Vorwort

Die Politik und besonders die Wissenschaftspolitik hat die Aufgabe, Spitzenforschung zu fördern und Brücken zu schlagen. Brücken aufzubauen in zweifacher Hinsicht: um Innovation durch interdisziplinäre Zusammenarbeit zu forcieren und um wissenschaftliche Erkenntnisse in Wirtschaft und Gesellschaft zu transferieren.

Die Förderung der interdisziplinären Forschung ist für Bayern Programm. Unsere Aufgabe ist es, das Potenzial, das in der Vernetzung der Wissenschaften liegt, auf bestmögliche Weise zu nutzen. Dies gilt sowohl für die natur- und ingenieurwissenschaftlichen Bereiche als auch für die Geisteswissenschaften. Beide sind wichtig, um das Fundament für die moderne Gesellschaft zu sichern. Die Forschungsverbünde sind ein wichtiges Element der bayerischen Forschungspolitik, um die interdisziplinäre Zusammenarbeit zu fördern.

In der Vernetzung von Spitzenforschung, Unternehmen, Existenzgründerzentren und Risikokapitalgebern zu Clustern liegt die Zukunft. Die Forschungsverbünde sind hierbei Cluster im Cluster und werden auch künftig eine große Bedeutung in der Forschungslandschaft Bayerns haben.

Die Zukunftsfähigkeit unseres Landes hängt wesentlich davon ab, ob es Deutschland gelingt, seine Spitzenstellung als Innovationsstandort wieder zurückzugewinnen. Wissenschaft und Forschung sind dabei ein Hauptmotor für Innovation und Kreativität. Trotz der dramatischen Entwicklungen der öffentlichen Haushalte muss und wird es uns gelingen, den Innovationsmotor mit „Turbo-Triebwerken" auszurüsten. Deshalb ist es wichtig, den Stellenwert von Wissenschaft in der Öffentlichkeit immer wieder positiv zu besetzen, die Ergebnisse bekannt zu machen.

abayfor, die Arbeitsgemeinschaft der Bayerischen Forschungsverbünde, unterstützt das Wirken der Verbünde nach außen und leistet einen wichtigen Beitrag zum Technologietransfer. Das Konzept der Forschungsverbünde ist nicht zuletzt durch die gemeinsame Plattform mittlerweile über die Grenzen Bayerns hinaus bekannt geworden.

Unsere Gesellschaft ist hoch entwickelt und global tief verflochten. Trotz aktueller Probleme liegen wir mit unserer Lebensqualität an der Weltspitze. Der hohe Lebensstandard macht uns aber auch verwundbar, zumal wir selbstverständlich davon ausgehen, dass er Bestand hat – unsere Abhängigkeit von Energie und Rohstoffen und deren zuverlässige Lieferung ist uns dabei selten bewusst. Solche Abhängigkeiten wahrzunehmen, zu reduzieren und in allen Richtungen nach Alternativen zu suchen, ist eine wichtige Aufgabe von Wissenschaft und Forschung.

Eine andere ist, Risiken und Gefährdungen durch Krankheiten, wirtschaftliche, gesellschaftliche oder politische Fehlentwicklungen frühzeitig zu erkennen und die richtigen Fragen zu formulieren. Auch eine Aufgabe von Wissenschaft und Forschung ist die Eroberung des Horizonts, nicht nur des eigenen, sondern unser aller Horizont. Nach der Grenze zu suchen ist sicher für viele Wissenschaftler eine Antriebsfeder. Wie sonst entstünden die Innovationen wie die Nanotechnologie oder die Mikroproduktionstechnik?

Immer wieder wird dabei über den Stellenwert von Grundlagenforschung kontrovers diskutiert. Ohne Grundlagenforschung entstehen keine bahnbrechenden neuen Erkenntnisse, ohne die angewandte Forschung keine Innovation in der Wirtschaft. Von der Grundlagenforschung bis zum erfolgreichen Produkt vergehen oft Jahrzehnte. Zwischen Gutenbergs erster (dokumentierter) Beschäftigung mit dem Buchdruck über bewegliche Lettern im Jahr 1435 und dem Druck der ersten Bibel vergingen 20 Jahre. Das Patent über MP3 lag 10 Jahre in der Schublade, bis die Technologie vor wenigen Jahren den wirtschaftlichen Durchbruch schaffte. Ein aktuelles Beispiel ist die Nanotechnologie. Wenigen konkreten Wirtschaftsdaten stehen viele Prognosen und Expertenmeinungen zwischen „akademischem Hobby" und „künftigem Milliardenmarkt" gegenüber. Deutschland befindet sich zusammen mit den USA und Japan im Wettbewerb um die Technologieführerschaft. Bei den Publikationen liegt Deutschland auf Platz 3 hinter den USA und Japan, bei den Patentanmeldungen auf Platz 2 hinter den USA, aber vor Japan. Es folgen Frankreich und Großbritannien. Um Chancen für neue, erfolgreiche Produkte auf hohem Niveau zu eröffnen, muss die gesamte „wissenschaftliche Wertschöpfungskette" zwischen Grundlagenforschung und anwendungsorientierter Forschung gefördert werden. Investitionen in die Grundlagenforschung erkennen mittlerweile auch Institutionen an, die bisher der Grundlagenforschung eher skeptisch gegenüberstanden. Angesichts der zunehmenden Verlagerung qualifizierter Arbeitsplätze ins Ausland und der immer noch lahmenden Konjunktur in Deutschland schreibt die VDI/VDE-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik im März 2004: „Die Investition in frühe Forschungsstadien ist von kaum zu überschätzendem Nutzen für die künftige Wirtschaftskraft eines Landes. Dies gilt insbesondere auch für die Mikrosystem- und Nanotechnik."

Wissenschaft und Forschung sind tragende Säulen unserer Gesellschaft und unseres Wohlstands. Mit ihren Beiträgen in „Zukunft im Brennpunkt" tragen die Wissenschaftler aus den Forschungsverbünden dazu bei, Begeisterung für Forschung und Wissenschaft und auch ein bisschen Stolz zu wecken. Und sie sorgen dafür, dass Forschung, Wirtschaft und Gesellschaft keine Gegensätze, sondern eine Einheit bilden.

„Mir wird applaudiert, weil mich jeder versteht, und Ihnen, weil Sie niemand versteht", sagte einst Charlie Chaplin zu Albert Einstein. „Zukunft im Brennpunkt" erscheint jetzt zum dritten Mal. Ich freue mich darüber, dass die Wissenschaftler aus den Forschungsverbünden die Möglichkeit ergreifen, ihre Arbeiten einer breiten Leserschaft verständlich zu erklären – und damit Applaus verdienen.
Ich wünsche Ihnen viel Vergnügen beim Lesen!

München, im Oktober 2004

Dr. Thomas Goppel
Bayerischer Staatsminister
für Wissenschaft, Forschung
und Kunst

INHALT

Thomas Goppel 2
Vorwort

WELT DER KULTUR 7

Alexander Thomas und Julia Bürger 9
Personalführung in internationalen Unternehmen

Hans-Dieter Haas 15
Chinas Hunger nach Rohstoffen und die Folgen des Wirtschaftsbooms

Peter Mertens 21
Informationstechnik in Deutschland – ein Auslaufmodell?

WELT DER INFORMATION 27

Rudolf Bayer, Christian Effert, Christian Roth und Dietmar Scharf 29
coPark – Coordiniertes Parken in Ballungszentren

Burkhard Freitag, Ulrich Zukowski und Gerhard Bloch 33
Digitales Dombauarchiv

WELT DES LEBENS 39

Rainer Barthel, Kai-Uwe Bletzinger, Michael Eckl, Martin Faulstich, Detlef Heinz, Florian Jurecka, Ernst Rank, Thomas Schäfer, Peter Schießl, Matthias Schleinkofer, Bettina Schöpe, Ziad Wassouf und Gabriele Weber-Blaschke 41
Bauwerke der Zukunft

Roland Meyer-Pittroff und Gerrit Blümelhuber 47
Mit Ultrahochdruck für das Leben

Eckhard Wolf, Regina Klose und Alexander Pfeifer 51
Von Klon-Kühen und Fluoreszenz-Ferkeln

WELT DER MATERIE 55

Hermann Gaub 57
Minikräfte mit Riesenpotenzial

Achim Wixforth 63
Nanobeben im Chiplabor

Joachim Heinzl, Michael Zäh, Michael Franzkowiak, Stefan Grünwald, Michael Schilp, Josef Zimmermann und Adolf Zitzmann 67
Die Schwebebahn der Mikroproduktion

Gerd Eßer und Stephan Roth 71
Mehr als ein „Licht-Skalpell“

Günter Ziegler 75
Biomaterialien nach Maß

Friedrich Dinkelacker 81
Vom Auspusten der Kerze und der Stabilisierung von Flammen

DIE FORSCHUNGSVERBÜNDE DER ABAYFOR 85

Zukunft im Brennpunkt 86

Liste der Forschungsverbünde 88

Impressum

PERSONALFÜHRUNG IN INTERNATIONALEN UNTERNEHMEN

Alexander Thomas und Julia Bürger

Interview mit einem deutschen Produktionsleiter in Tschechien: „Wir hatten immer wieder Verbesserungsvorschläge für einen Produktionsablauf gemacht, die nie umgesetzt wurden. Auf die beschlossenen Maßnahmen hin angesprochen, sagte dann der tschechische Produktionsleiter ‚hab ich vergessen' und ‚ja, ja, das mach ich noch'. Das ‚ja, ja' ist meiner Erfahrung nach ein ‚ja, ich hab's gehört, aber ich hab's nicht verstanden und ich werd's auch nicht umsetzen'. Und er hat den Produktionsablauf bis jetzt noch nicht geändert, auch nicht nach dem zweiten oder dritten intensiven Gespräch. Also das ist dann schon irgendwie frustrierend."

Montageband bei der VW-Tochter Skoda in Mlada Boleslav: Im Sinne einer hohen Produktivität kommt der Kooperation zwischen tschechischen und deutschen Mitarbeitern eine entscheidende Bedeutung zu.
Foto: Sean Gallup/Visum

Die Forderung nach interkultureller Kompetenz

Unternehmen unterhalten heute in der Mehrzahl nicht nur Geschäftsbeziehungen ins Ausland, sondern sind auch in ihrer Belegschaft international zusammengesetzt. Natürlich erwarten sie von ihren Mitarbeitern immer öfter interkulturelle Kompetenz und dass die kulturellen Unterschiede untereinander wahrgenommen und angemessen berücksichtigt werden. Nicht mehr nur in Großunternehmen ist der Anspruch, „international gebildet" zu sein in den Unternehmensleitlinien verankert, auch mittelständische und kleinere Unternehmen haben sich inzwischen auf den Weg in die große weite Welt gemacht.

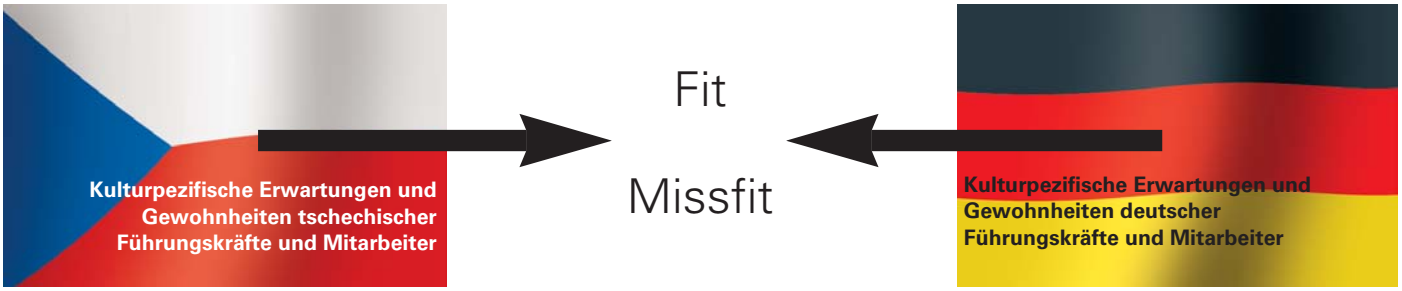
In der Theorie scheint interkulturelle Kompetenz in den letzten Jahren „eine Selbstverständlichkeit" geworden zu sein. Die praktische und alltägliche Umsetzung dieser Selbstverständlichkeit bereitet jedoch immer noch große Schwierigkeiten. Es zählt nach wie vor zu den großen Herausforderungen für das internationale Management, mit den Ähnlichkeiten und Unterschieden zwischen den Kulturen effektiv umzugehen und die Mitarbeiter in ihrer Kompetenzentwicklung zu fördern. Die Personalführung, hier am Beispiel der deutsch-tschechischen Unternehmen untersucht, ist in diesem Zusammenhang von zentraler Bedeutung.

Quo Vadis?

Die interkulturelle Psychologie beschäftigt sich bereits seit einigen Jahrzehnten mit den psychischen Prozessen, die ablaufen, wenn Menschen aus unterschiedlichen Kulturen miteinander in Kontakt treten. Das löst eine Flut von gegenseitigen Erwartungen, Wahrnehmungen, auch unterschiedlichen Interpretationen von Ereignissen und Gefühlen aus.

Die kulturelle Herkunft und die damit verbundenen Erwartungen und Gewohnheiten führen zu Kommunikations- und Kooperationsproblemen, wenn Fach- und Führungskräfte nicht gelernt haben, damit umzugehen. Dies beeinträchtigt die Effizienz und Qualität der (Zusammen-)Arbeit in erheblichem Maße. Das ist das Risiko. Die Chance liegt darin, dass entsandte Führungskräfte die besten Eigenschaften beider Kulturen zu großen Leistungen ergänzen können, dass sie zu Integrationsfiguren und Vermittlern in der Zusammenarbeit zwischen Standorten

Personalführung in internationalen Unternehmen



Ausgangspunkt der Zusammenarbeit deutscher und tschechischer Führungskräfte

in unterschiedlichen Ländern werden. Um das zu bewerkstelligen, müssen sie Vertrauen aufbauen und gangbare und produktive Lösungen entwickeln können. Zentrale Fragen sind:

- Inwieweit gibt es Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen dem Eigenen und dem Fremden?
- Auf welche Vorgaben und Richt-linien meiner Kultur kann ich notfalls verzichten? Wie weit kann und will ich mich anpassen?
- Was muss der Andere unbedingt akzeptieren, damit wir zusammen arbeiten können? Welche Möglichkeiten bestehen, den Fremden auf die eigenen Ziele und Verhaltensgewohnheiten so hinzuweisen, dass er sich ihnen öffnen und annähern kann?
- Welche produktiven oder destruktiven Konsequenzen haben solche Annäherungsbemühungen?

Die Beantwortung dieser Fragen ist alles andere als einfach und gelingt oft nur mit Unterstützung von außen.

Ein aktuelles Forschungsprojekt beschäftigt sich mit der Wirkung kultureller Einflussfaktoren auf die Personalführung in deutsch-tschechischen Gemeinschaftsunternehmen. Ziel ist es, geeignete Strategien und Verhaltensweisen zur Überwindung kulturell bedingter Konflikte im Rahmen der Personalführung zu entwickeln:

- In welchen Bereichen der deutsch-tschechischen Personalführung treten gehäuft interkulturelle Probleme auf?
- Wo liegen die Ursachen für die Konflikte?
- Wie kann Vertrauen zwischen den Partnern hergestellt werden?
- Welche Lösungen und Kompromisse gibt es für diese Probleme?
- Welche Eigenschaften und Fähigkeiten brauchen Führungskräfte für deutsch-tschechische Unternehmen (Auswahl und Vorbereitung von Führungskräften)?

Dazu hat sich ein interdisziplinäres (Psychologen und Wirtschaftswissenschaftler) und binationales (Deutsche und Tschechen) Forscherteam zusammengefunden, das die kulturellen Unterschiede bereits in der Vorbereitung und Ausführung der Forschungsaufgabe reflektiert und diskutiert. Bislang war es eher üblich, internationale Forschung als ein nach universell gültigen Normen und Regeln ablaufendes Geschehen und nicht selbst als interkulturelles Handlungsfeld zu betrachten. Doch auch die an der Forschung beteiligten Wissenschaftler müssen ähnliche Herausforderungen (z.B. Personalführung) bewältigen wie die Personen, deren Verhalten sie untersuchen. In einem derart gleichberechtigt zusammengesetzten Team ist es am besten möglich, die fachspezifischen Ressourcen und die kulturspezifischen Überzeugungsmuster optimal zu integrieren.

Personalführung zwischen Vorurteilen

Grundsätzlich hat die Personalführung die Aufgabe, die Mitarbeiter eines Unternehmens zur Zusammenarbeit zu motivieren, damit sie zum Erfolg des Unternehmens beitragen. Um diese Aufgabe zu erfüllen, splitten die Führungskräfte das Ziel in Einzelaufgaben wie beispielsweise „Ziele setzen“, „Anweisungen geben“, „Motivieren“, für ausreichende/s „Informationsmanagement“ und „Kundenorientierung“ sorgen. Die Mitarbeiter reagieren darauf je nach ihrem national-kulturellen und damit verbundenen unternehmenskulturellen Orientierungs- und Verhaltenssystem.

Bezogen auf die Länder Mittel- und Osteuropas vertritt die deutsche Sei-

te oft die Auffassung, dass der Osten vom Westen zu lernen habe, vor allem was modernes Management und Führungsaufgaben betrifft. Eine umgekehrte Richtung, auch wenn es um Details geht, kommt vielen gar nicht in den Sinn. Einige der im Projekt befragten tschechischen Manager fühlen sich entsprechend von ihren deutschen Kollegen nicht geschätzt und zu reinen Befehlsempfängern degradiert. Andererseits begegnen Tschechen den Deutschen oft mit starkem Misstrauen, so dass auch gut begründete Änderungsvorschläge ins Leere laufen. Ein deutscher Expatriat in Tschechien berichtet: „Die Zusammenarbeit kann ganz schön schwierig werden, einfach weil das typische Deutschenbild der Tschechen erst mal eine ablehnende Haltung bewirkt, nach dem Motto: ‚Jeder Deutsche führt sich wichtig auf, ist ein Angeber und hat einen Haufen Geld. Deswegen ist er nicht sympathisch und wenn der mir nicht sympathisch ist, dann arbeite ich auch nicht mit ihm zusammen'" – selbst dann nicht, wenn die Zusammenarbeit ihm nützen würde!

Wer erwartet was?

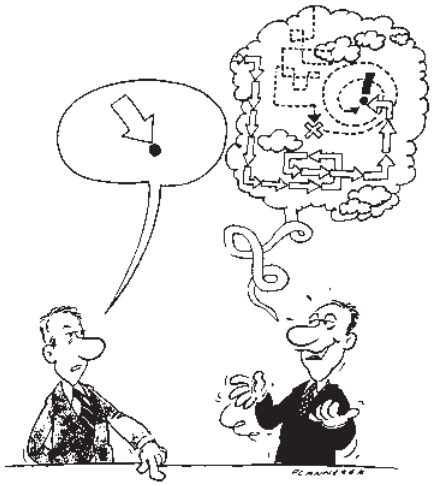
Häufig genannte Problembereiche auf beiden Seiten sind „Informationsmanagement", „Entscheidungen treffen" und „Beziehungsmanagement." Beispielsweise sagen sowohl Deutsche als auch Tschechen, dass sie das Gefühl haben, von der anderen Seite keine ausreichenden Informationen zu bekommen. Beide Seiten sprechen häufig davon, dass sie nie genau wissen, was auf der jeweils anderen Seite gerade vorgeht. Die Ursache dafür ist ein mangelhaftes Informationsmanagement – das häufig auch in monokulturellen Firmen nicht ausreichend entwickelt ist. Möglicherweise erwarten Deutsche und Tschechen aber auch jeweils andere Informationen voneinander. Deutsche Führungskräfte bezeichnen auch die Bereiche „Kundenorientierung" und „Motivieren/Überzeugen" als kritisch.

„Unsere tschechische Tochterfirma beliefert seit kurzem die Kunden direkt und seither gibt es Schwierigkeiten. Wir haben einige Kunden, die uns gesagt haben, ‚Wir rufen da an, wir schicken E-Mails, aber wir kriegen keine Antwort'. Und dasselbe haben wir in der internen Kommunikation zwischen Deutschland und Tschechien auch schon festgestellt. Eigentlich sollte binnen einer Stunde eine Antwort da sein, man bekommt aber tagelang keine. Ein bisschen drängt sich der Verdacht auf, dass die Tschechen der Kundenorientierung nicht die große Bedeutung beimessen wie wir. Und wenn ich frage, warum keiner den Kunden bedient, dann kriege ich eine ganz unklare Antwort, entweder ´Ja, ich hab ihm schon was geschickt´ oder ´Ich hab das nicht erhalten´ oder ‚Wir müssen das erst noch beantworten'".

Von hinten durch die Brust ins Auge

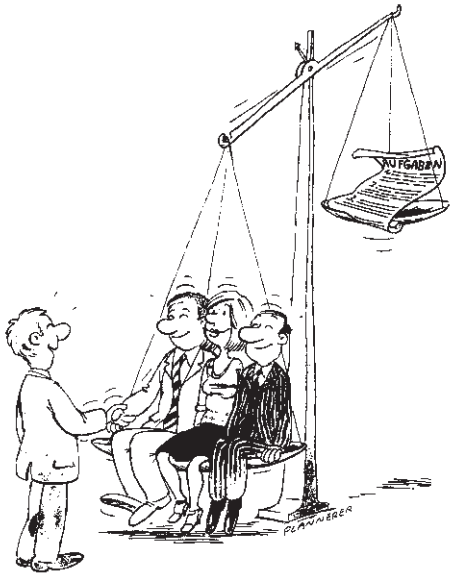
Einige Führungskräfte in deutsch-tschechischen Unternehmen berichten über erfolgreiche Lösungsstrategien, die sie inzwischen gefunden haben. Es gibt kein Patentrezept für gute Kooperationen, die Lösungen sind immer abhängig von der Situation und den beteiligten Personen.

Zwei Beispiele: Im ersten Fall hat sich eine deutsche Führungskraft im Bereich „Überzeugen" den in Tschechien weniger direkten Kommunikationsstil angeeignet, um die eigenen Ziele zu erreichen.



„In Tschechien ist es am besten, wenn man den eigenen Gedanken gegenüber einem Mitarbeiter erst mal für sich behält und das Problem allgemein schildert und darüber spricht. Wenn man es schafft, dass er schließlich selbst auf den gleichen Gedanken kommt, also so ein bisschen von hinten durch die Brust ins Auge ... Diese Methode zu überzeugen ist, glaube ich, die beste. Und ich habe auch das Gefühl, dass ich mir dadurch schon viele Sympathien eingehandelt habe. Das ist schon fast zu einem kleinen Spiel zwischen uns geworden."

Das zweite Beispiel zeigt, wie eine Führungskraft das Problem, dass immer alle Entscheidungen nur ihr



selbst abverlangt wurden, mit viel Geduld delegieren konnte und es dabei geschafft hat, das beinahe sprichwörtliche Improvisationstalent der Tschechen zu nutzen:

„Zuerst sollte ich immer möglichst alle Entscheidungen treffen, und ich habe meinen tschechischen Mitarbeitern immer wieder versucht zu erklären, was sie selbst entscheiden können und sollen. Das waren sie zunächst nicht gewohnt. Aber über die letzten zwei Jahre haben sie erkannt, dass es viele Vorteile hat, wenn sie die Verantwortung für ein Projekt selbst übernehmen. Sie haben ihren eigenen Aufgabenbereich, eigene Entscheidungsfreiheit und können hantieren, wie sie wollen. Und wenn sie es besser machen, dann bekommen sie noch eine extra Geldprämie. Das wurde dann doch enorm schnell umgesetzt. Und mein Eindruck ist, dass die tschechischen Kollegen wesentlich kreativer sind im Finden einer Lösung. Es ist aber enorm wichtig, dass der Freiraum groß genug ist. Man muss nur die Grenzen, die man gesteckt hat, überwachen und auch kontrollieren."

Traust du mir, trau ich dir

Ein weiterer zentraler Aspekt in der internationalen Zusammenarbeit ist „Vertrauen". „Wenn Sie Vertrauen zu Ihren Partnern aufgebaut haben, läuft alles fast wie von selbst", berichten Fachkräfte aus ihren Erfahrungen. Deshalb ist das Thema Vertrauen in den letzten Jahren im Bereich der Wirtschaftskooperationen und speziell der interkulturellen Kooperationen zunehmend bedeutsam geworden. In der eigenen Kultur ist jedem klar, wie er Vertrauen aufbaut, in anderen Kulturen existieren sehr wahrscheinlich andere Strategien. Ein tragfähiges Vertrauensverhältnis braucht immer und überall viel Zeit. Jeder Mensch hat eine Vorstellung davon, wie sich eine vertrauenswürdige Person verhalten sollte und diese Vorstellung ist größtenteils von der eigenen Kultur geprägt. Im interkulturellen Kontext bedeutet das, dass der Vertrauensaufbau nicht alleine durch guten Willen zu erreichen ist, sondern Kenntnisse darüber erfordert, welche Verhaltensweisen in der jeweiligen Kultur für die Vertrauensbildung wesentlich sind. Gerade für die deutsch-tschechische Zusammenarbeit muss dem Vertrauensaufbau viel Aufmerksamkeit geschenkt werden, da einerseits häufig ein starkes Misstrauen gegenüber Deutschen vorhanden ist (vgl. oben) und andererseits eine gute Zusammenarbeit in Tschechien sehr viel stärker über ein vertrauensvolles Beziehungsverhältnis geregelt wird.

Für Tschechen entsteht Vertrauen in Arbeitsbeziehungen vor allem über eine positiv erlebte und gelebte persönliche Beziehung zwischen den Menschen. Für Deutsche ist eine solche Beziehung zwar auch wichtig, die Prioritäten sind aber andere. Ein Kollege erweist sich für Deutsche dann als vertrauenswürdig, wenn er kompetent und zuverlässig arbeitet, wenn er Aufgaben rechtzeitig erledigt, Informationen von sich aus weitergibt und Probleme rechtzeitig meldet. Vertrauenswürdigkeit zeigt sich für den tschechischen Kollegen darin, dass das Beziehungsverhältnis von gegenseitiger Sympathie und wechselseitiger Wertschätzung getragen wird. Erst muss die persönliche Beziehungsebene stimmen, dann ergeben sich die arbeitsrelevanten Leistungskriterien von allein.

Made in Germany mit Tschechen

Personalführung ist immer ein sehr konkretes Handeln und deshalb in der deutsch-tschechischen Wirtschaftszusammenarbeit immer auch bestimmt von dem, was die Menschen als historische Lasten an Ungerechtigkeiten, Enttäuschungen, Aggressivität, Zwang, Unterdrückung und verfestigtem Misstrauen mit sich herumtragen. Wie die jüngsten Ereignisse wieder zeigen, belastet das auch das deutsch-tschechische Beziehungsverhältnis. Inwieweit betrifft dies einen deutschen Unternehmer, der vorhat, einen Produktionsstandort von Deutschland nach Tschechien zu verlagern, um kostengünstiger produzieren zu können und damit wettbewerbsfähig zu bleiben? Der deutsche Unternehmer wird in Tschechien ein Grundstück anmieten, eine Fabrikhalle errichten, tschechische Mitarbeiter einstellen, die in

der Lage sind, die Maschinen so gut zu bedienen, dass die Produktqualität den in Deutschland üblichen Standards entspricht. Diese Produktionsstätte liefert vom tschechischen Standort nach Deutschland und weltweit und bezahlt die tschechischen Mitarbeiter nach den in Tschechien üblichen Arbeitslöhnen plus einem produktionsabhängigen Bonus. Aus der Sicht des deutschen Unternehmers ist dies ein Gewinn-Geschäft für alle Beteiligten. Er produziert kostengünstig und die tschechischen Mitarbeiter haben einen gut bezahlten, sauberen und sicheren Arbeitsplatz. Der deutsche Manager wird vermutlich einen deutschen Betriebsleiter nach Tschechien abkommandieren, der den Produktionsstandort führt. Eventuell setzt er auch noch einen deutschen technischen Leiter, einen deutschen Vertriebsleiter und einen deutschen Controller ein, damit er die Garantie hat, dass die in Deutschland und in seinem deutschen Unternehmen üblichen Standards, an die seine Kunden gewöhnt sind, auch in Tschechien eingehalten werden.

Historische Altlasten

Aus tschechischer Sicht sieht die Standortverlagerung des Produktionsbetriebes von Deutschland nach Tschechien anders aus:

„Schon wieder sind die Deutschen, nachdem sie noch vor kurzem unermessliches Unheil über Europa gebracht haben, eine der führenden Industrienationen der Welt. Sie sind die bevölkerungsreichste und industriell potenteste Nation innerhalb Europas. Mit vereinten Kräften mit ihrem früheren Erzfeind Frankreich versucht Deutschland, die europäische Integration voranzubringen, aber natürlich nur zum eigenen Vorteil. Tschechien wird nur interessant, wenn es gebraucht wird. Der Deutsche verlagert seinen Produktionsstandort nicht nach Tschechien, weil Tschechen besonders gut ausgebildet sind, besonders intelligent sind, besonders kreativ sind und einen wesentlichen Beitrag zur Forschung und Entwicklung der in Deutschland hergestellten Produkte leisten können, sondern weil wir uninteressante Arbeit zu Billigstlöhnen verrichten, die in Deutschland niemand erledigen will und dann auch noch zu teuer wäre. Uns Tschechen traut der Unternehmer nicht zu, dass wir in der Lage sind, die gewünschten Qualitätsstandards zu garantieren. Er misstraut den tschechischen Mitarbeitern so sehr, dass er die Führungsposition mit Deutschen besetzt."

Vor diesem Hintergrund empfinden tschechische Mitarbeiter jegliche Kritik seitens der deutschen Geschäftsführer als ungerechtfertigtes, von mangelndem Vertrauen geprägtes Diktat eines auf Ausbeutung der tschechischen Arbeitskraft abzielenden deutschen Unternehmens und seiner Helfershelfer, unabhängig davon, ob die Kritik berechtigt ist oder nicht. Um es deutlich zu sagen: Wenn die deutschen Führungskräfte in Tschechien glauben, das Vertrauen der tschechischen Kollegen und Mitarbeiter dadurch zu gewinnen, dass sie sich als besonders fachlich tüchtig, korrekt, ordnungsliebend, regelorientiert, strukturiert und nach deutscher Sicht direkt, offen und ehrlich darstellen, dann bedienen sie bei den tschechischen Mitarbeitern das Stereotyp des ordnungsfanatischen, korrekten und dabei durchaus auch beneidenswert effizienten Deutschen, der genau so effizient wie kaltschnäuzig über Leichen geht.

Kognitionen und Emotionen

Selbst wenn unter günstigen personalen und sozialen Bedingungen zwischen einem deutschen Vorgesetzten und seinem tschechischen Mitarbeiter ein gutes und tragfähiges Vertrauensverhältnis aufgebaut ist, ohne dass die historischen Lasten dies verhindert hätten, ist dieses gute Verhältnis in Konfliktsituationen schnell gefährdet. In diesen „kritischen" Situationen, in denen nicht alles erwartungsgemäß verläuft und einer oder sogar beide Partner Grund zur Klage haben, sich gegenseitig die Meinung sagen, um Positionen zu klären oder zur Verstärkung und Festigung des eigenen Selbstwertgefühls, leben die mitgetragenen und noch nicht abgearbeiteten Lasten der Vergangenheit wieder auf. Gängige Stereotype, Vorurteile und moralische Rechtfertigungen lassen dann womöglich das Gebäude vertrauensvoller Zusammenarbeit schnell einstürzen.

Genau dann ist es wichtig, dass die Partner erkennen, welche Prozesse ablaufen, wie welche Kognitionen und Emotionen das Verhalten beeinflussen, um interkulturell intelligent handelnd das Vertrauen zu er-

Personalführung in internationalen Unternehmen

Prof. Dr. Alexander Thomas (geb. 1939) ist Leiter der Abteilung für Sozial- und Organisationspsychologie am Institut für Psychologie der Universität Regensburg. Seine Forschungsschwerpunkte sind Kulturvergleichende Psychologie, Interkulturelle Psychologie, Fragen der Qualifizierung von Fach- und Führungspersonal für den beruflichen Auslandseinsatz und im Rahmen von Schüler-, Jugend- und Studentenaustausch, Teamentwicklung, Diversity Management, Vertrauensmanagement. Zudem arbeitet er mit im Forschungsverbund Ost- und Südosteuropa (FOROST).

Dipl.-Psych. Julia Bürger (geb. 1975) ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Forschungsverbund Ost- und Südosteuropa (FOROST) im Forschungsprojekt „Personalführung in deutsch-tschechischen Gemeinschaftsunternehmen".

halten. Vertrauensmodelle aus der Psychologie liefern Handlungsansätze. Die kulturspezifischen Aspekte der Vertrauensbildung und -festigung untersuchen die FOROST-Wissenschaftler im laufenden Forschungsprojekt.

Der Wirtschaftsstandort Europa unter Druck

Im Zuge der Internationalisierung und Globalisierung steigt die Bedeutung des Human Ressource Managements. Vieles hängt davon ab, wie gut sich die Partner in Europa und in außereuropäischen Ländern, seien es in der Produktion tätige Fach- und Führungskräfte, Dienstleister, Zulieferer oder Kunden aufeinander einstellen können. Der Wirtschaftsstandort Deutschland lebt zukünftig nicht mehr ausschließlich vom Brainpotenzial, sondern in verstärktem Maße von dem, was ausländische Partner in enger Zusammenarbeit mit deutschen Fach- und Führungskräften gemeinsam erreichen und an Leistung zustande bringen. Der gesamte Wirtschaftsstandort Europa steht in Konkurrenz zu den bereits hoch entwickelten Märkten in Nordamerika und den dynamisch expandierenden Märkten in Asien und Lateinamerika. Diese Herausforderungen sind nur zu bewältigen, wenn ein hohes Maß an interkultureller Kompetenz und kulturspezifischem Wissen im Bereich der Personalführung vorhanden ist und sich in Auswahl, Ausbildung, Qualifizierung, Beurteilung, Potenzialförderung von Mitarbeitern, speziell für die Kommunikation und Kooperation mit ausländischen Partnern, niederschlägt. Nur interdisziplinäre Teams sind in der Lage, die kulturspezifischen Unterschiede und Gemeinsamkeiten aus beiden Perspektiven zu erfassen, so dass die kooperierenden Partner für die Zusammenarbeit gleich gut qualifiziert sind. Unternehmen, die ihre deutschen Mitarbeiter auf die kulturspezifischen Orientierungssysteme ihrer ausländischen Partner vorbereiten und die dafür sorgen, dass diese die gleiche Chance erhalten, haben deshalb im internationalen Wettbewerb einen deutlichen Vorteil.

CHINAS HUNGER NACH ROHSTOFFEN UND DIE FOLGEN DES WIRTSCHAFTSBOOMS

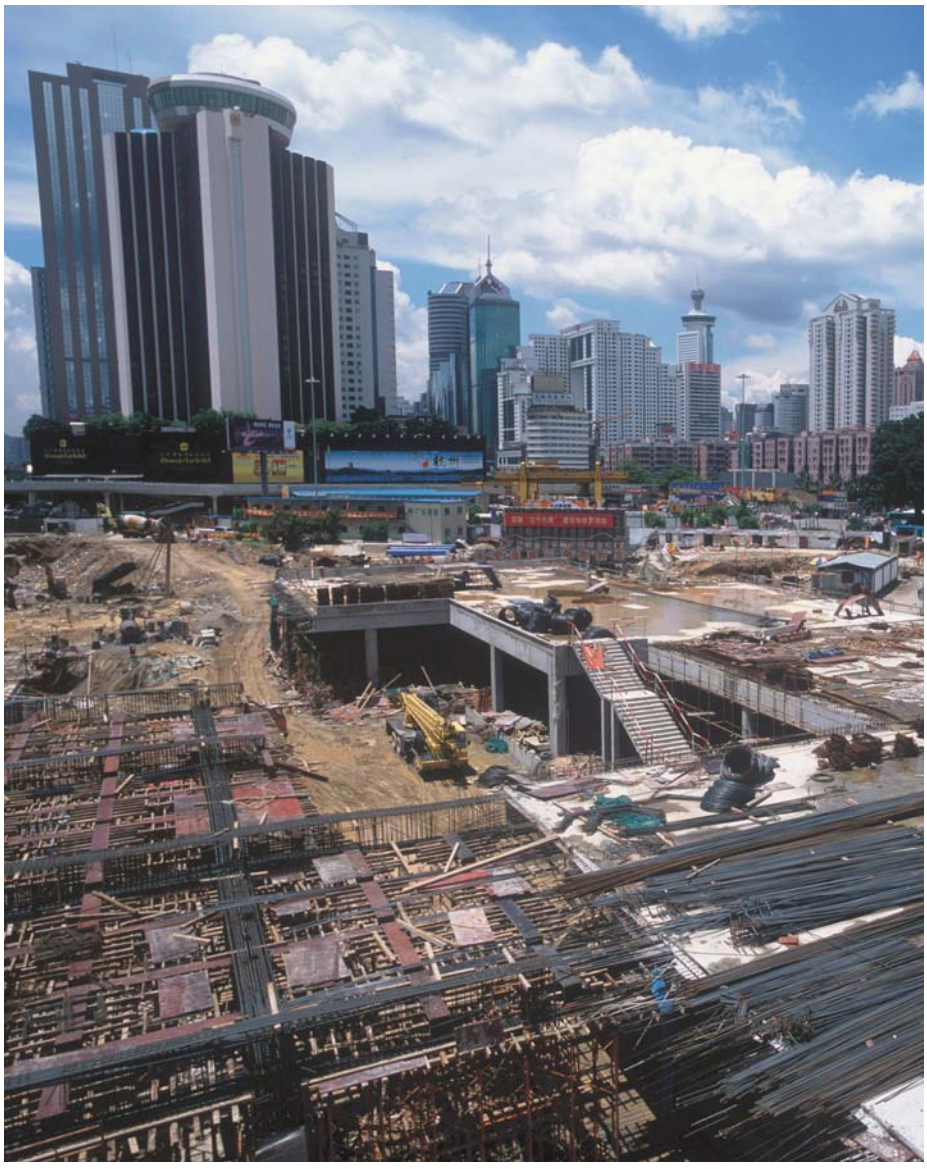
Hans-Dieter Haas

2004 stellt die Volksrepublik China ein Fünftel der Weltbevölkerung und verbraucht fast ein Viertel der weltweit produzierten Industriemetalle. Die jüngsten Preissprünge in der Rohstoffwirtschaft zeigen, dass eine neue Ära in der Weltwirtschaft begonnen hat. Die Zeiten sind vorüber, in denen sich das wohlhabende Fünftel der Weltbevölkerung problemlos und zu real sinkenden Preisen mit Rohstoffen versorgen konnte. Es ist absehbar, dass die Preise noch weiter steigen, vor allem bei Rohstoffen wie Erdöl, Zinn, Kupfer, Nickel und Zink, deren natürliche Vorkommen begrenzt sind. Versorgungsengpässe infolge falsch eingeschätzter Marktentwicklungen verstärken derzeit das Problem. China, das durch seinen Rohstoffhunger wesentlich zu der Situation beiträgt, leidet selbst am stärksten unter dem Rohstoffproblem.

El Dorado für Investitionen

Mit 1,3 Mrd. Menschen ist China weltweit die bevölkerungsstärkste Volkswirtschaft. 170 Millionenstädte, davon zwölf mit mehr als sechs Mio. Einwohnern, verschlingen jährlich Milliardeninvestitionen allein im Bereich der Infrastrukturentwicklung und der Energieversorgung. In zehn Jahren werden – trotz der Bestrebungen die Land-Stadt-Wanderung zu kontrollieren – bereits 600 Mio. Menschen in den Städten Chinas leben.

Die Wirtschaft des Landes boomt. Hochrechnungen ergeben, dass bereits im Jahre 2018 China die USA als größte Volkswirtschaft übertreffen wird. China zieht inzwischen weltweit die meisten Auslandsinvestitionen an. 2003 flossen 53 Mrd. US $ in die Volksrepublik. Damit ver-



In zehn Jahren werden bereits 600 Mio. Menschen in den Städten Chinas leben.
Foto: plainpicture/Bremen, J.

drängte China erstmals die USA von Platz eins der Empfängerländer von Direktinvestitionen. Obwohl sich die chinesische Gesellschafts- und Wirtschaftsordnung deutlich von denen der westlichen Nationen unterscheidet, sind alle namhaften Großkonzerne der Industrieländer und inzwischen auch viele mittelständische Unternehmen im Land der Mitte präsent, um Marktchancen zu nutzen. China gilt beispielsweise als Schlüsselmarkt für die chemische Industrie im asiatischen Großraum. Der deutsche Chemiekonzern BASF investiert derzeit 2,9 Mrd. US $ in das größte deutsch-chinesische Gemeinschaftsprojekt, ein Chemiewerk in der 6-Mio.-Stadt Nanjing, das 1,7 Mrd. t hochwertige Kunststoffe und Chemikalien pro Jahr produzieren soll. Den hohen Energiebedarf deckt die BASF aus der 3900 km langen Gaspipeline, die für 5,2 Mrd. US $ aus dem westchinesischen Tarimbecken bis an die wirtschaftsstarke Ostküste verlegt wurde. Hinzu kommt das eigene Kraftwerk, das eine Stadt mit 100 000 Einwohner mit Energie versorgen könnte. Zahlreiche andere Industriezweige, allen voran die Automobilindustrie, verarbeiten die in Nanjing produzierten Grundstoffe weiter. Bis zum Jahre 2008 hat allein die internationale Automobil- und Zulieferwirtschaft angekündigt, einen zweistelligen Milliardenbetrag in China zu investieren.

Planlose Dynamik

Gerade mal 4% tragen die 1,3 Mrd. Chinesen zur globalen Wirtschaftsleistung bei, doch ihre Wirtschaft verbraucht bereits die Hälfte der Weltproduktion an Zement, 31% der Kohle, 30% der Eisenerze, 27% des Stahls, 18% des Kautschuks, 17% des Aluminiums und gut 7% des Erdöls.

2003 expandierte der Industriesektor um 11,5% gegenüber dem Vorjahr. Aber das Wachstum ist regional sehr unausgewogen und es wirkt unkoordiniert. Das ausgeprägte Ost-West-Entwicklungsgefälle in China orientiert sich dabei an den physisch-geographischen Gegebenheiten des Landes und an der daraus resultierenden ungleichen Bevölkerungsdichte und Infrastrukturausstattung. Die von der Pazifikregion entfernt gelegenen Provinzregierungen versuchen ihren – wenn auch geringen – Entscheidungsspielraum zu nutzen und die Wirtschaft in ihrer Region voranzubringen. Die regionalen Entwicklungsmaßnahmen konzentrieren sich dabei aber allzu häufig auf die gleichen, Dynamik versprechenden Wirtschaftszweige. So gibt es inzwischen in den 31 Provinzen Chinas weit über 100 Automobilfabriken. Stahlhütten, Aluminium- und Zementfabriken entstehen planlos und zuhauf. Das Entwicklungstempo ist deutlich zu schnell geworden. In manchen Bereichen, zum Beispiel im Immobiliensektor, wird am Bedarf vorbeiproduziert.

Engpass Energie

Die Stromversorgung Chinas kann den Bedarf der boomenden Wirtschaft bei weitem nicht mehr decken. Die Leitungen brechen immer häufiger zusammen. Im Sommer 2004 drohte der Volksrepublik die größte Energiekrise seit zwei Jahrzehnten. Im zweiten Quartal fehlten dem Land fortlaufend größere Strommengen während der Spitzenverbrauchszeiten. Über zwei Drittel der chinesischen Provinzen mussten Stromausfälle und regionale Umverteilungen hinnehmen. Blackouts werden selbst in der Wirtschaftsmetropole Shanghai zur Regel; bereits im zweiten Quartal 2004 fehlten 6,3 Mio. kWh. Die Behörden verordneten 2100 Unternehmen im Stadtgebiet im Sommer 2004, ausschließlich nachts zu arbeiten, weitere 3000 mussten zwischen Tag- und Nachtarbeit wechseln. In Peking waren 600 Betriebe von den Maßnahmen betroffen. Taiwans Computerfirmen, die auf dem chinesischen Festland produzieren und inzwischen zwei Drittel der IT-Exporte Chinas bestreiten, planen inzwischen wegen der Stromknappheit ihre Produktion wieder aus dem Land weg zu verlagern. Selbst Hochtechnologieparks wie der von Suzhou und Zentren ausländischer Hightech-Firmen hatten im Sommer 2004 bis zu drei Tage pro Woche keinen Strom. Die Staatsregierung will daher in den kommenden fünf Jahren rund 100 Mrd. US $ in den Bau neuer Elektrizitätswerke investieren.

Engpass Verkehrsinfrastruktur

In Häfen und Güterbahnhöfen staut sich die Fracht mangels Transportmöglichkeiten. Staatliche Erhebungen machen deutlich, dass China derzeit 300 000 Eisenbahnwag-

gons pro Tag benötigt, doppelt so viele wie noch 2003! Doch die chinesische Bahn hat nur eine Kapazität von 100 000 Waggons pro Tag. Spediteure weichen deshalb vermehrt auf die Straße aus, die Folgen sind zusätzliche Staus und längere Transportzeiten. Die staatliche Reformkommission rechnete unlängst vor, dass das Land jährlich rund 12 Mrd. US $ in das Schienennetz investieren müsste, um eine weitere Verschlechterung der Transportversorgung zu verhindern. Wegen der starken Nachfrage in China vervierfachten sich innerhalb eines Jahres die Frachtkosten in der Seeschifffahrt bei einigen Chartertypen. Die Umschlagmöglichkeiten reichen nicht aus, um die ankommenden Schiffe zu löschen. Der anhaltende Ausbau der Tiefseehäfen, wie zum Beispiel in Shanghai, behindert zusätzlich. Die Reeder klagen über wochenlange Wartezeit der Schiffe, die somit zusätzlich Kosten verursacht.

Der Preis des Wachstums

Vor den Schattenseiten des Booms warnen seit geraumer Zeit chinesische wie internationale Fachleute. Die Umweltbelastung nimmt deutlich zu. Verstärkte Smogbildung in den Millionenstädten ist die Folge der Emissionsbelastung aus Industriewerken und der hohen Verkehrsbelastung. Die Agrarproduktion bekommt nicht nur wegen der immer wieder auftretenden Wasserknappheit Probleme, sondern auch infolge vergifteter Böden im Umfeld von dynamisch wachsenden Schwerindustriezentren. Gesetzliche Umweltschutzvorgaben gibt es in China kaum.

Montage von Mobiltelefonen im Siemens-Werk in Shanghai. Foto: H.-D. Haas

Alles hängt an den Rohstoffen

Der Rohstoffbedarf der chinesischen Wirtschaft wächst immer schneller. Die eigenen Vorkommen reichen schon seit geraumer Zeit nicht mehr aus und der Importbedarf steigt entsprechend für alle Rohstoffe extrem stark. Besonders die Energierohstoffe sind betroffen: Der Ölverbrauch wird sich bis 2020 (gemessen am Verbrauch im Jahre 2000) auf 620 Mio. t verdreifachen, 2004 werden es 100 Mio. t sein. Bis 1996 war China Ölexporteur, seither zählt das Land zu den weltgrößten Ölimporteuren. Bereits in diesem Jahr muss China ein Drittel der benötigten Ölmenge einführen. Obwohl China die eigene Ölproduktion jährlich um knapp 2% steigert, nimmt der Ölimport im zweistelligen Prozentbereich zu. Prognosen sagen, dass China im Jahr 2020 bereits 56% des benötigten Öls importiert. 2010 soll allein Chinas Straßenverkehr einen Verbrauch von 138 Mio. t erreicht haben, das sind 43% des landesweiten Erdölverbrauchs.

Eisenerz importiert China inzwischen zu 36% (160 Mio. t in 2004), bei Kautschuk sind es 68%. 2005 übersteigt der Import von Kohle des Kohlelands China wohl erstmalig den Export. Durch den starken Import erhöhte sich das Handelsdefizit Chinas allein im ersten Quartal 2004 auf 8 Mrd. US $. Die Engpässe in der Rohstoffversorgung führten in jüngerer Zeit zu deutlichen Preissteigerungen. Der Index für die Verbraucherpreise stieg im ersten Quartal 2004 um 2,8%; im Vorjahr lag die Inflationsrate noch bei 1,2%.

Zusätzliche Kraftwerke sollen den wachsenden Strombedarf decken, lange Leitungen die ländlichen Regionen mit Energie versorgen. Dies beflügelte die Nachfrage nach Kupfer als wichtigstes Leitungsmetall: 2005 steigt der Bedarf an Kupfer für Stromkabel voraussichtlich um 10%. Der Rohstoffhunger Chinas treibt die Preise auch für andere Metalle in die Höhe. Der Zinnpreis hat sich seit 2002 an der Londoner Metallbörse von 4 US $ pro Kilogramm auf heute über 8 US $ verdoppelt. Zwar fördern die Chinesen mehr Zinn als das klassische Zinnland Bolivien, die boomende Elektroindustrie in der Volksrepublik braucht aber immer mehr

Lötzinn, Chemieunternehmen mischen es in Farben und Pflanzenschutzmittel und auch die Spielwaren- und Konservenindustrie benötigen das Metall.

Nach den USA ist China der zweitgrößte Aluminiumverbraucher weltweit. Das Leichtmetall findet sich in vielen Produkten im Fahrzeugbau und in der Bauwirtschaft. Chinas Verbrauch wird bis 2006 auf mindestens 6 Mio. t (2003: 4,6 Mio. t) anwachsen. Dies bedeutet, dass dann doppelt so viel Tonerde (Bauxit), das Rohmaterial für die Aluminiumherstellung, wie noch vor einem Jahr zur Verfügung stehen muss. Der hohe Bedarf und die Engpässe bei der Stromversorgung der Alu-Schmelzwerke beeinträchtigten die Produktion des wichtigen Rohmetalls ernsthaft.

Stahl aus Schrott

Besonders problematisch ist der enorme Stahlverbrauch Chinas. Seine Kapazität in der Rohstahlproduktion hat sich von 2000 bis 2004 auf 260 Mio. t annähernd vervierfacht. 60% des Stahls werden von der Bauwirtschaft und der Automobilindustrie verbraucht. Dabei ist der Höhepunkt der Nachfrage noch lange nicht erreicht. Besonders stark boomt in der Stahlproduktion die Provinz Hebei, südlich von Peking, durch Kohlevorkommen ein klassischer und idealer Stahlstandort. Seit den 1990er Jahren stieg die Produktion von jährlich 20 Mio. t Stahl auf 50 Mio. t in 2003 an. Von dem benötigten Eisenerz importieren die Stahlhütten mehr als die Hälfte aus Australien und Brasilien. Durch weltweite Stahlschrottaufkäufe Chinas stieg der Schrottpreis zwischen 2003 und 2004 auch in Ländern wie Deutschland um 145% auf 270 Euro/t. Um ihre Produktionskapazität zu erhöhen, kaufen die Chinesen Altanlagen, die sie im Ursprungsland selbst demontieren und in China wieder aufbauen: Eine Kokerei aus dem Ruhrgebiet hilft jetzt in China, den hohen Koksbedarf für die Hochöfen zu befriedigen. Der Preis für Koks hat sich in den letzten vier Jahren verachtfacht. Bei der Herstellung von rostfreiem Edelstahl mussten chinesische Produzenten wegen der Verknappungen und Preissteigerungen bei Nickel auf das preisgünstigere Mangan ausweichen – und produzieren qualitativ minderwertigeren Stahl.

Stahlverarbeitung in China. Durch weltweite Stahlschrottaufkäufe Chinas stieg der Schrottpreis zwischen 2003 und 2004 auch in Ländern wie Deutschland um 145% auf 270 Euro/t.
Foto: H.-D. Haas

Rohstoffmangel treibt Blüten

Chinas wirtschaftliche Dynamik und der damit verbundene ökonomische Aufstieg verändert die bisherige internationale Arbeitsteilung. China ist bereits einer der größten Auslandsinvestoren. Hohe Summen investieren die Chinesen in zahlreichen Rohstoffländern weltweit. Dies ist eine der Auswirkungen des Rohstoffmangels. Ziel der chinesischen Offensive ist es, die Energie- und Rohstoffimporte in Übersee mittelfristig zu sichern. Chinas staatliche Konzerne versuchen, auf den großen, bisher noch wenig erschlossenen Rohstoffmärkten über den gesamten Globus Fuß zu fassen. Häufig bieten sie den Rohstoffländern Kompensationsgeschäfte an. Mit Unterstützung oder gar auf direkte Weisung des Staatsrates leisten sie bei der Rohstofferschließung und beim Infrastrukturausbau Hilfen oder staatliche Banken bieten Kredite an. China leistet damit einen Beitrag zur Wirtschaftsentwicklung vieler ärmerer Länder und hebt gleichzeitig das entwicklungspolitische Ansehen Pekings.

Versorgungssicherheit gegen Infrastrukturhilfe

Auffällig viel investieren chinesische Konzerne in Ländern wie Brasilien und sie beziehen große Mengen von Eisenerz und Soja aus dem Land. China

wurde auf diese Weise drittwichtigster Exportmarkt für Brasilien. Der bilaterale Handel hat sich in den letzten fünf Jahren auf 10 Mrd. US $ verzehnfacht. Wichtige Perspektiven bietet Brasilien den Chinesen vor allem in den Bereichen Erzbergbau, alternative Treibstofferzeugung (Ethanol), Agrarrohstoffe, Zellstoff/Papier und Düngemittel. Teilweise sind dies Produkte, die Brasilien auf den geschützten Märkten der Industrieländer nur bedingt verkaufen kann. Bei rund dreißig Rohstoffen (unter anderem Bauxit, Eisenerz, Rindfleisch, Baumwolle) ist Brasilien unter den weltweit führenden Lieferanten. Die Exporte ließen sich weiter steigern, wenn die dafür nötige Transportinfrastruktur vorhanden beziehungsweise leistungsfähig genug wäre, aber es fehlt an Fernstraßen, Schienennetzen und großen Häfen. China wird in brasilianische Infrastrukturprojekte 2,4 Mrd. US $ investieren – und erhält im Gegenzug Versorgungssicherheit bei wichtigen Rohstoffen. China will die Nord-Süd-Route des Schienensystems in Brasilien ausbauen und es an die Pazifikhäfen Perus und Chiles anbinden. Brasilianische Agrokonzerne und die staatliche Entwicklungsbank liefern als Kompensationsgeschäft Agrarrohstoffe (vor allem Soja). Peking strebt derzeit sogar eine Mitgliedschaft in der Inter-Amerikanischen Entwicklungsbank an, um leichter an öffentliche Gelder für die Finanzierung von Rohstoffprojekten zu gelangen. Der größte chinesische Händler für Bergbau- und Metallprodukte, die Minmetals Group, verhandelt in Brasilien über eine Investition im Verhüttungsbereich in Höhe von 2 Mrd. US $.

Energieversorgung sichern – Investitionen in aller Welt

Strategisch geplant, beteiligt sich China an Gasförderprogrammen im Iran oder an petrochemischen Großprojekten in Kuwait. Die Investitionen Chinas nehmen auch in Afrika zu; der Handel hat sich in den letzten 10 Jahren auf runde 13 Mrd. US $ versechsfacht. China kommt den afrikanischen Ländern entgegen und senkt seine Zölle bereits vor der erwarteten Anpassung durch die World Trade Organization (WTO). Wie in Südamerika investiert China auch in Afrika in den Rohstoffsektor, vor allem in Öl: Das westafrikanische Ölförderland Angola erhielt ein Darlehen über 2 Mrd. US $. Auch in den afrikanischen Ländern versuchen die Chinesen über Infrastrukturprojekte (Straßen-, Flughafen-, Staudammbau) ins Geschäft zu kommen.

In Australien hat der chinesische Ölkonzern CNOOC über eine Beteiligung an einem Offshore-Gasfeld verhandelt. In Indonesien ist China bereits in die Erdgas-Offshore-Gewinnung eingestiegen und in Südkorea erwarben chinesische Konzerne bereits Anteile am Raffinerie-Konzern Inchon. Offshore-Bohrungen führen chinesische Gesellschaften seit geraumer Zeit bei mehreren Inselgruppen im Südchinesischen und Ostchinesischen Meer durch, wobei sich die Staatsregierung Souveränitätsansprüchen Japans und mehrerer südostasiatischer Länder ausgesetzt sieht. Vor kurzem wurde mit dem Bau einer Erdölpipeline von Kasachstan in die nordwestchinesische Provinz Xinjiang begonnen. Die 1240 km lange Leitung soll jährlich bis zu 20 Mio. t Öl nach China befördern.

China versucht die Abhängigkeit vom Öl, aber auch von der noch immer mengenmäßig bedeutsamen, emissionsbelastenden Kohle zu reduzieren. Erdgas aus dem Ordos- und Tarim-Becken soll künftig über eine 4000 km lange Pipeline die Industriezentren der Ostküste versorgen. Im Juli 2004 beschloss die Regierung jährlich zwei weitere Atomkraftwerke zu bauen. Der Atomstrom soll damit seinen Anteil an der Energieproduktion von 1,4% (2003) auf 6% bis 2020 vergrößern. Die Kaufabsicht für die Hanauer Brennelemente-Fabrik ist ein Hinweis auf diese neue Strategie. Ferner setzt China auf den Ausbau der Wasserkraft, auf Windenergie und auf Biogas in den ländlichen Gebieten.

Gefährliche Dynamik

Seit Beginn 2004 bremst die Regierung durch verschiedene administrative Maßnahmen das dynamische Wachstum Chinas und die sich abzeichnende konjunkturelle Überhitzung. Ohne eine konjunkturelle Dämpfung ist Gefahr im Verzug: Besonders dynamische Wirtschaftsbereiche neigen zum Aufbau von Überkapazitäten, insbesondere die Produktionsgüterindustrie und der Immobiliensektor. Ein Tritt auf die Konjunkturbremse soll den Aufbau einer Spekulationsblase mit großen Gefahren für die gesamte Volkswirtschaft verhindern. Starkes Wachstum, zum Beispiel bei Anlageinvestitionen, lockt Trittbrettfahrer und Plagiatoren

Chinas Hunger nach Rohstoffen und Die Folgen des Wirtschaftsbooms

Prof. Dr. Hans-Dieter Haas (geb. 1943) ist Inhaber des Lehrstuhls für Wirtschaftsgeographie und BWL der Internationalen Wirtschaftsräume an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Internationalisierung der Wirtschaft, Ressourcen- und Umweltökonomie. In China leitete er mehrere Forschungsvorhaben, unter anderem im Rahmen von FORAREA, dem Kompetenznetzwerk für interkulturelle Kommunikation e.V..
Das Kompetenznetzwerk ging aus dem Bayerischen Forschungsverbund Area-Studies hervor und ist assoziiertes Mitglied bei abayfor.

auf den Plan. Dadurch werden Kredite und Subventionen fehlgeleitet. Die Parole „Wachstum um jeden Preis" des früheren Ministerpräsidenten Zhu Rongji hat sein Nachfolger Wen Jiabao zugunsten eines nachhaltigen Wachstums verändert. Er verordnet den Banken Zurückhaltung bei der Kreditvergabe, um das BIP-Wachstum von 9,7% im ersten Halbjahr 2004 (2003: 9,1%) auf gewünschte 7% zu drücken. Dabei bedeutet „nachhaltig" sowohl die ökologische Verträglichkeit des Wirtschaftswachstums, als auch eine ausgeglichenere Verteilung des Wachstums zwischen reichen und armen Provinzen und die Wohlstandsdisparitäten zwischen städtischer und ländlicher Bevölkerung in China. Eine Zinserhöhung könnte die derzeitigen Überinvestitionen abfedern, diese würde jedoch das dringend im Agrarsektor benötigte Wachstum hemmen. Dem Konjunkturrotstift fielen inzwischen zahlreiche Großprojekte zum Opfer, unter anderem die neu geplante Eisenbahnstrecke an der Suzhou-Küste, U-Bahnen in Großstädten (zum Beispiel Guangzhou) sowie ein Staudammprojekt am Nu-Fluss.

Der Kampf um die natürlichen Ressourcen

Den Rohstoffhunger in China bekamen spätestens seit 2004 die Industrie- und Entwicklungsländer deutlich zu spüren: durch Verknappung und Preissteigerungen bei den Rohstoffen. Für die deutsche Wirtschaft ist diese Situation neu: Abgesehen vom Öl in Zeiten von Ölkrisen waren Rohstoffe stets ausreichend und zu akzeptablen Preisen verfügbar. Der Terrorismus, die Lage im Irak, der Konflikt zwischen der russischen Regierung und dem Ölkonzern Yukos und der seit längerer Zeit schwelende Konflikt im Ölförderland Venezuela rücken das Thema Rohstoffsicherung bei Wirtschaft und Politik jetzt in den Vordergrund. Versorgungsengpässe und dramatische Preissteigerungen zeigen sich vermehrt nun auch in Rohstoffsektoren außerhalb des sensiblen Erdölbereichs. Der durch das dynamische Wachstum Chinas bei mehreren Rohstoffen ausgelöste Engpass hat den Blick der Unternehmer weltweit verändert. Hinter den Rohstoffpreisen verbirgt sich heute unter Umständen eine hohe Volatilität, ein harter Kampf um die knappen Ressourcen und ein größeres Risiko als bei Aktien, Zinsen und Devisen.

INFORMATIONSTECHNIK IN DEUTSCHLAND – EIN AUSLAUFMODELL?

Peter Mertens

Anmerkung: Der folgende Beitrag geht auf eine Podiumsdiskussion zurück, die anlässlich einer Veranstaltung des Forschungsverbundes Wirtschaftsinformatik (FORWIN) in Nürnberg stattfand. An ihr nahmen Repräsentanten der Software-Industrie, der Unternehmensberatung, der Wirtschaftsförderung, der Regionalpolitik, der Gewerkschaften und der Wissenschaft teil.
Der Aufsatz erschien im Informatik Spektrum. Der folgende Text ist eine von der Redaktion gekürzte und bearbeitete und vom Autor freigegebene Version.

In den letzten Monaten ist die Zahl der Meldungen, wonach die Informationstechnik und innerhalb dieser nicht zuletzt auch die Forschung und Entwicklung aus Deutschland auswandert, sprunghaft gestiegen.

Die F&E-Aufwendungen deutscher Unternehmen im Ausland bewegten sich von 1995 bis 1999 bei ca. 23 Mrd. €/Jahr, 2001 sprangen sie auf ca. 35 Mrd. €/Jahr, mit steigender Tendenz. Jedoch haben umgekehrt ausländische Unternehmen ihre F&E in Deutschland ausgebaut.

Ein sprachsoziologisches Symptom ist die Flut neuer Schlagworte: Neben dem Begriff „Offshore-Outsourcing" steht „Offshoring" für die Verlagerung nach Fernost, insbesondere nach Indien, und „Nearshoring" für die Auslagerung in östliche Nachbarländer.

Symptomatisch erscheint auch, dass bayerische Unternehmen den Wirtschaftsminister und die Industrie- und Handelskammern gedrängt haben, die „Kunst des Offshoring" mit staatlichen Mitteln weiterzuentwickeln. Als Resultat bietet das Internet seit Juli 2002 einen „Leitfaden zur Schaffung und Sicherung von Arbeitsplätzen durch offshore IT-Entwicklung im Rahmen der Internationalisierung des Mittelstandes in Bayern" (http://www.software-offensive-bayern.de/pdf/OffshoreIT.pdf, Aufruf am 2004-10-18) an. Verkürzt ausgedrückt wurden also mit öffentlichen Mitteln Anweisungen erarbeitet, wie IT-Arbeitsplätze in Bayern vernichtet werden.

Verlagerung von qualifizierten Arbeitsplätzen ins Ausland: Fluch oder Segen für den deutschen Wirtschaftsstandort? Die Aussagen und Meinungen der Experten widersprechen sich zum Teil grundlegend.

Die Entwicklung ist aus der Sicht der deutschen Informatik außerordentlich brisant, bedeutet sie doch mittelfristig unter anderem einen massiven Verlust an Wertschöpfung und an qualifizierten Arbeitsplätzen für unsere Hochschulabsolventinnen und -absolventen. In der Folge wird

nach denkbaren Szenarios gegliedert. Diese sind bewusst „mit dickem Pinsel gemalt".

Szenario „Abwarten"

Eine Kernfrage bei brisanten Situationen im Projektmanagement lautet: Was passiert, wenn wir jetzt nichts tun und die Entwicklung abwarten? Eine große Zahl von Nationalökonomen verweist (ähnlich wie Gregory Mankiw, s. Bild S. 24) darauf, dass nach den Wirkungszusammenhängen der internationalen Arbeitsteilung – die sogar bis auf Ricardos Gesetz der komparativen Kosten zurückgeführt werden können – die Auslagerung von Tätigkeiten in so genannte Niedriglohnländer auf längere Sicht die Produktivität der hoch entwickelten Industrienationen sogar fördern kann, und zwar dann, wenn Enderzeugnisse aus den Industrieländern kostengünstige importierte Komponenten aus Entwicklungs- und Schwellenländern enthalten und damit auf dem Weltmarkt konkurrenzfähig werden beziehungsweise bleiben.

Ein interessantes Einzelbeispiel ist das der method park Software AG, ursprünglich eine Ausgründung aus der Universität Erlangen-Nürnberg. Ihr Gründer Prof. Dr. Bernd Hindel hatte den bayerischen Ministerpräsidenten Dr. Edmund Stoiber auf einer Indienreise begleitet und dort ein vergleichbares indisches Softwarehaus, gegründet von einem in Deutschland ausgebildeten Diplom-Informatiker, kennen gelernt. So entstand ein „Joint Venture". Dieses erlaubt wegen der Mischkalkulation aus deutschen und indischen Personalkosten, einem US-amerikanischen Konkurrenten in den Vereinigten Staaten Paroli zu bieten. (Letzterer kooperiert mit einem Softwarehaus in Thailand!).

Dieses hinsichtlich der Langfristwirkungen optimistische Szenario darf aber nicht den Blick dafür verstellen, dass kurz- und mittelfristig in Hochlohnländern wie Deutschland erhebliche Verwerfungen drohen. Selbst wenn die Bilanz für die deutsche Volkswirtschaft am Ende positiv wäre, könnte sie bedeuten, dass Deutschland als Standort der Informationstechnik litte, weil sie als eine Art Vormaterial importiert würde.

Szenario „Resignation"

Diese eher pessimistische Einschätzung der künftigen Entwicklung des IT-Standortes Deutschland teilen viele Experten. Viele Teilgebiete der Informationsverarbeitung verlangen sehr gut ausgebildetes und hoch motiviertes Fachpersonal, aber weniger Kapital und weniger über lange Zeitstrecken und „Versuch- und Irrtum-Prozesse" ausgereifte, komplexe Organisationen. Ferner sind die Produkte und Vorprodukte fast ohne Zeitverzug und Transportkosten an jeden Ort der Welt zu transportieren – anders als z. B. in Taiwan hergestellte Zweiräder. Daher werden „hungrige" Unternehmer und Mitarbeiter in Entwicklungs- und Schwellenländern aggressiv Weltmarktanteile an sich reißen – und es wird ihnen gelingen. Prof. Dr. Edward G. Krubasik, Mitglied des Zentralvorstands der Siemens AG, warnte in einer Botschaft an Podium und Auditorium eindringlich davor, die Qualität der Informatiker in den Zielländern zu unterschätzen.

Gleichzeitig fehlt den „satten" Industrienationen die Kraft, um sich gegen die Konkurrenz zu behaupten. Reformen benötigen lange Zeit; die engmaschigen sozialen Netze fördern weder Leistungsanreize noch die Bereitschaft, wesentlich längere Arbeitszeiten in Kauf zu nehmen. Die Freizeitorientierung behält einen hohen Stellenwert.

Gerade die IT könnte als eine Art Vorprodukt Gegenstand des Offshoring und Nearshoring werden, während komplexere Enderzeugnisse wie Fertigungsroboter oder Anlagen zur Produktion von Pharmaka mit diffiziler Prozesssteuerung in den traditionellen Industrieländern gebaut werden. Im Endeffekt wird sich der Lebensstandard in den Entwicklungs- und Schwellenländern erhöhen und der in den Industrieländern wird absinken (eine Art Konvergenztheorie).

Der „Gastarbeiter-Effekt" ist Teil eines Exodus der Informatik-Elite: Ähnlich wie es bei türkischen Gastarbeitern früher gang und gäbe war, wandert mehr noch als bisher die Informatik-Elite in andere Länder aus, überweist einen Teil des Lohnes ins Heimatland und trägt so zur Ernährung der zurückgelassenen Familien bei. Mit Blick auf das Informatikstudium könnte dies heißen, dass die interkulturellen Kompetenzen einschließlich Fremdsprachen und Auslandspraktika einen hohen Stellenwert erhalten müssten.

Softwarespezialistinnen arbeiten in einem Großraumbüro der Softwarefirma Wipro Technologies in der indischen Stadt Bangalore.
Foto: Vision Photos/Klostermeier

Szenario „Nachkriegshaltung“

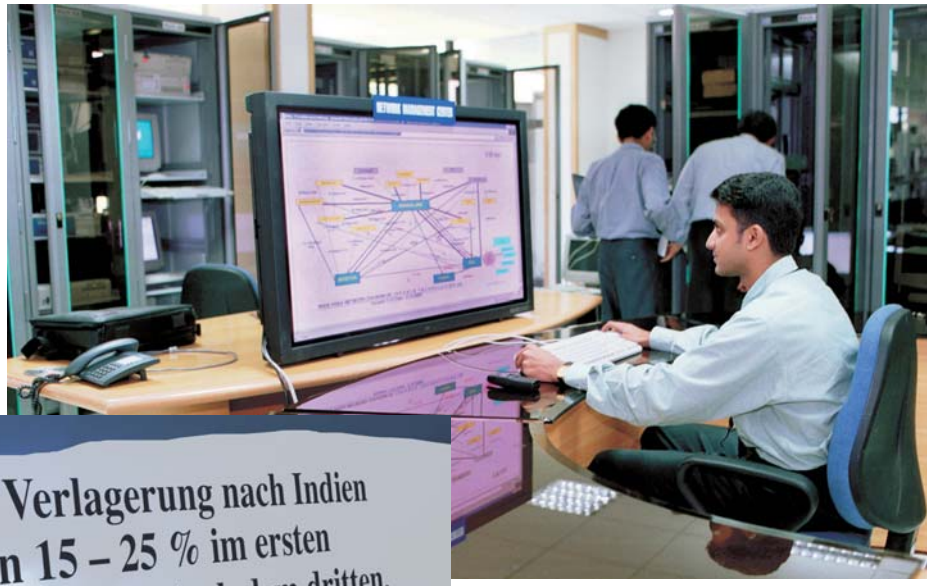
Neben „Abwarten“ oder gar „Resignieren“ sind auch Szenarios möglich, die man als „aktiv“ oder „offensiv“ bezeichnen müsste. Ein ermutigendes Zeichen ist die Flexibilität, die Gewerkschaften, Arbeitnehmer und Arbeitnehmerinnen zeigen, wenn die Unternehmer versprechen, die Arbeitsplätze zu erhalten (s. jüngste Betriebsvereinbarungen bei Siemens und Daimler).

Das Szenario „Nachkriegshaltung“ unterstellt, dass die deutsche Bevölkerung die Dramatik der Lage erkennt und im Zweifel harte Arbeit mit dem Ziel, einen hohen Lebensstandard zu verteidigen, der bisherigen starken Freizeitorientierung vorzieht. Voraussetzung ist, dass die Meinungsbildner, vor allem die Spitzenpolitiker, die Alternativen deutlich vor Augen führen. „Absenken des Lebensstandards“ bedeutet nicht nur relativ leicht verschmerzbare Einbußen, sondern harte Einschnitte in die Lebensqualität, etwa hinsichtlich Alterssicherung und medizinischer Versorgung. Speziell in der Informationstechnik dürfte bei der Arbeitszeitverlängerung die Ausweitung der Jahresarbeitszeit (Streichen von Urlaubs- und Feiertagen) ein stärkeres Gewicht haben als die der Wochenarbeitszeit, denn wegen der wiederholten Urlaubsphasen in Deutschland fehlen zu viele Zeitfenster, in denen alle Mitglieder von betrieblichen oder betriebsübergreifenden Teams gleichzeitig komplett und voll produktiv sind. Hinzu kommen der produktivitätsmindernde so genannte „Vor-Urlaubs-“ und der „Nach-Urlaubsstress“.

Renaissance des ‚Made in Germany‘

Das Zukunftsbild „Renaissance des ‚Made in Germany‘“ beinhaltet, dass eine Art Kernkompetenz oder Nationaltugend der Deutschen, das penible Streben nach sehr hoher Qualität bzw. nach Perfektion, „revitalisiert“ wird. Das könnte bedeuten, dass Software „Made in Germany“ zwar mit höheren Personalkosten und auch höheren anderen Kostenbestandteilen (z. B. Steuern) hergestellt wird, aber mit einem Qualitätsstandard, der den internationalen Durchschnitt einschließlich der Software aus USA deutlich überragt. Dieses Szenario impliziert, dass die gegenwärtig weithin sichtbaren und auch mit Informatikqualität zusammenhängenden Qualitätsprobleme in Deutschland (zum Beispiel Toll Collect, relativ schwache Position der deutschen Automobilhersteller in den Pannenstatistiken, starke Unpünktlichkeit der Deutschen Bahn, z. B. als Folge der schlecht funktionierenden Neigetechnik) nicht Fanale dafür sind, dass den Deutschen ihr

Informationstechnik in Deutschland – ein Auslaufmodell?



Indische Software-Experten des Unternehmens Infosys in Bangalore, Indien.
Foto: Vision photos/Klostermeier

Sinn für Qualität und Pünktlichkeit dauerhaft verloren gegangen wäre; vielmehr markierten sie nur eine vorübergehende Schwächephase. Diskussionen des Verfassers mit Pädagogen unterschiedlicher Provenienz führten freilich zu der Einschätzung, dass man hier die Wende nicht durch Aufrufe allein herbeiführen könne; vielmehr müssten Elternhaus und Schule Lässlichkeiten und Versäumnisse wie Geringachten der Präzision beim Umgang mit Zahlen, Rechenoperationen, Worten und Sprachkonstrukten oder Unpünktlichkeit beseitigen.

Szenario „Subvention“ und Schwerpunktverlagerung

Im Zentrum des Szenario „Subvention“ stehen öffentliche Förderungen, um deutsche IT-Standorte zu stabilisieren. So wurde offenbar der Infineon AG neben weiteren Zusagen garantiert, dass an bayerischen Hochschulen Studienrichtungen erhalten bleiben, um die Verlagerung der Entwicklung ins Ausland zu verhindern. Abgesehen davon, dass solchen Beihilfen durch das EU-Recht Grenzen gesteckt sind, stellt sich die Frage nach der Finanzierung. Ein erster Schritt wäre es, die De-facto-Subvention des Aufbaus von IT-Arbeitsplätzen in den östlichen EU-Beitrittsländern durch Deutschland abzuschaffen. Vereinfacht dargestellt, befindet sich Deutschland in einem Teufelskreis: Hierzulande werden vergleichsweise hohe Steuern erhoben und damit die privatwirtschaftliche Investitionskraft ebenso wie die persönlichen Leistungsanreize vermindert. Ein beachtlicher Teil dieser Steuereinnahmen fließt über Brüssel in die Beitrittsländer und erleichtert es diesen, niedrige Abgaben festzusetzen und so deutschen Unternehmen Anreize zu bieten, IT-Aktivitäten in die Beitrittsländer zu verlagern. Um die öffentlichen Haushalte zu finanzieren, müssen dann in Deutschland wiederum die Steuern erhöht werden usw.

Aus einer Studie des internationalen Beratungsunternehmens A. T. Kearney geht hervor, dass Informatikelemente, die sehr stark mit Produkten, betrieblichen Funktionen und Prozessen integriert wurden, weniger „anfällig“ gegenüber Offshoring oder Nearshoring sind. Die Berater treten daher für eine Akzentverlagerung von der in höherem Maße nachahmbaren Kerninformatik zu den Angewandten Informatiken (unter anderem Medizininformatik, Verkehrsinformatik, Wirtschaftsinformatik) ein.

Szenario „Kapitän und Wasserträger“

Das kühne Szenario „Kapitän-Wasserträger“ ist dem Leistungssport entliehen. Es zielt darauf ab, die Elite zu halten und gleichzeitig besonders pro-

duktiv zu machen. Der geniale Fußballer Beckenbauer konnte durch seinen Blick für die Spielsituation und seine überragende Balltechnik das Spiel aus der Libero-Position aufziehen; er mochte jedoch nicht gerne laufen und war ein schlechter Zweikämpfer. Daher haben ihm die Trainer den fleißigen, aber fußballerisch weniger begabten und kostengünstigeren Kämpfertyp Schwarzenbeck an die Seite gegeben, der Beckenbauer „den Rücken freihielt". Ähnliche Organisationsmuster findet man auch in anderen Sportarten, beispielsweise die so genannten Wasserträger bei der Tour de France, deren Aufgabe es ist, den Stars zum Sieg zu verhelfen.

Übertragen auf die deutschen Informatiker bedeutet das Prinzip, dass sich die Spitzenkräfte auf dem Höhepunkt ihrer fachlichen Leistungsfähigkeit extrem einsetzen sollen, was nur mit Hilfestellung Dritter geht – bis hin in den privaten Bereich. Um bei gleich bleibender Bezahlung – zumindest auf Nettobasis – mehr Leistung und Verzicht auf Freizeit verlangen zu können, werden ihnen arbeitslose oder früh pensionierte Informatiker oder auch andere Hilfskräfte beigeordnet, die ihnen andere Arbeiten bis hin ins Privatleben abnehmen (Einkaufen, Gartenarbeit, Behördengänge). Hierbei würde den Helfern der aus den Solidarkassen über die erarbeiteten Alterseinkünfte hinaus finanzierte Zusatzbetrag nur ausgezahlt, wenn konkrete Leistung dahinter steht. Die Leistung der Elitekräfte würde für ihre Unternehmen preisgünstiger, weil sie ohne Überstundenzuschläge mehr arbeiten.

IT-Spezialist im Rechenraum des Leibniz-Rechenzentrums München.

Das gegenwärtige System in Deutschland zeitigt umgekehrte Effekte: Vor die Wahl gestellt, ob ein Spitzenkönner Freizeit zusätzlich in seine Arbeit investiert oder sie beispielsweise nutzt, um seinen Garten zu pflegen, wird er sich beim Vergleich des zusätzlichen Nettoeinkommens mit den Kosten der Beschäftigung einer Gärtnerei, die zu ihren Stundenpreisen tätig wird, für das „Do it Yourself" im Garten und gegen die Überstunden entscheiden. Diese Stundenpreise sind unter anderem deshalb so hoch, weil über sie auch der Lebensunterhalt von Frühpensionären finanziert werden muss. Insgesamt ein ökonomischer Widersinn!

Jeder nach seinen Fähigkeiten

Letztlich läuft die Lösung darauf hinaus, dass alle Personalressourcen in Deutschland weitgehend den individuellen Fähigkeiten entsprechend zur Produktivität der Volkswirtschaft und damit zur Standortsicherung beitragen. Das „Kapitän-Wasserträger"-Modell zeitigt vergleichbare Effekte wie die Forderung von wirtschaftswissenschaftlichen Beraterkreisen und einzelnen Nationalökonomen in Deutschland, das Sozialsystem so umzubauen, dass (weniger qualifizierte) Arbeit, aber nicht Arbeitslosigkeit staatlich gefördert wird. Es zeigt ferner Verwandtschaft mit dem hedonistischen Ansatz zur Bewertung der Rationalisierungsmaßnahmen bei

Informationstechnik in Deutschland – ein Auslaufmodell?

Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Peter Mertens (geb. 1937) ist Leiter des Bereichs Wirtschaftsinformatik I an der Universität Erlangen-Nürnberg. Er ist Sprecher des Forschungsverbundes Wirtschaftsinformatik FORWIN, Vorstandsmitglied der abayfor und in FORWISS und FORSIP aktiv. Seine Forschungsschwerpunkte sind die überbetriebliche Kopplung von Anwendungssystemen, die Informationsverarbeitung in Unternehmensnetzen (Supply Chain Management), die Personalisierung von Informationssystemen und die künstliche Intelligenz im Betrieb.

qualifizierten Tätigkeiten. Im Software-Engineering müssten entsprechende Organisationsformen gewählt bzw. (weiter)entwickelt werden: Statt der bei deutschen Softwareherstellern vielfach anzutreffenden und sehr anspruchsvollen Funktionsintegration „Anforderungsanalyse – Systementwurf – Programmentwurf – Codierung – Test“ am Arbeitsplatz einer Person müssten Teilfunktionen so gestaltet werden, dass weniger qualifizierte Helfer sie auch bewältigen können. Zu denken wäre an eine Wiederbelebung des allerdings umstrittenen Chief-Programmer-Konzeptes: Ein Team für eine Herztransplantation besteht auch nicht aus acht hochqualifizierten Herzchirurgen; vielmehr reicht eine vergleichsweise wenig qualifizierte OP-Schwester die Instrumente.

Schlussbetrachtung

Inwieweit Absichtserklärungen der deutschen Unternehmen, das Off- und Nearshoring ins Auge zu fassen, valide sind, ist schwer zu beurteilen: Einerseits mag mit derartigen Veröffentlichungen Druck auf Arbeitnehmervertretungen ausgeübt werden (siehe Verhandlungen über die Flexibilisierung der Arbeitszeit oder über den Abbau übertariflicher Leistungen), dann könnten die Zahlen überhöht sein. Andererseits dürften sich aber Unternehmensleitungen auch scheuen, ihre wahren Auswanderungsabsichten offen zu legen, und die Kostensenkungsziele nach und nach („schleichend“) verwirklichen, um Widerstand aus Gewerkschaften, Arbeitnehmervertretungen, Politik und Öffentlichkeit (Kunden!) zu vermeiden. Charakteristisch sind Angriffe von Spitzenpolitikern, die den Arbeitsplätze verlagernden Führungskräften unpatriotisches Verhalten vorwerfen.

Umstritten ist, inwieweit man mit pessimistischen und optimistischen Szenarios operieren soll: Einerseits ist zu befürchten, dass düstere Zukunftsbilder junge Menschen ebenso entmutigen wie Investoren, sich in Deutschland in der IT zu engagieren. Dadurch würde die Standortsituation noch prekärer (selbsterfüllende Prognose). Andererseits muss ein Bewusstsein vorhanden sein, bevor breite Bevölkerungskreise in einer Demokratie einschneidende politische Maßnahmen akzeptieren. Je früher die Korrekturen einsetzen, desto maßvoller können sie ausfallen. Man stelle sich rückblickend vor, bald nach dem „Pillenknick“ oder wenigstens nach den ersten gut begründeten öffentlichen Warnungen, etwa Meinhard Miegels oder Bert Rürups, hätten die damaligen Bundesregierungen nicht schlicht erklärt „Die Renten sind sicher“, sondern Korrekturfaktoren eingeführt. Die jetzige, relativ dramatische Situation wäre den Deutschen erspart geblieben.

COPARK – COORDINIERTES PARKEN IN BALLUNGSZENTREN

Das Aus für den ständigen Kampf um einen Parkplatz!

Rudolf Bayer, Christian Effert,
Christian Roth und Dietmar Scharf

Freitagabend, Altstadtring in München. In 15 Minuten fängt die „Zauberflöte" an. Auf den Straßen geht nichts mehr und von einem Parkplatz keine Spur. Der Adrenalinspiegel des stressgeplagten Opernfans steigt in Herzinfarkt verdächtige Höhen.
Jeder, der in einer Großstadt wohnt, kennt die Situation: den Häuserblock schon fünfmal umrundet und immer noch keinen Parkplatz ergattert. Den Städten droht der Verkehrsinfarkt. Zumindest für die notwendigen Transporte ist die Verteuerung der Mobilität keine geeignete Maßnahme. Die Alternative ist, erforderliche Transporte besser zu managen, um so den Verkehr zu reduzieren.

Parken in Ballungsräumen

Studien haben gezeigt, dass mehr als 50 Prozent des Verkehrsaufkommens in Ballungsräumen durch den Parksuchverkehr entstehen, denn jedes fahrende Auto hat nur ein einziges Ziel: einen freien Parkplatz. Würde – ähnlich einem Flugzeug, das nur startet, wenn es am Zielflughafen landen darf – jedes Auto nur dann losfahren, wenn es ohne Umwege einen garantierten Parkplatz ansteuern kann, wären Staus ein bestauntes Phänomen, die Familienkasse und die Umwelt zudem erheblich entlastet.

Hier setzt die coPark-Idee an: koordiniertes Parken in Ballungszentren. coPark ist ein sehr komfortables und flexibles System, das den Lenker eines Kraftfahrzeugs auf kürzestem Weg zu einem garantiert freien Parkplatz führt. Oder aber es schlägt dem Nutzer – wenn er bereits unterwegs und kein Parkplatz in Zielnähe vorhanden ist – mit öffentlichen Verkehrsmitteln eine Alternative vor. Dann kann er sein Auto auf einer ausgewiesenen Park&Ride-Anlage abstellen und die Fahrt mit S-Bahn oder U-Bahn fortsetzen.

Das coPark-System

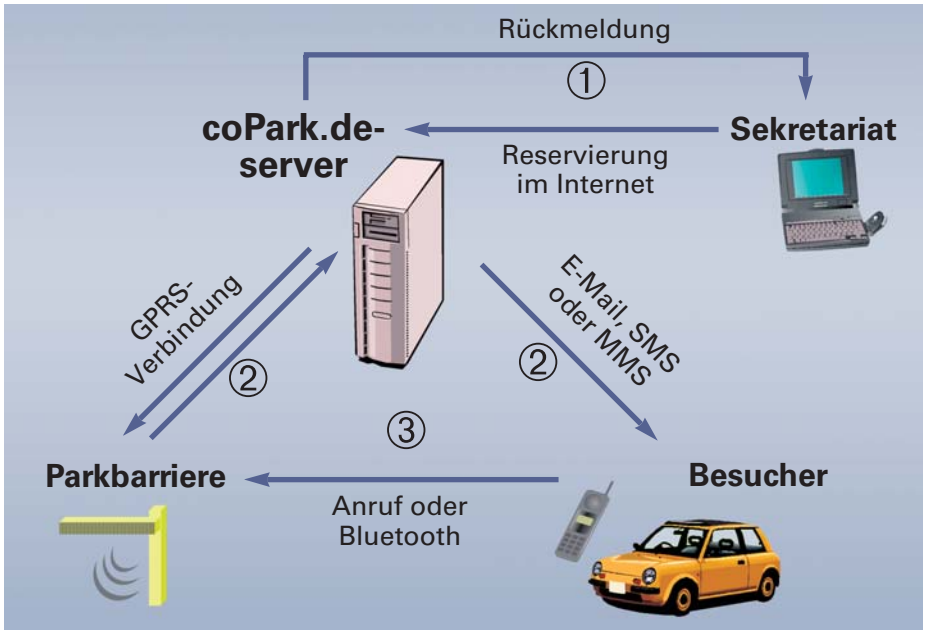
coPark hält aktuelle Informationen über verfügbare und dem System zugehörige coPark-Plätze im Internet vor, vermittelt diese Parkplätze und erlaubt sogar eine Reservierung. Den elektronischen Parkschein schickt das System per SMS aufs Handy. Eine Lageskizze des Parkplatzes erhält der Fahrer per E-Mail oder auch noch während der Fahrt per MMS (Multimedia Messaging Service).

Am Parkplatz angekommen, öffnet der Parkplatznutzer (coParker) die

Foto: coPark.de

Schranke per Mobiltelefon. Dabei identifiziert er sich direkt mit der eigenen Mobilnummer, entweder durch einen kurzen, kostenfreien Anruf oder mit der Nahbereichsfunktechnologie Bluetooth. Vom Mobiltelefon unabhängige Alternativen stellen hierzu die Eingabe einer persönlichen Identifikationsnummer (PIN) auf einem vor Ort installierten Tastenfeld oder die so genannte Radio Frequency Identification (RFID) mit berührungslos lesbaren Chipkarten.

Der Betreiber der jeweiligen Parkierungsanlage rechnet die Gebühren per Lastschrift am Monatsende ab. Der Parkschein aus dem Automaten ist also genauso überflüssig wie das lästige Kramen nach Kleingeld am Kassenautomaten.



Funktionsschema für Visitor-Parking

Vom Märchen zum Feldtest

Was für gestresste Autofahrer wie ein Märchen klingt, wurde im Wintersemester 2003/04 zum ersten Mal mit einer kleinen Gruppe von Studierenden der Technischen Universität München (TUM) unter realen Bedingungen getestet. Die Auserwählten konnten sich einen Platz in der Tiefgarage der TUM in der Arcisstraße reservieren und die Schranken mit ihren Handys bedienen, um ein- und auszufahren. Wenige Wochen später funktionierte coPark stabil und einwandfrei.

Dienst am Kunden: Visitor-Parking

Die Entscheidung, welches Geschäft, welchen Anwalt oder welchen Arzt ein Kunde aufsucht, hängt oft entscheidend von dem Parkplatzangebot vor Ort ab. So entstand die Idee, mit der coPark-Technologie einen Service zur Kundenbindung zu generieren. Zusammen mit seinem Termin erhält der Kunde dabei auch einen reservierten Parkplatz: Der elektronische Parkschein kommt per SMS und ein Handy-Anruf öffnet die Schranke zum Parkplatz. Ortsunkundige können sich per MMS oder per E-Mail eine Anfahrtsskizze schicken lassen. Sobald der Besucher die Schranke durchquert hat, erhält der Besuchte per SMS oder E-Mail die Information, dass sein Besuch gerade angekommen ist. Rückfragen bei der Sekretärin und der Gang zum Pförtner entfallen. Dieser Dienst heißt Visitor-Parking und ist derzeit unter anderem beim ADAC, bei T-Mobile, am Flughafen II in München und bei der MVG (Münchener Verkehrsgesellschaft) im Probeeinsatz.

Public-Parking

Viele Parkplätze, zum Beispiel in Tiefgaragen von Bürogebäuden und öffentlichen Einrichtungen (Beispiel TUM), stehen abends, an Feiertagen und Wochenenden leer. Mit bisherigen Technologien – Schranken, Kassenautomaten, Video-Überwachung, Parkscheinausgabe, Barbezahlung – lässt sich das nicht ändern, weil die Investitionen in die Infrastruktur und die laufenden Kosten für Personal zu hoch und die Organisation des Parkgeschehens viel zu aufwändig wären.

Vorhandene Schranken mit der coPark-Technologie aufzurüsten, ist eine wesentlich preiswertere Alternative: Weitere Infrastruktur ist vor Ort nicht erforderlich, denn die gesamte Organisation übernimmt der coPark-Server, an dem die intelligenten coPark-Schranken angemeldet

sind. So lassen sich auch einfache private oder halböffentliche Parkgaragen mit minimalen Investitionen für coParker zur Verfügung stellen.

Auf diese Weise kann das Parkplatzangebot in Ballungszentren deutlich erhöht und besser ausgenutzt werden. Sogar der Neubau von Parkhäusern kann überflüssig werden, was vor allem die Kasse finanzschwacher Kommunen entlastet. Da zudem alle coPark-Kunden bekannt sind und die einzelnen Parkvorgänge durch den coPark-Server registriert werden, ergeben sich weitaus weniger Sicherheitsprobleme. Man denke nur an Aufbrüche oder Beschädigungen von Autos.

Die Technik im Hintergrund

Die Integration zahlreicher Funktionen in das coPark-System wäre ohne modernste Informationstechnologien nicht möglich. Handelsübliche Mobiltelefone sind hier das Kommunikationsmittel für unterwegs. In Kürze können UMTS-Endgeräte den coPark-Kunden noch besser und schneller (zum Beispiel mit Lageplänen) informieren. Ebenso wichtig ist der Internetzugang. Eine ansprechende und einfache Bedienung leitet den coParker: Mit nur wenigen Klicks ist der Parkplatz angefordert, reserviert und freigegeben.

Die Schaltzentrale von coPark ist der coPark-Server. Er verwaltet in einer multidimensionalen Hochleistungs-Datenbank die freien und belegten Parkplätze, die Stammdaten von coParkern, ihre Buchungswünsche und Reservierungen. Auf dieser Basis stellt der coPark-Server die optimale Zuordnung und Belegung von Parkplätzen und die Gebührenabrechnungen sicher. Und nicht nur das: Die ausgeklügelte und modular aufgebaute Systemarchitektur gewährleistet, dass die Informationen genauso sicher auf dem Handy wie dem PDA landen sowie dass Bluetooth- und PIN-Identifikation problemlos funktionieren.

Die Zukunft: Unabhängig von Raum und Zeit

Immer dann, wenn Anbieter und Nutzer einer Dienstleistung zu einer bestimmten Zeit an einen bestimmten Ort zusammentreffen sollen, wird die Kopplung des mobilen Telefons mit dem satellitengestützten Positionierungssystem GPS (Global Positioning System) notwendig. Bereits in der Forschungsphase hat das coPark-Team auch diese Möglichkeit in die Konzeption einbezogen und vollständig entwickelt. Kommerziell eingesetzt wird diese Version derzeit noch nicht, da GPS in Verbindung mit dem Handy am Markt zwar verfügbar ist, aber noch keine nennenswerte Verbreitung gefunden hat. Eine Alternative zu GPS bieten Funkzellen, über die die aktuelle Position eines coParkers geortet werden kann. Diese zukunftsfähige Technologie erfordert allerdings neue, anspruchsvolle mathematische und datenbanktechnische Ansätze, an denen die Wissenschaftler intensiv forschen. Die bisherigen Ergebnisse sind sehr ermutigend. Die genaue geografische Positionierung eröffnet coPark viele neue Anwendungsfelder, von denen hier nur eine Auswahl genannt sei.

Taxiruf per GPS

Der Fahrgast übermittelt seinen Standort per Knopfdruck vom Handy an einen Taxi-Server. Dieser weiß sofort, wo sich welches Taxi aktuell befindet und welchen nächsten Ort es ansteuern soll. Der Taxi-Server sucht ein geeignetes Taxi und gibt ihm die Position des neuen Fahrgastes durch. Das Rendezvous zwischen Taxi und Fahrgast wird dann präzise und automatisch über GPS gesteuert. Was vermeintlich einfach klingt, ist in Wirklichkeit hochkomplex. Denn für ein solches „Echtzeitsystem“ ist eine Hochleistungsdatenbank mit geografischen Daten und dynamischer Aktualisierungsfähigkeit erforderlich.

In anderen Ländern, zum Beispiel in Singapur, haben sich Sammeltaxis bestens bewährt. Mit der coPark-Technologie entfallen dabei auch noch die lästige Absprache zwischen den Fahrgästen und der feste Abfahrtsort. Die Fahrgäste geben ihren Standort sowie ihre Wünsche bezüglich Fahrtziel und Abfahrtszeit über ein GPS-fähiges Mobiltelefon oder per Internet an den Taxi-Server durch. Dieser berechnet die optimale Abholreihenfolge und Fahrtroute für die Fahrgäste und steuert das Treffen wieder automatisch per GPS. Dadurch wird die Fahrt mit dem Taxi preiswert und das System ist so flexibel, dass keine Disco-Nachteule mehr von der verwaisten Bushaltestelle aus trampen muss.

Mitfahrzentrale mit Hightech

„Wenn ich schon fahren muss, warum dann die Kosten alleine tragen?“

coPark – Coordiniertes Parken in Ballungszentren

Prof. Rudolf Bayer Ph. D. (Jahrgang 1939) ist Leiter der FORWISS-Forschungsgruppe Wissensbasen und emeritierter Ordinarius der TU München (Lehrstuhl für Datenbanken). Er ist Inhaber mehrerer international genutzter Patente im Bereich Zugriffsminimierung, Träger des SIGMOD Innovations Award in den USA und Mitgründer von zwei Start-up-Unternehmen.

Dipl.-Ing. Christian Effert (Jahrgang 1972) ist als Projektleiter bei der Transaction Software GmbH für die Kommerzialisierung der coPark-Technologie verantwortlich.

Dr. Christian Roth (Jahrgang 1956) ist Geschäftsführer der Transaction Software GmbH. Das Unternehmen stellt die Datenbank und den coPark-Server zur Verfügung.

Dipl.-Inf. Dietmar Scharf (Jahrgang 1975) ist technischer Leiter des coPark-Projektes und Mitarbeiter von Prof. Bayer an der TU München.

Anmerkung:
Die Entwicklung der coPark-Technologie wird vom Förderkreis der Bayerischen Wirtschaft für das Bayerische Forschungszentrum für Wissensbasierte Systeme (KI) e.V. gefördert.

Mitfahrzentralen haben schon seit vielen Jahren Hochkonjunktur. Allerdings müssen sich die Mitfahrer frühzeitig absprechen und zur bestimmten Zeit am bestimmten Ort sein. Mit der coPark-Technologie ist es möglich, Mitfahrgelegenheiten sehr kurzfristig und auch für kurze Strecken zu organisieren. Die Sicherheit steigt, weil der coPark-Server die Fahrer- und Mitfahrerdaten sowie über ein vorgegebenes Bewertungsschema die „Qualität" seiner Mitfahrgelegenheit bereits vorab kennt.

Flexibler Verkehrsfluss

Mittagszeit: Ein Unfall auf einer Haupteinfallstraße blockiert den Verkehrsfluss und bringt Mütter in Stress, weil die Kleinen pünktlich vom Kindergarten abgeholt werden müssen. Wenn die Bewegung der Autos flächendeckend und „online" beobachtet werden könnte, wäre Abhilfe schnell möglich. Dies ist ein künftiges Ziel von coPark, denn um sich ein genaues Bild über die aktuelle Verkehrssituation zu verschaffen, bedarf es nur der Beobachtung von relativ wenigen Autos, zum Beispiel von Taxis. Deren Verhalten lässt auf aktuelle Staus und hohes Verkehrsaufkommen schließen. Ausweichstrecken könnte der Server den coPark-Kunden sofort aufs Handy senden.

Das coPark-Konsortium

Hinter coPark steht ein interdisziplinäres Konsortium aus Forschung, Technologieunternehmen und dem Öffentlichen Personen-Nahverkehr (ÖPNV): zwei Lehrstühle der TU München, MVV GmbH, Transaction Software GmbH, Siemens AG Intelligent Traffic Systems, GAP AG, TUM-Tech GmbH. Die Hightech-Offensive Zukunft Bayern und der FORWISS Förderkreis haben coPark gefördert.

Vom Forschungsprojekt zum Spin-off

Die coPark-Technologie bietet eine gute Grundlage, um das Verkehrsmanagement in Zukunft deutlich zu verbessern und dem Parkplatznotstand in Ballungszentren entgegenzuwirken. Sie reduziert Stress für Menschen, erhöht die Verkehrssicherheit, reduziert Kosten und entlastet die Umwelt. Das System wurde 2002 zum ersten Mal der Öffentlichkeit und seitdem bei mehreren Messen vorgestellt. Die begeisterte Resonanz der Besucher gab den Ausschlag für die Geschäftsidee coPark.de. Sie hat ihre erste „Feuertaufe" beim Münchner Businessplan Wettbewerb 2003 bereits bestanden. Die Autoren Rudolf Bayer, Christian Effert, Christian Roth und Dietmar Scharf betreiben die Gründung der coPark.de GmbH, suchen nach Kapitalgebern und haben bereits erste Kunden und Aufträge akquiriert.

DIGITALES DOMBAUARCHIV

Burkhard Freitag, Ulrich Zukowski und Gerhard Bloch

Im kalten Morgenlicht des frühen Sommermorgens schiebt der entsetzte Dombaumeister mit dem Fuß die Trümmer der ehemaligen Volute von der Westfassade herum. Sie war während der Nacht von ganz oben herunter gefallen. "Ein Glück", dachte sich der Dombaumeister und machte im Stillen drei Kreuze. Wäre sie am helllichten Tag abgebrochen, hätte sie ziemlich sicher eine der zahlreichen Touristengruppen getroffen, die in den Sommermonaten den Domvorplatz bevölkern. Wenn herabfallende Steinteile einen Besucher getroffen hätten, wäre das natürlich eine Katastrophe mit womöglich weitreichenden Konsequenzen gewesen. Das musste er unter allen Umständen vermeiden. Konnte noch mehr abbrechen? War die Westfassade der einzige gefährdete Teil des riesigen Doms aus dem 16. Jahrhundert mit den vielen Anbauten aus späteren Epochen?

Bei der Begutachtung vom Hubsteiger aus wird das wahre Ausmaß der Schäden erkennbar – viel schlimmer als ursprünglich angenommen. Der Sandstein ist an manchen Stellen so sehr ausgewaschen, dass er die Last der darüber liegenden Wandfläche kaum noch tragen kann und auch an vielen der Ornamente hat der Zahn der Zeit seine Spuren hinterlassen. Für den Dombaumeister steht fest, dass er rasch und konsequent handeln muss, um weitere Schäden zu verhindern.

Die richtige Information schnell zur Hand

Bevor die Arbeiter damit beginnen, den porösen Sandstein wieder zu verfestigen, konsultiert der Dombaumeister das Digitale Dombauarchiv – nur um sicher zu gehen. Mit wenigen Mausklicks ist die betroffene Fassade im Archivsystem lokalisiert. Maßnahmenkartierungen, das ist es, wonach der Dombaumeister sucht und auch sofort findet. „Ah, dann war meine Vermutung doch richtig!“, er eilt nach draußen. „Leute, wir müssen das anders machen!“ Die zunächst nahe liegende und oft erfolgreiche Verfestigung mit Polypropylensulfat hätte in diesem speziellen Fall mehr Schaden angerichtet als geholfen. Bereits vor mehreren Jahren war an der betroffenen Stelle eine Reinigungsmaßnahme durchgeführt worden. Damals wurde noch Benzolhydrat verwendet – heutzutage würde wohl niemand mehr diese aggressive Chemikalie einsetzen. In Verbindung mit Polypropylensulfat wäre eine verhängnisvolle Reaktion in Gang gesetzt worden, die den Stein durch Rissbildung schließlich endgültig zerstört hätte. So kommt nur Kieselsäure in Frage, zwar aufwändiger und kostspieliger in der Anwendung, aber dafür ohne Spätfolgen und somit langfristig die bessere Wahl. Der Dombaumeister ist froh, dass er über die für diese Entscheidung benötigten Informationen so rasch verfügen konnte. Noch vor einem Jahr, vor der Einführung des Di-

Lagebesprechung vor dem Passauer Dom.

gitalen Dombauarchivs, hätte die Recherche, die er eben in einer Minute durchführen konnte, Stunden gedauert – im schlimmsten Fall wäre die Kartierung und damit die frühere Reinigungsmaßnahme dabei auch leicht übersehen worden.

Digitale Vorlage für originalgetreuen Ersatz

Inzwischen kehrt auch der Steinmetz von seiner Begutachtung am Gerüst zurück. „Die Voluten müssen wir komplett ersetzen, von der Substanz ist kaum noch etwas erhalten. Ich suche mir nur schnell die alten Pläne und Fotos und beginne gleich mit der Rekonstruktion der Ersatzstücke." Er setzt sich an das Digitale Dombauarchiv; ihn interessieren Detailfotos und Planzeichnungen der betroffenen Zierelemente. Im Archiv navigiert er dazu direkt zu den einzelnen Steinquadern, an denen die Ornamente befestigt sind und das Archivsystem zeigt ihm die entsprechenden Dokumente. Nur in einem Fall bleibt die direkte Recherche ohne Ergebnis, da keine Detail-Dokumente vorliegen. Durch einen Klick vergröbert er die Suchanfrage und wird auch in diesem Fall fündig. Auf mehreren Übersichtsfotos der Wandfläche und auch auf Detailfotos der benachbarten Steine ist das inzwischen stark verwitterte Detail abgebildet. Mit diesen Vorlagen kann jetzt die Herstellung der Ersatzstücke beginnen.

Wenige Tage später begutachtet der Dombaumeister die geleistete Arbeit. „Mit diesem Ergebnis können wir alle zufrieden sein."

Von der Chronologie zur bedarfsgerechten Information

Diese Geschichte hat sich so nie zugetragen, das geschilderte Szenario ist deswegen aber nicht weniger realistisch – abgesehen von herunterfallenden Steintrümmern. Insbesondere die informationstechnischen Anforderungen stellen sich genau so im Tagesgeschäft der Dombauhütte des Staatlichen Hochbauamtes Passau. Diese verwaltet seit ihrer Gründung im Jahre 1928 alle bei der Arbeit entstandenen Dokumente in einem zentralen Archiv, bisher in der chronologischen Ordnung ihrer Entstehung. Daher war es nur anhand dieser zeitlichen Einordnung möglich, nach Dokumenten zu suchen. Wie das Beispiel zeigt, verlangt die Praxis jedoch häufig, gezielt Dokumente zu einem bestimmten Baudetail zu finden: Um beispielsweise einen dokumentierten Vorzustand auswerten zu können, hätte man theoretisch alle vorhandenen Fotografien (tausende von Einzeldokumenten) sichten und auswerten müssen. Praktikabel ist ein solches Verfahren nicht mehr. Das Digitale Dombauarchiv ist eine Software, die das und eine Menge mehr natürlich sehr viel schneller leistet und dabei noch einen wesentlich größeren Komfort im Praxiseinsatz bietet.

Ordnung ist das halbe Leben

Der Anwender kann frei entscheiden, ob er den Dokumentbestand wie bisher nach der Entstehungszeit oder gezielt nach Gebäudebereichen oder anderen Kriterien sichten möchte, die er einzeln oder in Kombination

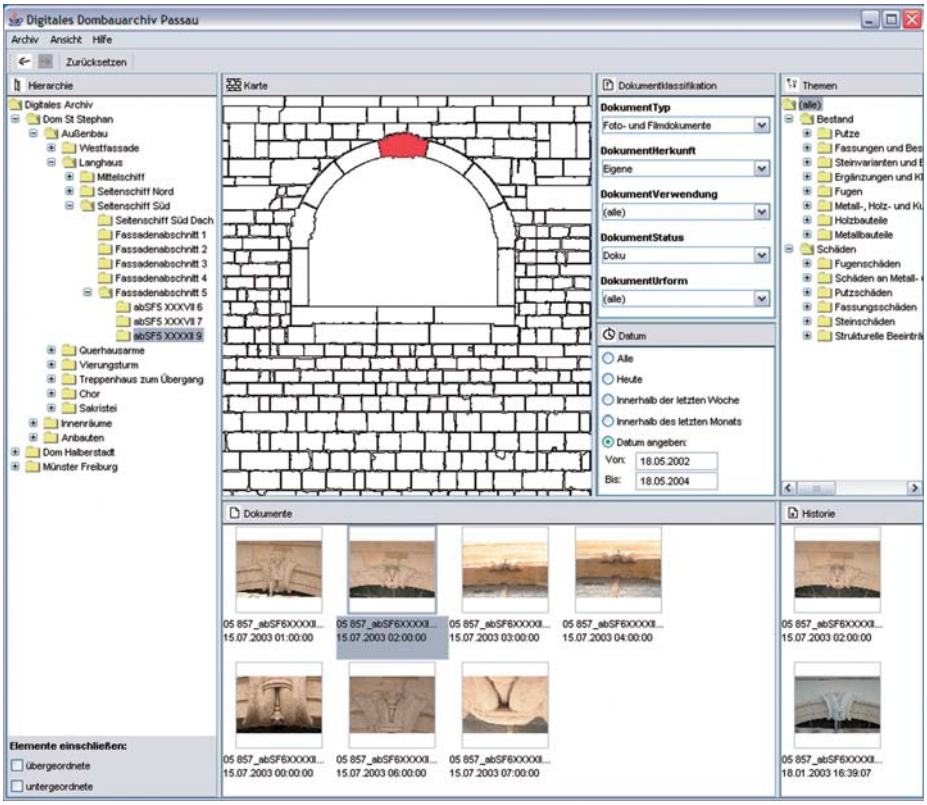
Vor den Renovierungsarbeiten muss klar sein, wie der Stein beschaffen ist.

verwenden kann. Die Ordnungsstruktur orientiert sich am Aufbau des jeweiligen Objekts: Der Passauer Dom beispielsweise wird auf der obersten Ebene in die Bereiche „Außenbau“, „Innenbau“ und „Anbauten“ untergliedert, die sich weiter verästeln bis hinunter zu einem ganz bestimmten Werkstein. Zusätzlich verknüpft die Archivsoftware die einzelnen Objekte auch mit Grund- und Aufrissplänen. Diese Karten dienen wie Landkarten zur Navigation im Gebäude und gleichzeitig als Basispläne für sämtliche Kartierungsprojekte wie Bestands-, Schaden- und Maßnahmenkartierungen. Das System gibt dem Anwender Hinweise, wenn er im Aufriss einer Wandfläche Werksteinquader übersehen oder versehentlich einer falschen Wandfläche zugeordnet hat.

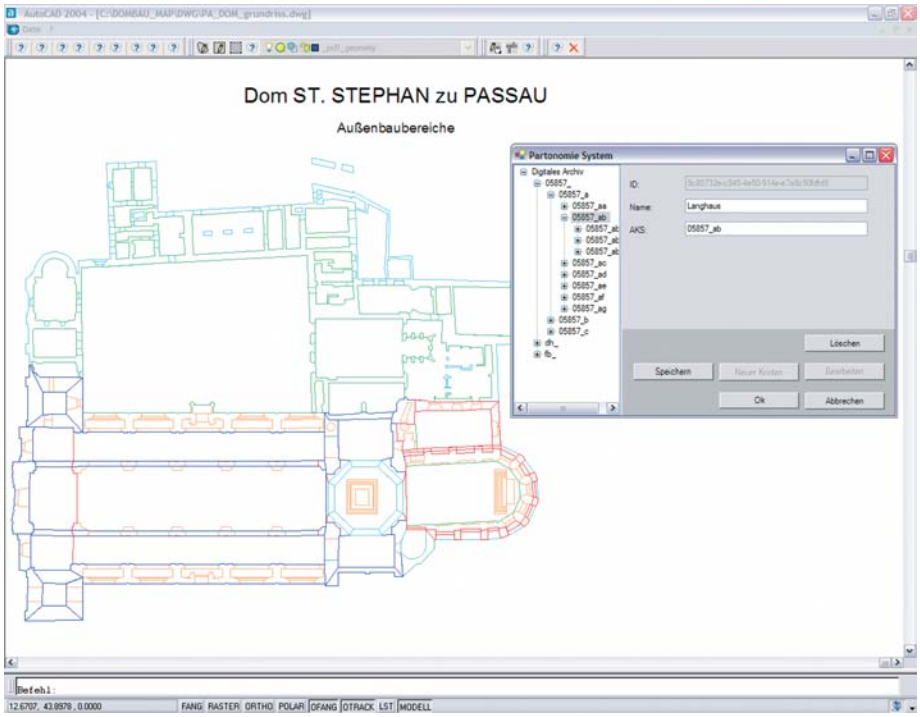
Das richtige Suchen die andere Hälfte

Eine sehr mächtige Suchfunktion ist die inhaltsbasierte semantische Suche über den Themen-Katalog. Dieser Katalog enthält ein Glossar der verwendeten Kartierungsthemen (darunter fallen zum Beispiel Bestand, Schäden und Maßnahmen) und macht es möglich, direkt nach relevanten Dokumenten zu suchen, die etwa einen bestimmten Schadenstyp oder durchgeführte Maßnahmen beschreiben. Die effiziente Suche und die damit hergestellten Querverbindungen erleichtern eine fundierte Planung der notwendigen Maßnahmen entscheidend.

Nach dem Erfassen einer neuen Schadenskartierung kann der Anwender direkt auf die darin vorkommenden Schadenstypen zugreifen und feststellen, wo noch ähnliche



Bedienoberfläche mit ihren Komponenten. Links die partonomische (hierarchische) Gebäudestruktur, in der Mitte die Aufrisskarte einer Wandfläche, auf der ein einzelner Werkstein ausgewählt wurde. Unten ist eine Liste der dazu vorhandenen Dokumente. Rechts am Rand finden sich die Auswahlfelder für die Dokumentklassifikation und das Datum sowie der Themenkatalog.



Der PMS-Editor erfasst die Partonomie (hierarchische Gebäudestruktur) und verknüpft sie mit CAD-Plänen. Er vollzieht den Brückenschlag zwischen symbolischer und geometrischer Repräsentationsebene.

Materialien verbaut sind, die dann über kurz oder lang denselben Schaden aufweisen, oder ob der Schaden erst durch eine früher durchgeführte Maßnahme entstanden ist, die unerwartete Spätfolgen nach sich zog.

Die Software sucht gezielt nach Fotos, Planzeichnungen oder Kartierungen, wobei nicht das Dateiformat den Ausschlag gibt, sondern der Inhalt. Der Anwender hat die Wahl unter zahlreichen Kriterien wie beispielsweise die Unterscheidung digital oder analog entstandener Dokumente, die er beliebig festlegen und abfragen kann. Der multidimensionale Ansatz ermöglicht außerdem eine Kombination dieser Merkmale.

Komfortable Bedienoberfläche

Die Bedienoberfläche ist praxisnah gestaltet, damit der Anwender sie sofort intuitiv nutzen kann. Alle Dokumente, die den gewählten Kriterien genügen, sind gleichzeitig übersichtlich aufgelistet, so dass er immer die Auswirkungen der vorgenommen Einstellungen nachvollziehen kann und über die grafische Vorschau sofort einen Überblick über die gefundenen Dokumente erhält.

Die technische Realisierung der Oberfläche entspricht dem aktuellen Stand und erlaubt ergonomisches Arbeiten. Mittels Drag&Drop kann der Benutzer Dokumente auf einfachste Art in das Archiv importieren oder verschieben.

In größeren Archiven hat er die Möglichkeit, Versionen eines Dokuments zu gruppieren, in der Dokumentenliste wird dann jeweils nur die aktuellste Version angezeigt. In einem weiteren Fenster erscheint die Historie dieses Dokuments, die alle Versionen in ihrer chronologischen Ordnung präsentiert.

Begutachtung der renovierten Wand.

Import von Dokumenten, Migration vorhandener Daten

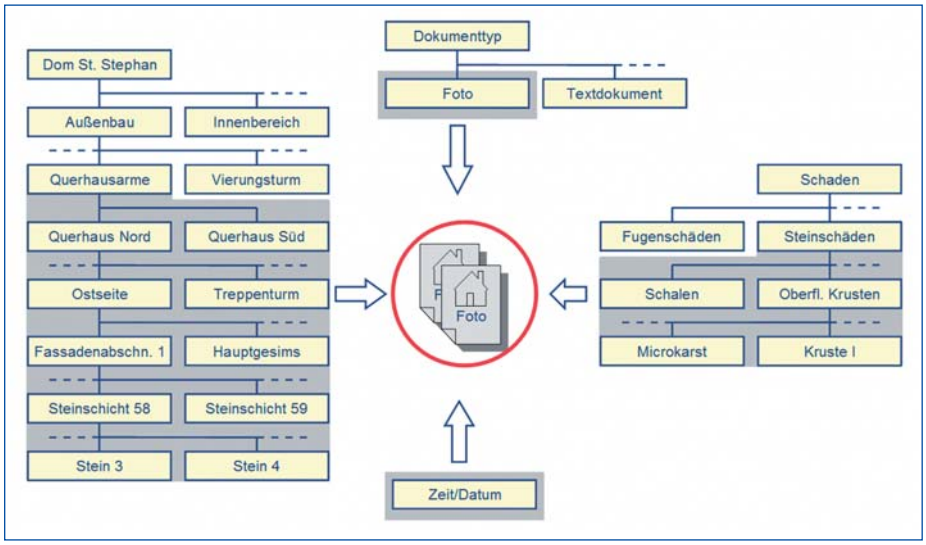
Trotz aller Vorteile des Digitalen Dombauarchivs wäre eine breite Nutzung kaum vorstellbar, würde es nicht die zahlreichen bereits vorhandenen Archive mit oft vielen tausend Dokumenten vollautomatisch übernehmen. Außerdem besteht die Möglichkeit, Daten aus verschiedenen Datenbanksystemen, Excel-Tabellen, strukturierten Textdateien oder Dateien aus proprietären Systemen zu übernehmen, solange diese in einem dokumentierten Format vorliegen.

Mit dem entwickelten System steht ein Baukasten zur Verfügung, der eine schnelle Realisierung angepasster Instanzen möglich macht. Da die Anforderungen, die unterschiedliche Bauwerke und Institutionen stellen, mitunter stark divergieren, ist dieses Vorgehen deutlich flexibler, als es starre vorgefertigte Lösungen sein könnten.

Datensicherheit

Die Frage nach der Datensicherheit hat für ein Archivsystem hohe Priorität. Die Dokumente stellen einen großen kulturellen Wert dar, der über

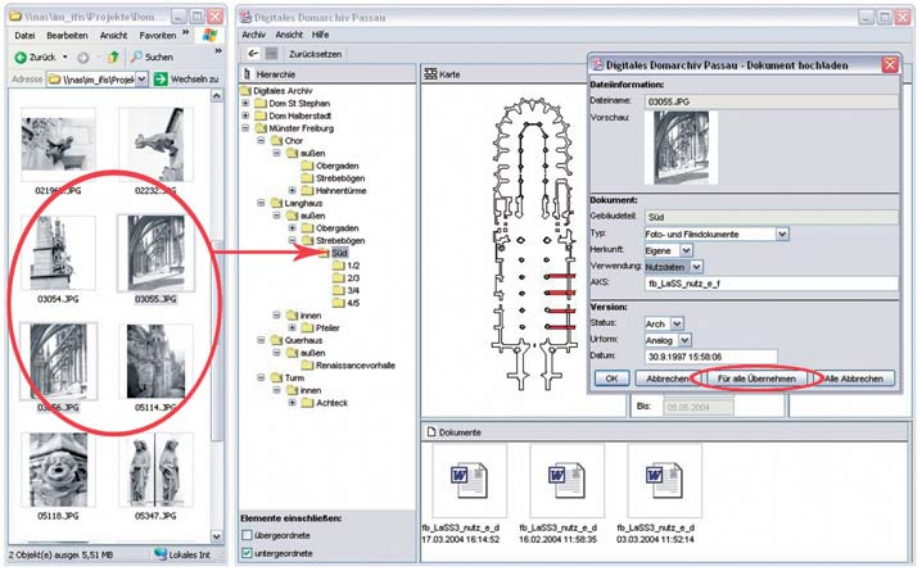
Jahrzehnte bewahrt werden muss. Die Entwickler haben alles getan, um aus heutiger Sicht optimale Voraussetzungen für eine lange Nutzung zu schaffen, wenngleich die Problematik der digitalen Langzeitarchivierung nach wie vor ein schwieriges Problem ist. Der Einsatz von Standardformaten bei den Archivdokumenten stellt sicher, dass gängige Programme zumindest mittelfristig die Daten lesen und verarbeiten können: Bei schriftlichen Dokumenten sind das die Standardformate PDF und RTF, bei Bildern JPG und TIFF und bei den Kartierungen das Format DWG. Das Archivsystem ist aber technisch in keiner Weise an diese Formate gebunden, sondern kann alle Formate verwenden, für die passende Programme zum Betrachten bzw. Bearbeiten installiert sind. Die Metadaten der Dokumente sind im Format RDF abgelegt, ein weltweiter Standard, der dank seines selbstbeschreibenden und menschenlesbaren Charakters die Nutzung der Metadaten langfristig sicherstellt.



Schematische Darstellung der Funktionsweise der multidimensionalen Anfragebearbeitung. Die einzelnen Suchkriterien können unabhängig voneinander festgelegt werden. Es werden genau die Dokumente angezeigt, die allen Einschränkungen genügen.

Die nächste Internet-Generation

Neben dem Gesichtspunkt der Datensicherheit verfolgt das Digitale Dombauarchiv mit seiner Metadaten-zentrierten Architektur auch das Ziel,



Der Import neuer Dokumente in das Archiv ist durch den Drag&Drop-Mechanismus kinderleicht. Die Metadaten werden automatisch erfasst; das Einfügen mehrerer gleichartiger Dokumente ist mit einem Mausklick möglich.

Prof. Dr. Burkhard Freitag (Jahrgang 1953) ist Forschungsgruppenleiter im Bayerischen Forschungsverbund FORSIP. Er ist Inhaber des Lehrstuhls für Informationsmanagement und Direktor des Instituts für Informationssysteme und Softwaretechnik (IFIS), beide an der Universität Passau. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen Datenbanken, Informationssysteme und Informationsmanagement. Die methodische Grundlage bilden Logiksprachen und Datenmodelle für die konzeptuelle Modellierung und die Wissensrepräsentation. Den technologischen Rahmen bieten Datenbanktechnik, objektorientierte Modellierung und Programmierung, sowie die XML-Technologie.

Dr. Ulrich Zukowski (Jahrgang 1968) ist Geschäftsführer des IFIS und leitet dort die Produktentwicklung in den Bereichen Internet-Informationssysteme, Workflowmanagement und Transaktionssysteme, Medienarchive und eLearning.

Gerhard Bloch (Jahrgang 1975) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am IFIS und beschäftigt sich mit multidimensionalen Archivsystemen, Semantic-Web-Technologien und Internet-Informationssystemen.

an einer visionären Entwicklung teilzunehmen, die unter dem Schlagwort Semantic Web als die nächste Generation des Internet propagiert wird. Die durch das Internet geschaffenen technischen Voraussetzungen ermöglichen einen weltweiten Austausch von Daten. Um jedoch auch das Wissen zu vernetzen, ist es erforderlich, dass der Rechner die ausgetauschten Daten versteht und auf der semantischen Ebene verarbeiten kann. Die Metadatensprache RDF und die darauf aufbauende Ontologiesprache OWL sind die Grundlagen für diese Entwicklung.

Dank seiner modernen technologischen Basis greift das Digitale Dombauarchiv auf die im Zuge des Semantic Web entwickelten Werkzeuge zurück und stellt die gespeicherten Informationen in einer Form bereit, die auch andere Anwendungen verstehen. Auch wenn die Entwicklung des Semantic Web heute noch in den Kinderschuhen steckt und weit davon entfernt ist, alle erhofften Versprechungen einzulösen, so eröffnen einzelne Bausteine bereits jetzt neue Möglichkeiten.

Entwicklungsperspektiven

Das Digitale Dombauarchiv ist eine Archivlösung für gebäudebezogene Dokumente, die in ihrer Art bisher einmalig ist. Die gezielte Zuordnung von Dokumenten zu Gebäudebereichen und die thematischen Suchanfragen eröffnen eine Fülle von möglichen Recherchen, die den Nutzen der Archivdaten enorm aufwerten. Dabei ist die Entwicklung aber noch lange nicht an ihrem Ende angelangt. Die Ausdehnung auf weitere Anwendungsbereiche und Standorte mit maßgeschneiderten Lösungen ist eines der nächsten Ziele, das die Entwickler Dr. Ulrich Zukowski und Dipl.-Inf. Gerhard Bloch unter der wissenschaftlichen Leitung von Prof. Dr. Burkhard Freitag in Angriff nehmen.

BAUWERKE DER ZUKUNFT

Rainer Barthel, Kai-Uwe Bletzinger, Michael Eckl, Martin Faulstich, Detlef Heinz, Florian Jurecka, Ernst Rank, Thomas Schäfer, Peter Schießl, Matthias Schleinkofer, Bettina Schöpe, Ziad Wassouf und Gabriele Weber-Blaschke

Menschen planen, bauen und nutzen seit Jahrtausenden Bauwerke. Dennoch würde wohl niemand auf die Idee kommen, dass es sich bei der Bauwerkserrichtung um eine veraltete Technik handelt. Im Gegenteil: Wir gehen ganz selbstverständlich davon aus, dass bewährte Traditionen über Generationen weiterentwickelt und verbessert wurden. Ergebnis ist nicht nur ein höherer Wohnkomfort, sondern auch ein erheblicher Fortschritt in der Effizienz von Bauwerken, insbesondere in der Nutzungsphase. Man denke nur an die Entwicklung des Heizenergiebedarfes und der zugehörigen Standards beziehungsweise an Regelwerke von der Wärmeschutzverordnung über die Energieeinsparverordnung (EnEV) zum Passivhaus-Standard. Trotzdem: Die Bauwirtschaft muss sich neuen Anforderungen stellen. Bauwerke der Zukunft müssen funktional flexibel sein, Ressourcen schonen, die Umwelt nicht belasten und Baureststoffe vermeiden – eine große Herausforderung für Planung, Bau und Betrieb.

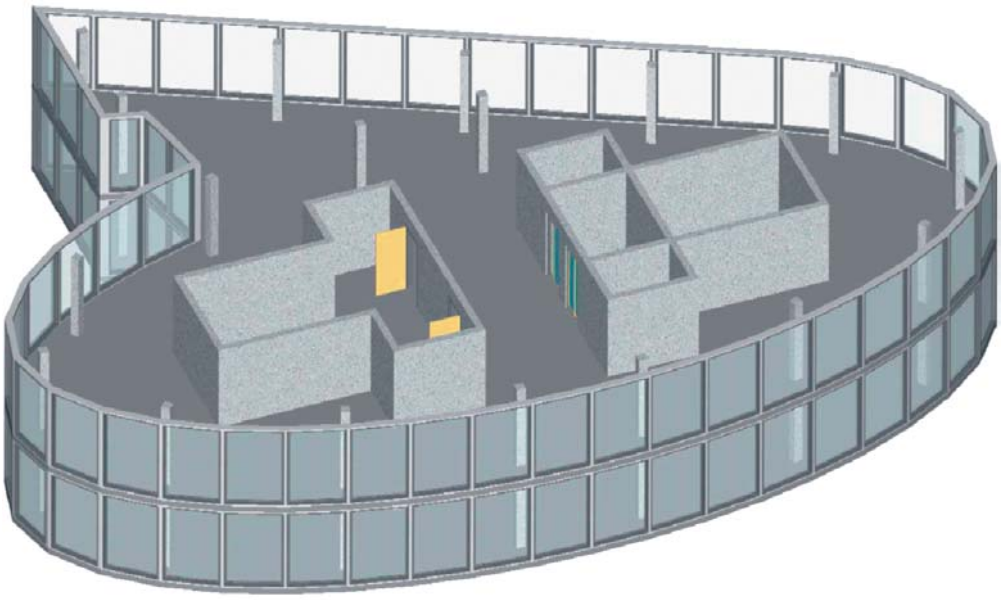
Ein Forschungsverbund aus Lehrstühlen der TU München und der Universität der Bundeswehr sowie das Zentrum Baustoffe und Materialprüfung widmet sich dem Ziel, eine nachhaltige Entwicklung im Bauwesen zu unterstützen. Das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz finanziert diesen Verbund unter dem Titel „Stoffflussmanagement Bauwerke".

Stoffflussmanagement

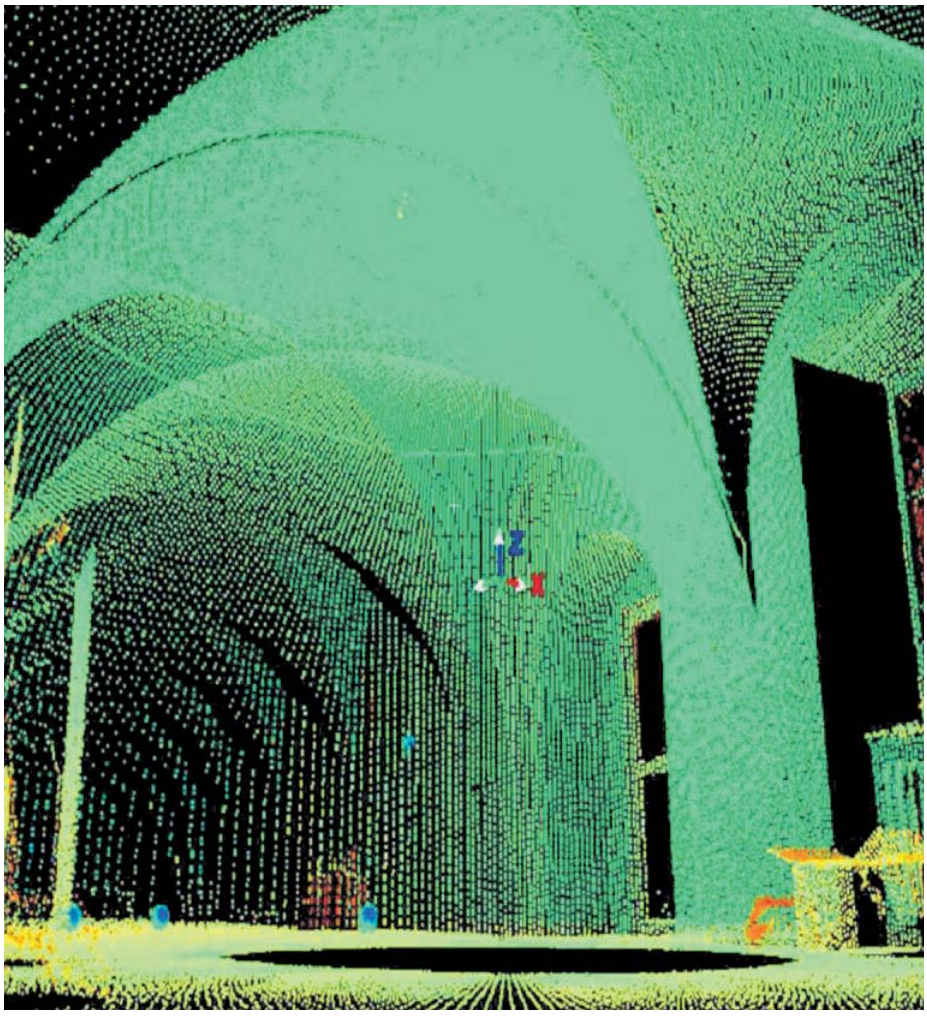
Zentrales Thema ist das Management der Stoffströme. Dies beginnt nicht erst auf der Baustelle, sondern bereits beim Abbau der Rohstoffe. Der überwiegende Teil der Bauwerke und insbesondere der Wohngebäude besteht aus mineralischen Rohstoffen oder aus Baustoffen, die diese enthalten. Die Massenströme, die sich daraus ergeben, sind enorm: Etwa 135 Mio. t Sand, Kies, Lehm, Ton, Beton, Ziegel und andere Baustoffe werden jährlich allein in Bayern abgebaut, hergestellt, transportiert und/oder verbaut. Hinzu kommen weitere Massenströme aus dem Abbruch von Gebäuden, die nur zum Teil wieder einer hochwertigen Verwendung oder Verwertung zugeführt werden.

Nur endlich viele Steine

Dass die Bautätigkeit damit Natur und Umwelt in erheblichem Maße beeinflusst, ergibt sich quasi von selbst, auch wenn beängstigende Schlagzeilen über „Supergifte" hier nicht an erster Stelle stehen. Sand und Steine, die vermeintlich reichlich „in der Gegend herumliegen", sind Rohstoffe mit endlicher zeitlicher Reichweite – und das Ende der Reichweite ist nicht erst in Jahrhunderten, sondern schon in wenigen Jahrzehnten erreicht, wenn nicht neue Konzepte und Wege diese Ressourcen schonen.



Die verschiedenen Bauteile können mit charakteristischen Werten der Materialien belegt werden, um auf Basis des Produktmodells zum Beispiel die Heizwärmeverluste zu berechnen (Ausschnitt aus dem Uniqa-Tower, Wien).
(Bild: Matthias Schleinkofer, Lehrstuhl für Bauinformatik, TUM)



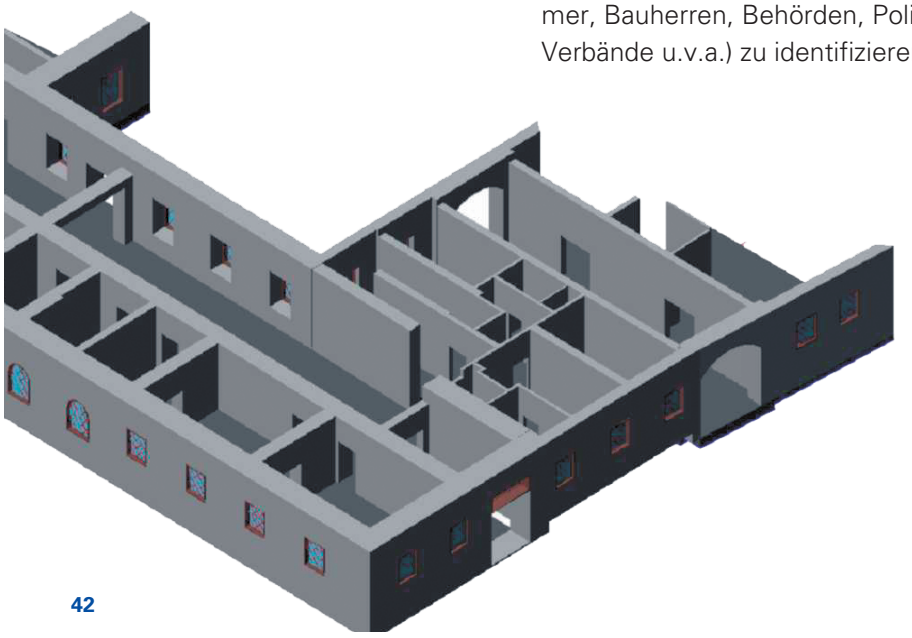
Mit einem 3D-Laserscanner erfasste Punktwolke eines Kellergewölbes. Eine Punktwolke beschreibt räumliche Geometrien mit Millionen einzelner Punktkoordinaten (x, y, z) und beinhaltet somit wichtige Informationen, aus denen sich wiederum CAD-freundliche Objekte ableiten lassen.
(Bild: Thomas Schäfer, Lehrstuhl für Geodäsie, TUM)

Von der Wiege bis zur Bahre

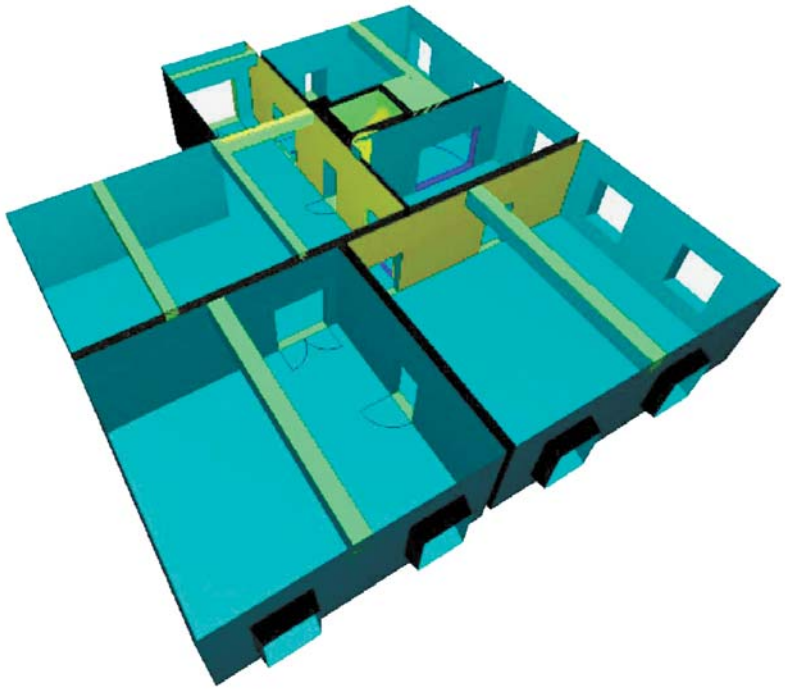
Die klassische Abfallwirtschaft der letzten 30 Jahre hatte primär die Entsorgung im Blick. Sie greift hier zu kurz, weil die Konzentration auf die „Abfallseite" auch bei technisch anspruchvollster Behandlung der Abfälle nicht den Verbrauch an Rohstoffen verringern kann. Deshalb ist die ganzheitliche Betrachtung aller Stoffströme für einen festgelegten Bilanzraum (zum Beispiel Bayern, ein großes Bauvorhaben) notwendig: das Stoffflussmanagement, das den gesamten Lebensweg von der Wiege bis zur Bahre umfasst. Entsprechende Strategien müssen alle relevanten Prozesse und Akteure einbeziehen. Für den Bereich „Bauwerke" bedeutet dies, alle Materialflüsse zu identifizieren und zu quantifizieren: vom Abbau der Rohstoffe über die Herstellung von Baustoffen und die Bauwerkserstellung und gegebenenfalls -sanierung bis zum Abbruch und zur Verwertung oder Beseitigung der Baureststoffe. Dazu gehört auch, die beteiligten Akteure (Baustoffhersteller, Bauunternehmer, Bauherren, Behörden, Politik, Verbände u.v.a.) zu identifizieren, die Rahmenbedingungen detailliert zu beschreiben und die Wechselwirkungen zwischen diesen zu modellieren. Strategien auf der Grundlage wissenschaftlich fundierter Bewertungskonzepte sollen helfen, die gesetzten ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Ziele, das heißt zusammenfassend ein nachhaltiges Management im Bausektor, zu erreichen.

Bauwerk-Recycling

Den mengenmäßig größten Anteil der Materialien im Bauwesen stellen nach wie vor die mineralischen Bau-



2D-Plandaten dienten dazu, den Alten Hof in München als Produktmodell zu modellieren. Dadurch wandelte sich die Geometrie von Strichelementen zu konsistenten Volumenkörpern mit Bauteilinformationen wie Typ (beispielsweise Wand, Decke, Tür) und Material (etwa Mauerwerk).
(Bild: Matthias Schleinkofer, Lehrstuhl für Bauinformatik, TUM)



Dreidimensionales geometrisches Modell des Lorenzistockes im Alten Hof (4. OG).
(Bild: Thomas Schäfer, Lehrstuhl für Geodäsie, TUM)

stoffe. Die Rohstoffe entnehmen die Hersteller unmittelbar der Natur. Andererseits setzen Abriss oder Renovierungsarbeiten große Mengen mineralischer Baustoffe wieder frei, die jedoch oft auf Deponien abgelagert oder minderwertig wieder verwendet werden. Die Wissenschaftler suchen daher nach neuen Wegen, um mineralische Baustoffe umfassend und hochwertig im Stoffkreislauf zu halten, denn geschlossene Materialkreisläufe schonen die natürlichen Ressourcen und verringern die Menge der zu beseitigenden Abfälle drastisch.

Beispiel: Verwertung von Betonbrechsand als Betonzusatzstoff. Etwa 30 % der Betonabbruchmasse fällt beim Recyceln als feinster Betonbrechsand, neben den wieder gewinnbaren groben Gesteinskörnungen an. Geeignete Zerkleinerungs- und Klassierprozesse, die das Zentrum für Baustoffe und Materialprüfung im kleintechnischen Maßstab entwickelt, sollen helfen, Betonbrechsand nicht zu „down-cyclen", sondern ihn als vollwertigen Betonzusatzstoff wieder einsatzfähig zu machen.

Bauen am Computer

Für jede Planung eines Bauwerks ist es unerlässlich, abstrakte Modelle zu entwickeln. Zunehmend verwenden die Planer dabei so genannte Produktmodelle, die es gestatten, eine Vielzahl von Planungsaufgaben in einer ganzheitlichen, modellbasierten Sicht vorzunehmen. Produktmodelle bieten für alle Projektbeteiligten eine gemeinsame, zentrale Planungsbasis für die Gebäudesimulation. In naher Zukunft wird der Planer das Bauwerk in einer virtuellen 3D-Umgebung entwerfen und gemeinsam mit dem Bauherrn begehen und bewerten können.

Die numerische Simulation einer „lebenszyklusorientierten Statik" wird das direkte Bindeglied zwischen den Bereichen „Konstruktion" und „Modell". Im Vordergrund steht hierbei das Tragwerk, denn die Tragstrukturen sollen gegenüber Umnutzungen oder Änderungen in den Anforderungen „tolerant" und flexibel sein. Damit ist die Statikberechnung keine einmalige, sozusagen „statische" Aufgabe mehr, sondern „lebensbegleitend": Sie muss von vorneherein so ausgelegt sein, dass das Bauwerk mit möglichst geringem ökonomischen Aufwand und größtmöglichem ökologischen Nutzen renoviert und neuen Anforderungen angepasst werden kann.

Alles in Einem

„Robust Design" heißt die Methode, die verschiedene Konstruktionsentwürfe oder bestehende Tragwerke hinsichtlich ihrer Flexibilität und Robustheit beurteilt. Bisher sind dazu sehr viele einzelne Berechnungen mit unterschiedlichen Parametern erforderlich. Ziel ist es, Robustheit und Flexibilität von Neu- und Altbauten und damit ihre statische Qualität weniger aufwändig und trotzdem absolut zuverlässig zu berechnen und die Programme in kommerzielle Statiksoftware zu integrieren.

Weitere Softwaremodule simulieren den Ressourcen- und Energiebedarf für die Bauwerke und die notwendige Anlagentechnik. Ein computergestütztes Modell eines Bauwerks einschließlich der technischen Gebäudeausstattung sowie die Simulations-, Analyse- und Bewertungsmethoden gestatten dem Architekten bereits beim ersten Gebäudeentwurf, den Lebenszyklus ganzheitlich zu ana-

Vier Bilder aus dem Dachstuhl Zwingerstock Mitte – Alter Hof. Die Bilder sind entsprechend ihrer Position im Dachstuhl angeordnet.
(Foto: Michael Eckl, Lehrstuhl für Tragwerksplanung, TUM)

lysieren. Er optimiert den Ressourcenverbrauch und berücksichtigt dabei die Wechselwirkung zwischen Gebäudehülle und Anlagentechnik. Mit Hilfe der energetischen und thermischen Gebäudesimulationen sieht er sofort, wenn Sach- oder Ökobilanz nicht ausgewogen sind.

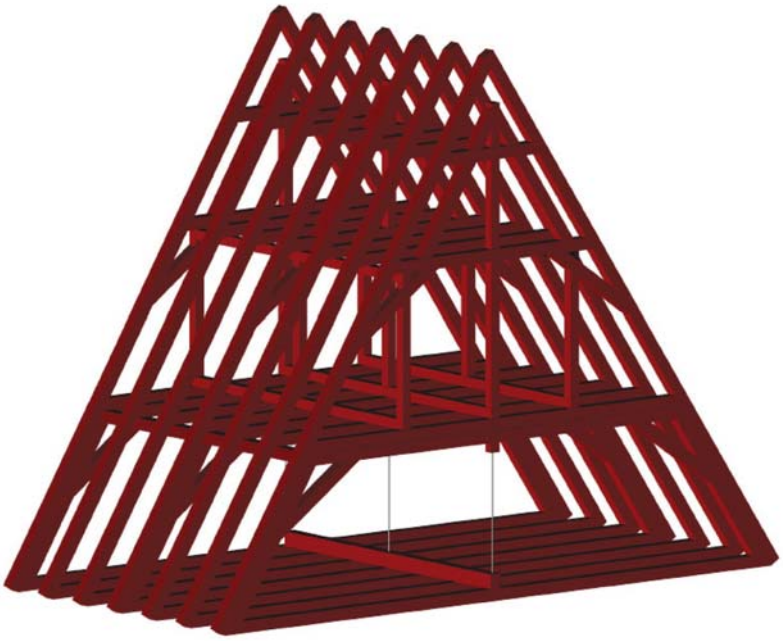
Bauwerksmodelle

Während sich die modellbasierte Planung derzeit bei größeren Neubauten langsam etabliert, ist sie bei Umbaumaßnahmen noch nahezu ohne praktische Bedeutung. Ein wesentlicher Grund dafür ist das Fehlen eines räumlichen Bauwerksmodells, das mit den heute verfügbaren Methoden nur nach einem oftmals äußerst mühsamen Aufmaß von Hand erstellt werden könnte. Mit Laseraufmaßverfahren (Handlasermeter, reflektorlos messender Tachymeter, 3D-Laserscanner) ist es möglich, ein geometrisches Modell des bestehenden Bauwerks zu erzeugen. Der Computer identifiziert die resultierenden Volumenkörper anschließend als Bauteile (Wände, Türen, …) und überführt sie in entsprechende Produktmodell-Objekte als Grundlage für alle weiterführenden Betrachtungen (zum Beispiel für Stoffflussmanagement, Umnutzung und Sanierung).

Sanieren und Modernisieren nach Maß

Für die Sanierung von Bauwerken entwickeln die Wissenschaftler Strategien, die es erlauben, die oben beschriebenen Produktmodelle auch in der Sanierungsplanung einzusetzen. Ziel ist es, das auf der Basis des Laserscannings erstellte „rohe" Objektmodell so mit Informationen anzureichern, dass ein „virtuelles Bauwerk" entsteht, an das alle weiteren Planungsschritte anschließen können.

Das dreidimensionale Laseraufmaß, das alle bestehenden Bauteilverformungen erfasst (verformungsgerechtes Aufmaß), ist die Grundlage für die Bestands- und Schadenserfassung. Vielfältige, über geometrische Daten hinausgehende Informationen wie zum Beispiel zu Detailausbildungen, Schadensbildern und Resttragfähigkeiten werden den Bauteilen zugeordnet. Ein wesentlicher Punkt dabei ist die Beurteilung der Relevanz der vielen Informationen für die Sanierung und die Erfassung der Stoffströme. Aus Kenntnis der alten Konstruktionsweisen und häufig vorkommender Schadensbilder wer-



Das Bild zeigt eine dreidimensionale Nachbildung des Dachtragwerks Zwingerstock Mitte – Alter Hof. Das Computermodell wurde mit Hilfe eines CAD Programms erstellt.
(Bild: Michael Eckl, Lehrstuhl für Tragwerksplanung, TUM)

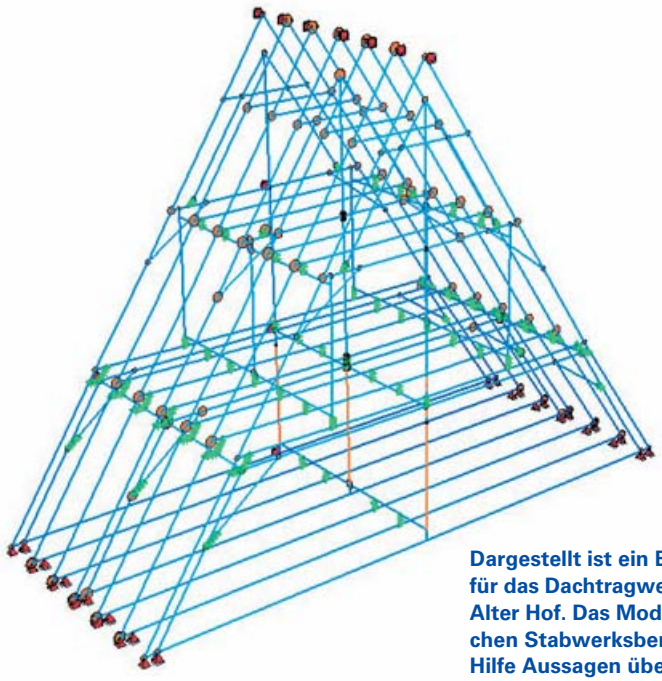
den Anforderungsprofile für den Aufbau eines Produktmodells abgeleitet. Die Verwendung eines Produktmodells als zentraler Informationsträger bietet die Möglichkeit, den Informationsfluss über alle Planungsphasen durchgängig zu gestalten und für alle Planungsbeteiligten transparent zu machen.

Auch thermografisch erhobene Altbaubefunde und wichtige Materialdaten werden computergestützt erfasst, im erweiterten Produktmodell integriert und für die Planung von Sanierungskonzepten verwendet. Die hierfür eingesetzten Methoden stützen sich auf Techniken der digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung. Ökobilanzen des virtuellen Bauwerks können die Forscher mit Hilfe eines ebenfalls an der TU München entwickelten Softwaretools zur internetbasierten Simulation des Ressourcenbedarfs von Bauwerken erstellen.

So bietet das Produktmodell auch bei der Beurteilung, Sanierung und Modernisierung die Basis, Material- und Baustoffströme zu bilanzieren. Mit Hilfe des „virtuellen Bauwerkmodells" lassen sich erforderliche Sanierungsmaßnahmen und nötige Eingriffe ganzheitlicher planen als bisher. Der Ressourcenbedarf kann ermittelt, gesteuert und damit auch verringert und im Sinne des Stoffflussmanagements positiv beeinflusst werden.

Das Haus bleibt das Zuhause

Die beschriebenen Ansätze tragen dazu bei, dass die jahrtausendealte Technik „Hausbau" ständig verbessert wird und weiterhin modern bleibt – im Dienst von Mensch und Umwelt. Wissenschaft und Technik helfen die Umwelt zu schonen und Kosten zu senken, während gleichzeitig die Qualität von Gebäuden weiter steigt und sich an die verschiedensten Arten der Nutzung anpasst. Der Bausektor ist enorm dynamisch und wird sich den großen Veränderungen der Zukunft anpassen. Eines aber wird so bleiben, wie es war: Häuser werden komfortable Wohnungen für Menschen sein, eben ihr Zuhause.



Dargestellt ist ein Berechnungsmodell für das Dachtragwerk Zwingerstock Mitte – Alter Hof. Das Modell zeigt eine räumlichen Stabwerksberechnung, mit deren Hilfe Aussagen über das Tragverhalten/ Tragvermögen der Dachkonstruktion erstellt werden sollen.
(Bild: Michael Eckl, Lehrstuhl für Tragwerksplanung, TUM)

Forschungskonsortium:
TU München:
Lehrstuhl für Tragwerksplanung
Lehrstuhl für Bauinformatik
Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung
Lehrstuhl für Statik
Lehrstuhl für Technologie Biogener Rohstoffe
Lehrstuhl für Produktentwicklung
Lehrstuhl für Stahlbau
Lehrstuhl für Geodäsie
Fachgebiet Leichtmetallbau und Ermüdung
Fachgebiet Gesteinshüttenkunde
Zentrum Baustoffe und Materialprüfung
Universität der Bundeswehr München:
Institut für Mathematik und Bauinformatik

Wir danken dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz für die großzügige Finanzierung dieses Forschungsverbundes und dem Bayerischen Landesamt für Umweltschutz für die fachliche Begleitung.

Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel (geb. 1955) leitet den Lehrstuhl für Tragwerksplanung an der TU München und forscht unter anderem auf dem Gebiet der Instandsetzung historischer Bauwerke.

Dipl.-Ing. Michael Eckl (geb. 1974) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Tragwerksplanung.

Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Bletzinger (geb. 1958) ist Ordinarius für Statik an der TU München. Sein Forschungsgebiet umfasst Strukturoptimierung, Finite-Elemente-Technologie sowie den gesamten Bereich des Computational Mechanics.

Dipl.-Ing. Florian Jurecka (geb. 1975) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Statik an der TU München. Er bearbeitet das Projekt „Numerische Methoden für eine lebenszyklusorientierte Statik".

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

Dr. rer. silv. Gabriele Weber-Blaschke (geb. 1966) leitet die Abteilung Stoffstrommanagement am Lehrstuhl für Technologie Biogener Rohstoffe und forscht auf den Gebieten Stoffstromanalyse, Bewertungskonzepte und Umwelt- und Nachhaltigkeitsindikatoren.

Dipl.-Ing. Bettina Schöpe (geb. 1970) ist dort wissenschaftliche Mitarbeiterin und bearbeitet das Projekt „Analyse, Bewertung und Management von Roh- und Baustoffströmen in Bayern".

Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz (geb. 1956) leitet das Fachgebiet Gesteinshüttenkunde des Institutes für Baustoffe und Konstruktion der TU München und forscht auf den Gebieten Zementchemie, Dauerhaftigkeit von Beton, Verwendung von sekundären Rohstoffen und nachhaltiger Produktion und Aufbereitung von Baustoffen.

Prof. Dr. rer. nat. Ernst Rank (geb. 1954) ist 1. Vizepräsident der TU München und leitet den Lehrstuhl für Bauinformatik. Sein Forschungsgebiet umfasst die Produktmodell basierte Planung, die Finite-Elemente-Technologie, sowie die Fluid-Struktur-Interaktion.

Dipl.-Ing. Ziad Wassouf MSc (geb. 1975) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Bauinformatik und bearbeitet das Projekt „Simulation des Ressourcenbedarfs von Bauwerken – Integration eines Produktmodells der technischen Gebäudeausstattung". Leiter dieses Projektes und der Abteilung 'CAD & Produktmodelle' ist Dr.-Ing. Frank Neuberg.

Dipl.-Ing. Matthias Schleinkofer (geb. 1970), ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Bauinformatik.

Dipl.-Ing. Thomas Schäfer (geb. 1976), wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Geodäsie, bearbeitet gemeinsam mit M. Schleinkofer das Projekt „Vom Laseraufmaß zum Stoffflussmanagement für Altbauten".

Prof. Dr.-Ing. Peter Schießl (geb. 1943) hat den Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung der TU München inne und ist Leiter des Lenkungsausschusses für das BayFORREST-Verbundprojekt „Stoffflussmanagement Bauwerke". Er forscht auf den Gebieten Recycling und Umweltverträglichkeit von Baustoffen, Dauerhaftigkeit von Betonkonstruktionen, Rissbreitenbeschränkung in Stahl- und Spannbetonbau sowie Betontechnologie und Straßenbeton.

MIT ULTRAHOCHDRUCK FÜR DAS LEBEN

Roland Meyer-Pittroff und Gerrit Blümelhuber

Für gewöhnliche Menschen gehört das alte verrostete Fahrrad auf den Schrottplatz, Künstler bauen daraus Skulpturen und verkaufen sie für viel Geld. In die Wissenschaft übertragen bedeutet diese Kreativität: Verfahren, die in einer wissenschaftlichen Disziplin bereits seit Jahren Stand der Technik sind, auch in andere Anwendungen jenseits des eigenen Fachgebietes zu übertragen.

Beispiel: François Quesnay, der Leibarzt von Marquise de Pompadour und Louis XV, übertrug das Prinzip des Blutkreislaufs auf den Kreislauf des Geldes. So entstand bereits 1759 das „Tableau économique" als erstes makroökonomisches Modell eines allseitig verflochtenen Wirtschaftskreislaufes, der stetig zirkuliert.

Ein Beispiel aus der Gegenwart ist die Anwendung von Ultrahochdruck:

AIDS-Waise in Namibia – Therapien auf der Basis der Ultrahochdrucktechnologie sind ein hoffnungsvoller Ansatz im Kampf gegen die Immunschwächekrankheit. Foto: Caro /Trappe

Die Kunststoffherstellung und Fertigungstechnik nutzen zur Verformung schon seit Jahrzehnten Drücke über 1000 bar. Die Auswirkungen von Ultrahochdruck auf biologische Systeme dagegen haben bisher nur wenige Wissenschaftler untersucht, und im medizinischen Bereich sucht man eine Anwendung vergeblich. Zugegeben: Einen Menschen oder auch nur einen Teil von ihm unter physischen Druck zu setzen, erinnert mehr an eine mittelalterliche Foltermethode denn an Hightech und Wissenschaftssynergie. Deshalb fangen wir „klein" an.

Ultrahochdruck

Was ist Ultrahochdruck? 1 bar entspricht dem Druck, den eine senkrechte Wassersäule von 10 m Höhe an ihrem unteren Ende ausübt. Dementsprechend ist für einen Druck von 1000 bar eine Wassersäule von 10 000 m notwendig. Auf unserer Erde finden sich solche Wassertiefen lediglich im Marianen-Graben im nördlichen Pazifik.

Ultrahochdruck beginnt erst bei 1000 bar. Drücke von mehreren Tausend bar sind technisch ohne größere Schwierigkeiten möglich: In den Geowissenschaften erzeugen Wissenschaftler im Labor bereits Drücke bis zu 400 000 bar. Die Medizin konzentriert sich auf den Druckbereich zwischen 1000 und 10 000 bar.

Die Wirkungen von Ultrahochdruck auf biologische Stoffe sind vielfältig: Zum Beispiel sinkt die Gefriertemperatur von Wasser unter Druckeinfluss. Im Allgemeinen gelten Flüssigkeiten als inkompressibel, was bedeutet, dass sie unter Druckeinfluss anders als Gase ihr Volumen kaum verringern. Nicht so bei Ultrahochdruck: Bei einem Druck von 6000 bar nimmt Wasser nur noch 85 % seines ursprünglichen Volumens ein. Damit erklären sich auch die Effekte des Ultrahochdrucks auf biolo-

Mit Ultrahochdruck für das Leben

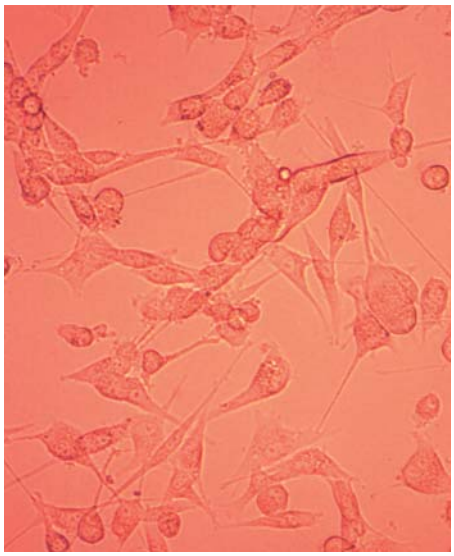
Laborhochdruckanlage zur Erzeugung von Drücken bis 6 000 bar.

gische Systeme. Beispielsweise komprimiert Ultrahochdruck Proteine so stark, dass sie ihre Struktur verändern, was auch nicht in jedem Falle wieder rückgängig zu machen ist. Bei Enzymen, also bioaktiven Proteinen, führt die Strukturänderung zum Verlust ihrer Spezifität und ihrer Funktion; sie werden inaktiv. Ersetzt man beispielsweise die Lufthöhle in einem Ei durch Wasser und behandelt das Ei anschließend mit 6 000 bar, passiert von außen betrachtet nichts: Die Eierschale ist unversehrt, da der Druck von allen Seiten gleichmäßig angegriffen hat. Doch der Schein trügt: Das Innere des Eis ist fest, als wäre es gekocht worden, weil die Proteine vollständig denaturiert wurden.

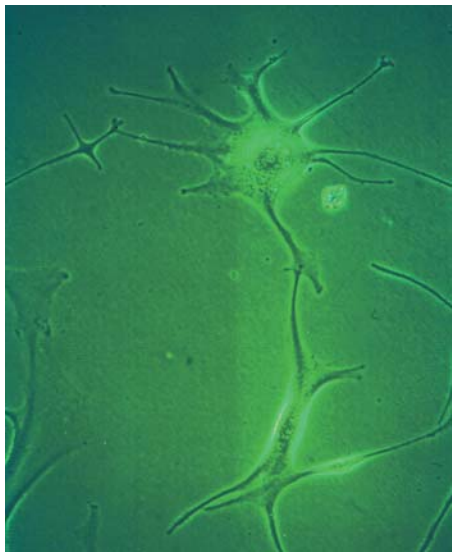
Zellen, Bakterien und Viren

Zellen, Bakterien oder Viren bestehen zum großen Teil aus Proteinen und zeigen deshalb die gleichen Effekte. Proteine und Enzyme braucht jedes Lebewesen, ja sogar jede einzelne Zelle, entweder um einen eigenen Stoffwechsel zu betreiben oder sich mit Hilfe des Enzyms in den Stoffwechsel eines Wirtes einzuklinken. Inaktive („impotente“) Enzyme führen nicht sofort, aber unweigerlich zum Tod. Ultrahochdruck wirkt sehr selektiv auf einzelne, höhermolekulare Substanzen wie die Enzyme und lässt kleinere Moleküle und Strukturen nahezu unverändert, wie das Experiment mit dem Ei zeigt. Ähnliches gilt auch für Viren und Bakterien: Unter Ultrahochdruck sterben Bakterien und Viren, weil sich die Proteine und Enzyme in ihrem Inneren verändern, aber ihre äußere Hülle, die Form, bleibt erhalten. Äußerlich ist der tote Erreger von dem lebenden kaum zu unterscheiden. Genau darin liegt die große Chance für die Medizin: Hochdruckbehandelte Erreger aller Art sind eine hervorragende Grundlage für die Entwicklung von Impfstoffen.

Beispiel HIV: Für die HIV-Infektion hauptsächlich verantwortlich ist die so genannte reverse Transkriptase des Virus. Die genetische Information liegt im Virus als RNA (Ribonukleinsäure) vor, die Wirtszellen speichern ihre genetische Information aber in der DNA (Desoxyribonukleinsäure). Damit sich das Virus in der Wirtszelle vermehren kann, muss also die RNA in die DNA „umgeschrieben“ werden. Das ist die Aufgabe der reversen Transkriptase. Eine Ultrahochdruckbehandlung mit 4 000 bar über drei Stunden hinweg inaktiviert die reverse Transkriptase völlig, belässt aber die Virushülle unverändert. Die HI-Viren können danach immer noch an die Wirtszelle andocken, aber nicht mehr ihren genetischen Code an sie weitergeben. Ihre Infektiösität haben die HI-Viren



Humane, adhärente Zelle. (Quelle: E. Meyer)



Dieselbe Zelle, HIV-befallen, 3 Tage nach der Infektion. (Quelle: E. Meyer)

also verloren. Durch die unbeschädigte Hülle, genauer gesagt durch ein erhaltenes Glycoprotein der Hülle, können sie aber eine effektive Immunantwort des Patienten stimulieren. Das mit Hochdruck behandelte Virus ist damit eine ideale Grundlage für einen Impfstoff gegen AIDS.

Fünf Rhesusaffen erhielten über einen Zeitraum von 22 Wochen eine Impfung mit dem Hochdruck behandelten, inaktivierten Virus in seiner intakten Hülle. Danach wurden sie mit dem lebenden HI-Virus infiziert und zeigten keinerlei Krankheitssymptome! Fünf nicht geimpfte Affen einer Kontrollgruppe erkrankten alle.

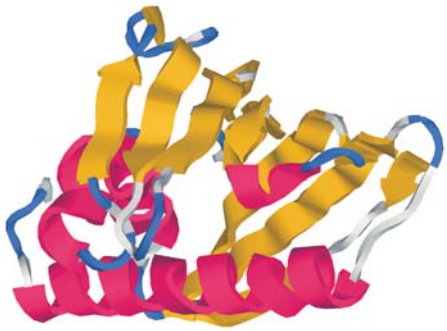
Das gleiche Prinzip soll auch für die Herstellung von Impfstoffen gegen Tumore genutzt werden. Hierbei sollen dem Patienten Tumorzellen entnommen und nach einer Ultrahochdruckbehandlung wieder injiziert werden. Ziel ist es, durch die Ultrahochdruckbehandlung die Tumorzellen abzutöten ohne ihre Oberfläche zu stark zu schädigen, so dass sie vom Immunsystem des Patienten erkannt und bekämpft werden können.

Invasive Tumorbehandlung

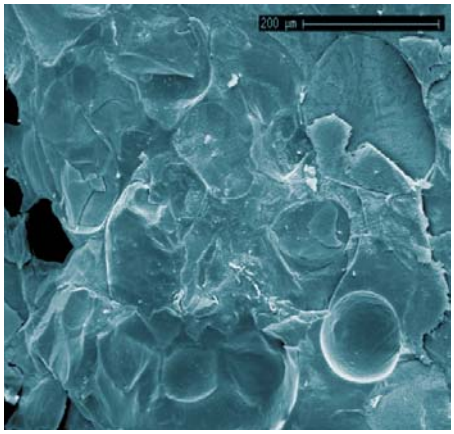
Andere Kandidaten für die Hochdruckbehandlung sind Knochentumore. Ultrahochdruck tötet sowohl gesunde wie Tumorzellen des befallenen Knochenstücks, schwächt aber nicht signifikant die Festigkeit der mineralischen Knochenstruktur. Bei einer anschließenden Re-Implantation könnte der Organismus das behandelte Knochenstück als leere Leitschiene verwenden und neue, gesunde Knochenzellen darauf ansiedeln. Ein ähnliches Vorgehen ist auch bei hartnäckigen Knocheninfektionen möglich, wie sie nach schweren Traumata häufig vorkommen.

Allergien

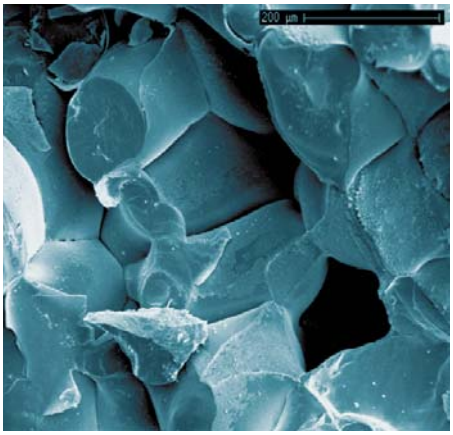
Auch die Allergieforschung nutzt die Eigenschaft des Ultrahochdrucks, Proteine in ihrer Struktur zu verändern. Beispielsweise schädigt sie das Hauptallergen des Apfels, ein Protein mit dem Namen Mal d1 soweit in seiner Struktur, dass ein Allergiker nicht mehr allergisch auf Ultrahochdruck behandelten Apfel reagiert. Das Immunsystem erkennt das Allergen nicht mehr als solches, da die ursprüngliche Struktur durch die Hochdruckbehandlung verändert wurde.



Errechnetes Modell des Apfel-Hauptallergens Mal d1. (Quelle: M. Scheibenzuber)



Pricktest mit einem bei 6000 bar behandelten Apfel. (Quelle: M. Scheibenzuber)



Pricktest mit einem unbehandelten Apfel. (Quelle: M. Scheibenzuber)

Mit Ultrahochdruck für das Leben

Prof. Dr.-Ing. Roland Meyer-Pittroff (Jahrgang 1942) hat an der TH München Maschinenbau studiert. Nach erfolgreicher und leitender Industrietätigkeit im Kraftwerksbau wurde er 1984 auf den Lehrstuhl für Energie- und Umwelttechnik der Lebensmittelindustrie der TU München in Freising-Weihenstephan berufen. Er ist Mitglied in zwei Forschungsverbünden: BayFORREST und ForTePro.

Dr.-Ing. Gerrit Blümelhuber (geb. 1969) studierte Brauwesen und Getränketechnologie in Weihenstephan und ist ein enger Mitarbeiter von Prof. Meyer-Pittroff. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Immobilisierungsverfahren und Ultrahochdruckanwendungen in der Medizintechnik. Er ist Forschungsgruppenleiter im Forschungsverbund ForTePro.

Sterilisation empfindlicher Produkte

Natürlich kann Ultrahochdruck auch ganz profan sterilisieren, was sich vor allem in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie für empfindliche Produkte anbietet. Aufgrund der bereits genannten Veränderung von Enzymen sterben auch Mikroorganismen ab, die für den Verderb von Lebensmitteln verantwortlich sind. Inzwischen hat sich bereits eine bayerische Firma darauf spezialisiert, empfindliche pharmazeutische Produkte, die kein anderes Verfahren sterilisieren kann, mittels Ultrahochdruck keimfrei zu machen. Mit Antibiotika beschichtete Implantate müssen zum Beispiel vor der Operation steril sein, aber die übliche Hitzesterilisation würde das Antibiotikum so schädigen, dass es seine Wirkung verlieren würde.

Was bringt die Zukunft?

Durch seine Fähigkeit, Proteine in ihrer Struktur zu verändern, kann Ultrahochdruck als wirkungsvolles Instrument bei der Aufklärung von Proteinstrukturen dienen. Möglich ist eines Tages sogar die gezielte Umfaltung von Proteinen durch Ultrahochdruck. Dadurch wird die Wirkungsweise von biologisch aktiven Proteinen, den Enzymen, verändert. Eine Vielzahl neuer, wirkungsvoller Medikamente würde daraus resultieren.

Ein weiteres denkbares Einsatzgebiet des Ultrahochdrucks in der Medizin beruht auf der Tatsache, dass Wasser bei einem Druck von 1000 bar erst bei einer Temperatur von - 10 °C gefriert. Würden beispielsweise Transplantate auf ihrem Transport in Druckbehältern bei 1000 bar gelagert, so könnten sie bis unter 0 °C gekühlt werden, ohne dass sich dabei die sonst üblichen Eiskristalle bilden, die zu einer Zerstörung des Transplantats führen. Die Folge einer solchen Vorgehensweise wäre, dass die Transplantate länger gelagert werden könnten als dies heute der Fall ist.

Die genannten Beispiele für die Anwendung des Ultrahochdrucks sind exemplarisch und geben nur eine grobe Momentaufnahme des enormen Potenzials wieder. Viele weitere Anwendungen sind in der Zukunft möglich, wenn der Ultrahochdruck als zusätzlicher wirkungsvoller Einflussparameter auf lebende Materie verstanden wird, zusätzlich zu den bisher genutzten Parametern wie chemische Einflüsse, Temperatur und ionisierende Strahlung.

VON KLON-KÜHEN UND FLUORESZENZ-FERKELN

Biotechniken in der Tierzucht

Eckhard Wolf, Regina Klose
und Alexander Pfeifer

Seit Beginn der Tierzuchtgeschichte vor mehr als 10 000 Jahren versucht der Mensch, Tiere an unterschiedliche Nutzungszwecke anzupassen. Dabei hat er durch systematische Leistungsprüfungen und mit quantitativ genetischen Verfahren in den letzten 70 Jahren bei der Milch- und Fleischproduktion eine enorme Leistungssteigerung erzielt. Heute ist die Verbesserung von Tiergesundheit und Produktqualität ein zentrales Ziel der Tierzucht.
Darüber hinaus sind Nutztiere außerordentlich interessante Modelle für die biomedizinische Forschung.

Nach der strukturellen Entschlüsselung der Genome des Menschen und wichtiger Modellorganismen wie der Maus ist es nur noch eine Frage von kurzer Zeit, bis auch die Genomsequenzen von Rind, Schwein und anderen Haustierarten vorliegen. Aus genetischer Sicht sind die Nutztiere dem Menschen ähnlicher als die Maus. Viele anatomische und funktionelle Parameter von Nutztieren stimmen mit denen des Menschen überein und deshalb stellen verschiedene Nutztierspezies, vor allem das Schwein, wichtige Modelltiere für die biomedizinische Forschung dar. Zwei neue Methoden zur genetischen Modifikation von Nutztieren stehen jetzt zur Verfügung: die Kerntransfer-Klonierung, ein Klonverfahren, bei dem der Kern einer Eizelle durch einen genetisch veränderten anderen ersetzt wird, sowie der Gentransfer mit lentiviralen Vektoren, das sind Genfähren aus der Familie der Lentiviren, die ein fremdes Gen in das Erbgut des Wirtes einschleusen.

Transgener Rinderklon, der einen bispezifischen Antikörper zur Tumortherapie exprimiert. (Quelle: Grosse-Hovest et al., PNAS, 2004)

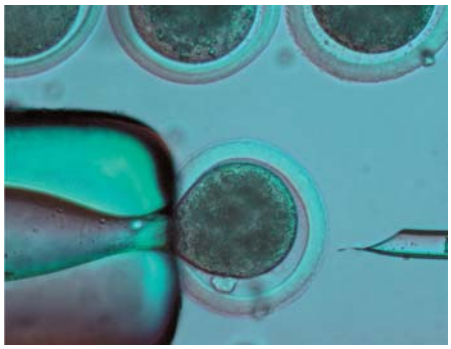
Klonen für die Grundlagenforschung und Biotechnologie

Der somatische Kerntransfer – Klonen nach der „Dolly-Methode" – hat für die Grundlagenforschung in den Bereichen Reprogrammierung und Epigenetik große Bedeutung erlangt. Klonen funktionierte ursprünglich nur mit totipotenten Zellen, das bedeutet, dass sich aus einer Zelle ein ganzer Organismus entwickeln kann. Während die Zellen von frühen Embryonen bis etwa zum Achtzellstadium „von Natur aus" totipotent sind, verlieren die Zellen diese Eigenschaft bei der Differenzierung. Trotzdem enthalten auch spezialisierte Zellen grundsätzlich die gesamte Erbinformation, auch wenn nur ein Teil davon für ihre Aufgaben benötigt wird. Bei der Reprogrammierung wird das Genaktivitätsmuster einer bereits spezialisierten Zelle, zum Beispiel einer Bindegewebszelle, so verändert, dass Totipotenz entsteht. Die DNA-Sequenz der Kernspenderzelle ist jedoch vor und nach der Reprogrammierung identisch. Die Änderung des Funktionszustandes vermitteln übergeordnete Mechanismen über die Chromatinstruktur. Chromatin (griech. chroma – Farbe) ist ein Komplex aus DNA und Proteinen. Das Erbgut liegt im Zellkern nicht als nackter DNA-Faden vor, sondern ist durch Interaktion mit Proteinen sehr komplex organisiert. In der ersten Organisationsstufe ist die DNA um so genannte Histonproteine gewunden, ähnlich wie ein Faden, der um Zwirnspulen gewickelt ist. Die Intensität der Wechselwirkung zwischen

DNA-Faden und Histonproteinen bestimmt, ob das Erbgut abgelesen werden kann oder nicht. Der Prozess ist sehr fein durch chemische Modifikationen der DNA und der Histonproteine sowie durch die Bindung weiterer Proteine reguliert. Diese Mechanismen werden unter dem Begriff „epigenetische Genregulation" zusammengefasst, eines der interessantesten und zukunftsträchtigsten Forschungsgebiete in der Biologie. Das Klonen liefert ideale Modelle für das Studium dieser Prozesse.

Darüber hinaus setzen Wissenschaftler das Klonen auch ein, um Nutztiere für biotechnische Anwendungen genetisch zu verändern. Bei der klassischen Methode des Gentransfers, der DNA-Mikroinjektion, überträgt man mit einer dünnen Glasnadel die genetische Information in die Vorkerne von befruchteten Eizellen (Zygoten). Nur ein kleiner Teil der Zygoten baut die übertragene DNA stabil im Erbgut ein. Es ist nicht möglich, den Integrationsort und die Zahl der eingebauten DNA-Kopien vorherzubestimmen. Dadurch ist dieses Verfahren mit vielen Unsicherheiten behaftet.

Durch einen Gentransfer in kultivierte Zellen statt direkt in Embryonen können diese Unsicherheiten umgangen werden. Das Verfahren erlaubt erstens, diejenigen Zellen in der Zellkultur zu selektieren, die ein Genkonstrukt an der gewünschten Stelle eingebaut haben, und zweitens auch noch zu prüfen, ob es funktioniert, bevor die Zellen für die Kerntransfer-Klonierung verwendet



Kerntransfer beim Rind.

werden. Exakt definierte Eingriffe im Genom, beispielsweise die gezielte Inaktivierung oder andere Modifikationen eines bestimmten Gens, sind dann möglich. Für ein derartiges Gene Targeting, das eines der wichtigsten Instrumente in der Mausgenetik darstellt, gibt es auch bei Nutztieren eine Reihe von interessanten Anwendungen.

Welche Aufgabe hat das natürliche Prionprotein?

In der BSE-Forschung ist eine sehr interessante Frage, ob das zelluläre Prionprotein – wie bei der Maus bereits vor mehr als 10 Jahren nachgewiesen – auch beim Rind entscheidend für die Entstehung von Prionerkrankungen ist. Mit Hilfe von Mäusestämmen, die kein zelluläres Prionprotein haben, konnte das Labor von Charles Weismann 1993 zeigen, dass die Tiere selbst dann nicht erkranken, wenn man ihnen Prionen direkt in das Gehirn injiziert. Bei diesen Mäusen war das Gen, das die Prionproteinproduktion veranlasst, gezielt inaktiviert worden; eine Technik, die bis vor kurzem nur bei Mäusen möglich war. Die Kombination von Kerntransfer-Klonierung und einer gezielten genetischen Modifikation von kultivierten Zellen erlaubt solche Untersuchungen jetzt auch an Nutztieren.

Um zu klären, ob das natürlich vorkommende Prionprotein beim Rind für die BSE-Erkrankung notwendig ist, wird in Bindegewebszellen die für das Prionprotein kodierende Gensequenz entnommen und gleichzeitig gegen ein Markergen ausgetauscht (homologe Rekombination). Anschließend werden aus den Zellen, die das Markergen tragen, über den Kerntransfer Nachkommen erstellt. Dabei geht man in zwei Schritten vor, wobei die beiden Kopien des Prionproteingens nacheinander inaktiviert werden.

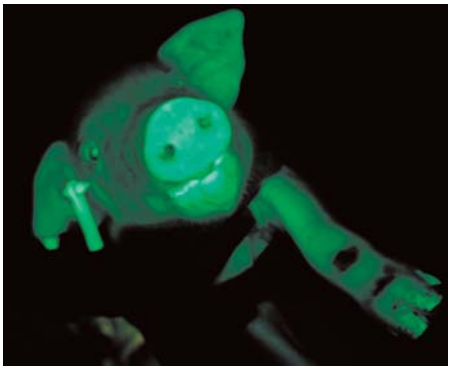
Rinder, denen das Prionprotein fehlt, können zum einen klären, welche biologische Bedeutung dieses Protein beim Rind hat. Die Maus zeigte nach einem Ausfall dieses Gens nur geringfügige Veränderungen, wobei allerdings artspezifische Unterschiede in der Bedeutung dieses Proteins nicht ausgeschlossen sind. Zum anderen müssen Infektionsversuche zeigen, ob beim Rind – analog zur Maus – das zelluläre Prionprotein ebenfalls essentiell für die Entstehung von BSE ist. Sollte sich das bewahrheiten, wären Prionprotein-defiziente Rinder vor allem für die Produktion von pharmazeutisch wirksamen Proteinen interessant, da Produkte von Rindern, die sicher nicht mit BSE infiziert werden können, als sicherer eingestuft und damit die Zulassungsverfahren vereinfacht würden. Transgene Rinder

kommen zum Beispiel für die Produktion von humanem Serumalbumin sowie von humanisierten polyklonalen oder rekombinanten Antikörpern in Frage. Die Agrobiogen GmbH, Hilgertshausen, züchtet beispielsweise transgene Klonrinder, die einen bispezifischen Antikörper für die Tumortherapie produzieren.

Schweine als Organspender für den Menschen

Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet für gezielten Gentransfer mittels Klonierung ist die genetische Modifikation von Nutztieren für die Xenotransplantation von Organen und Geweben in menschliche Patienten. Aufgrund der Größe und Funktion seiner Organe kommt hierfür vor allem das Schwein in Betracht. Allerdings handelt es sich beim Schwein in Bezug auf den Menschen um eine so genannte dyskordante Konstellation: Eine Gewebetransplantation vom Schwein auf Primaten führt zu einer massiven Abstoßungsreaktion. Diese auch als hyperakute Abstoßung bezeichnete Reaktion kommt vor allem dadurch zustande, dass die Oberflächen von Schweinezellen bestimmte Zuckermoleküle (Epitope) tragen, gegen die sich im Serum von Menschen Antikörper befinden. Die Bindung dieser Antikörper an die Zuckerepitope der Schweinezellen aktiviert ein Abwehrsystem (Komplement), das das körperfremde Gewebe in kurzer Zeit zerstört.

Eine Strategie, um diese Reaktion zu unterbinden, ist die Entfernung der störenden Zuckerreste von den Schweinezellen. Dies geschieht durch Inaktivierung des Enzyms α1,3-Galaktosyltransferase (αGT), welches die Zuckermoleküle an die Oberfläche von Schweinezellen anheftet. Dazu wird das für das αGT-Enzym kodierende Gen durch homologe Rekombination in kultivierten Schweinezellen deletiert. Anschließend werden aus den so modifizierten Zellen über den Kerntransfer αGT-defiziente Schweine erzeugt. Solche Tiere existieren mittlerweile in verschiedenen Arbeitsgruppen und erste Transplantationsexperimente auf Primaten zeigten, dass dadurch tatsächlich die hyperakute Abstoßungsreaktion ausbleibt. Das umgeht jedoch nur die erste Hürde in einer komplexen Abstoßungskaskade. Weitere genetische Modifikationen sind nötig, um z.B. die Blutgerinnung im transplantierten Organ zu verhindern und den Angriff von Immunzellen zu vermindern. Letztlich ist eine geeignete Kombination von verschiedenen transgenen Strategien die Methode der Wahl zur Erzeugung von optimierten Schweineorganen für die Xenotransplantation.



Grünfluoreszierendes Ferkel aus lentiviralem Gentransfer. (Quelle: Hofmann et al., EMBO Reports, 2003)

Die Tests für die Auswirkungen der genetischen Modifikationen können nur sehr eingeschränkt in vitro durchgeführt werden. Daher sind neue effiziente Verfahren für die Erzeugung multitransgener Schweine erforderlich.

Effizienter Gentransfer mit lentiviralen Vektoren

Untersuchungen in Nagermodellen zeigten, dass mit lentiviralen Vektoren ein effizienter Gentransfer in frühe Embryonalstadien erreicht werden kann. Lentiviren gehören zur Familie der Retroviridae, haben aber gegenüber den klassischen Oncoretroviren entscheidende Vorteile für biotechnische Anwendungen. Lentiviren können eine intakte Kernmembran passieren und daher auch Zellen außerhalb der Zellteilung infizieren. Die übertragene und in das Genom der Wirtszelle eingebaute genetische Information bleibt aktiv und wird nicht – wie das bei klassischen Retroviren der Fall ist – durch epigenetische Mechanismen inaktiviert.

Um das Potenzial von lentiviralen Vektoren für den Gentransfer bei Nutztieren zu testen wurde ein Modellvektor verwendet, der das grünfluoreszierende Protein (GFP) als Reportergen trägt. Entsprechende lentivirale Vektoren wurden befruchteten Schweineeizellen injiziert und diese anschließend Empfängertieren eingepflanzt. Die Mutterschweine warfen in insgesamt 6 Würfen 32 (70%) transgene Ferkel, von denen 30 (95%) im UV-Licht grün fluoreszierten. Das neue Gentransferverfahren ist damit mehr als eine Größen-

Prof. Dr. Eckhard Wolf (Jahrgang 1963) ist seit 1995 Inhaber des Lehrstuhls für Molekulare Tierzucht und Biotechnologie an der Tierärztlichen Fakultät und am Genzentrum der Ludwig-Maximilians-Universität München. Er ist Mitglied von FORPRION.

Dr. Regina Klose (Jahrgang 1967) ist als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Molekulare Tierzucht und Biotechnologie tätig und arbeitet an der genetischen Modifikation von Nutztieren.

Prof. Dr. Alexander Pfeifer (Jahrgang 1965) ist seit 2002 Professor für Molekulare Pharmakologie am Department Pharmazie, Zentrum für Pharmaforschung der Ludwig-Maximilians-Universität München und ist Spezialist für lentiviralen Gentransfer.

Anmerkung:
Die erwähnten Projekte werden u.a. von der Deutschen Forschungsgemeinschaft, dem Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie von der Bayerischen Forschungsstiftung gefördert.

ordnung effizienter als die klassische DNA-Mikroinjektionstechnik. Diese Technologie dient nun dazu, multitransgene Schweine zu erzeugen. Sie kombiniert effizient und kostengünstig verschiedene Strategien zur Vermeidung der Transplantatabstoßung. Darüber hinaus sind lentivirale Vektoren ein wichtiges Werkzeug für die funktionale Genomforschung in Nutztieren. Mit Hilfe lentiviraler Vektoren kann die genetische Information für kleine RNA-Sequenzen (siRNAs) übertragen werden, die verhindern, dass ein bestimmtes Wirts-Protein gebildet wird: Das Zielgen wird „ausgeschaltet" (Knock down). Die behandelten Tiere zeigen biologische Eigenarten, die Rückschlüsse auf die Aufgaben des gehemmten Gens zulassen. Dieser Ansatz erlaubt auch, die Mechanismen der Transplantatabstoßung nach einer Xenotransplantation näher zu charakterisieren und die Rolle der beteiligten Gene aufzuklären.

Funktionale Genomforschung in Nutztieren

Auch wenn es beispielsweise aus Neuseeland Absichtserklärungen gibt, transgene Nutztiere für die landwirtschaftliche Produktion zu verwenden, dienen die Techniken des Gentransfers bei uns in absehbarer Zeit vor allem für Genfunktionsstudien. Gegenstand solcher Studien sind vor allem Merkmale mit einer niedrigen Heritabilität, was bedeutet, dass die genetische Veranlagung äußerlich (phänotypisch) kaum erkennbar ist. Solche Merkmale sind Tiergesundheit, Langlebigkeit und Fruchtbarkeit, und diese zu verbessern ist das Ziel des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung eingerichteten Schwerpunktprogramms mit dem Namen FUGATO (Funktionale Genomanalyse im tierischen Organismus; www.fugato-forschung.de). Im Rahmen von FUGATO suchen interdisziplinäre Forschungskonsortien über systematische vergleichende Genexpressionsstudien auf Messenger-RNA- (Transkriptomics) und Proteinebene (Proteomics) nach Kandidatengenen, die diese Merkmale beeinflussen. Der große Vorteil von Nutztieren ist hier, dass die Untersuchungen unter sehr standardisierten Bedingungen durchgeführt werden können und exakt definiertes Probenmaterial in ausreichender Menge zur Verfügung steht. Zudem bestehen aufgrund der Vielfalt an Rassen und Nutzungsrichtungen und der damit verbundenen phänotypischen und genetischen Variabilität sehr gute Erfolgschancen, interessante Gene zu entdecken. Die genannten Verfahren des Gentransfers sind in der Lage, die Funktion eines bestimmten Gens letztlich zu beweisen. Aufgrund der Ähnlichkeit der Genome von Mensch und verschiedenen Nutztierarten wird dieser Ansatz auch wesentliche Erkenntnisse für die biomedizinische Forschung liefern.

MINIKRÄFTE MIT RIESENPOTENZIAL

Hermann Gaub

Spätestens seit John Dalton 1808 erklärte, dass die Elemente aus Atomen bestehen, interessieren sich Chemiker und Physiker für die Faust'sche Frage "Was die Welt im Innersten zusammenhält". Naturwissenschaftlich ausgedrückt: Welche Kräfte gibt es zwischen Molekülen, wie groß sind sie und wie kann der Mensch sie messen? Medizin- und Pharmaindustrie interessieren die Minikräfte vor allem in der Wirkstoffforschung. Kraftmessungen zwischen Molekülen erlauben detaillierte Einblicke in die Bindungsverhältnisse eines Stoffes und ermöglichen Vorhersagen über seine Reaktion. Die unterschiedlichen Kräfte zwischen Molekülen sind beispielsweise der Grund, warum Makromoleküle in einem Fall ein flüssiges Öl ergeben, in anderen Fällen aber harte Kunststoffe. Es ist verständlicherweise enorm schwierig und aufwändig, einzelne Moleküle zu greifen und die winzige Kraft zwischen ihnen zuverlässig zu messen, denn die klassische Mechanik und herkömmliche Federwaagen sind dafür zu grob.

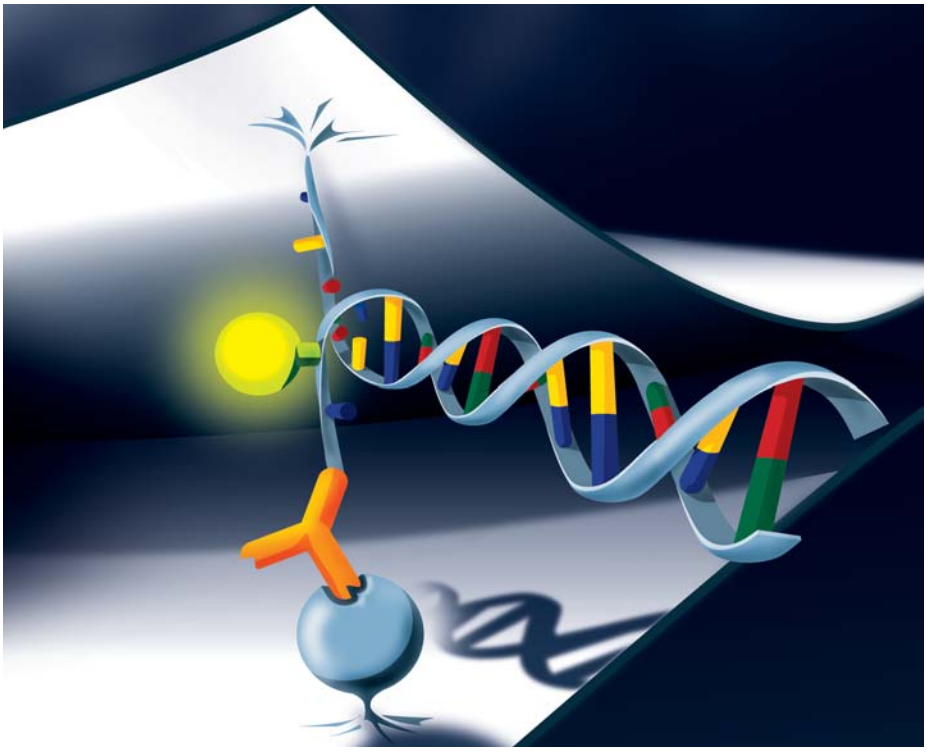
Im letzten Jahrzehnt haben sich einige Wissenschaftler an Messmethoden von solchen Bindungskräften versucht, Bindungskräfte immerhin, die sich im Piconewton-Bereich bewegen. Ungefähr 1 N ist nötig, um eine 100g-Tafel Schokolade zu heben, und 1 Piconewton ist folglich ein Billionstel oder 10^{-12} Newton (N).

Ein Mikroskop als Waage

Weltweites Aufsehen erregte Anfang der 90er Jahre der Versuch, das Rasterkraftmikroskop als „Pico-Waage" zweckentfremdet einzusetzen: Zum ersten Mal konnten die Forscher die Bindungskräfte zwischen einzelnen Molekülen, nämlich an Vitamin H (Biotin) und dem bakteriellen Protein Streptavidin messen.

Eine neue Forschungsrichtung entstand. Während 1994 noch eine Habilitation und mehrere Promotionen notwendig waren, um die Bindungskräfte in einem einzigen Molekülpaar, zum Beispiel Myosin und Aktin im Muskel, zu bestimmen, erledigt dies heute ein Diplomand binnen eines Jahres. Für die Pharmaforschung und die medizinische Diagnostik ist aber auch dieser Zeitraum zu lang, denn sie müssen Tausende biomolekularer Proben pro Tag vermessen. Dies ist mit einem Rasterkraftmikroskop wahrscheinlich niemals machbar und scheidet damit als industriell attraktive Technologie aus.

Mit der Idee, statt einer mechanischen Feder im Mikroskop bekannte Biomoleküle (zum Beispiel DNA-Stränge) als Vergleichskraftmesser wie ein Waagengewicht einzusetzen,



DNA-Stränge mit bekannten Bindungsstärken sollen künftig als Referenz für die Messung von Bindungskräften dienen.

Minikräfte mit Riesenpotenzial

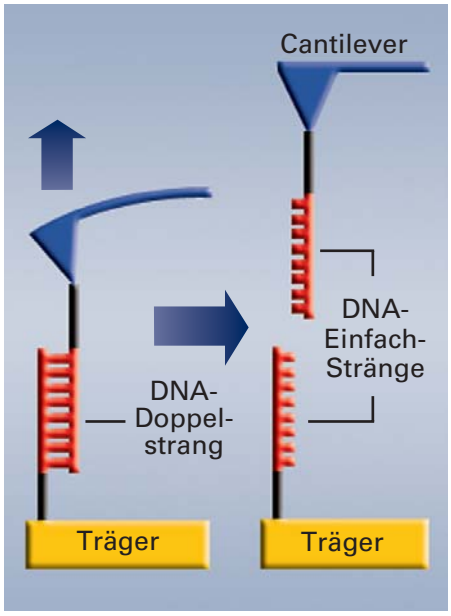


Abb. 1: DNA als programmierbares Kraftnormal.

um unbekannte biologische Moleküle zu vermessen, kam im Jahr 2000 neuer Schwung in die Forschung.

Das biologische „Gegengewicht"

Die Erbinformation einer Zelle steckt bekanntlich in der DNA (Desoxyribonucleinsäure). Diese besteht aus zwei komplementären Strängen, jeweils aufgebaut aus einem Zucker-Phosphat-Rückgrat mit angehängten DNA-Basen. Die Basen der komplementären Stränge ordnen sich so zusammen, dass das DNA-Gebilde aussieht wie eine gedrehte Strickleiter mit jeweils zwei gegenüberliegenden Basen (Basenpaar) als Stufen (Doppelstranghelix). Die DNA-Moleküle sind dehnbar, lassen sich wie ein Reißverschluss auseinander ziehen und wieder zusammensetzen und sind trotzdem sehr stabil.

DNA als programmierbares Kraftnormal

DNA-Stränge mit bekannten Bindungsstärken, sollen künftig als Referenz für die Messung von Bindungskräften dienen. Diese „erste" Referenzbindungsstärke wurde durch die oben erwähnte Rasterkraftmikroskop-Methode (Abb. 1) kalibriert. Das Mikroskop tastet Oberflächen mechanisch im Nanometerbereich, das heißt mit atomarer Auflösung, ab. Das Kernstück besteht aus einer Nadel, dem so genannten Cantilever, die an einer Silizium-Blattfeder befestigt ist. An der Nadelspitze wiederum hängen einige einfache DNA-Stränge chemisch gebunden. Eine Unterlage enthält die komplementären DNA-Stränge. Dann „streicht" der Cantilever über die Oberfläche der Unterlage und „sucht" einen komplementären DNA-Einzelstrang. Verbinden sich die beiden Stränge, kommt die Nadel aus dem Gleichgewicht. Diese winzige Auslenkung erfasst und misst ein Laser-Lichtzeiger. Aussagen über die Bindungskraft zwischen den DNA-Einzelsträngen erfahren die Wissenschaftler aber erst beim Trennen der Stränge: Die Nadel wird definiert angehoben, sie zieht sozusagen so lange an dem Doppelstrang bis dieser reißt und der Cantilever in seine ursprüngliche Position zurückschnellt. Auch diese Bewegungen registriert der Laserstrahl: Die Auslenkung des Cantilevers, der mechanischen Feder, unmittelbar vor dem Zurückschnellen ist ein direktes Maß für die Bindungskräfte innerhalb des DNA-Doppelstrangs.

Die „Stempelmethode"

Im Vergleich mit den bekannten Bindungskräfte in unterschiedlichen DNA-Doppelsträngen (Referenz-DNA) lassen sich jetzt unbekannte Kräfte zwischen Molekülen messen (Abb. 2). Über einen Polymer-Anker ist ein Strang der Referenz-DNA an der Oberfläche eines weichen Stempels angekoppelt. Der andere Strang ist über ein Bindeglied mit dem unbekannten molekularen Komplex – in diesem Beispiel hier einem anderen DNA-Doppelstrang – auf der Trägerplatte verbunden. Das unbekannte DNA-Stück enthält etwa 20 Basenpaare. Das Bindeglied besteht ebenfalls aus DNA und enthält zusätzlich ein Fluoreszenzmolekül. Beim Auseinanderziehen zeigt sich dann, welche der beiden Bindungen die schwächere ist und eher reißt: die zwischen den beiden Strängen der Referenz-DNA oder die der unbekannten DNA. Zu sehen ist dies über den Fluoreszenzmarker, der entweder auf dem Stempel sitzt – wenn die Bindung des unbekannten Moleküls schwächer ist als die Referenz-Bindung – oder aber auf dem Träger, wenn die Bindung des unbekannten Moleküls stärker ist als die der Referenz-DNA: Ganz in der Art Salomons, der die beiden Frauen an den Armen des Kindes zerren ließ und dann nur noch schauen musste, auf welcher Seite das Kind endete.

Weil Sequenz und Länge des DNA-Referenzkomplexes in weiten Grenzen wählbar sind, lassen sich verschiedene Referenzkräfte chemisch programmieren. An verschiedenen Stellen des Stempels können verschiedene Referenzkomplexe verankert werden, so dass ein gleichzeitiger Vergleich der unbekannten Bindung mit einem fein abgestimmten Muster an Referenzkräften durchgeführt werden kann: ein molekularer Analog/Digitalwandler.

Mit dieser Methode lassen sich viele unterschiedliche Zielmoleküle auf einem Chip gleichzeitig vermessen: Stempel und Träger enthalten so genannte Spots, das sind definierte und räumlich von einander ge-

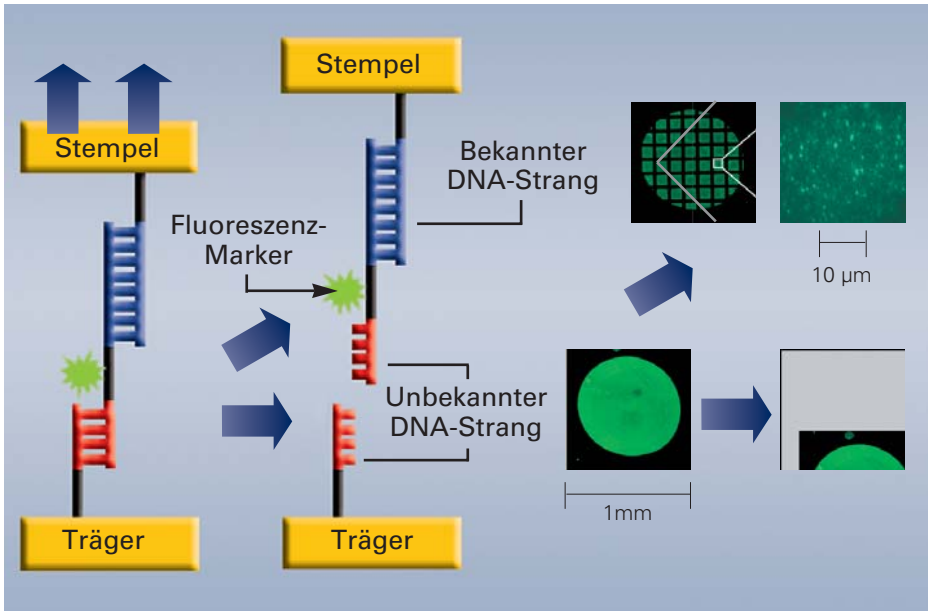


Abb. 2: Kraftmessung durch Vergleich mit bekannten Bindungsstärken.

trennte Bereiche ähnlich den Beeten eines Gemüsegartens, in denen sich jeweils eine Sorte von Zielmolekülen befindet.

Airbag gegen den Crash

So einfach wie es klingt, gelingt der Versuch allerdings nicht, denn Stempel und Träger müssen sich so präzise einander nähern, dass der ganze sensible Aufbau aus aneinander hängenden Molekülen (Verbindungspolymer, zu messendes Molekül, Fluoreszenzmarker, Referenz-DNA) nicht beschädigt wird. Außerdem müssen sich die zu untersuchenden DNA-Stückchen auch noch physisch „finden", damit sie eine Bindung eingehen können. Dafür sind mehrere Griffe in die chemische und physikalische Trickkiste notwendig.

Der Träger besteht aus festem, aktiviertem Glas und trägt die zu messenden DNA-Stücke chemisch gebunden. Der Stempel hingegen ist weich: Silikon-Kautschuk (Polydimethylsiloxan, PDMS) „puffert" den „Schlag" auf die Oberflächen, wenn sich Träger und Stempel nähern. Für den richtigen Abstand zwischen Stempel und Träger bei der Annäherung der DNA-Einzelstränge sorgt ein Hydrogel aus Polyethylenglycol (PEG). Das Hydrogel erlaubt zudem den langen Molekülfäden einander schnell zu finden.

Finetuning

Bei welcher Kraft ein DNA-Doppelstrang reißt, hängt von der Zugrichtung beziehungsweise von der Versuchsgeometrie ab. Wie bei einem Klettverschluss ist es 15 Mal leichter die DNA-Stränge an den nebeneinander liegenden Enden auseinander zu ziehen als an den gegenüberliegenden Enden der beiden Einzelstränge (Abb. 3).

Ebenso lässt sich unterscheiden zwischen DNA-Stückchen, die exakt zueinander passen und solchen, die es nicht tun: Letztere reißen bei Zugspannung schneller, weil die beiden DNA-Stränge eben nicht exakt zueinander passen.

Die Bindungskräfte der DNA-Doppelstränge sind über die geometrische Anordnung im Versuch und über die Anzahl der verwendeten Basenpaare fein einstellbar. Je länger der DNA-Strang ist, umso mehr Kraft ist notwendig, um die Stränge zu trennen. Die DNA als molekularer Kraftsensor eröffnet fantastische Möglichkeiten in der Protein- und Immunforschung und beim Testen neuer Medikamente, zum Beispiel von Antibiotika oder um zu diagnostizieren, an welchem Erreger der Patient erkrankt ist.

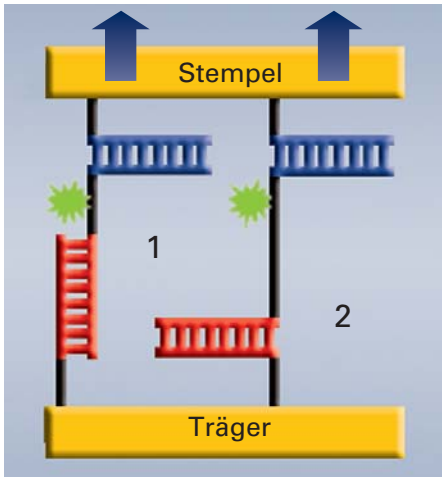


Abb. 3: Anordnung 2 reißt fünfzehn Mal leichter als Anordnung 1.

Antigene und Antikörper

Antigene sind Moleküle, die vom Körper als Fremdstoffe erkannt und durch das Immunsystem bekämpft werden. Kohlenhydrate, Proteine, Lipide oder auch in den Körper eingedrungene Fremdkörper (zum Beispiel Pollenkörner, Kot von Hausstaubmilben) sind typische Antigene, die gewöhnlich auf der Oberfläche von Zellen, Bakterien oder Viren sitzen. Der Körper erkennt solche Oberflächenstrukturen als fremd und bekämpft sie mit Hilfe von Antikörpern, die das Immunsystem produziert. Antikörper (Immunglobuline) sind Eiweißstoffe und zentrale Bestandteile des Immunsystems. Sie wirken im Blut und im Gewebe und haben die Form eines Ypsilon. Die Antikörper heften sich an die Antigene und behindern so zum Beispiel die Vermehrung von Viren. Für jedes Antigen muss das Immunsystem einen ganz bestimmten, dazu passenden Antikörper produzieren (Schlüssel-Schloss-Prinzip, Abb. 4).

Immunologen weisen Antikörper gegen zahlreiche Krankheitserreger mit dem so genannten ELISA-Test

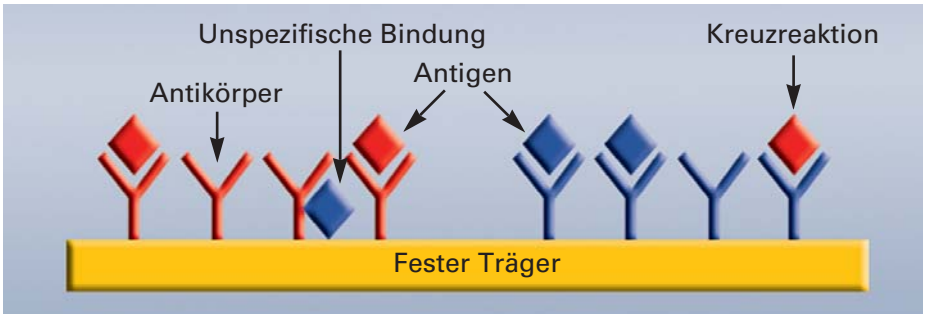


Abb. 4: Antikörper-Antigen-Reaktion.

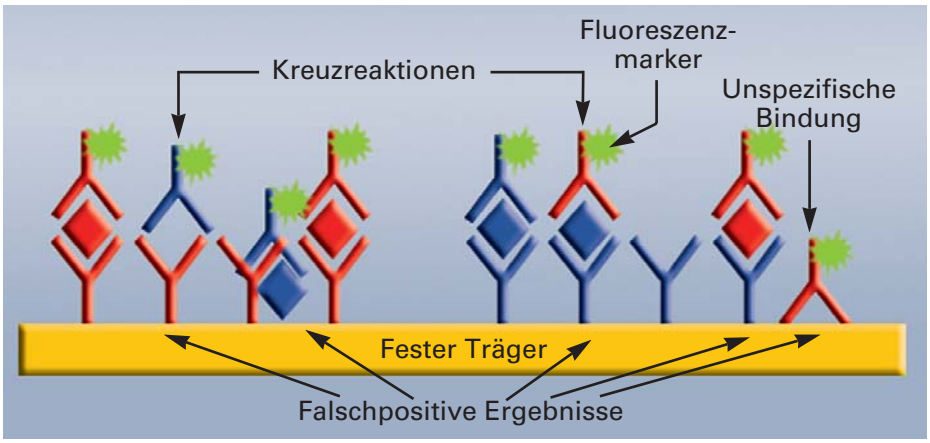


Abb. 5: Prinzip des Sandwich-ELISA-Tests.

(enzyme-linked immunosorbent assay) nach, der auf der Antigen-Antikörper-Reaktion beruht. Beim ELISA-Test wird das Antigen fest auf einem Träger verankert und mit Patientenserum (zum Beispiel Blut) überschichtet. Hat der Patient spezifische Antikörper gegen das Antigen, binden die sich an das Antigen zu einem nachweisbaren Komplex. Beim Sandwich-ELISA-Test (siehe Abb. 5) nutzt man den Antikörper im ersten Schritt, um ein bestimmtes Antigen aus der Lösung zu binden. Mit einem zweiten Antikörper weist man dann diese Bindung nach. Das Antigen ist dann wie in einem Hamburger zwischen zwei Antikörpern „eingeklemmt".

Theoretisch ist dieser Test sehr spezifisch für jedes Antigen, praktisch ist auf das Ergebnis nur bedingt Verlass, denn Kreuzreaktionen und unspezifische Bindungen mit anderen Substanzen im Serum gaukeln ein positives Ergebnis vor, das im schlimmsten Fall den Arzt zu einer Fehldiagnose verleitet.

Von der molekularen Polygamie zur Einehe

Um ausschließlich die richtigen Antikörper-Antigen-Antikörper-Komplexe detektieren zu können, wäre es also notwendig, die jeweils passenden Antigene gezielt an einem Ort zusammenzubringen und über die spezifische Bindungskraft des Komplexes unspezifische Bindungen und damit falsch-positive Ergebnisse auszuschließen. Unspezifische oder zufällige Bindungen besitzen eine weitaus geringere Bindungsstärke als die richtigen Schlüssel im Schloss.

Anders als im herkömmlichen Sandwich-ELISA-Test gelingt dies mit der Stempelmethode (Abb. 6): Der Stempel bringt den zweiten Antikörper gezielt an die richtige Stelle auf dem Träger. Die Ausgangslage ist identisch zum Sandwich-ELISA-Test: Der Antikörper sitzt auf dem Trägerchip fixiert und reagiert mit dem Antigen. Dabei entstehen genauso viele unspezifische Bindungen zwischen Antigen und Träger oder zwischen Antikörper und falschem Antigen wie beim traditionellen Versuch auch. In der neuen Kraftmessung jedoch schwimmt der zweite Antikörper nicht mehr in einer Lösung, sondern sitzt fest montiert am Stempel. Dieser schwingt den Antikörper wie ein Kran exakt an die komplementäre Stelle auf dem Träger. Das schließt einige vorher übliche Kreuzreaktionen aus: zwischen zwei unterschiedlichen Antigenen ohne Antikörper und zwischen einem Antigen und einem Antikörper, der zufällig am Träger bindet.

Bleibt das Problem falscher Antikörper auf einem Antigen und eventuell schwacher Bindungen zwischen Antikörpern. Dies löst die Referenz-DNA, die zwischen Antikörper und Stempel hängt. Beim Trennen von Träger und Stempel reißt der Doppelstrang der Referenz-DNA nur, wenn das Antikörper-Antigen-Antikörper-Sandwich wirklich zusammengehört. Die richtige Bindung im Komplex ist stärker als die Bindungskräfte im DNA-Doppelstrang, so dass zuerst der DNA-Strang reißt. Damit bleiben alle richtigen Komplexe auf dem Träger haften. Falsche Bindungen sind naturgemäß schwächer, so dass die Partner an der DNA kleben bleiben und mit dem Stempel nach oben wandern. Der Nachweis ist jetzt sehr einfach, weil die an der DNA gebundenen Fluoreszenzmoleküle, die Marker, unter UV-Licht entweder auf dem Träger oder auf dem Stempel zu sehen sind. Das Verfahren ist außerordentlich zuverlässig, flexibel und schnell und durch geschickte Aufteilung des Trägers/Chips lassen sich 100 und mehr Antigene parallel testen.

Vom Labor ins wirkliche Leben …

Mit Hilfe der vorgestellten Technologie gelingen Nachweise von Sub-

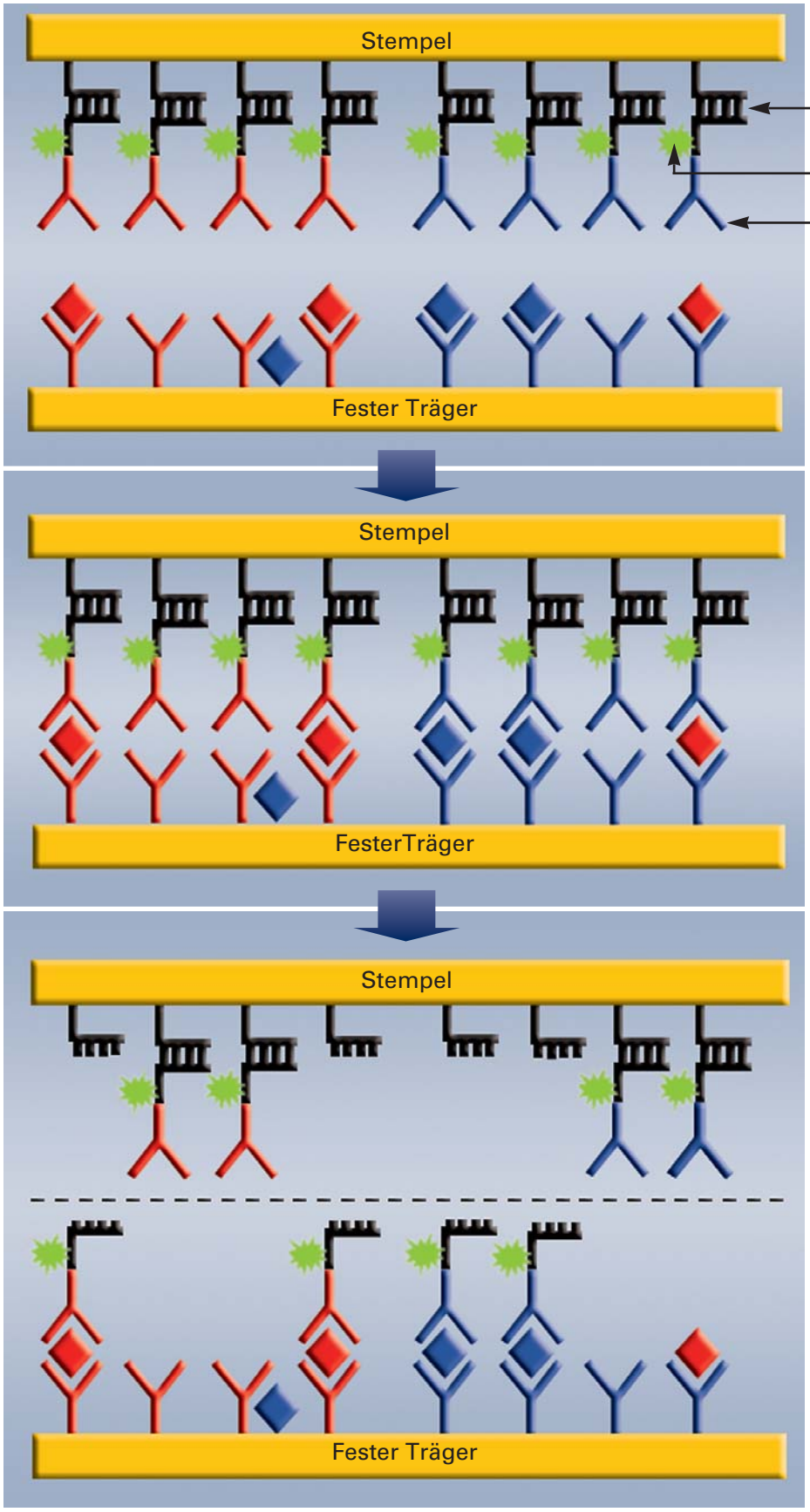


Abb. 6: Ablauf der „Stempelmethode“: Das Verfahren ist schnell, zuverlässig und verhindert falsch-positive Ergebnisse.

stanzen, die bei einigen bekannten Erkrankungen eine Rolle spielen: Cytokine, Interleukine und Kinasen wirken bei der Zellsteuerung und Zelldifferenzierung, aber auch bei der Entstehung von Zellentartungen (Krebs) oder manchen medikamentösen Nebenwirkungen mit.

Natürlich ist interessant, wie Proteine auf verschiedene Antikörper oder Medikamente reagieren (Abb. 7). Ein umgedrehter Versuchsaufbau ermöglicht auch diese Aussage. Jetzt sind die unterschiedlichen Antigene auf dem Träger in den separaten Spots befestigt. Der Stempel enthält jeweils nur eine Sorte Antikörper, die über Biotin (Vitamin H oder B7) oder das Protein Streptavidin an den DNA-Kraftsensor gebunden sind. Reagiert der Antikörper mit einem der Antigene, leuchtet der Spot auf dem Träger im UV-Licht, weil der DNA-Strang beim Auseinanderziehen von Träger und Stempel mitsamt dem Fluoreszenzmarker reißt und an dem festen Antigen-Antikörper-Komplex auf dem Träger haften bleibt.

… und in den Markt

Mini-Analysensysteme reduzieren Kosten. Die kleinen Probenvolumina senken den Verbrauch von Reagenzgläsern, Mikrotiterplatten und anderen Labor-Einmalartikeln und vor allem von Reagenzien deutlich. Die Microarrays sind oft wesentlich sensitiver als ihre makroskopischen Testkit-Verwandten und liefern die Ergebnisse auch noch erheblich schneller, weil viele Proben parallel analysiert werden.

Hauptanwender von Biochips sind die Medizin- und Pharmaindustrie. Die Unternehmensberatung Frost & Sullivan bezifferte den Umsatz für Biochips auf dem Weltmarkt auf 531 Millionen US-Dollar im Jahr 2000, 2003 lag er bereits über einer Milliarde Dollar. Die Prognose der Unternehmensberatung scheint sich zu bestätigen: Für 2007 sagen die Experten einen weltweiten Umsatz von

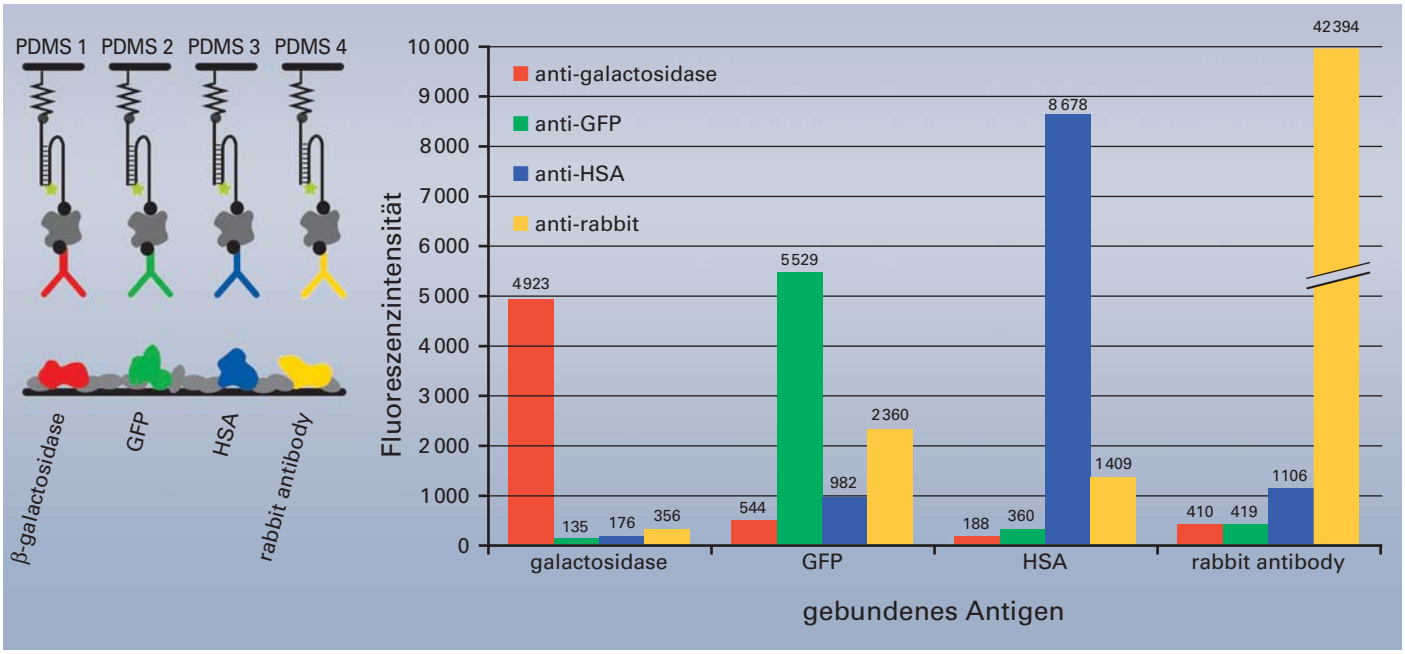


Abb. 7: Das „Stempelverfahren" liefert bei vielen Antigenen ein eindeutiges Ergebnis.

Prof. Dr. Hermann Gaub (Jahrgang 1954) leitet den Lehrstuhl für Angewandte Physik an der LMU München. Im Forschungsverbund für Miniaturisierte Analyseverfahren durch Nanotechnologie (FORNANO) leitet er das Projekt „Bindungskräfte zwischen Polynukleinsäuren auf DNA-Chips". Seine Forschungsschwerpunkte sind Biophysik und molekulare Maschinen.

Nachsatz:

Die beschriebene Technologie ist eine Entwicklung aus Bayern. Ein brillantes und engagiertes Team junger Wissenschaftler hat die Technologie mitentwickelt, einen Spin-off gegründet und sich in den Markt gewagt. Trotz guter Entwicklungsergebnisse, Absicherung durch Patente und Publikationen in den besten Journalen scheiterte die zweite Finanzierungsrunde. Heute kommerzialisiert eine kalifornische Firma das Produkt, die über ein deutlich besseres Venture Capital Umfeld und mehr staatliche Unterstützung verfügt.

3,3 Milliarden Dollar voraus. Reagenzgläser, Pipetten und Zentrifugen – es scheint, als ob das gemeine Labor ausgedient hat.

Das Ende ist nicht in Sicht

Etliche Unternehmen, die Biochips erfolgreich entwickeln und vertreiben, haben sich die Zähne an den Ergebnisverfälschungen durch unspezifische Bindungen und Kreuzreaktionen ausgebissen. Unseres Wissens nach gibt es auch derzeit kein Unternehmen, das in der Lage wäre, hochspezifische und zuverlässige Tests anzubieten. Der Lehrstuhl des Autors hat zusammen mit einem Start-up-Unternehmen einen Multiplex-Proteinbiochip zunächst für Cytokine entwickelt. Die Technologie ist durch mehrere erteilte Patente und Patentanmeldungen weltweit geschützt, universell und bietet daher eine schier unendliche Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten.

DNA-Biochips haben derzeit im Markt die Nase vorn. Um die biologische Natur und die Funktion eines Proteins zu beschreiben, reicht es jedoch nicht aus, die Gensequenzen auf der DNA zu kennen. DNA-Chips können also nur unvollständig Auskunft über zelluläre Prozesse, vor allem über die proteingesteuerten geben. Diese sind aber besonders in der Krebsforschung und für die Krebsdiagnostik wichtig, denn defekte Proteine können explizit zur Krankheit beitragen. Mittlerweile wurden mehrere Proteomics-Werkzeuge entwickelt, trotzdem sind Verfahren zur effektiven und parallelen Identifikation, Messung und Analyse von Proteinen, auch heute ein Engpass. Eine Plattformtechnologie für Proteindaten, analog zu den Genom-Daten, existiert bis heute ebenso wenig wie empfindliche, spezifische und parallele Analysetests. Diese zu entwickeln ist die wissenschaftliche Herausforderung für die nächsten Jahre.

NANOBEBEN IM CHIPLABOR

Achim Wixforth

Winzige „Erdbeben“ auf einem eigentlich aus der Mikroelektronik bekannten Chip bewirken Erstaunliches: Gezielt und gerichtet eingesetzt, transportieren sie kleinste Flüssigkeitsmengen entlang mit bloßem Auge nicht sichtbarer Kanäle über den Chip. Die „Nanobeben“ oder „akustischen Oberflächenwellen“ können elektrisch ein- und ausgeschaltet werden und ermöglichen so, automatisch arbeitende Minilabors (Lab-on-a-chip) für biologische und chemische Anwendungen zu programmieren, auf denen sich die Flüssigkeiten wie von Geisterhand bewegen.

Die Vorteile des Kleinen

Immer detaillierter wird das Wissen um die biochemischen Vorgänge im Zellinnern, immer weiter stößt die pharmakologische Forschung in die molekulare Ebene vor. Impulse für die Suche nach neuen Angriffspunkten für Medikamente und Aufschluss über Wirkmechanismen erhoffen sich die Forscher nicht zuletzt von der Entschlüsselung des menschlichen Genoms. Genexpressionsanalyse (das heißt Analyse der Information in einem Gen) und die parallele Analyse vieler unterschiedlicher Stoffe in einem Einzel-Zell-Assay gehört inzwischen zu den Standardverfahren des Wirkstoff-Screenings. Hunderte, ja Tausende Proben untersuchen die pharmazeutischen Firmen täglich, um ein wirksames Medikament zu entdecken. Die Untersuchungen sind aufwändig, die Reagenzien teuer und das Probenmaterial oft rar und damit kostbar. Dies ist die Triebfeder, die Analyseprozesse zu miniaturisieren.

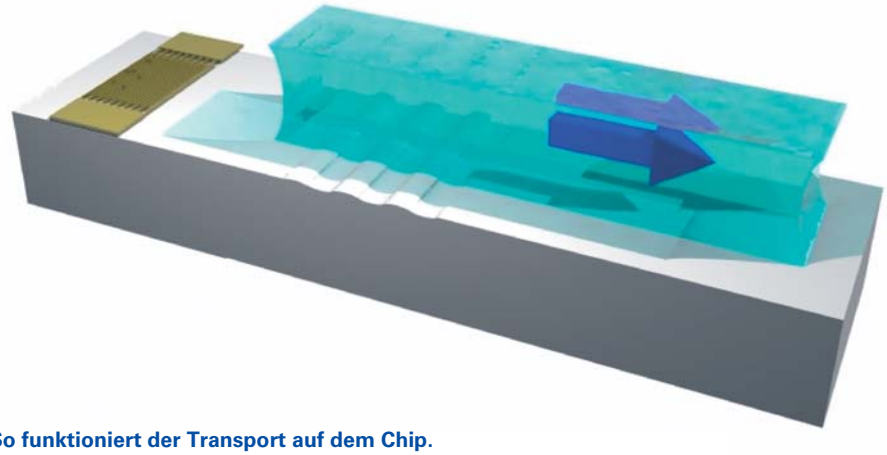
Mikrotiterplatten sind heute gängiger Laborstandard. Mehrere Hundert Proben sitzen in winzigen Reagenzgläsern dicht gedrängt auf einer Platte von etwa 100 Quadratzentimetern. Jedes Reagenzglas fasst kleine Flüssigkeitsmengen im Mikroliterbereich. Das klingt nach nicht viel, summiert sich aber.

Weniger als einen millionsten Liter fassen die Reagenzientröpfchen (zur besseren Sichtbarkeit eingefärbt), die auf der Oberfläche dieses Biochips mit Nanopumpen manipuliert werden. (Foto: Advalytix AG)

Für die Kleinen gelten andere Gesetze

Die Evolution in Richtung der Miniaturisierung in den Nanoliterbereich ist deshalb geradezu zwangsläufig. Doch beim Übergang von der Mikro- in die Nanowelt sieht sich die Analytik mit physikalischen Problemen konfrontiert. Nanolitertröpfchen verhalten sich gänzlich anders als die uns aus dem täglichen Leben vertrauten Mengen. Je mehr die Probenvolumina schrumpfen, desto dominanter werden nämlich die Kräfte an der Tröpfchenoberfläche beziehungsweise die Wechselwirkungen der Flüssigkeit mit den Wänden der kleinen Gefäße oder Leitungssysteme. Winzige Tröpfchen gegen die Adhäsionskraft (Anziehungskraft der Wand) und die Oberflächenspannung durch die mikrometerfeinen Kanäle eines „Chiplabors“ zu pressen, gleicht dem Versuch, Honig durch einen Strohhalm zu saugen. Die Pumpe müsste winzig klein sein, dabei aber über riesige Kräfte verfügen. Mit klassischer Mechanik ist dieses Problem nur mit enormem Aufwand zu lösen.

Dieselben Effekte bewirken, dass sich kleinste Flüssigkeitsmengen nicht mehr in gewohnter Weise mischen können. Wer Milch in den Kaffee gießt, sieht die Mischungsturbulenzen. Im Nanoliterbereich existieren nur noch laminare Strömungen, denn die Kräfte sind zu stark, um Turbulenzen entstehen zu lassen. Das einfache Durchmischen von Nanotröpfchen ist deshalb ein großes technologisches Problem.



So funktioniert der Transport auf dem Chip.

„Containerbahnhof" in der Nanowelt

Wie hoch die Oberflächenspannung von Mini-Tröpfchen ist, lässt sich an einem Spinnennetz nach einem Regen oder im Morgentau beobachten: Kleinste Flüssigkeitsmengen stabilisieren sich selbst, sie brauchen eigentlich keine Behälter!

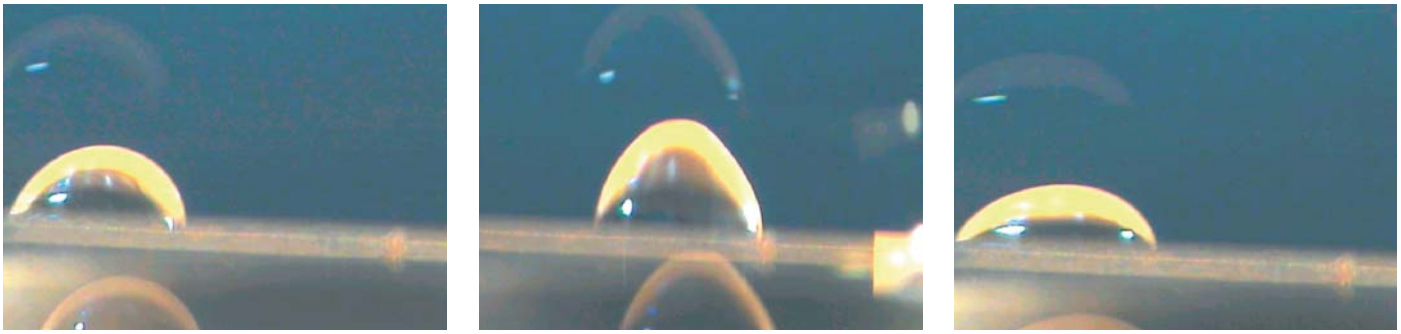
Die Oberflächenspannung der Flüssigkeit und die Benetzungseigenschaften der jeweiligen Unterlage bestimmen die Größe der Tröpfchen. Benetzungseigenschaften können die Wissenschaftler durch physikalische oder chemische Modifikationen in weiten Grenzen modulieren. Monomolekulare Schichten mit geeigneten Kopfgruppen auf dem Träger sorgen dafür, dass Wasser zum Beispiel abperlt (hydrophobe Schicht) oder sich auf dem Substrat verteilt (hydrophile Schicht). Mit Hilfe photolithografischer Verfahren, wie sie aus der Halbleiterfertigung bekannt sind, gelingt es, auf der Chipoberfläche Bereiche zu schaffen, auf denen unsichtbare Kräfte die Flüssigkeit geradezu einsperren. Die Reagenzien bewegen sich entlang fluidischer „Leiterbahnen" auf Chipoberflächen, ohne dass dafür eine mechanische Absperrung notwendig wäre.

Jedes einzelne Tröpfchen bildet dabei sein eigenes, virtuelles Reagenzglas.

Oberflächenwellen als Pumpen

Konventionelle Pumpen sind für ein solches offenes System natürlich nicht geeignet. Statt dessen werden hier akustische Wellen verwendet, die mit der Flüssigkeit an der Chipoberfläche in Wechselwirkung treten und sie in Bewegung versetzen können. Die Grundlage solcher Nanopumpen bildet ein piezoelektrisches Substrat, das sich unter Einwirkung eines elektrischen Feldes verformt. Auf dem Substrat liegen kammförmige, metallische Elektroden, deren Zähne ineinander greifen, ohne sich zu berühren. Liegt an den Elektroden eine elektrische Spannung an, verformt sich das darunter liegende piezoelektrische Substrat und es entsteht eine akustische Oberflächenwelle (SAW – Surface Acoustic Wave). Technologisch dienen diese Wellen heute in riesigen Stückzahlen als Hochfrequenzfilter zum Beispiel bei Mobiltelefonen. Ein SAW-Filter wandelt ein elektrisches Signal (Spannung) in eine Oberflächenwelle, das heißt in eine Druckwelle, um und dann wieder zurück in ein elektrisches Signal mit präzisem Frequenzgang. Solche Filter sind preiswert, hochgenau und winzig klein. Mit einer Amplitude im Nanometerbereich und Wellenlängen von einigen Mikrometern breiten sich diese Wellen wie Erdbeben im Nanoformat über den Chip aus. Trifft eine SAW auf eine Flüssigkeit auf der Chipoberfläche, so wird ein Teil ihrer Energie in Bewegungsenergie der Flüssigkeit transformiert. Die Stärke der Wechselwirkung zwischen Welle und Flüssigkeit und die Amplitude der SAW bestimmen, ob eine Strömung innerhalb des Flüssigkeitsvolumens entsteht (bei kleiner Amplitude) oder der Tropfen sich als Ganzes bewegt (ab einer gewissen Minimalamplitude).

Die auf SAW-Technik basierenden Pumpen haben somit keinerlei bewegliche Teile und lassen sich mit



Transport eines Tropfens von etwa 50 nl Volumen. Ein solcher Tropfen hat einen Durchmesser von rund 200 Mikrometern. (Foto: Advalytix AG)

den gleichen photolithografischen Prozessen herstellen wie die Benetzungsstrukturen auf dem Chip.

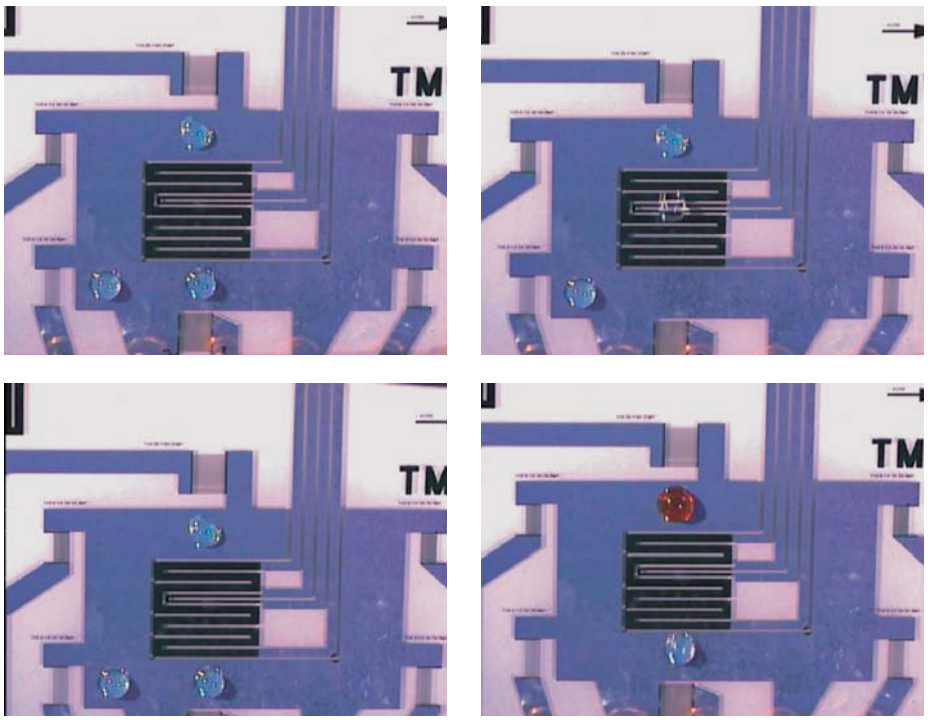
Akustische Mixer

Der Transport von Tröpfchen löst aber noch keine Reaktion aus, dafür müssen sich die Reagenzien schon mischen. Das tun sie freiwillig jedoch kaum, denn durch die schon erwähnte hohe Adhäsion und Oberflächenspannung strömen sie nur laminar. Die schallinduzierte Strömung über SAW innerhalb eines geschlossenen Volumens oder in einzelnen Tropfen dagegen „mixt" die Flüssigkeit ganz nebenbei. Schnelle Wechsel von Frequenz oder Amplitude erzeugen Wellen, die auch kleinste Flüssigkeitsvolumina innerhalb von Sekunden quasi-chaotisch durchmischen.

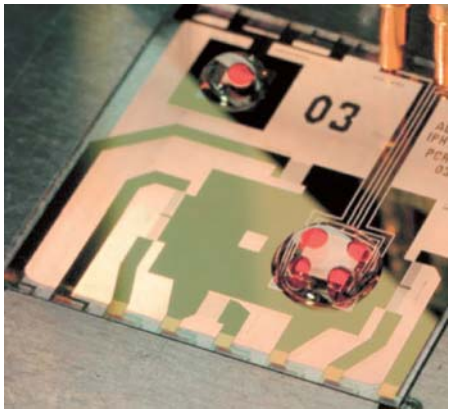
Kommerziell eingesetzt wird diese schallgetriebene Durchmischung bereits heute in zwei Produkten für die Gen- und Proteinforschung (ArrayBoosterTM und SlideBoosterTM, Advalytix AG, Brunnthal). Auch um Tumorzellen in Gewebeschnitten sichtbar zu machen, bewähren sich solche Nanopumpen, denn Tumorzellen reagieren schneller mit fluoreszierenden Molekülen als normale Zellen. Die Schallwellen durchmischen die kleinen Zellproben effektiv mit dem Fluoreszenzmarker. Das beschleunigt das Verfahren und die Nachweisempfindlichkeit steigt gegenüber klassischen Methoden.

Lab-on-a-Chip

Die Kombination aus Benetzungsstrukturierung und SAW-Nanopumpe ermöglicht eine Vielzahl neuer Anwendungen in der Biologie und Chemie, zum Beispiel in der Dispensertechnik. Ein Dispenser füllt über Minispritzen automatisch eine definierte Reagenzienmenge, meist einige Mikroliter, in die Reagenzgläschen auf einer Mikrotiterplatte. Die neue Technik ersetzt die gesamte Mechanik eines her-



Transport von Reagenztröpfchen zum Reaktionsort auf dem Chip. (Foto: Advalytix AG)



Ein programmiertes Chiplabor mit Heizung und Thermosensor.
(Foto: Advalytix AG)

Prof. Dr. Achim Wixforth (Jahrgang 1956) ist Physiker und Gründungsmitglied des Center for NanoScience (CeNS) an der LMU München. 2002 folgte er dem Ruf auf den Lehrstuhl für Experimentalphysik I an die Universität Augsburg. Prof. Wixforth erhielt 1998 den Walter-Schottky-Preis für Festkörperforschung und 2003 den ersten „BioTrends" Preis für seine Beiträge zur Biotechnologie. Gemeinsam mit Kollegen gründete er 2000 die Advalytix AG (Brunnthal), ein Spin-off-Unternehmen des CeNS. Seine Forschungsschwerpunkte sind Materialwissenschaften, Halbleiterphysik, Nanotechnologie, Hybride Materialien, Mikrofluidik, Biochips.

kömmlichen Dispensers und verarbeitet dabei Reagenzienmengen von wenigen Picolitern (1 Picoliter entspricht einem milliardstel Milliliter). Durch die schachbrettartige Strukturierung der fluidischen Leiterbahn auf dem Chip trennt ein Ultraminiaturdispenser ein präzises Muster von 20 pl-Volumina aus einem Reagenzientropfen ab und deponiert sie für weitere Reaktionen auf dem Chip.

Der Nano-Baukasten

Die beschriebenen Funktionseinheiten eines zweidimensionalen fluidischen Netzwerkes (Dispenser, Ventile, Mischkammern etc.) sind dabei im Gegensatz zu einer dreidimensionalen Fluidikarchitektur vollkommen voneinander entkoppelt und lassen sich somit wie in einem Baukastensystem zu komplexen Prozessoren verschalten. Im Vergleich zu einer Mikrotiterplatte reduzieren sich die verwendeten Reagenzienmengen dabei mindestens um einen Faktor 1000. In diesem Größenmaßstab gelingt es dank der elektronischen Ansteuerung der Nanopumpen selbst einzelne Zellen zu manipulieren und zu untersuchen.

Das im Bild oben gezeigte programmierbare Chiplabor, auf dem ein komplexer Prozess abläuft, enthält auch andere Komponenten, zum Beispiel eine Heizung, einen Thermosensor und andere elektronische Funktionseinheiten. Sollen beispielsweise auf einem Chip Polymerase-Proteine in einer Kettenreaktion kleinste Mengen genetischen Materials vervielfältigen, so ist es notwendig, die Probe zwischendurch zyklisch zu erwärmen. Damit dabei die winzige Probenmenge nicht verdunstet, überschichten die Experimentatoren alle vier Proben mit einem Ölfilm. Das vervielfältigte genetische Material bleibt gleich zur Analyse auf dem Chip. Auf diese Weise können gleichzeitig mehrere Reaktionen und Analysen auf dem Chip ablaufen.

Technologieplattform mit Wirtschaftspotenzial

Der Chip mit variabler Benetzungsstruktur, akustisch getriebenen „Nanopumpen" und ausgeklügelter elektronischer Verschaltung ist keine Insellösung für ein begrenztes Problem, sondern eine universelle Technologieplattform, die zudem auch noch ein hohes wirtschaftliches Potenzial besitzt. Alle Verfahren zum Aufbau der Chips sind hinlänglich aus der Mikroelektronik bekannt und erprobt. Die einzelnen Grundkomponenten wie Nanopumpen kosten nicht viel und lassen sich problemlos auf dem planaren Chip integrieren. Das Verfahren spart Pharmakonzernen immens viel Geld, weil die benötigten Proben- und Reagenzienmengen um Größenordnungen kleiner sind als bei der Mikrotiterplatten-Technik. Zudem lassen sich viel mehr Proben in kürzerer Zeit analysieren. Das Potenzial der programmierbaren, elektrisch ansteuerbaren „Chiplabors" von der Größe eines Daumennagels ist noch lange nicht ausgeschöpft.

DIE SCHWEBEBAHN DER MIKROPRODUKTION

Joachim Heinzl, Michael Zäh, Michael Franzkowiak,
Stefan Grünwald, Michael Schilp, Josef Zimmermann und Adolf Zitzmann

Zaubertricks im Zirkus und Illusionisten im Varieté: Die scheinbare Aufhebung der Naturgesetze faszinierte den Menschen schon immer. Wie schwebt die Jungfrau und wie bewegen sich überhaupt Gegenstände ohne Berührung? Ausschließlich Unterhaltungswert haben diese Phänomene heute nicht mehr, denn sie sind in vielen Produktionsprozessen tägliches Brot. Die Bauteile werden immer kleiner, immer mehr davon müssen auf kleinerer Fläche Platz finden und oft sind sie noch extrem empfindlich und dürfen nicht beschädigt werden. Beschichtete und fein strukturierte Oberflächen von Sensoren, beidseitig prozessierte Wafer, beschichtete Linsen mit feinst geschliffenen Oberflächen sind nur einige Beispiele. Dennoch müssen sie in der Produktion transportiert, positioniert und bearbeitet werden – möglichst ohne die empfindlichen Oberflächen zu berühren. Aus der berührungslosen Handhabung entstehen neue Verfahren, um die Qualität der Produkte zu verbessern, den Ausschuss zu senken oder um neue Produktionsmöglichkeiten und Produktbereiche zu erschließen. Dies gilt sowohl für große als auch für kleine Bauteile, auf die wir uns hier beschränken.

Luftmassensensor aus dem Automobilbereich

Ein Produktbeispiel sind Luftmassensensoren. Sie messen im Ansaugtrakt von fast allen Autos den Luftstrom, dessen exakte Steuerung eine optimale Verbrennung garantiert. Als Funktionsfläche dient eine hauchdünne, wenige Mikrometer dicke Siliziummembran, die aus einem Siliziumchip herausgeätzt wird. Auf der Membran ermitteln Sensoren die Luftgeschwindigkeit. Der verbleibende Rahmen um die Membran stabilisiert sie, dient aber auch dazu, das Bauteil taktil zu greifen, weil jede Berührung die Membran zerstört. Das Bauteil ist also doppelt so groß wie es sein müsste. Oder anders herum: Bei Verzicht auf die Grifffläche hätten doppelt so viele Bauteile auf dem Wafer Platz und die Produktionskosten sänken deutlich. Das bedeutet aber, dass dieses Bauteil berührungslos gegriffen werden muss!

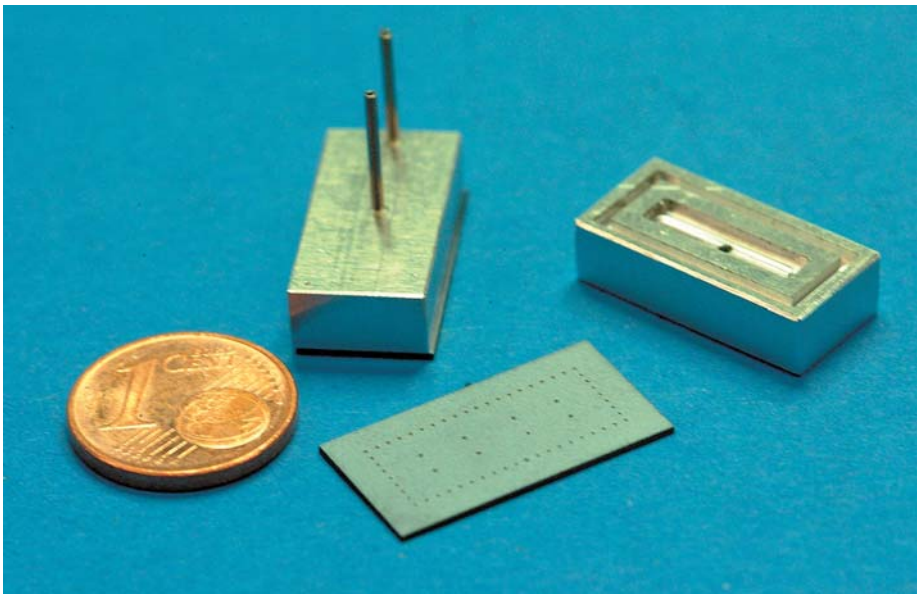
Berührungslose Handhabung bedeutet, dass Kräfte auf die Bauteile ohne direkten Kontakt zu den Transfersystemen übertragen werden. Natürlich wären elektrostatische oder magnetische Kräfte für den berührungslosen Transport denkbar, aber diese funktionieren nur, wenn die zu transportierenden Materialien auch magnetisch oder elektrostatisch aufladbar sind. Dies trifft zum Beispiel auf Silizium, Glas oder Kunststoff nur eingeschränkt zu. Ein universell einsetzbares Prinzip für das berührungslose Greifen ist das Luftkissen, bei dem die Kräfte auf ein Bauteil nur über die Raumluft oder ein Prozessgas wirken, ähnlich einem Luftkissenboot, das die Wasseroberfläche während der Fahrt nicht berührt. Der stabile Schwebezustand des Transportguts sollte dabei sensibel einzustellen sein. Erreicht wird dies durch eine Kombination von Ansaugen und Wegblasen und weiterer physikalischer Effekte.

Luftkissengreifer

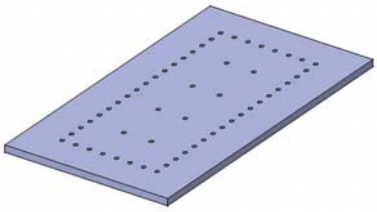
Die Greiffläche des Luftkissengreifers besteht sowohl aus Überdruckdüsen als auch aus Unterdruckdüsen, so dass in dem Luftkissen zwischen Greifer und Bauteil Bereiche mit Über- und Unterdruck entstehen. Der Unterdruck zieht das Bauteil an, während es die Überdruckdüsen gleichzeitig auf Abstand halten, so dass es etwa 10 µm entfernt von der Greiferfläche sozusagen in der Luft schwebt.

Durch die Kombination aus Über- und Unterdruckbereichen im Luftfilm befindet sich das schwebende Bauteil in einer stabilen Gleichgewichtslage. Wird es näher zum Greifer gedrückt, vergrößert sich die Wirkung der Überdruckbereiche gegenüber den Unterdruckbereichen und es entsteht eine abstoßende Kraft, die das Bauteil zurück in die Gleichgewichtslage drückt. Wenn sich das Bauteil aus der Gleichgewichtslage vom Greifer entfernt, verringert sich sowohl der Einfluss der Unterdruck- als auch der Überdruckbereiche. Allerdings sinkt der Überdruck stärker als der Unterdruck, so dass die resultierende Kraft das Bauteil wieder in die Gleichgewichtslage zurückzieht.

Die Schwebebahn der Mikroproduktion



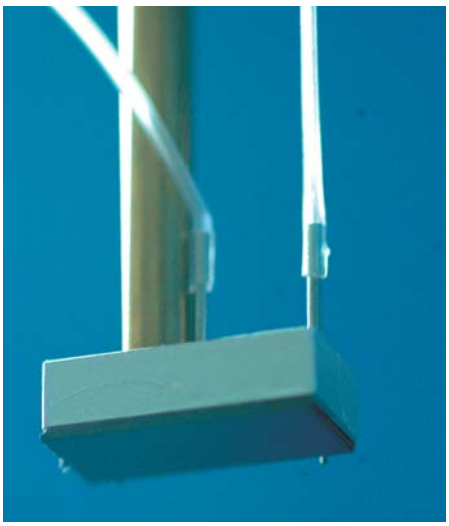
Luftkissengreifer mit Unterdruck- und Überdruckdüsen.



Typische Anwendungen für Luftkissengreifer sind Pick-and-Place-Vorgänge in Bestückungsautomaten zur Montage von Mikrosystemen. Sie entnehmen dabei einzelne, meist flächige Bauteile aus Magazinen, bringen sie zum Montageort und legen sie dort an einer definierten Position für die weitere Verarbeitung ab.

Das Luftkissen muss also das Bauteil nicht nur in vertikaler Richtung halten, sondern zusätzlich muss es auch laterale (seitlich wirkende) Kräfte aufbringen, damit es beim Transport und den dabei üblichen hohen Beschleunigungen nicht seitlich abgleitet, irgendwo anstößt oder gar herunter fällt.

Eine Möglichkeit, das Bauteil unter dem Greifer zu fixieren, sind mechanische Anschläge am Greiferrand. An diese kleinen Anschläge legt sich das Bauteil bei hohen Beschleunigungen an und kann nicht mehr seitlich herunterfallen.



Greifer mit seitlichen Anschlägen.

Neben den mechanischen Anschlägen kann auch ein fluiddynamischer Effekt das Bauteil berührungslos zentrieren. Dies funktioniert unter zwei Bedingungen: Form und Größe von Greifer und Bauteil müssen aufeinander abgestimmt sein und die Unterdruckdüsen am Greifer müssen so angeordnet sein, dass Luft in den Spalt zwischen Bauteil und Greifer eingesaugt und nicht ausgeblasen wird. Auf diese Weise wird die Luft um die Bauteilkante herum auf eine gekrümmte Bahn gezwungen. An der Bauteilseite entsteht in einem kleinen Bereich unterhalb des Luftspalts ein Unterdruck, der die für eine Zentrierung erforderliche seitliche Kraft auf das Bauteil ausübt.

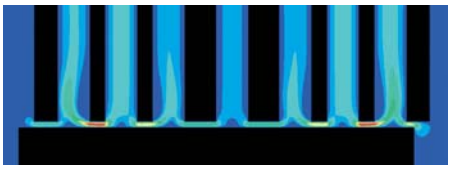
Ist das Bauteil unter dem Greifer zentriert, herrscht an den Bauteilseiten überall ein gleich großer Unterdruck, so dass sich die seitlichen Kräfte gegenseitig die Waage halten. Wird aber das Bauteil beim Beschleunigen seitlich ausgelenkt, vergrößert sich der Unterdruck an der Bauteilseite, die der Auslenkrichtung gegenüberliegt. Gleichzeitig verschiebt sich die entgegengesetzte Bauteilkante gegenüber der Greiferkante. Die Luft wird also nicht mehr um diese Kante herum in den Spalt gesaugt, so dass dort kein Unterdruck mehr entstehen kann und sich Umgebungsdruck einstellt. Dadurch entsteht eine seitlich gerichtete Kraft, die der Auslenkung entgegenwirkt und das Bauteil wieder in seine zentrierte Position unter dem Greifer zurückführt.

Der Luftkissengreifer mit berührungsloser Zentrierung kann vor allem

kleine, flächige Bauteile von wenigen Quadratmillimetern bewegen. Ein Laserstrahl schneidet die Luftdüsen mit einem Durchmesser von ca. 50 µm in dünne Siliziumscheiben. Zukünftig soll diese Art von Greifern bis herunter zu Bauteilgrößen von 0,5 mm x 0,5 mm funktionieren. Mit dem oben beschriebenen Effekt können größere und damit schwerere Bauteile aufgrund ihrer hohen Trägheitskräfte nicht mehr berührungslos zentriert werden, sondern nur noch mechanisch durch die seitlichen Anschläge.

Stehwelle

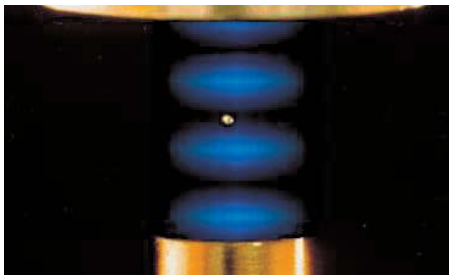
Die so genannte akustische Levitation mit Hilfe von Ultraschall ist eine andere Möglichkeit, Bauteile berührungslos zu greifen. Levitation kommt aus dem lateinischen levitas und bedeutet Leichtigkeit. Die Parapsychologie verwendet den Begriff als freies Schweben eines Körpers im Raum. Physikalisch beruht die Levitation auf der Ausbreitungscharakteristik von Schallwellen. Im weitesten Sinn verhalten sich Schallwellen ähnlich einem Stein, der ins Wasser fällt und dabei eine sich konzentrisch ausbreitende Wellenfront auslöst. Diese prallen dann an den Wänden ab und kommen zurück. Dabei überlagern sie sich mit den ankommenden Wellen. Bei einem definierten Verhältnis des Abstandes zwischen dem Ort der Schallerzeugung und der -reflektion zur Wellenlänge entsteht eine so genannte stehende Welle. Im Ultraschallbereich gibt es innerhalb der Welle Bereiche mit höherem Druck und tieferem Druck (Druckknotenpunkte). Was immer



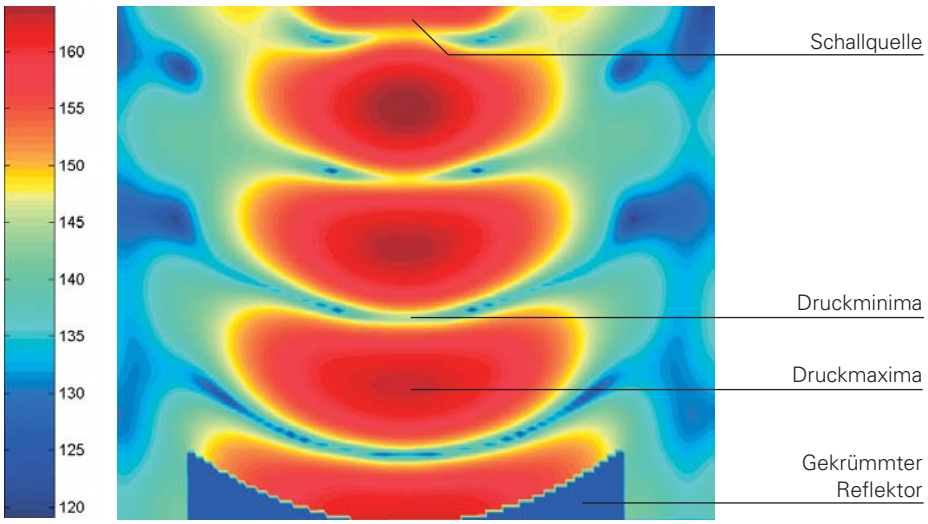
2D-Simulation der Geschwindigkeiten im Luftspalt zwischen Greifer (oben) und einem seitlich ausgelenkten Bauteil (unten).

sich an festen Teilchen an diesen Knotenpunkten befindet, bleibt auch dort, da der Luftdruck in allen drei Dimensionen der Umgebung höher ist. Ein Feld stehender Ultraschallwellen dient in der Mikrosystemtechnik zum Greifen von Teilchen ohne Festkörperkontakt.

Für das Feld aus Ultraschallwellen sorgen Wandler. Ein Wandler setzt ein elektrisches Signal in mechanische Schwingungen um. In den Bereichen bis 15 kHz dient dafür ein elektrodynamischer Wandler, im Ultraschallbereich (f > 20 kHz) werden in der Regel piezoelektrische Wandler, meist aus keramischen Werkstoffen, eingesetzt, die einen longitudinal schwingenden Kolben in seiner Eigenfrequenz anregen. Diesem gegenüber befindet sich ein Reflektor. Als Materialien für diese Bauteile dienen meist Titan oder Aluminiumlegierungen. Die Schallwellen bewegen sich zwischen dem Wandler und dem Reflektor hin- und her. Der Abstand zwischen dem Wandler und dem Reflektor, der so genannte Resonatorraum, wird sehr fein justiert, damit sich die Wellen zu einer stehenden Welle überlagern.



Druckfeld eines Ultraschalllevitators mit levitierter Kugel. (Höppner 2002)



Effektives Druckfeld in einer stehenden Welle.

Prof. Dr.-Ing. Joachim Heinzl (Jahrgang 1940) ist Ordinarius des Lehrstuhls Feingerätebau und Mikrotechnik der TU München, deren 1. Vizepräsident er von 1995 bis 2002 war. Er ist stellvertretender Sprecher des Bayerischen Forschungsverbundes Mikroproduktionstechnik, FORMIKROPROD. In seinen Forschungsgebieten der Mikroaktorik, dem Tintendruck, der Mikrosystemtechnik, den aerostatischen Lagern, der Ultrapräzisionsbearbeitung sowie der Lasermesstechnik meldete er weit über 100 Patente an.

Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh (geb.1963) ist Inhaber des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik an der TU München und leitet das Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften iwb. Nach Tätigkeiten bei Gleason-Pfauter Maschinenfabrik GmbH, zuletzt in der erweiterten Geschäftsführung, wechselte der studierte Maschinenbauingenieur 2002 an die TU München. Prof. Zäh ist Mitglied im Bayerischen Forschungsverbund Mikroproduktionstechnik, FORMIKROPROD.

Dipl.-Ing. Michael Franzkowiak (geb. 1976) ist Maschinenbauingenieur und seit Januar 2004 wissenschaftlicher Mitarbeiter am iwb. Sein Forschungsschwerpunkt ist die berührungslose Handhabung kleiner Bauteile, insbesondere die Entwicklung von Luftkissengreifern.

Dipl.-Ing. (FH) Stefan Grünwald (geb. 1977) studierte Feinwerktechnik und ist seit Februar 2002 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Feingerätebau und Mikrotechnik der TU München. Zu seinen Forschungsschwerpunkten gehören das Dispensen hochviskoser Fluide sowie die berührungslose Handhabung kleiner Bauteile mittels aerostatischer Mikrogreifer.

Dipl.-Ing. Michael Schilp (geb. 1973) studierte Maschinenbau und ist seit 1999 wissenschaftlicher Mitarbeiter am iwb. Seine Forschungsschwerpunkte sind neue Technologien für das Auftragen (Dispensen) von Flüssigkeiten, Integration von Fügetechnologien, modulare Werkzeuge für die Mikrosystemtechnik, berührungslose Handhabung kleiner Bauteile und berührungsloses Dispensen hochviskoser Medien.

Dipl.-Ing. Josef Zimmermann (geb. 1974) kam nach dem Studium der Elektrotechnik im Juli 1999 ans iwb. Seine Forschungsschwerpunkte sind die berührungslose Handhabung und neue Planungskonzepte für Montageanlagen mechatronischer Produkte.

Dipl.-Ing. Adolf Zitzmann (geb. 1973) ist Maschinenbauingenieur und seit April 2001 wissenschaftlicher Mitarbeiter am iwb. Sein Forschungsschwerpunkt ist die berührungslose Handhabung mittels Leistungsultraschall.

Ausblick

Trotz der enormen Fortschritte in den vergangenen Jahren gibt es eine ganze Reihe offener Fragen: Wie klein dürfen und können die Bauteile noch werden? Wird es physikalische Grenzen für die heutigen Verfahren geben? Setzen kleine Störungen in den Fluidströmen eine geometrische Untergrenze für die Bauteile?

Ähnliches gilt für die entgegengesetzte Entwicklungsrichtung: Wie groß können die auf die Bauteile applizierten Kräfte maximal werden? Insbesondere für die Werkstückhandhabung mit stehenden Wellen sind Grenzen zu erwarten.

Mit diesen beiden Verfahren stehen zwei viel versprechende Prinzipien zur Verfügung, um kontaminationsempfindliche, oberflächensensitive oder auch formlabile Bauteile zu bewegen. Dies sind naturgemäß die eingangs genannten Bauteile und Werkzeuge der Mikrosystemtechnik und Optik. Aber auch in den klassischen Industriezweigen eröffnen sich neue Anwendungsfelder. So können Bauteile an beschichteten Oberflächen „gegriffen" werden, noch bevor diese ausgehärtet oder abriebfest sind.

Ganz neue Handhabungs- und Materialflusssysteme ermöglichen völlig neue Prozessketten, die über vereinzelte Insellösungen hinausgehen und damit die Spielräume der Produktentwicklung und der -herstellung erweitern.

BIOMATERIALIEN NACH MASS

Günter Ziegler

Im Mittelalter wurden die Menschen nur etwa 35 Jahre alt. Bis zum Ende des 19. Jahrhunderts stieg die Lebenserwartung bereits auf rund 45 Jahre und heute stehen die Prognosen für Neugeborene bei 95 bis 100 Jahren. Worauf ist dies zurückzuführen? Bei aller Unsicherheit über die Einflussfaktoren ist Eines unbestritten: Die großen Fortschritte in Medizin, Naturwissenschaften und Technik haben zur Steigerung der Lebenserwartung beigetragen. Einen wichtigen Anteil am medizinischen Fortschritt leisten dabei die Biomaterialien als Basis für maßgeschneiderte Implantate.

Moderner Dreikampf: Medizin, Naturwissenschaften, Technik

Immer höhere Anforderungen stellen Mediziner an Implantate: Sie sollen mechanisch stabil sein, sich optimal und in kürzester Zeit mit dem körpereigenen Gewebe verbinden, keine Abstoßungsreaktionen oder gar Infektionen hervorrufen und möglichst ein Leben lang halten. Dies gelingt nur, wenn Mediziner, Naturwissenschaftler und Ingenieure eng zusammenarbeiten.

Der Einsatz von Implantat- und Biomaterialien ist außerordentlich vielfältig. Hauptanwendungsgebiete sind Implantate im Bereich des Bewegungsapparats (Gelenkprothesen, Knochenimplantate), im Kiefer- und Dentalbereich, für kardiovaskuläre Anwendungen, als Bandscheibenersatz und Dosiersysteme für die optimale Langzeitabgabe von Wirkstoffen sowie künstliche Organe und Hautersatz.

Hilfe zur Selbsthilfe

Fachleute unterscheiden zwischen temporären und permanenten Implantaten. Temporäre Implantate übernehmen ihre Aufgabe nur für eine bestimmte Zeit. Sie ersetzen ein vorübergehend funktionsunfähiges Körperteil so lange, bis dieses wieder selber einsatzbereit ist, zum Beispiel ein Marknagel zur Fixierung einer Oberschenkelfraktur. In Verbindung mit körpereigenen Strukturen (Knochenteile, Gewebezellen etc.) unterstützt das temporäre Implantat die Wiederherstellung des defekten Körperteils. Normalerweise entfernt der Chirurg das Implantat wieder aus dem Körper, wenn der Knochen nachgewachsen ist. Bestünde es jedoch aus Biomaterialien, die sich selbst auflösen und sich in körpereigenes Material verwandeln, wäre die zweite Operation überflüssig und Patient wie Krankenkassenbudget ungeheuer erleichtert. Erste Beispiele für temporäre Implantate mit diesen Eigenschaften sind künstliche Knochenersatzmaterialien, die der Körper resorbiert, sozusagen verdaut, während er gleichzeitig den natürlichen Knochen wieder aufbaut.

Mit Ersatzteilen leben

Permanente Implantate bleiben dauerhaft im Körper, weil die Funktion des natürlichen Körperteils irreparabel geschädigt ist. Häufig betroffen ist der Bewegungsapparat, vor allem die Hüft- und Kniegelenke. Für die Beanspruchung gelten ähnliche Kriterien wie bei den temporären Implantaten. Zusätzlich unterliegen Gelenkprothesen aber einer starken Verschleißbeanspruchung, deshalb muss die Implantatoberfläche besonders im Bereich der Reibflächen zusätzlich verschleißfest sein. Permanente Implantate erfordern darüber hinaus Langzeitstabilität und geringe Wechselwirkung mit Diagnoseverfahren (Röntgen, Computertomographie, Kernspinresonanz etc.).

Einheit von Körper und Ersatzteil

Der Bedarf an Materialien, die sich für verschiedenste Anwendungen maßschneidern lassen, ist sehr groß. Von äußerster Wichtigkeit ist bei al-

len Implantaten eine optimale Biokompatibilität, das bedeutet, dass die künstlichen Materialien keine Abstoßungs- oder Entzündungsreaktionen mit lebenden Geweben, zum Beispiel Knochen, Weichgewebe, Blut hervorrufen dürfen. Manchmal kommen nur Metalle als Implantate infrage und die verursachen häufig durch ihre toxischen Ionen ernste Nebenwirkungen.

Verträglichkeit des Implantats mit dem Körper gewährleisten Werkstoffverbunde. Der so genannte Volumenwerkstoff sorgt für die Form und die mechanische Stabilität des Implantats und ist vom Oberflächenmaterial eingehüllt, das wiederum mit dem Körper, mit Blut und Gewebe, wechselwirkt. Die Oberfläche schützt Implantat und Körper vor gegenseitigen schädlichen Reaktionen und gewährleistet und fördert die Verträglichkeit mit dem lebenden Organismus. Hierbei spielt die Oberflächenbeschaffenheit, also Rauigkeit, Poren und die chemische Konditionierung eine große Rolle, zum Beispiel Hydroxylapatit, das als natürlicher Knochenbestandteil die Zellen zum Einwachsen anregt. Bei künstlichen Knochenersatzmaterialien als temporäre Implantate sollten diese Calciumphosphate, wie Hydroxylapatit, so strukturiert sein, dass der Körper sie resorbieren kann. Dazu müssen sie Poren bestimmter Größe und Form enthalten, damit das körpereigene Gewebe in das Implantat einwachsen kann.

Maßgeschneiderte Materialien für die unterschiedlichen Einsatzgebiete sind das Ziel. Es ist nicht einfach, diese Materialien zu entwickeln und genauso schwierig ist es, daraus die individuell angepassten Implantate zu bauen. Hier sind vor allem innovative Verfahrenstechniken gefragt.

Nanostrukturen auf der Oberfläche verhindern Entzündungen

Trotz zahlreicher hygienischer Verbesserungen sind Infektionen während einer Implantation und während der Heilungsphase eine ebenso dauerhafte wie große und schmerzhafte Gefahr für den Patienten. Ist die Wunde erst einmal entzündet, ist eine erneute Operation oft nicht zu umgehen. Meist ist der Austausch der Prothese die einzige Möglichkeit, den Infektionsherd zu beseitigen. Forscher des Friedrich-Baur-Forschungsinstituts in Bayreuth versuchen durch antiinfektiöse Oberflächenbeschichtungen auf dem Implantat den Angriff von Bakterien abzuschwächen oder ihn sogar zu stoppen.

Keramische Beschichtungen mit antibakterieller Wirkung lassen sich aus Lösungen herstellen. Die Grundlage für derart antiinfektiös ausgestattete Oberflächen sind metallorganische Titan-, Silizium- oder Aluminiumverbindungen, die unter Säurezugabe in organischen Lösungsmitteln winzige, nanometergroße keramische Partikel bilden, die sich permanent wieder auflösen und neu bilden. Diese Partikel lassen sich durch verschiedene Beschichtungsmethoden wie Tauchen, Sprühen oder Aufschleudern auf metallische, keramische oder, ohne zusätzliche Wärmebehandlung, sogar auf polymere Werkstoffe aufbringen. Die Keramikschicht, die anschließend im Ofen bei etwa 500 °C entsteht, ist nur 0,1 µm dick. Je nach Wahl der Herstellungsparameter variieren die Schichteigenschaften zwischen sehr glatt und dicht und hochporös.

Diese im Fachjargon als Sol-Gel-Verfahren bezeichnete Methode bietet einen entscheidenden Vorteil: Bei der Abscheidung der Schicht aus einer Lösung ist es möglich, antiinfektiöse Metallionen wie Silber oder Kupfer gleichmäßig verteilt einzubauen. Die Metallionen lösen sich nach der Implantation aus der Schicht, wandern in das Körpergewebe und unterbinden die Vermehrung von klinischen Keimen wie Staphylococcus epidermidis oder Staphylococcus aureus. Der große Vorteil der Methode ist, dass die Bakterien gegen Metallionen im Gegensatz zu Antibiotika nicht resistent werden. Zudem tötet die antiinfektiöse, keramische Oberfläche des Implantats die bei der Operation eingebrachten Bakterien ohne die körpereigenen Gewebezellen zu schädigen (Abb. 1). Die Biokompatibilität der Schichten steigt noch mit der Zeit, wenn die Metallionen nach und nach herausdiffundieren. Knochenbildende Zellen wachsen dann schneller an, der Patient kann das Krankenhaus früher verlassen und auf die langfristige Stabilität seines Implantats vertrauen.

Neue Techniken für verschleißfeste Implantate

Wegen der guten Biokompatibilität bestehen Implantate häufig aus Titan

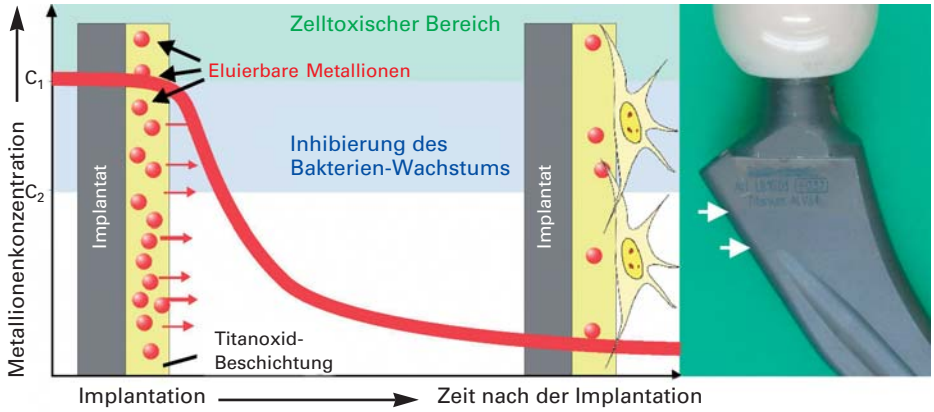


Abb. 1:
Die antiinfektiöse, keramische Oberfläche des Implantats tötet die bei der Operation eingebrachten Bakterien, ohne die körpereigenen Gewebezellen zu schädigen.

oder Titan-Legierungen, die aber bei mechanischer Dauerbelastung, zum Beispiel im Kniegelenk, ohne Oberflächenmodifizierung zum Leidwesen des Patienten schnell verschleißen. Heute greifen Werkstoffwissenschaftler immer mehr zu verschleißfesten und hochstabilen Keramiken, vor allem, wenn das Implantat im Körper Druckspannungen abfangen muss. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn metallische Implantate verschleißfester gemacht werden sollen. Die Eigenschaften der Keramiken lassen sich über die so genannte Precursortechnik maßschneidern. Im Gegensatz zur „klassischen" physikalischen Keramikherstellung aus Mineralpulvern durch Pressen und Sintern bei hohen Temperaturen, nutzen die Wissenschaftler bei der Precursortechnik ebenso wie schon beim Sol-Gel-Verfahren chemische Methoden.

Precursoren sind molekulare Vorstufen der eigentlichen Keramik. Sie bestehen aus metallorganischen Verbindungen, einzelnen kleinen oder wenig vernetzten Molekülen. Bei Temperaturen zwischen 120 und 300 °C vernetzen die Vorstufen chemisch zu Polymeren, also zu großen, verzweigten Molekülen. Erst bei der anschließenden Pyrolyse, das heißt einer Behandlung bei 700 bis 1000 °C, entstehen die gewünschten polymer-keramischen Schichten, Verbundwerkstoffe oder keramischen Hochleistungsfasern.

Elektronenstrahlhärtung

Neueste Forschungsarbeiten zeigen, dass keramische Fasern unter Beschuss mit hochenergetischen Elektronen im Elektronenbeschleuniger härten und dieses Verfahren zudem auch noch die Herstellungskosten deutlich reduziert. Die neuen Fasern sind thermisch und chemisch außerordentlich stabil, lassen sich problemlos weiterverarbeiten und bieten den derzeit üblichen Kohlefaserverbundwerkstoffen Paroli. Ein weiteres wichtiges Beispiel ist die Elektronenstrahlvernetzung der Polyethylenpfannen im Bereich der Hüftendoprothetik, um die Verschleißfestigkeit zu erhöhen. Forscher am Klinikum der Universität Regensburg entwickelten weiterhin ein biologisch abbaubares Kunststoffgerüst, in das Stammzellen einwachsen und dort Knorpelmasse wieder aufbauen, zum Beispiel im Meniskus. Die Elektronenbestrahlung verleiht dabei dem Kunststoff die notwendige Stabilität. Auch Verbundwerkstoffe für die Zahntechnik lassen sich mit Elektronen härten und bauen besonders feste Strukturen auf.

Gradientenwerkstoffe: Aus zwei mach eins

Reine Keramiken sind spröde und würden daher die unerwünschten Eigenschaften der Metallimplantate nur durch andere, genauso unerwünschte ersetzen. Ziel ist also, die guten Eigenschaften beider Werkstoffe zu vereinen. Dies können so genannte Gradientenwerkstoffe, das sind Materialien, bei denen sich eine Eigenschaft, zum Beispiel der Metallgehalt oder die Porosität, abhängig vom Ort in dem Werkstück ändert. Die Precursortechnik eignet sich ideal für die Herstellung von keramischen Gradientenschichten auf Metallen. Das Implantat besteht dann aus einem Metallkern, der die Form

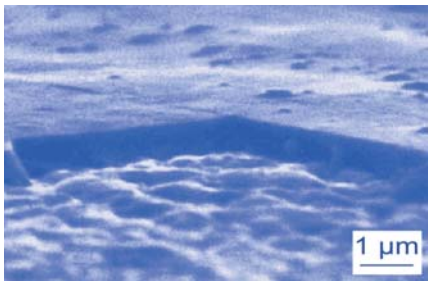


Abb. 2: Neuartige Schicht in Precursorkeramik.

vorgibt und für die notwendige Verformbarkeit und Zugfestigkeit sorgt, und einer Keramikschicht, die für gutes Verschleiß- und Korrosionsverhalten sowie für die Biokompatibilität verantwortlich ist (Abb. 2). Nun kann eine einfache Keramikschicht auf einem Metall schnell abplatzen und ohne eine geschickte Verbindung beider Bauteile kämen die Vorteile der einzelnen Werkstoffe nicht zum Tragen. Die Verbindung schafft eine weitere Wärmebehandlung nach dem Aufbringen der Keramikschicht über die Precursortechnik. Durch die Wärme diffundieren Precursormoleküle in die Metalloberfläche und bilden eine harte Zwischenschicht bis zu 1/20 Millimeter Dicke zwischen Metallkern und Keramikoberfläche: Es entsteht ein Gradientenwerkstoff. Der graduelle Übergang von der Oberfläche zum Basismaterial verhindert, dass die Keramikschicht bei hoher Spannung abplatzt. Gleichzeitig schützt die Keramik den menschlichen Körper vor toxischen Metallionen aus dem metallischen Implantat, die Allergien und Entzündungen verursachen können, erhöht dessen Bioverträglichkeit und gewährleistet den Verschleißschutz, so dass das Implantat länger im Körper bleiben kann.

Gerüste für Knochen und Knorpel

Beim Tissue Engineering werden körpereigene Zellen auf synthetischen Gerüststrukturen (Scaffolds) kultiviert, um künstliche Organe im Reagenzglas zu züchten, zum Beispiel Haut, Knorpel und Knochen. Bei der Regeneration von Knochen und Knorpel kommen dreidimensionale poröse Scaffolds zum Einsatz, die der Chirurg bereits vor der Operation mit Gewebezellen des Patienten besiedelt. Die Scaffolds, die aus resorbierbaren organischen und anorganischen Materialien bestehen, benötigen dafür eine definierte Porenstruktur.

Organische Scaffolds entstehen durch Vernetzung von wässrigen Polysaccharidlösungen. Polysaccharide sind lange Ketten oder Netzwerke aus Zuckermolekülen, zum Beispiel Zellulose oder Stärke. Durch Gefriertrocknung wird dem System das Wasser entzogen und es entsteht ein poröses Gerüst (Abb. 3). Dieses kann der Körper resorbieren und durch körpereigenes Gewebe ersetzen. Scaffolds auf Polysaccharid-Basis eignen sich vorzugsweise für Knorpel-Tissue-Engineering.

Die anorganischen Scaffolds bestehen aus einer Calcium-Phosphat-Keramik, die in ihrer mineralogischen Zusammensetzung dem natürlichen Knochen entspricht. Die Grundform gibt zunächst ein Polyurethan-Schaum vor, der in einen Calcium-Phosphat-Schlicker, einer Suspension des keramischen Pulvers in Wasser, getaucht wird. Unter hoher

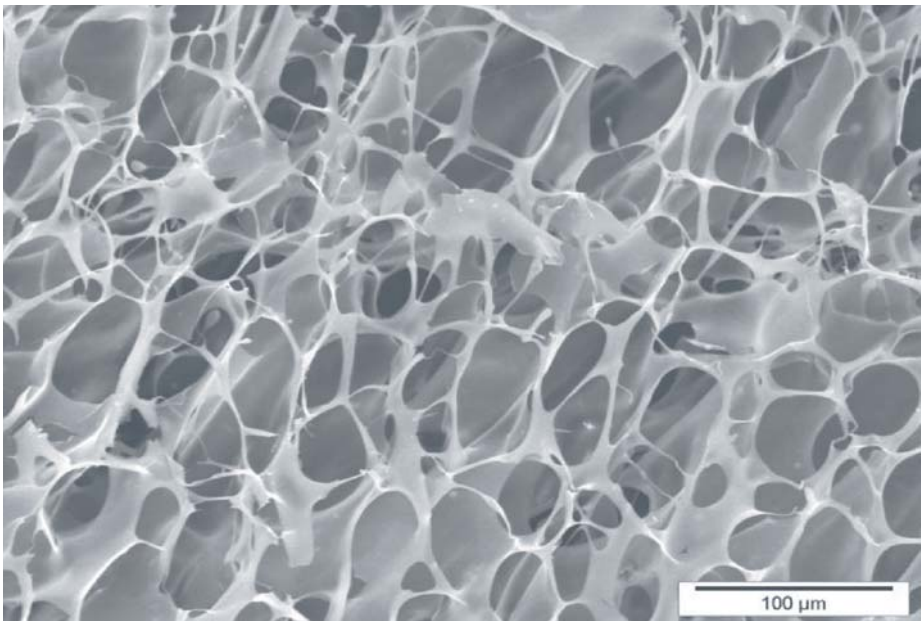


Abb. 3: Poröses Gerüst aus Polysaccharid.

Hitze verbrennt das Polyurethan und gleichzeitig sintert die Keramik. Zurück bleibt das hochporöse Scaffold mit einem Porennetzwerk, das der schwammähnlichen Struktur des natürlichen Knochens ähnelt. Durch Variation des Polyurethan-Schaumes und der Prozessparameter lassen sich sowohl die Porengröße als auch die Porosität der Keramik gezielt einstellen (Abb. 4).

Auf den keramischen Calcium-Phosphat-Scaffolds siedeln Stammzellen aus dem Knochenmark des Patienten. Diese Zellen sind so genannte mesenchymale Stammzellen (MSC), die unter bestimmten Bedingungen zu Knochenzellen differenzieren (Abb. 5). Nach einiger Zeit produzieren die Zellen eigenen Knochen im dreidimensionalen Biomaterial. Der Verbund aus künstlichem Material und Gewebezellen ist jetzt für die Implantation bereit.

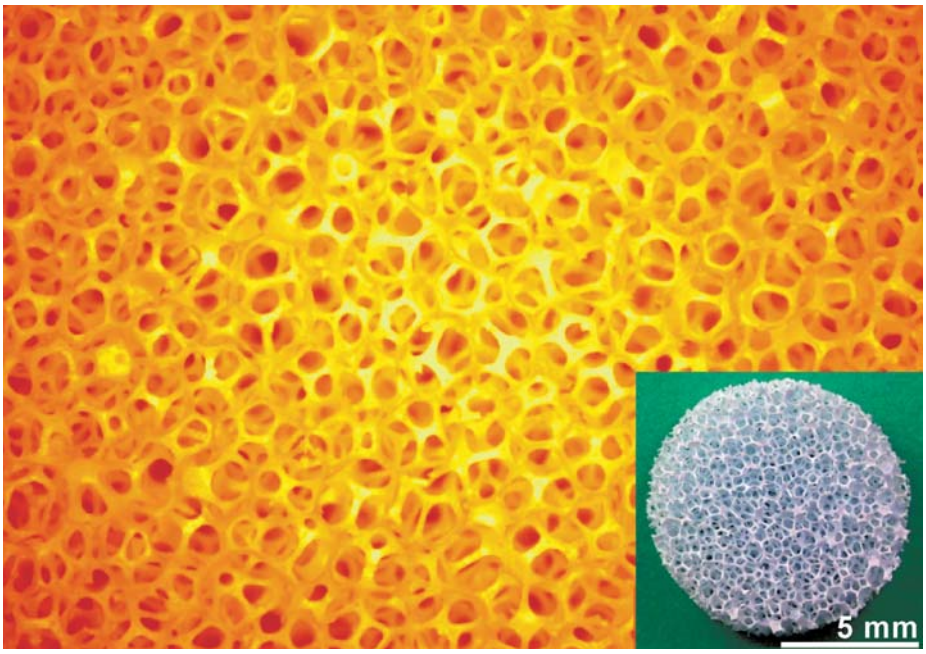


Abb. 4: Die schwammähnliche Struktur des Scaffolds ähnelt der eines natürlichen Knochens.

Gewebekleber nach dem Vorbild der Natur

Auf den ersten Blick ist das Problem unscheinbar, aber nasse Gewebe, Knochen und Knorpel zu verkleben, ist unter OP-Bedingungen bisher nicht möglich. Selbst kleine Bruchstücke befestigt der Chirurg bei Knochenbrüchen derzeit mit Draht oder Schrauben, um sie in einer zweiten Operation wieder zu entfernen. Übliche medizinische Kleber sind das nicht bioresorbierbare Cyanacrylat und der resorbierbare Fibrinkleber, der allerdings nicht sonderlich gut haftet. Cyanacrylat ist ein körperfremdes Chemieprodukt. Die Grundlage für den Fibrinkleber ist oft tierisches Blut, dessen Einsatz in der Medizin aufgrund der möglichen Infektionsgefahr (beispielsweise BSE) kontroverse Diskussionen auslöst.

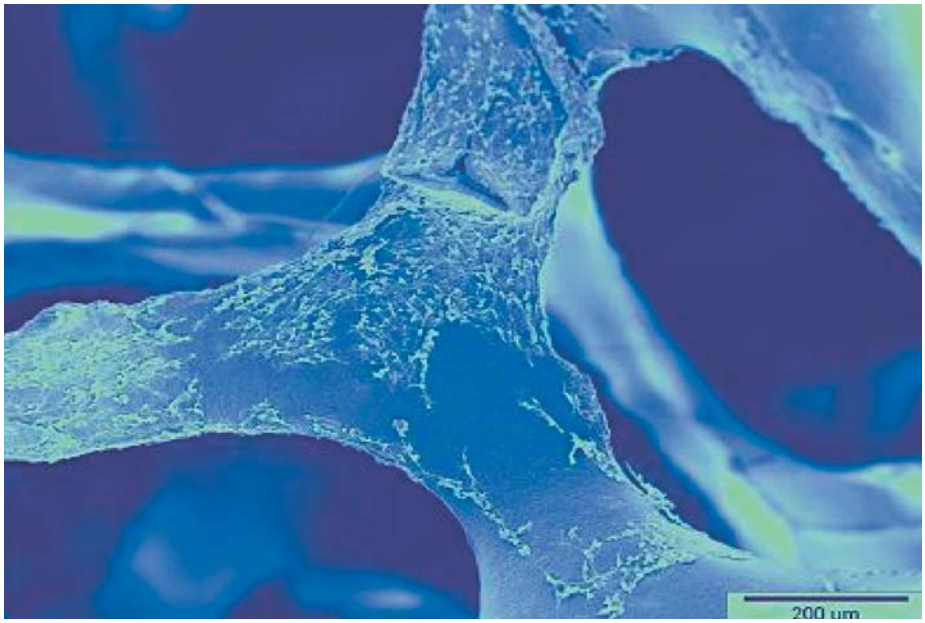


Abb. 5: Mesenchymale Stammzellen (MSC) differenzieren zu Knochenzellen.

Prof. Dr. Günter Ziegler (geb. 1938) ist Direktor des Friedrich-Baur-Forschungsinstituts für Biomaterialien an der Universität Bayreuth und leitete bis März 2003 zusätzlich den Lehrstuhl Keramik und Verbundwerkstoffe. Er ist Geschäftsführer der BioCer Entwicklungs-GmbH, Vorstandsmitglied des Bayerischen Forschungsverbundes Materialwissenschaften (FORMAT) und Forschungsgruppenleiter im Bayerischen Forschungsverbund Tissue Engineering und Rapid Prototyping (ForTePro). Wissenschaftlich beschäftigen ihn keramische Werkstoffe und Verbundwerkstoffe für die verschiedenartigsten Anwendungen und Biomaterialien für Implantate und Medizinprodukte.

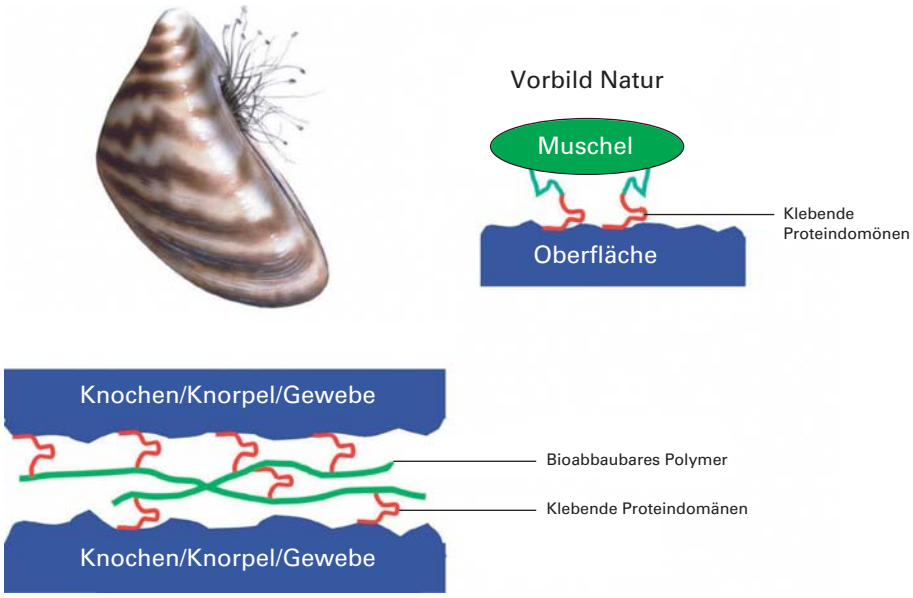


Abb. 6: Die Muschel als Vorbild für das Verkleben von nassen Oberflächen.

Wie sich nasse Oberflächen verkleben lassen, zeigen Muscheln (Abb. 6). Die Muschel produziert einen Kleber, mit dem sie sich unter Wasser oder auf nassem Untergrund festklebt und selbst bei starker Strömung haften bleibt. Dieser Kleber besteht aus einem Protein, dessen Klebewirkung bis heute noch nicht verstanden wird. Wissenschaftler der BioCer Entwicklungs-GmbH versuchen nun, das Protein beziehungsweise die haftenden Teile des Proteins künstlich nachzubauen, mit den schon erwähnten Polysacchariden zu verknüpfen und damit nasse Gewebe zu verkleben. Die Polysaccharide besitzen kein Infektionspotenzial und der Körper zerlegt sie bei der Wundheilung in die Zuckermoleküle, die er anschließend verwertet. Nach einiger Zeit bleibt von dem Implantat im Körper nicht mehr übrig als natürlicher Knochen und Knorpel.

Die Fortschritte bei den Implantat- und Biomaterialien verbessern die Lebensqualität vieler Patienten und entlasten die Krankenkassen. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund der weiter steigenden Lebenserwartung der Menschen von großer Bedeutung.

VOM AUSPUSTEN DER KERZE UND DER STABILISIERUNG VON FLAMMEN

Friedrich Dinkelacker

Jeder von uns hat schon oft eine Kerze ausgepustet – vermutlich einfach so, ohne viel zu überlegen, was denn dabei vor sich geht. Dass solches Wissen zuweilen sehr nützlich ist, zeigen die brennenden Ölquellen in Kuwait 1991. Um brennende Pipelines oder Ölförderanlagen zu löschen, reicht ein einfaches Auspusten nicht mehr. Spezialteams nutzen neben anderen Verfahren hier zuweilen Dynamit-Explosionen – wie im Film „Die Unerschrockenen" („Hellfighters" 1968) mit John Wayne. Das entzündete Dynamit entzieht bei der Explosion dem Ölfeuer so viel Sauerstoff, dass es ausgeht. Allerdings entzündet es sich in der Praxis wieder, so dass die Experten doch gleich andere Löschtechniken einsetzen.

Feuersbrunst und Feuertechnik

Normalerweise wird Feuer genutzt und soll also vernünftig brennen – das Löschen eines Feuers ist technologisch gesehen eher Nebensache. Schiller beschreibt beide Seiten eindruckvoll in seinem „Lied von der Glocke" – einerseits die Feuersbrunst, die sich durch die belebten Gassen wälzt – andererseits die „Wohltätigkeit des Feuers Macht" zum Gießen der Glocke. Heutzutage ist diese „metallurgisch-verfahrenstechnische" Nutzung des Feuers (um etwas nüchterner zu kategorisieren) nur eine von vielen. Es ist eine Fülle von weiteren wichtigen Anwendungen hinzugekommen – zum Beispiel 6000 (!) Flammenzündungen in jeder Minute, die Ihren Automotor antreiben, wenn der 4-Zylinder-Motor bei 3000 Umdrehungen pro Minute auf der Autobahn schnurrt. Oder das große Feuer, das im Heizkessel eines Kohlekraftwerkes dafür sorgt, dass „der Strom aus der Steckdose kommt" (Deutschland deckte im Jahr 2003 etwa 51 Prozent des Strombedarfes durch Kohleverbrennung). Auch der heimische Kamin, mit dem gemütlichen Knistern der Holzscheite, hat nicht immer nur romantische Seiten: Denn wenn das Holz nicht brennen will, qualmt er wie ein Kartoffelfeuer im Herbst statt heimelige Wärme zu verströmen. Hier kommen wir der Thematik der modernen Verbrennungstechnik schon näher: Wie können technische Feuerungen „stabil" und „sauber" betrieben werden?

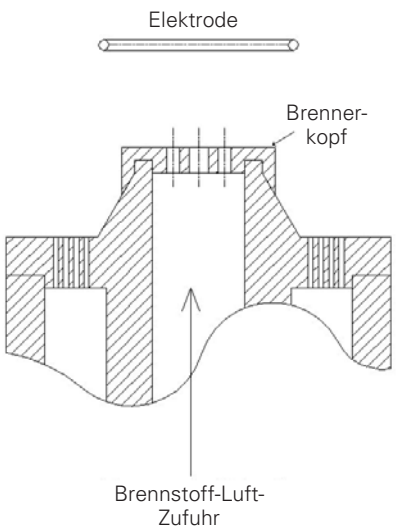


Abb.1: Versuchsbrenner mit ringförmiger Elektrode zur Steuerung der Flamme.

Stabile Flammen

Vielerlei „Stabilität" ist notwendig, oder, wissenschaftlich gesehen, vielerlei „Instabilitäten" sind zu berücksichtigen. Schon die einfache Kerze zeigt hoffentlich ein „richtiges" Stabilitätsverhalten: Die Wärme der brennenden Kerzenflamme sorgt dafür, dass der feste Brennstoff (Kerzenwachs) zunächst flüssig wird und dann an der Außenseite des Dochtes verdampft, bevor er selber in der Flamme verbrennt. Wird der Docht jedoch länger und länger, steigt die Brennstoffverdampfungsrate, die Flamme wächst und noch mehr Wachs verflüssigt sich. Die Rückkopplung führt dazu, dass irgend-

wann der Zeitpunkt kommt, an dem das Wachs auf die Tischdecke fließt und der Docht bis an die Decke rußt.

Dies war ein typisches Problem der Kerzen unserer Vorväter: Sie mussten fortwährend „geschnäuzt" werden; so nannte man das damals, wenn der abgebrannte Docht gekürzt wurde, um Rußen und Tropfen zu verringern. Sogar den Beruf des „Wachsschnäuzers" gab es bei Hofe. Und Goethe formulierte: „Wüsste nicht, was sie besseres erfinden könnten, als dass die Lichter ohne Putzen brennten." Immerhin, diese Zukunftsvision von Goethe ist Wirklichkeit geworden, die Technologie des Kerzendochtes ist heute „im Griff" und rußende Kerzen gibt es nur noch bei selbstgezogenen Bienenwachskerzen (ganz abgesehen davon, dass Dichter heutzutage bei nächtlicher Arbeit nicht mehr auf Kerzenlicht angewiesen sind).

Gegenwartsprobleme …

Instabilitätsprobleme haben vor einigen Jahren in einem ganz anderen Bereich der Verbrennungstechnik massiv an Bedeutung gewonnen. Die großen Gasturbinen-Hersteller wollten eigentlich der Umwelt etwas Gutes tun und haben ein neues Brennverfahren der „mageren Vormischverbrennung" eingeführt, bei dem zehnmal weniger Schadstoffe als vorher produziert werden. Plötzlich traten zuweilen massive Probleme auf. Ein durchdringendes penetrantes Geräusch verschreckte die Anwohner kilometerweit um ein „befallenes" Gasturbinen-Kraftwerk.

Was war passiert? Die Brennkammer mutierte offenbar plötzlich zu einer großen Orgelpfeife: Die Flamme und mit ihr die Brennkammer fing an zu oszillieren. Solche „selbsterregten Schwingungen" sind in Orgelpfeifen erwünscht, ganz und gar nicht aber in Brennkammern. Abgesehen von dem penetranten Dauerton führen die Schwingungen hier auch zu Materialvibrationen bis hin zum Bruch der Gasturbine.

Das Phänomen der oszillierenden Flammen war nicht ganz neu, es gab sogar schon militärische Anwendungen, die Pulsstrahltriebwerke der während des zweiten Weltkrieges entwickelten „V1-Wunderwaffe". Mit selbststeuernden Flatterventilen wurde hier periodisch das Brennstoff/Luft-Gemisch gezündet, sorgte durch die nur nach hinten mögliche Expansion des Gases für den Vortrieb und wurde danach von vorne wieder mit neuer Luft befüllt. Das dabei entstehende typische Knattergeräusch wurde für einige Zeit in London durchaus gefürchtet.

Es lohnt, einige Stabilitätsmechanismen am Beispiel der Gasturbinenverbrennung etwas genauer zu betrachten.

Flamme ist nicht gleich Flamme

Frühere Gasturbinenbrennkammern arbeiteten durchaus schon ordentlich, ohne zu schwingen. Allerdings war der Schadstoffausstoß recht hoch, die Verbrennungsfachleute reden von so genannten „Diffusionsflammen", die hier eingesetzt wurden. Ein Brenner sieht dabei vereinfacht so aus, wie in Abb. 2a skizziert: Brenngas (beispielsweise Erdgas) und Verbrennungsluft strömen getrennt in die Brennkammer, die für die Verbrennungsreaktion notwendige Mischung findet dann durch Diffusion von Brennstoff und Sauerstoff statt, daher der Name. Heutzutage werden Gasturbinen dagegen mit „Vormischflammen" betrieben. Hier wird Brenngas und Luft bereits vor der Brennkammer vermischt (Abb. 2b). Das hat Vor- und Nachteile.

Ein prinzipieller Nachteil ist, dass diese Brenner unsicherer gegenüber Flammenrückschlag sind. Bekommt ein Autofahrer einen Anruf auf sein Handy, nimmt er wahrscheinlich instinktiv den Fuß vom Gaspedal und reduziert die Geschwindigkeit während des Telefonats. Täte der Bediener eines Vormischbrenners dasselbe, würde es im wahrsten Sinne des Wortes brenzlig, denn bei einer Drosselung der Brennstoff- und Luftzufuhr auf die Hälfte, kann die Flamme in die Vormischkammer zurückschlagen. Eine Riesengefahr, weil die zurückschlagende Flamme den ganzen Brenner zerstören kann. Dreht er die Brennstoff-/Luftzufuhr umgekehrt zu stark auf, so kann die Flamme ausgeblasen werden und verlöschen.

Nah am Limit

Es ist wichtig, das Brennstoff-/Luftgemisch und Geschwindigkeit auszubalancieren, um den großen ökologischen Vorteil der Vormischflamme auszunutzen: Wird mehr Luft zugeführt, als zur Reaktion des Brennstoffes theoretisch notwendig ist, so sinkt die Flammentemperatur und

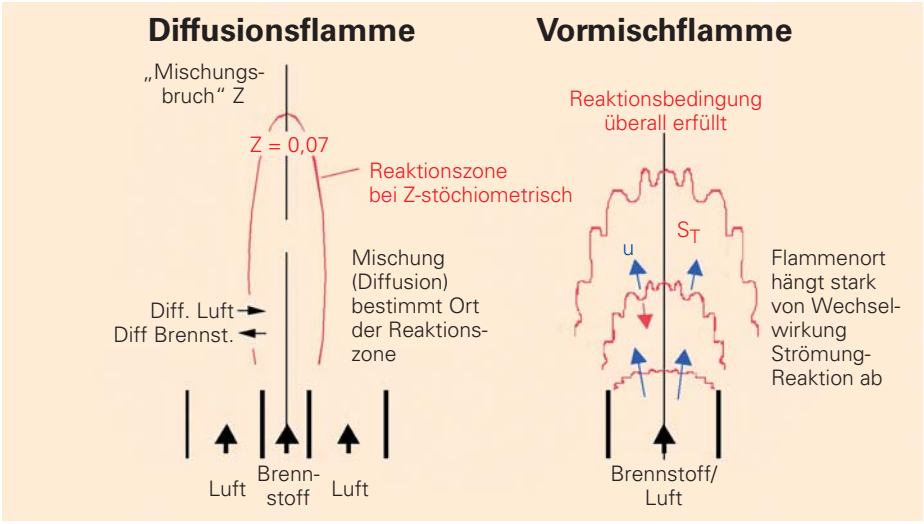


Abb.2a und 2b: Schema von Diffusionsflamme und Vormischflamme

gleichzeitig der Stickoxidausstoß. Angenehmer Nebeneffekt: Der Rußanteil sinkt auch, denn Ruß entsteht vor allem bei Luftmangel. Bei Gasturbinen wird heute fast doppelt so viel Luft zugeführt wie notwendig, entsprechend gering ist die Stickoxid-Emission und entsprechend schadstoffarm die Verbrennung.

Hier lauern aber nun gleich zwei Gefahren. Zum einen ist der Stabilitätsbereich sehr eng, so dass die Flamme leichter ausgehen kann. Zum anderen kann hier zunehmend Kohlenmonoxid (CO) als Schadstoff freigesetzt werden, das als Zwischenprodukt in der Verbrennungskette entsteht. Bei vollständiger Verbrennung oxidiert es weiter zu Kohlendioxid, bei sehr mageren Flammen ist die Verbrennung offenbar nicht vollständig. Vermutlich hängt die CO-Emission mit dem Abheben der Flamme zusammen und wahrscheinlich spielt auch die Geometrie von Brenner und Brennkammer und das damit verbundene Strömungsfeld in seiner Wechselwirkung mit der durchaus komplexen Reaktionschemie der Flamme eine entscheidende Rolle. Technologisch ist es sehr wichtig, solche Flammen möglichst nahe an diesem Limit betreiben zu können.

Seit Juli 2004 besteht die Bayerisch-Baden-Württembergische Forschungsinitiative „Kraftwerke des 21. Jahrhunderts“, der 22 Forschungsinstitute aus beiden Bundesländern und 11 Industriepartner angehören. Der Lehrstuhl für Technische Thermodynamik der Universität Erlangen und das Fachzentrum Electromagnetic Systems & Plasma Technology der Siemens Corporate Technology suchen, unterstützt durch die Siemens Power Generation, gemeinsam nach Möglichkeiten, den Stabilitätsbereich in der Nähe dieser mageren Löschgrenze zu erweitern, ohne dabei die CO-Emission zu erhöhen.

Elektrische Felder stabilisieren die Flamme

Die Grundidee im Projekt ist, Flammen durch Hochspannung so zu stabilisieren, dass sie „besser“ brennen. Erste Versuche der Partner am Hochdruckbrennerprüfstand des Lehrstuhles für Technische Thermodynamik zeigen, dass beispielsweise der CO-Ausstoß in einem vorgemischten „Sieben-Loch-Versuchsbrenner“ ganz massiv sinkt, wenn dem Brenneraustritt eine ringförmige Elektrode gegenübersteht (s. Abb. 1, S. 81), die bei Spannungen von bis zu 40 kV das dafür erforderliche elektrische Feld praktisch verzögerungsfrei aufbaut. Zum ersten Mal gelang der Nachweis, dass diese Stabilisierung durch das angelegte elektrische Feld sogar bei erhöhtem Druck in der Brennkammer funktioniert.

Nächste Schritte widmen sich zum einen dem Schutz der Elektroden im „Brennraum“, denn in der Flammenumgebung würden sie über kurz oder lang zerstört. Zum anderen sind weitere Tests bei höheren Gasgeschwindigkeiten und komplexeren Strömungsfeldern vorgesehen, um sich schrittweise an die in großen Gasturbinen herrschenden Bedingungen heranzutasten. Beobachtungen der Außenseite der 7-Loch-Flammen ergeben, dass das E-Feld besonders den Abhebeprozess der Flamme beeinflusst. Während die Flamme in der Nähe der Instabilitätsgrenze normalerweise schon weit abgehoben ist, sorgt offenbar das elektrische Feld in der Flamme dafür, dass die Flamme wieder ordentlich am Brenner aufsitzt und das entstandene Kohlenmonoxid zu CO_2 oxidiert. Bereits geringe elektrische Felder reichen aus, um die Flamme zu stabilisieren – der aufzuwendende Energieeintrag beträgt in der Regel weniger als 1 Promille der thermisch freiwerdenden Energie.

Last but not least: Selbst die fundamentalen Prozesse bei der Flammensteuerung durch elektrische Felder sind noch nicht ausreichend geklärt. Moderne Lasermessmethoden, die der Bayerische Forschungsverbund für turbulente Verbrennung (FORTVER) seit einigen Jahren weiterentwickelt, sollen den Forschern helfen, hinter die Mechanismen der Flammenstabilisierung zu kommen.

Warum Flammen manchmal oszillieren

Den schon angesprochenen „Orgelpfeifen-Effekt“ bei Flammen bezeichnen Verbrennungsexperten als „ther-

Dr. Friedrich Dinkelacker (Jahrgang 1961) ist Privatdozent und Oberassistent am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik an der Universität Erlangen-Nürnberg. Er leitet den Bereich der Verbrennungstechnik und betreut Projekte im Bayerischen Forschungsverbund für turbulente Verbrennung (FORTVER) und in der Forschungsinitiative „Kraftwerke des 21. Jahrhunderts (KW 21)“ der Länder Baden-Württemberg und Bayern. Die wissenschaftlichen Schwerpunkte liegen auf dem Gebiet der turbulenten Verbrennung, der Lasermesstechnik und der numerischen Methodik.

moakustische Instabilität“. Flammen brennen normalerweise in fast geschlossenen Brennkammern. Diese können länglich wie Orgelpfeifen sein oder auch ringförmig bei den großen Gasturbinen (schöne Bilder waren in Zukunft im Brennpunkt, Heft 2, 2003 zu sehen). Wenn irgendwo in der Brennkammer ein periodischer Vorgang entsteht, der eine Schallwelle induziert, und diese durch die Randbedingungen der Brennkammer wie bei einer Orgelpfeife mehrfach reflektiert wird, kann sie sich zu einer stehenden akustischen Welle überlagern, falls die Anregungsfrequenz mit der „Eigenfrequenz“ des Resonators übereinstimmt. Gerade die sehr mageren Vormischflammen lassen sich aufgrund der Nähe zu ihrer Instabilitätsgrenze besonders sensibel von einer Schallwelle beeinflussen. Lord Rayleigh (1842 - 1919, englischer Physiker und Nobelpreisträger für Physik 1904) hat bereits im 19. Jahrhundert die Bedingung formuliert, dass sich die Schwingungen wechselseitig anfachen, wenn sich die Schallwelle und die periodische Wärmefreisetzung der Flamme „in Phase“ befinden. Es entsteht eine Art Resonanzkatastrophe und die Schallwelle wird immer lauter.

Für manche Gasturbinen-Hersteller wuchs sich das zu einem finanziellen und existenziellen Problem aus, das beinahe dazu führte, diese modernen Gasturbinen nicht weiter zu bauen. Dies wäre ein Rückschritt für die Umwelt gewesen, denn die Gasturbinen, gekoppelt mit nachgeschalteten Dampfturbinen, erzeugen deutlich saubereren Strom und sehr viel weniger CO_2-Ausstoß als herkömmliche Kohlekraftwerke. Das Öffnen vieler Trickkisten der Ingenieure und Physiker löste zwar schließlich die dringendsten aktuellen Probleme, allerdings mit erheblichem konstruktivem Aufwand. Die thermoakustischen Instabilitäten gleich bei der Konstruktion von Brennkammern zu vermeiden, ist konsequenterweise ein Hauptthema der Forschungsinitiative „Kraftwerk des 21. Jahrhunderts“.

Elektrische Felder auch gegen Orgel-Flammen?

Vielleicht – und das ist nun unsere Vision – ist es auch möglich, den schon angesprochenen Hang mancher Brenner zur akustischen Oszillation durch gezieltes schnelles Gegensteuern durch elektrische Felder zu verhindern. Schnell genug sind die E-Felder jedenfalls regelbar, ob sie die gewünschte Wirkung haben, muss erprobt werden.

Die elektrische Flammensteuerung könnte somit gleich vielfach nützlich sein gegen das „Auspusten“ der Flamme, zur Reduzierung der CO-Emission bei mageren Vormischflammen und zur Stabilität bei sonst periodisch schwingenden Flammen. Vielleicht wird dies ein wichtiger Baustein für die schadstoffarme und effiziente Verbrennung, zur Entwicklung wettbewerbsfähiger Spitzentechnologie und letztlich ein Beitrag zum Wohl der Umwelt und der Menschen.

ZUKUNFT IM BRENNPUNKT

Die Arbeitsgemeinschaft der Bayerischen Forschungsverbünde, abayfor

„Wir alle sollten uns um unsere Zukunft sorgen,
denn wir werden den Rest unseres Lebens darin verbringen."

Charles F. Kettering (1876-1958), zuständig für Forschung und Entwicklung bei General Motors

Wie sieht der Mensch in der Zukunft aus? Und wie seine Umgebung? Die Freiheit, über alle Grenzen zu denken, den Raum der Möglichkeiten zu nutzen, dafür stehen die Wissenschaftler in den bayerischen Forschungsverbünden.

Keine komplexe Fragestellung kann heute noch in den engen Grenzen wissenschaftlicher Disziplinen beantwortet werden. Forschen im Verbund ist mehr denn je eine Notwendigkeit geworden und jeder Wissenschaftler steht vor der großen Herausforderung, Denkweise und Sprache des Anderen zu verstehen. Interdisziplinäre Zusammenarbeit, unabhängig von Ort und Zeit, ist das Gebot der Stunde, um aktuelle Themen aufzugreifen und vorausschauend Probleme zu lösen. Diese Arbeit leisten die Forschungsverbünde.

„Gemeinsam über Grenzen" ist die Leitidee für alle Forschungsverbünde um Innovationen zu ermöglichen und Perspektiven zu schaffen. Die Partner aus der Wirtschaft haben die wichtige Aufgabe, die anwendungsnahe Forschung mit Blick auf eine zügige Umsetzung in die wirtschaftliche Anwendung zu sichern.

Unter einem Dach

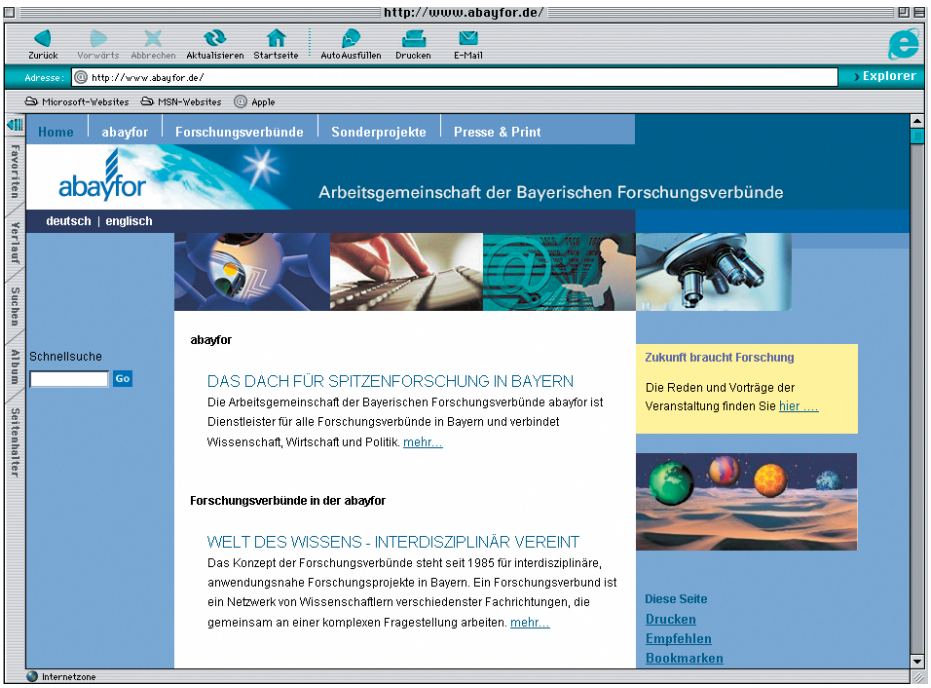
Die unterschiedlichen Themen der Forschungsverbünde benötigen eine gemeinsame Plattform nach außen, die Wissenschaft mit Wirtschaft, Politik und Gesellschaft in Kontakt bringt. In der Arbeitsgemeinschaft der Bayerischen Forschungsverbünde, abayfor, haben sich die Verbünde zu einer eigenen Interessenvertretung zusammengeschlossen, die übergreifende Aufgaben organisiert.

abayfor ist zentraler Dienstleister und strategischer Partner für die Forschungsverbünde und die Fördermittelgeber. In abayfor fließt Wissen aus vielen Forschungsverbünden, aus vielen unterschiedlichen Wissensdisziplinen zusammen. abayfor ist ein Informationspool und ein Ideenlieferant für die Schlüsseltechnologien von morgen. Die abayfor-Mitarbeiter vermitteln als Wissenschaftsmanager zwischen Wissenschaft, Politik und Wirtschaft, zunehmend auch im internationalen Umfeld.

Die „Welten der Wissenschaft" …

… sind ein Versuch, Ordnung zu schaffen in der unübersehbaren Vielfalt der Forschungsprojekte.

Neue Materialien und maßgeschneiderte Implantate entwerfen Forscher aus der „Welt der Materie".



www.abayfor.de:
Alles über abayfor, Forschungsverbünde, Projekte und Partner.

Neue Produktionstechniken und -verfahren haben mittlerweile den Nano-Maßstab erreicht und leiten damit das nächste Zeitalter ein.

Die Verbesserung der Lebensbedingungen ist das zentrale Thema in der „Welt des Lebens“: Umweltschonende Produkte von der Herstellung bis zur Entsorgung, der Umgang mit Ressourcen, Krankheiten erkennen und in den Griff bekommen.

Wissenschaftler aus der „Welt der Kultur“ entwickeln neue Ansätze für das Miteinander: Ob Verkehrslogistik oder interkulturelles Management beim Zusammenprall unterschiedlicher Kulturen. Sie begleiten die zeitgeschichtlichen Ereignisse und Phänomene mit wissenschaftlicher Erkenntnis und praktischem Tun.

In der „Welt der Information“ bauen Mathematiker, Informatiker, Ingenieure und Wirtschaftsexperten Roboter für gefährliche und „virtuelle Diener“ für ungeliebte Aufgaben. Sie planen die Produktionslogistik und vereinen weltweit verteilte Rechner zu großen Superrechner-Netzen.

Was wäre Wissenschaft ohne Visionen und mutige, helle Köpfe? Forschungsverbünde haben das Denken in wissenschaftlichen Disziplinen verlassen, um über alle Grenzen hinaus zu forschen und zu arbeiten.

Kontakte

Die Forschungsverbünde der abayfor

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

FORSIP
Bayerischer Forschungsverbund für Situierung, Individualisierung und Personalisierung in der Mensch-Maschine-Interaktion
c/o abayfor, TU München
Arcisstraße 21
80333 München
Tel (089) 2 89-2 25 38
Fax (089) 2 89-2 25 89
Internet www.abayfor.de/forsip
www.forsip.de

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

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

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

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

KONWIHR
Kompetenznetzwerk für Technisch-Wissenschaftliches Hoch- und Höchstleistungsrechnen in Bayern
TU München
Lehrstuhl für Rechnertechnik und Rechnerorganisation
Boltzmannstraße 3
85748 Garching
Tel (089) 2 89-1 76 80
Fax (089) 2 89-1 76 62
Internet www.abayfor.de/konwihr
http://konwihr.in.tum.de

KW 21
Forschungsinitiative Kraftwerke des 21. Jahrhunderts

Kontakt Bayern:
abayfor c/o TU München
Arcisstr. 21
80333 München
Tel (089) 2 89-2 25 38
Fax (089) 2 89-2 25 89

Kontakt Baden-Württemberg:
Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum
Institut für Verbrennungstechnik
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart
Tel (0711) 68 62-3 97
Fax (0711) 68 62-5 78
Internet www.abayfor.de/kw21

Assoziierte Mitglieder:

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

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

Fördermittelgeber aus Bayern für Forschungsverbünde:

Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie

Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz

Bayerische Forschungsstiftung

Impressum

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

Herausgeber ©:
abayfor, Arbeitsgemeinschaft der Bayerischen Forschungsverbünde
Arcisstraße 21
80333 München
Tel (089) 2 89-2 25 87
Fax (089) 2 89-2 25 89
E-Mail abayfor@abayfor.de
Internet www.abayfor.de

Copyright: 2004 abayfor

Redaktion:
Dr. Ute Berger, abayfor (verantw.)
Christine Kortenbruck, abayfor (verantw.)

Erscheinungshinweis:
„Zukunft im Brennpunkt“ erscheint einmal pro Jahr:
1. Band Juni 2002
2. Band Juli 2003
3. Band November 2004

Layout:
Hans Gärtner Kommunikation, 82515 Wolfratshausen

Druck:
Ulenspiegel Druck, Andechs

Wir danken
dem FORWISS-Förderkreis
(Förderkreis der Bayerischen Wirtschaft
für das Bayerische Forschungszentrum für
Wissensbasierte Systeme (KI) e.V.)
und dem Bayerischen Staatsministerium
für Wissenschaft, Forschung und Kunst
für die großzügige Unterstützung.