chaos und Anarchie. Der Kampf gegen den immer weiter um sich greifenden Terrorismus rechtfertigt in den Industrieländern schließlich den Abbau sämtlicher Bürgerrechte. UNO, NATO und europäische Institutionen und brechen völlig auseinander, nur eine bedingungslose Gefolgschaft bei der einzig verbliebenen Weltmacht sichert das Überleben von Nationen.

Utopie? Vision? Schwarzmalerei? Der jetzt eindeutig völkerrechtswidrig beginnende Krieg kann zu Dammbrüchen führen, deren Folgen kaum vorhersehbar sind.



**Befreier oder Besatzer?  
Jubel in Mossul, Proteste und  
Terror in Bagdad.**

Fotos: dpa

# SELBSTORGANISATION IM DSCHUNGEL DER WELTMÄRKTE

## Der Mittelstand spinnt Unternehmensnetzwerke

Torsten M. Kühlmann

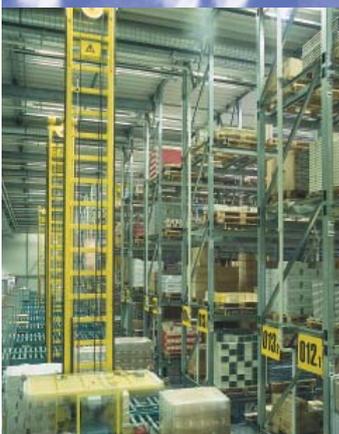
**Fast alle Global Player sind Großunternehmen und Konzerne. Mittelständler scheuen oft den Weg in die Internationalisierung, verspüren aber einen wachsenden Druck, in anderen Ländern „vor Ort“ sein zu müssen. Hier hilft nur Eines: Ressourcen und Kompetenzen bündeln, Netzwerke bilden. Die Kooperation im Netzwerk schafft eine besondere Form von Kapital – das Sozialkapital.**

**W**eltweit nimmt der Austausch von Gütern, Kapital, Ideen und Personen über nationale Grenzen hinweg stetig zu. Unternehmen aller Größenordnungen fördern diesen Trend – teils angezogen durch die Absatzchancen, die zusammenwachsende nationale Märkte versprechen, teils getrieben vom intensiven Wettbewerb durch ausländische Konkurrenten auf den angestammten Mär-

ten. Verglichen mit den Großunternehmen hinkt der Mittelstand diesem Trend deutlich hinterher. Zwar eroberte eine Reihe mittelständischer Unternehmen – weithin unbemerkt von der breiten Öffentlichkeit – mit ihren Produkten eine international führende Wettbewerbsposition, doch diese „hidden champions“ sind nicht repräsentativ für die Gesamtheit mittelständischer Unternehmen. Die Gründe für den Rückstand liegen in einer Reihe mittelstandstypischer Engpässe:

- knappe Eigenkapitalausstattung,
- schwierige Kreditaufnahme für internationale Aktivitäten,
- Fehlen international erfahrener Mitarbeiter/Führungskräfte,
- Informationsdefizite zu ausländischen Märkten,
- schwach ausgeprägte Unternehmensplanung, dafür aber
- starker Wille zum Erhalt unternehmerischer Unabhängigkeit.

Angesichts dieser Hindernisse ist es für viele Mittelständler kaum möglich, „im Alleingang“ vom bloßen Export zum Aufbau ausländischer Tochterunternehmen voranzuschreiten. Dieser Rückstand ist besonders bedenklich angesichts der großen Bedeutung, die mittlere Unternehmen für die deutsche und europäische Wirtschaft haben. Neuere empirische Studien zeigen jedoch, dass mittelständische Unternehmen zunehmend die oben genannten Engpässe überwinden, indem sie ihre Internationalisierung durch netzwerkartige Unternehmenskooperationen vorantreiben.



### Die Alternative des Mittelstands zum Konzern: Unternehmensnetzwerke

Unternehmensnetzwerke sind zwischen dem Einzelexport und der Gründung bzw. dem Erwerb von Auslandsgesellschaften angesiedelt (vgl. Abb. 1). In Unternehmensnetzwerken kooperieren rechtlich selbstständige, aber wirtschaftlich partiell voneinander abhängige Unternehmen miteinander und vereinbaren dafür gemeinsame Spielregeln. Netzwerke sind zugleich Bedingung, Medium und Konsequenz von Kooperation. Sie zeichnen sich gegenüber anderen Organisationsformen durch einen eigenen „Ehrencodex“ aus.

### Einer für Alle, Alle für Einen

Unternehmen, die Teil eines Netzwerks sind, haben dennoch eigene Ziele und befinden sich vielleicht sogar in Konkurrenz miteinander. Vertrauensvolle Beziehungen zwischen den Netzwerkmitgliedern sind das zentrale Bestimmungsmerkmal, das A und O von Netzwerken. Vertrauen bedeutet, dass die Partner fähig und willens sind, die Interessen Aller in der Kooperation anzuerkennen und zu wahren. Die Ziele der einzelnen Partner sind nur erreichbar, wenn die Interessen aller kooperierenden Netzwerkteilnehmer berücksichtigt werden.

Hier muss die Überzeugung der Partner greifen, dass die Ziele des Netzwerks höher zu veranschlagen sind und verlangen, dass sich die Einzelunternehmen an gemeinschaftlichen Zielen orientieren (Zielkongruenz).



Obgleich die Partner nur unvollständig über Handlungskompetenz und -absichten der übrigen Netzwerkmitglieder informiert sind, setzen sie sich freiwillig über das Risiko einer möglichen Fehlentscheidung hinweg. Die Beteiligten verzichten dabei aber auf Verträge als Absicherungsmechanismus und versprechen, die Interessen der anderen Netzwerkpartner bei den eigenen Entscheidungen zu respektieren und nicht opportunistisch zu handeln (Selbstverpflichtung). Sie erbringen sogar Vorleistungen, die opportunistisch ausgenutzt werden könnten und die sich nur bei Weiterbestehen des Netzwerkes rechnen. Derartige Vorleistungen können materieller oder immaterieller Natur sein: Kredite, Rabatte, Bereitstellen von Personen, Know-how, Investition in Produktionsanlagen.

### Gebunden und doch frei

Netzwerke sind auf Dauer angelegt, ohne den Zeitraum genau zu bestim-

men. Viele der oben genannten Netzwerkqualitäten bilden sich erst durch häufige Zusammenarbeit der Netzwerkunternehmen aus.

Rechtlich bleiben Netzwerkunternehmen selbstständig, die wirtschaftliche Abhängigkeit beschränkt sich auf bestimmte Kooperationsbereiche wie Forschung und Entwicklung oder Einkauf. Alle können das Netzwerk auch wieder verlassen.

Gegen eine Verletzung der Kooperationsregeln sind die rechtlichen Sanktionsmöglichkeiten beschränkt. Intern droht jedoch der Ausschluss aus dem Netzwerk, wenn der „Ehrencodex“ verletzt wird. Für das ausgeschlossene Unternehmen bedeutet dies ein höheres wirtschaftliches Risiko und einen Imageverlust.

Im Netzwerk ist die Zusammenarbeit stets eine Gratwanderung zwischen gegenseitiger wirtschaftlicher Abhängigkeit und unternehmerischer Freiheit. Dabei gilt: Wer sich selbst verpflichtet, erwartet gleiches von den Partnern. Die lockere Koppelung sichert das Netzwerk ab, damit es beim Ausfall eines Unternehmens nicht insgesamt gefährdet ist.

### Das spezifische Kapital eines Netzwerks: Sozialkapital

Mit dem Eintritt eines Unternehmens in ein Netzwerk entsteht eine spezifische Kapitalform – das Sozialkapital. Sozialkapital ist eine Ressource, die das Unternehmen ähnlich wie „Sachkapital“ (Maschinen, Gebäude) oder „Humankapital“ (Ausbildung und Engagement der Mitarbeiter) nutzt, um im Wettbewerb zu bestehen. Sozialkapital basiert auf dem



Beziehungsnetzwerk, das ein Unternehmen zu anderen Unternehmen unterhält. Es äußert sich in verschiedener Form, etwa als Wissensaustausch, Hilfeleistung oder als wechselseitige Anregung zu neuen Ideen. Wie andere Spielarten des Kapitals auch, ist Sozialkapital produktiv, denn damit lassen sich Unternehmensziele viel besser verwirklichen. Die Bildung von Sozialkapital erfordert eine Investition, zum Beispiel Zeitaufwand für den Kontaktaufbau. Dafür ist es vielfach verwertbar (beispielsweise zur Förderung von Inno-

vationen) und kann in andere Kapitalarten umgewandelt werden. Lernen im Netzwerk steigert das Sozialkapital und wertet gleichzeitig das Humankapital auf, weil die Erfahrungen der Mitarbeiter zunehmen. Sozialkapital braucht aber auch ständige Pflege, weil es auf Beziehungen basiert.

Im Gegensatz zu den anderen Kapitalarten ist Sozialkapital nicht Privateigentum eines einzelnen Unternehmens, sondern kollektives Eigentum des Netzwerks. Demzufolge ist Sozialkapital auch unveräußer-

lich. Mit der Auflösung eines Netzwerks verschwindet auch das in ihm angesammelte Sozialkapital. Die spannende Frage für Wissenschaftler lautet: Was fördert oder gefährdet das Sozialkapital im Unternehmensnetzwerk?

### Was bringen Unternehmensnetzwerke?

Zahlreiche ausländische Märkte wehren sich mit Eintrittsbarrieren gegen internationale Wettbewerber. Erfahrene Partnerunternehmen, die schon auf ausländischen Märkten tätig



sind, erleichtern durch ihre Kenntnisse und Kontakte den Markteintritt. Dieser Zeitgewinn kann je nach Branche und Region erheblich sein. „Alte Hasen“ dienen als Lehrer und Berater für die Newcomer auf dem lokalen Markt. Eine Expansion auf internationale Märkte kann auch ein Großunternehmen überfordern. Dagegen kann das Netzwerk flexibler agieren; ihm fehlt die hierarchische und oft starre Entscheidungsstruktur großer Konzerne. Die Arbeitsteilung in einem Netzwerk ermöglicht dem einzelnen Unternehmen, sich auf seine Kerngebiete zu konzentrieren und sich damit einen Wettbewerbsvorteil zu sichern. So liegt es gerade zu Beginn von Internationalisierungsprozessen nahe, mangels eigener Marktkenntnis die Aktivitäten auf einem ausländischen Markt lokalen Vertriebsgesellschaften zu übertragen. Know-how und verteiltes Wissen entstehen im Netzwerk und stehen damit dann allen Netzwerkpartnern zur Verfügung.

Die Partner sind mit dem gemeinsamen Wissen in der Lage, sich neue Märkte zu erobern oder sich quasi

als Monopolträger auf einem speziellen Auslandsmarkt zu etablieren. Ein Netzwerk erlaubt den Partnern, neben Einzel- und Vorprodukten auch ganze Systemlösungen anzubieten oder seine Angebotspalette um Dienstleistungen zu ergänzen (z. B. Logistik- oder Wartungsleistungen). Das Netzwerk reduziert deutlich den mit der Internationalisierung verbundenen Kostenaufwand: Einsparungsmöglichkeiten ergeben sich etwa aus gemeinsam genutzten Gebäuden, Verwaltungseinrichtungen, Vertriebsmannschaften, Transportkapazitäten und Lieferquellen.

### Kein Patentrezept

Nun sollten Unternehmensnetzwerke und der Aufbau von Sozialkapital nicht als Patentrezept missverstanden werden. Vielmehr wohnen Unternehmensnetzwerken eine Reihe von Risiken inne, die sowohl den Fortbestand einzelner Netzwerkunternehmen als auch des Netzwerks als Ganzes bedrohen können.

Hohe Kosten für die Anbahnung, Abwicklung und Kontrolle von Netzwerkaktivitäten können die Liquidität

eines Partnerunternehmens schwächen. Die Übertragung von Funktionen an Netzwerkpartner schränkt zentrale Unternehmenskompetenzen ein. Unternehmerische Entscheidungen fallen zwischen Autonomie und Abhängigkeit, zwischen Wettbewerb und Kooperation, zwischen Vertrauen und Kontrolle. Werden Betriebsgeheimnisse unbeabsichtigt weitergegeben, gerät die Wettbewerbsfähigkeit in Gefahr. Im Netzwerk sind Spannungen vorprogrammiert, mit denen die Partner umgehen lernen müssen. Wie behandeln die Partner in transnationalen Netzwerken kulturelle Unterschiede? Fehlt das Verständnis für die Denkweise des Anderen, wird ein Netzwerk nicht gut oder gar nicht funktionieren.

### Netzwerkbeziehungen managen

Die Risiken verdeutlichen, dass Netzwerke „gemanagt“ werden müssen, um die Vorteile dieser Organisationsform zur Geltung zu bringen.

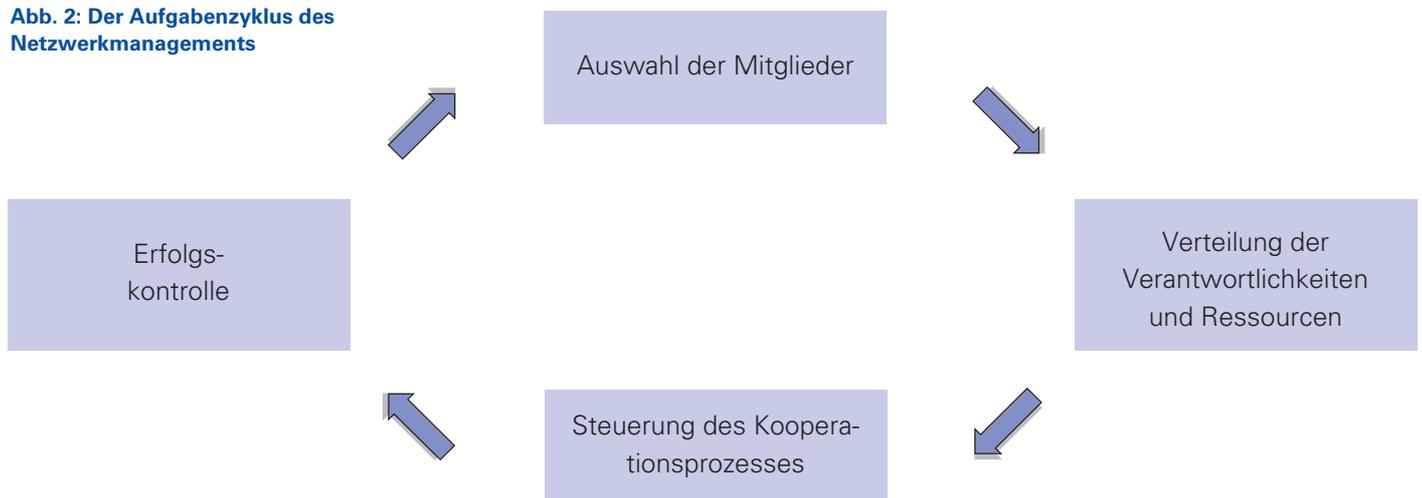
Ohne ein Netzwerkmanagement bliebe das Geflecht der beteiligten Unternehmen als Ganzes handlungsunfähig. Die Prozesse in den Unternehmen und die Praktiken der Mitarbeiter müssen ihre individuelle Eigendynamik und Freiheit den im Netzwerk geltenden Regeln anpassen und gegebenenfalls auch unterordnen.

Dem Managementbegriff liegen hierbei allerdings nicht die klassisch-betriebswirtschaftlichen Allmachtsphantasien zur zeitlich abgegrenzten, vorausplanbaren und zielgenauen





Abb. 2: Der Aufgabenzyklus des Netzwerkmanagements



Steuerung des Netzwerkgeschehens zugrunde. Das Netzwerkmanagement bewegt sich zwischen geplantem Wandel und ungesteuerter Evolution. Angesichts der Komplexität und Dynamik von Netzwerkbeziehungen ist mit unbeabsichtigten Handlungsfolgen, Entwicklungsbrüchen und Widerständen immer zu rechnen.

Für das Management von Unternehmensnetzwerken lassen sich vier große Aufgabenbereiche identifizieren (vgl. Abb. 2).

### ● **Auswahl der Netzwerkpartner**

Wer sind die geeigneten Netzwerkpartner? Für die Auswahl ist wichtig, dass die potenziellen Partner in ihrem Leistungsspektrum und ihren Unternehmenszielen zueinander passen. Dazu gehört auch die Beurteilung der Mitarbeiter, die in den einzelnen Partnerunternehmen für die Netzwerkkontakte verantwortlich sein sollen.

### ● **Arbeitsteilung**

Welcher Partner übernimmt welche Aufgabe im Netzwerk? Zuständigkeiten und Ressourcen müssen auf die beteiligten Unternehmen verteilt werden. Der Maßstab dafür sind die jeweiligen Stärken bzw. Wettbewerbsvorteile der einzelnen Partner.

### ● **Festlegen der (Spiel-)Regeln**

Die Partner legen für ihre Zusammenarbeit Regeln fest, die alle akzeptieren und die durchsetzbar sind. Beispielsweise wird vereinbart, auf welchen Feldern Kooperationspartner miteinander in Wettbewerb treten dürfen, wie mit Zielkonflikten umzugehen ist, welche Mechanismen das Wohlverhalten der Partner kontrollieren können, welche Verhaltensregeln für die Mitarbeiter gelten, wie formell die Beziehungen im Netzwerk zu gestalten sind und wo den Partnern Entscheidungsfreiäume zugestanden werden.

### ● **Erfolgskontrolle**

Was bringt das Netzwerk? Welche Kosten und Erträge entstehen durch die Netzwerkkooperation – sowohl bei den einzelnen Partnerunternehmen als auch im Netzwerk insgesamt? Betroffen sind nicht zuletzt die Aufgaben des Netzwerkmanagements: Auswahl – Arbeitsteilung – Steuerung der Zusammenarbeit. Gerade hierbei entstehen viele spannende Fragen: Welche Kriterien zur Wahl von Partnerunternehmen bewähren sich? Welche Vor- und Nachteile gehen mit der Integration ausländischer Unternehmen in das Netzwerk einher? Wie werden die (Spiel-)Regeln der Netzwerkkooperation praktiziert?

## Selbstregulierendes System

Netzwerkmanagement bedeutet Selbstmanagement im Netzwerk und keine von „außen“ betriebene Fremdsteuerung. Die Mitglieder vereinbaren und kontrollieren eigenstän-

---

**Prof. Dr. Torsten M. Kühmann** (geb. 1952) leitet den Lehrstuhl für Personalwesen und Führungslehre an der Universität Bayreuth. Er beteiligte sich am Forschungsverbund Area-Studies (forarea) mit mehreren Projekten. Seine Forschungsschwerpunkte sind internationales Personalmanagement, Unternehmertum und internationale Unternehmenskooperationen.

---

dig die (Spiel-)Regeln der Kooperation. Bei veränderten Umfeldbedingungen entwickeln die Beteiligten in einem selbstorganisierten Prozess ihr Regelsystem weiter. Die verbreitete Ansicht, dass Netzwerke auf hierarchische Strukturen und Machtasymmetrien zugunsten eines gleichberechtigten Aushandelns verzichten, trifft nur teilweise zu. Insbesondere bei unterschiedlich großen Netzwerkunternehmen übernehmen die größeren Mitglieder mehr Managementaufgaben und beeinflussen die Netzwerkkooperation stärker als die kleineren Partner. Es bildet sich eine „Netzwerkführerschaft“ heraus.

Das alltägliche Netzwerkmanagement benötigt Managementkapazitäten, entweder in einzelnen Netzwerkunternehmen oder im Netzwerk, das dann zur Wahrnehmung der Aufgaben des Netzwerkmanagements besondere Stellen oder Abteilungen schafft. Ob das Netzwerkmanagement in den einzelnen Unternehmen „neben“ den anderen Aufgaben der Unternehmensführung wahrgenommen wird oder in Organisationseinheiten zentralisiert oder institutionalisiert ist, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab: Zahl und Größe der Netzwerkunternehmen, Erfahrungen im Netzwerkmanagement, Art der Netzwerkbeziehungen und ihr Gewicht für die einzelnen Unternehmen ... Netzwerke mittlerer Unternehmen entscheiden sich oft gegen ein institutionalisiertes Netz-

werkmanagement, greifen aber stärker auf externe Expertise zurück als Kooperationen großer Unternehmen.

### Ein Netzwerk fürs Netzwerk

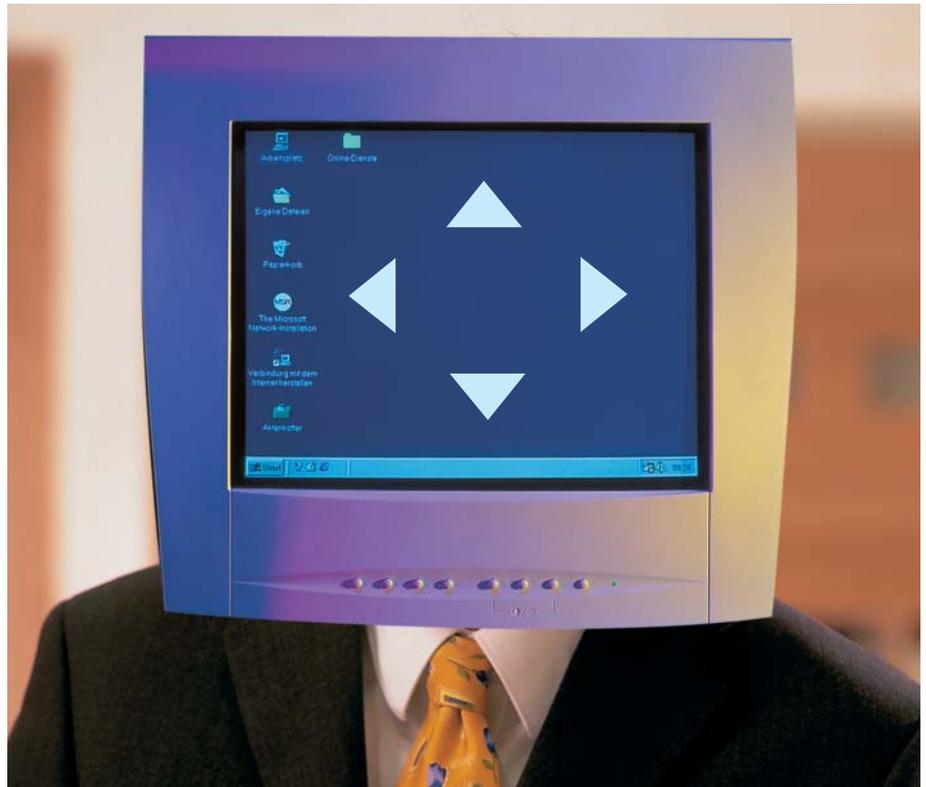
Unternehmensnetzwerke gelten als ideale Organisationsform zur Internationalisierung mittelständischer Unternehmen. Trotzdem ist die Vernetzung auch mit Risiken behaftet, die spezifische Aufgaben der Steuerung im Netzwerk begründen und damit ein Netzwerkmanagement verlangen. Angesichts eines häufigen Scheiterns von Netzwerken stellt sich die Frage, wie ihr Selbstmanagement verbessert werden kann. Hier liegt die künftige Herausforderung für eine anwendungsorientierte Netzwerkforschung. Die Komplexität des Netzwerkphänomens erfordert sowohl einen disziplinübergreifenden Zugang zum Forschungsgegenstand als auch die Anwendung vielfältiger Untersuchungsmethoden. Als Organisationsform zur multidisziplinären und multimethodischen Beantwortung der genannten Forschungsfragen bietet sich wiederum an: ein Netzwerk!

# COMPUTER LENKEN – MENSCHEN DENKEN



Andrew J. Zeller

**Die Informationsverarbeitung übernimmt in Betrieben immer mehr auch strategische und operative Entscheidungen, die früher allein das Management getroffen hat. Nötig sind für solche Funktionen intelligente Produkte und Baugruppen, die eigenständig den Handlungsbedarf erkennen und geeignete Maßnahmen einleiten können.**



## Der Vorstand entscheidet?

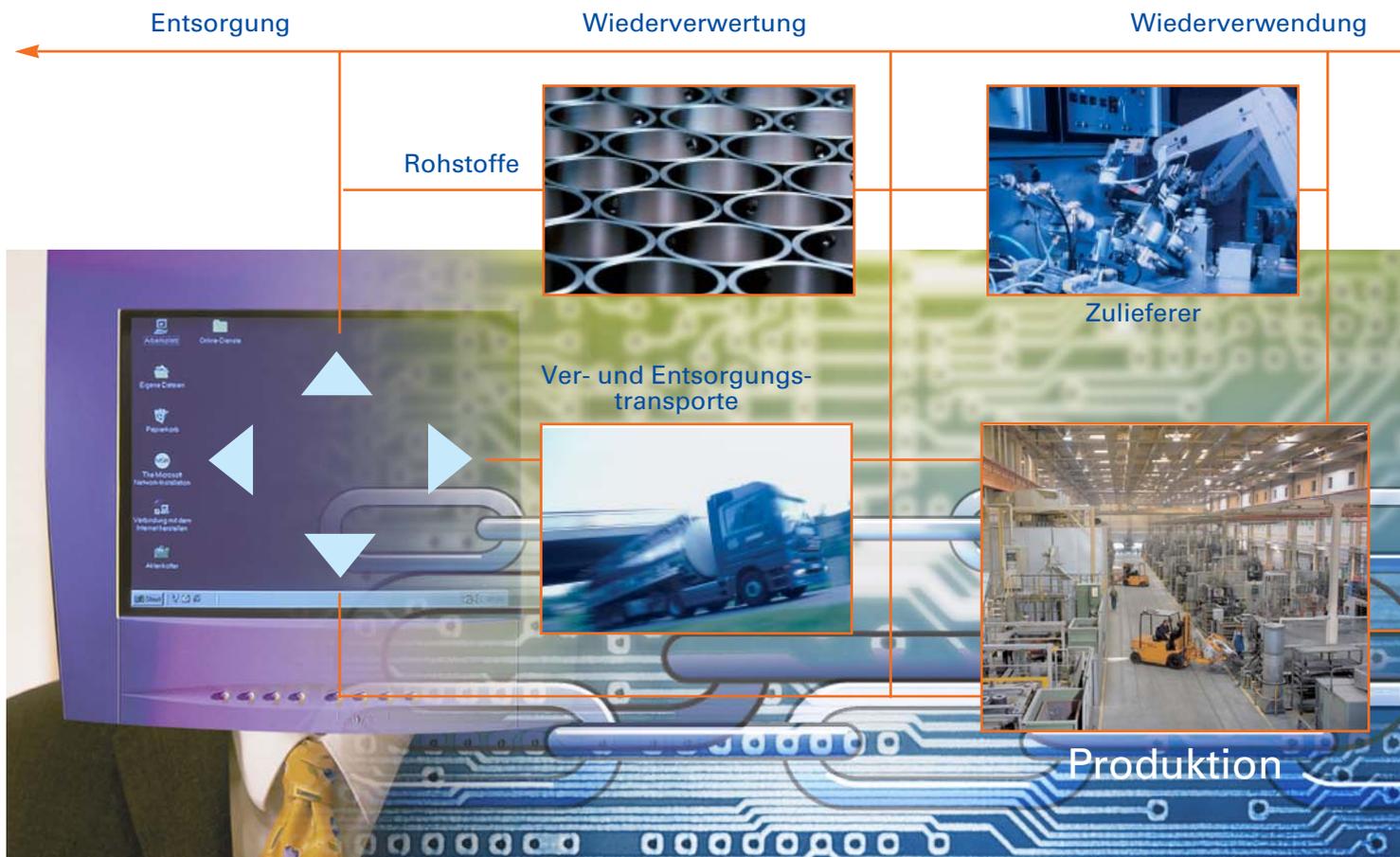
Die Absatzzahlen für das neue Produkt sind in den letzten Monaten ständig gestiegen, auch die Marktforschungsinstitute prognostizieren einen expandierenden Markt. „Steigern Sie die Produktion um 200 Prozent!“ Der Beschluss ist schnell gefasst. Um die zusätzlich benötigten Kapazitäten möglichst sofort bereitzustellen, werden zwei weitere Unternehmen aus dem Netzwerk in Bulgarien und Singapur beauftragt. Eine typische Entscheidungssituation von Vorständen!?

Heute noch – aber schon bald nicht mehr. Im gesamten Liefernetz und bei allen Entscheidungen ist kein menschlicher Aufgabenträger mehr beteiligt. Planung und Steuerung unterliegen einem Heer von Informati-

onssystemen, einem Kollektiv aus Rechnern, mobilen Endgeräten, Sensoren, Datenbanken und Anwendungssoftware. Die einzelnen Glieder der Lieferkette stellen die so genannten Supply-Chain-Objekte dar. Das System-Kollektiv arbeitet selbstständig, rekonfiguriert sich selbst und ist in die Domäne des Top-Managements oder der Vorstände eingezogen.

Rohstoffmärkte, Produktion, Vertriebskanäle und Verkaufsstellen werden ständig überwacht. Externe Unternehmens- und Marktdaten liefert das System automatisch aus dem Internet und wertet regelmäßig Hypothesen zur strategischen Entwicklung des Unternehmensnetzes aus. Es vergleicht die eigenen Leistungen über brancheninterne und

## Computer lenken – Menschen denken



-übergreifende Benchmark-Studien. Steht ein Ziel fest, simuliert das System-Kollektiv alternative Wege und Szenarios, optimiert das Zusammenspiel der beteiligten Unternehmen, Transportdienstleister und Vertriebsstrukturen.

### Das System braucht eine Verfassung

Die grundlegenden Ziele und Verhaltensregeln des unternehmerischen Handelns sind in einem Rahmenwerk festgelegt, der „Netzwerk-Verfassung“. Diese ist vergleichbar mit der politischen Verfassung eines Staates. Die Verfassung schreibt die Grundsätze des Zusammenlebens in der Gesellschaft fest, in deren Rahmen sich das Individuum selbst verwirklichen und seinen Nutzen maximieren kann. In der Netzwerk-Verfassung werden analog dazu die

Marktstrategie (z. B. „so billig wie möglich“) und die Verhandlungsstrukturen zwischen den am Netzwerk beteiligten Partnern und auch externen Unternehmen („maximal 16 % Rabatt“) definiert. Ist einmal eine Einigung darüber zustande gekommen, welche Daten die beteiligten Systeme dem Kollektiv offen legen, agiert das System transparent. Fehlallokationen durch typische menschliche Schwächen, wie Weitergabe unpräziser Informationen oder Verschleierungstaktiken, sind dem System fremd. Ein Zielmarkt wird definiert, als Basis für die weiteren Aktivitäten des Kollektivs. Erst jetzt dürfen die einzelnen Supply-Chain-Objekte autonom agieren.

Die Verfassung ist bei allen Prozessen das „Maß aller Dinge“. Sie definiert die Ziele des Netzwerks, daraus abgeleitet auch die Ziele der beteilig-

ten Unternehmen und nicht zuletzt die der zu erstellenden Produkte. Das System-Kollektiv trifft Tag für Tag viele Entscheidungen. Jede einzelne wird geprüft, ob sie mit den Netzwerkzielen übereinstimmt, sonst entstehen Widersprüche und wirtschaftlicher Schaden. Beispielsweise steht die Marktstrategie „so billig wie möglich“ im Widerspruch zu dem Angebot „Auslieferung so schnell wie möglich, dafür aber teurer“. Das System vergleicht die Entscheidungen mit den Vorgaben der Netzwerk-Verfassung, erkennt den Zielkonflikt und bereinigt ihn.

### Intelligenz auf operativer Ebene

Doch die Automatisierung beschränkt sich nicht nur auf die strategische Management-Ebene. Während des täglichen Arbeitsab-



Rücknahme

Distribution



Verteilungstransporte



Markt

Zusammenspiel in einem  
Supply-Chain-Kollektiv.

laufs kommen intelligente Bauteile und -gruppen zum Einsatz, die eigenständig wissen, wo und wann sie in welches Enderzeugnis eingebaut werden sollen. Damit ist die Produktionssituation immer und überall völlig transparent. Die Baugruppen erkennen und beheben Störungen im Ablauf sofort und methodisch, ähnlich einem Arzt, der die Symptome erfasst, eine Diagnose stellt und anschließend eine Therapie einleitet.

Bricht beispielsweise der Pleuel des Kolbens (Symptom), so erkennt die beteiligte Baugruppe dies und sorgt für Ersatz des fehlerhaften Teils (Symptombekämpfung). Dieses kann nun innerhalb des eigenen Liefernetzes oder aber von einem vollkommen unabhängigen Unternehmen bezogen werden. In einer Art Internet-Branchenverzeichnis sucht

das der Baugruppe übergeordnete Supply-Chain-Objekt automatisch nach einem geeigneten Partner, übermittelt die Spezifikationen der benötigten Teile und die Rahmendaten wie Menge und Lieferzeitpunkt. Kommen für den Bezug mehrere Betriebe infrage, verhandelt das Supply-Chain-Objekt selbstständig nach den Vorgaben der Netzwerk-Verfassung („Lieferung so schnell wie möglich, Preis weitgehend irrelevant, um Kunden doch noch pünktlich bedienen zu können“). Es holt von den verschiedenen Anbietern jeweils Angebote ein und vergleicht sie miteinander. Über die Variation der Rahmendaten, wie Preis, Menge und Lieferzeitpunkt, versucht das System günstigere Konditionen auszuhandeln und prüft diese, bis ein Angebot akzeptiert und der Auftrag vergeben werden kann.

Aber die akute Symptombekämpfung reicht nicht aus, denn es könnte ein systematischer Fehler vorliegen wie etwa ein falsches Material. Deshalb fängt das System gleichzeitig an, nach möglichen Systemfehlern zu suchen. Es analysiert Ursache-Wirkungs-Ketten oder sucht nach ähnlichen Fällen, deren Lösung sich auf das aktuelle Problem übertragen lassen. Tritt ein Fehler gehäuft auf, kann auf die tatsächliche Ursache mit hoher Wahrscheinlichkeit geschlossen werden. Das Kollektiv überprüft die aktuelle Netzstruktur und hält Rücksprache mit der strategischen Planung.

Natürlich beschränkt sich ein solches Szenario nicht auf einen Fehler. Künftig ist durchaus denkbar, dass ein Transport-Container für Südfrüchte das Kühlsystem vollautomatisch steuert, sodass eine Ladung Bana-

---

### Dipl.-Volkswirt Andrew J. Zeller

(geb. 1971) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bayerischen Forschungsverbund Wirtschaftsinformatik, FORWIN, in Nürnberg. Seine Arbeitsgebiete sind Unternehmensnetzwerke, Liefer- und Störungsmanagement sowie Prozess- und Leistungsüberwachung.

---

nen auf dem Weg von Costa Rica nach Deutschland immer die richtige Temperatur hält und nicht verdirbt. Jeder Transportbehälter wäre mit einem Mikrochip ausgestattet, der die Spezifikation der Ware, die Versandmöglichkeiten und den Zielort kennt und mit einem übergeordneten Supply-Chain-Objekt des Transport-Containers kommuniziert. Muss die Lieferung zwischendurch umgeladen werden, erkennt das Dispositionssystem des Lagers den Bestimmungsort der einzelnen Frachtbestandteile. Im neuen Container angekommen, überprüft wiederum der Behälter, ob die Ladung noch ausreichend gekühlt ist.

Das Szenario konsequent weitergedacht, ist auch die Entsorgung des Transport-Containers bereits im Chip vorprogrammiert. Der Container kennt seine Einzelteile und deren Material genau, könnte über eine Internet-Verbindung die jeweils aktuellen Entsorgungsrichtlinien abrufen und bei Bedarf am Ende seiner „Container-Karriere“ den nächstgelegenen Wertstoffhof kontaktieren. Auch der Kühlschrank oder die Waschmaschine wäre auf diese Weise „ökologisch intelligent“ und würde den eigenen „Tod“ bereits zu Lebzeiten organisieren.

### Wo bleibt der Mensch?

So paradiesisch die beschriebenen Szenarios auch klingen mögen: Der Maschine in jeder Situation die Entscheidung zu überlassen ist weder

sinnvoll noch gewollt. So sind die verschiedenen, in die Kette integrierten Bauteile zwar mit einer gewissen Intelligenz ausgestattet, denkfähig sind sie deshalb aber nicht. Ausnahmesituationen, die das Rahmenwerk der Netzwerk-Verfassung nicht abdeckt, lähmen einzelne Supply-Chain-Objekte oder führen zu Fehlhandlungen. Nicht jeder Arbeitsablauf ist eindeutig und durch klare Randbedingungen definiert. Ein erheblicher Teil der täglichen Entscheidungen fällt „aus dem Bauch heraus“, ist Erfahrungswissen eines langjährigen Mitarbeiters und beruht nicht auf Analysen und eindeutiger Logik. Mit unstrukturierten Entscheidungssituationen kann ein solches System nur begrenzt umgehen. Überall dort, wo frei wählbare Alternativen, Risikoabschätzungen oder Unwägbarkeiten die Entscheidung beeinflussen, kommt die Maschine ohne den Menschen nicht aus. Kreativität ist hierbei gefragt – und dies ist noch immer die Domäne des Menschen.

# PRODUKTE UND KUNDEN DAS RINGEN UM BALANCE

Hans Ulrich Buhl  
und Veronica Winkler

**Viele Finanzdienstleister betrachten ihre Kunden zwar als zahlende Abnehmer für ein Produkt, ihre Bedürfnisse bleiben aber mehr oder weniger unberücksichtigt. Dies gilt vor allem für Standardprodukte, zum Beispiel Rentenfonds, Hausfinanzierungen oder Lebensversicherungen. Durch die zunehmende Unsicherheit vieler Verbraucher, wie sich ihre soziale Situation langfristig entwickeln wird, steigt das Bedürfnis nach flexiblen, individuell angepassten Produkten. Für geschickte Anbieter von Finanzdienstleistungen birgt dieser Wunsch große Vorteile im Wettbewerb, wenn es ihnen gelingt, kundenorientierte statt produktorientierte Leistungen anzubieten. Individuelle Anlagevorschläge bergen den Schlüssel zum Erfolg. Intelligente IT-Unterstützung ist dabei unerlässlich.**



**E**ine häufige Situation in der Bank: Der Kunde nennt sein Anliegen, der Berater greift in die Schublade und zieht ein Standardprodukt heraus. Die persönliche Lage, Interessen, Bedürfnisse und Wünsche oder das Umfeld des Kunden bleiben dabei weitestgehend unberücksichtigt. Ob der Kunde das Angebot akzeptiert, hängt von vielen Faktoren ab: Kann er das Angebot nachvollziehen und für gut befinden, bekommt er Verhandlungsspielraum und Alternativen, hat er Vertrauen in „seinen“ Berater? Im Extremfall wechselt er den Anbieter, sofern er sich im Dschungel der Vor- und Nachteile verschiedener Angebote auskennt. Die Leistungen orientieren sich bisher wesentlich stärker am Produkt als am Kunden. Die Kunden erhalten zum Beispiel bei „Beratungsgesprächen“ zur Altersvorsorge oft standardisierte Fonds-Sparpläne oder fondsgebundene Lebensversicherungen. Die Risikobereitschaft, die Risikotragfähigkeit und auch den Liquiditätsbedarf der Kunden zum Zeitpunkt der Beratung berücksichtigen Standardprodukte nur unzureichend. Noch weniger Beachtung wird der Entwicklung dieser Faktoren im Zeitablauf geschenkt, wenn der Kunde beispielsweise eine Familie gründet oder ein Haus baut. Die Folgen der pauschalen Beratungsansätze werden angesichts der

dramatischen Kursrückgänge in den letzten drei Jahren an den Wertpapierbörsen offensichtlich: Die Auszahlung privater Zusatzrenten bleibt weit unter der erwarteten Höhe, wodurch die Finanzierung geplanter, im schlimmsten Fall bereits durchgeführter Investitionen des Kunden zusammenbricht. Viele Kunden fühlen sich von den Finanzdienstleistern alleingelassen und schlecht beraten. Potenzielle Neukunden sind durch die negative Presse verunsichert, Altkunden halten sich mit dem Abschluss neuer Policen zurück. Gerade bei der Altersvorsorge ist das Sicherheitsbedürfnis der Kunden stark ausgeprägt, die Anbieter müssen auf die geänderte Situation reagieren, wenn sie nicht einen Imageschaden und wirtschaftliche Einbußen riskieren wollen.

## **Individuelle Angebote nur für die Reichen**

Lediglich in besonders „wertvollen“ Kundensegmenten, das sind finanzstarke, so genannte „High-Networth-Individuals“ erstellen die Finanzdienstleister bereits heute individuell zugeschnittene Anlagevorschläge.

Individuelle Angebote beruhen auf der ganzheitlichen Financial Planning-Beratung. Ziel des Financial Planning ist, eine individuelle und ganzheitliche Lösung für die finanzielle Situation des Kunden zu finden und diese

## Produkte und Kunden



kontinuierlich der aktuellen Situation anzupassen. Die Beratung ist dadurch aufwändiger, erfordert eine höhere Kompetenz der Berater und ist für die Anbieter kostenintensiver als der Verkauf von Standardprodukten. Eine solche individuelle Beratung samt entsprechenden Angeboten ist bisher einem „elitären“ Kundenkreis vorbehalten. Sollen sie für den Massenmarkt, das heißt für Jeden zugänglich werden, benötigen die Finanzdienstleister IT-Unterstützung für den Beratungsprozess. Sie bietet die Voraussetzung für Individualprodukte zu akzeptablen Preisen.

### „Ökonomische Nischen“ für Finanzdienstleister

Immer mehr Kunden nutzen das leistungsfähige Internet, um für Standard-Finanzdienstleistungen den günstigsten Anbieter herauszufiltern. Online-Broker lockten die Kunden durch den Wertpapierhandel im Internet mit niedrigen Transaktionskosten an. Andere Anbieter mussten nachziehen, Transaktionskosten und Margen sanken beträchtlich. „Klassische“ Finanzdienstleister mit einem weit verzweigten Filialnetz müssen jedoch mit hohen Fixkosten kalkulieren. Für sie ist ein reiner Preiswettbewerb, bei dem sie mit den Online-Brokern konkurrieren, mit hohen wirtschaftlichen Risiken verbunden und keine attraktive Strategie. Ihre Chance liegt vielmehr in der Leistungsdifferenzierung, um der Vergleichbarkeit und damit dem Kostendruck zu entgehen.

Eine Möglichkeit ist, mit Hilfe der Informationstechnologie die Beratungsqualität deutlich zu verbessern. Unterstützt durch den Computer, nutzt ein Finanzdienstleister die Informationen über die Wünsche, Bedürfnisse und Interessen des Kunden, um damit ein individuelles Angebot zu erstellen. Er verschafft sich durch maßgeschneiderte Lösungen einen Vorsprung gegenüber den Konkurrenten. Die Vorteile einer individuellen Beratung, wie sie heute nur High-End-Kunden erfahren, lassen sich so auf eine breitere Kundenklientel übertragen. Mehr Kunden mit ähnlichem Beratungsbedarf rechtfertigen die zunächst teure Entwicklung spezieller Unterstützungsprogramme. Voraussetzung für eine qualifizierte Computer-Unterstützung ist das so genannte Kundenmodell. Dieses spezifiziert, welche Informationen über den Kunden für Beratungen relevant sind und welche Details pro Information abgelegt werden müssen. Zu jeder Information gehört nicht nur der Name und der Wert, sondern auch der Informationsgrad, das heißt ein Maß für die Vollständigkeit der Information.

### Viele Quellen speisen das Kundenmodell

Viele Menschen beschäftigt derzeit die Altersvorsorge. Wie und in welcher Höhe muss ich privat vorsorgen, wenn ich meinen Lebensstandard auch im Ruhestand halten möchte? Ein Kunde, der vor kurzem

in das Berufsleben eingetreten ist, besucht den Webauftritt eines Finanzdienstleisters (Selbstberatung) oder seinen persönlichen Berater bei einer Versicherung, um sich über die Altersvorsorge zu informieren. Sowohl der virtuelle Web-Berater als auch der Berater vor Ort nutzen den gleichen automatisierten Fragebogen, um die Wünsche des Kunden nach seinem Liquiditätsbedarf im Alter und die monatliche Sparrate zu erfahren. Falls notwendig, erfasst das Programm zusätzlich zu bereits vorhandenen Informationen detaillierte Angaben zu seiner Vermögens- und Liquiditätslage, seiner sozialen Situation und seinen Hobbys.

Früher wusste ein Berater durch den intensiven persönlichen Kontakt sehr gut über die Bedürfnisse, Wünsche und Interessen des Kunden Bescheid. Heute ist dies nur noch selten der Fall. Folge ist, dass die Beratungsergebnisse nicht mehr für den Kunden adäquat sind. Diese Aufgabe übernimmt das Kundenmodell, das aus vorhandenen Informationen Rückschlüsse über die Bedürfnisse, Interessen und Wünsche des Kunden ziehen kann.

Die Daten stammen aus unterschiedlichen Quellen und füttern eine Datenbank, die gemäß dem Kundenmodell aufgebaut ist (siehe Grafik oben). Neben der persönlichen Befragung dient als Informationsquelle auch das so genannte „Webtracking“, das den Weg, den ein Kunde durch die Internetseiten nimmt und seine



Aktionen auf den Webseiten nachvollzieht. Unternehmensdatenbanken, die Informationen über den Kunden aus anderen Beratungsvorgängen enthalten, geben weiteren Aufschluss über dessen Vorlieben und Interessen. Verwertbare Auskünfte über die Risikobereitschaft des Kunden erhält der Berater zum Beispiel über den Anteil riskanter Anlagen am Gesamtvermögen oder bisher getätigte Aktiengeschäfte.

### Maßgeschneiderter Anlagevorschlag

Aus den Informationen ermittelt der Computer ein Kundenprofil und erstellt anschließend einen maßgeschneiderten Anlagevorschlag. Die Beratung ist kein einmaliger Vorgang, sondern ein iterativer Prozess. Wächst beispielsweise die Familie des Kunden oder ändert sich die Vermögenslage durch eine Erbschaft oder Arbeitslosigkeit, werden die gespeicherten Informationen aktualisiert und gegebenenfalls die Anlagen der neuen Situation angepasst.

Kunden individuell zu betrachten, durchbricht das „normale“ Denkschema in Kundensegmenten. Gerade Informationen zu Details oder Besonderheiten eines Kunden, die sonst durch die Segmentierung verloren gehen, fließen jetzt in die Beratung ein. Ist beispielsweise bekannt, dass ein Kunde Immobilien- oder High-Tech-Fonds völlig ablehnt, bezieht ein geschickter Berater diese Produkte erst gar nicht in seinen An-

lagevorschlag ein. Die klassische Segmentierung und standardisierte Angebotserstellung berücksichtigt solche Vorlieben oder Abneigungen nicht. Folglich enthält der Anlagevorschlag oft unerwünschte oder ungeeignete Produkte, und der Kunde ist entweder schon jetzt unzufrieden mit der Beratung oder später, wenn potenzielle Risiken wirklich eingetreten sind. Prozesse um die Beraterhaftung gerade im letzten Fall sind keine Seltenheit.

### Effizient und individuell

Marktübliche Beratung legt einem Angebot oft nur Rendite und in Ausnahmefällen noch Risiko zugrunde. Der Kunde verfolgt aber häufig ganz andere Ziele wie Flexibilität, Verwaltbarkeit und Nachvollziehbarkeit der im Anlagevorschlag enthaltenen Produkte. Für einen Kunden, der seine Anlagen selbst verwalten möchte, können beispielsweise der leichte Zugang zum Depot und der Handel über das Internet wichtig sein. Eine gute Beratungssoftware berücksichtigt diese Bedürfnisse und Wünsche. In

zwei Schritten ermittelt die Software einen individuellen Anlagevorschlag: Im ersten Schritt stellt das Programm fest, wie viele Lösungen (Produkte und Produktkombinationen) effizient sind. Lösungen sind dann effizient, wenn kein Ziel (zum Beispiel die Rendite) verbessert werden kann, ohne mindestens ein anderes (zum Beispiel das Risiko) zu verschlechtern. Diese Vorgabe reduziert die Anzahl möglicher Anlagevorschläge in der Regel auf etwa 3 % aller möglichen Produktkombinationen.

Zum Vergleich: Die von Finanzdienstleistern derzeit angebotenen Standardprodukte sind meist nur zufällig hinsichtlich Rendite und Risiko effizient. Wissenschaftliche Studien und Umfragen der Stiftung Warentest zur Beratungsqualität bei Immobilienfinanzierungen ergaben, dass die Testpersonen nur in jeder vierten Filiale gut beraten wurden.

Im zweiten Schritt vergleicht das Beratungsprogramm die effizienten Lösungen mit den Informationen aus dem Kundenmodell und wählt die Vorschläge aus, die den Bedürfnis-



---

**Prof. Dr. Hans Ulrich Buhl** (geb. 1955) ist Inhaber des Lehrstuhls für Betriebswirtschaftslehre, Wirtschaftsinformatik und Financial Engineering und wissenschaftlicher Leiter des Kernkompetenzzentrums Informationstechnologie & Finanzdienstleistungen an der Universität Augsburg. Außerdem ist er Forschungsgruppenleiter im Bayerischen Forschungsverbund für Situierung, Individualisierung und Personalisierung in der Mensch-Maschine-Interaktion, FORSIP. Seine Forschungsschwerpunkte im Bereich der Wirtschaftsinformatik sind Informationssysteme in Finanzdienstleistungsunternehmen und die betriebliche Finanzwirtschaft von Industrieunternehmungen.

**Diplom-Kauffrau Veronica Winkler M. Sc.** (geb. 1979) ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl von Prof. Buhl. Sie befasst sich mit der systemtechnischen Umsetzung von kundenzentrischen Informations- und Beratungssystemen im Bereich des Financial Planning und Financial Engineering.

---

sen, Wünschen und Interessen des Kunden am besten entsprechen. Der Kunde erhält mehrere Anlagevorschläge mit unterschiedlichen Gewichtungen für die verschiedenen Ziele. So erhält ein Kunde, dem Flexibilität besonders wichtig ist, weil er eventuell bereits früher als geplant in den Ruhestand gehen möchte, einen Anlagevorschlag, mit dem er früher auf das angesparte Geld zugreifen kann und der keine Produkte mit einem Mindestsparzeitraum enthält.

Die meisten Menschen können ihre Bedürfnisse, Wünsche und Interessen nicht in exakten Zahlen angeben. Das Beratungsprogramm berechnet die Anlagevorschläge deshalb auf der Basis von Wertebereichen für die Ziele des Kunden: Dadurch erhält der Kunde einen Spielraum für seine Auswahl, da ihm der Berater mehrere Anlagevorschläge unterbreiten kann, die hinsichtlich der Ziele im vorgegebenen Wertebereich liegen.

### **Risikobereitschaft = Risikotragfähigkeit?**

Gute Berater unterscheiden bei der Auswahl von Anlagevorschlägen für den Kunden zwischen dem Risiko, das der Kunde aufgrund seiner familiären und finanziellen Situation eingehen kann (Risikotragfähigkeit) und dem Risiko, das einzugehen er bereit ist (Risikobereitschaft). Besonders wichtig ist dabei, dass der Kunde die Unterschiede zwischen Vorschlägen, die seiner Risikotragfähigkeit, und Lösungen, die seiner Risikobereitschaft entsprechen, versteht. Ein Kunde mit geringer Risikotragfähig-

keit, kann zum Beispiel seinen Lebensstandard im Ruhestand in keiner Weise aufrechterhalten, wenn seine Versorgungslücke nicht gedeckt wird. Daher ist es sinnvoll, ihm nur Anlagevorschläge zu unterbreiten, durch die er seine Versorgungslücke mit hoher Wahrscheinlichkeit deckt.

### **Objektive contra subjektive Beratung**

Beratungssysteme berücksichtigen nicht nur die Bedürfnisse, Wünsche und Interessen der Kunden, sondern sind bei ihren Vorschlägen auch objektiv: Sie beziehen alle Produkte und Produktkombinationen gleichermaßen in ihre Berechnungen ein. Berater im Finanzdienstleistungsbereich bevorzugen dagegen häufig bestimmte Produkte, über die sie am meisten Fachwissen besitzen oder für die sie höhere Provisionen erhalten. Die selektive Auswahl vermittelt dem Kunden ein verzerrtes Bild von den möglichen Anlagealternativen, das die persönlichen Kenntnissen und Vorlieben des Beraters widerspiegelt, nicht aber den Bedürfnissen, Wünschen und Interessen des Kunden entspricht.

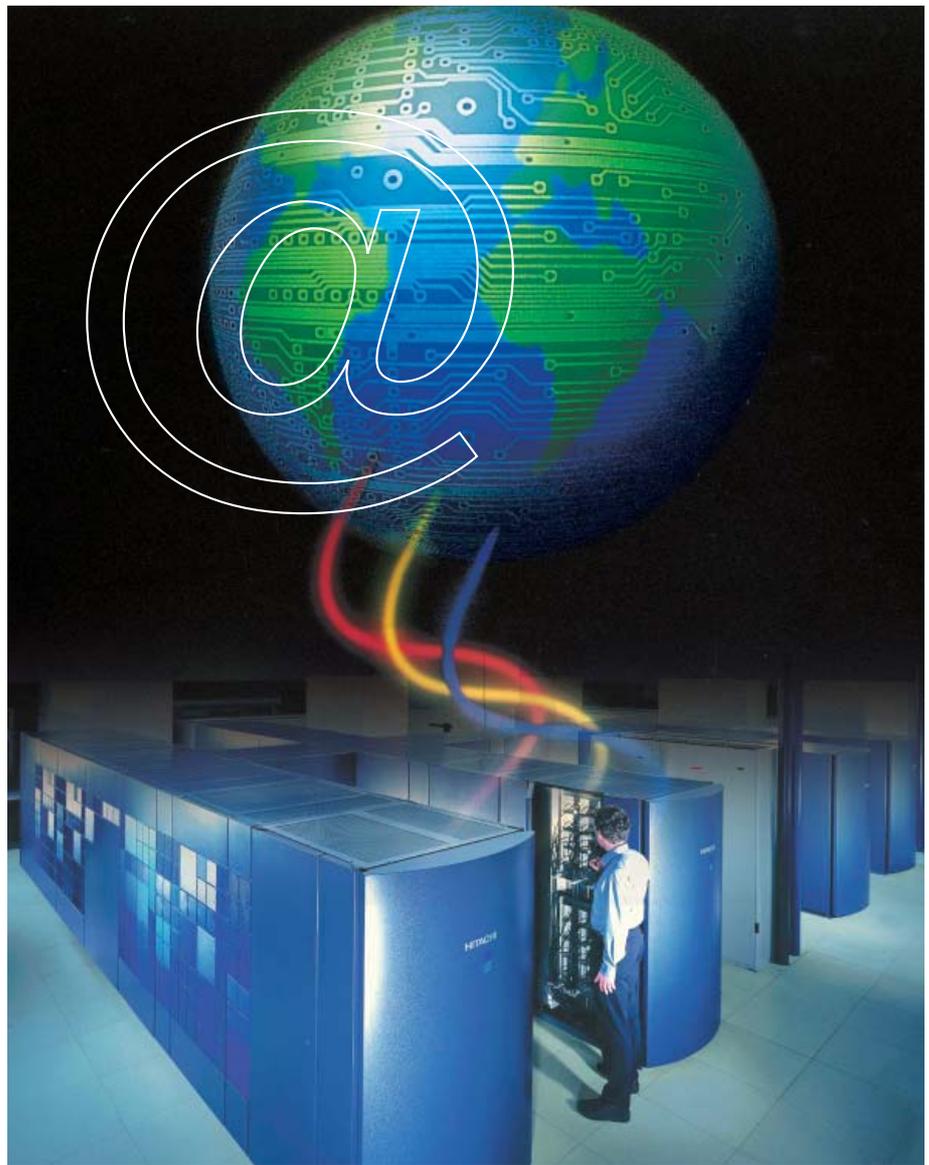
Das Kundenmodell hilft, die Befragung zu strukturieren und dabei keinen wichtigen Aspekt aus den Lebensumständen und Plänen des Kunden zu vergessen. Eine gute Beratungssoftware sichert eine qualitativ hochwertige und konsistente Beratung für alle Kunden unabhängig vom Berater.

# DEM GEHEIMNIS DES LEBENS AUF DER SPUR

„Rechner aller Länder, vereinigt euch!“

Harald Meier und Arndt Bode

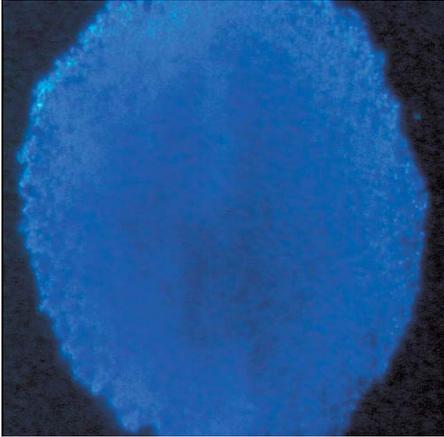
**Informatiker greifen künftig auf „brachliegende“ Rechnerkapazitäten im World Wide Web zurück! Die Bioinformatik erzeugt Massendaten, für deren Analyse die Rechenleistung herkömmlicher Computer nicht mehr ausreicht, deshalb rückt die Entwicklung und Parallelisierung hocheffizienter Algorithmen ins Rampenlicht. Stammbäume des Lebens, die aus molekularen Informationen ganzer Genome berechnet werden, gewähren uns tiefe Einblicke in die Entwicklungsgeschichte der Organismen. Simulationen erlauben perfekte Vorhersagen über die Proteinfaltung und helfen, Medikamente schneller zu entwickeln. Der enorme Wissenszuwachs wird insbesondere die Bereiche Biotechnologie, Pharmazie und Medizin revolutionieren.**



## Vier Basen schreiben das Leben

Die gesamte genetische Information – und damit die Voraussetzungen für unsere Existenz ebenso wie die aller Lebewesen auf unserem Planeten steckt in nur vier unterschiedlichen so genannten Basen. Ähnlich der Punkte und Striche im Morsealphabet legt die Reihenfolge dieser Ba-

sen im DNS-Strang fest, welche Proteine gebildet werden. Drei Basen codieren immer eine der 20 essenziellen Aminosäuren, aus denen die Proteine bestehen. Seit 1950 war der Aufbau der DNS aus den 4 Basen bekannt, 3 Jahre später entwickelten Watson und Crick das berühmte Helixmodell für die DNS. 15 Jahren später waren bereits die



**Eine Bakterienkolonie von 0,3 Millimetern im Durchmesser fluoresziert blau nach Bindung eines Farbstoffes an das Erbgut der Bakterien.**

wesentlichen Fakten über den genetischen Code bekannt: die Übersetzung der in der DNS gespeicherten Information in die Proteine. Damit begann die mühsame Kleinarbeit, die Basenanordnung der DNS zu analysieren und parallel dazu die Aminosäuresequenzen der Proteine. Vor 20 Jahren waren in öffentlichen Datenbanken wie in der Nukleinsäuredatenbank des European Molecular Biology Laboratory (EMBL) etwa 600 DNS-Sequenzen mit etwa einer halben Million Basen gespeichert.

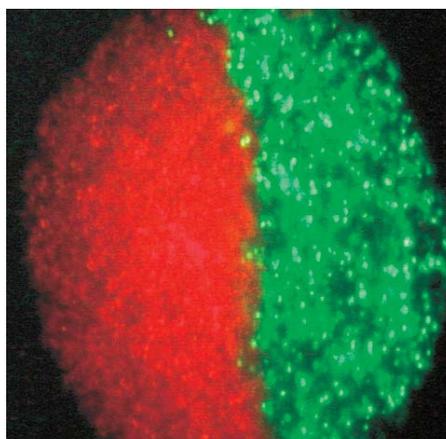
Zu diesem Zeitpunkt war den Molekularbiologen klar, dass Computer und die geeignete Software bei der Analyse von DNS und Proteinsequenzen die Ermittlung der biologisch wichtigen Informationen stark erleichtern, in vielen Fällen sogar erst ermöglichen würde.

Spätestens seit Automaten die Sequenzierung der DNS übernehmen, wird das Problem, die zunehmende Datenflut zu beherrschen und sinnvoll auszuwerten, evident.

### Das Leben erzeugt Massendaten

Diese Datenmenge hat sich in 20 Jahren um das 40 000-fache vergrößert und wird weiterhin exponentiell anwachsen. Mittlerweile liegen mehr als 13 Millionen Proteinsequenzen vor. Derzeit sind die Genome von 145 Organismen (Eukaryonten, Bakterien, Archaeobakterien), das menschliche Genom eingeschlossen, und bereits über 1 000 Viren genome bekannt. Aktuell arbeiten Wissenschaftler weltweit an rund 600 weiteren Genomprojekten. Darunter befinden sich auch viele Krankheitserreger, wie zum Beispiel *Entamoeba histolytica*, der Verursacher der Amöbenruhr, an der jährlich weltweit etwa 50 Millionen Menschen erkranken.

Die Analyse der DNS und die Zuordnung der Basen zu Genen und Proteinen reicht jedoch nicht aus, um dem Geheimnis des Lebens ein Stück weiter auf die Spur zu kommen. Wir müssen wissen, welches Gen wann aktiv ist und wie viele



**Dieselbe Kolonie wie oben. Ein auf Gensonden basierendes Nachweisverfahren erkennt zwei unterschiedliche Bakterienarten.**

Proteine in welcher Menge in den Zellen vorliegen, wenn beispielsweise ein Mensch an Krebs erkrankt. Aus diesen Informationen können neue Medikamente entwickelt werden, um speziell diese Krebsart zu bekämpfen, vorausgesetzt, es gibt ein identifizierbares Gen, das für den Ausbruch der Krankheit verantwortlich ist. Mit diesen Fragen beschäftigt sich die funktionelle Genomanalyse. Hierbei werden aktive Zellen untersucht – und weitere Massen an Daten erzeugt: so genannte Transkriptom- und Proteomdaten.

Transkriptome zeigen die Genaktivität von Zellen oder Organismen als molekulare Momentaufnahmen. Bevor Gene in Proteine „übersetzt“ werden, müssen sie kopiert werden. Transkriptom-Panoramabilder zeigen, welche Gene gerade in abgeschriebener Form vorliegen und wie viele Kopien angefertigt wurden. Proteomdaten sind ebenfalls molekulare Schnappschüsse, die aber einen Gesamtüberblick darüber geben, welche Proteine in welcher Menge in einer Zelle oder einem Organismus gerade enthalten sind.

Zu dieser Fülle an Informationen gesellen sich Strukturdaten biologischer Moleküle und andere beschreibende biologische Daten. Die experimentelle Erzeugung von Massendaten ist schon fast zu einem geringen Problem geworden gegenüber der umfassenden, vergleichenden Verarbeitung und Analyse der Daten. Das ist Aufgabe und Herausforderung der Bioinformatik.



### Aufgabe der Bioinformatik

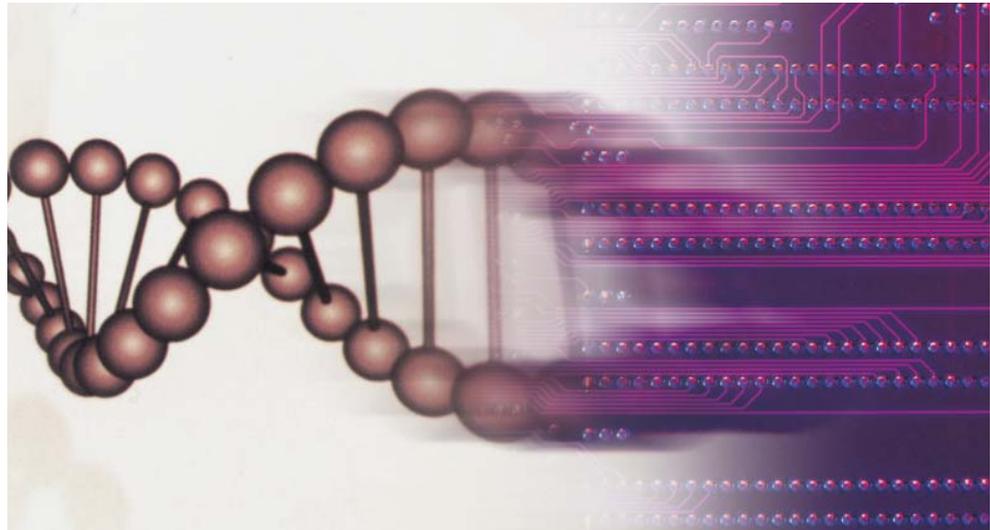
Die Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen betreffen besonders zwei Bereiche: die Lösung der biologisch-biochemischen Probleme und die Bereitstellung der notwendigen Rechenleistung.

Die speziellen Aufgaben in der Bioinformatik erfordern hocheffiziente, angepasste Algorithmen. Um diese zu entwickeln, müssen Experten aus der Biologie oder der Biochemie mit Spezialisten für paralleles und verteiltes Rechnen zusammenarbeiten. Die hochkomplexen Programme sind nur dann leistungsfähig, wenn sie in der Lage sind, das gewaltige Rechenpotenzial von Hochleistungsrechnersystemen effizient auszunutzen. Wahrscheinlich werden für einzelne Aufgaben sogar spezielle Supercomputer gebaut werden müssen.

Neben Hochleistungsrechnern kommt zunehmend eine neue Art der Zusammenarbeit zwischen Computern zum Einsatz, die so genannten Computer-Grids. Das können sowohl große WWW-Netzwerke aus Heimcomputern als auch Zusammenschlüsse von Hochleistungsrechnern, die ultraschnelle Leitungen verbinden, sein.

### Algorithmen für die Massendaten

Die Analyse eines einzelnen Genoms für sich ist wenig aufschlussreich. Entscheidend ist, die Unterschiede zwischen den einzelnen Genomen herauszuarbeiten und konsequent Kapital aus diesem Wissen zu schlagen. Zum Beispiel möchten Pharma-



zeuten und Mediziner neue Ansatzpunkte für neue Medikamente erhalten. Wichtig ist dann, Gene zu finden, die beispielsweise nur in einem Krankheitserreger und nicht im Menschen vorkommen. Hochwertige Suchergebnisse erzielt ein Rechner nur dann, wenn er die Ergebnisse funktioneller Analysen mit einbeziehen kann. Wenn ein Gen Zielkandidat für ein neues Medikament sein soll, müssen Transkriptom- und Proteomdaten Aufschluss darüber geben, wann und unter welchen Bedingungen dieses Gen aktiv ist.

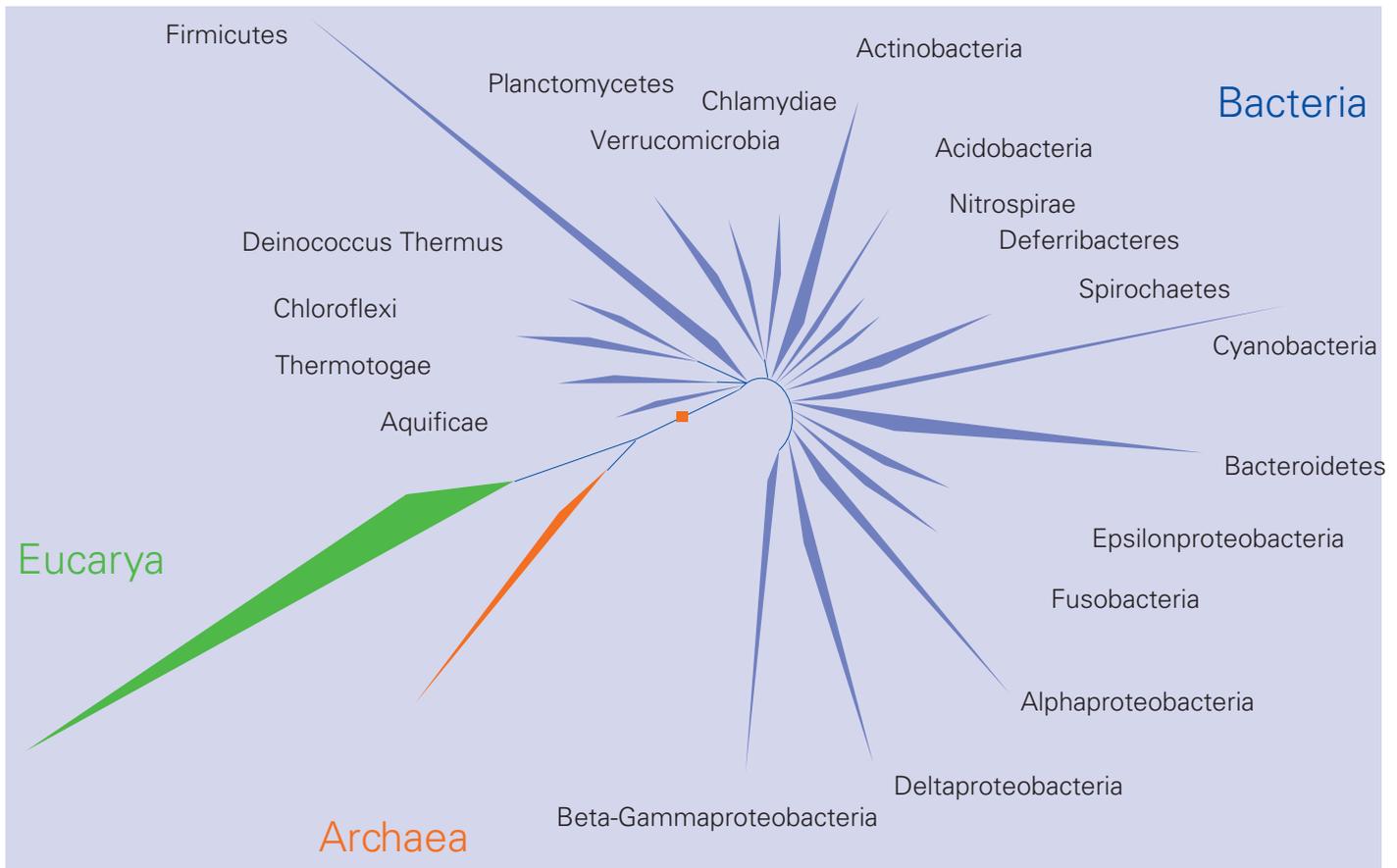
Bioinformatiker entwickeln zukünftig Algorithmen, die Genomdaten vergleichend auswerten und die vorhandenen Transkriptom- und Proteomdaten einbeziehen. Hochleistungsrechner müssen die daraus entwickelten Computerprogramme effizient ausführen können. Die gewaltige Menge an experimentellen Daten verlangt, dass die Genom-, Transkriptom- und Proteomdaten über die ganze Welt verteilt gespeichert werden. Verteilte Rechensys-

teme wie Hochleistungsrechnerverbünde führen dann vergleichende funktionelle Genomanalysen durch. Aus derartigen Hochleistungsanalysen können Wissenschaftler oder auch Computer mehrschichtige Strategien entwickeln, um Krankheitserreger oder sogar Epidemien zu bekämpfen. Der Genomvergleich zwischen dem gefährlichsten Malariaerreger (*Plasmodium falciparum*), seinem Überträger (Stechmücke *Anopheles gambiae*) und dem Menschen wird beispielsweise neue Ansatzpunkte liefern, wie die Infektion effektiver behandelt oder sogar die Übertragung auf den Menschen verhindert werden kann.

### Ahrentafeln aus Genomen

Die vergleichende Genomanalyse legt verwandtschaftliche Beziehungen und evolutionäre Entwicklungen offen. Wissenschaftler rekonstruieren heute Stammbäume, indem sie die Sequenzen einzelner, homologer Gene von unterschiedlichen Organismen, das sind Gene mit einem ge-

## Dem Geheimnis des Lebens auf der Spur



**Stammbaum des Lebens, berechnet aus den Gensequenzen für die Ribonukleinsäure (RNA) der kleinen Untereinheit der Ribosomen.**

meinsamen Vorfahren und der gleichen Funktion, miteinander vergleichen. Diese Methoden sind so rechenintensiv, dass die Rekonstruktion eines umfassenden Stammbaumes des Lebens aus einigen tausend Organismen bereits Höchstleistungsrechner erfordert. Berechnet man einen Stammbaum mit 1 000 Organismen aus den Sequenzen ein- und desselben Gens, das aus jeweils 1 800 Basenpaaren zusammengesetzt ist, sind bereits mehrere hundert Milliarden Rechenschritte notwendig, selbst wenn bestimmte Wahrscheinlichkeitsregeln die Anzahl der Vergleichsoperationen reduzieren. Im Forschungsverbund KONWIHR befasst sich das Projekt PARBAUM mit diesem Problem. Neue oder optimierte existierende, parallele Algorithmen sind in der Lage, umfassende Stammbäume des Lebens, die aus 20 000 und

mehr Organismen bestehen, zu berechnen. Der Hochleistungsrechner Hitachi SR8000 am Münchener Leibniz-Rechenzentrum leistet die eigentliche Rechenarbeit.

### „Vaterschaftstest“ für Bakterien

Dann ist es kein Problem mehr, Krankheitserreger schnell zu identifizieren, unbekannte Mikroorganismen einzuordnen und festzustellen, wie gefährlich sie sind.

Das moderne Klassifikationssystem für Bakterien und andere Mikroorganismen beruht auf der Ähnlichkeit einer ganz bestimmten Gensequenz. Der Vergleich lässt sofort erkennen, wohin ein unbekannter Keim gehört. Der Arzt kann beispielsweise anhand molekularer Analysen von Schleimproben mit anschließender Stammbaumberechnung entscheiden, ob sein Patient mit Myco-

bakterium tuberculosis infiziert ist, also eine Lungentuberkulose hat, oder ob eine Lungenentzündung durch Streptococcus pyogenes vorliegt.

Diese Methode ist leider nicht so genau, dass sie zwischen nahe verwandten Bakterienstämmen unterscheiden kann, etwa einem nicht pathogenen Stamm von Escherichia coli, einem gewöhnlichen Darmbakterium, und dessen krankheitserregender Variante, die schwere Darmblutungen hervorruft.

In wenigen Jahren fließen jedoch ganze Genome in die Stammbäume ein. Der Informationsgehalt dieser umfassenden Stammbäume des Lebens reicht aus, um das verwandtschaftliche Verhältnis feinst verästelt darzustellen. Die vergleichenden Analysen von rekonstruierten Stammbäumen werden die Klassifikationssysteme für Lebewesen er-



heblich verbessern und neue Erkenntnisse über die Entwicklungsgeschichte liefern. Die Daten legen nicht nur offen, welche heute lebenden Organismen einen gemeinsamen Vorfahren haben, sondern auch, zwischen welchen Organismen Erbmaterial ausgetauscht wurde, welche Gene und Eigenschaften damit verbunden sind und welche Organismen diese fremden Eigenschaften besitzen. Zu wissen, woher ein krankheitserregendes Gen stammt, ist ein großer Gewinn für die Medizin. Die Sequenzdaten eines unbekannten Bakteriums liefern nicht nur die Identität, sondern lassen auch Schlüsse auf dessen pathogenes Potenzial zu. Das Fernziel der Forschungsaktivitäten ist, aus den Informationen Strategien abzuleiten, um den vermeintlichen Krankheitserreger gezielt zu bekämpfen.

Sind die Unterschiede zwischen den Genomen einzelner Organismen bekannt, können auch hochaufgelöste und spezifische Nachweismethoden für Mikroorganismen in komplexen Systemen, wie Lebensmittel- und Umweltproben entwickelt werden.

Die Berechnung von Stammbäumen aus Genomdaten erfordert

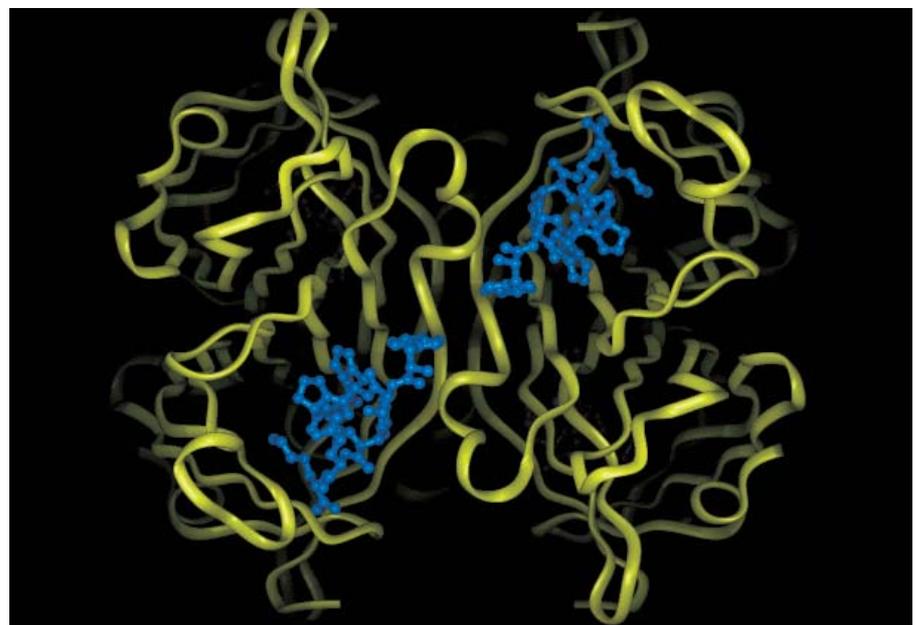
neue Algorithmen, die effiziente Heuristiken enthalten, das heißt methodische Verfahren für eine beschleunigte Problemlösung. Supercomputer müssen diese Algorithmen verarbeiten können und nutzen dafür die Ressourcen aller Rechner im World Wide Web. „Paralleles Rechnen“ heißt die Zukunft der Massendatenverarbeitung. Zwei Wege sind möglich: Entweder werden viele Rechner beauftragt, die gleichen Operationen mit unterschiedlichen Daten durchzuführen, oder die Rechner bearbeiten unterschiedliche „Arbeitspakete“ eines großen Programms.

### Medikamente gegen verdächtige Gene

Heute können Jahrzehnte vergehen, bis ein Medikament gegen ein verdächtiges Gen auf den Markt kommt und das trotz Unterstützung durch große Computersysteme. Die Hilfe

der Bioinformatik soll die Suche nach eindeutigen Unterschieden in den Genomen zielgerichteter gestalten. Doch auch dies reicht nicht, denn das „individuelle“ Gen muss als Ziel für Medikamente auch geeignet sein. Deshalb ist es wichtig, herauszufinden, ob und unter welchen Bedingungen es vom Zielorganismus hergestellt wird. Umfassende Analysen der experimentell ermittelten Transkriptom- und Proteomdaten sind notwendig.

Die Proteinsequenz gibt nur die Reihenfolge der Aminosäuren wieder. Die eigentliche Funktion eines Proteins entsteht aber erst durch die korrekte Faltung der Aminosäurekette in eine dreidimensionale Struktur. Superrechner können dann Interaktionen mit Wirkstoffen oder potenziellen Medikamenten simulieren: Wirkstoffe werden schneller getestet, Medikamente schneller entdeckt.



**3D-Struktur eines Protein/Liganden Komplexes. Hier haben zwei Peptidliganden an Bindungstaschen im gefalteten Streptavidin angedockt.**

Bild: Prof. Arne Skerra (Lehrstuhl für biologische Chemie, TU-München)

---

### **Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. habil. Arndt Bode**

(geb. 1948) leitet den Lehrstuhl für Rechner-technik und Rechnerorganisation (LRR TUM) an der Technischen Universität München. Er ist Vizepräsident der TU München und Sprecher des Kompetenznetzwerks für Technisch-Wissenschaftliches Hoch- und Höchstleistungsrechnen in Bayern, KONWIHR. Seine Forschungsschwerpunkte sind: Technische Informatik, Rechnerarchitektur, parallele und verteilte Systeme, Programmierwerkzeuge, verteilte Anwendungen, Supercomputing.

### **Dr. rer. nat. Dipl. biol. Harald Meier**

(geb. 1962) leitet die Arbeitsgruppe Angewandte Hochleistungsbioinformatik am Lehrstuhl für Rechner-technik und Rechnerorganisation (LRR TUM) der TU München. Sein Forschungsgebiet umfasst die Berechnung von molekularen Stammbäumen auf Höchstleistungsrechnern, Entwurf und Analyse von DNA-Microarrays, Design von Gensonden im Großmaßstab und vergleichende Analysen bakterieller Genome.

---

## Die Falten der Proteine

Eine hohe Herausforderung für die Hochleistungsbioinformatik ist deshalb die Vorhersage und Simulation der korrekten Faltung von Proteinen aus ihrer Aminosäuresequenz. Obwohl für die dreidimensionale Anordnung der Aminosäuren bestimmte Gesetzmäßigkeiten gelten, haben die einzelnen Bauteile immer noch nahezu unvorstellbar viele Möglichkeiten, sich im Raum auszurichten. Die ablaufende Faltung in „Zeitlupe“ zu sehen, bedeutet einen immens hohen Rechenaufwand. Der Aufwand wird sich trotzdem lohnen. Zunächst möchten die Wissenschaftler Faltungsprozesse und die daran beteiligten Zellmoleküle und -strukturen grundlegend verstehen lernen. Erst dann kann die gezielte Suche nach Möglichkeiten beginnen, wie krankhafte Fehlfaltungen verhindert oder sogar wieder rückgängig gemacht werden können.

Neu entwickelte, parallele Rechensysteme mit derzeit etwa 70 000 Prozessoren bis hin zu einer Million Prozessoren, wie sie IBM im Blue Gene Projekt plant, sollen in der Lage sein, mehr als nur Momentaufnahmen von etwa einer milliardstel Sekunde zu simulieren. Wissenschaftler an der Stanford University (Palo Alto, Kalifornien) verfolgen eine andere Strategie. Im Projekt Folding@home verwenden sie einen speziell entwickelten Algorithmus, der die Rechenkapazität von privaten Rechnern nutzt, die am World Wide Web angeschlossen sind. Heute können die Rechner nur die Faltung kleiner Proteine (weniger als 40 Ami-

nosäuren) oder einzelner Abschnitte großer Proteine zeitaufgelöst berechnen.

Dennoch sind die Wissenschaftler zuversichtlich, dass in einigen Jahren neue Algorithmen entwickelt sind, die eine große Proteinstruktur und deren hochaufgelöste simulierte Faltung sicher aus der bloßen Gensequenz vorhersagen. Sie werden in der Lage sein, alle verfügbaren Daten unabhängig von dem Dateiformat für solche Berechnungen zu verwenden. Vorausgesetzt, dass Supercomputer in einem weltweiten Netz über speziell entwickelte, parallele Programme zusammenarbeiten, könnte auch die Faltung großer Proteine vollständig berechnet werden.

Falsch gefaltete Proteine lösen bisher noch unheilbare Krankheiten wie Alzheimer und BSE aus. Gekoppelte Simulationen von Proteinfaltung und Docking lassen hoffen, dass sie doch geheilt werden können. Gelingt es, Wirkstoffe zu finden, die die Faltung des Proteins in die krankmachende, „falsche“ Struktur blockieren, oder eine Faltung in die „gesunde“ Struktur fördern, sind Heilungschancen greifbar.

Ohne Hochleistungsrechnen und das Zusammenwirken verschiedenster Experten wären diese Ziele nur ein schöner Traum. Die noch junge Wissenschaft Bioinformatik stellt sich der Herausforderung und weiß, dass sich das Engagement für alle mehr als bezahlt machen wird.

# INDIVIDUELLE PRODUKTE – IN SERIENFERTIGUNG



Udo Lindemann

**Individuelle Lösungen stehen im Wettbewerb mit Massenprodukten. Neue Technologien erlauben zunehmend die Herstellung von kleineren Stückzahlen zu immer noch wettbewerbsfähigen Kosten. Dadurch gewinnen individualisierte Produkte zunehmend Marktchancen, allerdings müssen die Entwicklungskosten deutlich gesenkt werden. Dafür sind qualifizierte Mitarbeiter erforderlich, die mit modernen Methoden unter Nutzung von geeigneten Rechnerwerkzeugen für eine schnelle Realisierung qualitativ hochwertiger und kostengünstiger Produkte beitragen.**



**Z**unehmend kürzere Produktzyklen, kürzere Entwicklungszeiten sowie sich rasch wandelnde Technologien und Märkte setzen Maschinen- und Fahrzeugindustrie und andere Branchen bei der Produktentwicklung unter großen Druck. Zusätzlich erfordern hohe Personalkosten aber auch der häufige Mangel an qualifiziertem Nachwuchs Rationalisierungsmaßnahmen.

Erleichterung verschaffte zunächst die Informationstechnologie: Die dreidimensionale Konstruktion am Bildschirm, Simulationsverfahren zu Bauteil- und Systemverhalten und generierende Fertigungsverfahren ermöglichten den Entwicklern, ihre Produkte und Produktionsprozesse deutlich zu verbessern. Viele dieser Aufgaben werden mittlerweile weitgehend parallel durchgeführt.

Während die Entwickler noch an den Details der Gussteile feilen, bereitet der Modellbauer bereits die Gussmodelle vor. Auch diese organisatorischen Ansätze unterstützen Computer, wie zum Beispiel das Produktdatenmanagement.

## **Weniger Anbieter – mehr Produkte**

Die Unternehmen reagierten auf den immer weiter steigenden Druck oft mit Verdrängungswettbewerb und Fusionen. Konzerne mit hoher Finanzstärke und große Stückzahlen sollten den Vorsprung im Kampf um eine gute Marktposition sichern. Oft waren preiswerte, standardisierte Massenprodukte das Ergebnis.

Die Zahl der Anbieter am Markt sank, die Zahl der unterschiedlichen Produkte und Produktvarianten stieg bei den überlebenden Unternehmen.

Variantenreiche Produkte sollten die Kunden locken, die Attraktivität des Angebots erhöhen. Gleichzeitig wurden die Entwicklungsprozesse durch die Produktvielfalt komplexer, denn alle zugelassenen Ausstattungsvariationen, zum Beispiel für Autos, müssen im Einsatz ihre Funktion fehlerfrei erfüllen. Ähnliche Veränderungen erfuhren auch andere Prozessbereiche: die Logistik, die Montage oder der Service.

### Nicht von der Stange

Varianten alleine befriedigten die Wünsche bei etlichen Kunden jedoch nicht. Sie forderten individuelle oder zumindest in Teilbereichen individualisierte Produkte. Die Unternehmen reagierten: Zum Beispiel bieten Hersteller von Produktionsmaschinen über das normale Standardprogramm hinaus zusätzliche Aggregate an, die die Rüstzeiten reduzieren. Selbstverständlich liefern sie dem Kunden gemäß seinen Vorstellungen eine spezielle Ausführung der Maschinenüberwachung – also eine individualisierte Lösung.

Das Bedürfnis nach dem individuellen, einmaligen Gerät macht auch vor Produkten des täglichen Lebens nicht halt. Die Unternehmen stehen vor der Frage, wie sie individualisierte Produkte zu marktfähigen Preisen, Qualität und Lieferzeit liefern sollen. So ist der Kundenwunsch nach einem individuellen ovalen Fernseher aus Titan mit Motiven von Roy Lichtenstein technisch problemlos erfüllbar. Trotzdem würde der überwiegende Teil der Verbraucher ein

solches Produkt wegen der langen Lieferzeit und des hohen Preises nicht akzeptieren. Ganz anders verhält es sich bei Kleidung. Bereits seit einiger Zeit besteht die Möglichkeit, individuelle Kleidungsstücke maschinell und damit kostengünstig herzustellen. Die Frage ist, ob und wie sich die dabei verwendeten Methoden auf Maschinen und Fahrzeuge übertragen lassen.

Erste Anzeichen deuten darauf hin, dass individualisierte Maschinen und Fahrzeuge in naher Zukunft eine reelle Marktchance haben werden. Moderne Informationsverarbeitung, neue Fertigungsverfahren und Materialien sowie erweiterte Möglichkeiten in der Elektronik eröffnen völlig neue Möglichkeiten für individuelle Produkte.

### Irgendwo in ...

Unternehmensplanung: Das Unternehmen HOVOMAT aktualisiert die Unternehmensplanung für die nächsten Jahre. Der Absatz von Reinigungsgeräten für Privathaushalte ist in den letzten Monaten gesunken, die Marktposition gefährdet. Der Materialeinsatz wurde bereits optimiert und die neue Gerätegeneration spart 15 % Energie. Der Kunde kann sein Wunschgerät aus einer großen Zahl möglicher Varianten selbst zusammenstellen: Durch variable Anordnung der Teilaggregate entstehen kompakte oder flache Geräte und die Farbe des Gerätes ist Dank des dreidimensionalen Inkjet-Druckverfahrens frei wählbar.

Das Strategieteam analysiert die bisherige Nachfrage, die aus Inter-

netanfragen erkennbaren Vorlieben und Wünsche potenzieller Kunden und die technischen Möglichkeiten. Zwei Entwicklungsschwerpunkte kristallisieren sich heraus: Mehr wählbare Varianten für die Gehäuseform und eine deutlich verbesserte Schmutzaufnahme beim Saugen.

Das Projektteam für die Gehäuse-Individualisierung bekommt die Aufgabe, denkbare und mögliche Freiräume zu entwickeln und die Fertigungsschritte zu planen. Das „Sauger-Team“ steht vor einer großen Aufgabe. Es muss für die Verbesserung der Reinigungsleistung scheinbar völlig neue oder zumindest andere Wege als bisher suchen.

### Die Suche nach der Lösung

Strukturentwicklung: Das „Sauger-Team“ besteht aus wenigen, aber hoch qualifizierten Mitarbeitern. Zwei Ingenieure sitzen im Stammhaus in München, ein weiterer in Orlando. Das Team wird komplettiert durch einen jungen Mitarbeiter aus dem Personalwesen im Pariser Werk, der auf diesem Weg mehr über die Produkte und die Anforderungen in der Entwicklung lernen will. Das Team analysiert zuerst die eigenen technischen Lösungen wie auch die der Wettbewerber und untermauert die Ergebnisse durch Strömungsberechnungen und Saugvergleiche im Labor. Die Teammitglieder kommunizieren über das neue High-Speed Intranet. Bei gemeinsamen Sitzungen arbeitet der Kollege aus Orlando häufig von seiner Privatwohnung aus. Nach der Eingangsrecherche wird deutlich:

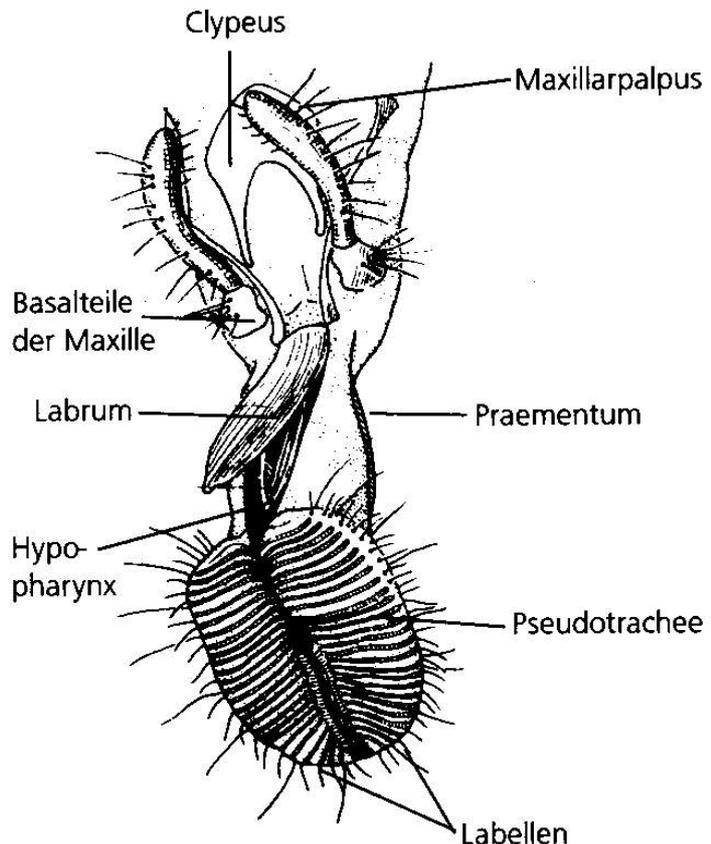


Die Daten lassen keinen ausreichend innovativen Lösungsansatz erkennen.

Daher versucht das Team aus der interaktiven Methodendatenbank Hinweise für das weitere Vorgehen zu gewinnen. Die gespeicherte Vielzahl der Methoden ist verwirrend und der Bezug zum aktuellen Problem nicht immer erkennbar. Aber die Navigationshilfe weist dem Team einen Weg, um sich in dem Methodendschungel zurechtzufinden. Das System schlägt mögliche Methoden vor und ist in der Lage, diese sogar anzupassen oder mit anderen Methoden zu kombinieren.

### Eine Lösung aus der Natur?

Neue Ansätze könnte die Bionik, die Anleihe in der Natur liefern. Daher machen sich der Mitarbeiter aus der Personalabteilung in Paris und einer der Ingenieure aus dem Stammhaus auf die Suche nach verwandten Abläufen in der Biologie. Über Suchmaschinen kommen sie sehr schnell auf Rüssel von Insekten und anderen Tieren. Die Darstellungen der geometrischen Ausgestaltung am Ende des Rüssels können sie sich als Laien nicht erklären. Also wird der Rat eines Fachmanns zum Thema Insekten gesucht. Über das Internet finden die HOVOMAT-Mitarbeiter den Experten an der Universität in München. Sie erläutern ihre Fragestellung bei einem kurzfristig vereinbarten Gespräch und werden aus dem Stegreif mit einer Fülle weiterer unterschiedlicher geometrischer Ausprägungen von Insektenrüsseln konfrontiert.



**Diptera. Kopf und leckend-saugende Mundwerkzeuge. Muscidae.**  
Aus Westerheide, W.; Rieger, R. (Hrsg.): **Spezielle Zoologie – Teil 1, Gustav Fischer Verlag Stuttgart 1996**

Die Funktion der erkennbaren Furchen und ihre Anordnung sind dem Biologen allerdings nicht bekannt; Fragen dieser Art waren aus Sicht der Biologie bisher nie gestellt worden. Um schnell Klarheit zu gewinnen, wird ein Staubsauger im CAD modelliert, der die grundsätzlichen Merkmale des Fliegenrüssels aufweist. Nach kurzer Rücksprache fertigt ein 3D-Drucker in Orlando ein funktionsfähiges Modell im Rapid-Prototyping-Verfahren. Schon die ersten Versuche am nächsten Tag zeigen, dass der „Rüsselsauger“

den Schmutz deutlich besser aufnimmt als die traditionellen Geräte. Parameterstudien zu Größe und Breite der „Furchen“ und ihrer Anordnung optimieren in den nächsten Tagen die Kanalausbildungen für das Saugen.

### Von Katzen und Schnecken

Die zwei anderen Teammitglieder widmen sich der Aufnahme von Fäden und Fusseln von Teppichböden. Sie stoßen auf Hunde und Katzen, die durch Lecken ihr Fell reinigen. Offensichtlich noch interessanter

## Individuelle Produkte – in Serienfertigung

aber sind die Zungen von Schnecken. Ein Biologe beschreibt das System aus feinen Widerhaken auf der Zungenoberfläche. Kurze Zeit später verbessern entschärfte Widerhaken in einer optimierten Anordnung an der Unterseite des Saugers die Aufnahme von Fäden und Fusseln deutlich. Mit Hilfe des 3D-Skizzierers werden die Ideen kombiniert und anschließend weiter ausgearbeitet.

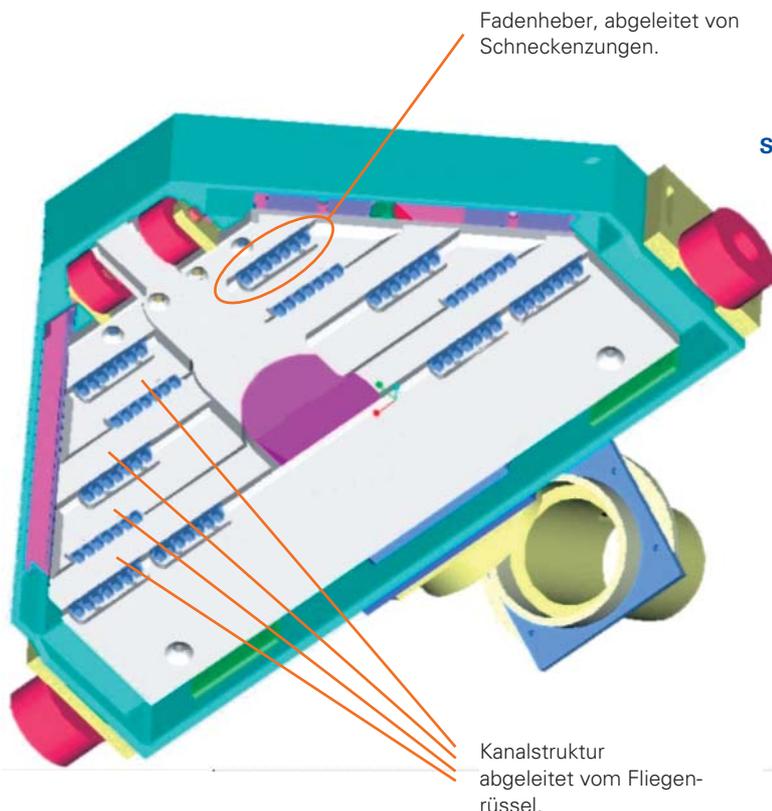
Inzwischen hat auch das zweite Team die Arbeiten für die Individualisierungsmöglichkeiten des Gehäuses erfolgreich abgeschlossen. Die Kunden können nun direkt in den re-

gionalen Fabriken oder über das High-Speed Internet ihr individualisiertes Produkt bestellen.

### Einmalig ...

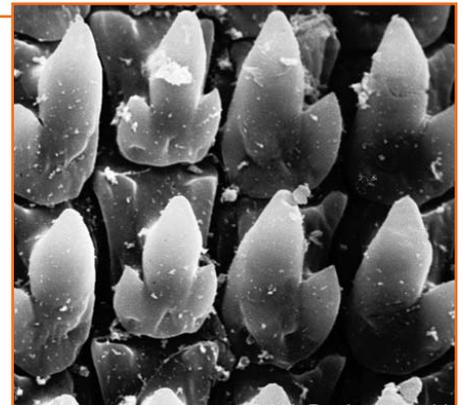
Individualisierung: Frau Schulz, leitende Mitarbeiterin in der Elektrobranche, kommt am Freitag neugierig in die Minifabrik. Sie hat von den hervorragenden Reinigungseigenschaften der HOVOMAT-Reinigungsgeräte gehört und die Aussicht auf ein individuell gestaltetes Gerät weckt ihr Interesse. In der Eingangshalle stößt sie auf die Visualisierungswand mit Beispielen

unterschiedlichster Reinigungsgeräte. Im Dialog mit einem neuartigen Konfigurator beginnt Frau Schulz ihr persönliches Reinigungsgerät zu entwerfen. Zunächst wählt sie die für sie wichtigen Funktionen aus, zum Beispiel das Saugen von Teppich- sowie Steinböden und das Nasssaugen, besonders in Küche und Bad. Der Konfigurator fragt sie nach der Lage der Wohnung, der Art der Fußböden, ihren Hobbys, nach den Personen im Haushalt, nach Garten, Haustieren und anderen Faktoren und spezifiziert die Funktionen. Die Wohnungsaufteilung hat

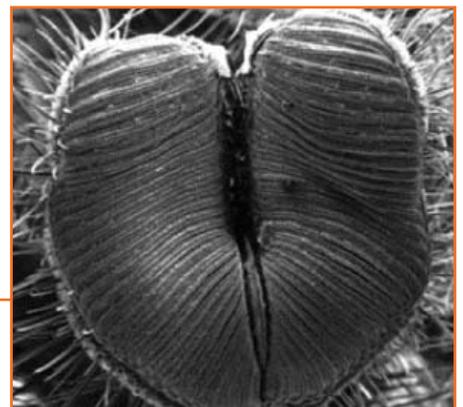


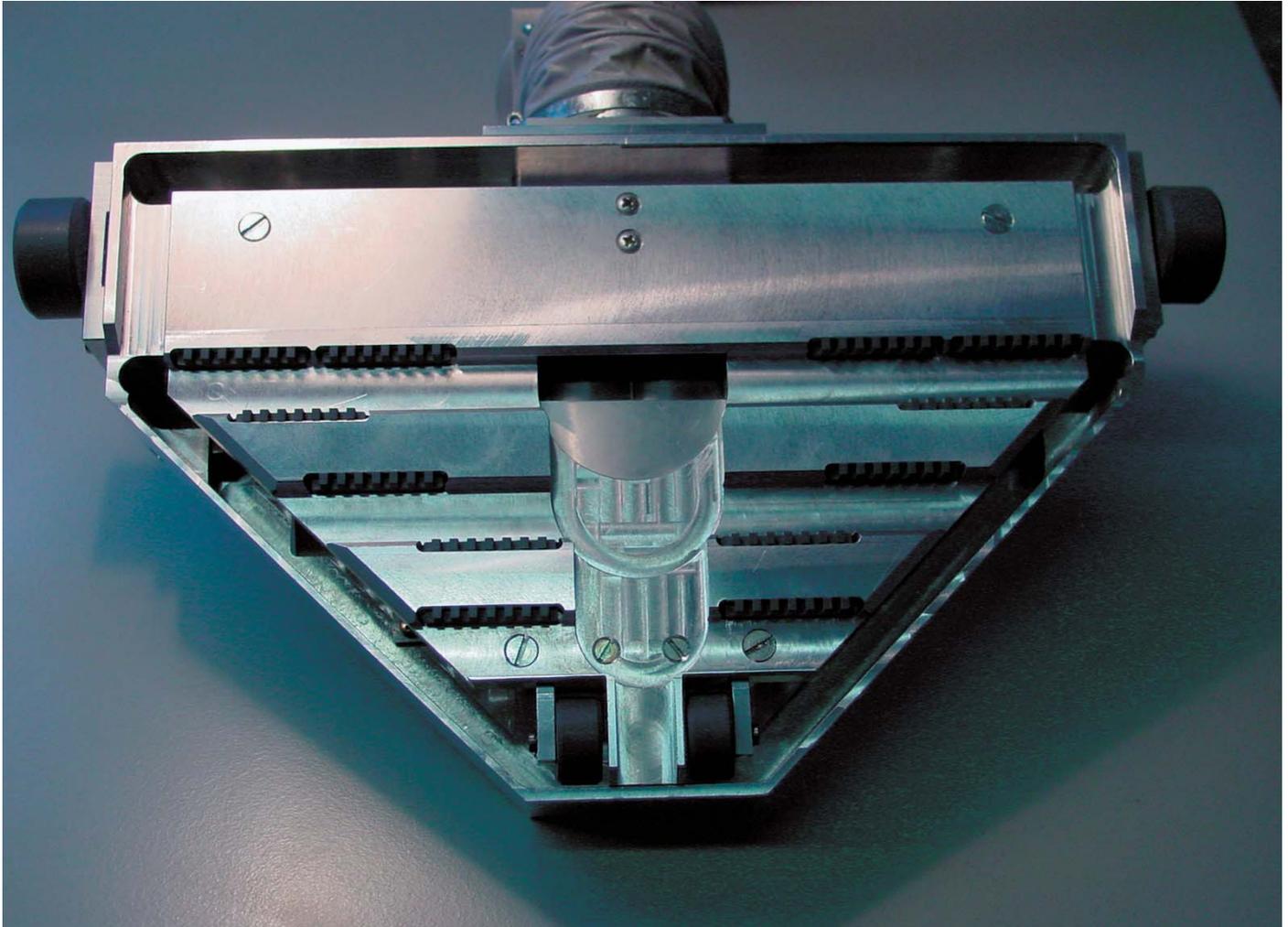
#### Mikroskopische Aufnahme einer Schneckenzenge.

Copyright:  
Louis De Vos,  
Université Libre  
de Bruxelles



#### Mikroskopische Aufnahme eines Fliegenrüssels.





**Erstes Funktionsmuster  
des Bionik-Staubsaugerkopfes.**

Foto: TU München

Frau Schulz als dreidimensionalen Scan aus ihrem Rechner abgerufen und mitgebracht.

### Nichts ist unmöglich ...

Der Konfigurator schlägt ihr eine erste Lösung vor und erläutert die Gründe für den Vorschlag. Nach wenigen Ergänzungen und Änderungen darf Frau Schulz sich ein Gehäuse aussuchen. Sie kann aus verschiedenen Vorschlägen auswählen, diese in bestimmten Grenzen modifizieren oder aber das Gehäuse frei gestalten, soweit es der Platzbedarf der Funktionseinheiten und die Produktionsmöglichkeiten zulassen.

Die Funktionseinheiten besitzen feste Geometrien, ihre Lage zueinander ist aber in Maßen veränderbar. Da sie sich ein flaches Design vorstellt, muss der Behälter für die Schmutzaufnahme seitlich angebracht werden. Dabei stellt ein Regelsatz sicher, dass das Gerät einwandfrei funktioniert. Technisch unsinnige Vorschläge lässt es nicht zu.

Nun skizziert Frau Schulz die von ihr gewünschte Außenkontur ihres Reinigungsgerätes mit einigen wenigen Linien auf der Projektionswand. Das System berücksichtigt ihre Gesamtvorstellung sowie die Abmessungen der Funktionseinheiten und

berechnet daraus eine geglättete Hüllgeometrie. Für besondere Gestaltungselemente steht eine Bibliothek zur Verfügung und bei Bedarf unterstützt ein Designer die Konstruktion über das Internet.

Innerhalb kurzer Zeit präsentiert sich ein virtueller, völlig nach den Wünschen von Frau Schulz zusammengestellter Nass- und Trockensauger. Er bewegt sich sogar in ihrer Wohnung und zeigt, dass er auch die kniffligsten Winkel zuverlässig erreicht. Parallel zum Design berech-

---

**Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann** (geb. 1948) leitet den Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München und ist Projektleiter im Bayerischen Forschungsverbund Abfallforschung und Reststoffverwertung, BayFORREST. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Produktinnovation, die Effizienzsteigerung der Entwicklungsprozesse, die Entwicklung nachhaltiger Produkte durch den Einsatz von Arbeitsmethoden und Rechnerwerkzeugen.

---

net das Kalkulationssystem die Kosten und unterbreitet Frau Schulz ein Angebot. Sie erteilt den Auftrag.

### Freitag gedacht und Montag geliefert

Produktion: Die Produktion des Geräts beginnt. Einige Funktionsgruppen entsprechen den Standards und werden in der eigenen Fabrik oder in Partnerfabriken für den nächsten Tag disponiert. Der seitliche Schmutzbehälter erfordert aber eine angepasste Verbindung zur Saugeinheit. Die Konstruktions-schnellgruppe erledigt das umgehend und die Fertigung startet noch am gleichen Tag. Konstrukteur Huber prüft, ob auch alle Funktionseinheiten im Gehäuse untergebracht werden können.

Am Montag wird das Reinigungsgerät für Frau Huber montiert und ihr am späten Nachmittag durch den Kurierdienst in die Wohnung gebracht.

### Utopie oder Realität?

Die angesprochenen Technologien sind grundsätzlich bereits verfügbar, zumindest als Prototypen. Die Leis-

tungsfähigkeit steigern und dabei die Kosten deutlich reduzieren, sind die Herausforderungen für Forscher und Entwickler.

Die größte Unbekannte ist die Kompetenz und Flexibilität der handelnden Personen. Die konsequente Anwendung von jeweils geeigneten Arbeitsmethoden und Vorgehensstrategien erfordert deutliche Änderungen in der Aus- und Weiterbildung, sie erfordert auch deutliche Veränderungen in der Führungskultur.

# STALL UND FELD, NATUR UND GELD

## Agrarforschung im Spannungsfeld vieler Interessen

Peter Schröder, Jean Charles Munch  
und Beate Huber

**Die Agrarforschung der Zukunft wird sich nicht nur mit Lebensmittelsicherheit und -qualität beschäftigen müssen, sondern auch mit der immer drängender werdenden Frage der Sicherung der natürlichen Ressourcen.**

Immer wieder gerät der Agrarbereich in die Schlagzeilen – sei es durch Lebensmittelskandale, Gifte in der Nahrung, geklonte Tiere oder genmanipulierte Pflanzen. Dabei wird die eigentliche Leistung der Landwirtschaft, nämlich die Ernährungssicherung der Bevölkerung und die Gestaltung der Landschaften, im Bewusstsein der Öffentlichkeit immer mehr in den Hintergrund gedrängt. Man hält sie für selbstverständlich. Die Verbraucher fordern noch mehr hochqualitative Produkte bei sinkenden Preisen ohne Eingriffe in Ökologie und Ökonomie. Der Wunsch nach ästhetischen Naherholungsgebieten mitten in der Produktionslandschaft ist groß.

Mit dem wachsenden Lebensstandard steigt auch der Bedarf an sauberer Luft und sauberem Wasser stetig.

Parallel dazu beobachten wir zunehmende Flächenversiegelung und Höfesterben. Kein Wirtschaftszweig kann sich auf Dauer positiv entwickeln, wenn ihm die gesellschaftliche Akzeptanz fehlt. Und das ist heute in der Landwirtschaft häufig der Fall. Die Agrarforschung wird sich in den kommenden Jahren diesen komplexen, häufig widersprüchlichen Anforderungen der Gesellschaft stellen und neue Konzepte erarbeiten müssen. Im Folgenden ein Überblick über die sich abzeichnenden Forschungstrends.



### Agrarökosysteme verstehen

Die Intensivlandwirtschaft im letzten Drittel des 20. Jahrhunderts hat zwar als „grüne Revolution“ die Nahrungsmittelproduktion mehr als verdoppelt, aber auch zu zahlreichen Problemen geführt, die den Glauben der Bevölkerung in die Produktionsbasis tief erschüttert haben. Überproduktion, Butterberg und BSE sind nur einige der Schlagworte. Die Lösung lässt sich in wenige, einfache Sätze fassen. Bereits Mitte der 80er Jahre formulierte der Forschungsverbund Agrarökosysteme München (FAM) seine Kernthesen: Nachhaltige, hocheffiziente und umweltschonende Landwirtschaft

- darf Nachbarsysteme nicht belasten,
- muss die Biodiversität schützen und
- sowohl Produktivität als auch die Qualität der Produkte langfristig erhalten.

Heute, zwölf Jahre nach der Gründung des FAM, wissen wir, dass der eingeschlagene Weg richtig war. Nur war die Forschung bisher nicht in der Lage, die Komplexität der Agrarökosysteme in allen Fällen aufzulösen. Die Kreisläufe von Wasser und Nährstoffen sowie die Veränderungen der Lebensräume unserer Flora und Fauna sind beileibe nicht einfach zu durchschauen. So bleibt uns nicht viel anderes, als den Gegenstand unserer Neugierde in einzelne, besser zu beherrschende Teile zu zerlegen und Ausschnitte des Agrarökosystems unter kontrollierten Bedingungen unter die Lupe zu nehmen, be-

vor wir Empfehlungen für die Umsetzung geben können.

Manche Veränderungen vollziehen sich ausgesprochen langsam, was lange Mess- und Beobachtungszeiträume erforderlich macht. Erst dann sind tragfähige Aussagen möglich. Der mittlerweile für wissenschaftliche Projekte übliche Zeitraum von drei Jahren reicht für die Beantwortung vieler Fragen der Agrarforschung nicht aus. Allein die Überprüfung von Modellen zur Verlagerung von Nährstoffen im System oder zur Ertragsprognose mit dem Ziel, Vorhersageinstrumente für die Politikberatung zu erzeugen, benötigt langfristige Datenreihen.

### Den Wurzelraum erforschen

Ein Kompartiment des Agrarökosystems, das bislang nur unzureichend erforscht ist, aber die Grundlage seiner Produktivität darstellt, ist der Wurzelraum der Pflanze. In dieser dünnen Zone des Oberbodens spielen sich Tausende von Prozessen ab, von denen wir bis heute nur wenig wissen. Mikroorganismen, Bodentiere und Pflanzenwurzeln stehen miteinander in Wechselwirkung und beeinflussen sich gegenseitig durch Signale. Hochauflösende Analytik und Molekularbiologie haben uns bisher nur kleine Einblicke in dieses komplexe Gefüge gegeben. Langsam beginnen wir, die Bedingungen für die friedliche Koexistenz, aber auch die chemische Kriegsführung in der Rhizosphäre zu verstehen. Dazu kommt neues Wissen über den Boden als physikochemische Grundlage allen Pflanzenwachstums im Agrar-

ökosystem. Längst hat man sich von der Vorstellung verabschiedet, es gebe den einheitlichen Boden, auf dem alles schon irgendwie zum Wachsen und Gedeihen komme. Moderne Bodenforschung hat uns gezeigt, dass unsere Äcker höchst heterogen sind und dass wir nur dann produktiv wirtschaften können, wenn wir auf die Bodeneigenschaften eingehen. In den USA und anderen hochproduktiven Gebieten ist es daher gang und gäbe, die Bodenart und Bodeneigenschaften vorab durch Fernerkundung identifizieren zu lassen und im Abgleich mit Modellen den Bedarf an Düngern und Wasser, aber auch Bewirtschaftungsart und Saatedichten festzulegen. Mit einer solchen Karte im Hintergrund lassen sich aktuell anstehende Bewirtschaftungsentscheidungen treffsicherer fällen und die Ertragssicherheit steigern.

### Nachhaltigkeit beurteilen

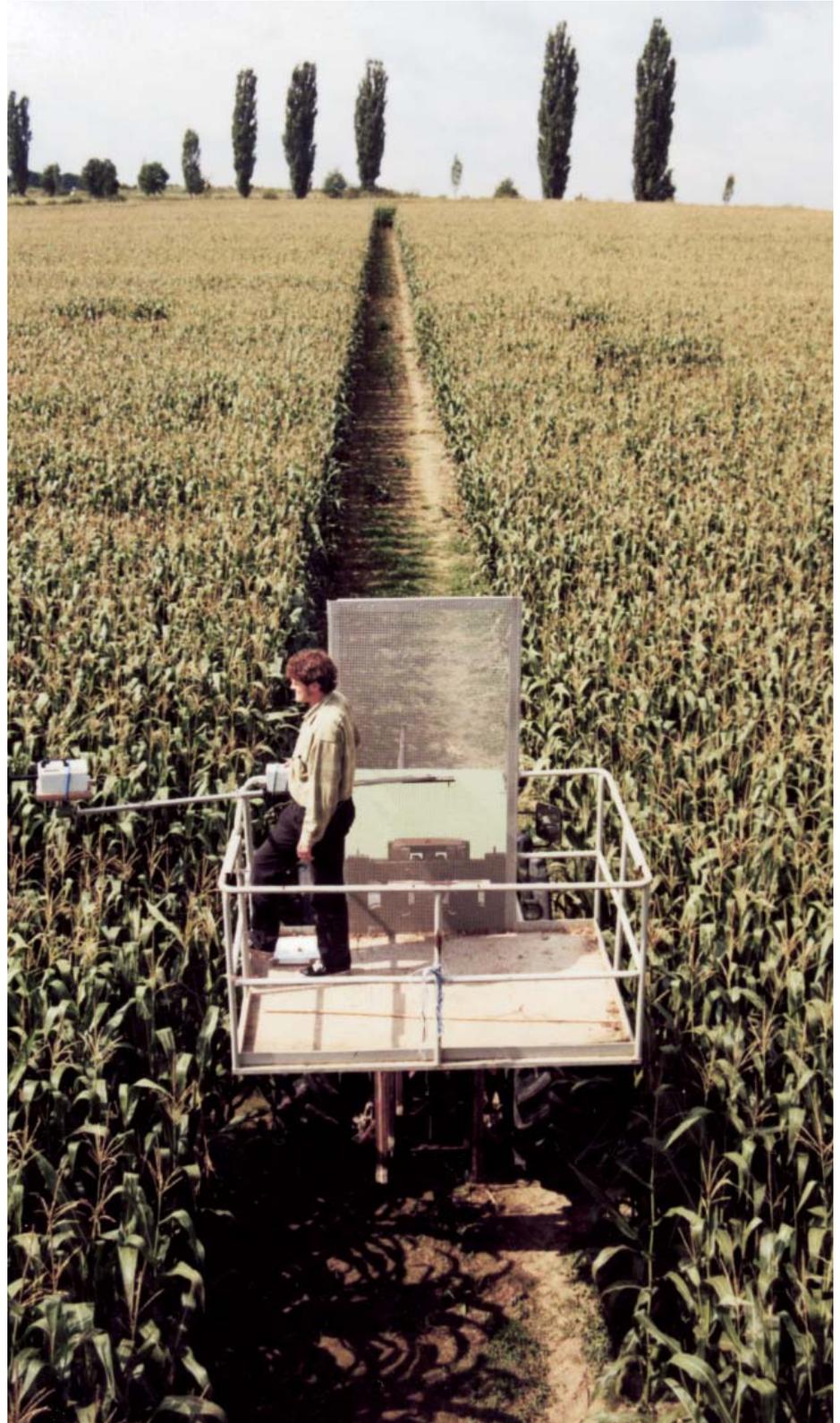
Ein weiterer zukünftiger Forschungsschwerpunkt ist die Beurteilung der Nachhaltigkeit der Landnutzung. Politiker wollen die Entwicklungen gezielt lenken, zum Beispiel mit Subventionen die Nachhaltigkeit der Landnutzung fördern. Wie aber können sie die Mittel sinnvoll und gerecht vergeben? Dafür werden konkrete, von der Forschung untermauerte Angaben benötigt. Wann ist ein landwirtschaftlicher Betrieb nachhaltig? Welche Kriterien muss er erfüllen und welche Grenzwerte muss er einhalten? Wie gewichtet man verschiedene Kriterien? Mit solchen Fragen befasst sich die so genannte



„Indikatorenforschung“. Indikatoren können normativ oder deskriptiv sein, sie vergleichen also entweder Zielvorstellungen oder beschreiben Zustände. Sie definieren Ziele und Grenzen, spiegeln Umweltbedingungen und Belastungen wider und bieten Lösungsansätze. Dabei sollen sie leicht zu interpretieren sein und Tendenzen aufzeigen, wie man zum Beispiel mit den zur Verfügung stehenden Steuergeldern auch den gewünschten Erfolg erzielen kann.

### Nachhaltige Techniken entwickeln

Parallel zur Beurteilung der Nachhaltigkeit müssen die Forscher neue landwirtschaftliche Praktiken entwickeln, die es ermöglichen, auch tatsächlich umweltverträglich und ressourcenschonend zu wirtschaften. Ein Beispiel ist die so genannte Teilschlagtechnik – auch unter den Begriffen „precision agriculture“ oder „farming by soils“ bekannt. Immer ausgefeiltere Techniken helfen, Saatgut, Dünger und Agrarchemikalien einzusparen. Zum Beispiel berechnen in Traktoren integrierte Systeme aus Geopositionierungsdaten und den Ertragsinformationen der Vorjahre den diesjährigen Düngereinsatz für jeden Quadratmeter Acker individuell und bringen dann compu-



**Erfassung des aktuellen  
Pflanzenzustandes zur ortsgenauen  
Düngerdosierung.**  
Foto: FAM



tergestützt nur die notwendige Menge aufs Feld. Das senkt die Produktionskosten der Landwirte, schont die Umwelt und spart Arbeitskraft.

### **Kulturlandschaft erhalten**

Die Landwirtschaft hat sich in den letzten Jahrzehnten stark verändert. In Bayern gibt es noch viele kleinere Betriebe, die mittlerweile verpachtet sind, nur noch im Nebenerwerb bewirtschaftet werden oder denen die Stilllegung droht. Die verbleibenden Vollerwerbsbetriebe sind größer geworden, bei einer insgesamt rückläufigen Gesamtzahl an Beschäftigten. In der Folge drohen Landflucht, Verlust kleinräumiger Siedlungsdichte und regionaler Eigenständigkeit.

Eine niedersächsische Regierungskommission hat im Jahr 2001 einen weiteren Konflikt festgestellt.

Zwar bestehe erhebliche Zahlungsbereitschaft innerhalb der Bevölkerung für Umweltgüter, doch sei diese Bereitschaft bei öffentlich zugänglichen Gütern nur gering, da man ihre Präsenz für selbstverständlich halte. Vom Genuss eines ansprechenden Landschaftsbildes kann niemand ausgeschlossen werden. Nach der Kommission besteht deshalb für den Konsumenten nur ein geringer Anreiz, gerade solche Produkte nachzufragen, die in Betrieben erzeugt worden sind, die einen besonders hohen Beitrag zu einem ansprechenden Landschaftsbild leisten, indem sie Landschaftselemente wie Hecken und Bäume pflegen, Freilandhaltung betreiben oder ästhetische Aspekte in die Landschaft einfügen. Somit hat der einzelne Landwirt kaum eine Möglich-

keit, sein Nebenprodukt „ansprechende und abwechslungsreiche Landschaft“ zu vermarkten. Die vielerorts entstandenen Hofläden sind dabei keine echte Lösung für die Umweltprobleme: Direktverkauf zieht Kunden an, die oft weite Wege im PKW zurücklegen und damit die Energiebilanz der erzeugten Produkte indirekt verschlechtern.

Die Umstrukturierung der landwirtschaftlichen Betriebe, die schon in den letzten Jahrzehnten begonnen hat, wird sich zukünftig noch stärker auf unsere Kulturlandschaft auswirken. Die Gesellschaft muss neu definieren, wie unsere Landschaft in Zukunft aussehen soll, wer sie pflegt und wie diese Leistung honoriert wird. Man braucht deshalb neue Konzepte für die Nutzung und Erhaltung der Kulturlandschaft.



## Nachwachsende Rohstoffe und Energiepflanzen bewerten

Was kann uns die Landwirtschaft außer Nahrungsmitteln noch liefern? Wie viel unserer landwirtschaftlichen Nutzfläche kann und soll weiterhin zur Produktion von Nahrungsmitteln genutzt werden? Neue Ideen zur Bewirtschaftung der vorhandenen Flächen beginnen sich langsam durchzusetzen. Ein Beispiel ist die Gewannebewirtschaftung, bei der alle Felder eines Einzugsgebiets von nur noch einem Bewirtschafter, aber nach den Prinzipien der Präzisionslandwirtschaft und der Anweisung des jeweiligen Landeigners bestellt und gepflegt werden.

Die Hochwasserereignisse der vergangenen Jahre zwingen uns, darüber nachzudenken, welche Flächen für den Hochwasserschutz bereitgestellt werden sollten. Sollten wir andere Flächen für den Naturschutz beireithalten, oder zur Erzeugung von nachwachsenden Rohstoffen? Werden wir unseren Energiebedarf zum Teil mit Heizmaterial aus der Landwirtschaft decken? Bestehen die Verpackungs- und Dämmstoffe der Zukunft aus Flachs, Hanf, Sisal & Co.? Auch hier eröffnet sich ein weites Forschungsfeld, das der Politik Handlungsempfehlungen geben muss, um die Risiken des Anbaus neuer Nutzpflanzen oder gentech-

nisch veränderter Organismen, die nicht für die Nahrungsmittelproduktion erzeugt werden, abzuschätzen – und zwar unabhängig von den Interessen von Lobbyisten und Industrie. Dazu brauchen die Entscheidungsträger belastbare Informationen, die nur eine langfristig angelegte Sicherheitsforschung erzeugen kann.

## Tierhaltung: Ethik und Wettbewerb austarieren

Im Jahr 2002 wurde der Tierschutz im Grundgesetz verankert. Dies hat auch Auswirkungen auf die Haltung von Nutztieren. Wie kann man – auch im europäischen Umfeld – wettbewerbsfähige, tierische Produkte erzeugen und dabei dem Ruf nach der Agrarwende weg von unwürdiger Fließbandproduktion und hin zu einer gesellschaftlich akzeptierten Nutztierhaltung Rechnung tragen? Die Marktchancen für artgerecht und damit teurer erzeugte Tierprodukte

müssen verbessert werden. Dies geht nicht ohne eine breite Akzeptanz in der Öffentlichkeit: Verbraucherinformation und die für den Agrarsektor unübliche Publicrelations-Arbeit sind notwendig. Gerade die Produktion von Fleisch steht im Spannungsfeld zwischen ethisch-moralischen Bedenken und Gesundheitsängsten auf der einen sowie rasch umschlagenden Marktchancen auf der anderen Seite. Hier ist eine gläserne Produktion gefragt. Es ist Aufgabe der Forschung, für vertrauenswürdige Produkte zu sorgen und den Produktionsweg pannenfrei und nachhaltig zu gestalten. Der in der Europäischen Union geforderte Verzicht auf Leistungsförderer und Antibiotika lässt sich ohne produktivitätssteigernde Alternativen nicht umsetzen. Diese bedürfen aber eines sicheren wissenschaftlichen Fundaments für eine nachhaltige Tierproduktion.

Erfassung der  
Bestandstranspiration.  
Foto: FAM



---

**Dr. Peter Schröder** (geb. 1957) ist Koordinator des Forschungsverbundes Agrarökosysteme München, FAM, und leitet am GSF Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg, eine Arbeitsgruppe zum Thema Dynamik der Rhizosphäre. Als Privatdozent vertritt er am Wissenschaftszentrum Weihenstephan das Fachgebiet Herbologie.

**Prof. Dr. Jean Charles Munch** (geb. 1949) leitet das GSF Institut für Bodenökologie und hat den Lehrstuhl für Bodenökologie am Wissenschaftszentrum Weihenstephan inne. Er ist Sprecher des Forschungsverbunds Agrarökosysteme München, FAM.

**Dr. Beate Huber** (geb. 1960) ist Agrarwissenschaftlerin und Koordinationsassistentin im Forschungsverbund Agrarökosysteme München, FAM. Sie befasst sich in der Arbeitsgruppe mit dem Abbau von organischen Schadstoffen durch Pflanzen.

---

### Neue Werkzeuge transdisziplinär nutzen

Das Vorgegangene macht deutlich, dass die Agrarforschung der Zukunft mehrere Ziele aus widerstrebenden Interessen und Ansprüchen parallel optimieren muss. Möglich ist dies nur durch ein neues Forschungs- und Wissenschaftsprinzip, die Transdisziplinarität. Die heute schon vielfach gepflegte Interdisziplinarität ist eine partielle Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Forschungsbereichen, in der mal „über den eigenen Tellerrand“ hinausgeschaut wird. Transdisziplinarität hingegen verändert die disziplinären und fachlichen Grenzen dort, wo eine allein fachliche oder disziplinäre Definition von Problemen nicht möglich ist. Unabhängig von disziplinären Erkenntniszielen ist sie auf die wissenschaftliche Bearbeitung lebensweltlicher Probleme ausgerichtet und versucht, die Kluft zwischen wissenschaftlicher Erkenntnis und praktischer Umsetzung zu schließen. Damit gelingt es der transdisziplinären Forschung, komplexe Phä-

nomene zu erschließen und ganzheitliche, nachhaltige Lösungen vorzuschlagen. Eine solche Herangehensweise kann für die Agrarökosystemforschung heißen: Eine neuartige Problemwahrnehmung zu entwickeln, die die Komplexität der Systeme und die mit ihr verbundenen Mehrzielkonflikte aufgreift und zu neuartigen Problemlösungen zu führen – und nicht nur zu einem neuen ganzheitlichen Ansatz. Unsere Gesellschaft braucht eine langfristig und thematisch breit angelegte Agrarökosystemforschung, die transdisziplinär alle notwendigen Gebiete umfasst und breite gesellschaftliche Zustimmung genießt. Diese Forschung ist so relevant für uns alle, dass sie es nicht nötig haben sollte, nach kurzfristigen, möglichst spektakulären Ergebnissen zu schießen, um von den Geldgebern weiterhin gefördert zu werden.

# KLIMAWANDEL GEHT UNTER DIE HAUT

Erhöhte UV-Strahlung – ein nach wie vor aktuelles Problem

Peter Köpke, Sabine Gaube,  
Joachim Reuder und Marianne  
Placzek

**Die Ozonschicht unserer Atmosphäre ist wahrscheinlich auf dem Weg der Besserung. Damit sind die Gesundheitsgefahren durch erhöhte UV-Strahlung jedoch noch lange nicht vom Tisch. Auch der Treibhauseffekt führt über Veränderungen der jahreszeitlichen Bewölkungsverteilung zu einem möglichen Anstieg des „solaren Beschusses“ der menschlichen Haut. Vor diesem Hintergrund rückt besonders die Untersuchung der UV-A-Strahlung und ihre Wirkung in den Fokus des Forschungsinteresses.**



**S**owohl solare als auch künstliche ultraviolette Strahlung (UV-Strahlung) kann beim Menschen zu vielfältigen, nicht selten schmerzhaften Effekten führen. Sonnenbrand (Erythem) und Schneeblindheit sind akute UV-Schäden, die durch die Absorption von Photonen im Körpergewebe ausgelöst wer-

den. Die Strahlung kann aber auch chronische Schäden hervorrufen wie Hautkrebs, Katarakt im Auge oder eine Schwächung des Immunsystems. Die UV-Problematik ist mittlerweile weiten Bevölkerungskreisen bewusst und wird häufig mit dem Ozonproblem in Verbindung gebracht.

### Drei Spektralbereiche mit unterschiedlichem Charakter

Die Forscher teilen zur Vereinfachung den Wellenlängenbereich der UV-Strahlung in drei Spektralbereiche ein: UV-A, UV-B und UV-C. Die UV-A-Strahlung ist die langwelligste und damit energieärmste UV-Strahlung. Sie liegt zwischen dem sichtbaren Licht und dem UV-B. Sie kann das Immunsystem schwächen, die Hautalterung vorantreiben und steht zunehmend im Verdacht, auch bei der Entstehung von Hautkrebs beteiligt zu sein. Der UV-B-Spektralbereich ist am stärksten für die Bildung von Sonnenbrand verantwortlich und spielt bei der Entstehung von Hautkrebs und dessen Vorstufen eine wichtige Rolle. Der UV-C-Bereich hat

die kürzesten Wellenlängen und damit die höchste Photonenenergie. Die Wirkung von UV-C entspricht weitgehend der von UV-B-Strahlung, ist jedoch deutlich aggressiver. Von der Sonne erreicht uns Strahlung aus diesem Wellenlängenbereich nicht, da das Ozon in der Atmosphäre hier vollständig absorbiert. UV-C-Strahlung entsteht aber auch künstlich – zum Beispiel beim Schweißen oder bei medizinisch genutzten Speziallampen.

Im Vergleich zum UV-B hat sich die medizinische Forschung bisher relativ wenig mit dem UV-A auseinandergesetzt. Grund: Beim UV-B-Bereich bewirkt eine Änderung der Dicke der atmosphärischen Ozonschicht sehr große Intensitätsunterschiede. Die

langwelligere UV-A-Strahlung ist dagegen vom Ozon praktisch unabhängig. Folglich hat die Diskussion um die Zerstörung der Ozonschicht und das damit verbundene Öffentlichkeitsinteresse die UV-A-Strahlung nicht tangiert. Außerdem ist die medizinische Wirkungsforschung in diesem Spektralbereich sehr aufwändig, da die akute Reaktion des menschlichen Organismus auf UV-A-Strahlung sehr gering ist und Spätschäden nur mit großer Zeitverzögerung nachweisbar sind.

### Ozon und UV-Strahlung

Zwei wissenschaftliche Beobachtungen haben in den achtziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts zu einer Intensivierung der UV-For-





schung geführt: die Entdeckung des Ozonlochs über der Antarktis und die parallel dazu registrierte Zunahme von Hautkrebs. In der Folge wurden staatlich geförderte Forschungsprogramme initiiert, wie zum Beispiel das Ozonforschungsprogramm des BMBF oder die Forschungverbände BayForKlim und BayForUV in Bayern, die zu einem enormen Erkenntnisgewinn führten. Dank des schnellen und globalen Handelns der politisch Verantwortlichen wurde die Emission von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) deutlich reduziert. Mittlerweile hat deren Konzentration in der Stratosphäre, wo sich der Großteil der schützenden Ozonschicht befindet, ihren Höhepunkt erreicht.

Die Dicke der Ozonschicht – und damit die Intensität der UV-Strahlung – wird aber nicht nur durch die Menge der FCKWs beeinflusst, sondern auch durch die Temperatur der Stratosphäre. Bei niedrigeren Temperaturen laufen die Ozonabbauprozesse effektiver ab, das heißt, eine konstante Menge an FCKWs führt in einer kälteren Stratosphäre zu einem stärkeren Ozonabbau. Außerdem spielen niedrige Temperaturen eine wichtige Rolle für die Bildung von Polaren Stratosphärischen Wolken (PSCs). Diese sind beispielsweise verantwortlich für das alljährlich auftretende Ozonloch über der Antarktis. Dort bildet das Chlor aus den FCKWs während des langen Polarwinters durch Reaktionen an der Oberfläche von PSCs leicht aktivierbare Verbindungen. Sobald im antarktischen Frühling die Sonne er-



### UV-A ins Rampenlicht!

Aus meteorologischen und medizinischen Gründen verdient die UV-A-Strahlung die gleiche Aufmerksamkeit wie die UV-B-Strahlung.

Die UV-A-Strahlung

- nimmt nicht ab, wenn sich die Ozonschicht wieder erholt,
- wird im Mittel in zukünftigen Sommern in Bayern wie die UV-B-Strahlung zunehmen, da die Bewölkung abnehmen wird,
- ist in den Vor- und Nachmittagsstunden, wenn die UV-B-Strahlung schon gering ist, immer noch hoch, so dass die Exposition des Menschen hohe Werte erreicht, selbst wenn er sich an die UV-B-Regel hält, die Sonne in der Mittagszeit zu meiden,
- kann verstärkt wirken, wie die UV-B-Strahlung, durch die Einnahme von photosensibilisierenden Medikamenten,
- wird bei vielen Menschen künstlich erhöht, beispielsweise durch medizinische Behandlungsmethoden oder durch den Besuch von Sonnenstudios.

scheint, werden sehr schnell große Mengen an Chlor freigesetzt, die innerhalb weniger Tage zu einem fast vollständigen Ozonabbau in Höhen zwischen 15 und 20 km führen. Aktuelle Forschungsergebnisse zeigen auch für die Arktis einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Stärke des Ozonabbaus und dem Auftreten von PSCs.

Die Temperatur der Stratosphäre wird – und zwar sehr langfristig – durch die Emission von Treibhausgasen beeinflusst. Der Treibhauseffekt erwärmt die Troposphäre und kühlt parallel dazu die Stratosphäre ab. Eine durch Kohlendioxid bedingte weitere Abkühlung der Stratosphäre könnte damit auch über der Arktis trotz Stabilisierung der FCKW-Kon-

## Klimawandel geht unter die Haut

zentration zu verstärkten Ozonverlusten führen. Die genaue Prognose der zukünftigen Entwicklung des Ozons ist nicht zuletzt deshalb so schwierig, weil hier zwei gegenläufige Prozesse miteinander konkurrieren. Durch Transportvorgänge in der Atmosphäre, speziell im Spätwinter und Frühling, könnte der Ozonabbau in der Arktis auch Mitteleuropa betreffen. Verbunden damit wäre eine Zunahme der UV-B-Strahlung – und das zu einer Jahreszeit, in der die menschliche Haut strahlungsungeohnt und unadaptiert aus dem Winter kommt.

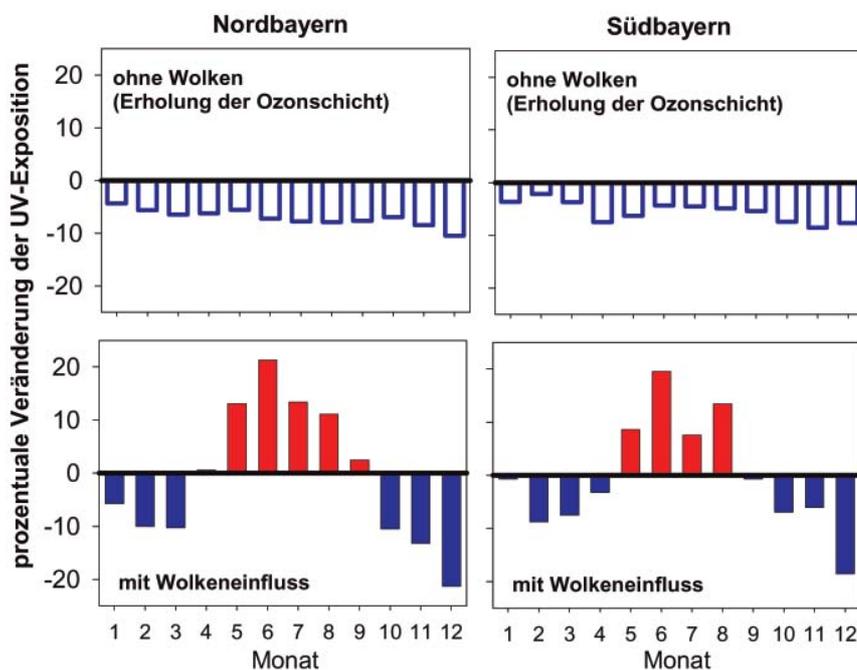
### Weniger Wolken im Sommer

Klimamodelle zeigen, dass der Treibhauseffekt zu einer Umstellung der typischen Zirkulationssysteme in Eu-

ropa führt. Dadurch ist auch für Bayern eine Zunahme von wolkenarmen Ostwetterlagen im Sommer zu erwarten. Bedingt durch den höchsten Sonnenstand mit den höchsten absoluten UV-Strahlungswerten in dieser Jahreszeit, zusammen mit der größten Aufenthaltswahrscheinlichkeit im Freien, ist mit erhöhter UV-Exposition bei vielen Menschen zu rechnen. Eine derartige gesteigerte Exposition gilt sowohl für UV-B als auch für UV-A, da beide Spektralbereiche in der solaren Strahlung immer gleichzeitig enthalten sind und von den Wolken ähnlich beeinflusst werden. Abbildung 1 zeigt die prozentuale Veränderung der UV-Strahlung zwischen heutigen Klimabedingungen und denen unter der Annahme einer CO<sub>2</sub>-Verdoppelung, wie sie zwischen 2050 und 2080 zu er-

warten ist. Als Gewichtungsmaß der Strahlung dient die Sonnenbrand-Empfindlichkeit der menschlichen Haut.

Angenommen, dass sich die Bewölkungsbedingungen in einem zukünftigen Klima nicht ändern, ist durch die prognostizierte Erholung der Ozonschicht mit einem Rückgang der mittleren UV-Strahlung in allen Monaten in einer Größenordnung von fünf bis zehn Prozent zu rechnen. Werden jedoch die prognostizierten geänderten Bewölkungsbedingungen bei der UV-Simulationen berücksichtigt, so zeigt sich ein völlig anderes Bild: In den strahlungsarmen Zeiten im Winter, Vorfrühling und Herbst wird der durch Ozon bedingte UV-Rückgang sogar verstärkt. Im Sommer dagegen über-



Änderung der mittleren erythem-gewichteten UV-Exposition in Nord- und Südbayern, modelliert für ein Klima bei dem der CO<sub>2</sub>-Gehalt doppelt so hoch ist wie heute.

Oben: Abnahme der UV-Strahlung durch die Erholung der Ozonschicht wenn sich die Wolkeneigenschaften nicht ändern.

Unten: Erwartete Entwicklung der UV-Exposition bei Erholung der Ozonschicht und zusätzlicher Änderung der Bewölkung im zukünftigen Klima.



kompensiert der Rückgang der Bevölkerung den Effekt der Ozonerholung und führt zu einer Zunahme der mittleren UV-Strahlung um fünf bis zwanzig Prozent.

### Sensibilisierung durch Medikamente

Völlig unabhängig von den meteorologischen Gegebenheiten hat die Exposition von Menschen mit UV-A-Strahlung in den letzten Jahren generell stark zugenommen. Das liegt einerseits an der steigenden Beliebtheit von Sonnenstudios, in denen hauptsächlich im UV-A-Bereich bestrahlt wird, und andererseits an der zunehmenden medizinischen Anwendung von UV-A-Strahlung bei chronischen Hautkrankheiten, wie Schuppenflechte oder Neurodermitis. Hierbei wird häufig zusätzlich eine photosensibilisierende Substanz, das Psoralen, verwendet um die Effizienz der Therapie zu steigern (PUVA-Therapie). Photosensibilisierung ist die Wirkung einer Substanz, die durch Einnahme, Inhalation oder Einreiben in die Haut gelangt und dort die UV-Absorption verändert. Dadurch kommt es zu einer erhöhten UV-Empfindlichkeit der Haut. Es gibt bereits Untersuchungen über ein erhöhtes Risiko für die Entstehung eines malignen Melanoms bei PUVA-Therapie. Das Risiko scheint mit der Höhe der angewendeten UV-A-Dosis und mit der vergangenen Zeitspanne nach der Therapie anzusteigen. Während beim Psoralen die photosensibilisierende Wirkung erwünscht ist, gibt es eine Reihe von häufig angewendeten Me-



**Unerwünschte Nebenwirkungen:** Eine Reihe von häufig angewendeten Medikamenten erhöht die UV-Empfindlichkeit der Haut.

dikamenten, darunter Antibiotika, Schmerzmittel, Diuretika, Antidiabetika und Herzmedikamente, bei denen diese Wirkung auch, aber unerwünscht, auftritt. Patienten, die diese Mittel einnehmen, haben bei gleicher UV-Exposition ein erhöhtes Risiko für die Entstehung von Hautkrebs und dessen Vorstufen, zum Beispiel aktinischen Keratosen. Nicht zu unterschätzen ist die Anzahl der Personen, die auch ohne Verordnung photosensibilisierende Substanzen einnehmen – wie zum Beispiel Johanniskraut gegen Depressionen – und dabei keinerlei ärztlicher Kontrolle unterliegen.

### Hautnahe Forschung

Generell besteht im nächsten Jahrzehnt vermehrter Forschungsbedarf über die Wirkung von UV-Strahlung auf den Menschen. Das gilt vor al-

**Dr. rer. nat. Peter Köpke** (geb. 1944) leitet kommissarisch die Arbeitsgruppe für Atmosphärische Strahlung und Satellitenmeteorologie am Meteorologischen Institut der Universität München und ist Vorstandsmitglied im Bayerischen Forschungsverbund Erhöhte UV-Strahlung in Bayern – Folgen und Maßnahmen, BayForUV. Seine Forschungsgebiete sind neben der UV-Strahlung die Fernerkundung und die klimarelevanten Eigenschaften von Aerosolpartikeln.

**Dr. med. Sabine Gaube** (geb. 1975) ist wissenschaftliche Mitarbeiterin von Dr. Placzek und AIP in der Dermatologischen Klinik und Poliklinik der Universität München.

**Dr. rer. nat. Joachim Reuder** (geb. 1964) modelliert zeitlich und räumlich variable UV-Strahlung und untersucht dabei ihre biologische und photochemische Wirkung am Meteorologischen Institut der Universität München.

**Dr. med. Marianne Placzek** (geb. 1957) ist ebenfalls Vorstandsmitglied von BayForUV und Ärztin in der Klinik und Poliklinik für Dermatologie und Allergologie der Universität München. Im Forschungsverbund beschäftigt sie sich mit der Bedeutung unterschiedlicher UV-Wellenlängenbereiche für die Entstehung von malignen Melanomen und anderen Hauttumoren und mit Photoprotektion durch Antioxidantien.



**Nicht nur die richtige Sonnencreme kann vor gefährlicher UV-Strahlung schützen. Vitaminreiche Nahrung stärkt den Körper von innen.**

lem für die Haut, aber auch für den Organismus als Ganzes, beispielsweise das Immunsystem. Hier muss der UV-A-Strahlung sicherlich ein deutlich höherer Stellenwert als bisher eingeräumt werden. Die UV-Forschung sollte verstärkt Hautreaktionen untersuchen und zwar unter Berücksichtigung der verschiedenen UV-Spektralbereiche und der nichtlinearen Zusammenhänge zwischen Exposition und Wirkung. Besonders wichtig sind damit die Schutz-, Reparatur- und Erholungsprozesse in der Haut. Diese werden sowohl durch das Verhalten gegenüber der UV-Strahlung als auch durch andere Faktoren wie z. B. die Ernährung beeinflusst. Im BayForUV-Projekt konnte teilweise ein positiver Effekt von Antioxidantien (Vitamin C und E) gezeigt werden.

Auf Grund der vermehrten Exposition von UV-A und der häufigen Anwendung von photosensibilisierenden Medikamenten gilt es zu erforschen, welche Wirkung die UV-A-Strahlung auf zellulärer Ebene ausübt und wie eventuelle Schäden verhindert oder behoben werden können. Hierzu, wie auch für UV-B, ist die Entwicklung verschiedener Hautmodelle dringend erforderlich, mit denen sowohl die akuten, als auch die chronischen Wirkungen der UV-Strahlung auf die Zellen untersucht werden können. Zu denken ist in diesem Zusammenhang an Zellkulturen, aber auch an Tests am Menschen selbst.

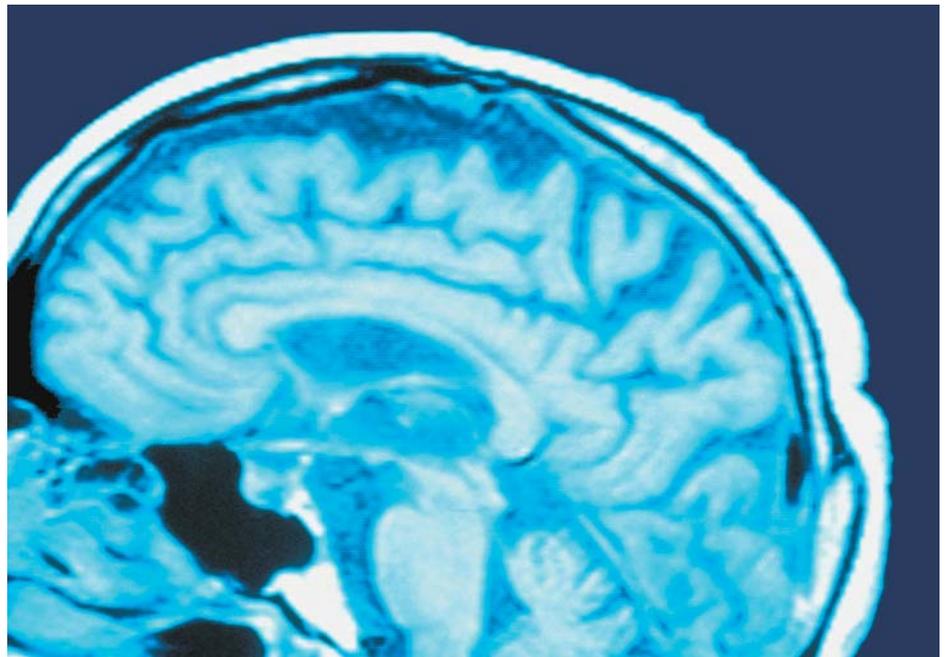
Um die Wirkung von zeitlich variabler Strahlung zu verstehen, brauchen wir außerdem computergestützte Modelle der Haut. Sie können die Wirkungen von UV-Strahlung, einschließlich der Adaptation und Erholung, simulieren. Statistische Methoden sind nötig, um das Problem des großen Zeitabstandes zwischen einem auslösenden Ereignis und der Hautkrebsentstehung in den Griff zu bekommen.

# PRIONEN: VERMEHRUNG OHNE EIGENE GENE



Hans A. Kretzschmar

**Prionen sind die einzigen Krankheitserreger, die sich ohne eigene Gene vermehren. Sie tun dies, indem sie körpereigene Proteine des Wirtsorganismus in ihrer Gestalt so verändern, dass sie selbst zu Prionen werden. Die 1982 aufgestellte Prionhypothese ist bis heute nicht bewiesen.**



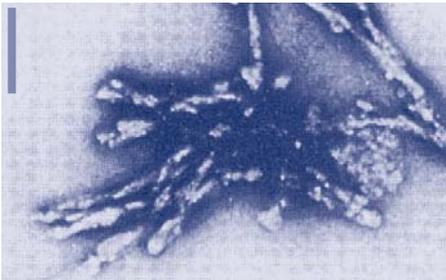
**S**chon vor 200 Jahren beobachteten Bauern erstmals bei Schafen Bewegungsstörungen und Verhaltensänderungen. Die Krankheit wurde als Scrapie oder Traberkrankheit bekannt. Erst im 20. Jahrhundert gelang es zwei französischen Forschern zu beweisen, dass Scrapie eine übertragbare Krankheit ist und erst in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts zeigte sich, dass eine schon seit langem bekannte Erkrankung des Menschen, die Creutzfeldt-Jakob-Krankheit, zur selben Krankheitsgruppe gehört und ebenfalls übertragbar ist. Lange Zeit wurde ein „slow virus“ als Auslöser dieser Erkrankungen gesucht. Als Mitte der 80er Jahre die ersten Fälle von BSE (Bovine Spongiforme Enzephalopathie), einer ganz ähnlichen schwammartigen Hirnerkrankung bei Rindern, in Großbritannien auftraten, begann sich die Forschung zu inten-

sivieren. Die von Stanley Prusiner 1982 veröffentlichte Hypothese, dass Prionen, fehlgefaltete körpereigene Proteine, für die ansteckende Krankheit verantwortlich seien, schien zunächst gewagt.

## **Eine falsche Form als Ursache allen Übels**

Im Sinne dieser Hypothese bestehen Prionen aus einem Protein, der so genannten Scrapie-Isoform des Prionproteins, PrP<sup>Sc</sup>. In einem bis heute nicht völlig verstandenen Prozess entsteht PrP<sup>Sc</sup> aus einem natürlichen Protein des Wirtsorganismus, der physiologischen zellulären Isoform des Prionproteins, PrP<sup>C</sup>. Dieser Umformungsprozess sollte laut der Prionhypothese autokatalytisch ablaufen: Das natürliche, körpereigene Protein ändert seine Form in das fehlgefaltete Prionprotein und die so neu gebildeten PrP<sup>Sc</sup>-Mo-

## Prionen: Vermehrung ohne eigene Gene



**Abb. 1: Elektronenmikroskopische Darstellung der „prion rods“, das sind amyloide Strukturen, die sich aus dem Gehirn von Schafen, Rindern oder auch Menschen isolieren lassen, die an einer Prionerkrankung verstorben sind. Der Balken entspricht ca. 100 nm ( $10^{-9}$  m).**  
Bild: Prof. D. Riesner, Universität Düsseldorf.

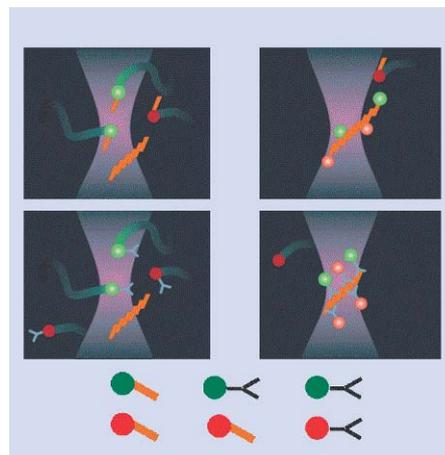
leküle können weitere PrPC-Moleküle umformen. Dabei müssen gewisse Hürden überwunden werden, denn sonst würde die Umwandlung ständig vor sich gehen, und alle Organismen, die Prionproteine synthetisieren, würden sehr häufig Prionkrankheiten entwickeln und daran zugrunde gehen. Alle Säugetiere stellen Prionprotein und andere Wirbeltierklassen zumindest verwandte Proteine her, deren Fähigkeit zur Umformung in PrPSc allerdings unklar ist.

### Das Immunsystem wird ausgetrickst

Aus der Ähnlichkeit des Erregers mit einem körpereigenen Protein oder eigentlich aus der Tatsache, dass der Erreger aus einem wirtseigenen Protein entsteht, erklären sich weitere Besonderheiten der Prionkrankheiten: Der befallene Organismus kann die infektiösen Prionen nicht als fremde Erreger erkennen! Das Im-

munsystem, das über viele Möglichkeiten verfügt, fremde Erreger wie Bakterien oder Viren zu erkennen und auszuschalten oder zumindest zu bekämpfen, ist gegen die Prionen völlig machtlos. Trotz falscher Faltung und Form ähnelt das Prion den körpereigenen Proteinen zu sehr; das Immunsystem hält es für „seinegleichen“.

Zusätzlich erkennt das Immunsystem Krankheitserreger über so genannte pathogen-assoziierte molekulare Muster. Das sind Bakterienwandbausteine oder bestimmte Nukleinsäurebestandteile, in denen sich Viren und Bakterien von Wirbeltieren deutlich unterscheiden. Diese Strukturen identifiziert das angeborene Immunsystem als fremd und bekämpft sie. Auch hier sind die Prionen eine Besonderheit, sie sind



**Abb. 2: Fluoreszenzmarkierung von Prionnaggagaten. Prionen lassen sich mit fluoreszierenden spezifischen Antikörpern oder fluoreszierenden Prionprotein-Monomeren markieren. In einem durch Laserstrahlen definierten Raum werden die Moleküle angeregt und die resultierenden Fluoreszenzstrahlen gemessen.**

Quelle: J. Bischke/A.Giese

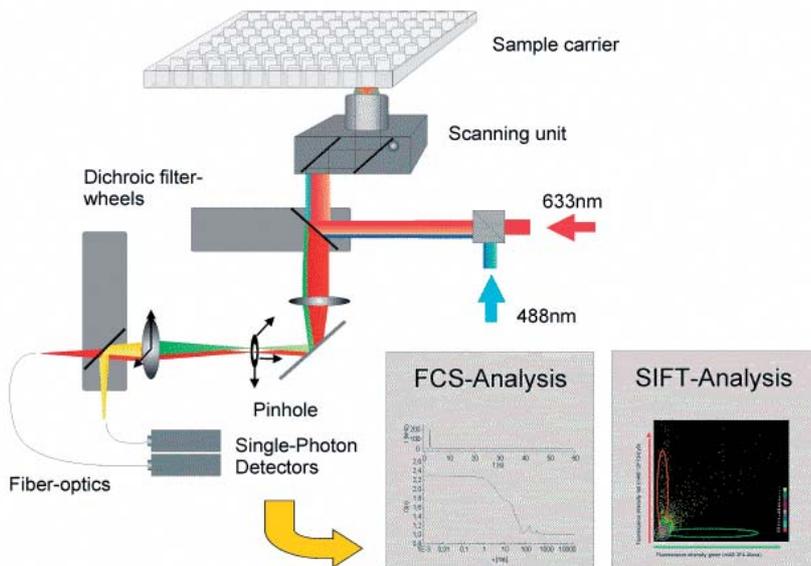
vom Säugerorganismus nicht an pathogen-assoziierten Mustern als Krankheitserreger erkennbar.

### Ein Erreger, verschiedene Opfer

Die Prionkrankheiten sind übertragbare Erkrankungen des Gehirns von Mensch und Tier mit bislang unbittlich tödlichem Ausgang. Bekannt ist Scrapie (die Traberkrankheit), eine Erkrankung von Schafen, die offenbar nicht auf den Menschen übertragbar ist. Ob die Bovine Spongiforme Enzephalopathie (BSE) bei Rindern durch den Scrapie-Erreger verursacht wurde, ist eine nach wie vor offene Frage – und es wird wohl auch immer schwer sein, sie sicher zu beantworten.

Eine als Chronic Wasting Disease (CWD) bekannte Erkrankung von Hirschen scheint sich in den USA rasant auszubreiten. Ihr Ursprung ist bisher unbekannt, aber Prionen gelten als die wahrscheinlichsten Verursacher. Derzeit ist es unmöglich abzuschätzen, ob die CWD auf den Menschen übertragbar ist.

Die häufigste Prionkrankheit des Menschen ist die sporadische oder idiopathische CJD (sCJD - sporadic Creutzfeldt-Jakob Disease). Jährlich erkranken von einer Million Einwohner 1 bis 1,5 Menschen an sCJD. Die Krankheit könnte spontan entstehen, etwa durch eine Mutation des Prionproteingens oder durch eine spontane Umfaltung des physiologischen Prionproteins (PrPC) in die krankheitsübertragende und krankheitsverursachende Form (PrPSc). Weiterhin kennen wir die seltenen



**Abb. 3: Messaufbau für den Einzelmolekülnachweis mit der Fluoreszenzkorrelationsspektroskopie (FCS) und dem SIFT Verfahren („scanning for intensely fluorescent targets“).**  
Quelle: J. Bischke/A.Giese

erblichen Prionkrankheiten, die durch Mutationen im Prionproteingen verursacht werden, und die durch Infektionen erworbenen Prionkrankheiten. Zu der Gruppe der erworbenen Prionkrankheiten gehört die variante CJD (vCJD): Beobachtungen aus der experimentellen Forschung und aus der Epidemiologie belegen, dass sie vom BSE-Erreger verursacht wird. 134 Menschen sind dieser Krankheit bisher in Großbritannien zum Opfer gefallen, sechs in Frankreich und einer in Italien. Vermutlich sind nicht alle Menschen gleich anfällig für den BSE-Erreger. Welche Gene, zusätzlich zum Prionproteingen, die Anfälligkeit bestimmen, wissen wir noch nicht – ebenso wenig können wir abschätzen, wie viele Menschen infiziert sind oder an der vCJD sterben werden.

### Schwierige Diagnostik

Die Verwandtschaft der Prionen mit einem körpereigenen Protein ist eine ganz besondere Herausforderung an die Laboratoriumsdiagnostik. Bis jetzt gibt es keinen Antikörper, der sicher zwischen der infektiösen Proteinform, PrP<sup>Sc</sup>, und der natürlichen Form, PrP<sup>C</sup>, unterscheiden könnte.

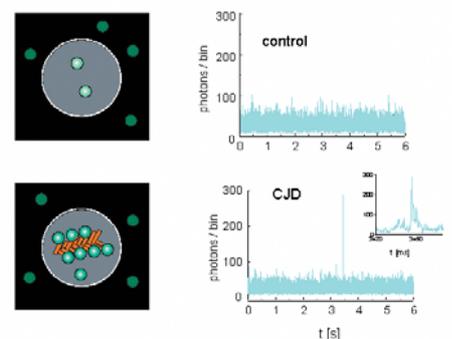
Die üblichen antikörperbasierten Nachweismethoden sind also nur bedingt einsetzbar, deshalb machen sich die Analytiker bestimmte biochemische Unterschiede der beiden Proteine zunutze. Proteasen, das sind eiweißspaltende Enzyme, können körpereigene Prionproteine zerlegen, bei der infektiösen PrP<sup>Sc</sup>-Form gelingt ihnen das weniger gut als bei PrP<sup>C</sup>.

Zudem tendieren die Krankheitserreger zur Selbstaggregation: sie verklumpen. Die Fluoreszenzkorrelationsspektroskopie (FCS) ist in der Lage, Aggregate in kleinsten Konzentrationen nachzuweisen. Sie kann in einem Volumen von 1 fl (Femtoliter = 10<sup>-15</sup> l) – das entspricht etwa der Größe eines einzigen Bakteriums – einzelne fluoreszierende Aggregate erkennen. So gelingt es PrP<sup>Sc</sup>, das mit anderen PrP<sup>Sc</sup>-Molekülen aggregiert, nachzuweisen, indem diese Aggregate mit fluoreszierenden Antikörpern oder fluoreszenzmarkierten einzelnen Prionproteinen markiert werden (siehe Abbildungen).

### Schnelltest zu Lebzeiten

Eine der wirklich großen praktischen Herausforderungen der Zukunft wird

sein, Prionen sicher im Blut nachzuweisen, am besten im femtomolaren Bereich. Das Blut von Scrapie-infizierten Schafen ist infektiös und scheint Prionen in dieser niedrigen Konzentration zu enthalten. Anders als bei Scrapie ist es bei Patienten mit sporadischer CJD (sCJD) noch nie gelungen, Infektiosität im Blut nachzuweisen. Die vom BSE-Erreger verursachte vCJD unterscheidet sich in vielen Details von der sCJD und ähnelt in mancher Hinsicht der Traberkrankheit beim Schaf. Während bei der sCJD der Erreger auf das zentrale Nervensystem, also Gehirn, Rückenmark und das Auge beschränkt ist, lässt sich PrP<sup>Sc</sup> bei der vCJD – ähnlich wie beim Schaf – in einer Reihe anderer, lymphozytenreicher Organe nachweisen: in den Mandeln, in der Milz, in Lymphknoten und im Blinddarm. Es ist nicht auszuschließen, dass PrP<sup>Sc</sup> und



**Abb. 4: Aggregatnachweis durch Fluoreszenzintensität (SIFT). Einzelne fluoreszierende Antikörper werden als kleine fluoreszierende Blitze erkannt, wenn sie im Laserfokus erscheinen (oben), Prionaggregate binden zahlreiche Antikörper und erscheinen im Fokus als intensiv fluoreszierende Strukturen (unten).**  
Quelle: J. Bischke/A.Giese

---

### Prof. Dr. med. Hans A. Kretzschmar

(geb. 1950) ist Direktor des Instituts für Neuro-pathologie an der Universität München und Sprecher des Bayerischen Forschungsverbands Prionen, FORPRION. Seine Forschungsschwerpunkte sind Prionkrankheiten und Neurodegenerative Erkrankungen des Nervensystems.

---

damit Infektiosität bei der vCJD auch im Blut vorhanden sein könnte. Von ganz vitalem Interesse ist daher, Prionen in sehr niedriger Konzentration nachweisen zu können, um sie im Blut zu entdecken. Das erste große Etappenziel für die Bekämpfung aller Prionkrankheiten ist, die Infektion am lebenden Organismus nachzuweisen.

### Therapie und Prophylaxe

Prionen sind so hitzeresistent, dass die normale Sterilisation im Krankenhaus nicht ausreicht, um die Übertragung von Mensch zu Mensch durch ärztliches Handeln sicher zu unterbinden. Auch unter diesem Gesichtspunkt ist eine möglichst frühzeitige und sensitive Diagnostik von großer Bedeutung, um eine Weiterverbreitung zu verhindern. Bis vor wenigen Jahren glaubten die Wissenschaftler, dass eine kausale Therapie kaum möglich sei. Seit kurzer Zeit berichten aber Arbeitsgruppen von verschiedenen Substanzklassen und potenziellen Medikamenten, die wirksam in den Metabolismus der Prionen eingreifen können. Es gibt auch experimentelle Hinweise, dass die immunologische Intervention, zumindest in der Postexpositionsprophylaxe, das heißt nach einer Infektion aber vor dem Auftreten der Erkrankung, wirkungsvoll angeregt werden kann. Derzeit kaum zu beantworten ist die Frage, ob Prionkrankheiten im Tierreich ausgerottet werden können, oder ob sie immer wieder durch Mutation des Prionproteingens oder durch spontane Umfaltung des Prionproteins neu entste-

hen können und damit auch den Menschen bedrohen. In Zukunft und auf lange Sicht wird die Diagnostik immer wieder im Mittelpunkt der Forschungsaktivitäten stehen.

### Offene Fragen

Alle technischen Fortschritte in den praktischen Fragen beruhen auf Erkenntnissen der Grundlagenforschung. Das wird wohl auch in der Zukunft so bleiben. Fortschritte in der Grundlagenforschung wirken sich auf die Erforschung anderer Krankheiten aus: Beispielsweise entsteht die Alzheimerkrankheit ebenfalls durch die Anhäufung körpereigener Proteine, sie ist aber im Gegensatz zu den Prionkrankheiten nicht übertragbar. Ganz neue Ansätze für die Diagnostik und Therapie werden sich ergeben, sobald wir mehr über die physikalisch-chemische Beschaffenheit des Erregers wissen und den Vermehrungsvorgang der Prionen verstehen. Auch 20 Jahre nach Aufstellung der Prionhypothese sind diese Vorgänge nicht völlig klar und deshalb in der Retorte bis heute nicht nachgestellt. Viele Fragen sind offen: Wie geht der Umfaltungsprozess vor sich? Sind weitere Proteine in diesen Prozess verwickelt? Was ist die Funktion des körpereigenen Prionproteins? Wo und wie versteckt sich der Erreger während der oft mehrjährigen Inkubationszeit? Wie lässt sich die Existenz von Erregerstämmen mit ganz unterschiedlichen Eigenschaften erklären?

# DER LOCKRUF DER CHEMOKINE

Rekombinante Chemokine als natürliche Verstärker einer Immunantwort auf HIV-Impfstoffe

Ralf Wagner und Jens Wild

**Gib Aids keine Chance: Biologen und Mediziner arbeiten derzeit an der Entwicklung eines Impfstoffes gegen das menschliche Immunschwäche-Virus HIV. Der Schlüssel dazu könnte in der Stoffgruppe der Chemokine liegen, mit der die Immunantwort des Körpers gezielt gesteuert werden kann. Auch ein Einsatz bei der Bekämpfung von Tumor- und Autoimmunerkrankungen ist denkbar.**

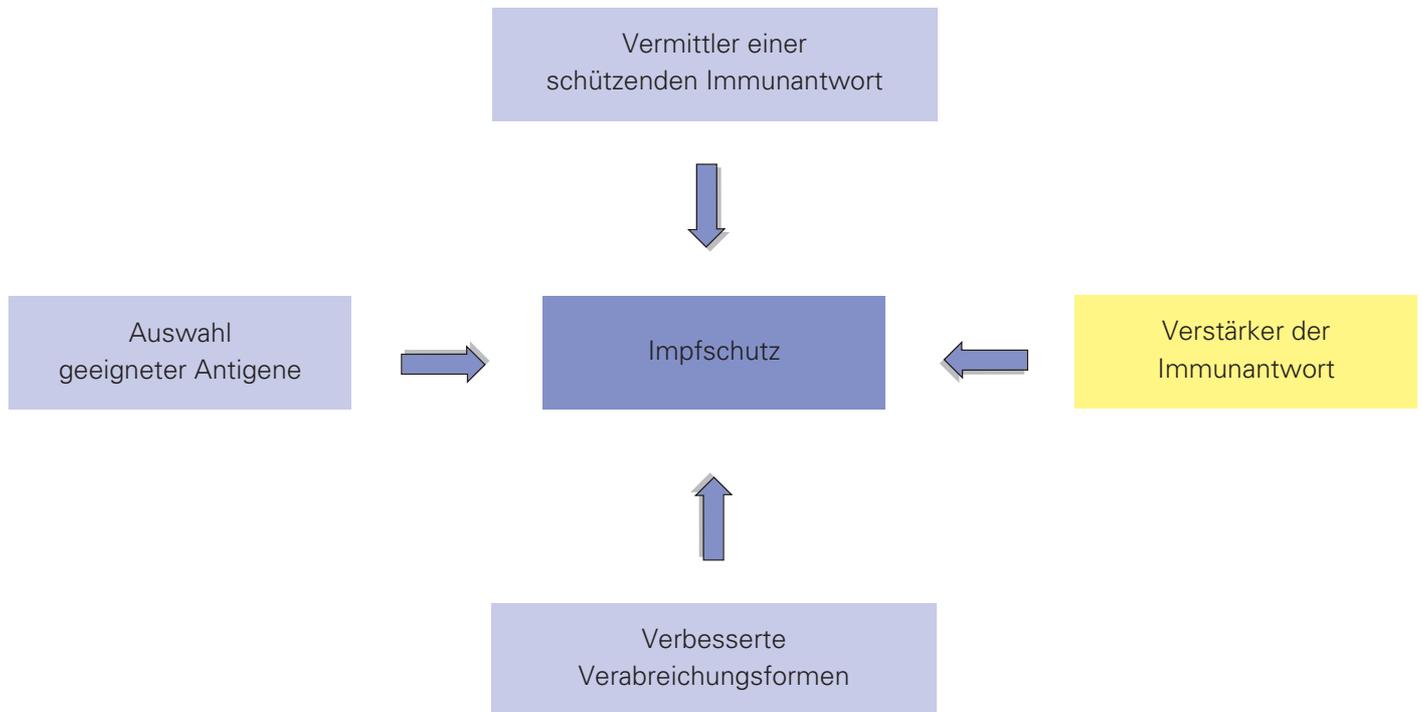


In vielen Entwicklungsländern ist die Aids-Epidemie außer Kontrolle geraten: Allein in Afrika, südlich der Sahara, sind mehr als 20 Millionen Menschen mit dem menschlichen Immunschwäche-Virus HIV infiziert. Nach Schätzungen aus Malawi, Sambia und Namibia trägt etwa jede dritte Schwangere den Erreger in sich. In Südafrika wird Anfang des nächsten Jahrzehnts wohl jeder vierte Bürger HIV-positiv sein.

Die Dringlichkeit der Entwicklung eines vorbeugenden oder therapeutischen Impfstoffes steht folglich außer Frage. Bereits vor über 200 Jahren leitete Edward Jenner mit der Pockenbekämpfung das Zeitalter der Impfstoffe oder Vakzine ein. Seither wurden zwar ungeheure Fortschritte erzielt, bei einigen Krankheiten aber sind noch immer keine oder nur unzulängliche Impferfolge zu verzeichnen. Insbesondere HIV entzieht sich bislang hartnäckig allen gängigen Impfvorfahren.

## Immunisierung mit DNA

Hoffnung weckte vor etwas mehr als zehn Jahren eine neue Immunisierungsstrategie, die DNA-Vakzinierung. Im Normalfall werden zur Immunisierung Eiweißbestandteile eines Virus, die so genannten Proteine, gespritzt. Diese sind meist in der Lage, die Bildung von Antikörpern anzuregen, in der Regel aktivieren sie aber keine spezifischen Killerzellen im Immunsystem, die in der Lage wären, von Viren befallene Körperzellen abzutöten. Bei der DNA-Vakzinierung wird an Stelle eines solchen Eiweißbestandteils ein Gen, welches ähnlich einer Blaupause die Informationen über die Zusammensetzung des Proteins enthält, in Form kleiner, ringförmiger DNA, der so genannten Plasmid-DNA, verabreicht. Die Immunisierung mit DNA ahmt eine Infektion mit Viren quasi nach und regt dadurch nicht nur die Antikörperbildung an, sondern aktiviert auch die spezifischen Killerzellen



len. Die zunächst viel versprechenden Ergebnisse bei Versuchen mit Mäusen versagten jedoch bei Affen: Die Immunantworten der Primaten waren meist sehr schwach, von einem Impfschutz gegen HIV waren die Tiere weit entfernt.

Die Forscher des Projektverbands Infektionserregervakzine bei FORIMMUN versuchen jetzt, mit einer neuen Strategie einen DNA-Impfstoff gegen HIV zu entwickeln. Basis ist die Verwendung synthetischer Gene.

### Viren-DNA zu Menschen-DNA umbauen

Die DNA besteht bei Mensch und Tier ebenso wie bei Mikroben und Viren aus den vier Basen Adenin, Thymin, Guanin und Cytosin, die in wechselnder Reihenfolge auf den

langen DNA-Strängen angeordnet sind. Während Viren-DNA einen hohen Anteil an Adenin und Thymin enthält, besteht humane DNA vorwiegend aus Guanin und Cytosin. Die in der DNA steckende Erbinformation muss in die zum Leben notwendigen Proteine „übersetzt“ werden, die wiederum aus vielen Aminosäuren bestehen. Das „Übersetzungslexikon“ ist der so genannte Genetische Code: Jeweils drei Basen, ein Triplet, „kodieren“ dabei eine der 20 essenziellen Aminosäuren – ähnlich den Nullen und Einsen im Binärcode der Informatiker. Eine besondere Bedeutung bei den Triplets nimmt die letzte Position ein, die „Wobble-Position“. Häufig kann diese Position variabel mit unterschiedlichen Basen besetzt sein, die

trotzdem als Triplet die gleiche Aminosäure kodieren. Die Forscher nutzen genau diese Wobble-Position: Bei der Herstellung synthetischer DNA aus der Virenvorlage besetzen sie die dritte Position mit Guanin oder Cytosin, sofern sich dadurch der Code für die gewünschte Aminosäure nicht ändert. Dadurch erhöht sich der Gesamtanteil an Guanin und Cytosin, die ursprünglich virale DNA wird „human“. Setzt man die so veränderte Erbinformation in die Plasmide ein und verabreicht die optimierten Impfstoffe, gelingt es nun – anders als vorher – auch in Affen die Bildung von Killerzellen und Antikörpern effizient anzuregen. Sogar der Ausbruch der Immunschwächeerkrankung Aids konnte bei den Tieren so verhindert werden.



### **Impfstoff-Unterstützer gesucht**

Trotz der viel versprechenden Ergebnisse ist es weiterhin nötig, die Immunantwort zu verbessern und zu modulieren. Ziel der Wissenschaftler ist es, nicht nur den Ausbruch, sondern bereits die Infektion mit Aids zu verhindern. Gesucht werden Stoffe, die mit einem Impfstoff zusammen verabreicht werden und dabei die Immunantwort verstärken und unterstützen. Derartige Bestandteile eines Impfstoffes nennt man auch „Adjuvantien“. Falls diese Stoffe ebenfalls Eiweiße wären, ließe sich deren Erbinformation ebenfalls in die Plasmide einsetzen, so dass lediglich DNA immunisiert werden müsste.

Große Hoffnungen ruhen derzeit auf Zytokinen und Chemokinen, die eine hohe Bedeutung bei der hochkomplexen Induktion und Regulation von Immunantworten haben. Zytokine sind Botenstoffe, über die die Immunzellen untereinander „kommunizieren“; Chemokine locken immunologisch relevante Zellen, beispielsweise „Fresszellen“ (Makrophagen), an den Ort einer Entzündung

oder einer Immunisierung. So verstärken und modulieren sie die Immunantwort entscheidend. Das macht sie zu geeigneten Adjuvantkandidaten für die neue Strategie, körpereigene und nicht etwa künstliche Komponenten als Verstärker einer Immunantwort einzusetzen.

### **Chemokine schwierig zu handhaben**

Chemokine wurden von der Forschung lange Zeit vernachlässigt, weil sie sehr instabil und daher schwierig im Labor zu synthetisieren sind. Die Instabilität verhinderte bislang systematische Tests der verschiedenen Chemokinvarianten. Hauptaufgabe der Forscher ist es daher, die Chemokinproduktion und -stabilität im immunisierten Organismus zu verbessern. Die Hoffnung ist, dass dies ebenfalls durch die bereits beschriebene Anpassung des genetischen Codes möglich sein

wird und diese Erbinformation dann zusätzlich in die Plasmid-DNA eingebaut werden kann. Im Rahmen des FORIMMUN-Projektes soll auf diesem Weg die einzigartige Selektivität von Chemokinen genutzt werden, um neue Immunverstärker für neue, auch therapeutisch einsetzbare Vakzine zu entwickeln.

Das angestrebte „Endprodukt“, ein hochwirksamer HIV-Impfstoff, eröffnet den von Aids betroffenen Entwicklungsländern die Chance auf eine Eindämmung oder sogar Beendigung der Epidemie und gleichzeitig volkswirtschaftlich eine Erholung. Schließlich sind die meisten Infizierten junge und wirtschaftlich aktive Menschen, von deren Produktivität Wirtschaft und Wohlstand eines Landes abhängen.

Darüber hinaus können die in den Forschungsarbeiten gewonnenen Erkenntnisse für die Verbesserung bestehender sowie die gezielte Ent-

**Aidswaisen in einem Kindergarten von Katutura, einem Elendsviertel von Windhuk. Katutura heißt übersetzt: Ort an dem wir nicht leben wollen. Die Lösung des AIDS-Problems ist eine grundlegende Voraussetzung für eine positive wirtschaftliche und soziale Entwicklung in Afrika. Neue Impfstoffe können dazu einen wichtigen Beitrag leisten.**

Foto: Caro/trappe



---

**Prof. Dr. Ralf Wagner** (geb. 1962) ist Professor für Molekulare Mikrobiologie mit den Schwerpunkten Virologie und Vektorentwicklung am Institut für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene der Universität Regensburg. Im Forschungsverbund Neue Strategien der Immuntherapie, forimmun, befasst er sich mit der Herstellung neuer Infektionserregervakzine auf Plasmid-DNA-Basis, insbesondere gegen HIV.

**Dr. Jens Wild** (geb. 1971) gehört der Arbeitsgruppe seit 2000 an.

---

wicklung neuer Impfstoffe genutzt werden, was einen breiten wirtschaftlichen Horizont eröffnet.

### Breites therapeutisches Potenzial

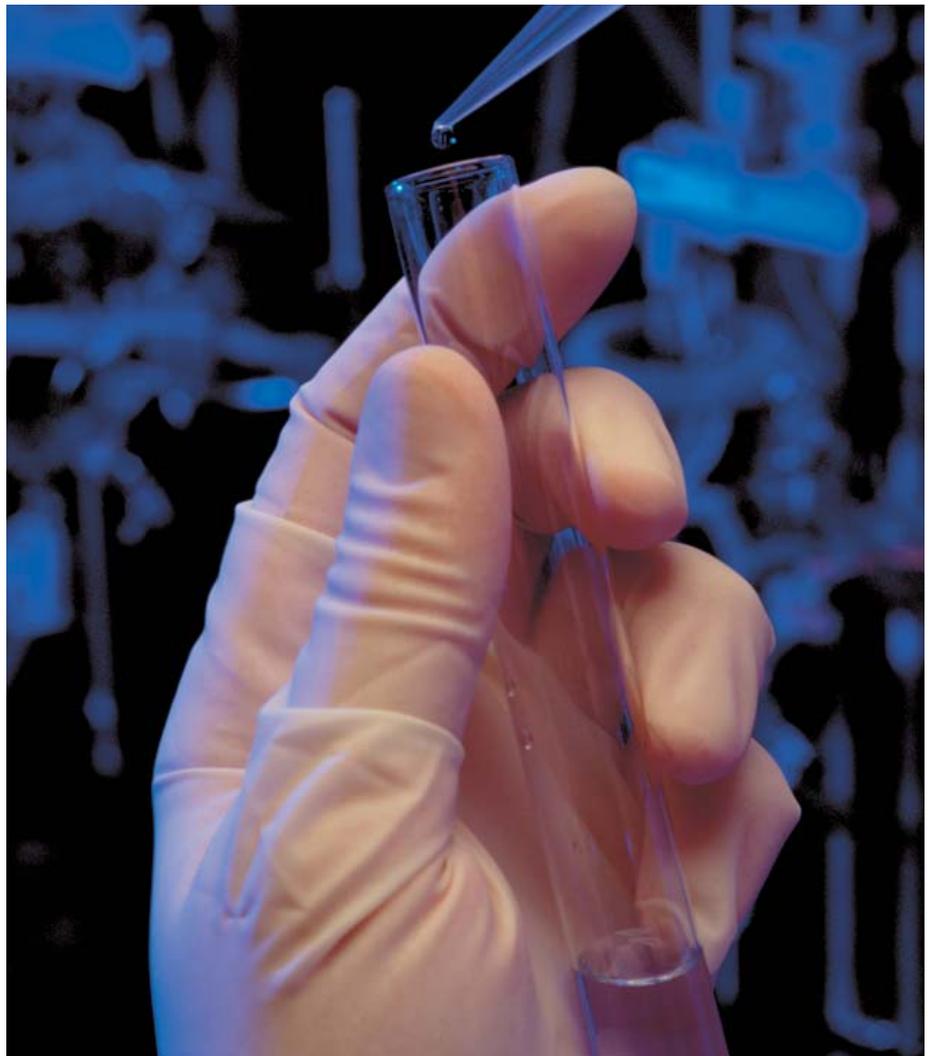
Die Bekämpfung von Infektionserregern durch den eigenen Körper, das heißt die gezielt aktivierte eigene Immunabwehr, hat häufig weniger schwere Nebenwirkungen als die Gabe von synthetischen Medikamenten. In Zukunft könnten Chemokine die Immunzellen des Körpers so manipulieren, dass sie die ideale Immunantwort auf eine spezielle Infektion geben. Denkbar ist auch die Entwicklung von Wirkstoffen zur Bekämpfung von Tumor- und Autoimmunerkrankungen. Chemokine besitzen ein breites therapeutisches Potenzial, das noch lange nicht in seinen Einzelheiten vollständig erfasst ist. Als neue Impfstoffbestandteile bergen sie neue wirtschaftliche Perspektiven für die Pharmazie und die Krankenversicherer.

# „ERSATZTEILE“ AUS DER RETORTE

## Neuland in der Chirurgie: Tissue Engineering

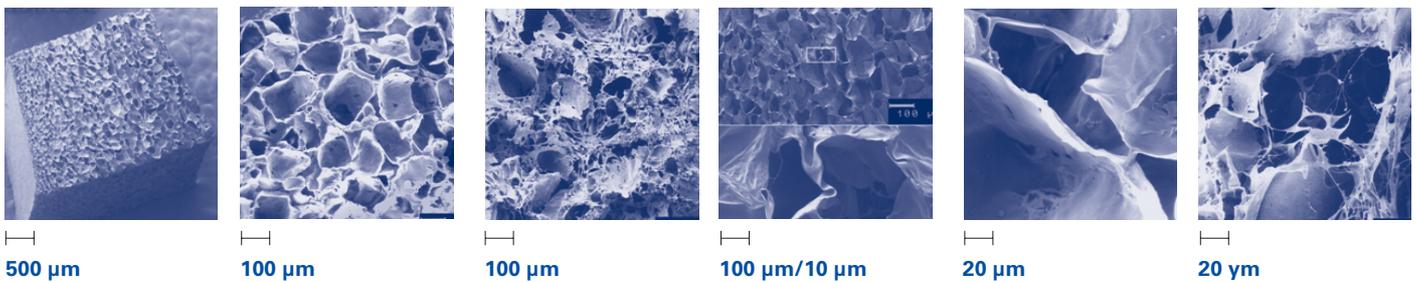
Michael Nerlich, Peter Angele  
und Richard Kujat

**Der größte Kostenfaktor im Gesundheitswesen entsteht durch die Schädigung von Organen und Geweben. Fast alle menschlichen Gewebe sind betroffen: vom arthritisch geschädigten Kniegelenk bis zu nicht mehr funktionsfähigen lebenswichtigen Organen. Die zurzeit üblichen Behandlungsmethoden verursachen erhebliche Kosten. Etwa acht Millionen chirurgische Eingriffe und 40 bis 90 Millionen Krankenhaustage sind jährlich aufgrund solcher Funktionsverluste allein in den USA erforderlich.**



**P**rothesen ersetzen bisher einige Gewebe, wie geschädigte Knie- oder Hüftgelenke. Natürlich weichen deren Materialeigenschaften von denen des menschlichen Gewebes erheblich ab. Sie werden häufig nicht ausreichend ins Gewebe integriert und können sich dann lockern oder sogar lösen. Oft bewirken sie auch Veränderungen in der Struktur des angrenzenden Gewebes und erhöhen in ihrer unmittelbaren Nähe das Infektionsrisiko.

Geschädigte Organe dagegen können auf Dauer nicht durch Prothesen, sondern nur durch eine Transplantation ersetzt werden. Der große Bedarf an Spenderorganen lässt sich jedoch bei weitem nicht decken. So verachtfachte sich von 1988 bis 2003 in den USA die Zahl der Patienten auf der Warteliste für Organtransplantate auf fast 81 000 (BRD 14 000), die Zahl der Todesfälle aufgrund von Organversagen stieg im gleichen Zeitraum um mehr als



**Künstliche, extrazelluläre Matrix aus derivatisierter Hyaluronsäure und Kollagen unter dem Rasterelektronenmikroskop. Das rechte Bild zeigt eine Matrix, die bereits mit Zellen besiedelt und kultiviert wurde. Die wachsenden Zellen sind in den Poren in der Bildmitte zu erkennen.**

das Dreifache an. Die Transplantation fremder Organe birgt das Risiko von Virusinfektionen wie Hepatitis und Aids und wird nur unter begleitender Immunsuppression vom Körper toleriert, einer sehr kostenintensiven Therapie, die oft mit gravierenden Nebenwirkungen einhergeht.

### Tissue Engineering: Aus der Produktion in den Körper

Bis vor einigen Jahren war die Kultivierung und Vermehrung lebender Zellen von Menschen im Labor außerhalb des menschlichen Organismus noch undenkbar. Heute befassen sich die Wissenschaftler in Forschungszentren, Universitäten und Biotechnologieunternehmen intensiv mit einem jungen Forschungszweig, der die Lösung der Probleme verspricht: Tissue Engineering.

Tissue Engineering stützt sich auf die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Wissenschaftlern aus den Bereichen Biologie, Chemie, Physik, Materialforschung, Geräte- und Verfah-

renstechnologie, Informatik sowie Medizin. Durch die Kooperation dieser großen Zahl von Wissensbereichen und der Aufgabe, die Wechselwirkungen von Struktur und Funktion organischen Zellgewebes weiter zu untersuchen, entsteht neben den praktischen Anwendungen ein enormer Erkenntnisgewinn auf dem Gebiet der Life Sciences. Motor für die rasche Entwicklung des Tissue Engineering ist jedoch vor allem der ständig wachsende Bedarf an Ersatzgeweben und -organen.

### Erst in vitro dann in vivo

Das Ausgangsmaterial sind organotypische Zellen aus kleinen menschlichen Gewebeproben. Diese werden in vitro, das heißt im Reagenzglas außerhalb des menschlichen Organismus, in Zellkulturen vermehrt. Menschliche Zellen wachsen dabei nur unter sehr strengen Bedingungen: Temperatur, Sauerstoffgehalt und pH-Wert müssen konstant bleiben und Stoffwechselabbauprodukte entsorgt werden. In den so genannten Bioreaktoren herrschen höchste

Anforderungen an die Reinheit. Zur Herstellung von Gewebeersatzteilen im Tissue Engineering Verfahren ist neben den Zellen auch noch ein Stützgerüst notwendig, eine Matrix aus biologisch verträglichem Material, die die Form des defekten Organfragmentes „nachbildet“, zum Beispiel einen Meniskus. Im nächsten Schritt wird das Trägermaterial mit den Zellen als Suspension getränkt. Jetzt müssen die Zellen im weiteren Kulturverlauf auf dem Träger anwachsen und sich – abhängig von der Defektgröße – weniger oder mehr zu dem gewünschten Gewebe ausdifferenzieren, beispielsweise zu Knochen oder Knorpel.

Noch ist es nicht möglich, ein Knie- oder Hüftgelenk oder gar eine Herzklappe in der Retorte herzustellen, während die Züchtung von Hautersatz schon fast Routine ist. Auch die Züchtung von Knorpel gelingt mittlerweile, wenn auch häufig noch nicht im klinischen Alltag. Die ersten Anwendungen befinden sich schon in der klinischen Praxis. Patienten können so mit biologisch hergestellter



neuer Eigenhaut, sowie Knochen- oder Knorpel-Ersatzteilen behandelt werden.

### Auf das Trägermaterial kommt's an

Entscheidend ist das richtige, biokompatible Trägermaterial. Die verwendeten natürlichen oder synthetischen Biomaterialien müssen im Hinblick auf das zu ersetzende Gewebe verschiedene chemische, biologische, physikalische und strukturelle Anforderungen erfüllen.

Wissenschaftler im Labor für experimentelle Unfallchirurgie der Universität Regensburg entwickelten nun ein neues bioabbaubares Trägermaterial mit spezifischen biologischen Eigenschaften, speziell für die Knorpelreparatur. Das porös aufgebaute Material (Porengröße 50 bis 500 µm) besteht aus veresterter Hyaluronsäure und hydrolysiertem Kollagen, beides Derivate der physiologischen extrazellulären Matrix von unserem eigenen Gewebe. Eine chemische Veränderung der Grundkomponenten verhindert einen zu schnellen Abbau der Zellträger durch körpereigene Enzyme (Hydrolyse).

Die verzögerte Hydrolysierung der künstlichen Matrix nach zwei bis drei Monaten erlaubt einen Abbau des Trägermaterials, wenn das Reparaturgewebe stabil genug ist, um die Stützfunktion zu übernehmen. Die freigesetzten Abbauprodukte des Trägermaterials sind natürlich vorkommende Substanzen, die zudem die Geweberegeneration unterstützen können. Die Einzelkomponenten des Biomaterials und deren Kombi-



nation zeigten in Voruntersuchungen keinerlei Anzeichen von Toxizität, noch lösten sie eine entzündliche Gewebeantwort aus oder erwiesen sich als mutagen.

### Belastungen standhalten

Probleme bereiten die biomechanischen Eigenschaften wie Zug- und Druckbelastbarkeit der in der Literatur bekannten Tissue Engineering Produkte. Das erschwert dem behandelnden Chirurgen die Implantation des in vitro hergestellten Reparaturgewebes, denn eine Grundstabilität des Implantats ist eine wichtige Voraussetzung für den Arzt, um es im Körper anzupassen und zu fixieren. Bis der Patient das Implantat belasten und sich wieder natürlich bewegen kann, vergeht noch einige Zeit: Die Belastungen für das Knochengerüst und die Gelenke sind erheblich. Beispielsweise bestehen die Bandscheiben der Lendenwirbelsäule zum großen Teil aus Knorpel,

der Belastungen von bis zu 300 kg auf einer Auflagefläche von wenigen Quadratzentimetern standhalten soll. Noch stärker belastet sind die Kniegelenke mit bis zu dem zehnfachen des Körpergewichts und das Hüftgelenk mit bis zu 1000 kg Gewicht.

Allgemein übliche chemische Verfahren zur Erhöhung der mechanischen Stabilität, wie zum Beispiel die



Neuentwickeltes Tissue Engineering Trägermaterial (trocken).



Neuentwickeltes Tissue Engineering Trägermaterial (mit Medium).



Neuentwickeltes Tissue Engineering Trägermaterial (mit Zellen).

---

**Prof. Dr. Michael Nerlich** (geb. 1953) ist Leiter der Abteilung für Unfallchirurgie am Universitätsklinikum Regensburg. Seine Forschungsschwerpunkte sind Tissue Engineering mit Biomaterialentwicklung und Optimierung, Biomechanik des Knorpels und Knochens, Biomechanik von Osteosynthesetechniken, Robotik und Navigation, Unfallforschung und Telemedizin. Er wirkt in den Forschungsverbänden Biomaterialien, FORBIOMAT, und Materialwissenschaften, FORMAT, mit.

**Dr. Peter Angele** (geb. 1967) und

**Dr. rer. nat. Richard Kujat** (geb. 1949) leiten das Labor für experimentelle Unfallchirurgie am Universitätsklinikum Regensburg. Ihre Forschungsschwerpunkte liegen im Tissue Engineering mit Biomaterialentwicklung und Optimierung.

---

Quervernetzung mit Glutaraldehyd, sind toxisch bedenklich. Polyvinylpyrrolidon dagegen, ein in der Medizin zur Erhöhung der Viskosität in Blutersatzmitteln verwendetes Reagenz, kann mit Hilfe modernster Elektronenbeschleuniger radioaktiv bestrahlt und damit zur Quervernetzung, also zur Stabilisierung der übrigen Matrixkomponenten, angeregt werden.

Das Labor für Unfallchirurgie am Universitätsklinikum Regensburg verzeichnet erste Erfolge auf diesem Gebiet. Toxizitätsuntersuchungen weisen auf eine gute Zellverträglichkeit der Biomaterialien nach dieser Stabilisierungsmethode hin. Biomechanische Untersuchungen und erste Tierversuche mit den optimierten Tissue Engineering-Trägermaterialien laufen bereits an.

### Implantat und Körper „kooperieren“

Das große Ziel des Tissue Engineering ist, dem Körper bei der Wiederherstellung seiner natürlichen Funktion zu helfen. Das Implantat und die körpereigenen Reparaturmechanismen „kooperieren“, wobei das Implantat zu Beginn der Heilung eine unterstützende und stützende Rolle einnimmt, die es langsam zugunsten des körpereigenen Reparaturmaterials wieder abgibt, indem es sich auflöst. Das unterscheidet Tissue Engineering-Verfahren von der Prothetik: Eine Prothese wird immer ein Fremdkörper bleiben.

Die Effizienz der Tissue-Engineering-Produkte muss durch den klinischen Einsatz und stringente Erfolgskontrollen nachgewiesen werden. Nach der Implantation, das heißt dem Transfer aus dem in vitro in das in vivo Milieu, kontrolliert der Arzt die Vitalität der Zellen und später die Geweberegeneration im Empfänger. Bis zum Routineeinsatz in der Klinik sind noch viele Hürden zu nehmen, denn Materialien wie Methoden müssen den strengen Vorschriften und Normen genügen und klinische Studien die Sicherheit des Patienten gewährleisten.

Tissue Engineering wird als biologischer Gewebeersatz in Zukunft ein wesentlicher Bestandteil der humanmedizinischen Therapie sein und in naher Zukunft die mit großen Kosten und Nachsorgeaufwand verbundene Endoprothetik (zum Beispiel künstliches Kniegelenk, Hüftgelenk, Bandscheiben oder Meniskus) und Organtransplantationen (beispielsweise Leber, Niere, Herz) ganz sicher Schritt für Schritt ersetzen.

# MAßGESCHNEIDERTE IMPLANTATE AUS KÖRPEREIGENEN ZELLEN



Hans-Florian Zeilhofer

**Die Implantate der Zukunft überbrücken und verdecken nicht nur große Defekte im Schädel oder im Skelett des Bewegungsapparates, sondern passen sich so perfekt im Material und in ihrer Funktion an, dass der Mensch sie nicht mehr als Ersatz wahrnimmt.**

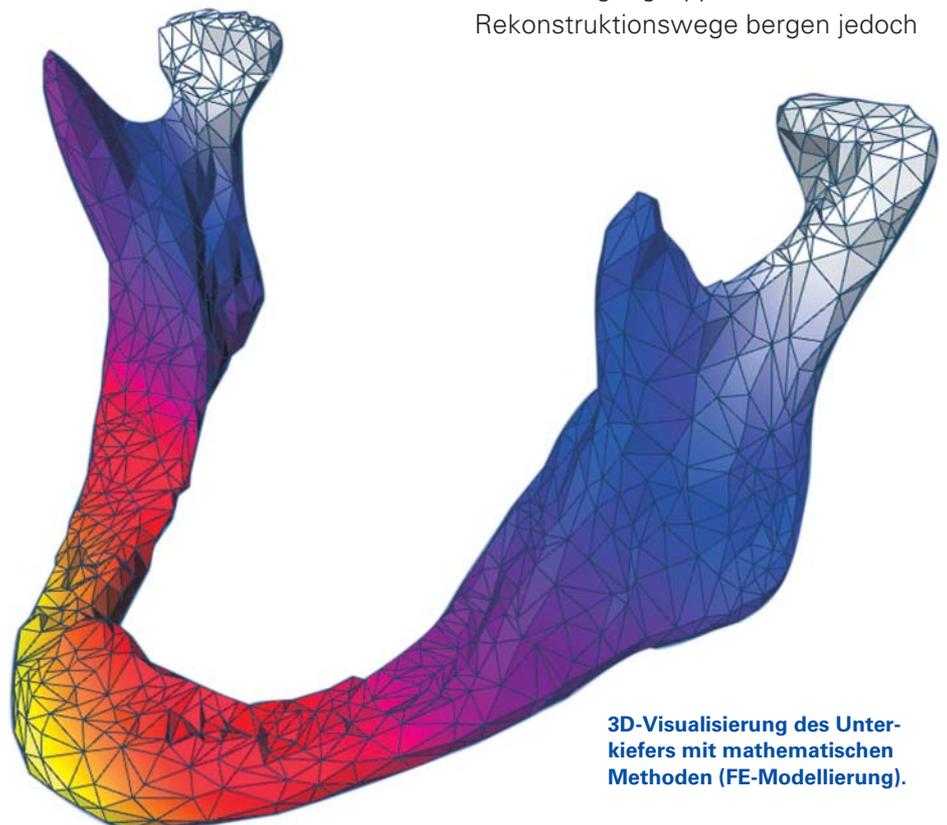
**B**eim Blick auf das Röntgenbild erschrecken viele Patienten: Die neue Prothese sieht aus wie das Ersatzteillager in einer Autowerkstatt: Schrauben, Platten, Federn; wie viel von der ganzen Technik bin eigentlich noch ich? Hier eine funktionell und ästhetisch möglichst „natürliche“ Lösung zu finden, die dem Patienten einen formstabilen Ersatz liefert und ihn den Defekt vergessen lässt – dies muss das therapeutische Ziel sein.

In unserer hoch entwickelten Industriegesellschaft steigt der Bedarf an langlebigen, hoch belastbaren Implantaten ständig. Solche Implantate waren zunächst vor allem zur Korrektur angeborener entstellender Defekte und zur Wiederherstellung nach Unfällen gefragt. Mit den Fort-

schritten der Tumorthherapie ist nunmehr auch für Krebspatienten, vor allem nach Amputationen bei Knochenkrebs, der perfekte, dauerhaft stabile Knochen- und Knorpelersatz notwendig geworden. Er entscheidet über die weitere Lebensqualität der Patienten. Im Übrigen wächst mit der steigenden Lebenserwartung der Bevölkerung auch die Zahl der Skelettschäden durch degenerative Erkrankungen wie Arthrose oder Gicht, die mit Implantaten rekonstruiert werden können.

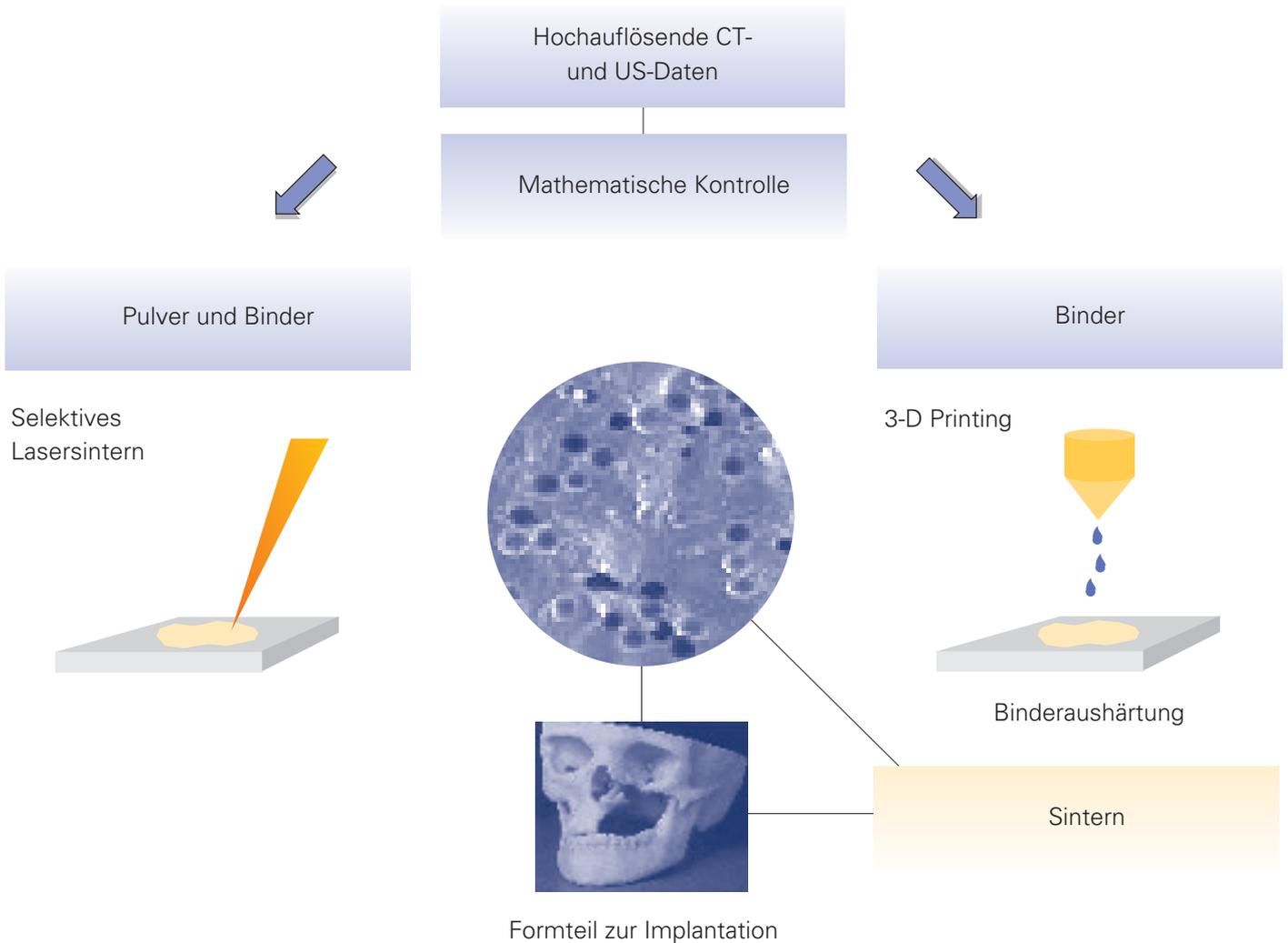
## Tücken und Gefahren

Bisher ersetzen Implantate aus synthetischem Fremdmaterial oder Knorpel- und Knochentransplantate aus dem eigenen Körper große Defekte im Schädel oder im Skelett des Bewegungsapparates. Beide Rekonstruktionswege bergen jedoch



**3D-Visualisierung des Unterkiefers mit mathematischen Methoden (FE-Modellierung).**

## Maßgeschneiderte Implantate aus körpereigenen Zellen



Tücken und Gefahren. Die Transplantate passen häufig nicht genau zu dem Defekt und das Ergebnis der Operationen befriedigt weder den Patienten noch den Arzt. Zudem sind die Ressourcen für das „Ersatzmaterial“ aus dem eigenen Körper ausgesprochen limitiert. Überdies entstehen Hebedefekte bei der Entnahme der körpereigenen Transplantate, die bei einem Großteil der Patienten über kurz oder lang Beschwerden verursachen. Implantate

aus körperfremdem Kunststoff oder Metall lösen dagegen durch ihre chemischen oder physikalischen Eigenschaften langfristig nicht selten Allergien oder Abstoßungsreaktionen aus. Sind solche Implantate starken Belastungen ausgesetzt, zum Beispiel bei künstlichen Hüftgelenken, können mechanische Schäden und Deformationen bei Implantat und Skelett entstehen. Ein körperfreundlicher und dauerhaft stabiler Knochen- und Knorpelersatz in

einer individuell hergestellten und perfekten Passform ist also dringend erforderlich.

### Maßgeschneiderte Trägergerüste verdauen sich selbst

Maßgeschneiderte Implantate, die dem natürlichen Gewebe entsprechen, sind stabil, der Anatomie des Patienten angepasst und werden vom Körper als „seinesgleichen“ akzeptiert. Solche Implantate bergen keine Infektionsrisiken, werden vom



Körper nicht abgestoßen und sind sofort mechanisch belastbar.

Am besten geeignet ist eine Trägerstruktur, auf der körpereigene Zellen sitzen, die natürlichen Knochen oder Knorpel bilden. Das Stützmaterial ist exakt nach dem Defekt geformt und verschwindet im gleichen Maße, wie die körpereigene Knochenstruktur wächst. Während des Heilungsprozesses „verdaut“ es sich selbst, zurück bleibt der komplett geschlossene Defekt ohne Fremdmaterial. So entsteht ein Kiefer oder eine Nase in der ursprünglichen Form, oder auch ein Ohr, das identisch ist mit dem ersten: Ein entstelltes Gesicht gewinnt durch solch ein individuell für den Patienten geschaffenes „Ersatzteil“ seine Harmonie zurück.

Die Entwicklung derartiger „natürlicher“ Implantate ist eine interdisziplinäre Aufgabe für Mediziner, Materialwissenschaftler, Biologen, Mathematiker, Physiker und Ingenieure. Das Ziel ist ein biokompatibler, resorbierbarer Werkstoff als Trägergerüst, der sich mit körpereigenen (autogenen) Zellen besiedeln lässt und diesen ein allmähliches Hineinwachsen in die geformte Struktur ermöglicht, während er zugleich langsam vom Körper abgebaut wird. Zu den physiologischen Anforderungen kommen die physikalischen: Nur anatomisch korrekte, dreidimensionale Trägergerüste liefern das gewünschte, ästhetische Implantat. Solche Gerüste zu entwickeln und zu formen, ist Aufgabe des so genannten Tissue Engineering.

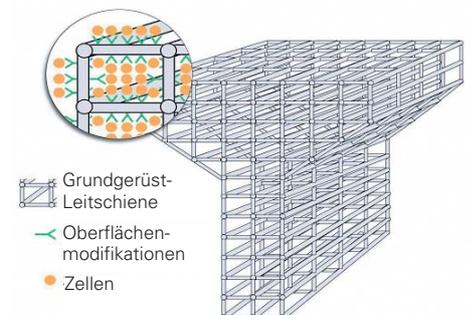
### Tissue Engineering

Tissue Engineering verbindet Techniken aus den Ingenieurwissenschaften mit Methoden der Biowissenschaften, um mit lebenden Zellen und Komponenten synthetischer Trägermaterialien fehlendes Gewebe zu ersetzen, Gewebefunktionen aufrecht zu erhalten oder sie zu verbessern. Im ersten Schritt entnimmt der Arzt dem Patienten eine kleine Menge von Knorpel- oder Knochenzellen, die in der Zellkultur vermehrt und anschließend auf das vorgeformte Trägermaterial aufgebracht wird. Dem Patienten wird also ein Stützgerüst implantiert, das mit seinen eigenen Zellen besetzt ist, aus denen dann neues, natürliches Gewebe entsteht.

### Rapid Prototyping

Innovative Scan-Technologien (3D-Ultraschall und Holografie) und mathematische Verfahren der Modellierung und Simulation ermöglichen die individuelle Formgebung der Implantate. Um die Trägerstrukturen in defektgerechter Form herzustellen, eignet sich nach den bisherigen Erfahrungen in der Medizin am besten das so genannte Rapid Prototyping-Verfahren (RP). Dieses Verfahren erlaubt es, Bauteil-Prototypen aus unterschiedlichsten Materialien direkt herzustellen. Die Idee ist dem Maschinenbau entliehen: Die Automobil- und Flugzeugindustrie setzt das Rapid Prototyping ein, um die Produktentwicklung zu beschleunigen. In der Medizin werden dreidimensionale, anatomisch passgenaue Kunststoffmodelle für die Patienten

gebaut. Aus Schichtaufnahmen, zum Beispiel des Schädels, generiert ein Bildverarbeitungsprogramm auf dem Computer das dreidimensionale Modell des Schädels, die CAD-Daten für das Kunststoffmodell. Es gibt mehrere RP-Verfahren, doch die meisten bauen das Modell schichtweise aus den CAD-Daten auf. Dabei zerlegt das Programm die dreidimensionalen, geometrischen Daten wieder in dünne Schichten, so wie es der automatisierte Formenbau benötigt. In der Prozesskammer der Rapid Prototyping-Maschine wird das Modell dann Schicht für Schicht aufgebaut. In der am häufigsten für medizinisches Rapid Prototyping verwendeten Stereolithographie fährt ein computergesteuerter Laserstrahl blitzschnell über flüssigen, transparenten Kunststoff und härtet ihn nach den vorgegebenen 3D-Daten aus. So wächst das gewünschte Modell Schicht für Schicht in die Höhe. Ein so gefertigter Schädel stellt feinste anatomische Strukturen und Hohlräume dar.



**Dreidimensionales Implantatgrundgerüst als biomechanische, stabile Leitschiene für einwachsende Zellen.**

---

**Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Hans-Florian Zeilhofer** (geb. 1952) leitet das Hightech-Forschungs-Zentrum – Center of Advanced Studies in Cranio-Maxillo-Facial Surgery am Klinikum rechts der Isar der TU München und die Abteilung für Kiefer- und Gesichtschirurgie der Klinik für Wiederherstellende Chirurgie der Universität Basel (Schweiz). Zeilhofer ist außerdem Chefarzt für Kiefer- und Gesichtschirurgie am Kantonsspital Aarau (Schweiz). Er ist Sprecher des Bayerischen Forschungsverbunds für Tissue Engineering und Rapid Prototyping, ForTePro. Seine Forschungsschwerpunkte sind Computerassistierte Chirurgie (CAC), Einsatz von 3D-Technologien in der kraniofazialen Chirurgie und der Wiederherstellungschirurgie, Intraoperative Navigation, Virtual Reality, Scientific Networking, Entwicklung neuer Materialien und Verfahren für maßgeschneiderte Implantate im Mund-Kiefer-Gesichtsbereich, Biomaterialien und Tissue Engineering sowie tumorbiologische Fragestellungen.

---

### **Biomaterialien und Rapid Prototyping: Bisher noch Gegensätze**

In der industriellen Produktentwicklung entspricht der Modellwerkstoff nicht unbedingt dem Werkstoff des Bauteils. Im Gegensatz dazu wird in der Medizin das Knochenersatz-Implantat individuell hergestellt und direkt in den Körper eingesetzt. Deshalb ist im medizinischen Bereich der Werkstoff für die Herstellung des Trägergerüsts von entscheidender Bedeutung.

Keines der bereits experimentell verwendeten Trägermaterialien für Zellen eignet sich derzeit für das Rapid Prototyping. Notwendig ist daher die Modifikation bekannter Werkstoffe, beziehungsweise die Entwicklung von Biomaterialien, die sich für die Herstellung von defektgerechten Implantaten eignen. Nicht jedes Biomaterial taugt für jeden Defekt, denn schließlich bestehen Knochen und Knorpel aus gänzlich unterschiedlichen Materialien und physikalischen Strukturen. Der Weg zum Implantat der Zukunft erfordert eine Technologie, die solide Formkörper aus unterschiedlichsten Materialien mit Hilfe von Rapid Prototyping-Verfahren herstellen kann. Als Ausgangsmaterialien für verschiedene direkte und indirekte RP-Verfahren eignen sich keramische und polymere Werkstoffe. Für das Tissue Engineering sind ausdifferenzierte Knorpel- und Bindegewebszellen sowie Stammzellen aus dem Knochenmark als Ausgangsmaterialien sinnvoll.

### **Technologie der Zukunft**

Die gleichzeitige Material- und Verfahrensentwicklung bei der Herstellung maßgeschneiderter Implantate birgt gerade für kleine und mittelständische Unternehmen ein unüberschaubares technologisches und wirtschaftliches Risiko. Hilfreich ist deshalb die Kooperation mit einem interdisziplinären Verbund von Wissenschaftlern.

Der neu gegründete Bayerische Forschungsverbund für Tissue Engineering und Rapid Prototyping (FORTEPRO), der von der Bayerischen Forschungsstiftung gefördert wird, entwickelt individuelle biologische Implantate über neue Rapid Prototyping-Verfahren und autogene Gewebebesiedlung. Er berücksichtigt sowohl die medizinische Zukunft von der Natur nachempfundenen Implantate aus körpereigenem Material wie den bedeutenden wirtschaftlichen Aspekt. Denn die angestrebte Technologie soll es zukünftig mittelständischen Firmen ermöglichen, individuell designte, hoch belastbare Bioimplantate für den Patienten schnell und effizient herzustellen. Forschergruppen aus vier bayerischen Universitäten, ein Großforschungszentrum, eine externe Universitätsklinik und 13 bayerische mittelständische Firmen helfen in FORTEPRO, den Hightech-Standort Bayern zu sichern.

# DER REGENSBURGER KAUSIMULATOR

Neue Testapparaturen simulieren die Belastungen und Einflüsse der Mundhöhle auf dentale Werkstoffe

Michael Behr

**Kommt ein Patient zum Zahnarzt seines Vertrauens, möchte er davon ausgehen, dass die neuen Zähne perfekt passen und lange halten. Auch hier bleibt die technologische Entwicklung nicht stehen: Es werden immer neue zahnärztliche Materialien und Restaurationstechniken entwickelt. Bevor diese jedoch klinisch verwendet werden können, müssen vorausgehende, oft langwierige Untersuchungen ihre Eignung sicherstellen. Alle neuen Werkstoffe sollten mit Hilfe möglichst genauer Simulationen nachweisen, dass sie den jahrelangen mechanischen und chemischen Belastungen in der Mundhöhle gewachsen sind.**

Im Vergleich zu zeitaufwändigen und aus ethischer Sicht oft problematischen in vivo-Studien, kann mit so genannten Kausimulatoren eine standardisierte Simulation thermo-mechanischer Belastungsparameter erfolgen. Hierdurch ist es möglich, in kurzer Zeit eine Bewertung zahnmedizinischer Konstruktionen und Materialien durchzuführen. In der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der Universität Regensburg wird jetzt bereits die 4. Generation derartiger Geräte erfolgreich eingesetzt. Vergleiche mit klinischen Daten zeigen eine gute Übereinstimmung der Resultate.

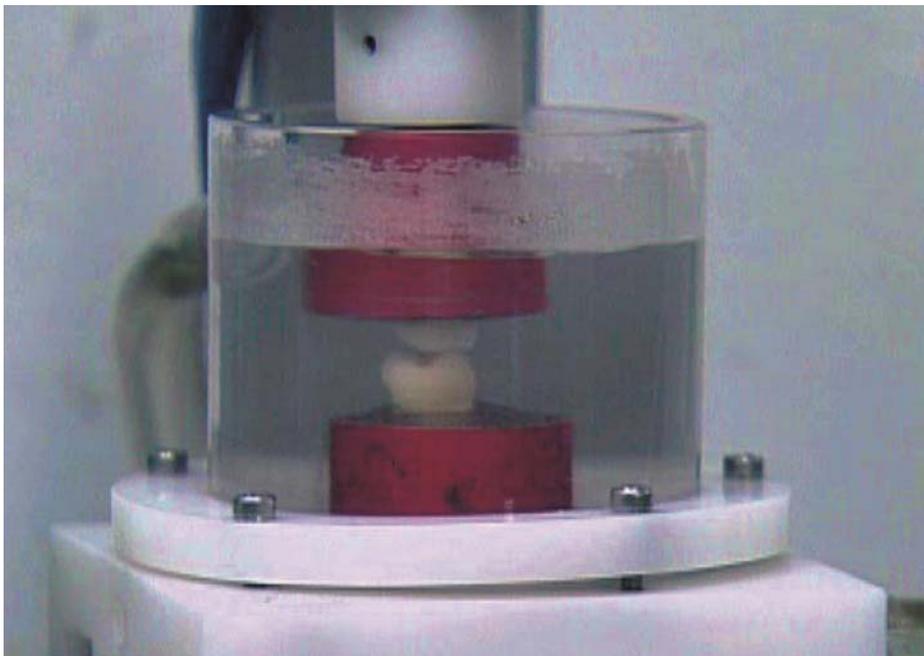
## **Auch in der Zukunft: Zahnersatz bleibt unverzichtbar**

Neben Problemen wie Mutagenität, Toxizität und Allergenität sind dentale Werkstoffe auch oft den mechanischen Belastungen in der Mundhöh-

le nicht gewachsen. Abgeplatzte Verblendungen, Brüche, Abrieb oder Verfärbungen oder sogar Sekundärkaries aufgrund mangelnder Randdichtigkeit sind die Folgen. Durch umfangreiche Reparaturen oder gar Neuanfertigungen müssen diese Schäden mit meist erheblichen Kosten aufgefangen werden. Wie eine Studie der I+G Gesundheitsforschung (München) zum prothetischen Behandlungsbedarf bis zum Jahr 2020 ergab, wird die Nachfrage nach Zahnersatz allen Prophylaxe-Maßnahmen zum Trotz fast auf dem derzeit hohen Niveau bleiben. Das Problem löst sich also nicht von selbst.

Hier können Apparaturen, die im Zeitrafferverfahren die klinische Eignung von neuen dentalen Werkstoffen und Restaurationen untersuchen, wertvolle Dienste leisten, um vorklinische Tests so aussagekräftig wie möglich zu gestalten. Wenn auch klinische Untersuchungen unverzichtbar sind, lassen sich doch so eine größere Anzahl von Neuentwicklungen prüfen und der Einsatz von Versuchstieren reduzieren oder sogar vermeiden. Es müssen aber für jeden dentalen Werkstoff, ob Keramik, Komposit oder Metall-Legierung und für jede Konstruktion wie Brücke, Prothese oder Inlay individuelle Belastungsparameter erarbeitet werden.

**Simulationseinheit  
Kausimulator.**



---

### Privatdozent Dr. med. dent. Michael Behr

arbeitet an der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik am Klinikum der Universität Regensburg. Im Forschungsverbund Materialwissenschaften, FORMAT, beschäftigt er sich mit dentalen Werkstoffen, Testmethodenentwicklung und dem Vergleich in vitro- /in vivo-Untersuchungen dentaler Werkstoffe und Restaurationen.

---

### Der Regensburger Kausimulator

Der Regensburger Kausimulator berücksichtigt neben der Kaukraft und der Belastung der Zähne bei verschiedenen Temperaturen auch das unterschiedliche feuchte Mundmilieu, die Mahlbewegung und die Beweglichkeit des Zahnhalteapparates, also des Kiefers. Die Kaubelastung wird dabei entweder durch Stempel oder durch einen oder mehrere natürliche Zähne als Antagonisten simuliert. Sowohl Materialproben als auch zahnärztliche Rekonstruktionen wie Füllungen, Kronen, Brücken oder ganze Prothesen können im Kausimulator untersucht werden. Das System ist auf einer pneumatischen Schaltung aufgebaut, die es erlaubt, sowohl die Kaukräfte als auch die Dauer der thermischen und hydrolytischen Belastung durch die Spülflüssigkeit frei einzustellen. Ein Computersystem kontrolliert dabei alle Parameter. Um auch eine optische Überwachung der Proben durchführen zu können, sind die Probenkammern aus glasklarem Kunststoff gefertigt.

Neben der Dauerlastfähigkeit einer Konstruktion oder Werkstoffkombination lassen sich Abtragungen der Oberfläche, Farbveränderungen und die Randschlussgenauigkeit am Übergang der vorhandenen Zahnschicht, beispielsweise zu einer Krone, untersuchen. Da der Regensburger Kausimulator neben künstlichen Zähnen auch mit extrahierten natürlichen Zähnen bestückt werden kann, lassen sich in Zukunft nicht nur mechanische, sondern auch biologische

Fragestellungen beantworten. Im Regensburger Klinikum laufen erste Versuche, die mechanische Kausimulation mit kariogenen Spülflüssigkeiten zu kombinieren, die nachträglich Karies erzeugen. Dies eröffnet die Möglichkeit, die kariesschützende Gestaltung von Restaurationsformen und die Wirkung bestimmter Inhaltsstoffe von neuen Materialien zur Kariesprophylaxe vor klinisch zu untersuchen.

### Hoffnung auf Gentechnik

Fernziel aller Bemühungen der Regensburger Wissenschaftler ist, eine funktionsfähige biologisch aktive Einheit von Zahn und Zahnhalteapparat (Parodontium) in einen Simulator einzubauen. Mit Hilfe der Gentechnik dürfte es dann eines Tages möglich sein, aus embryonalen Zellen eine Zahn/Parodontium-Funktionseinheit zu züchten. Zusammen mit dem Regensburger Kausimulator ließen sich dann die klinischen Bedingungen soweit nachahmen, dass künftig keine Produkte mehr in den Mund des Patienten kommen müssen, deren klinische Eignung fragwürdig oder gar risikoreich ist.

Die Nutzung derartiger Simulatoren ist jedoch nicht auf die Zahnmedizin beschränkt. Auch andere medizinische Fächer wie die Chirurgie, benötigen Werkstoffe und Konstruktionen, die mechanischen wie biologischen Belastungen standhalten. Für eine interdisziplinäre Zusammenarbeit muss also das Know-how der Ingenieurwissenschaften, der Werkstoffwissenschaften und der Medizin zusammengetragen werden.

# AM ANFANG WAR DAS FEUER

## Vom Torffeuer zum Wasserstoffmotor

Thomas Sattelmayer,  
Christoph Hirsch und Jochen R. Kalb

Vermutlich beginnt die gemeinsame Karriere von Mensch und Feuer mit Blitzschlag und brennendem Holz, eine für den Menschen sicherlich bahnbrechende Entdeckung. Durch das Feuer wird es möglich, gewaltigen Raubtieren zu trotzen, in klirrender Kälte zu überleben und damit neue Klimazonen als Lebensraum zu erschließen. Das Feuer bringt die Möglichkeit, Fleisch zu garen, das dadurch leichter essbar und besser verdaulich wird. Noch heute weckt das Lagerfeuer oder das Kaminfeuer tief sitzende Gefühle in uns: Geborgenheit, Sicherheit, Euphorie. In den Zeiträumen der Evolution nur einen Wimpernschlag später, entdeckt der Mensch Wege, das Feuer selber zu entfachen: Durch Reibung und Funkenschlag wird aus dem in steter Angst vor dem Verlöschen der Feuerampel lebenden Mensch ein göttergleicher Herrscher über eine treibende Kraft seiner Entwicklung. Von den alten Völkern an Euphrat und Tigris bis zum Prometheus der griechischen Sagenwelt behandeln alle bekannten Mythen und Erzählungen diese Erfindung, die immer als Eckpfeiler der menschlichen Entwicklung galt.



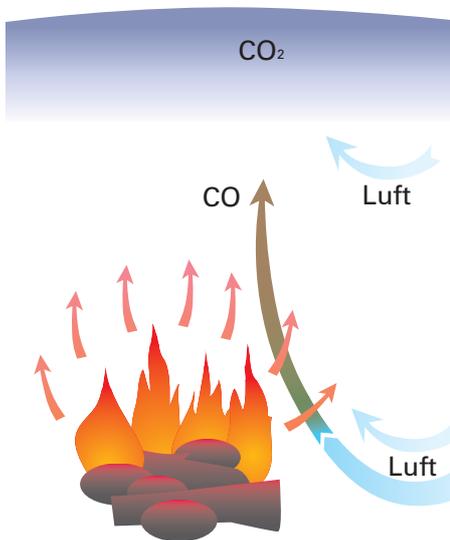
### Was die Flamme zum Leuchten bringt

Über sehr lange Zeit verwendete der Mensch das Feuer nur als offene Feuerstelle, die er mit festem Brennstoff wie Holz, Torf oder Dung beschickte.

In einer solchen Feuerstelle vergasen die festen kohlenstoffhal-

tigen Bestandteile, zum Beispiel Brennholz, im Inneren des Feuers bei relativ hohen Temperaturen mit wenig Luft und bilden Kohlenmonoxid. Dieses verbrennt dann weiter außen mit schwach bläulich leuchtender Flamme weiter zu Kohlendioxid. Außen liegt das frische Scheit, das durch die Verbrennungswärme

aus dem Kern des Feuers zunächst getrocknet und aufgeheizt wird. Hat das Holz eine gewisse Temperatur erreicht, werden die so genannten „flüchtigen“ Bestandteile wie Harze und ätherische Öle als Gase ausge-



**Bild 1: Beim offenen Feuer wird das Holz im heißen Kern vergast. Gleichzeitig werden die frischen Scheite aufgeheizt bis auch sie Brenngase abgeben. Die gebildeten Gase verbrennen während der weiteren Luftzumischung zu Kohlendioxid und Wasser.**

trieben. Diese mischen sich mit der heißen Luft, die aus dem Kern des Feuers aufsteigt und verbrennen mit hell leuchtender Flamme. Das Scheit beginnt zu brennen, sagen wir.

Die ausgetriebenen Gase müssen sich zunächst mit der Luft mischen, bevor eine Verbrennung, also die Umsetzung zu Wasserdampf und Kohlendioxid beginnen kann und Wärme entsteht. Die Flamme gleicht der aus einem Gasfeuerzeug oder einer Kerze. Auch dort sieht man diese hellgelb leuchtenden Flammen, die ja das bei der Kerze gewünschte

Licht erzeugen. Das Leuchten entsteht, wenn die Gase bei hoher Temperatur und wenig Luft Ruß bilden.

Dieser Ruß gelangt dann in die Verbrennungszone, wo er erst sehr heiß wird, bevor er verbrennen kann. In diesem Bereich, der so genannten Leuchtzone, strahlt der Ruß sichtbares, gelbes Licht, ähnlich wie die Wendel einer Glühbirne, aus. Was nicht verbrannt wird, weil zu viel Ruß entsteht oder Temperatur und Luft zur Rußverbrennung nicht ausreichen, trägt das Rauchgas aus dem Feuer. Solche Rußspuren hinterließen einst die Höhlenbewohner und heute das Abgasrohr eines Dieselmotors.

Die Verteilung von Brennstoff, Luft und Temperatur bestimmt den Ort der Verbrennung. „Schüren“ verändert die Luftzufuhr, ansonsten sind die Einflussmöglichkeiten auf den Verbrennungsverlauf im offenen Feuer gering. Das natürliche Feuer stößt aufgrund der unkontrollierten Abläufe eine Vielzahl von Schadstoffen aus, allen voran Kohlenmonoxid (s. Schema in Bild 1), aber auch Ruß und je nach Brennstoff sogar größere Mengen von Giftstoffen wie Dioxin. Auch wird nur ein kleiner Teil der erzeugten Wärme genutzt, während der größte Teil mit dem Rauchgas „durch den Schornstein“ verschwindet.

### Feste Feuerstellen und empirisches Wissen

Mit der Sesshaftigkeit begann der Mensch feste Feuerstellen zu bauen und den Verbrennungsvorgang gezielt zu beeinflussen und zu steuern.

Getrieben von dem Versuch, Gefäße aus Keramik herzustellen und Metall zu schmelzen, erwarben sich die Menschen empirisches Wissen im Bau von Öfen und Feuerungsanlagen. Nachdem die ersten Umwandlungsbrennstoffe wie Holzkohle aufkamen, wurde die Verbrennung gegenüber dem offenen Holzfeuer erheblich effizienter.

Aufbau und Wirkungsgrad der Feuerungen wurden im Laufe der Zeit immer besser, das Grundprinzip der Verbrennungsvorgänge und ihre Schadstoffemission blieben jedoch gleich. Mit dem Beginn der Industrialisierung im 18. Jahrhundert und der damit verbundenen Verstädterung zeigte sich bald massiv die Wirkung dieser Schadstoffe. Das bekannteste Beispiel ist der „London Smog“, der bei Sir Conan Doyles „Sherlock Holmes“ öfter eine wichtige Rolle spielt.

Nachdem Edwin Laurentine Drake am 27. August 1859 die erste größere Ölquelle in Pennsylvania (USA) durch eine Bohrung fand, stand einer industriellen Nutzung des schon lange bekannten Erdöls nichts mehr im Wege. Zunächst wurde das Erdöl samt seiner Destillate hauptsächlich zu Beleuchtungszwecken verbrannt, bald avancierte es jedoch zum Kraftstoff und schließlich zum Brennstoff für die aufkommende Stromproduktion. Wichtig für diese Entwicklung war die Weiterverarbeitung des Erdöls durch Destillation zu den so genannten Sekundärbrennstoffen wie dem Benzin, die die Mobilitätswelle ab 1909 durch die kleinen und leichten Motoren in den Automobilen und



Flugzeugen erst in Gang setzte. Gleichzeitig erforderte der stetig wachsende Bedarf an Elektrizität immer größere Kraftwerke, in denen durch Verfeuerung Wärmeenergie erzeugt, in mechanische Energie umgewandelt und schließlich in Generatoren elektrische Energie produziert wurde. Großkraftwerke zur Versorgung ganzer Städte kamen auf.

### Erste Gefahren bringen neue Verfahren

Die Massennutzung der Verbrennungstechnik in der Blüte der Industrialisierung im 20. Jahrhundert beeinträchtigte Umwelt und Gesundheit von Mensch und Tier erheblich. Die aufbereiteten Sekundärbrennstoffe entlasteten die Umwelt trotz gesteigerter Gesamtemissionen zunächst vor allem durch die geringere Rußbildung. Doch die in die Erdatmosphäre steigenden Verbrennungsnebenprodukte Schwefeldioxid und Stickoxid führten schließlich zu neuen Belastungen: dem sauren Regen mit der Folge des Waldsterbens und den in Bodennähe erhöhten Ozonwerten mit ihren Gefahren für Atemwegs- und Kreislaufkranke. Der Smog im Los Angeles der frühen achtziger Jahre hat Berühmtheit auf diesem Gebiet erlangt.

Sekundäre Emissionsminderungsverfahren, Abgasnachbehandlung und Rauchgasreinigung waren die ersten Verfahren, die diese Entwicklungen aufhalten sollten. In dieser Zeit entstand der geregelte Katalysator für Autos. Die verstärkte Forschung auf dem Gebiet der eigentlichen Verbrennungstechnik verrin-

gerte die Schadstoffbildung durch Primärverfahren. Primär bedeutet in diesem Fall, unmittelbar in den Entstehungsprozess der Schadstoffe einzugreifen, also die Randbedingungen und „Einstellungen“ des Verbrennungsverfahrens genau so zu verändern, dass möglichst wenig Schadstoffe entstehen.

Der erste Schritt beruht auf einer weiteren Reinigung, der Entschwefelung des Brennstoffes. Wo kein Schwefel in der Flamme ist, kann er auch nicht zu Schwefeldioxid verbrennen. Der nächste Schritt ist eine genaue Steuerung des Temperaturverlaufs: Liegt die Temperatur zu niedrig, ist die Verbrennung unvollständig und es entstehen Giftstoffe wie Kohlenmonoxid. Ist die Temperatur hingegen zu hoch, setzt das übermäßig viele Stickoxide frei. In Müllverbrennungsanlagen kann die geeignete Temperaturführung der Verbrennungsgase verschiedene Giftstoffe, zum Beispiel Dioxine, noch vor der nachfolgenden Abgasreinigung zerstören.

Die Einstellung einer mittleren Flammentemperatur allein hilft wenig. An einigen Punkten in der Flamme herrschen so hohe Temperaturen, dass allein dort größere Mengen an Stickoxiden produziert werden (Negativbeispiel Dieselmotor). Die Konstruktion der Feuerungsanlage muss also für eine möglichst homogene Flamme sorgen, indem sich idealerweise Brennstoff und Luft schon vor der Flamme perfekt miteinander vermischen, was nur im gasförmigen Zustand möglich ist.

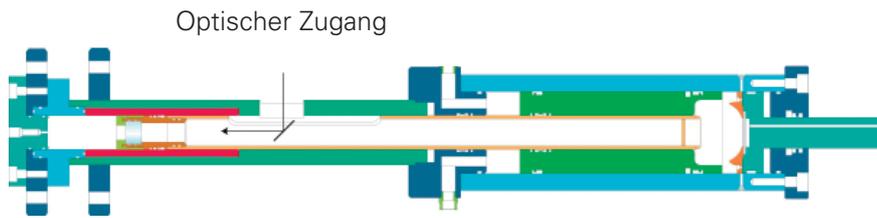
### Das Feuer macht Diät

Grundvoraussetzung der „mageren Vormischverbrennung“ ist eine hohe und konstante Qualität von Sekundärbrennstoffen wie Erdgas. Mager bedeutet hierbei, dass in der Flamme mehr Luft vorhanden ist, als zur vollständigen Verbrennung des Brennstoffes notwendig wäre. Auf die Luftmenge bezogen ist also relativ wenig Brennstoff vorhanden, daher die Bezeichnung des „mageren Gemisches“. Die überschüssige Luft wird in der Flamme natürlich auch erhitzt, beansprucht sozusagen einen Teil der Wärme für sich und reduziert damit die Temperatur der gesamten Flamme. Die perfekte Vormischung von Luft und Brennstoff vermeidet lokale Temperaturspitzen.

Dieses Verfahren reduziert also die Stickoxidemissionen erheblich und wird deshalb häufig eingesetzt: in Großkraftwerken wie den besonders umweltfreundlichen Gas- und Dampfturbinen-Kombikraftwerken, in den so genannten Blaubrennern in Hausheizungsanlagen bis hin zu neu konzipierten Verbrennungsmotoren wie dem HCCI-Motor (Homogeneous Charge Compression Ignition), der gewissermaßen eine Mischform aus Diesel- und Ottomotor ist.

Die magere Vormischverbrennung kämpft allerdings mit anderen, grundlegenden Problemen: Während bei einer „traditionellen“ Flamme die chemische Verbrennungsreaktion einfach an dem Ort stattfindet, an dem sie die richtige Mischung von Luft und Brennstoff vorfindet, ist die „Mager-Mischung“ praktisch überall zünd- und brennfähig. Wo wird die

## Am Anfang war das Feuer

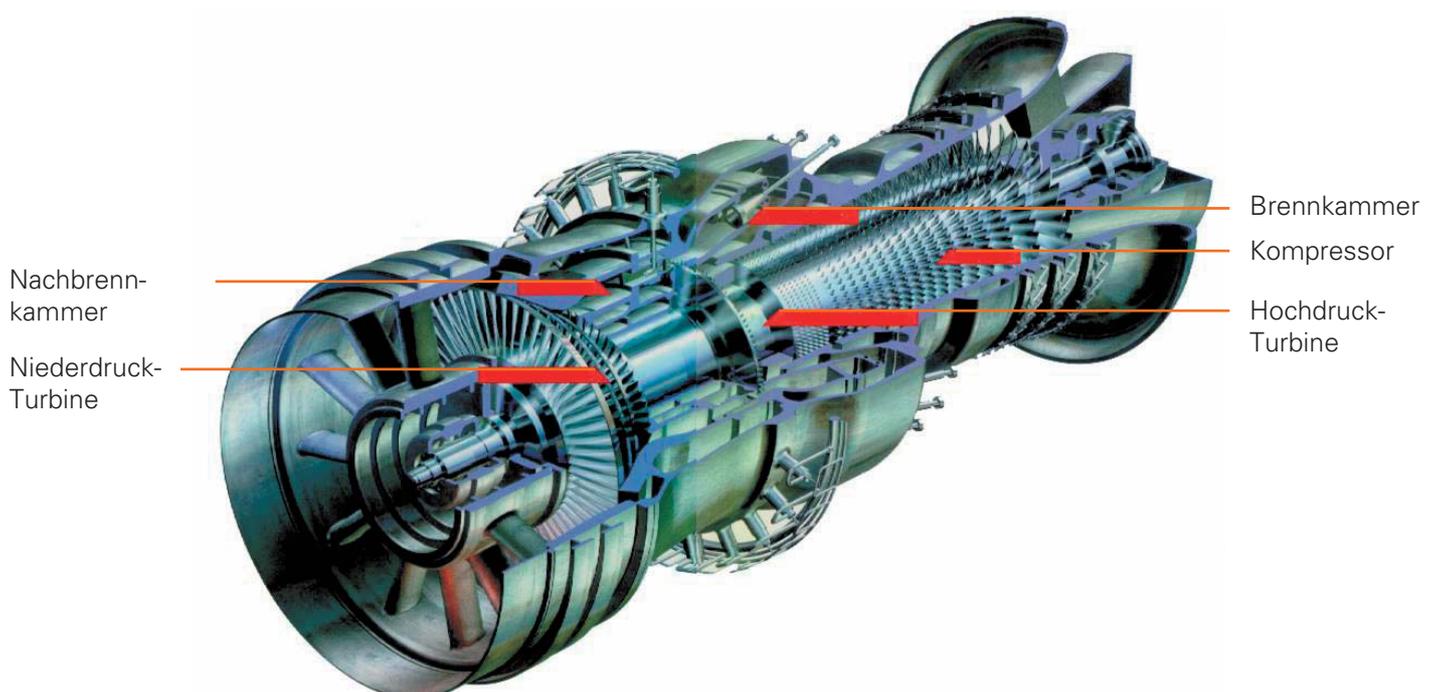


**Bild 2:** Experimentelle Forschung zum Verbrennungsprozess kann an Versuchsmotoren, Verbrennungszellen oder, wie im Bild gezeigt, an Einhubmaschinen durchgeführt werden. Pro Experiment simuliert die Einhubmaschine einen einzigen Verdichtungs-, Verbrennungs- und Expansionsvorgang.

Flamme also brennen? Die komplizierten Wechselwirkungen zwischen der Turbulenz der Luft-Brennstoff-Strömung, den akustischen Schwingungen darin und den thermischen Prozessen der Wärmefreisetzung in der Verbrennungszone bestimmen

diesen Ort. Die Flammenzone hat allerdings keinen festen Ort, sie schwingt um ein Zentrum. Diese Verbrennungsschwingungen sind beim heimischen Heizungsburner hörbar, sie verursachen den Verbrennungslärm. In Verbrennungsmotoren

können zyklische Schwankungen auftreten, bei denen das Gemisch im Zylinder eben nicht immer gleich zündet. In großen Gasturbinen (Bild 3) kann das sogar zu ernstesten Stabilitätsproblemen führen, die eine Abschaltung der Anlage erzwingen.



**Bild 3:** Gasturbine der 200MW-Klasse für die Stromerzeugung.



### Wissenschaft macht Feuer

Aufgabe der Verbrennungsforschung ist, die zugrunde liegenden naturwissenschaftlichen Zusammenhänge genau darzustellen, sie in einem mathematischen Modell abzubilden und durch Computersimulationen zu berechnen. Das Ziel ist dabei, diese Prozesse und ihre Anwendungen systematisch zu optimieren, denn umweltfreundlichere Techniken werden sich nur dann auf dem Markt durchsetzen, wenn sie verlässlich und stabil funktionieren.

Erster Ansatzpunkt ist, die magere vorgemischte Verbrennung für den Einsatz in neuen Anwendungsfeldern wie den automobilen Antrieben fit zu machen. Dazu untersuchen Wissenschaftler am Lehrstuhl für Thermodynamik der Technischen Universität München die Grundeigenschaften der oben schon erwähnten HCCI-Verbrennung in einem vereinfachten Versuchsstand (Bild 2), der aber dennoch alle wesentlichen Eigenschaften und Merkmale des späteren Einsatzes in einem Verbrennungsmotor nachbildet. Dieser Versuch verfolgt also den Lade-, Zünd- und Ausbrandvorgang in einem Zylinder während eines Kolbenhubes. Die umfassende Messung der relevanten Größen ermöglicht, eine Antriebstechnologie schrittweise zu optimieren, bis ihre Emissionen weit unter denen von heutigen Dieselmotoren liegen, während der Brennstoffverbrauch gleich bleibt.

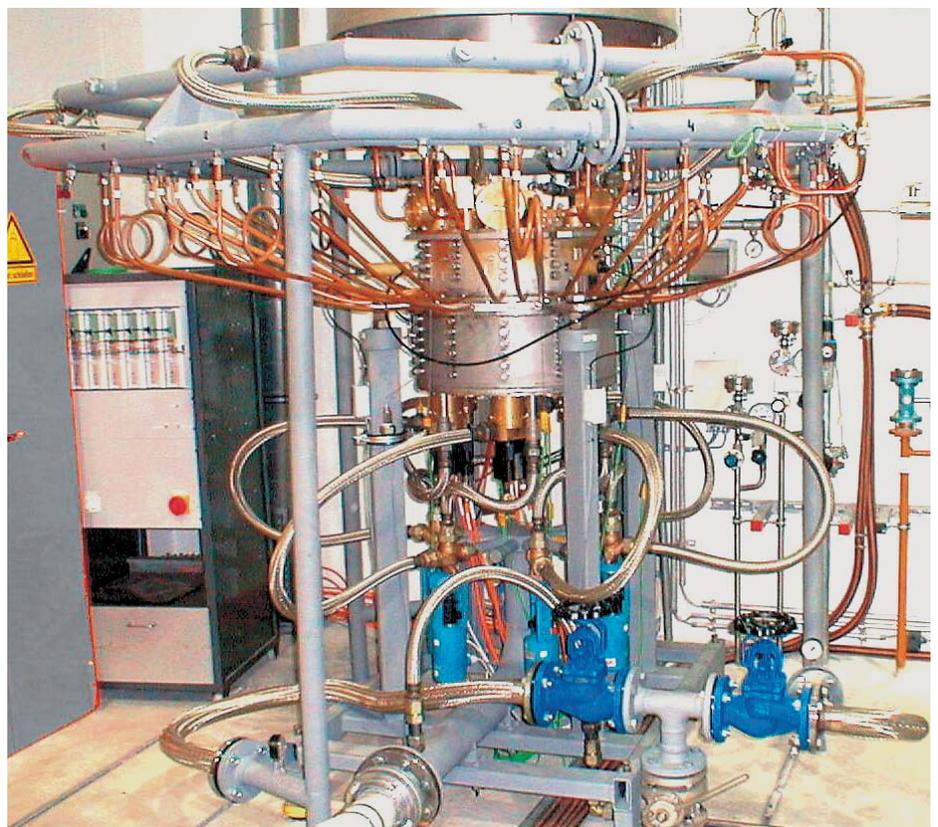
Genau dieses Ziel verfolgt die Forschung auch für die Feuerung von Gasturbinen. Obwohl hier die magerere Vormischverbrennung schon Ein-

zug gehalten hat, kann sie für flüssige Brennstoffe noch nicht genutzt werden. Erst wenn die Flamme so stabil ist, dass sie noch bei Temperaturen verlässlich brennt, wo sie bei herkömmlichen Brennern längst verloschen wäre, wird es möglich, Stickoxidemissionen bis in fast vernachlässigbare Konzentrationen zu senken. Die erzielten Ergebnisse gelten dann auch für Flugtriebwerke, denn hier steht die Stickoxidreduktion noch ganz am Anfang. Experimente und Computersimulationen sind die Voraussetzungen, die wichtigen Einflussfaktoren für neue Brennerkonzepte zu berechnen.

Parallel dazu arbeiten Wissenschaftler intensiv an der Frage, wie die Verbrennungsschwingungen entstehen. Dazu verwenden sie einen Versuchsstand, der eine industriell verwendete Ringbrennkammer nachbildet (Bild 4).

### Feuervisionen

Die Erforschung der Verbrennungstechnologie hat trotz ihrer langen Geschichte noch immer Zukunft, auch und gerade heute. Das Ölzeitalter läuft ab, diskutiert wird nicht mehr über das „Ob“, nur noch über das „Wann“. Auch die Vorräte des verhältnismäßig „sauberen“ Erdgases



**Bild 4: Ringförmige Versuchseinrichtung mit bis zu 2MW thermischer Leistung zur Simulation unerwünschter Verbrennungsschwingungen in Brennkammern großer Gasturbinen (Bild 3).**

---

### **Prof. Dr.-Ing. Thomas Sattelmayer**

(geb. 1955) war lange in der Industrie tätig, bevor er den Lehrstuhl für Thermodynamik an der TU München übernahm. Im Forschungsverbund Turbulente Verbrennung, FORTVER, beschäftigt er sich mit dem Verhalten turbulenter Flammen in Raum und Zeit. Sein wissenschaftliches Interesse ist die Thermo-Fluid-dynamik.

**Dr.-Ing. Christoph Hirsch** (geb. 1960) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Thermodynamik an der TU München. Seine Forschungsschwerpunkte sind im Bereich der Interaktion von Turbulenz und Reaktion.

**Dipl.-Phys. Jochen R. Kalb** (geb. 1976) ist Mitarbeiter von Prof. Sattelmayer. Er arbeitet an der Entwicklung eines fast  $\text{NO}_x$ -emissionsfreien Verbrennungssystems.

---

neigen sich dem Ende zu. Die Suche nach neuen Brennstoffen und deren Potenzial hat schon begonnen. Dem Wasserstoff winkt eine große Zukunft, weil er in großen Mengen mit Sonnenenergie aus Wasser gewonnen, oder durch die so genannte „grüne“ Kohleumwandlung unter gleichzeitiger Bindung des Treibhausgases Kohlendioxid aus Kohle erzeugt werden kann. Die Vergasung oder direkte Verbrennung von Biomasse steht ebenfalls zur Debatte.

Die Technologie der Brennstoffzelle wird verbrennungsbasierte Verfahren, wo sinnvoll, ergänzen. Schon heute existieren Pläne für Brennstoffzellen-Gasturbinen-Kombinationskraftwerke. Theoretisch nutzt zwar eine Brennstoffzelle den Brennstoff vollständig, in der Praxis allerdings bedeutet das einen unwirtschaftlich hohen Materialaufwand und Platzbedarf. Deshalb muss der Wasserstoff, den die Brennstoffzelle im wirtschaftlichen Betrieb nicht mehr nutzen kann, in einem nachgeschalteten Prozess verbrannt werden und kann so zum Beispiel mit einer Gasturbine in weitere Elektrizität

umgewandelt oder als Abwärme genutzt werden. Damit auch dieser Verbrennungsvorgang in der Zukunft zuverlässig und schadstoffarm erfolgt, gilt es heute die Grundlagen zu legen.

Die moderne Feuerungstechnologie hat einen wichtigen Platz in der Vision einer ökologischen Kreislaufwirtschaft. Am Anfang war also das Feuer – und es wird der menschlichen Kultur und Wirtschaft in seiner „neuen“ Form sicher noch lange erhalten bleiben.

# FORSCHER GUCKEN DURCH DIE NANO-RÖHRE

## Nanotubes aus Kohlenstoff

Otto Vostrowsky und Andreas Hirsch

**Schaltkreise und Speicherelemente in Molekülgröße, Geräte, die zu Tausenden auf einem menschlichen Haar Platz finden, miniaturisierte, extrem leichte Werkzeuge mit der Elastizität und Zugfestigkeit von Stahl – das sind nur einige der Visionen der Nanotechnologieforschung. Die Bauteile hierfür können aus kleinsten Kohlenstoffröhren konstruiert werden.**

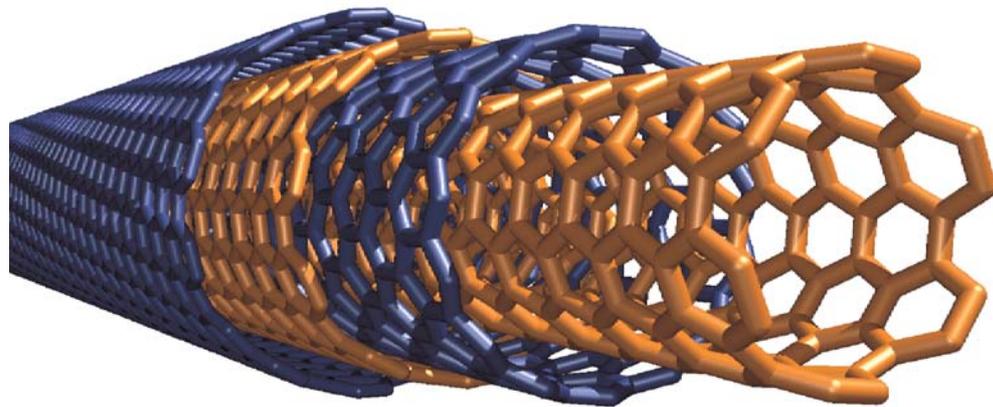
Die Nanotechnologie entwickelt Oberflächen, Strukturen, Materialien, Bauteile, Apparate und Maschinen mit Dimensionen unter einem Mikrometer (einem millionstel Meter) bis hinunter zu molekularen und atomaren Abmessungen. Es ist nur noch eine Frage der Zeit, bis aus den Ministrukturen elektronische Halbleiter- und Speicherelemente in der Größe von Molekülen in Serie gebaut werden können, die Grundlagen für zukünftige Computer, Kommunikationssysteme, Fahrzeuge, Haushaltsanwendungen und Automation. Die Produktion von Nanomaterialien wird zu

### Zusammengerollter Grafit

Ein viel versprechendes Material zur Realisierung dieser Ideen sind Kohlenstoffnanoröhren. Der japanische Physiker Sumio Iijima beobachtete 1991 bei der Verdampfung von Kohlenstoff im elektrischen Lichtbogen zufällig die Entstehung von kleinsten Röhrcchen aus Kohlenstoff, im Englischen „carbon nanotubes“. Sie sind aufgebaut aus zusammengerollten Grafit-schichten mit einem Sechsring-Honigwaben-Muster und haben Durchmesser von einem bis zu einigen zehn Nanometern (1 Nanometer nm = 1 millionstel Millimeter = 1/80 000 des Durchmessers eines Haares) und Längen bis zu wenigen Mikrometern. Neben Diamant, Grafit und den fußballförmigen Fullerenmolekülen sind die Nanotubes die vierte geordnete Modifikation des Kohlenstoffs.

Die ersten synthetisierten Nanotubes bestanden aus ineinander geschichteten Röhren, die völlig andere physikalische und chemische Eigenschaften besitzen als einzelne Kohlenstoffröhren. Als es 1996 gelang, größere Mengen einwandiger Kohlenstoffröhren mit katalytischen Syntheseverfahren herzustellen, war der Weg für die Untersuchung der individuellen Eigenschaften der winzigen Röhrcchen frei.

Nanotubes gibt es in vielfältigen Ausprägungen. Je nachdem, in welche Richtung sich das Grafitgitter aufrollt, entstehen symmetrische, spiralige (helikale) oder Zickzack-Formen. Bei den helikalen Röhren unterscheidet man links- und rechtsgedrehte Formen, die sich wie Bild



**Mehrwandige Kohlenstoffnanotubes.**

neuen und verbesserten Werkstoffen führen. Denkbare Einsatzfelder sind der Oberflächenschutz, Isoliermaterialien, Verbundwerkstoffe oder die Werkzeugherstellung. Miniaturisierte Geräte und Apparate werden heutige Produktionstechniken ersetzen: Den „Nanofabriken“ gehört die Zukunft.

und Spiegelbild unterscheiden: Sie sind chiral. Einwandige Kohlenstoffnanoröhren aggregieren bevorzugt zu parallel ausgerichteten Bündeln.

### Die Form bestimmt die Eigenschaften

Ihre entscheidende Bedeutung für zukünftige Technologien erlangen die Nanotubes weniger durch ihre Dimension, sondern durch ihre einmaligen mechanischen, physikalischen, chemischen und elektronischen Eigenschaften. Nanotubes haben eine mechanische Steifigkeit, die der von Kevlar, einem Polymer für Tennisschläger, oder der Seide von Spinnen entspricht. Ihre Zugspannung ist damit hundertmal so groß wie die von hochfestem Stahl – und das bei nur einem Sechstel dessen Gewichts. Die mechanische Festigkeit in Verbindung mit der ge-



**Einwandige Kohlenstoffnanoröhren aggregieren bevorzugt zu parallel ausgerichteten Bündeln.**

ringen Dichte machen die winzigen Röhren zu idealen Komponenten für Verbundwerkstoffe.

Je nach Form der Röhren haben Nanotubes bei unveränderter chemischer Zusammensetzung halbleitende oder metallisch-leitende elektronische Eigenschaften bis hin zu ballistischer Leitfähigkeit. Bei Letzterer setzt der Leiter den Leitungselektronen nur einen unendlich kleinen Widerstand entgegen. Wegen dieser besonderen Charakteristiken können aus Kohlenstoffnanoröhren aktive elektronische Bauelemente mit Abmessungen im nm-Bereich konstruiert werden. Einfache elektronische Bauelemente wie Dioden und Feldeffekttransistoren wurden bereits realisiert und teilweise zu logischen Schaltkreisen kombiniert.

Nanoröhren sind chemisch stabil und oxidationsbeständiger als andere Modifikationen des Kohlenstoffs. Von Sauerstoff werden sie primär an den offenen Röhrenden angegriffen. Beim Erhitzen tritt erst bei etwa 700 °C unter Zersetzung ein Gewichtsverlust ein.

Kohlenstoffnanoröhren sind als Kapillaren auch zur Speicherung von Wasserstoff geeignet, wobei die Speicherkapazität in der Größenordnung weniger Gewichtsprozent liegt.

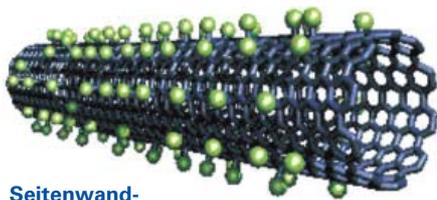
### Forschungsgebiet Funktionalisierung

Solch ein röhrenförmiges Kohlenstoffmolekül ist ähnlich wie Diamant und Grafit weder in Wasser, noch in einem organischen Lösemittel löslich. Das erschwert eine

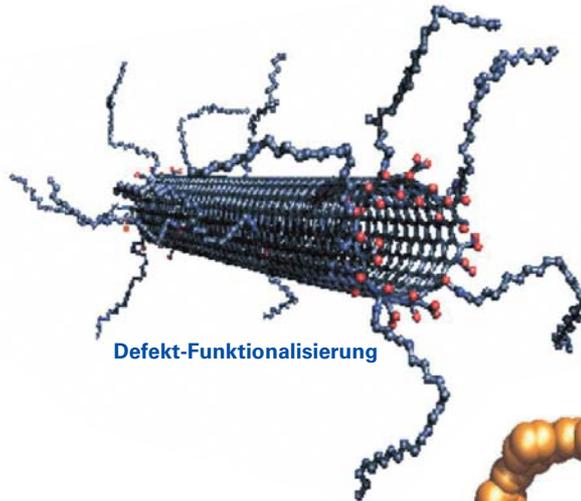
spätere Verarbeitung und Prozessierung oder macht sie gar unmöglich. An diesem Problem forscht eine Gruppe Physiker, Materialwissenschaftler und Chemiker des Bayerischen Forschungsverbands für Werkstoffe auf der Basis von Kohlenstoff (FORCARBON) zusammen mit einer Reihe von Industriepartnern. Die Bayerische Forschungstiftung fördert das Vorhaben. Ziel ist es, die Eigenschaften der Kohlenstoffnanoröhren gezielt so zu steuern, dass aus ihnen Materialien mit den gewünschten Charakteristika entwickelt werden können. Dazu muss die Oberfläche der Nanotubes verändert – „funktionalisiert“ – werden.

Dies kann chemisch oder physikalisch geschehen. Die Röhren bekommen quasi einen „Mantel“, der sie mit einer erhöhten Affinität zum Lösemittel umgibt. Auf diesem Weg ist es bereits gelungen, löslichen Kohlenstoff zu erzeugen.

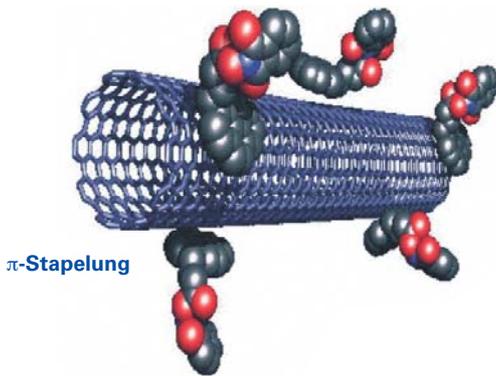
Verbesserte Lösungseigenschaften verändern jedoch die mechanischen, physikalischen und elektronischen Eigenschaften, reduzieren sie in manchen Fällen sogar. Auch eine Reduktion kann durchaus ein Vorteil sein: Sie ermöglicht ein „Finetuning“ der Eigenschaftsprofile der Tubes auf bestimmte Anwendungen hin und so die Entwicklung jeweils völlig neuer Materialien. Mit Hilfe eines Rastersondenmikroskops wird geprüft, wo sich die funktionalisierenden Moleküle auf der Oberfläche der Nanotubes befinden und wie viele vorhanden sind (Grad der Funktionalisierung). Röntgenstrahlen



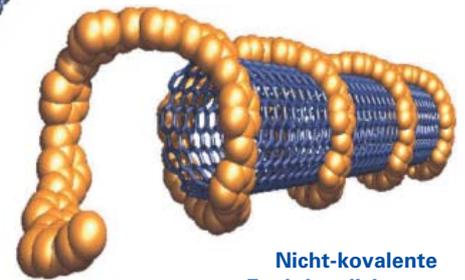
Seitenwand-  
Funktionalisierung



Defekt-Funktionalisierung



$\pi$ -Stapelung



Nicht-kovalente  
Funktionalisierung



endohedrale Funktionalisierung

tasten die Oberfläche der Tubes ab und analysieren deren elementare Zusammensetzung quantitativ.

Für den Einsatz in der Nanoelektronik müssen sich die Nanotubes auf Substraten (Trägern) in Feldern (Arrays) geordnet anlagern können. Dazu verhelfen ihnen die funktionellen Gruppen. Ziel ist es, definierte Nanotubes in Form von Polymer-Komposit-Materialien und Filmen zu verarbeiten.

### Chemisch ankoppeln

Die chemische Funktionalisierung unterscheidet zwischen der Defektfunktionalisierung und der Seitenwandfunktionalisierung. Defektfunktionalisierungen nutzen Fehler in dem normalerweise aus regelmäßigen Sechsringen bestehenden Röhrengitter, wie etwa Fünfringe und Siebenringe. Diese Defekte und auch die offenen Röhrenenden sind

durch Chemikalien leichter „angreifbar“ als die stabilen Sechsringe. Bei der Funktionalisierung reagieren die angreifenden Gruppen deshalb genau dort mit den Kohlenstoffatomen zu einer festen, chemischen Bindung.

Seitenwandfunktionalisierung bedeutet ebenfalls, zusätzliche Moleküle direkt auf der Oberfläche der Nanotubes anzubringen, hier allerdings an den Seitenwand-Sechsecken. Die verwendeten chemischen Substanzen sind besonders reaktiv. Sie überziehen die ganze Nanoröhre in mehr oder weniger regelmäßigen Abständen mit funktionisierenden Gruppen. Diese lassen sich entweder noch weiter chemisch verändern oder interagieren direkt mit dem Lösungsmittel, sodass sich die ganze Kohlenstoffröhre löst. Die Form der funktionellen Gruppen – zum Beispiel langkettig oder ver-

zweigt – und ihr chemisches Verhalten – polar oder unpolar – steuern dabei, wie gut sich die Nanotubes in den unterschiedlichen Lösemitteln lösen.

### Mäntel, Schlangen, Füllungen

Bei der physikalischen Funktionalisierung erhalten die Nanotubes eine zusätzliche Hülle, mit der sie aber nicht fest verbunden sind. Sie bekommen einen „Mantel“, den sie auch wieder „ausziehen“ können.

Besonders leistungsfähig ist die Aggregatbildung mit Polymeren und Biopolymeren. Dabei „umschlingen“ lang gestreckte Polymermoleküle die einzelnen Nanotubes, ähnlich wie Schlangen einen Ast.

Ein Sonderfall ist die so genannte  $\pi$ -Stapelung. Die umhüllenden Moleküle lagern sich nur mit „Saugnapfen“ an dem Röhrengerüst an, wäh-

---

**Dr. Otto Vostrowsky** (geb. 1944) ist Akademischer Oberrat am Institut für Organische Chemie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Seine Forschungsinteressen umfassen die synthetische Phosphorchemie, Naturstoffchemie, Massenspektrometrie und die Chemie von Fullerenen und Nanomaterialien.

**Prof. Dr. Andreas Hirsch** (geb. 1960) ist Inhaber des Lehrstuhls für Organische Chemie an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und Forschungsgruppenleiter bei FORCARBON. Er forscht an neuen Synthesemethoden für exohedrale Fullerenderivate, an deren Einsatz als Bausteine für supramolekulare Architekturen und Nanomaterialien und an der chemischen Derivatisierung von Kohlenstoffnanoröhren.

---

rend die anderen Bereiche frei in den Raum ragen. „Orientierte Adsorption“ nennt der Fachmann diese Art der Anlagerung.

Der Hohlraum im Inneren der Kohlenstoffröhre bietet genügend Platz für „Gäste“ wie Metalle, Metallsalze, kleine Verbindungen und Wasserstoff. Es entstehen so genannte endohedral funktionalisierte, „gefüllte“ Nanotubes.

Physikalische Funktionalisierungsmethoden sind wichtig, um unterschiedliche Nanotubes über chromatographische Reinigungsverfahren von einander zu trennen. Nach der Reinigung lassen sich die „Mäntel“ viel leichter wieder entfernen als die chemisch fest an die Röhren gebundenen funktionellen Gruppen.

### Nanotubes heute und morgen

Die Wissenschaftler arbeiten an neuen und verbesserten Herstellungsmethoden und Prozessierungstechniken für Kohlenstoffnanotubes. Entsprechende Funktionalisierungsmethoden sollen zu strukturell defi-

nierten und qualitativ hochwertigen Produkten führen. Erst wenn es möglich ist, durch chemisch-physikalische Manipulationen zuverlässig spezifische Eigenschaften bei den Tubes zu erzeugen, werden die Kohlenstoffnanoröhren zu einem Hochtechnologiewerkstoff und zu einer essenziellen Komponente zukünftiger Nanotechnologien. Mit der Lösung dieser Probleme werden die Menschen in Zukunft Objekte gestalten und nutzen können in einer Dimension, die weit unterhalb unserer natürlichen Wahrnehmungsfähigkeit liegt.

# MIKROPRODUKTIONSTECHNIK: MINIBAUTEILE MIT GRÖÖÖ

Manfred Geiger und Gerd Eßer

**Der Mensch verdankt einen großen Teil seines Erfolges der Intelligenz, die ihn in die Lage versetzt, biologische Defizite durch Nutzung technischer Hilfsmittel auszugleichen. Die richtigen technischen Hilfsmittel in ausreichender Stückzahl, in hinreichend kurzer Zeit und genügend hoher Qualität, also wirtschaftlich produzieren zu können, ist ein entscheidender Erfolgsfaktor.**

**Produkte und Produktionsmethoden haben sich im Laufe der Zeit gewandelt. Hat der Mensch früher vorwiegend lebensnotwendige Gegenstände wie Bekleidung, Waffen und Werkzeuge manuell gefertigt, so lässt er heute eine unüberschaubare Vielfalt technischer Produkte maschinell herstellen. Die Produkte unserer heutigen Industriegesellschaft sind nicht mehr „nur“ lebensnotwendig. Sie bestimmen die Form unserer Welt und gestalten unser Leben. Erzeugnisse wie Auto, Flugzeug, Mobiltelefon oder Computer befriedigen zum Teil Bedürfnisse, die erst durch ihre Erfindung geschaffen wurden. Es ist unerheblich, ob man diese Entwicklung als gut oder schlecht empfindet – sie ist nicht aufzuhalten.**

**Vor allem in der Medizintechnik finden sich vielfältige Einsatzmöglichkeiten für Mikroprodukte (gezeigtes Beispiel: künstliche Linse der Fa. Human Optics, Erlangen).**

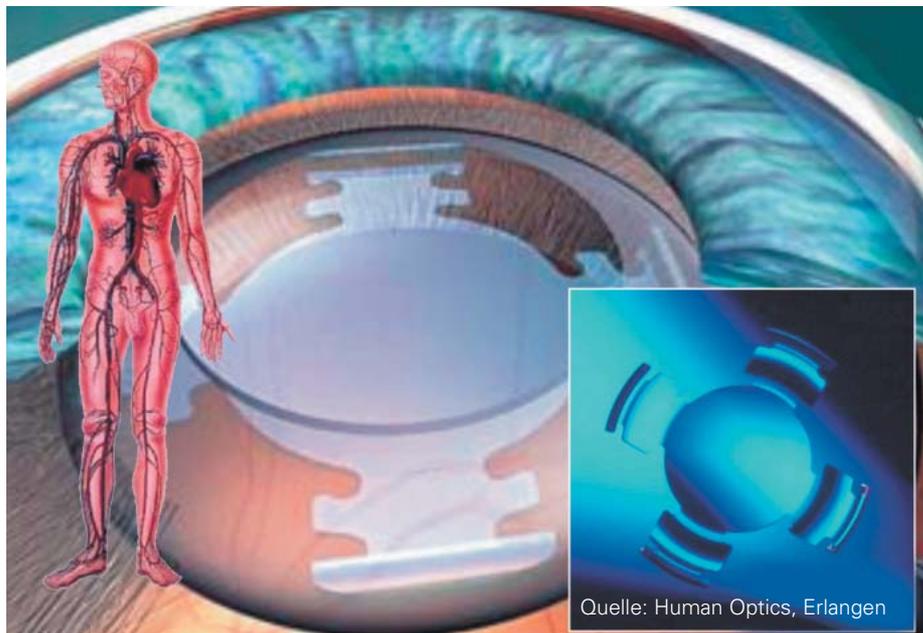
**D**er globale Markt treibt die Evolution der Produktionstechnik voran. Die weltweite Vernetzung durch moderne Verkehrs- und Kommunikationsmittel führt dazu, dass wir heute in einer sehr viel kleineren Welt als noch vor 100 Jahren leben. Japan, Australien und Amerika sind für uns keine exotischen, fremden Regionen mehr. Sie sind lediglich ein paar Flugstunden oder heute sogar nur einige Mausklicks entfernt. Weltweit muss der Mensch sich dieser immer schneller wandelnden Welt in immer kürzeren Zeiten anpassen.

Gleiches gilt für seine Produktionstechniken. Nur mit Know-how und den besten technischen Hilfsmitteln kann ein Industrieland, das nur über eine geringe Menge an natürlichen Rohstoffen, aber über eine große Menge an anspruchsvollen Konsumenten verfügt, im globalen Wettbewerb überleben. Was früher das Er-

finden der besten technischen Hilfsmittel war, ist heute die Entwicklung von High-Tech-Produkten und damit verbundenen Hochtechnologien. Gerade die Fertigung miniaturisierter multifunktionaler Produkte, wie sie uns heute nicht nur in Form von Mobiltelefonen und elektronischen Terminplanern ständig begleiten, erfordert solche Hochtechnologien.

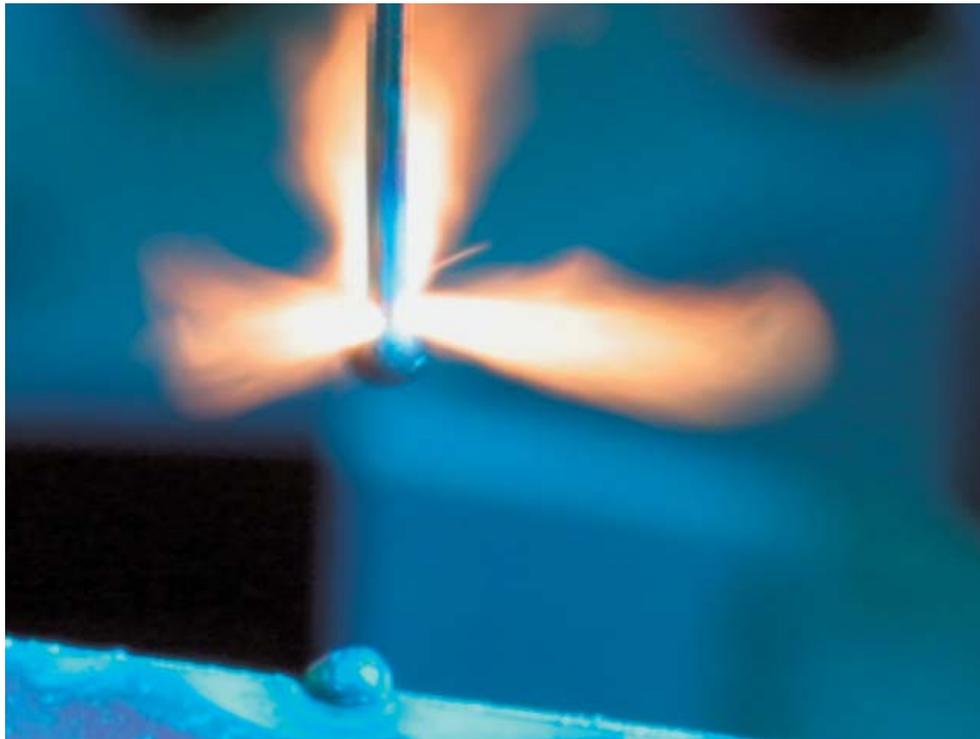
## „Intelligente Bohnen“

Mikrokameras, Mikromotoren und -pumpen, Sensoren und Aktoren sind heute schon wichtige Bestandteile in Kraftfahrzeugen und in der Luft- und Raumfahrttechnik. In der Produktionstechnik führen sie zusammen mit immer ausgefeilteren elektronischen Steuerungen dazu, dass die eigentliche Produktion schneller und gleichzeitig flexibler vonstatten geht. Bald werden wir elektronische Zeitungen, Bildtelefone, intelligente Chipkarten und Mikrosysteme für die Überwa-



Quelle: Human Optics, Erlangen

## Mikroproduktionstechnik: Minibauteile mit Größe



Beim Laser Droplet Welding entstehen Mikroverbindungen indirekt durch lasergenerierte Schmelztropfen.

chung unserer Gesundheit ebenso selbstverständlich mit uns herumtragen, wie heute unsere Brillen oder Armbanduhr. Bohnengroße, intelligente Mikrocomputer werden in ihrer Leistungsfähigkeit unsere heutigen Arbeitsplatzrechner bald übertreffen. Sie werden berührungslos miteinander kommunizieren und zum Aufbau eines Computernetzwerks werden weder Kabel noch Stecker nötig sein. Es wird ausreichen, „intelligente Bohnen“ in ein entsprechendes Gefäß zu geben, das Energie liefert und eine Datenschnittstelle zur Außenwelt bereitstellt. Es ist durchaus vorstellbar, dass wir in einigen Jahren Rechnerleistung im Supermarkt kaufen wie heute Bohnen.

In den modernen Industrieländern, deren Bevölkerungsstruktur eher durch die „Über-60-Jährigen“ als durch die „Unter-20-Jährigen“ geprägt ist, wird die Verbreitung mikrotechnischer Produkte aber vor allem in der Medizintechnik weiter steigen.

Der menschliche Körper besteht aus äußerst komplexen Komponenten, die allesamt nur auf eine endliche Lebensdauer ausgelegt sind. Es liegt nahe, solche Komponenten ersetzen zu wollen, weil die Lebenserwartung des Menschen die seiner Komponenten deutlich übersteigt, oder weil die biologische Evolution die erfolgreiche Anpassung des Menschen an die von ihm selbst mit zunehmender Dynamik veränderte Umwelt nicht mehr gewährleisten kann. Mit Hilfe der modernen Technik sollen Ersatzteile genauso funktional wie die Natur werden und das bei gleicher Baugröße. Die Fertigung medizintechnischer Produkte wie Herzschrittmacher, Hörgeräte, künstliche Herzklappen und Mikropumpen im Blutkreislauf ist eine spannende Herausforderung für die Mikroproduktionstechnik.

### Kleiner, leichter, effektiver

Die immer kleineren und leichteren Komponenten müssen auch weiter-

hin genau zueinander passen. Die Toleranzgrenzen in der Produktion verlagern sich in den Mikrobereich, der Montageaufwand wächst. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an Produktivität und Fehlervermeidung und damit auch die Kosten. Allen Anforderungen gerecht zu werden und dabei effizient zu wirtschaften, ist eine große Herausforderung für die Produktionstechnik.

Lasergestützte Fertigungsverfahren, zum Beispiel in der mechanischen Positionsjustage, sind innovative Lösungsansätze. Ein Laserstrahl erwärmt ein Werkstück lokal, der bestrahlte Bereich wird weicher und dehnt sich aus. Das umliegende, nicht erwärmte Material behindert diese Ausdehnung. Das führt zu Druckspannungen und beim Erkalten umgekehrt zu Zugspannungen. Diese beiden gegenläufigen Kräfte können dann einen Aktor in definierter Art und Weise bewegen. Eine grobe Vormontage vor der eigentlichen hochgenauen und automatisierbaren Laserstrahljustage sichert die Produktivität auch bei den gesteigerten Anforderungen der Mikrofertigung mit niedrigsten Toleranzen.

Längst nicht ausgereizt sind die Potenziale der lasergestützten Verbindungstechnik. Neben bereits etablierten Verfahren wie dem Laserstrahlschweißen oder -löten erfinden Forscher immer wieder neue Prozessvarianten. Das so genannte Laserstrahl-Tröpfchenschweißen (siehe Bild) verbindet Bauteile auch dann noch zuverlässig miteinander, wenn sich ein Spalt zwischen ihnen nicht vermeiden lässt. Der Laser schmilzt



eine kleine Menge eines zusätzlichen, verbindenden Werkstoffs in Drahtform zu einem Tropfen. Durch Modulation der Laserstrahlintensität löst sich der flüssige Tropfen am Drahtende ab, verbindet damit die Fügestelle und dichtet sie ab. Angepasstes Drahtmaterial hilft, auch Materialkombinationen miteinander zu verbinden, die für das Laserstrahlschweißen als „nicht ffügbar“ gelten. Dieses Verfahren erzielt vor allem bei der Bearbeitung hochreflektierender Werkstoffe – wie sie häufig in der Elektronikproduktion eingesetzt werden – eine höhere Prozesssicherheit.

### „Winzige“ Probleme

Ein grundsätzliches Problem in der Mikroproduktionstechnik ist, dass die innere Struktur der verwendeten Materialien mikroskopisch inhomogen ist. Beispielsweise ändert sich das Umformverhalten von metallischen Werkstoffen, wenn die Bauteilabmessungen der mittleren Korngröße nahe kommen. Je kleiner das Bauteil wird, umso weniger „Materialkörner“ enthält es. Gleichzeitig steigt der Anteil von Körnern mit Kontakt zur Bauteiloberfläche. Dies

führt zu einer Reduktion des Widerstands gegen Formänderungen insgesamt.

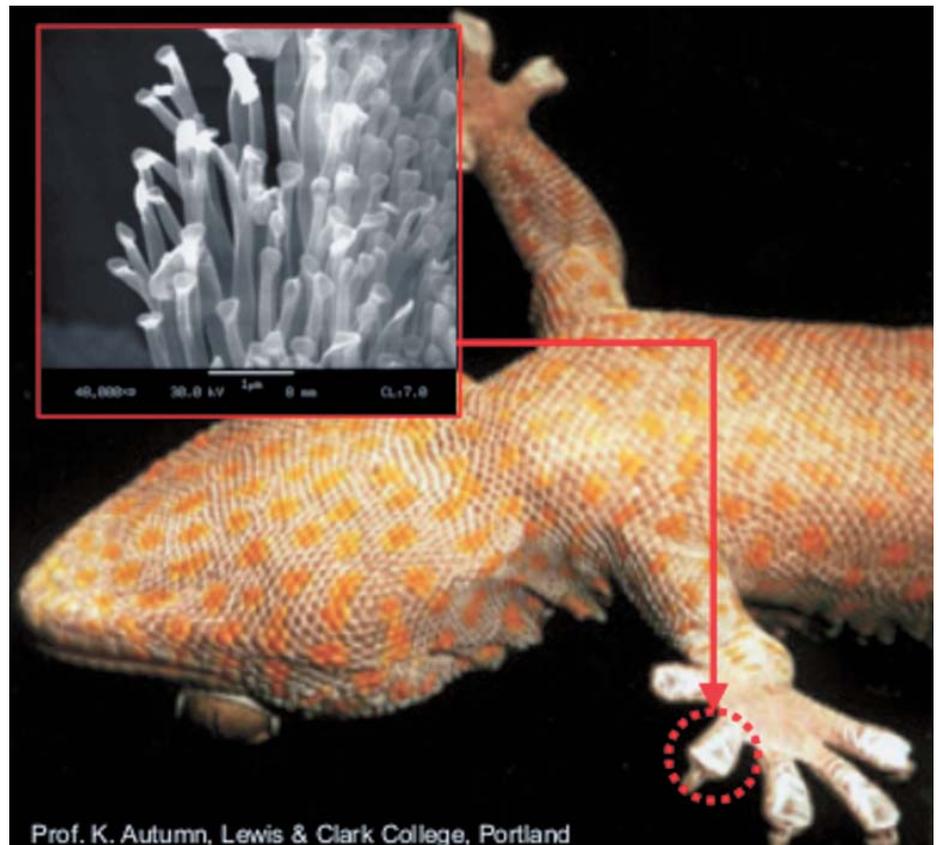
Ähnliches gilt für die tribologischen Eigenschaften (Reibung, Verschleiß und Schmierung) in einem Werkzeugsystem für das Mikroumformen. Je kleiner ein Bauteil, desto ungünstiger ist das Verhältnis von Oberfläche zum Volumen und desto größer die Reibung.

Wer die Mechanismen im Mikrokosmos versteht, kann auch metallische Kleinstteile mit Abmessungen im Mikrometerbereich durch Mikroumformen herstellen. Bisher werden allerdings immer noch täglich Millionen Steckerelemente für elektronische Baugruppen durch Mikro-

zerspanung hergestellt, auch wenn sie nur wenige Millimeter groß sind und die Oberflächenkennzahlen im Nanometerbereich liegen. Die Mikrozerspanung trennt mehr Bauteilvolumen ab, als für das Bauteil selbst benötigt wird. Das Verfahren produziert hohe Materialkosten und ist ökologisch zweifelhaft. Es ist nur noch eine Frage der Zeit, bis die Mikroumformtechnik die Produktionsketten der Elektronikindustrie nachhaltig verändert.

### Zu klein für die grobe Mechanik

Zu dem Problem der sinkenden Fertigungstoleranzen, dem man mit der Laserstrahljustage noch gut begeg-



**Im Mikrokosmos gelten andere Gesetze:  
Adhäsion durch Mikrostrukturen  
macht es einem Gecko möglich,  
an der Decke zu laufen.**

---

### Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c.

**Manfred Geiger** (Jahrgang 1941) ist Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie der Universität Erlangen-Nürnberg und Vorsitzender der Geschäftsführung des Bayerischen Laserzentrums in Erlangen. Von 1995 bis 2002 war er Mitglied in Senat und Hauptausschuss der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG). Heute ist er Mitglied im Wissenschaftsrat und in der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften. Seine Forschungsschwerpunkte sind Umformtechnik, Lasertechnik und Informationstechnik. Er ist Sprecher des Bayerischen Forschungsverbundes Mikroproduktionstechnik, FORMIKROPROD, und Vorstandsmitglied der abayfor.

**Dr.-Ing. Gerd Eßer** (Jahrgang 1969) ist Geschäftsführer des Bayerischen Laserzentrums. Die gemeinnützige BLZ gGmbH versteht sich als Forschungsunternehmen, Transfereinrichtung und Dienstleister für den industriellen Anwender. Forschungsschwerpunkte sind laser-gestützte Verfahren in Elektronikproduktion, Feinwerktechnik, Mikrooptik, Mess- und Regelungstechnik, Kunststofftechnik, Medizintechnik, Maschinenbau und Rapid Prototyping.

---

nen kann, kommen weitere Herausforderungen, zum Beispiel die Handhabung der winzigen Baukomponenten. Im Mikrokosmos gelten andere Gesetze: Ein Bauteil mit einem Volumen von 0,1 Kubikmillimeter verhält sich ganz anders als ein ähnliches Bauteil mit einem Volumen von 0,1 Kubikmeter. Das drastisch vergrößerte Verhältnis von Oberfläche zu Volumen führt zu viel höheren Adhäsionskräften, magnetischer und elektrostatischer Anziehung oder Abstoßung.

Für eine leistungsfähige Mikroproduktionstechnik muss die Handhabung von Mikrokomponenten noch stark verbessert werden. Spezielle Werkzeuge wie Vakuumgreifer helfen nur im Einzelfall, das grundsätzliche Problem lösen sie nur teilweise. Bei der Mikroproduktion bedeutet jeder zusätzliche Verfahrensschritt eine enorme Fehlermöglichkeit. Verfahren aus der Halbleitertechnik lassen sich auf die Fertigung mikromechanischer, mikrooptischer und mikromechatronischer Baugruppen übertragen und könnten auch hier die Produktivität entscheidend steigern.

Ein Siliziumwafer trägt als „Tablett“ eine Vielzahl identischer Mikrochips, die als Einzelkomponenten nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand bearbeitet werden könnten. Das Prinzip lässt sich auf die Mikroproduktionstechnik übertragen: Die Serienfertigung von Mikrokomponenten auf makroskopisch dimensionierten Trägern würde den Handhabungsaufwand erheblich minimieren. Besonders reizvoll ist die Idee einer Mikro-

produktion von der Rolle. Damit ist gemeint, dass identische Mikrokomponenten auf bandförmigen Träger substraten gefertigt werden und in genau dieser Form auch für die Baugruppenmontage zur Verfügung stehen. Ob dies möglich ist, hängt von den eingesetzten Materialien und Fertigungsverfahren ab.

### Ausblick

Die Bedeutung mikrotechnischer Erzeugnisse wird in den kommenden Jahren kontinuierlich wachsen. Es ist eine der größten Herausforderungen für die Produktionstechnik, Technologien, Systeme und Methoden zu finden, um mikrotechnische Erzeugnisse in Zukunft wirtschaftlich produzieren zu können. Der globale Markt bestimmt die Entwicklungsdynamik. Dieser Herausforderung stellt sich der bayerische Forschungsverbund Mikroproduktionstechnik, in dem Wissenschaftler aus den unterschiedlichsten Disziplinen intensiv mit Partnern aus der Wirtschaft zusammenarbeiten. Die Zukunft der Mikroproduktion hat nicht nur in den Labors der Forscher längst begonnen.