

# RWTH AACHEN UNIVERSITY FACULTY OF ENGINEERING TECHNICAL UNIVERSITY OF AACHEN BIONIK

Schnittstelle zwischen  
Natur und Technik

BERICHTE  
AUS DER  
RHEINISCH-  
WESTFÄLISCHEN  
TECHNISCHEN  
HOCHSCHULE  
AACHEN

AUSGABE 1/2008

ISSN-NR.  
0179-079X





## Wovon Sie als Kind auch träumten: Jetzt wird es Zeit, es wahr zu machen.

Sie wollten schon immer an wegweisenden Projekten mitwirken, Innovationen anstoßen, Verantwortung tragen? Bei uns können Sie das vom ersten Tag an. Einer guten Idee ist es schließlich egal, wer sie hat: der Junior oder der Abteilungsleiter. Und gute Ideen – die brauchen wir jeden Tag. Denn sie haben uns zu dem gemacht, was wir heute sind: einer der Schrittmacher bei vielen Zukunftstechnologien. Es sind Entwicklungen aus unserem Hause, die den Takt vorgeben im Mobilfunk, im Digital-Fernsehen, in der Funktechnik.

Auch bei Themen wie Flugsicherung, drahtloser Automobiltechnik oder EMV sind wir federführend – und praktisch in jedem unserer Geschäftsgebiete einer der drei wichtigsten Player auf dem Weltmarkt. Damit wir das auch bleiben, brauchen wir Leute wie Sie. So bald wie möglich. Deshalb können Sie bei uns nicht nur als frischgebackener Hochschulabsolvent (m/w), sondern auch schon während Ihres Studiums einsteigen. Als Praktikant, Werkstudent oder begleitend zu Ihrer Abschlussarbeit (Master, Bachelor, Diplom).

**ROHDE & SCHWARZ**

[www.career.rohde-schwarz.com](http://www.career.rohde-schwarz.com)

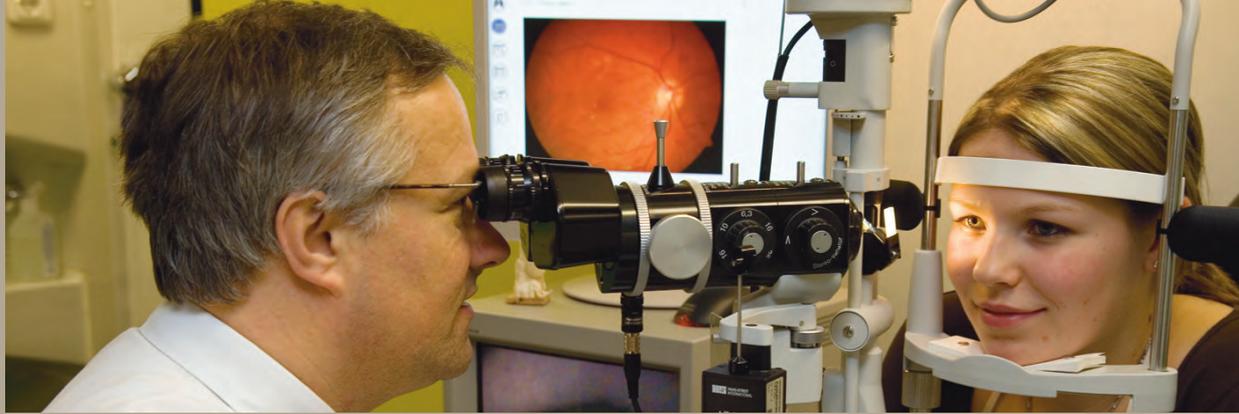


Foto: Peter Winandy

**Impressum**  
Herausgegeben  
im Auftrag  
des Rektors:  
Dezernat Presse- und  
Öffentlichkeitsarbeit  
der RWTH Aachen  
Templergraben 55  
52056 Aachen  
Telefon 0241/80-94327  
Telefax 0241/80-92324  
Pressestelle@zhv.rwth-aachen.de  
www.rwth-aachen.de

**Verantwortlich:**  
Toni Wimmer

**Redaktion:**  
Sabine Busse  
Angelika Hamacher

**Titel:**  
*Wissenschaftler des Instituts  
für Biologie II (Zoologie) und  
des Aerodynamischen Instituts  
untersuchen den leisen Flug der  
Schleiereule, um Ideen für  
zukünftige Tragflügelkonzepte zu  
entwickeln. Im Vordergrund steht  
der Einfluss biologischer Strukturen  
auf die Geräuschentwicklung  
am Tragflügel.*  
Foto: Peter Winandy

**Rücktitel:**  
*Mediziner der Augenklinik  
am Universitätsklinikum Aachen  
entwickelten ein Implantat, das  
aus der runden Kunstlinse mit  
integrierter Elektronik und  
Reizelektroden besteht.  
Dieses Implantat wurde jetzt  
erfolgreich bei den ersten  
Patienten eingesetzt.*  
Foto: Peter Winandy

**Fotos:**  
Peter Winandy

**Anzeigen:**  
print'n'press, Aachen  
jh@p-n-p.de

**Art direction:**  
Klaus Endrikat

**DTP:**  
ZAHRENDesign,  
Aachen

**Druck:**  
Brimberg  
Druck und Verlag GmbH,  
Aachen

Gedruckt auf  
chlorfrei gebleichtem  
Papier

Das Wissenschaftsmagazin  
„RWTH-Themen“ erscheint einmal  
pro Semester. Nachdruck einzelner  
Artikel, auch auszugsweise,  
nur mit Genehmigung der  
Redaktion. Für den Inhalt  
der Beiträge sind die Autoren  
verantwortlich.

Sommersemester 2008

# AUS DEM INHALT

Lernen von der Natur – Das „Zentrum Bionik Aachen“ als interdisziplinäre Plattform	6
Neue Hüfte und Schmerzen im Knie	8
Nachbildung von Stimmstörungen	12
Position und Funktion des Kehlkopfs können nichtinvasiv bestimmt werden	16
Die Schleiereule als Vorbild für neue Tragflügelkonzepte	20
Kollagen – Biomaterialdesign von Mutter Natur	22
Nanofasern für die Nervenregeneration	24
Die Aachen-IFAS-Hand	26
Bionische Venenklappen	28
Das Retina Implant ersetzt Photorezeptoren im Auge	32
Licht am Ende des Tunnels	35
Wie Pflanzen Wurzeln schlagen	36
Neurons on Chips	40
Training für Neuronale Netze	44
Evolutionäre Clustering-Algorithmen	46
Haften oder nicht haften	48
Mit Licht Werkstoffe funktionalisieren	52
Metallische Gussteile nach dem Vorbild der Natur	56
Biomechanik sorgt für maximale Festigkeit und minimales Gewicht	60
Umformtechniker walzen metallische Haifischhaut	62
Zellen mögen´s süß	66
Hormonähnlichen Umweltchemikalien auf der Spur	70
Das Insektenkarussell	74
Erfinderwerkstatt Natur	76
BIOKON – Das nationale Kompetenznetzwerk	77
Namen & Nachrichten	78

Die Natur weiß wie es geht. Lange Zeit haben die Menschen bei ihrer Suche nach neuen Lösungen für technische Fragen den Vorbildern aus Flora und Fauna zu wenig Beachtung geschenkt. Das hat sich geändert. Eine neue und respektvolle Sicht auf die Natur und die vielfachen Lösungen, die die Evolution für unterschiedliche Probleme gefunden hat, liefert die Grundlage für viele Innovationen.

Unter dem Sammelbegriff „Bionik“ analysieren immer mehr Wissenschaftler aus unterschiedlichen Fachbereichen natürliche Phänomene. Dabei haben aktuelle Analysemethoden, wie beispielsweise die hochauflösende Elektronenmikroskopie, buchstäblich neue Einsichten gefördert. Denn das Verständnis, warum beispielsweise die Haifischhaut so strömungsoptimiert ist oder welcher Aufbau manchen Pflanzenoberflächen ihre besonderen Eigenschaften verleiht, bildet die Grundlage der bionischen Forschung.

Dieses Wissen zu nutzen und die Effekte im Nachbau mit neuen Materialien zu reproduzieren, ist der nächste Schritt. Dann geht es darum, die gewonnenen Erkenntnisse mit modernen technischen Anforderungen zu kombinieren. Daraus schließlich neue Produkte mit besseren Eigenschaften zu machen, erfordert ein hohes Maß an Kreativität.

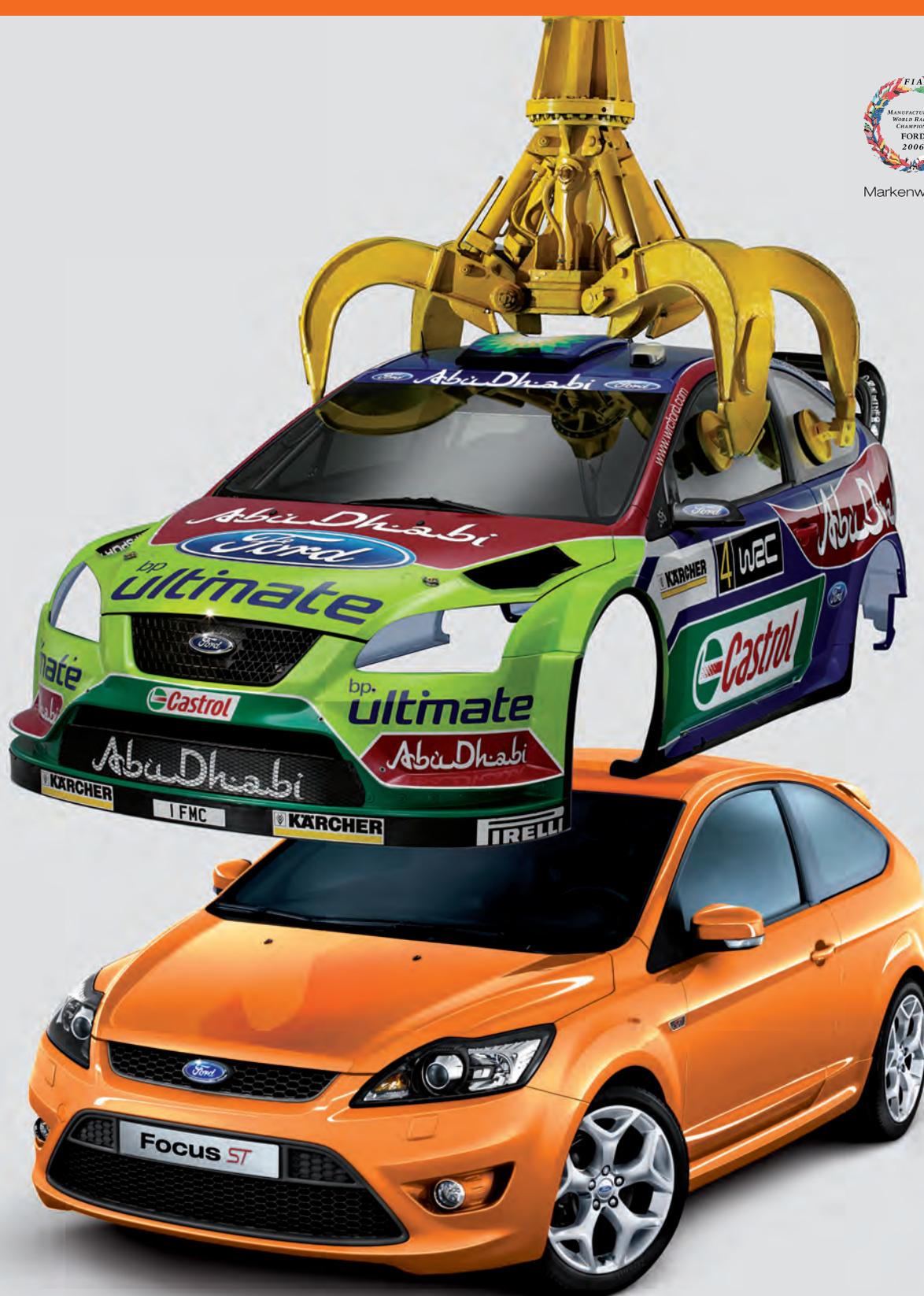
Diese Ausgabe der „RWTH-Themen“ macht deutlich, dass der Transfer am besten gelingt, wenn sich an dieser Stelle Wissenschaftler mit unterschiedlichen Kompetenzen und Sichtweisen einbringen. Die umfangreichen Möglichkeiten der interdisziplinären Zusammenarbeit an der RWTH Aachen macht das Thema Bionik für uns also besonders interessant. Zumal diese Wissenschaft noch am Anfang steht und sicher noch viele, eventuell auch verblüffende Entwicklungen hervorbringen wird.

Viel Spaß bei der Information darüber, wie wir von der Natur lernen können!

Univ.-Prof. Dr. Burkhard Rauhut



Markenweltmeister 2006 & 2007



## Treiben Sie mehr Sport.

Der neue Ford Focus ST macht es Ihnen leicht: einsteigen und Höchstleistung erleben. Schon wissen Sie, wie sich unsere Rallye-Weltmeister fühlen. Probieren Sie es aus – jetzt bei Ihrem Ford Partner.

**Ford**Focus ST

Feel the difference



# Lernen von der Natur

## Das „Zentrum Bionik Aachen“ als interdisziplinäre Plattform

# B

Bionik ist ein Schlagwort, das weite mediale Verbreitung erfahren hat. Mit diesem Begriff ist die Herausbildung innovativer Technologien nach dem Vorbild der Natur verbunden. Der Begriff Bionik stellt ein Kunstwort dar, zusammengesetzt aus den Wörtern Biologie und Technik. Aufgabe der Bionik ist, relevante Phänomene in der belebten Natur zu erkennen, sie zu beschreiben, zu abstrahieren und sie damit der technischen Umsetzung zugänglich zu machen. Bionikrelevante Erkenntnisse lassen sich auf allen Ebenen der Biologie und Medizin gewinnen - von der Ökologie über die Verhaltens-, die systemische und Zellbiologie bis zu den molekular orientierten Teilgebieten. Die Palette der Anwendungen biologischer Mechanismen reicht dabei von Organisationsformen über Konstruktionsmechanismen bis zu Mechanismen der Informationsverarbeitung. Bionik ist auch ein Zukunftssymbol der Lebenswissenschaften und ein Zeichen für den Wandel der Lebenswissenschaften in den letzten Jahren. Innerhalb der RWTH Aachen ist die Bionik ein Beispiel für die zunehmende Annäherung der Lebenswissenschaften an die seit langem hervorragend etablierten technischen Disziplinen.

6 Warum ist die Bionik so attraktiv? Technischer Fortschritt erfordert innovative, kostensparende und nicht zuletzt umweltschonende Entwicklungen. Die belebte Natur liefert Vorbilder für neue Techniken. Der Grund ist die über mehrere Jahrmilliarden wirkende Evolution, die einen Optimierungsprozess darstellt, der nach den Prinzipien von Mutation und Selektion arbeitet. Daraus haben sich oft verblüffende Lösungen ergeben, welche bis heute durch Ingenieure nicht gefunden wurden. Die durch den Lotuseffekt beschriebene Selbstreinigung, die im Bau der Haihaut enthaltene Mechanismen zur Luft- und Wasserwiderstandsreduktion aber auch der Klettverschluss sind prominente Beispiele. Zudem verspricht eine Technik, die aus der

Natur entwickelt wird, eine Technik zu sein, die im Einklang mit der Natur steht. Der Wunsch nach einer solchen Technik ist seit Jahren stark in unserer Gesellschaft.

Die Gründungsväter der Bionik sahen einen strengen Gegensatz zwischen ihrem Fach mit dem Informationsfluss von der Natur in die Technik und der technischen Biologie und der Biotechnologie, Disziplinen bei denen dieser Fluss teilweise umgekehrt ist. Die technische Biologie ist eine Biologie unter zum Teil massiven Einsatz modernster Technik. Die Biotechnologie wiederum setzt lebende Organismen zur großtechnischen Produktion vor allem schwer synthetisierbarer, organischer Substanzen ein. Die strikte Trennung zwischen diesen drei Disziplinen ist unseres Erachtens überholt, vielmehr ist die Bionik eine Schnittmenge zwischen den Lebenswissenschaften und der Technik zum wechselseitigen Nutzen.

**Das „Zentrum Bionik Aachen“**  
Der zunehmenden Bedeutung der Bionik für die Lebens- aber auch die Ingenieurwissenschaften trug die RWTH Aachen schon früh Rechnung. Nach der Etablierung des Schwerpunktes Lebenswissenschaften Ende der neunziger Jahre beschloss das Rektorat 2002 die Etablierung eines „Zentrum Bionik Aachen“. Koordinator dieses Zentrums wurde Univ.-Prof. Dr. Hermann Wagner vom Institut für Biologie II. Privatdozent Dr. Harald Luksch, ebenfalls aus dem Institut für Biologie II, wurde Geschäftsführer des Zentrums. Auch das Bundesministerium für Bildung und Forschung hatte das Potenzial der Bionik erkannt und im Rahmen der Nachhaltigkeitsförderung

das nationale Kompetenznetzwerk Bionik, kurz BIODON, ins Leben gerufen. BIODON nahm das Zentrum Bionik Aachen 2004 als Mitglied auf. Dieses hat das Ziel, die Aktivitäten im Bereich der Bionik zu bündeln und nach außen sichtbar zu machen. Außerdem findet aus dem Zentrum heraus Beratung von Schülern und Studierenden sowie die Schaffung von Lehrangeboten statt. Das Zentrum stellt Plattformen für Kontakte mit bionikinteressierten Forschern auf nationaler und internationaler Ebene bereit. Diese Plattformen sollen auch zu Industriekontakten führen.

Das Zentrum Bionik umfasst heute Interessenten aus sechs Fakultäten und mehr als 20 Instituten. Dazu gehören auch das Institut für Technische und Makromolekulare Chemie im DWI, das Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und angewandte Ökologie, das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, das Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik und die Institute für Schichten und Grenzflächen 2 und Biologische Informationsverarbeitung des Forschungszentrums Jülich.

In den letzten Jahren entstanden durch die Vermittlung des Zentrums viele Kooperationen, die in dieser Ausgabe der „RWTH-Themen“ dargestellt werden. Aus der Arbeit des Zentrums Aachen konnte im Rahmen der Biohybridforschung auch die Gründung des virtuellen Instituts für Biohybridtechnik (vIBHT) initiiert werden. Diesem Institut gehören mittlerweile die RWTH-Institute für Biologie II, für Biologie VII und für Werkstoffe der Elektrotechnik sowie die Institute für Schichten und Grenzflächen 2 und für Biologische Informationsverarbeitung des Forschungszentrums

Jülich an. Im Rahmen des virtuellen Institutes existieren Kooperationen zur Verschaltung neuronaler Zellen mit mikroelektronischen Bauteilen, die aktuell von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert werden.

Die bionische Forschung, vertreten durch das Zentrum Bionik Aachen, ist seit Jahren erfolgreich und im Wachstum begriffen. Den Vorsprung, den sich die deutsche Forschung und der Standort Aachen im Bereich der Bionik erarbeitet haben, gilt es nun zu verteidigen und auszubauen. Die dafür nötigen Kooperationen anzuregen und bei der Beschaffung der nötigen Mittel zu helfen, wird eine der wichtigen zukünftigen Aufgaben des Zentrums Bionik Aachen sein.

[www.biologie.rwth-aachen.de/bionik](http://www.biologie.rwth-aachen.de/bionik)

**Autoren:**  
Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Hermann Wagner ist Leiter des Institutes für Biologie II, Initiator und Koordinator des Zentrums Bionik Aachen.  
Dr.rer.nat. Marcus J. Wirth ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Biologie II und Geschäftsführer des Zentrums Bionik Aachen.

**Ein MTU 8000-Motor hat die Power von wie vielen Formel-1-Motoren?**

**a) ca. drei**

**b) ca. zwölf**

**c) ca. zwanzig**

**d) Formel 1 ist stärker**

## Empower your Career

### Neues schaffen. Weiter denken. Vorwärtskommen.

Aus faszinierenden Ideen machen unsere über 8.000 Mitarbeiter kraftvolle Technik – vom 10.000-kW-Dieselmotor bis zur Brennstoffzelle. Mit den Unternehmen und Marken MTU, MTU Detroit Diesel, SKL Motor, Katolight, MDE, CFC Solutions, L'Orange und Rotorion ist die Tognum-Gruppe einer der weltweit führenden Anbieter von Motoren und kompletten Antriebssystemen für Schiffe, Land- und Schienenfahrzeuge, Industrieantriebe und dezentrale Energieanlagen. Bewegen auch Sie mit uns die Welt!

Berufseinstieg, Traineeprogramm, Praktikum, Abschlussarbeit – Tognum bietet Ihnen alle Möglichkeiten. Mehr dazu in der Stellenbörse auf unserer Homepage.

### Willkommen bei Tognum in Friedrichshafen.

Senden Sie uns Ihre aussagekräftigen Bewerbungsunterlagen – gern mit der richtigen Antwort auf unsere Frage: Tognum AG • Personalmarketing • Regine Siemann • Maybachplatz 1 • 88045 Friedrichshafen  
regine.siemann@tognum.com • Tel. 07541 / 90-6513

# Neue Hüfte und Schmerzen im Knie Trickbewegungen und ihre Folgen

RWTHTHEMEN 1/2008

# G

Die Möglichkeit, sich selbstständig zu bewegen, ist Grundlage der Handlungsfähigkeit des Menschen. Gelenkschmerzen führen zu Bewegungseinschränkung, die behindern und häufig die Ausführung selbst alltäglicher Tätigkeiten erschweren. Bewegungsunsicherheit wirkt sich auf das Selbstvertrauen aus, Bewegungsbehinderungen schränken die Mobilität ein. Es ist daher dringend geboten, durch gezielte Maßnahmen die Bewegungsfähigkeit langfristig zu erhalten. Patienten kompensieren ihre Defizite durch Ausweichbewegungen, so genannte Trickbewegungen, wobei das betroffene Gelenk geschont und andere Gelenke genutzt werden. Trickbewegungen führen zwar kurzfristig zu einer Bewältigung der Bewegungseinschränkung, langfristig kommt es jedoch zu Folgeschäden an Muskeln, Bändern und knöchernen Strukturen. Insbesondere der Verlust an Lebensqualität, aber auch die mit den Bewegungseinschränkungen und deren Folgen verbundenen Kosten erfordern innovative Ansätze zur Erhaltung beziehungsweise Wiederherstellung des Bewegungsvermögens. Neue innovative Technologien, wie sie in der Abteilung Biophysikalische Messtechnik des Lehrstuhls für Angewandte Medizintechnik entwickelt werden, unterstützen den Therapeuten bei der Beurteilung und Quantifizierung dieser Trickbewegungen, sodass diese schon frühzeitig in der Behandlung des Patienten Berücksichtigung finden. Dies ist Voraussetzung für den Patienten ein weitgehend physiologisches Bewegungsmuster wiederzulerlernen und somit langfristig sein Bewegungsvermögen zu erhalten.

Das wesentliche Problem im Zusammenhang mit Bewegungsstörungen ist die objektive Bewertung der Bewegung, die der Patient tatsächlich ausgeführt hat. Hierfür stützt sich der Arzt bisher in erster Linie auf die visuelle Beobachtung der Bewegungen, eine Vorgehensweise, die im Wesentlichen durch den subjektiven Eindruck des Untersuchers geprägt ist. Neue technische Möglichkeiten, wie die

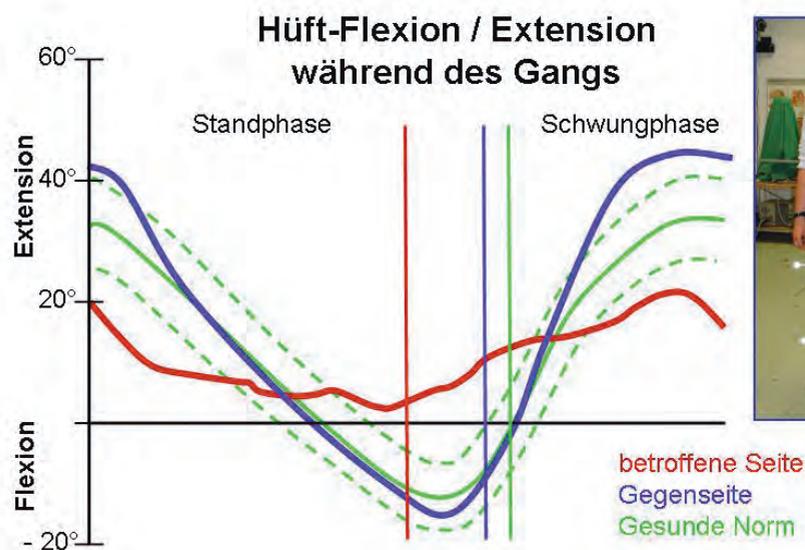


Bild 1: Kompensationsbewegung eines Patienten mit Hüftgelenkarthrose während des Gangs. Das Beispiel zeigt, dass

Patienten schmerzhafteste Bewegungseinschränkungen durch so genannte Trickbewegungen in nicht betroffenen Gelenken

kompensieren, hier das nicht betroffene Hüftgelenk der Gegenseite, dargestellt in der violetten Kurve.

dreidimensionale Bewegungsanalyse, schaffen die Grundlage für eine objektive Analyse der Bewegung des Patienten. Bei diesem optoelektronischen Messprinzip werden zunächst die Bewegung von passiven, Infrarotlicht reflektierenden Markern, die an spezielle anatomische Punkte geklebt werden, erfasst. Anschließend wird aus den Bilddaten die Bewegung der Marker im Raum dreidimensional rekonstruiert. Basierend auf einem biomechanischen Modell können dann aus den dreidimensionalen Bewegungsbahnen der jeweiligen Marker die Winkelstellungen der einzelnen Gelenke entsprechend ihrer anatomischen Achsen und deren zeitliche Änderung berechnet werden. Bild 1 zeigt beispielhaft für die untere Extremität den berechneten Beugungswinkel, den das Hüft-

gelenk während eines Schritts im Gangzyklus einnimmt. Verglichen wird hier das Bewegungsmuster eines Patienten mit einer einseitigen Hüftgelenkarthrose mit dem typischen Bewegungsmuster gesunder Probanden. Die rote Kurve zeigt die betroffene Seite, die violette Kurve die nicht betroffene Seite und die grüne Kurve das Bewegungsmuster gesunder Probanden. Neben der Bewegungseinschränkung auf der betroffenen Seite wird auch die Kompensationsbewegung auf der nicht betroffenen Gegenseite im Übergang von Schwung- zu Standphase deutlich.

Während für die unteren Extremitäten standardisierte Verfahren zur objektiven Bewertung der Bewegung und resultierender Kompensationsbewegungen klinisch etabliert

sind, stand bisher für die Beurteilung der Bewegungen der oberen Extremitäten keine äquivalente Methodik zur Verfügung. Ursache hierfür ist, dass die Bewegungen der oberen Extremitäten im Vergleich zum Gang eine große Vielfalt aufweisen und wesentlich komplexer sind. Das größte Problem stellt hierbei die Reproduzierbarkeit, und damit die Vergleichbarkeit der Bewegung dar. Das am Lehrstuhl für Angewandte Medizintechnik entwickelte Verfahren des „Isokinetischen 3D-Trackings“ bietet erstmals die Möglichkeit, die Bewegungen der oberen Extremitäten reproduzierbar und standardisiert zu erfassen und zu beschreiben, wobei trotzdem dem Patienten die Möglichkeit gegeben wird, genau definierte Bewegungen eigenständig und frei in seiner Bewe-



Bild 2: 3D-Tracking zur standardisierten und reproduzierbaren Erfassung der Bewegungen oberer Extremitäten. Ein Roboter gibt eine dreidimensionale Bewegungsbahn vor, der der Patient folgen muss. Eine spezielle Sensorik erfasst die Qualität der Bewegungsdurchführung.

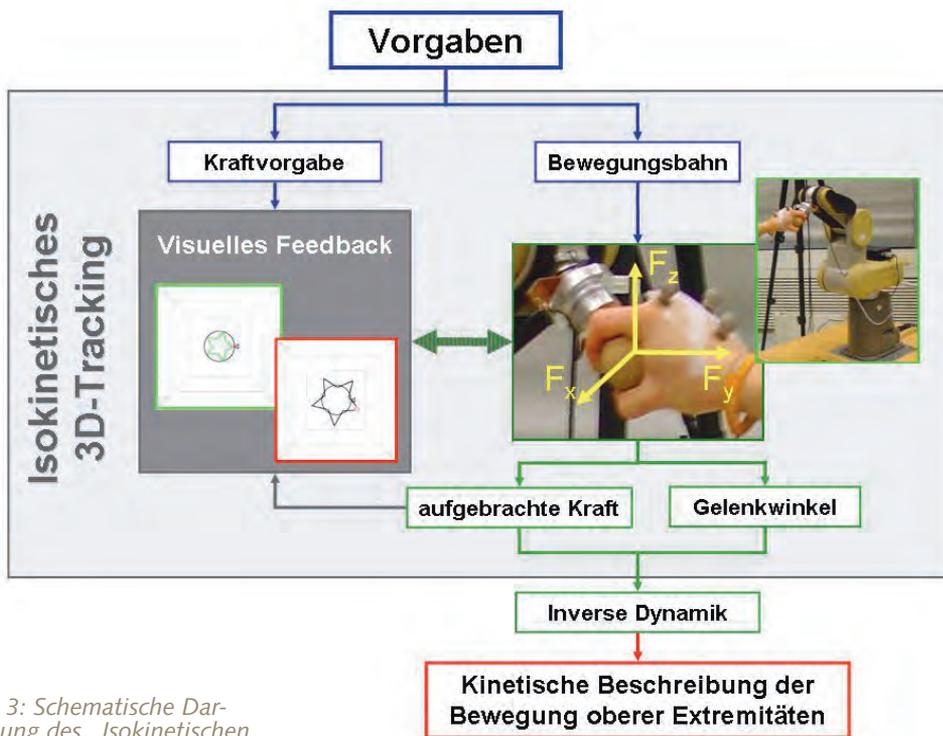


Bild 3: Schematische Darstellung des „Isokinetischen 3D-Trackings“. Dieses liefert die zur Berechnung der Kinetik der oberen Extremität wesentliche Information über Bewegungsausführung und extern wirkende Kräfte.

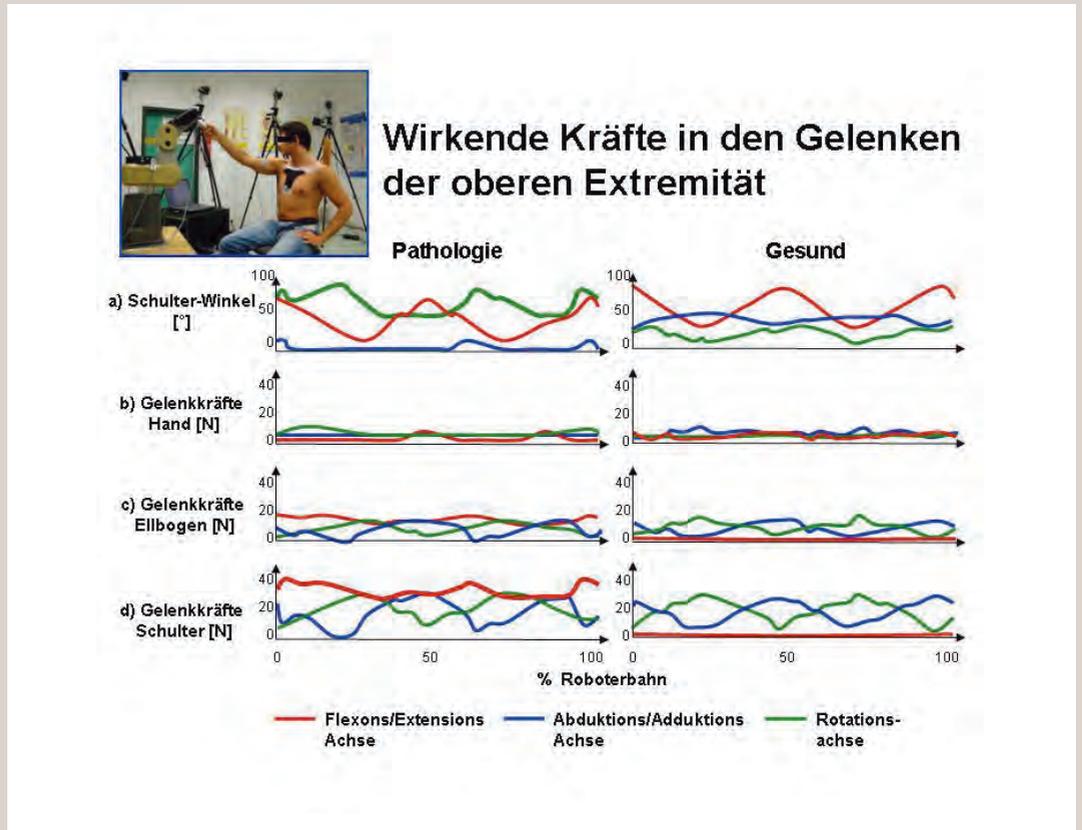
gungsstrategie durchzuführen. Beim Isokinetischen 3D-Tracking gibt ein Roboter dem Patienten eine definierte, individuell an seine Bedürfnisse angepasste dreidimensionale Bewegungsbahn vor, der der Patient mit einem Zeiger folgt, siehe Bild 2. Die Vorgabe der Bewegungsbahn durch den Roboter bietet den Vorteil, dass der Weg, auf dem sich die Hand des Patienten befindet, und die Geschwindigkeit, mit der diese Bewegung erfolgt, klar definiert sind. Welche Gelenke der oberen Extremität der Patient zur Positionierung der Hand nutzt und welche Drehungen um die anatomischen Achsen er zur Bewältigung der Bewegungsaufgabe wählt, bleibt dem Patienten selbst überlassen. Auf diese Weise kann der Patient seine individuellen Trickbewegungen nutzen, um die vom

Roboter vorgegebene Bewegung trotz Bewegungseinschränkungen in einigen Gelenken erfolgreich auszuführen. Um die individuellen Trickbewegungen quantitativ zu erfassen, wird beim Isokinetischen 3D-Tracking zeitgleich zur durch den Roboter geführten Bewegung eine dreidimensionale Bewegungsanalyse der oberen Extremität durchgeführt, siehe Bild 2. Hierdurch werden die Trickbewegungen, die der Patient wählt, um dem Roboter folgen zu können, in medizinisch relevanten Größen, wie anatomische Gelenkwinkel, quantitativ erfasst. Sind zusätzlich zu den Gelenkwinkeln die von außen auf den Menschen wirkenden Kräfte bekannt, können die in den einzelnen Gelenken entlang der anatomischen Achsen wirkenden Kräfte und Momente berechnet wer-

den. Hierfür wurde beim Isokinetischen 3D-Tracking der Roboter mit einem Kraft-Momenten-Sensor versehen. Anstelle des Zeigers umfasst der Patient nun aktiv den Kraft-Momenten-Sensor, sodass eine Kopplung zwischen Patient und Roboter entsteht, siehe Bild 3, und die vom Patienten aktiv aufgetragenen Kräfte und Momente in sechs Freiheitsgraden erfasst werden können. Um auch hier eine Reproduzierbarkeit der Versuchsdurchführung zu ermöglichen, müssen die vom Patienten aufzubringenden Kräfte in Richtung und Betrag vorgegeben werden und von ihm kontrolliert werden können. Hierfür wurde ein visuelles Feedback implementiert, welches während der robotergeführten Bewegung die Daten des Kraft-Momenten-Sensors verarbeitet und aus diesen in

Echtzeit dem Patienten Rückmeldung gibt, siehe Bild 3. Auf diese Weise kann neben einer kinematisch eindeutigen und reproduzierbaren Bewegung auch eine kinetisch eindeutige und reproduzierbare Bewegung realisiert werden. Aus den externen Kräften sowie aus den Gelenkwinkeln können, unter Berücksichtigung der individuellen Körpermaße, auf der Basis der inversen Dynamik die internen Kräfte und Momente berechnet werden, die innerhalb jedes Gelenkes entlang der anatomischen Gelenkachsen wirken. Diese gelenkinternen Kräfte erlauben eine Beurteilung der Belastung der einzelnen Gelenke während der Bewegungsausführung. Weiterhin ist bekannt, dass eine pathologische Erhöhung der gelenkinternen wirkenden Kräfte zu einer langfristigen Schädigung

Bild 4: Vergleich einer physiologischen Flexions-/Extensionsbewegung der Schulter mit einer pathologischen Bewegung eines Patienten mit geburts-traumatischer Lähmung des Plexusnervs. Die vermehrte Innenrotation der Schulter des Patienten führt zu einer Erhöhung der wirkenden Kräfte insbesondere im Schultergelenk. Diese unphysiologischen Kraftverhältnisse führen zu frühzeitigem Gelenkverschleiß, der zu weiteren Bewegungsdefiziten führen kann.



gung des Gelenkes führt. Bild 4 vergleicht die während einer Schulter-Flexions-/Extensionsbewegung auftretenden gelenk-intern wirkenden Kräfte eines gesunden Probanden mit denen eines Patienten mit einer geburts-traumatischen Lähmung des Plexusnervs. Als Folge der Lähmung kann der Patient die vom Roboter vorgegebene Bewegung nur dann ausführen, wenn er sein Bewegungsdefizit durch eine vermehrte Innenrotation der Schulter ausgleicht, siehe Bild 4a, grüne Kurve. Die Isokinetischen 3D-Trackingversuche zeigen jedoch, dass diese Trickbewegung zu einer Erhöhung der wirkenden Gelenkkräfte primär entlang der Flexions- / Extensionsachse des Ellbogens und des Schultergelenkes führt, siehe Bild 4c und d, rote Kurven.

Betrag und Richtung der gelenk-internen Kräfte erlauben die Abschätzung eines Risikos für Folgeschäden an den Gelenken, in denen die Kompensationsbewegungen stattfinden. Für den Arzt oder Therapeuten stellt dies eine wichtige Zusatzinformation für seine Therapieplanung dar, da im Sinne einer langfristigen Erhaltung der Bewegungsfähigkeit nicht nur die Bewegung in den betroffenen Gelenken wiederher-

gestellt, sondern auch in den umliegenden Gelenken erhalten werden sollte.

Das Isokinetische 3D-Tracking bildet die dringend erforderliche Plattform zur quantitativen Erfassung und Beurteilung der Folgen von Trickbewegungen. Dieses führt zu einer verbesserten Diagnostik, aber erstmals auch zu einer gezielten und effektiven Therapie von Patienten mit Bewegungsstörungen der oberen Extremitäten. Die Entwicklung des Isokinetischen 3D-Trackings wurde maßgeblich von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt. Das Verfahren wird zukünftig für eine an die individualisierten Bedürfnisse und Defizite des jeweiligen Patienten angepasste Rehabilitation eingesetzt werden.

[www.ame.hia.rwth-aachen.de](http://www.ame.hia.rwth-aachen.de)

**Autoren:**

Privatdozentin Dr.rer.nat. Catherine Disselhorst-Klug ist Leiterin der Abteilung Biophysikalische Messtechnik des Lehrstuhls für Angewandte Medizintechnik im Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik. Dipl.-Ing. Fabian Kohler und Dipl.-Ing. Nikica Popovic sind Wissenschaftliche Mitarbeiter der Abteilung Biophysikalische Messtechnik des Lehrstuhls für Angewandte Medizintechnik im Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik. Univ.-Prof. Dr.med. Dipl.-Ing. Thomas Schmitz-Rode ist Inhaber des Lehrstuhls für Angewandte Medizintechnik.

## Wild Thing.

Wer hier mehr als eine Druckmaschine sieht, bringt genau die Leidenschaft mit,  
die wir von unseren Bewerbern erwarten.



Der Rhythmus unserer Druckmaschinen ist Musik in unseren Ohren. Wenn Sie sich vorstellen können, als Ingenieur oder Wirtschaftswissenschaftler, gerne auch als Diplomand oder Praktikant, auf der Bühne des Weltmarktführers mitzuspielen, bewerben Sie sich über den Link Karriere auf [www.heidelberg.com](http://www.heidelberg.com)

**HEIDELBERG**

# Nachbildung von Stimmstörungen

Die verbale Kommunikationsfähigkeit des Menschen wird durch die Erzeugung informationstragender Schallsignale realisiert. Das im Kehlkopf generierte primäre Schallsignal kann als Quelle des im Ansatzrohr geförmten komplexen Stimm- und Sprachsignals verstanden werden. Die Mehrzahl aller Stimmstörungen kann auf die fehlende oder unphysiologische Tonuseinstellung der inneren und äußeren Kehlkopfmuskeln zurückgeführt werden, welche die für die Schwingung der Stimmlippen nötigen Randbedingungen schafft. Es resultiert eine Störung der Stimmgebung, die sich zum Beispiel in Dysphonie in Form von Heiserkeit, gepresster oder gehauchter Stimme oder gar Aphonie, der Stimmlosigkeit, zeigen kann. Es ist aus der logopädischen Praxis bekannt, dass bei Stimmpatienten oft auch Verspannungen der Halsmuskulatur zu beobachten sind. Oft bewirkt eine Lockerung der Nacken-Schultermuskulatur eine Verbesserung der Stimmfunktion. Der Zusammenhang zwischen der Aufhängung des Stimmapparats und der Stimmgebung wird über die komplexe Wechselwirkung muskulärer Kräfte hergestellt, deren Dynamik die Bewegungen des Stimmapparats steuert und deren Gleichgewichte die Einstellung spezifischer Stimm-situationen bewirkt.

In einem Projekt wird eine Nachbildung der Kräfteverteilung im Stimmapparat bei der Phonation mit einer Computersimulation vorgenommen. Der Kehlkopf wird aus vielen einzelnen Elementen als Körper nachgebildet, der an verschiedenen Positionen mit den umgebenden Organen über elastische Verbindungen zusammenhängt. Innerhalb des Kehlkopfes können zahlreiche Muskeln, Knorpel und Sehnen die Position der Stimmlippen in weiten Bereichen verändern, siehe Bild 1, und verschiedene Funktionen wie das Öffnen und Verschließen der Glottis beim Atmen oder Phonieren bewirken. Die Stimmlippen selbst sind innerhalb des Kehlkopfes ebenfalls als elastisches Element nachgebildet,

das jedoch nicht nur passiv auf Kräfte reagiert, sondern wegen der Muskeleigenschaft selbst aktiv seine Länge und Spannung ändern kann. Die Aktivität der Vokalismuskeln und anderer relevanter Muskeln kann mit Änderung der Muskel-Stimulationsraten zwischen Null und 100 Prozent gesteuert werden. In Bild 2 ist die Lage und Aufhängung der Stimmlippen im Finite-Elemente-Modell dargestellt.

Die Position und Spannung der Stimmlippen ist das Resultat der Kräfte, die von den umgebenden Geweben auf die Stimmlippen wirken, sowie der Kräfte, die die Stimmlippen aktiv durch Kontraktion des Vokalismuskels erzeugen. Für die Phonation ist die Zusammenführung der Stimmlippen nötig, damit der Lungendruck die Schwingung der Stimmlippen anregen kann. Dies kann durch Drehung und Zusammenführung der in Bild 2 als graue Dreiecke dargestellten Aryknorpel geschehen.

Mit einem Multimassenmodell, siehe Bild 3, wird die Schwingung der Stimmlippen als System gekoppelter Feder-Masse-Systeme simuliert. Die unterschiedlichen Gewebe der Stimmlippen (Muskel, Ligament/Sehne und Schleimhaut/Mucosa) werden hierbei mit kleinen Masseblöcken repräsentiert. Das System wird über den Lungendruck zu Schwingungen angeregt und somit die Erzeugung stimmhafter Laute erlaubt. Eine Vielzahl physikalischer und physiologischer Parameter erlaubt die Anpassung des Stimmlippenmodells an unterschiedliche Phonationsformen. Neben der reinen Schwingungsfunktion ist auch die Erzeugung glottalen Rauschens in dem Modell berücksichtigt, das insbesondere bei heiseren Stimmen einen wesentlichen Anteil am Stimmklang hat.

Über die Aufhängepunkte sind das Finite-Elemente-Modell und das Multimassenmodell miteinander gekoppelt. Die Kopplung der beiden Modelle ermöglicht eine direkte visuelle und auditive Beurteilung des Einflusses von Änderungen der Kräfteverteilung, die sich am

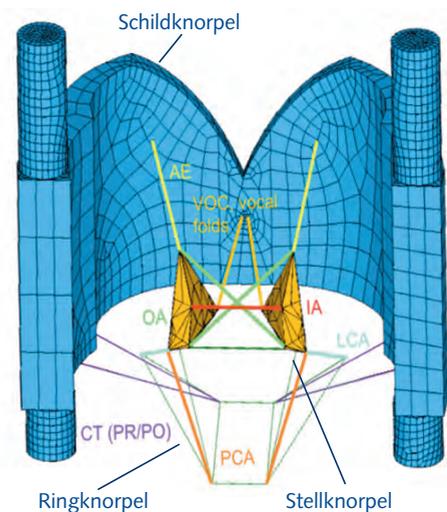


Bild 1: Finite-Elemente-Modell des Kehlkopfes.

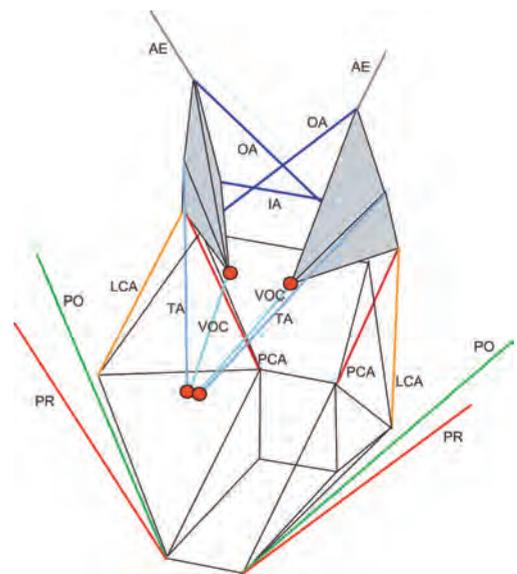


Bild 2: Darstellung der kraftübertragenden Elemente innerhalb des Kehlkopfes. Die Aufhängepunkte der Stimmbänder sind rot hervorgehoben.

# Mediziner und Ingenieure arbeiten an einem Finite-Elemente-Modell des Kehlkopfs

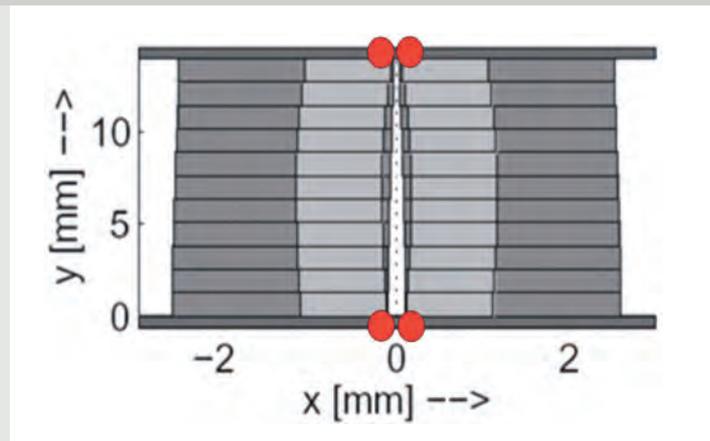
Menschen nicht oder nur unzureichend kontrolliert durchführen lassen. Variationsrechnungen erlauben darüber hinaus eine Abschätzung des potenziellen Einflusses der oft langwierigen Therapie spezifischer Muskeln oder Muskelgruppen.

Die grundlegende Funktion der Abduktion und Adduktion, das Öffnen und Schließen der Stimmlippen, konnte mit der Simulation bereits übereinstimmend mit der endoskopischen Beobachtung nachgebildet werden. Während die für diese Bewegungen nötigen Kräfte beim Menschen während der Manöver nicht gemessen werden können, erlaubt die Simulation eine Auswertung der Zeitverläufe der Spannungsänderungen, siehe Bild 4.

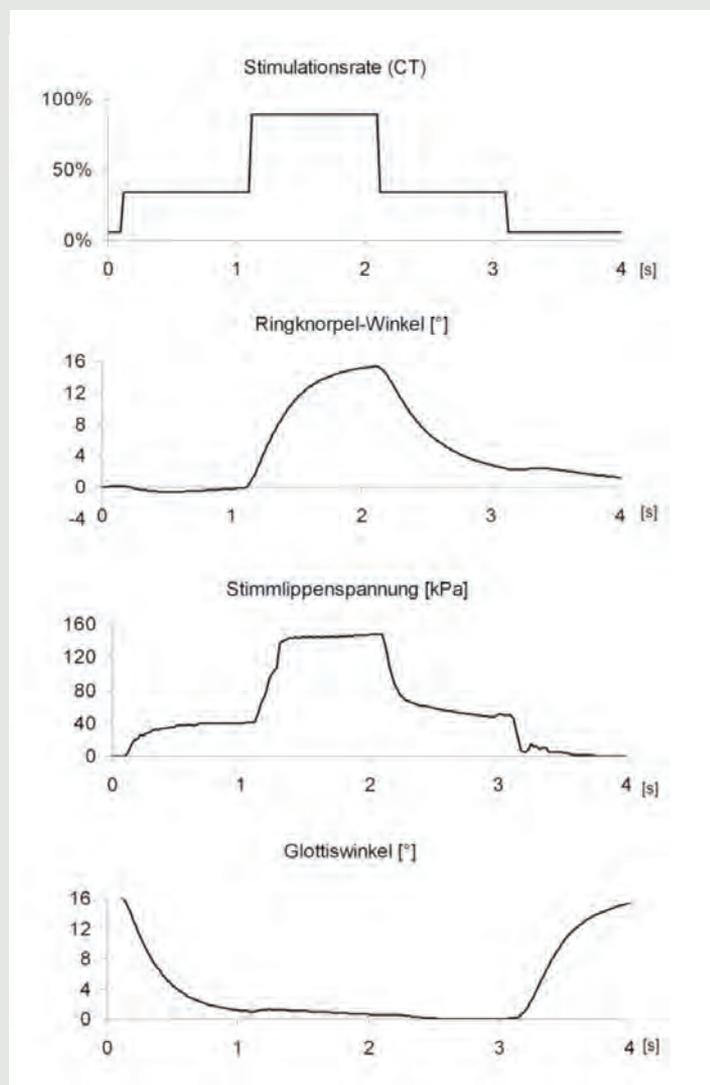
Ziel des Projekts ist die individuelle Nachbildung der Spannungszustände inner- und außerhalb des Kehlkopfes sowohl bei gesunden als auch bei stimmgestörten Menschen unter verschiedenen Halsstellungen und Schulter-/Arm-Belastungen. Zur Parametrisierung der Modelle werden bisher physiologische Daten aus Messungen an Präparaten herangezogen. Künftig werden auch zeitlich und räumlich hochaufgelöste MRI-Aufnahmen zur Ermittlung geometrischer Kehlkopfparameter Verwendung finden, die eine präzisere Anpassung der Modelle an die physiologischen Gegebenheiten jedes Patienten erlauben.

In weiteren Kooperationen zwischen dem Lehr- und Forschungsgebiet für Phoniatrie und Pädaudiologie und dem Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik wird gegenwärtig die Kombination der beiden Modelle als gekoppeltes Fluid-Struktur-Modell durchgeführt. Die Integration der beiden Ansätze würde eine bidirektionale Kopplung der Kräfteabhängigkeiten bewirken, so dass sowohl die Auswirkung der externen Kräfte auf die Stimmlippenschwingung und den Phonationsschall als auch die Veränderung der Kräfteverhältnisse außerhalb des Kehlkopfs bei Veränderung der Stimmlippenkonfiguration untersucht werden können.

*Bild 3: Aufsicht auf das Multi-massenmodell „VOX“. Die dunkelgrauen Elemente stellen die Gewebe von Vokalismuskel und Ligament dar, die hellgrauen Elemente repräsentieren die Mucosa. Die Aufhängepunkte im Finite-Elemente-Modell sind rot gekennzeichnet.*



*Bild 4: Resultierende Winkel c) und Spannungen d) der Stimmlippen bei Stimulation a) der Drehung der Aryknorpel b) bei einer zeitlichen Folge von Adduktions- und Abduktionsbewegung.*



**Autoren:**  
 Dr.-Ing. Malte Kob ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehr- und Forschungsgebiet Phoniatrie und Pädaudiologie. Univ.-Prof. Dr. med. Christiane Neuschaefer-Rube betreut das Lehr- und Forschungsgebiet Phoniatrie und Pädaudiologie und ist Direktorin der Klinik für Phoniatrie, Pädaudiologie und Kommunikationsstörungen. Dr.-Ing. Christoph Butenweg und Dipl.-Ing. Andreas Gömmel sind Wissenschaftliche Mitarbeiter am Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik.



ANSYS



0.0025 0.0075 0.01 (m)

DE 09:41





*Bild 5: Wissenschaftler des Lehr- und Forschungsgebiets Phoniatrie und Pädaudiologie und des Lehrstuhls für Baustatik und Baudynamik diskutieren physikalische und numerische Modelle der menschlichen Stimmerzeugung.  
Foto: Peter Winandy*

# Nichtinvasive Erfassung von Position und Funktion des Kehlkopfs

## Ein neues Verfahren zur Untersuchung von Stimm- und Schluckstörungen

**D**er Kehlkopf, medizinisch Larynx, ist für drei lebenswichtige Funktionen von Bedeutung. Einerseits öffnet er in Atemstellung den Luftstrom zu der Lunge und verhindert durch Verschluss das Einatmen von Flüssigkeiten oder festen Körpern. Andererseits ist er aktiv am Schluckvorgang beteiligt und vollführt beim Schlucken eine komplexe Positionsänderung sowie einen synchronen Verschluss. Schluckstörungen können als Symptom bei zahlreichen nervalen oder muskulären Erkrankungen sowie bei zentralen Koordinationsstörungen auftreten und vielfältige Ursachen haben, beispielsweise Trauma, Entzündung, Autoimmunerkrankung oder Infarkt. Schließlich ist der Kehlkopf die Quelle unseres Stimmschalls, der aus der periodischen Modulation des Luftstroms beim Ausatmen durch die Stimmlippen entsteht. Bei der Stimmgebung ist sowohl die Stellung des Kehlkopfs als auch der genaue zeitliche Verlauf der Stimmlippenöffnung zur Beurteilung der Stimmfunktion von Bedeutung. So ändern sich bei Sängern die Kehlkopfstellung mit der gesungenen Tonhöhe und die Art der Stimmlippenschwingung beim Registerwechsel. Bei einer Stimmstörung ist der Verlauf der Stimmlippenschwingung oftmals gestört; es treten Unregelmäßigkeiten der Schwingung oder Veränderungen der Zeitverhältnisse beim Öffnen beziehungsweise Schließen der Stimmlippen auf.

Zur dynamischen Erfassung der Kontaktfläche zwischen den Stimmlippen, der Glottis, wird neben visuellen Methoden wie der Endoskopie auch das Verfahren der Elektrolottographie, kurz EGG, eingesetzt. Hierbei wird ein hochfrequenter Wechselstrom auf Höhe des Kehlkopfes durch den Hals geleitet und die zeitabhängige Änderung der Impedanz, des elektrischen Widerstands, registriert. Bei der EGG lässt sich mit der einkanalen Messung des Impedanzverlaufs die zeitabhängige Änderung des Öffnungsgrades der Stimmlippen ermitteln, da die Impedanz bei geöffneten Stimmlippen höher ist als bei

geschlossenen. Mit dieser Funktion kann aus dem Verhältnis der Öffnungs- und Verschlussphasen einer Schwingungsperiode ein objektives Maß für die Beurteilung der Stimmlippenschwingung gewonnen werden. Das EGG-Verfahren wird bereits als Hilfsmittel zur Diagnose von Stimmstörungen sowie zur Register-einteilung beim Singen eingesetzt.

Ungeachtet der Häufigkeit von Stimm- oder Schluckstörungen gibt es in der klinischen Anwendung bisher noch kein Instrumentarium, um die Zeitdynamik von Öffnung und Verschluss der Stimmlippen simultan zur Lage des Larynx zu erfassen. Die in Bild 1 dargestellte simultane Erfassung der Kehlkopfstellung und EGG-Funktion mit Hilfe eines neuen Messverfahrens könnte in der phoniatischen Praxis zur objektiven Beurteilung des Erfolgs einer Stimm- oder Schlucktherapie beitragen.

Das hier vorgestellte Verfahren nutzt die bei der Frequenz von etwa zwei Megahertz besonders hohe elektrische Leitfähigkeit des menschlichen Körpers, um zeitliche und örtliche Änderungen der Gewebspositionen zu erfassen. Obwohl die Änderungen – zum Beispiel bei der Phonation – mit mehreren hundert Hertz recht schnell erfolgen können, ist ein elektrisches Verfahren wegen der mit Lichtgeschwindigkeit übertragenen Impedanzänderungen hinreichend schnell, um auch eine mehrdimensionale Bewegung der Gewebe zu erfassen. Zum Einsatz kommt hierzu ein Zeitmultiplex-Verfahren mit mehrkanaliger, sequenzieller Abtastung von bis zu 36 Strompfaden, die den Bereich des Kehlkopfs durchlaufen. Die Stromstärke ist so gering gewählt, dass gemäß der Vorgaben des Medizinproduktegesetzes keinerlei Beeinträchtigung des Gewebes auftreten kann. Die in einem ersten Prototyp eingesetzten Elektrodenarrays sind in Bild 2 dargestellt.

Die Elektroden werden beidseitig des Kehlkopfes mit einem elastischen Klettband am

Hals befestigt, was eine Messung sowohl in aufrechter als auch liegender Position erlaubt. Die Erzeugung, Umschaltung und Zusammenführung der Einzelsignale zu einem Gesamtsignal erfolgt in eigens angefertigten Schaltungen unter Verwendung spezieller elektronischer Schalter, die von einem Mikrocontroller angesteuert werden und ein schnelles und zugleich verzerrungsarmes Schalten des Hochfrequenzsignals erlauben. Die Positionsbestimmung und Verlaufsanalyse des EGG-Signals erfolgt auf einem PC mit der Software „LABVIEW“.

In Bild 3 ist beispielhaft der Verlauf des Schalldrucks, des EGG-Signals und des Höhsignals für den Verlauf einer gesunden Singstimme beim Übergang Bruststimme – Kopfstimme – Bruststimme während des Auf- und Abwärtssingens dargestellt. Die Auswertung des akustischen Sprachsignals im oberen Graphen lässt allein noch keine hinreichende Aussage über den Registerübergang des Kehlkopfs beim Singen zu. Aus dem Verlauf des EGG-Signals ist jedoch deutlich der Übergang zwischen Brustregister (starke Amplitude der Stimmlippenschwingung, Vollschwingung) und Kopfregister (geringe Amplitude, Randkantenschwingung) zu erkennen. Die simultane Darstellung des Höhenverlaufs des Kehlkopfs erlaubt eine zeitliche Zuordnung der Kehlkopfstellung zu dem akustischen Signal. Somit kann eine objektive Beurteilung dieses physiologischen Vorgangs bei der Durchführung von Registerübergängen erfolgen, die bislang nur subjektiv erfasst werden konnten.

Künftige Entwicklungen sollen die mit dem obigen Verfahren erfasste Bewegung des Kehlkopfs mit Hilfe eines Modells während der Messung darstellen und somit eine unmittelbare quantitative Beurteilung von Pathologien erlauben. Für diese Form der Darstellung ist jedoch die Berücksichtigung der individuellen physiologischen Gegebenheiten nötig, um die Positionserfassung bei jedem Men-

schen kalibriert durchführen zu können.

Diese Arbeiten wurden mit Unterstützung des Instituts für Technische Akustik durchgeführt und werden in laufenden Forschungsprojekten am Lehr- und Forschungsgebiet Phoniatrie und Pädaudiologie sowie der Arbeitsgruppe Biophysikalische Messtechnik am Lehrstuhl für Angewandte Medizintechnik fortgesetzt. Das Projekt wurde im Rahmen des START-Projekts 23/05 von der Medizinischen Fakultät der RWTH gefördert.

[www.phoniatrie.ukaachen.de](http://www.phoniatrie.ukaachen.de)  
[www.ame.hia.rwth-aachen.de](http://www.ame.hia.rwth-aachen.de)

#### Autoren:

Dr.-Ing. Malte Kob ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehr- und Forschungsgebiet Phoniatrie und Pädaudiologie. Dipl.-Ing. Tobias Frauenrath ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehr- und Forschungsgebiet Experimentelle Magnetresonanzbildgebung und am Lehr- und Forschungsgebiet Phoniatrie und Pädaudiologie. Dr.med. Oliver Goldschmidt war Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Klinik für Phoniatrie, Pädaudiologie und Kommunikationsstörungen. Univ.-Prof. Dr. med. Christiane Neuschaefer-Rube betreut das Lehr- und Forschungsgebiet Phoniatrie und Pädaudiologie und ist Direktorin der Klinik für Phoniatrie, Pädaudiologie und Kommunikationsstörungen. Privatdozentin Dr.rer.nat. Catherine Disselhorst-Klug ist Leiterin der Abteilung Biophysikalische Messtechnik des Lehrstuhls für Angewandte Medizintechnik am Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik.

## Larynxposition



## EGG-Darstellung

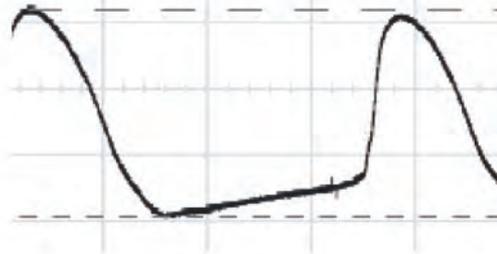


Bild 1: Simultane Darstellung der Position des Kehlkopfes, MRT-Bild links, und des Öffnungszustands der Stimmlippen, EGG-Signal rechts.

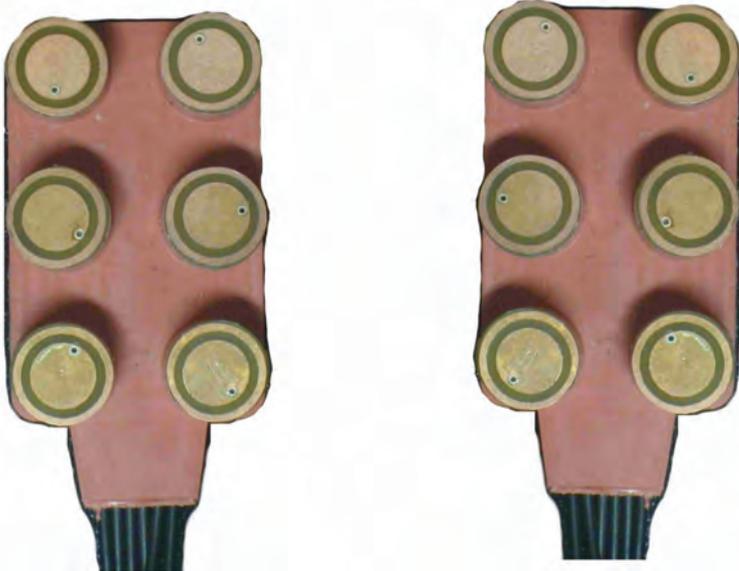


Bild 2: Elektrodenarray zur Abtastung von bis zu 36 verschiedenen Strompfaden.

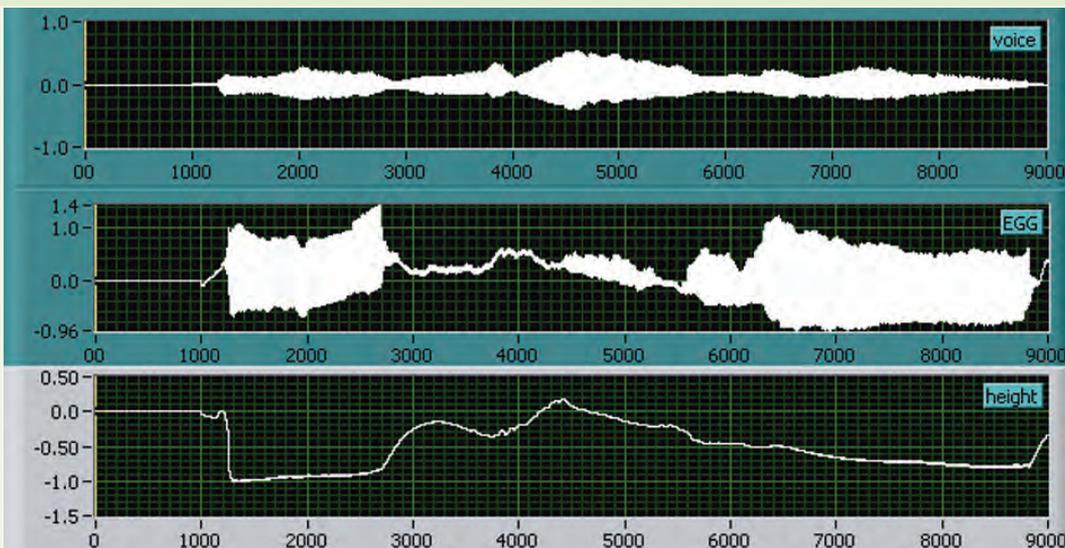


Bild 3: Verlauf von Schalldrucksignal (oben), Elektroglottogramm (Mitte) und Höhe des Kehlkopfes (unten) beim Singen eines Glissandos (tief-hoch-tief) mit Registerwechseln.



*Bild 4: Ein neues Verfahren zur nicht-invasiven Untersuchung der Kehlkopf- und Stimmfunktion wurde in Zusammenarbeit zwischen dem Lehr- und Forschungsgebiet Phoniatrie und Pädaudiologie mit dem Lehrstuhl für Angewandte Medizintechnik entwickelt.  
Foto: Peter Winandy*



Hier erfahren Sie mehr – [www.porsche.de](http://www.porsche.de) oder Telefon 01805 356 - 911, Fax - 912 (EUR 0,14/min).

**An welche Klassenkameraden  
erinnern Sie sich noch:  
an die Eierköpfe oder die Querköpfe?**

**Der Cayman.**



**PORSCHE**

# Die Schleiereule als Vorbild für neue Tragflügelkonzepte

Lautlos gleitet ein dunkler Schatten über die Köpfe hinweg und nur der Windhauch hinterlässt eine Gänsehaut bei den Beobachtern... So oder ähnlich könnte ein Krimi beginnen. Womit sich jedoch Wissenschaftler des Instituts für Biologie II (Zoologie) und des Aerodynamischen Instituts beschäftigen, hat wenig mit Gruselgeschichten zu tun. Der lautlose Flug der Eulen hat die Menschheit schon seit jeher in ihren Bann gezogen, positiv wie negativ. So wird die Eule einerseits als Todesvogel gefürchtet, andererseits genoss sie göttliche Verehrung.

Warum aber fliegen Eulen so leise? Diese Frage versuchen Biologen und Ingenieure jetzt gemeinsam zu klären. Dabei steht die Grundlagenforschung im Mittelpunkt. Eine spätere Anwendung in Form vom neuem Design für Tragflügel oder Rotorblätter für Windkraftanlagen ist nicht ausgeschlossen. Eulen sind Spezialisten der Schalllokalisation. Sie haben verschiedene anatomische und morphologische Anpassungen, die es ihnen ermöglichen, ihre Beute, Mäuse und Kleinsäuger, präzise zu orten und zu schlagen. Am auffälligsten ist der Gesichtsschleier. Er ist bei der Schleiereule sehr stark ausgeprägt und war auch in der deutschen Sprache namensgebend für die Art. Die Federn des Schleiers sind so angeordnet, dass sie den Schall wie ein Parabolspiegel einfangen und an die Ohren weiterleiten. Die Ohren selbst sind asymmetrisch angeordnet. Das rechte Ohr sitzt tiefer und ist nach oben gerichtet, das linke Ohr sitzt höher und zeigt nach unten. Diese Eigenschaften ermöglichen es der Eule Schallquellen sehr präzise zu orten, und zwar nicht nur ruhig auf einem erhöhten Platz sitzend, sondern auch während des Fluges. Die Eule kann aber nur dann erfolgreich sein, wenn selbstproduzierte Geräuschquellen ausgeschaltet werden. Auch hier zeigt die Eule interessante Anpassungen. So ist der gesamte Körper bis hin zu den Füßen von einem sehr weichen

Gefieder bedeckt. Betrachtet man die Flügel der Eulen genauer, so kann man auch hier besondere Strukturen finden. Die Flügel haben eine elliptische Form und sind im Vergleich zu anderen, etwa gleichschweren Vögeln, wie zum Beispiel Tauben, deutlich vergrößert. Dies ermöglicht es der Eule langsamer zu fliegen. Die elliptische Form der Eulenflügel sorgt dabei auch bei geringer Geschwindigkeit für genügend Auftrieb. Tauben hingegen fliegen mit höheren Geschwindigkeiten. Sie haben ein spitzes Flügelende und produzieren ein deutlich vernehmbares Fluggeräusch. Vor allem beim Losfliegen kann man hören, wie die Flügelspitzen aneinander schlagen. Zusätzlich produzieren die Federn, beziehungsweise die Rami, ein Geräusch, während sie beim Flügelschlagen aneinander reiben. Dies liegt am morphologischen Aufbau des Flügels, der aus dachziegelartig übereinander liegenden Federn besteht. Das Handgelenk unterteilt den Flügel in einen Hand- und Armbereich. Die Fingerknochen sind reduziert und nur der Daumen bildet in Form der Alula oder Vorflügel eine funktionelle Einheit. Der Armbereich, bestehend aus Ober- und Unterarm, stellt mit den Knochen, Muskel- und Sehngewebe den dicksten Bereich des Flügels dar. Er ist bedeckt mit mehreren Reihen von Deckfedern. Über so genannte Flughäute zwischen Ober- und Unterarm kann der Vogel aktiv die Wölbung des Flügels beeinflussen. Über die Stellung des Ellbogengelenks wird die Größe und Form des Flügels verändert. Durch diese Veränderungen jedoch reiben die Federn zwangsläufig übereinander. Vogelfedern bestehen aus einem Kiel und einer Vorder- und Hinterfahne. Die Fahnen sind wiederum aus einzelnen Rami zusammengesetzt, die sich über Haken- und Bogenstrahlen verbinden. Durch die parallele Anordnung der Rami entsteht eine Rillenstruktur, die bei Reibung Geräusche produziert, ähnlich wenn man mit einem Fingernagel über ei-

nen Kamm fährt. Eulenfedern sind auf ihrer Oberseite samtig weich. Unter dem Rasterelektronenmikroskop kann man die Ursache dafür erkennen. Die Hakenstrahlen, die die einzelnen Rami miteinander verbinden, haben an ihrer Spitze eine haarähnliche Verlängerung. In der Masse bildet sich so eine flaumartige Oberfläche, die die Geräuschenstehung unterdrückt und somit dafür sorgt, dass die Federn leise übereinander gleiten können. Die Oberfläche der Taubenfedern ist seidenmatt glänzend. Der Ramusverbund bildet eine glatte und regelmäßige Kante rings um die Feder. Auch hier unterscheiden sich Taube und Eule. Bei Eulen sind die Haken- und Bogenstrahlen im äußersten Bereich der Feder nicht mehr miteinander verbunden. Die Rami verjüngen sich zur Spitze hin und bilden somit einen Fransensaum, der die gesamte Feder umgibt. Es gibt also keine scharfen Kanten, die die Luft laut durchschneiden, mit einer Ausnahme: der Hakenkammstruktur. Diese besondere Struktur lässt sich auf der Vorderseite derjenigen Federn finden, die auch die Vorderkante des Flügels bilden. Die einzelnen Rami formen an ihrer Spitze sägezahnähnliche Auszackungen. Inwieweit diese Strukturen die Luftströmungen über den Flügel beeinflussen wird am Aerodynamischen Institut untersucht.

Da es aber schwierig ist, an einem echten Flügel Aussagen über den Einfluss jeder einzelnen Struktur zu machen, wird die Morphometrie der Flügel und Federn und deren Materialeigenschaften im Institut für Biologie II (Zoologie) erfasst. Anschließend werden die Strukturen aus Kunststoff nachgeformt und einzeln im Windkanal untersucht. Für die Herstellung eines künstlichen Flügelmodells wurden zunächst verschiedene Flügel von Schleiereulen in Gleitflugstellung präpariert und mit Hilfe von optischen 3D-Scannern eingescannt. Als Grundlage für die Präparation dienten Aufnahmen von frei gleitfliegenden Eulen um die Flügelstellung zu definieren.

Von diesen 3D-Modellen wurden Modelle für den Windkanal konstruiert. Die Flügel wurden nach der Digitalisierung senkrecht zur Vorderkante des Armbereichs in eine Vielzahl von Schnittebenen zerlegt. Jeder Schnitt stellte so ein Profil des Flügels an einer definierten Stelle der Spannweite dar. Die Schnitte wurden mathematisch beschrieben, sodass alle Profile zusammengenommen die Geometrie des Eulenflügels wiedergeben und dabei die Bedingungen für Windkanalversuche einhalten. Das Modell wurde also soweit angepasst, dass die Eigenschaften der Eulenflügel erhalten blieben, aber insgesamt ein Flügelmodell entstand, das den Anforderungen von Windkanalversuchen genügt. Im natürlichen Vorbild bestehen immer Irregularitäten die auf die dicken Kiele der Federn und kaputte oder verschmutzte Federn zurückzuführen sind. Ein weiterer Vorteil des künstlichen Flügels ist es, ihn mit geeigneten Befestigungsmöglichkeiten und mit Messequipment ausstatten zu können. Außerdem müssen Modelle für Windkanalversuche technische Bedingungen, wie zum Beispiel eine reproduzierbare Positionierung im Windkanal und eine Möglichkeit zur Verstellung des Anstellwinkels, erfüllen.

Technisch lässt sich ein Flügelprofil im Wesentlichen durch die folgenden drei Größen beschreiben: die Wölbungslinie, die Dickenverteilung und die Profiltiefe. Die Wölbungslinie ist die Linie, die genau zwischen der Ober- und Unterseite des Profils liegt. Die Dickenverteilung gibt den Abstand zwischen der Wölbungslinie und der Ober- beziehungsweise der Unterseite an. Die Profiltiefe ist der Abstand zwischen Vorderkante und der Hinterkante eines Profils. Um den Einfluss einzelner Strukturen besser untersuchen zu können, wurde zusätzlich zu einem dreidimensionalen Flügelmodell auch ein Modell mit einem konstanten Profil konstruiert, welches eine vorwiegend zweidimensionale Umströmung aufweist. Vergleicht man dieses Flügelprofil



mit technischen Flügelprofilen, so zeigt sich, dass der Eulenflügel im vorderen Bereich deutlich dicker ist, dafür aber zur Hinterkante hin schnell sehr dünn wird. Technische Flügelprofile, die mit dem der Taube vergleichbar sind, haben eine etwas gleichmäßigere Dickenverteilung. Die Flügelgeometrie der Eule eignet sich aufgrund ihrer großen Dicke, der großen Flügelfläche und dem nahezu elliptischen Grundriss für einen Langsamflug mit hoher Manövrierfähigkeit. Dünne, spitz zulaufende Flügelgeometrien hingegen mehr für hohe Flugeschwindigkeiten.

Der künstliche Flügel wurde mittels Rapid Prototyping hergestellt. Dies ist ein Fertigungsverfahren, welches die virtuellen 3D-Modelle der Flügel schnell und präzise in ein Werkstück umsetzt. Dazu wird ein lichtaushärtender Kunststoff von einem Laser Schicht um Schicht ausgehärtet, bis ein Urmodell entsteht. Das Urmodell des Eulenflügels wurde abgeformt, um verschiedene Flügelmodelle herstellen zu können. Dadurch ist es möglich, die speziellen, rekonstruierten Strukturen der Eule einzeln oder in Kombinationen anzubringen. Zuerst wurde ein Flügelmodell ohne strömungsbeeinflussende Strukturen im Windkanal untersucht. Zum Einsatz kamen hierbei verschiedene Messtechniken wie Ölanstriche, Druckmessungen und Particle-Imaging Velocimetry – kurz PIV –, um die Eigenschaften des künstlichen Flügels unter aerodynamischen Aspekten zu betrachten. Sobald die Windkanal-Experimente an diesem Flügelmodell abgeschlossen sind, sollen verschiedene Applikationen, wie zum Beispiel die Hakenkammstruktur oder die samtige Oberfläche, an den Flügel angebracht werden. Durch einen Vergleich mit den bisher erzielten Ergebnissen soll es dann möglich sein, Rückschlüsse auf den strömungsmechanischen Effekt der einzelnen Strukturen und somit auch auf eine mögliche Geräuschreduzierung zu ziehen.

Zukünftig sollen die Morphometrie und die Materialei-

genschaften des Eulenflügels und der Federn noch detaillierter beschrieben werden. In Freiflugexperimenten mit Eulen wird die Form und die Stellung der Flügel im Gleitflug erfasst, um die verwendeten Flügelmodelle zu überprüfen und gegebenenfalls zu überarbeiten. Auf Basis dieser Daten sollen neue strömungsbeeinflussende Strukturen auf den Flügelmodellen angebracht und im Windkanal auf ihre Wirksamkeit untersucht werden.

Als gemeinschaftliches Ziel soll in Zusammenarbeit des Instituts für Biologie II (Zoologie) und des Aerodynamischen Instituts ein umfassendes Bild der Mechanismen des leisen Eulenfluges erstellt werden. Insbesondere der Einfluss der speziellen Strukturen des Eulenflügels auf die Umströmung soll geklärt werden um die gewonnenen Erkenntnisse beim Bau von innovativen Tragflügeln zu berücksichtigen.

Wenn irgendwann einmal Flugzeuge als leise Schatten über unsere Köpfe hinweg gleiten, so haben sich unsere kühnsten Träume erfüllt und der lautlose Flug wird die Menschheit weiterhin in seinen Bann ziehen.

[www.bio2.rwth-aachen.de](http://www.bio2.rwth-aachen.de)  
[www.aia.rwth-aachen.de](http://www.aia.rwth-aachen.de)

#### Autoren:

Dipl.-Biol. Thomas Bachmann ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Biologie II (Zoologie).  
Dipl.-Ing. Stephan Klän ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Aerodynamischen Institut.

Anzeige

[www.sparkasse-aachen.de](http://www.sparkasse-aachen.de)

STANDORT HIER

Auch kleine Impulse  
haben grosse  
Wirkung.

 Sparkasse  
Aachen

Mit der Initiative „Standort: hier“ unterstützt die Sparkasse Aachen aktiv den Strukturwandel in der Region. Wir fördern die Realisierung innovativer Ideen in technologieorientierten Unternehmen, stellen Wagniskapital bereit und helfen beim Aufbau einer neuen Unternehmenskultur: Mit Projekten wie „Schüler werden Unternehmer“, mit einer intensiven Gründungsberatung, mit dem von uns initiierten Gründerkolleg oder aber mit dem Wettbewerb StartUp.

**Standort: hier – Mit der Sparkasse für die Region.**

# Kollagen – Biomaterialdesign von Mutter Natur

Selbst als noch so guter Naturwissenschaftler oder Ingenieur ist die eigene schöpferische Leistungsfähigkeit nicht im Entferntesten zu vergleichen mit dem, was „Mutter Natur“ uns durch die Evolution an fertigen Schöpfungen zu bieten hat. Deshalb liegt es nahe, wenn Wissenschaftler sich an diesen Schöpfungen orientieren, von ihnen lernen und sie im Rahmen der Bionik innovativ für neue Anwendungen nutzen. So ging es Wissenschaftlern am Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik an der RWTH auch, die in enger Kooperation mit Partnern in der Medizinischen Fakultät bionische Prinzipien eingesetzt haben, um neuartige Biomaterialien für die Medizin zu entwickeln. Dabei entstand als Hochschulausgründung auch die Matricel GmbH, in der die klinische Produktentwicklung und Produktzulassung verfolgt wird und die heute sehr eng mit verschiedenen Hochschulinstituten und Kliniken der RWTH Aachen kooperiert.

Aber was genau ist der neuartige Ansatz und worin liegt die medizinische Innovation? Die Medizin war bisher oft geprägt vom Gedanken der Ersatzteilmedizin, wie man sie von technischen Systemen her kennt: Ist beispielsweise eine Herzklappe, ein Kniegelenk, oder ein Hüftgelenk geschädigt, so werden sie durch künstliche Prothesen ersetzt. Weil diese Prothesen nicht „leben“, ist es nur eine Reparatur mit begrenzter Haltbarkeit. Nichtsdestotrotz kann die Reparatur lebensrettend sein, wie im Fall des Herzklappenersatzes. Natürliche Systeme hingegen können sich zu einem gewissen Maß selbst „regenerieren“, indem beispielsweise durchtrennte Blutgefäße nachwachsen und so die Gewebsversorgung wieder sicherstellen. Aus diesen Erkenntnissen ist eine ganz neue biomedizinische Forschungsdisziplin entstanden, die so genannte „Regenerative Medizin“ oder etwas enger gefaßt, das „Tissue Engineering“. Ziel ist es, erkrankte oder zerstörte Körpergewebe oder Organe tatsächlich zu regenerie-



Bild 1: Das strukturierte Biomaterial aus Kollagen wird hergestellt durch das Wachstum von fingerförmigen Eiskristallen, hier gelb dargestellt, durch eine Kollagendispersion (1A).

Bei der anschließende Gefrier-trocknung wird das Eis sublimiert, also gasförmig ohne zu schmelzen, so dass offenporöse Kollagenleitstrukturen entstehen (1B). Die weißen Kolla-

genschwämmchen (1C) müssen im Tissue Engineering zur Geweberegeneration mit patienteneigenen Zellen besiedelt werden (1D), bevor sie therapeutisch zum Einsatz kommen können.

ren. Hierzu werden heute bereits patienteneigene Zellen in spezialisierten Zellkulturlabors vermehrt und so stimuliert, dass sie auf resorbierbaren Matrices implantiert werden können und im Körper die Regeneration des zerstörten Gewebes bewirken.

Erste Beispiele für den medizinischen Erfolg dieser neuen Methoden sind die Hautregeneration bei Verbrennungsoffern und die Knorpelregeneration nach traumatischen Gelenkknorpelverletzungen. Dabei ist die klinisch zugelassene Kollagenmembran der Matricel eines der ersten Produkte in Europa und Australien, das im Tissue-Engineering zur Regeneration von Gelenkknorpel im Kniegelenk eingesetzt wurde.

Aber wie kommt man zu einem solchen Produkt und wo und wie kann man dabei von der Biologie profitieren? Vereinfachend dargestellt ist die Aufgabe dreigeteilt: Man muss ein zellverträgliches, resorbierbares Biomaterial finden, diesem Material anschließend die für die Regeneration notwendige Struktur geben und es schließlich mit Zellen besiedeln, die die Regeneration fördern. So einfach wie es klingt, ist es aber leider nicht und viele der Entwicklungen befinden sich noch in einem frühen Forschungsstadium. Hier seien einige eigene Aspekte der Entwicklung dargestellt:

Menschliches Gewebe besteht in der Regel aus verschiedenen, zum Teil sehr spezialisierten Zellen, die eingebettet sind in einer extrazellulären Matrix. Das Biomaterial muss diese fehlende oder zerstörte

extrazelluläre Matrix somit zumindest in der Anfangsphase unmittelbar ersetzen, bis die körpereigenen Zellen eine neue extrazelluläre Matrix produziert haben und das implantierte Biomaterial abgebaut haben. Beim Menschen besteht die extrazelluläre Matrix zu einem überwiegenden Teil aus verschiedenen Kollagentypen, bei denen der Kollagentyp I überwiegt. Dieses Faserprotein lässt sich aus tierischen Quellen gewinnen und durch technologische Prozesse zu hochaufgereinigten Faserstrukturen verarbeiten, die frei von tierischen Begleitproteinen sind und durch implementierte Prozessschritte in höchstem Maße mikrobiologisch sicher sind. Im Gegensatz zu künstlich hergestellten Materialien erkennen die Zellen das „vertraute“ Kollagen, können es besiedeln und bei Bedarf durch körpereigene Enzyme spalten und durch zelluläre Prozesse restlos abbauen. Somit reagiert der Körper auf Kollagen sehr natürlich – im Gegensatz zur Reaktion auf manche resorbierbare Kunststoffe, die ebenfalls für Tissue-Engineering-Anwendungen in Erwägung gezogen werden.

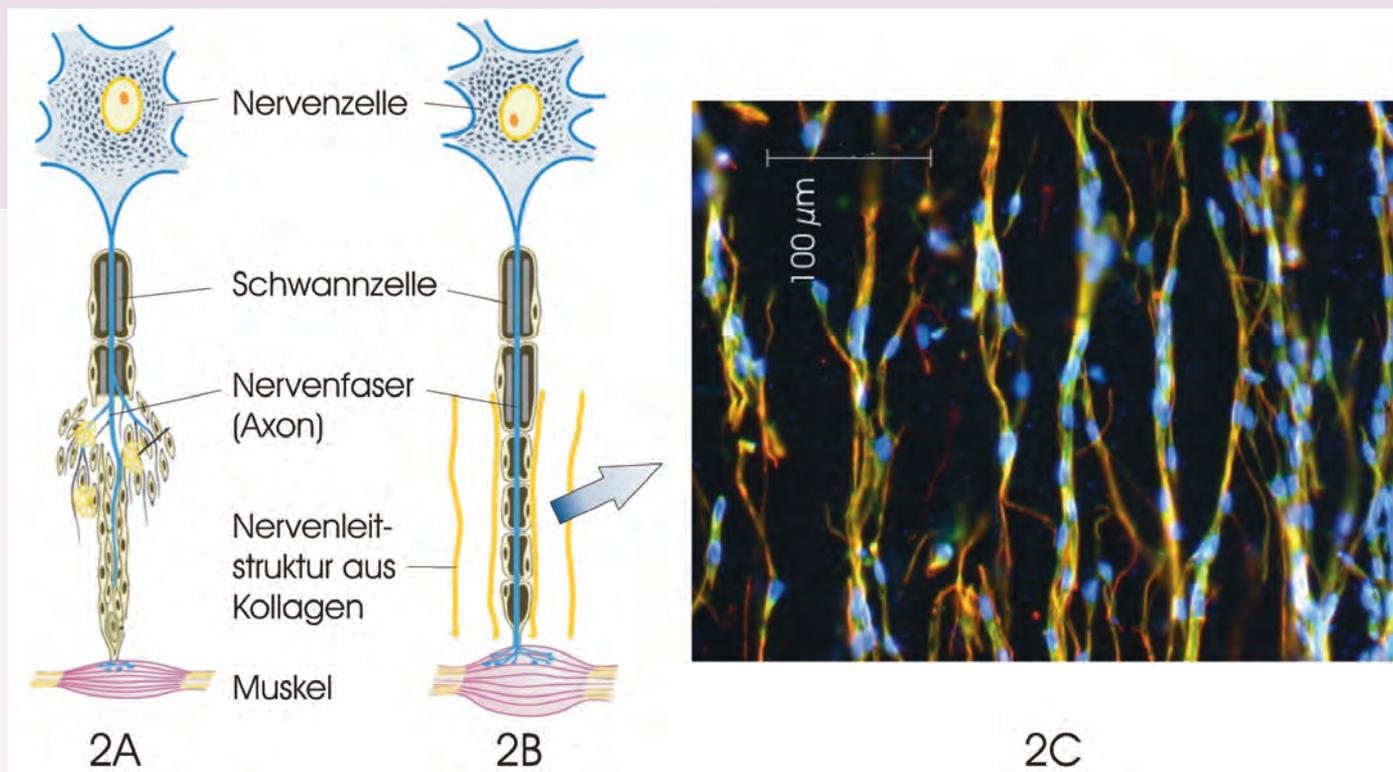
Neben der reinen Materialfrage spielt für das erfolgreiche Tissue-Engineering die dreidimensionale Struktur des Trägermaterials eine entscheidende Rolle. Auch hier lassen sich aus dem biologischen Vorbild sehr leicht die Erfordernisse ableiten. Für manche klinische Anwendungen werden dünne, fast zweidimensionale Folien oder Membranen erforderlich, wie zum Beispiel als Abdeckmem-

bran bei der Knorpelregeneration, als Kapselersatz im Schultergelenk oder zum Verschluss eines Bauchwanddefekts. Im Verlaufe des Regenerationsprozesses wird die ursprüngliche Membran vollständig resorbiert und durch das neugebildete Gewebe ersetzt. Entscheidend ist dabei, dass durch geeignete Vernetzung des Kollagens die Synthese neuen Gewebes genau auf die Kollagenabbaurate abgestimmt ist, damit es nicht zum Implantatversagen kommt. Im Idealfall wird eine Reoperation – wie bei nicht-resorbierbaren Materialien beispielsweise zur Entfernung eines Knochen nagels oder nach Implantatverschleiß – nicht notwendig.

Damit ein dreidimensionales Biomaterial für das Tissue Engineering geeignet ist, muss es – neben der Zellverträglichkeit – insbesondere eine offene Porenstruktur aufweisen, um ein tiefes Einwandern körpereigener Zellen und auch eine Einsprossung von sich neu bildenden Blutgefäßen ohne Barrieren zu ermöglichen. Für viele Anwendungen muss die Porenstruktur zudem eine Leitschienenfunktion erfüllen, damit beispielsweise ein Nervenwachstum entlang dieser Struktur gefördert wird.

Matricel hat zu diesem Zweck eine Methode entwickelt und patentiert, die in Bild 1 schematisch dargestellt ist. Zunächst wird eine wässrige Dispersion aus Kollagen hergestellt, in der die Kollagenfasern homogen verteilt sind. Bei dem anschließenden kontrollierten Einfrieren werden fingerförmige Eiskristalle erzeugt, die durch

# Neue Behandlungskonzepte mit zellbesiedelten Kollagenträgern im Tissue Engineering



die Dispersion wachsen. Dabei werden die Kollagenfasern von den Eisfingern verschoben und konzentrieren sich dadurch in den Zwischenräumen zwischen den Eiskristallen auf. Bei der anschließenden Gefrierdrying verschwindet das Eis durch Sublimation. Zurück bleibt das offenporige Material, das den Zellen eine Leitstruktur bietet. Durch die Prozessführung beim Einfrieren lässt sich auch die Porengröße im Kollagenschwamm auf die Anforderungen der Zellen einstellen. Die bisherigen Forschungsprojekte und Forschungsk Kooperationen zeigen auf, dass auf Basis dieser durchgängig zellbesiedelbaren Kollagenschwämme die Züchtung von vielerlei Gewebstypen wie beispielsweise Knochen, Haut, Fett und Muskel vorstellbar erscheint. Im Bereich Hautersatz sind schon klinische Studien geplant, um bei Schwerebrandverletzten eine Regeneration der Dermis zu erreichen. Exemplarisch sei abschließend ein aktuelles Kooperationsprojekt der Matricel zur Nervenregeneration mit der Medizinischen Fakultät der RWTH Aachen dargestellt, bei dem viele relevante Aspekte einer Tissue-Engineering-Verfahrensentwicklung beleuchtet werden.

Nervendefekte treten häufig als Folge von Verletzungen oder

Tumoroperationen auf und führen zu Lähmungen oder Gefühlsausfällen mit oft erheblichen Folgeschäden. Außer der mikrochirurgischen Transplantation von körpereigenen Nerven als Interponat („Überbrückungsstück“) stehen bei langstreckigen peripheren Nervendefekten bislang keine erfolgreichen Therapien zur Verfügung. Im zentralen Nervensystem gibt es bei chronischen Schädigungen praktisch noch gar keine Therapieansätze. In dem von Matricel mit den klinischen Partnern entwickelten Konzept zur Regeneration durchtrennter Nervenfasern im peripheren Nervensystem werden nach einem patentierten Verfahren Kollagenträger mit einer inneren Röhrenstruktur hergestellt und anschließend mit Schwanzzellen – den natürlichen Hüll- und Stützzellen im Nerven – besiedelt. In Bild 2 ist das Konzept erläutert sowie ein mikroskopischer Ausschnitt eines solchen besiedelten Kollagenträgers gezeigt. Durch das längsorientierte Wachstum der Schwanzzellen und durch die Ausschüttung von Wachstumsfaktoren wird das gerichtete Nervenwachstum gefördert. Aktuelle Tierimplantationsstudien mit besiedelten Kollagenträgern zeigen, dass die Aussprossung der Nervenfasern in die Leitstruktur erfolgt und dass die regenerieren-

den Nervenfasern den Muskel tatsächlich erreichen und stimulieren können. Zudem konnte mit Forschungspartnern in der Neurologie sogar gezeigt werden, dass durch die Zellbesiedelbarkeit und Leitstruktur des Kollagenschwamms bei Besiedlung mit der richtigen Zellart selbst bei Rückenmarksverletzungen ein Regenerationspotenzial besteht. So werden selbst für Querschnittslähmungen vielleicht in nicht allzu ferner Zukunft durch regenerative Technologien neue Behandlungskonzepte vorstellbar.

Das Forschungsprojekt wird im Rahmen der „BioChance-PLUS“-Ausschreibung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Stichwort „PeriMaix“ gefördert.

[www.plastische-chirurgie-aachen.de](http://www.plastische-chirurgie-aachen.de)  
[www.matricel.de](http://www.matricel.de)

**Autoren:**  
 Dr.-Ing. Ingo Heschel,  
 Dr. rer. nat. Sven Möllers,  
 Dipl.-Ing. Frank Schügner,  
 Dr. Leon Olde Damink sind für die Matricel GmbH tätig.  
 Dr.med. Ahmet Bozkurt ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Klinik für Plastische Chirurgie, Hand- und Verbrennungschirurgie am Universitätsklinikum Aachen.

*Bild 2: Nach einer Nervenverletzung im peripheren Nervensystem versuchen die Nervenzellen durch Aussprossen von Axonen den Muskel zu erreichen, damit dieser wieder elektrisch stimuliert werden kann. Bei kurzen Nervendefektstrecken gelingt dies entweder von selbst (2A) oder durch eine direkte Naht des durchtrennten Nerven. Bei längeren Defektstrecken braucht man ein Transplantat eines anderen zu opfernden körpereigenen Nervs, oder ein Biohybrid, das aus einer zellverträglichen Kollagenmatrix mit einer Vielzahl innerer Leitröhren besteht, als gelbe Linien in 2B, in denen patienteneigene Schwanzzellen angesiedelt sind. Die Schwanzzellen fördern durch die Ausschüttung von Wachstumsfaktoren das gerichtete Nervenwachstum durch die Leitstruktur zum Muskel und umschließen die Axone. Die mikroskopische Aufnahme (2C) zeigt einen Ausschnitt eines solchen Biohybrids, in dem die mit Schwanzzellen besiedelte senkrecht orientierte Kollagenschwammleitstruktur gut zu erkennen ist.*

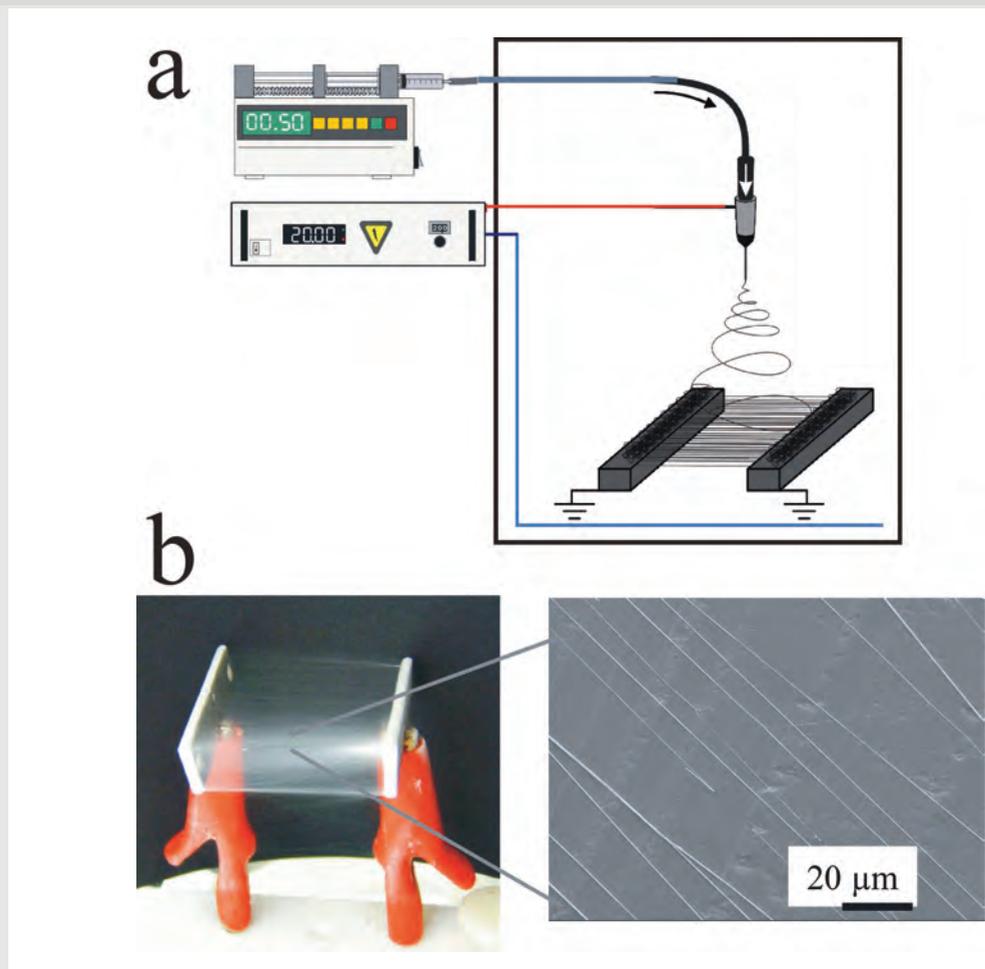
# Nanofasern für die Nervenregeneration

## Zoologie, Makromolekulare Chemie und Neurologie kooperieren bei der Entwicklung eines künstlichen Nervenimplantats

# B

Bei Schnittverletzungen der Hände, Arme und Beine können auch die Nerven verletzt werden. Dies geschieht häufiger als man denkt. Solche Nervenläsionen führen zu bleibenden Schädigungen, wenn sie nicht erfolgreich operiert werden. Zum Glück können überlebende Neurone des peripheren Nervensystems ihre Fortsätze, die Axone, regenerieren. Dazu brauchen sie aber eine regenerationsförderliche Umgebung und auch eine Leitstruktur, die nachwachsende Nervenfasern dorthin führen, wo sie einen Muskel oder die Haut wieder innervieren sollen. Eine solche, gut geeignete Leitungsbahn gibt es, wenn zwei durchtrennte Nerven wieder zusammennäht werden können. Tatsächlich ist die beste Umgebung für Nervenregeneration ein durch Verletzung aktivierter peripherer Nerv, und deshalb besteht die beste verfügbare Therapie zur Überbrückung größerer Verletzungen aus der Transplantation eines körpereigenen Nervs. Häufig wird dazu der Nervus suralis aus dem Unterschenkel gewählt.

Natürlich entsteht hier ein anderes Problem. Nach der Transplantation fehlt der Nerv im Bein, so dass sensorische Defizite auftreten, zum Beispiel Sensibilitätsstörungen an der Fußaußenseite. Außerdem ist eine zweite Operation nötig, bei größeren Verletzungen reicht das Material nicht, und der Suralisnerv kann ja selbst betroffen sein. Die Transplantation von fremdem Spendergewebe bringt das Problem der Immunabstoßung mit sich. Aus diesen Gründen ist es wünschenswert, künstliche Implantate zu entwickeln. Dies ist das Fernziel eines gemeinsamen Forschungsprojekts, das in einer Kooperation von Arbeitsgruppen des Instituts für Biologie II (Zoologie), dem Institut für Technische und Makromolekulare Chemie und dem Universitätsklinikum Aachen verfolgt wird. Zurzeit befindet sich das Projekt auf dem Niveau der Grundlagenforschung, doch die geplante Anwendung ist klar: Es wird eine Leitstruktur aus



biologisch abbaubaren Materialien angestrebt, die steril gelagert und bei Bedarf implantiert werden kann.

### Regeneration im peripheren Nervensystem

Bei der natürlichen Regeneration eines peripheren Nervs befinden sich die Neurone im Rückenmark oder in Ganglien in der Nähe des Rückenmarks. Die durch die Verletzung von ihnen getrennten Fasern, die Axone, degenerieren zwar, dafür werden aber neue Axone gebildet, die in die Peripherie wachsen. Das ist nur möglich, wenn sie von anderen Zellen unterstützt werden. Der wichtigste Zelltyp bei dieser Interaktion sind die so genannten

Schwannschen Zellen. Deren Hauptfunktion besteht im gesunden Nerv in der elektrischen Isolation der Axone. Eine implantierbare, künstliche Brücke muss also das Einwandern der körpereigenen Schwannszellen fördern und außerdem eine Leitstruktur für die geordnete Regeneration der Nervenfasern bilden. Wie kann man solche Leitstrukturen herstellen? Aus welchem Material sollen sie bestehen?

### Herstellen von biologischen Leitstrukturen durch Elektrospinnen

Mit Hilfe der Technik des Elektrospinnens werden langgestreckte Fasern produziert, die in paralleler Orientierung zwi-

*Bild 1: Durch Elektrospinnen können orientierte Fasern aus biokompatiblen Materialien erzeugt werden.*

schen zwei Elektroden gesammelt werden, siehe Bild 1. Diese Fasern haben einen Durchmesser von etwa 0,5 Mikrometern und sind damit etwas dünner als die regenerierenden Axone selbst. Verschiedene Materialien sind für das Elektrospinnen geeignet. Verwendet werden nur biologisch abbaubare Fasern, zum Teil völlig künstliche Polymere oder Mischungen mit Molekülen aus der natürlichen extrazellulären Matrix. Um die biologische Aktivität dieser Leitstrukturen

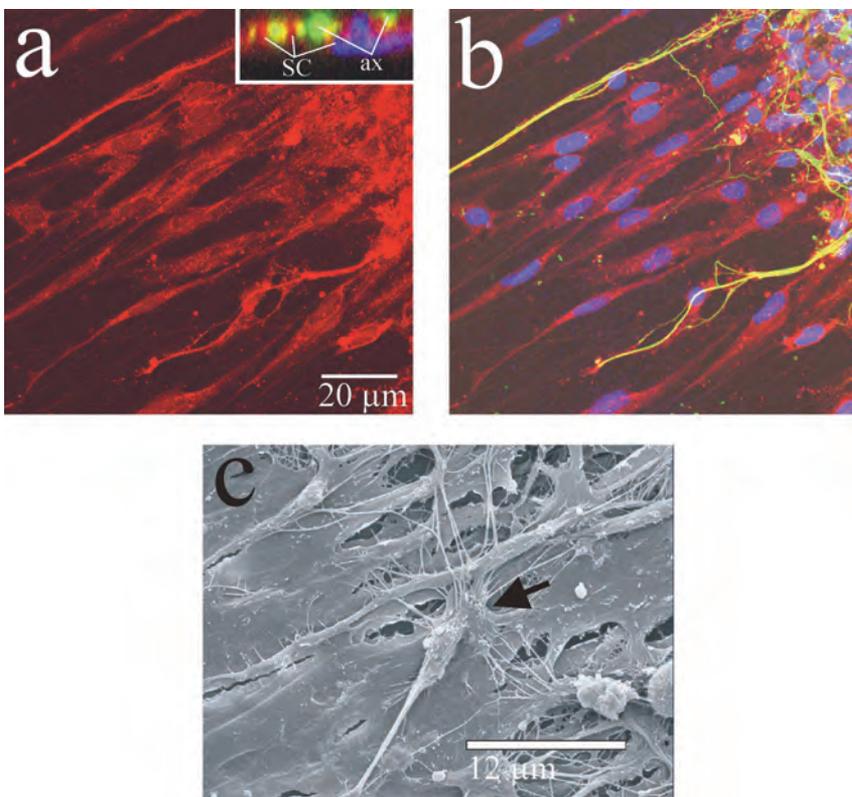


Bild 2: Regeneration von Nervenfasern und Migration von Schwannzellen entlang künstlicher Mikrofasern. a) Antikörperfärbung macht Schwannzellen in rot, b) Axone in gelb sichtbar, Zellkerne sind blau gefärbt. Mit konfokaler Lasermikroskopie wird ein digitaler Querschnitt des Präparats rekonstruiert (Inset in a). Die künstlichen Fasern auf der Oberfläche mit einer Orientierung von etwa 60° sind nicht sichtbar. c) Im Rasterelektronenmikroskop wird der Wachstumskegel eines regenerierenden Axons dargestellt (Pfeil), der sich auf orientierten Schwannzellen bewegt.

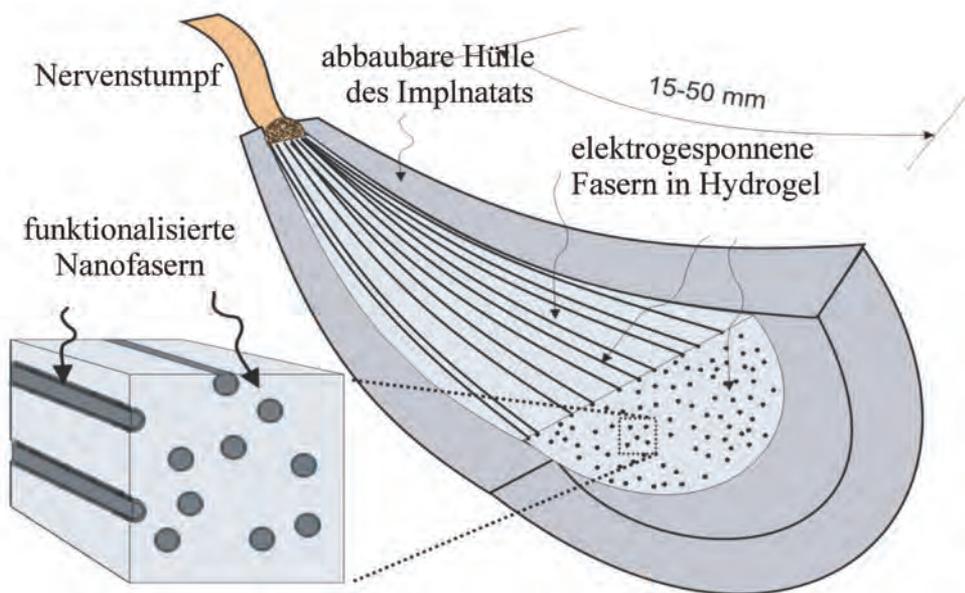


Bild 3: Zeichnung des geplanten Nervenimplantats.

noch zu verbessern, werden sie chemisch modifiziert. Durch diese Modifikation werden bestimmte Peptide auf der Oberfläche der Fasern präsentiert, von denen bekannt ist, dass sie die Schwannzellen und Neurone aktivieren.

**Biologische Aktivität künstlicher Leitungsbahnen**  
In Zellkulturversuchen bewirken die durch Elektrospinnen gewonnenen Mikrofasern tatsächlich, dass Schwannzellen an ihnen entlang kriechen, siehe Bild 2a. Von explantierten Nervenzellen wachsen Axone entlang der künstlichen Fasern oder auf den Schwannzellen, die sich an den Fasern orientiert haben, siehe Bild 2b, c. Diese Effekte

sind möglich, weil sich die mechanischen und die biochemischen Eigenschaften an den Strukturen orientieren, die natürlicherweise im Nerv vorkommen. Axone wachsen gerne in Bündeln an langgestreckten Fasern, Schwannzellen umhüllen solche Fasern. Auch die biochemische Funktionalisierung nutzt Proteine und Peptide, die natürlich in der extrazellulären Matrix vorkommen, und von denen man molekulare Rezeptoren und Signalprozesse kennt. Wegen dieser Nachahmung der vorteilhaften Eigenschaften natürlicher Substrate spricht man von biomimetischen Strukturen. Im Forschungsprojekt werden zurzeit die mechanischen und chemi-

schen Eigenschaften der Mikrofasern hinsichtlich der Förderung von Zellmigration und Nervenregeneration optimiert. Außerdem werden molekulare Mechanismen der biologischen Effekte untersucht.

**Von der Zellkultur zum dreidimensionalen Implantat**  
Die nächste Herausforderung besteht nun darin, die orientierten Mikrofasern in eine dreidimensionale Matrix einzufassen und diese im Tierversuch zu testen, siehe Bild 3. Zurzeit finden Experimente mit Hydrogelen, die einerseits die Fasern in der

zu implantierenden Röhre fixieren und andererseits den Schwannzellen und Axonen erlauben, hineinzuwachsen, statt. Natürlich sollen alle diese Materialien unschädlich und vollständig abbaubar sein. Während aktuell intensiv daran gearbeitet wird, Fragen der chemischen Herstellung und biologischen Wirkungen zu beantworten, erscheint die nächste große Herausforderung am Horizont: Die künstliche Nervenbrücke muss mikrochirurgisch implantiert werden. Bereits bei der Verpflanzung autologer Nerven-Transplantate ist es eine handwerkliche Kunst, die verschiedenen Nervenfaserbündel richtig mit einander zu verbinden. Dieses Problem auch für den künstlichen Nervenersatz zu lösen, wird ein wichtiger Schritt in der Neurochirurgie sein.

[www.bio2.rwth-aachen.de](http://www.bio2.rwth-aachen.de)

**Autoren:**  
Privatdozent Gary Brook Ph.D. B.Sc. ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Neuropathologie. Dr.rer.nat. Doris Klee ist Außerplanmäßige Professorin am Lehrstuhl für Textilchemie und Makromolekulare Chemie. Dr.rer.nat. Jörg Mey ist Außerplanmäßiger Professor und Akademischer Oberrat am Institut für Biologie II (Zoologie).

# Die Aachen-IFAS-Hand

Künstliche Hände haben vor allem in der Prothetik eine lange Tradition. Aktuelle Entwicklungen zielen aber auch auf den Einsatz von Roboterhänden in Dienstleistungsanwendungen oder in Gefahrenbereichen ab. Eine mittels Druckluft betriebene künstliche Hand stellt die „Aachen-IFAS-Hand“ dar. Es gibt grundsätzlich zwei Entwicklungsziele für künstliche Hände: Die Prothese, die die Fähigkeiten und das Erscheinungsbild der menschlichen Hand möglichst gut nachempfunden, und die Roboterhand, die die Flexibilität und die Greifkraft der menschlichen Hand erzielen soll. Die Entwicklung einer Roboterhand führt dabei in der Regel zu einem der menschlichen Hand sehr ähnlichen Erscheinungsbild. Aber im Gegensatz zur Prothetik geschieht dies nicht in erster Linie aus ästhetischen Gründen, sondern weil davon ausgegangen wird, dass die menschliche Hand im Zuge der Evolution zu einem beinahe perfekten Greif- und Handhabungswerkzeug gereift ist.

Bei der Aachen-IFAS-Hand handelt es sich in diesem Sinne um eine Roboterhand. Bei ihrer Entwicklung standen die Eigenschaften und die Flexibilität der menschlichen Hand im Vordergrund. Doch auch der Aufbau der menschlichen Hand lässt sich in der Struktur der Aachen-IFAS-Hand wiederfinden.

Eine Besonderheit sind die verwendeten Antriebe. Während die meisten weltweit entwickelten Roboterhände mit Elektromotoren angetrieben werden, setzt die Aachen-IFAS-Hand auf die Pneumatik, also auf Druckluft. Dies bietet Vorteile im Hinblick auf Gewicht, Kraftdichte, Überlastsicherheit und Komplexität. Dem gegenüber steht der wesentliche Nachteil der schlechten Regelbarkeit der Fingerbewegungen.

Im Gegensatz zur menschlichen Hand besitzt die Aachen-IFAS-Hand lediglich vier Finger. Auf einen fünften Finger wurde verzichtet, da für das sichere Halten eines Objektes und dessen Manipulation während des Greifens vier Finger ausreichend sind. Die Aachen-IFAS-Hand

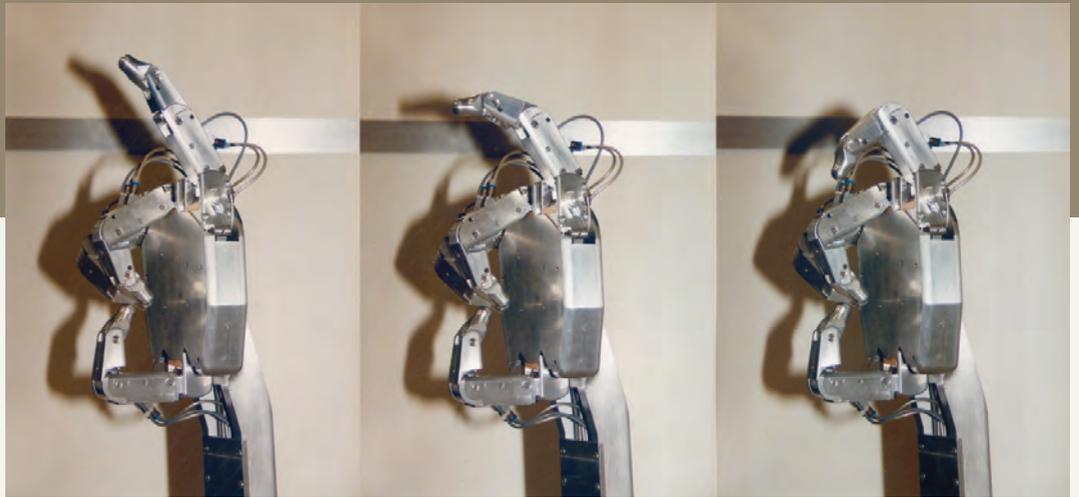


Bild 1



verfügt über insgesamt elf voneinander unabhängige Bewegungsmöglichkeiten: Die beiden äußeren Finger und der Daumen verfügen über jeweils drei unabhängige Bewegungsmöglichkeiten, der Mittelfinger verfügt über deren zwei.

Die äußeren Finger und der Daumen können parallel zur Handfläche geschwenkt werden, so genannter erster Freiheitsgrad. Sie können darüber hinaus Richtung Handfläche gebeugt werden, der zweite Freiheitsgrad. Der dritte Freiheitsgrad ergibt sich dann durch die Beweglichkeit des mittleren Fingergelenks. Dieses erlaubt ein Schwenken des restlichen Fingergliedes Richtung Handfläche.

Der mittlere Finger der Aachen-IFAS-Hand ist nicht in der Lage, parallel zur Handfläche zu schwenken, daher weist er nur zwei unabhängige Bewegungsmöglichkeiten auf. Um diese Beweglichkeiten nutzen zu können, wurden drei verschiedene Antriebsarten eingebaut. Diese sind ein normaler Zylinder, der über einen Hebel den kompletten Finger schwenkt, die Bewe-

gung erfolgt parallel zur Handfläche, siehe Bild 3, ein Schwenkflügelantrieb, der den kompletten Finger beugt und streckt, siehe Bild 2, und ein Bandantrieb, der das mittlere Fingergelenk bewegt, um Beugen und Strecken zu ermöglichen, siehe Bild 1.

Der Zylinder-Hebel-Antrieb sitzt in der Handfläche, während der Schwenkflügelantrieb an der Handfläche und dem Zylinder-Hebel-Antrieb befestigt ist. Der Bandantrieb befindet sich im ersten Fingerglied. Bei diesem handelt es sich um einen Pneumatikzylinder, bei dem die Kolbenstange durch ein Band ersetzt wurde, was die Erzeugung einer unmittelbaren Drehbewegung am mittleren Fingerglied ermöglicht.

Das letzte Fingergelenk wurde nicht mit einem pneumatischen Antrieb versehen. Dies erscheint nicht notwendig, da beim menschlichen Finger eine Bewegung des letzten Gelenks unabhängig vom vorherigen Gelenk nicht möglich ist. Daher wurde das letzte Fingergelenk der Aachen-IFAS-Hand festgesetzt. Es lassen sich dennoch alle

*Bild 1: Der Bandantrieb befindet sich im ersten Fingerglied und ermöglicht ein Schwenken des mittleren Fingergelenks. Beim Bandantrieb handelt es sich um einen kolbenstangenlosen Pneumatikzylinder, dessen Linearbewegung durch ein nachgeschaltetes Band-/Rollen-system in eine Schwenkbewegung umgewandelt wird.*

denkbaren Griffe und Manipulationen durchführen. Zur Kontrolle der Fingerpositionen wird die Aachen-IFAS-Hand in einem Lageregelkreis betrieben. Zum Greifen und Halten von Objekten kommt dagegen ein Kraftregelkreis zum Einsatz, der die Einhaltung der gewünschten Greif- oder Haltekraft gewährleistet.

Um beide Regelkreise mit den notwendigen Informationen (Drücke in den Antrieben und Gelenkwinkel) zu versorgen, wurden 22 Drucksensoren und elf Winkelsensoren in die Hand integriert. Es sind pro Bewegungsmöglichkeit zwei Drucksensoren notwendig, da jeder

# Eine pneumatische Roboterhand nach dem Vorbild der Natur

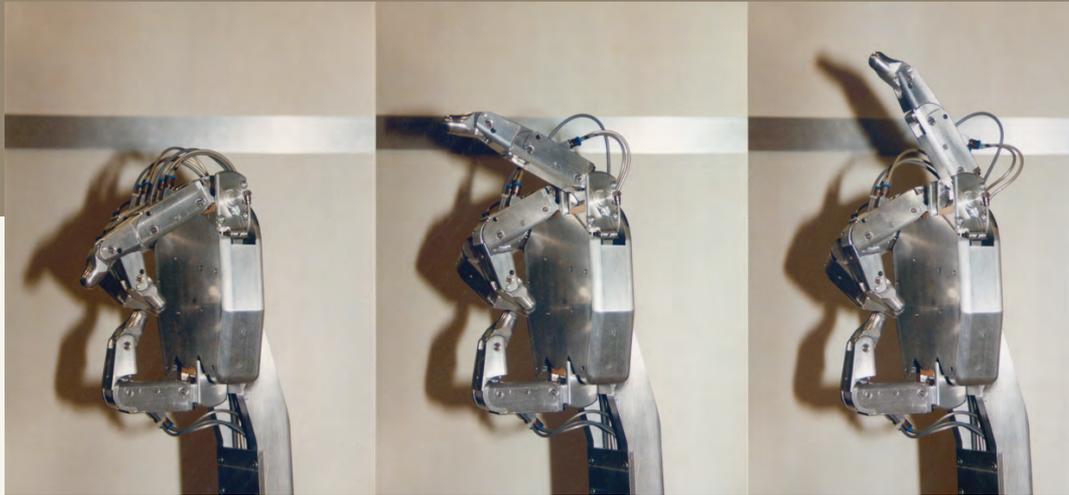


Bild 2

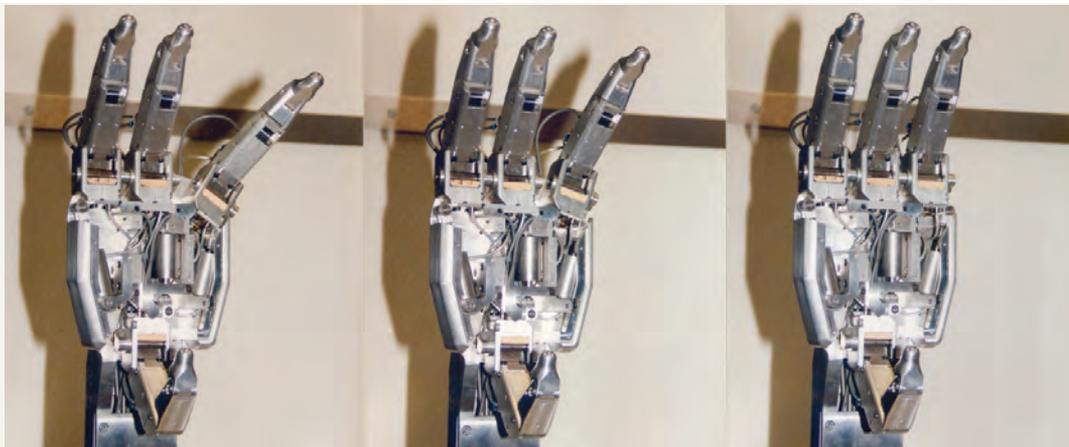


Bild 3

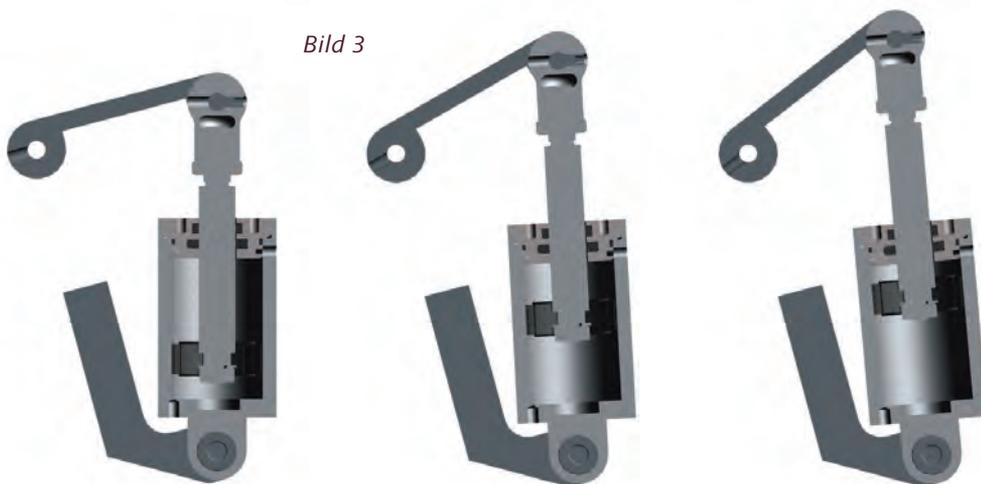


Bild 2: Der Schwenkflügel-Antrieb stellt das Verbindungsgelenk zur Handfläche der Aachen-IFAS-Hand dar. Durch ihn kann der Finger in Richtung Handfläche oder von dieser fort geschwenkt werden. Der Schwenkflügel-Antrieb ist der einzige verwendete Antrieb, der eine Druckbeaufschlagung unmittelbar in eine Drehbewegung umsetzen kann.

Antrieb zwei Kammern aufweist, die jeweils mit Druck beaufschlagt werden können. Die Signale dieser Sensoren werden mit einem Mess- und Steuerungsrechner in Echtzeit verarbeitet und in Stellsignale für die pneumatischen Antriebe der Hand umgewandelt. Derzeit beschäftigt sich das Institut für fluidtechnische Antriebe und Steuerungen mit der Weiterentwicklung der Aachen-IFAS-Hand. Die Entwicklungsziele liegen einerseits in der Verbesserung der Regelung und damit der Feinfühligkeit der Fingerbewegungen. Andererseits wird die Miniaturisierung und Optimierung weiter vorangetrieben, um das Leistungspotenzial der Hand vollständig ausschöpfen zu können.

**Autoren:**

Dipl.-Ing. Marcell Meuser und Dipl.-Ing. Olivier Reinertz sind Wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für fluidtechnische Antriebe und Steuerungen.

Bild 3: In der Handfläche der Aachen-IFAS-Hand befinden sich drei Zylinder-Hebel-Antriebe. Sie ermöglichen dem Daumen und den beiden äußeren Fingern ein Schwenken parallel zur Handfläche.

# Bionische Venenklappen



Wissenschaftler und Ingenieure entdecken zunehmend in der Natur lebende Prototypen als Vorbilder für neue, umweltverträgliche Produkte, Prozesse und Strategien. Gerade auf dem Gebiet der Mikrofluidik, also der Handhabung minimaler Mengen von Flüssigkeiten oder Gasen, gewinnen biologische Vorbilder immer mehr an Bedeutung. Die biologischen Lösungen sind über Jahrtausende aus einem natürlichen Selektionsprozess hervorgegangen.

Am Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik I wurden in einer grundlagenorientierten Forschung passive Ventile, so genannte mikrofluidische Dioden, die sich aus dem Funktionsprinzip der Venenklappen des venösen Blutkreislaufs ableiten, untersucht. Diese wurden in komplexen mikrofluidischen Netzwerken eingesetzt, um die externe Peripherie zu reduzieren. Da die strömungsmechanischen und geometrischen Größen der menschlichen Venenklappen bei einer Verkleinerung nicht direkt auf den technischen Ansatz im Mikromaßstab übertragen werden können, sondern das Dioden-Prinzip im Mikromaßstab technisch realisiert werden musste, erwachsen hieraus neue wissenschaftliche Fragestellungen.

28

Hierzu war es notwendig, die wichtigsten Einflussgrößen zu charakterisieren, sie auf den Mikromaßstab zu projizieren und deren Parameterraum abzugrenzen. Auf dieser Grundlage wurde das Design zur Konstruktion der Diodenstrukturen abgeleitet. Anschließend wurden die Dioden konstruiert und simuliert. Aufgrund der in den Simulationen ermittelten Parameter wurde die Konstruktion angepasst. Um Venenklappen technisch nachzubilden, wurde ein elastisches Material, Polydimethylsiloxan, kurz PDMS, eingesetzt. PDMS ist ein kostengünstiges Silikon, das zunehmend im Bereich mikrofluidischer Anwendungen eingesetzt wird. Die experimentelle Überprüfung der Simulationsergebnisse wurde mit Hilfe von fluoreszenzspektroskopischen Verfahren durchgeführt. Die Flu-

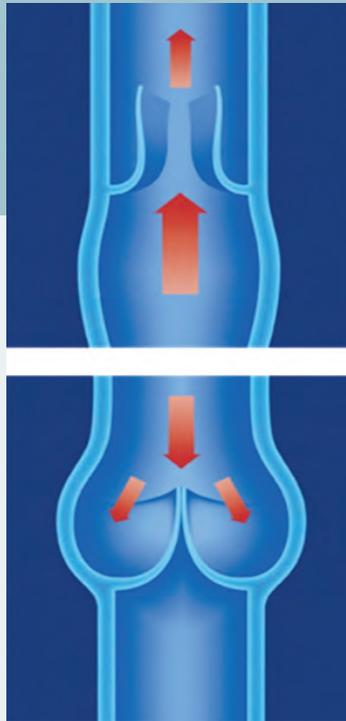


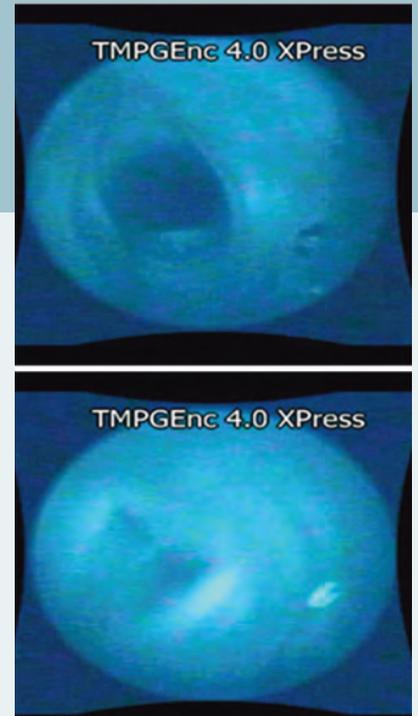
Bild 1: Funktionsprinzip der Venenklappe. Links: Skizze, rechts: Venenklappe in einer Beinvene.

oreszenzspektroskopie ist ein optisches Messverfahren, bei dem die Intensität eines fluoreszierenden Farbstoffes detektiert wird. Dieses Verfahren wurde erstmalig zur Charakterisierung der Strömungsvorgänge und Diodizitäten von bionischen, mikrofluidischen Ventilen eingesetzt.

Die Mikrofluidik ist ein Teilgebiet der Mikrosystemtechnik, das mit dem Einsatz von Mikrosystemen zur Handhabung von Gasen und Flüssigkeiten im Sub-Milliliter befasst ist. Darunter wird im Allgemeinen die kontrollierte Einspeisung, Vermischung, Steuerung und Reaktionskontrolle von Flüssigkeiten und Gasen in mikrotechnischen Bauteilen oder Systemen verstanden. In Mikrofluidsystemen lassen sich vollautomatisierte und integrierte Analysen minimaler Mengen an Ausgangssubstanzen und Reagenzien auf einem Chip realisieren. Aktuelle Anwendungsgebiete der Mikrofluidik sind zum Beispiel die Wirkstoffforschung, die Diagnostik, die Genom-Analyse und die Umweltanalytik. Miniaturisierte Synthesysteme werden als Mikroreaktoren in der chemischen Verfahrenstechnik zur Prozessentwicklung, in der Kombinatorik zum Screening

Proximal

Distal



und im zunehmenden Maße in der Biokatalyse eingesetzt.

Mikrofluidische Ventile sind ein zentrales Element innerhalb komplexer fluidischer Netzwerke, um die Gas-, oder Flüssigkeitsströme zu steuern. Im menschlichen Körper existiert ein einfaches und effektives Rückschlagventil: die Venenklappe. Eine Venenklappe, lateinisch valvula, ist eine Faltenbildung der Innenwand der Venen. Sie bestehen aus zwei bis drei halbmondförmigen Taschen aus Bindegewebe. Dieses Ventil steuert auf einfache und effektive Weise den venösen Blutrückstrom zum Herzen.

Während die arterielle Blutströmung von der Kraft des Herzens erzeugt wird, muss der venöse Blutrückstrom zum Herzen passiv und entgegen der Schwerkraft erfolgen. Dies ist erst durch die Venenklappen möglich. Durch die Muskelaktivität der Beine werden die dünnwandigen Venen bei der Muskelanspannung leer gepresst und damit das Blut nach oben verdrängt. Die Venenklappen verhindern den Rückstrom des Blutes, so dass sie sich nur von unten wieder auffüllen können bis sie erneut leer gepresst werden. In Bild 1 sind das Funktionsprinzip einer Ve-

nenklappe auf der linken Seite und eine Aufnahme einer realen Venenklappe auf der rechten Seite dargestellt.

Die Venenklappen bieten gegenüber den bisher existierenden technischen Ventilen den Vorteil, dass sie als passive Dioden keine externe Peripherie zur Aktivierung benötigen. Darüber hinaus haben sie einen einfachen Aufbau, der durch eine Abformung eines elastischen Kunststoffes in einem Fertigungsschritt technisch realisiert werden kann.

## Design der Mikroventile

Als Design wurde ein vereinfachtes Modell des biologischen Vorbildes gewählt, siehe Bild 2. Das Ventil besteht aus zwei symmetrischen Ventilkappen die auf einer Seite in eine taschenförmige Ausbuchtung enden. Bedingt durch das Fertigungsverfahren wurde als kleinste Distanz zwischen den Ventilkappen 20 µm gewählt. Die maximale Höhe wurde auf 70 µm festgelegt. Die Länge der Ventilkappen wurde zwischen 300 und 1000 µm variiert. Die Mikroventile wurden in Kanäle mit Durchmesser von 100 bis 500 µm integriert. In angenommener Durchlassrichtung sollte die Strömung nicht

# Ventile für komplexe mikrofluidische Netzwerke

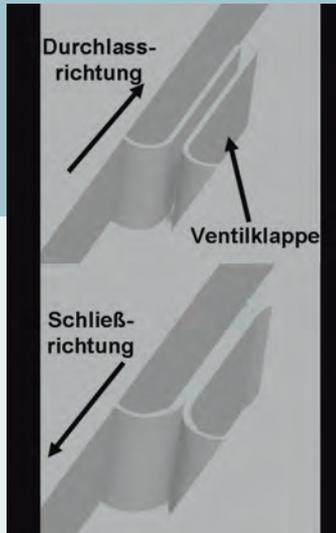


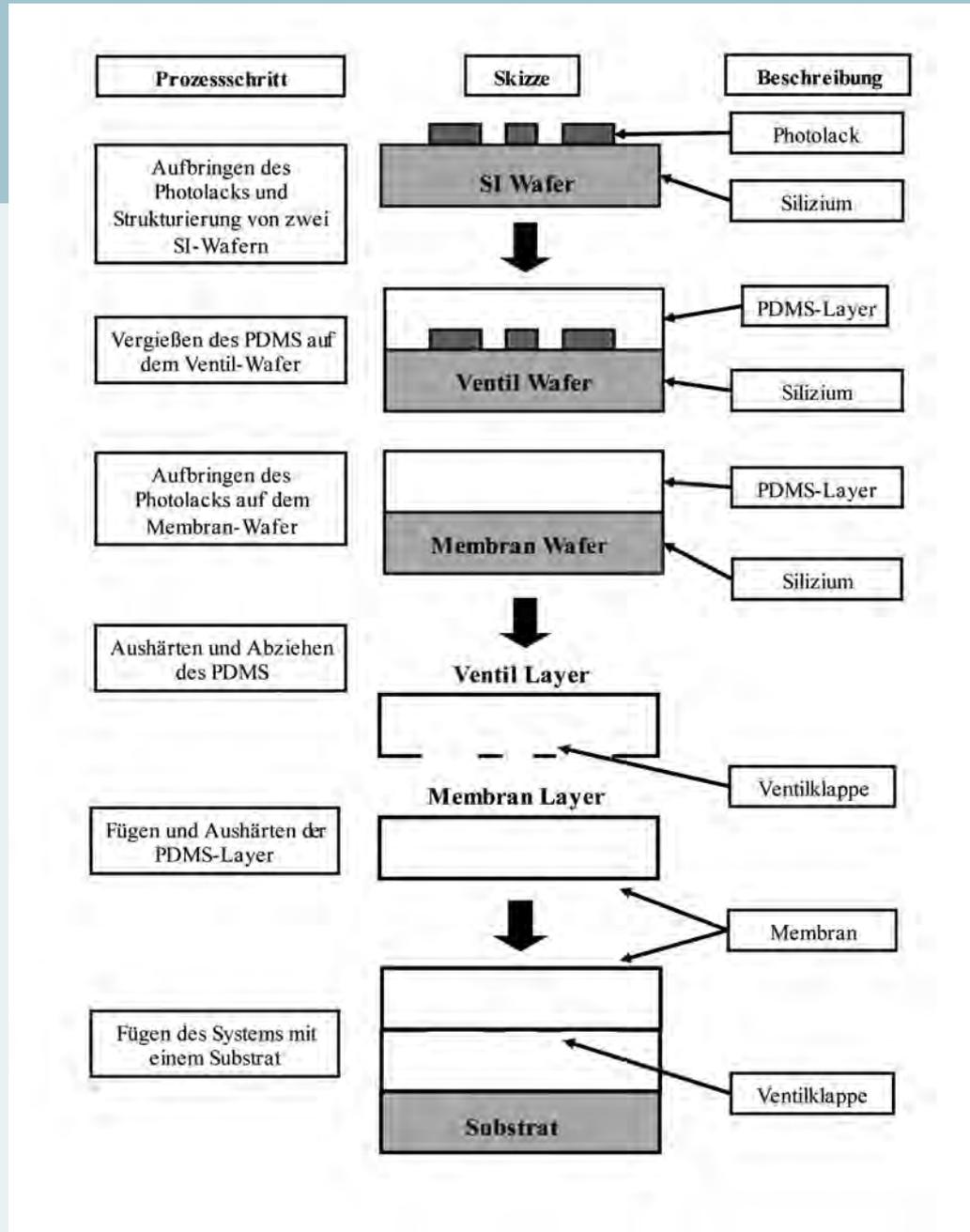
Bild 2: Design der Mikroventile.

Bild 3: Prozessablauf zur Abformung der Mikrostrukturen mit Hilfe von Polydimethylsiloxan.

signifikant beeinflusst werden. In der anderen Richtung sollen die Strömungskräfte einen Druck auf die taschenförmigen Ausbuchtungen ausüben, der die Kanäle in der Mitte verschließt.

**Simulation der Mikroventile**  
Um das Prinzip der Venenklappen technisch umzusetzen und verschiedene Ventilbauformen in der Entwurfsphase auf ihr Bewegungs- und Dehnungsverhalten zu testen, wurden numerische Simulationen eingesetzt. Der Algorithmus benutzt die Methode der Fluid-Struktur-Interaktion zur Lösung des Problems. Hierbei werden in einer Iterationsschleife die Strömungskräfte simuliert und anschließend diese auf die Struktur des Kunststoffes aufgebracht. Der Kunststoff verformt sich und prägt seinerseits dem Fluid Kräfte auf. Die Iterationsschleife wiederholt sich so lange, bis bestimmte Abbruchkriterien erfüllt sind.

Die Simulationen zeigen, dass der größte Druck bei Strömung in Schließrichtung und damit die größte Verformung am Anfang der taschenförmigen Ausbuchtungen entsteht. Je größer die Verformung, desto kleiner wird der Kanalquer-



schnitt. In Schließrichtung entsteht ein größerer Druckverlust als in Durchlassrichtung. Eine Kennzahl, um Ventile und Fluidioden zu charakterisieren, ist der Quotient aus dem Druckverlust in Sperrrichtung  $\Delta p_s$  und dem Druckverlust in Durchlassrichtung  $\Delta p_d$  über ein Ventil oder eine Fluidioden bei gleichem Volumenstrom  $\dot{V}$ , die so genannte Diodizität:

$$D = \left( \frac{\Delta p_s}{\Delta p_d} \right)_{|\dot{V}|=const} = \left( \frac{\dot{V}_d}{\dot{V}_s} \right)_{|p|=const}$$

Die Diodizität kann sowohl aus dem Quotienten des Druckverlustes als auch dem der Volumenströme berechnet werden. In den Simulationen wurden die verschiedenen Designs hinsichtlich der höchsten Diodizität optimiert.

**Herstellung**  
Die Herstellung erfolgte mit Hilfe von softlithografischen Techniken. Die Softlithografie basiert auf der Abformung einer Struktur mit einem weichen Kunststoff wie beispielsweise PDMS. In Bild 3 ist das Herstellungsverfahren der mikrofluidischen Ventile skizziert. Dabei

dient ein Siliziumwafer mit strukturierter Photolack als Gießform für die Ventil- und Kanalstrukturen, ein zweiter Wafer als Gießform für die Membran.

**Charakterisierung der Ventile**  
Die experimentelle Charakterisierung der Mikroventile hinsichtlich ihrer Schließfähigkeit wurde mit Hilfe optischer Analysetechniken durchgeführt. Hierbei wurde erstmalig ein fluoreszenzbasiertes Verfahren zur Charakterisierung der bionischen, mikrofluidischen Ventile verwendet. Als Messaufbau wurde ein Fluoreszenzreader verwendet, der aus einem opti-

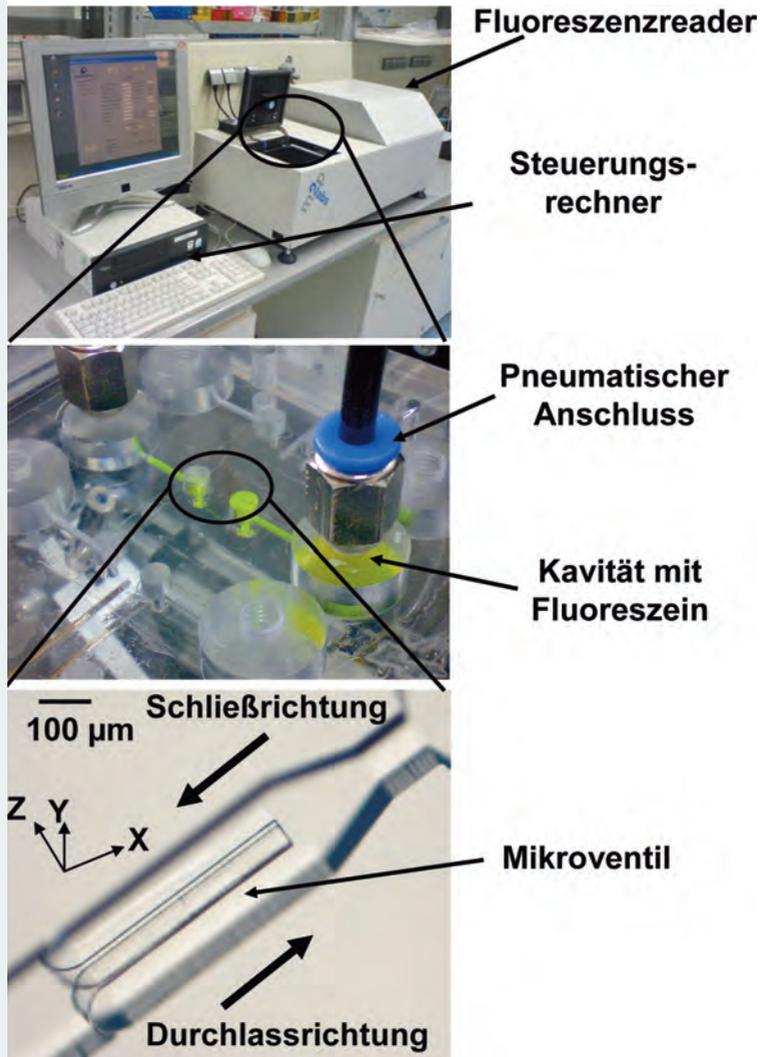


Bild 4: Fluoreszenzspektroskopische Charakterisierung der Mikroventile.

schen Faserbündel, einer Positioniereinheit und einem orbitalen Schüttler besteht, wie in Bild 4 dargestellt ist. Der Fluoreszenzreader emittiert Licht mit einer Wellenlänge von 485 nm und misst reflektiertes Licht bei einer Wellenlänge von 520 nm.

Um eine homogene Verteilung des fluoreszierenden Farbstoffs zu gewährleisten, wurde der Messaufbau mit einer Frequenz von 800 rpm und einem Schüttelradius von 3 mm geschüttelt. Vor jeder Messung wurden die Kammern des Messaufbaus mit Kalibrierlösungen gefüllt und anschließend die jeweilige Intensität bestimmt. Nach der Kalibration wurden die eigentlichen Messungen durchgeführt. Es wurde in jeweils eine Kavität der Fluoreszenzfarbstoff gegeben. Anschließend wurde über einen Anschluss ein pneumatischer Druck auf die Flüssigkeit aufgeprägt. Die Flüssigkeit durchströmt die Mikroventile und gelangt in die andere Kavität. Hier wurde die Intensitätsänderung des Fluoreszenzsignals in Abhängigkeit von unterschiedlichen pneumatischen Drücken und unterschiedlichen Designs der Ventile gemessen. Die Mes-

sungen wurden sowohl in Schließ- als auch in Durchlassrichtung durchgeführt. Aus dem Verhältnis der Volumenströme in beide Richtungen wird die Diodizität ermittelt. Für die in unseren mikrofluidischen Systemen eingesetzte Kanalbreite von 100 µm hatten mikrofluidische Dioden mit einem Abstand und einer Breite der Ventilkappen von 20 µm, einer Höhe von 70 µm und einer Länge von 750 µm die höchste Diodizität. Bei Drücken über 1.1 bar schlossen sie vollständig.

#### Zusammenfassung

Nach dem biologischen Vorbild der Venenklappen im venösen Blutsystem wurde ein neuartiges, mikrofluidisches Ventil hergestellt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Mikroventilen kann dieses einfach aufgebaute, passive Ventil in einem softlithografischen Fertigungsprozess hergestellt werden. Es ermöglicht in pneumatisch gesteuerten Mikrofluidsystemen die externe Peripherie signifikant zu reduzieren.

[www.iwe1.rwth-aachen.de](http://www.iwe1.rwth-aachen.de)

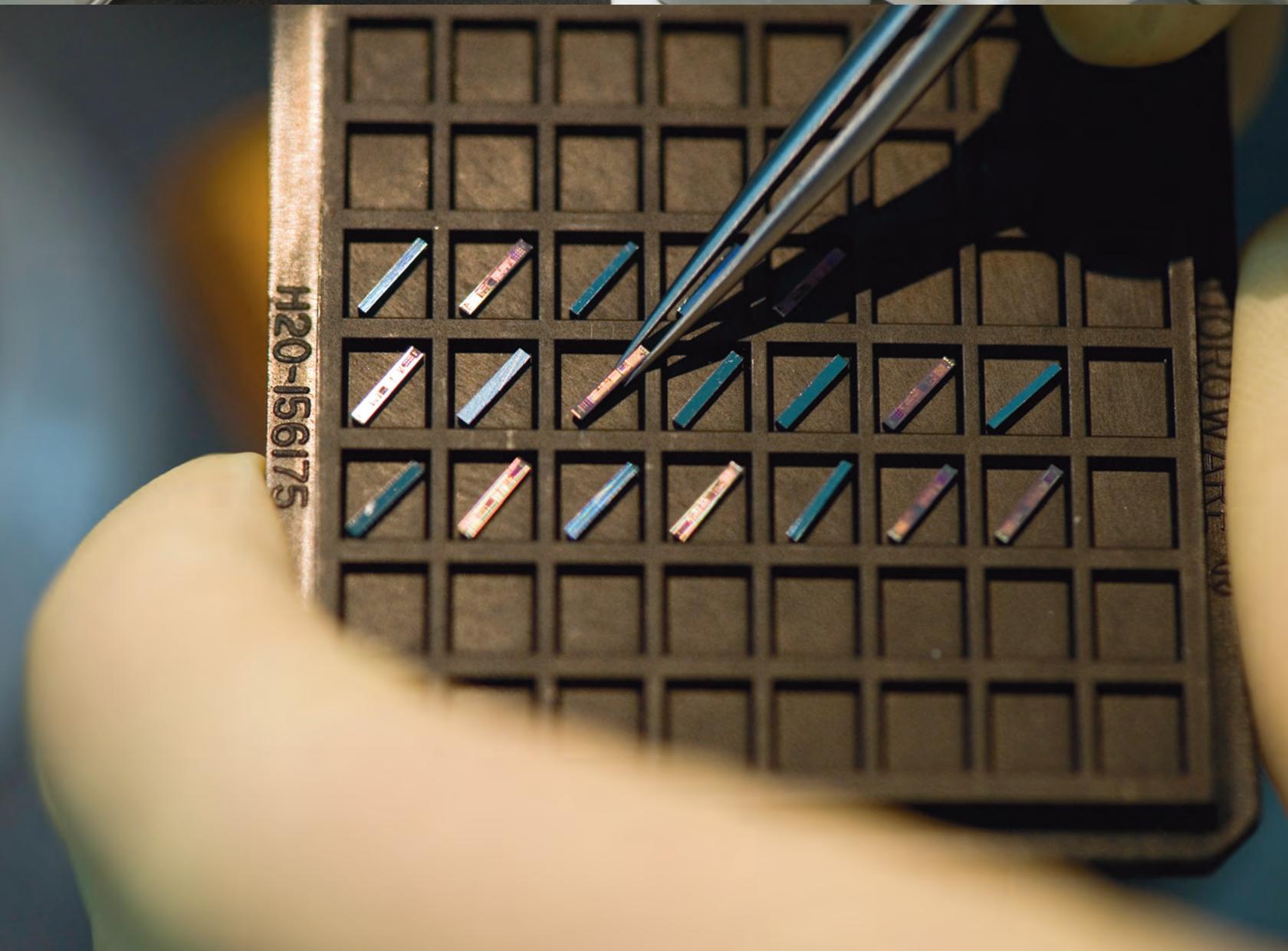
#### Autoren:

Dipl.-Ing. Ingo Klammer war Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik I. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Wilfried Mokwa ist Inhaber des Lehrstuhls für Werkstoffe der Elektrotechnik I und Leiter des Instituts für Werkstoffe der Elektrotechnik. Dr. Uwe Schnakenberg ist Akademischer Direktor des Lehrstuhls und Leiter des Projekts.

*Bild 5 (oben): Wissenschaftler vom Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik I bauen mikrofluidische Systeme mit integrierten Sensoren auf.*

*Bild 6 (unten): Miniaturisierte Komponenten wie beispielsweise Drucksensoren ermöglichen die Vermessung von mikrofluidischen Systemen.*

Fotos: Peter Winandy



# Das Retina Implant ersetzt Photorezeptoren im Auge

Blinde Menschen wieder sehend zu machen ist eine nahezu biblische Herausforderung und in verschiedenen Bereichen der Augenheilkunde gelingt das auch, etwa bei Operationen an weit fortgeschrittenen Linsentrübungen oder bei Operationen von Glaskörperblutungen. Dennoch gibt es trotz aller Fortschritte auch heute noch Erkrankungen am Auge, die zur Erblindung führen und für die es keine Therapie gibt. Hierzu gehört die Retinitis pigmentosa, eine erbliche Degeneration der lichtempfindlichen Zellen in der Netzhaut. Derzeit sind etwa 140 genetische Defekte identifiziert, die zu dieser Erkrankung führen. Erste Symptome sind Nachtblindheit, später kommt ein Verlust des peripheren Sehens dazu. Über die Phase eines Tunnelblicks kommt es dann zur Erblindung. In Deutschland sind rund 20.000 Menschen von dieser Erkrankung betroffen, jährlich kommen 250 Patienten dazu. Die Erkrankung kann schon im Kindesalter beginnen, die Erblindung tritt dann im dritten bis fünften Lebensjahrzehnt auf.

Seit mehr als zehn Jahren arbeiten Wissenschaftler aus den Bereichen Neurophysiologie, Bioinformatik, Materialkunde und Elektrotechnik mit Netzhautchirurgen und Neuropathologen an einem Konzept, wie ein Implantat aussehen müsste, mit dem es gelingen könnte, die abgestorbenen Netzhautzellen zu überbrücken um so wieder einen Seheindruck selbst bei Blinden zu vermitteln. Diese Idee wurde im Rahmen der Neurotechnologieinitiative des Bundes gefördert. Ziel des Projektes war die Entwicklung eines Prototypen, der in das menschliche Auge implantiert werden kann. Das Projekt steht unmittelbar vor dem Abschluss in Form einer klinischen Studie an blinden Patienten, siehe Text „Licht am Ende des Tunnels“, Seite 35.

Menschen sehen Bilder in dem Lichtquanten in den Stäbchen und Zapfen der Netzhaut absorbiert und in neuronale Signale umgewandelt werden. Diese Signale konvergieren über

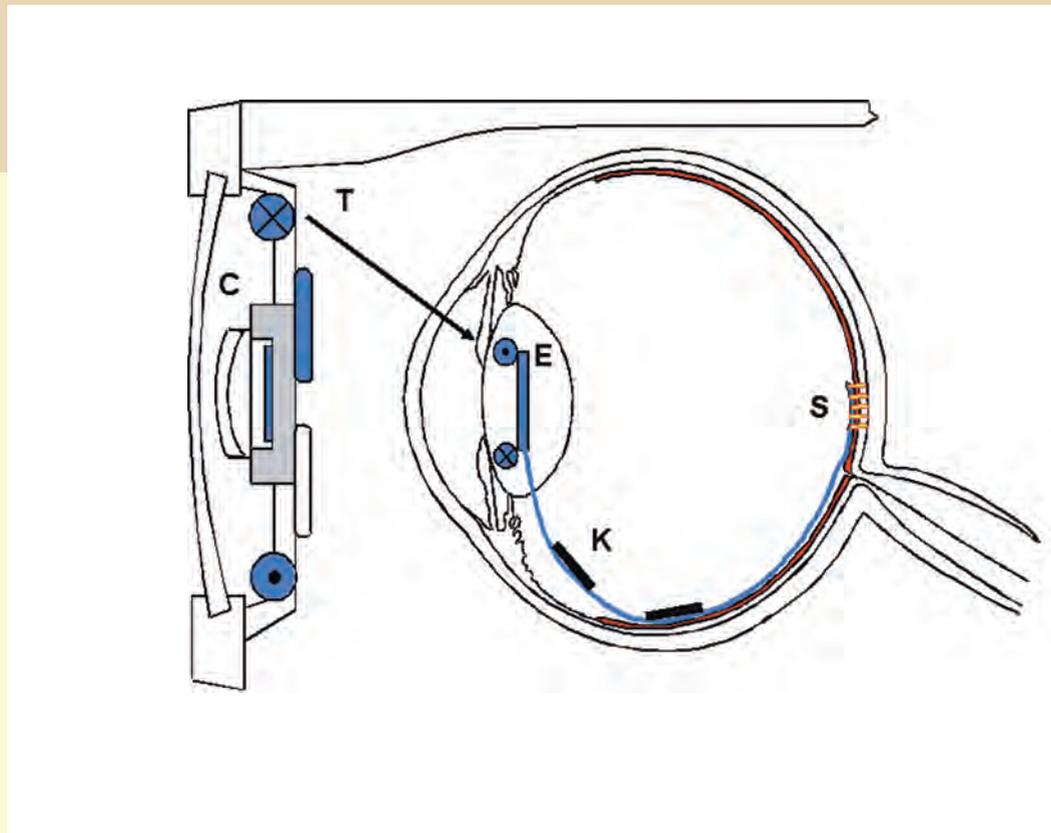


Bild 1: Systemkonzept der Prothese EPI-RET 3. Kamera „C“ ist in ein Brillengestell integriert. Komponenten zur Signalverarbeitung und zur telemetrischen Daten- und Ener-

gieübertragung „T“ sind ebenfalls im Brillenrahmen integriert. Das Implantat besteht aus einem Empfängermodul „E“, das anstelle der Linse in das Auge eingesetzt wird. Die

Linse wird hierfür entfernt. Der Stimulator „S“ wird auf die Netzhautoberfläche platziert. Empfängermodul und Stimulator sind mit einem Mikrokabel „K“ verbunden.

verschiedene Zwischenneurone auf die Ganglienzellen des Nervus opticus. Über die Fasern der Sehnerven erreicht diese Information dann das Zwischenhirn und anschließend das primäre visuelle Feld in der Hinterhauptregion, den visuellen Cortex. Bei der Retinitis pigmentosa sind Schlüsselenzyme des eigentlichen Sehvorganges defekt, der für die Umwandlung der Lichtenergie in ein neuronales Signal sorgt. Dadurch kommt es zum Untergang dieser Zellen, die Eingangsstufe in das visuelle System fällt aus. Es finden Umbauprozesse in der Netzhaut statt, wobei aber eine signifikante Zahl von Ganglienzellen an der Innenseite der Netzhaut mit ihren Verbindungen zum Gehirn erhalten bleibt. Die Idee des Retina Implant-Projektes beruht nun darauf, die ausgefallenen Photorezeptoren zu ersetzen. Die Ganglienzellen erhalten ihren normalen Input über vorgeschal-

tete Zwischenneurone. Das Implantat ersetzt diese Zwischenneurone durch eine Matrix von Mikroelektroden. Mit diesen Mikroelektroden sollen die Ganglienzellen elektrisch so stimuliert werden, dass sie sich verhalten als erhielten sie ihren natürlichen Input: Sie sollen normale Impulse an das Gehirn weitergeben. Damit diese Impulse auch etwas mit der Sehwahrnehmung zu tun haben, muss die Stimulation über das Feld der Mikroelektroden an die Sehsituation einerseits aber auch an die Situation des Empfängerorgans andererseits angepasst werden. Zunächst wird das Sehsignal mit einer miniaturisierten Kamera aufgefangen. Ein Kameramodul lässt sich heute schon sehr gut in ein Brillenglas einpassen. Die Kamerainformation wird ausgelesen und einem Signalverarbeitungsprozess unterworfen, der ähnlich wie die natürliche Signalverarbeitung in der Netzhaut

funktioniert. Dabei kommen im Wesentlichen adaptive Raum-Zeit-Filter zum Einsatz, deren Parameter in einem Trainingsdialog mit dem Implantat abhängig von dessen Wahrnehmung verstellt werden. Das Ergebnis dieses Signalverarbeitungsprozesses sind Muster von Stimulationspulsfolgen, die auf die einzelnen Reizelektroden verteilt werden müssen. Dabei werden die notwendige Energie und die Daten für die Reize vollständig telemetrisch zu dem Implantat übertragen. Kabelverbindungen von der Außenwelt in das Augeninnere werden so vermieden.

In umfangreichen Voruntersuchungen wurden verschiedene Materialien hinsichtlich ihrer Biokompatibilität am und im Auge getestet. Als Basismaterial für das Implantat wird Polyimid verwendet, die Elektroden sind aus Iridiumoxid, die Verkapselung aus Parylene und Silikon.

# Ein Schritt auf dem Weg Blinde sehend zu machen

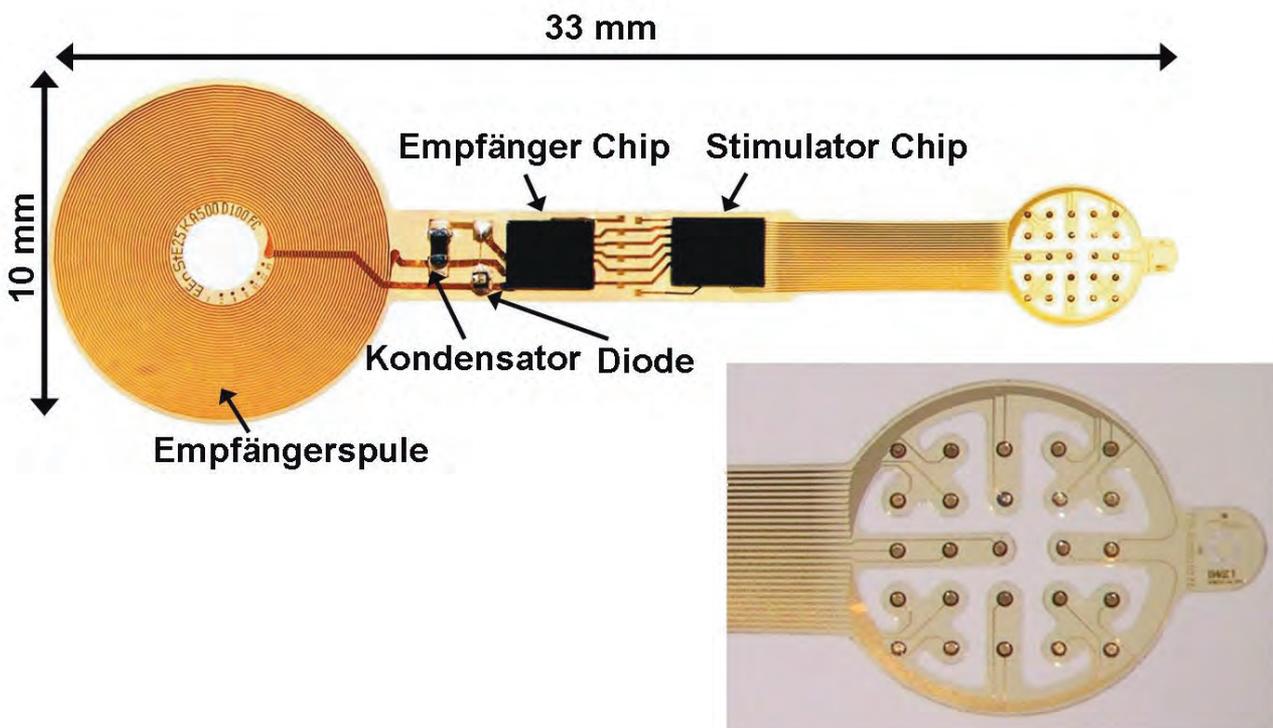


Bild 2: EPI-RET 3 Labormuster mit flexibler Empfängerspule links, Elektronikkomponenten für Daten- und Energieempfang sowie Stimulatorchip mit pro-

grammierbaren 25 Stromquellen für jede der Mikroelektroden im Stimulatorfeld rechts.

In weiteren Untersuchungen wurden tierexperimentell geeignete Operationsverfahren entwickelt. Dabei galt es vor allem das Problem der Fixation des Elektrodenarrays auf der Netzhaut zu lösen. Das konnte mittels Netzhautnägeln gelöst werden, kleinen Titanpins, die das Implantat auf der Netzhaut halten. Auch Explantationstechniken wurden erprobt. Schließlich wurden Untersuchungen durchgeführt, mit denen geprüft wurde, ob durch derartige Implantate ein Sehvermögen herstellbar ist. In Tierversuchen konnte mit verschiedenen Methoden eindeutig eine Aktivierung des visuellen Kortex nach epiretinaler elektrischer Stimulation nachgewiesen werden. In Akutversuchen wurden auch bei Erblindeten Sehnehmungen nach Elektrostimulation der Netzhaut festgestellt. Die Patienten berichten über die Wahrnehmung kleiner punktförmiger heller

Objekte. In der jetzt anstehenden Studie wird das Implantat bei sechs Patienten an der Augenklinik des Universitätsklinikums und bei sechs Patienten an der Augenklinik am Essener Universitätsklinikum für eine begrenzte Zeit implantiert. Die Systeme verfügen über 25 Elektroden. Damit sollte es möglich sein, einfache Geometrien in der Wahrnehmung zu realisieren. In einem Anschlussprojekt wird es dann darum gehen, die Daten zum Aufbau eines marktfähigen Medizinproduktes mit einer sehr viel höheren Zahl von Elektroden zu nutzen. In den USA und in Japan arbeiten ebenfalls verschiedene Forschergruppen mit Hochdruck an der Realisierung einer solchen Prothese und auch in Deutschland gibt es verschiedene Arbeitsgruppen, deren Konzepte sich etwas unterscheiden. Zum Team der RWTH gehören die Institute für Werkstoffe der

Elektrotechnik, für Neuropathologie und die Augenklinik. Weitere Partner sind das Institut für Neurophysik der Philipps-Universität Marburg, die Augenklinik der Universität Essen und das Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme in Duisburg. Hinzu kommen drei Industriepartner: Dr. Schmidt Intraokularlinsen in St. Augustin, Thomas Recording in Giessen und Bytec Medizintechnik in Stolberg. Der Prototyp der Aachener Gruppe ist weltweit das einzige System, das eine vollständige telemetrische Ansteuerung der Elektroden erlaubt. Im Gegensatz zu allen anderen derzeit in Pilotstudien getesteten Implantaten vermeidet das Aachener Implantat jede Kabelverbindung zwischen der Außenwelt mit dem Augennern. Hierdurch wird insbesondere die Langzeitsicherheit für den Patienten gewährleistet.

Sicher ist man derzeit noch weit entfernt davon, Blinde wieder wirklich sehend zu machen, aber einfache Funktionen des Sehsystems wie die Unterscheidung von Tag und Nacht, das Erkennen grober Hindernisse als Hilfe bei der Orientierung und Manövrierfähigkeit werden sich mit dem System wieder herstellen lassen.

[www.eyenet-aachen.de](http://www.eyenet-aachen.de)

**Autoren:** Dr.med. Gernot Roessler ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Augenklinik am Universitätsklinikum Aachen. Univ.-Prof. Dr.med. Peter Walter ist Direktor der Augenklinik und Inhaber des Lehrstuhls für Augenheilkunde.



*Bild 3: Univ.-Prof. Dr.med.  
Peter Walter untersucht eine  
Patientin mit dem Spaltlampen-  
mikroskop.  
Foto: Peter Winandy*

# Licht am Ende des Tunnels

## Weltpremiere: Augenärzte setzen komplette Sehprothese in menschliches Auge ein

**F**Ein Hoffnungsschimmer für alle an Netzhautschwund erkrankten Menschen kommt aus dem Universitätsklinikum Aachen. Dort haben Netzhautchirurgen und Ingenieure erfolgreich die weltweit erste vollständig in das Auge implantierbare Sehprothese für Blinde bei Patienten implantiert. Vollständig heißt in diesem Fall, dass bei der von einem interdisziplinären Forschungsverbund entwickelten Sehprothese keine Kabelverbindung vom Augeninnern nach außen nötig ist. „Die Operationen verliefen komplikationslos“, berichtet Univ.-Prof. Dr. med. Peter Walter, Direktor der Augenklinik. Und: Alle sechs Patienten schilderten nach dem Eingriff rudimentäre Seheindrücke. Rund 15.000 Menschen leiden allein in Deutschland an der unheilbaren Erkrankung „Retinitis pigmentosa“. Die genetisch bedingte Krankheit tritt in der Regel zwischen dem dreißigsten und fünfzigsten Lebensjahr auf und lässt die Erkrankten nach und nach komplett erblinden. Kein Wunder also, dass die Betroffenen die Fortschritte des interdisziplinären Forschungsverbunds äußerst interessiert verfolgen. „Unsere Mitglieder setzen große Hoffnungen auf dieses Implantat“, bestätigt Werner Lengenfeld, Geschäftsführer von Pro Retina, der Selbsthilfevereinigung von Menschen mit Netzhautdegeneration.

Rund eineinhalb Stunden dauerte jede Operation. Insgesamt sechs Patienten wurden am Aachener Universitätsklinikum

und an der Universitäts-Augenklinik Essen operiert. Dabei wurde zunächst die natürliche Linse und der Glaskörper aus dem Auge entfernt. An deren Stelle kam das Implantat namens EpiRet, dessen künstliche Linse so groß wie eine kleine Knopfzelle ist und die Seheindrücke von außen empfängt. Eine stecknadeldünne Verbindung stellt den Kontakt zu den Elektroden im Augeninnern sicher, die die empfangenen Reize in Form von elektrischen Impulsen an die Netzhaut weiterleiten. Von dort werden die Informationen über bestimmte Nervenzellen zum Gehirn transportiert, wo diese wiederum in Seheindrücke „decodiert“ werden. „Netzhaut-Implantate sind mikroelektronische Systeme, die noch verbliebene Nervenzellen so reizen, dass das Sehsystem wieder aktiviert werden kann“, bestätigt Prof. Walter.

Noch sehen die Patienten allerdings nur Lichtpunkte und einzelne Linien. Erste Tests zeigen jedoch, dass Patienten in absehbarer Zeit mit Hilfe der weiterentwickelten Sehprothese zumindest grobe Hindernisse

und Umrisse erkennen werden. „Das Implantat befindet sich derzeit in der klinischen Erprobungsphase“, berichtet der Direktor der Augenklinik des Universitätsklinikums in Aachen. Während der vierwöchigen Tests verarbeitete die Sehprothese daher noch keine vielschichtigen Reize aus der Außenwelt, sondern lediglich elektrische Impulse, die von einem Sender ausgingen. Spezialisten der Neurophysikgruppe der Philipps-Universität Marburg lösten unterschiedlich starke Testreize aus, deren Seheffekte von den Patienten kommentiert wurden.

„Künftig werden die Informationen der Außenwelt von einer speziellen Miniaturkamera aufgenommen, die im Brillengestell integriert ist“, berichtet Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Wilfried Mokka vom Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik an der RWTH Aachen. Der Forschungspartner ist sich sicher, dass es bereits in zwei bis drei Jahren erste marktfähige Sehprothesen geben wird, die sehr viel komplexere Seheindrücke als bisher ermöglichen: „Unsere Testprothesen hatten lediglich

25 Elektroden, die Impulse an die Netzhaut weitergaben. Künftige Prothesen werden mit etwa 200 bis 400 Elektroden ausgestattet sein.“ Erste Kamerateests seien indes schon für dieses Jahr geplant und eine Firma zur Weiterentwicklung des Produkts gegründet. Wichtig für einen dauerhaften Einsatz des Implantats ist auch, dass die Netzhautstimulation mit niedrigen Strömen erfolgt, so dass die Sehprothese für den Patienten verträglich ist und die Bauelemente nicht so schnell verschleißeln. „Diese Prämissen hat unser Testprodukt komplett erfüllt“, bestätigt Prof. Peter Walter. Der Augenklinik geht davon aus, dass die serienreife Sehprothese künftig länger als zehn Jahre reibungslos funktionieren wird, weil sie – anders als etwa Herzschrittmacher – keine Batterie benötigt. Ob das Implantat als Kassenleistung abgerechnet werden kann, ist derzeit allerdings noch unklar.

# Wie Pflanzen Wurzeln schlagen

## Digitale Bildanalyse macht Wurzel-Wachstum messbar

**P**flanzen sind in vielen Bereichen von hoher - auch wirtschaftlicher - Bedeutung, so in der Nahrungsmittel- oder Energieproduktion. Einer der bedeutendsten Prozesse für Pflanzen ist ihr Wachstum. Anders als höher entwickelte Tiere bestehen Pflanzen aus einer Anordnung aufeinander abgestimmter, sich wiederholender Module, wie Zweige und Blätter oder Wurzeln und Wurzelspitzen. Dieses Konstruktionsprinzip erlaubt es ihnen, ihr ganzes Leben lang zu wachsen und dabei ihre äußere Erscheinung wechselnden Umweltbedingungen anzupassen.

Wachstumsanalysen erlauben schon bei sehr jungen Pflanzen Rückschlüsse, wie sie auf veränderte Umweltbedingungen reagieren. Obwohl Wachstum eine so bedeutende Rolle für die Gesamtfunktion einer Pflanze spielt, sind die grundlegenden Zusammenhänge zwischen makroskopischem Wachstum und den darunterliegenden Mechanismen nur unzureichend verstanden. Für ein tiefer gehendes Verständnis der grundlegenden biologischen Prozesse ist es notwendig, Wurzelsysteme exakt zu vermessen. Dabei sind eine Reihe von Kenngrößen von biologischer Relevanz, wie Anzahl der Wurzelzweige, Längen und Dicken der Zweige, Abzweigungswinkel und Anzahl der Abzweigungen.

Bisher waren diese Größen für jede Pflanze nur messbar, indem man sie vorsichtig ausgräbt, die Wurzeln wäscht, hochaufgelöst einscannert und anschließend vermisst. Durch Einscannen entstandene Bilder haben den Vorteil extrem hoher Ortsauflösung und gleichmäßiger Ausleuchtung. Dies erleichtert die Auswertung durch Computer-Algorithmen. Allerdings wächst eine einmal ausgegrabene Pflanze nicht mehr genauso weiter wie zuvor. Deshalb sind so nur Momentaufnahmen möglich. Dynamische Größen wie Zuwachsraten des gesamten Wurzelsystems sind nicht zugänglich.

Um das Wachstum der Wurzeln messen zu können,

muss der zeitliche Verlauf der Bildung eines Wurzelsystems verfolgt werden. Dazu müssen dieselben Pflanzen mehrfach so vermessen werden, dass die Messungen das Pflanzenwachstum nicht beeinträchtigen. Konzentriert man sich zunächst auf die mikroskopische Erfassung des Wachstums von Wurzelspitzen, so lässt sich dies durch Aufzucht der Pflanzen in einem transparenten Nährgel umsetzen. Für die wesentlich komplexere Analyse und Vermessung ganzer Wurzelsysteme muss dieser Ansatz jedoch deutlich erweitert werden. Dieser Aufgabe stellen sich in einem gemeinsamen Forschungsprojekt der Lehrstuhl für Bildverarbeitung der RWTH Aachen und das Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre des Forschungszentrums Jülich.

Die Pflanzen wachsen dazu anstatt in Erde in Petrischalen, in die eine spezielle Agarose, also ein transparentes Nährgel eingebracht wird. Die Petrischalen selber bestehen aus zwei dünnen Glasplatten, siehe Bild 1. Diese Anzuchtform ermöglicht nun die wiederholte Aufnahme von Bildern der Wurzelsysteme, die dann mit Methoden der Bildverarbeitung analysiert und anschließend statistisch ausgewertet werden. Die Aufnahmen erfolgen automatisiert über mehrere Tage bis über Wochen hinweg. Dabei werden viele gleichartige Schalen immer wieder der Reihe nach durchgefahren. So lassen sich zukünftig sehr große Anzahlen von Pflanzen der gleichen Sorte in Form von Massen-Screening vermessen. Dieses Vorgehen erlaubt sehr treffsichere statistische Aussagen, erhöht aber die Anforderungen an die computergestützte Bildanalyse: Da die Lage der einzelnen Petrischalen beim wiederholten Hereinfahren in das Blickfeld der Kamera nicht exakt reproduziert werden kann, erscheinen die Wurzelsysteme einer Pflanze in den nacheinander aufgenommenen Bildern an leicht unterschiedlichen Positionen. Für die Bestimmung von Wachstumsraten und anderen

*Bild 1:  
Pflanzen werden  
in Petrischalen mit  
transparentem  
Nährgel angezo-  
gen, um mit Bild-  
verarbeitungsalgo-  
rithmen das Wur-  
zelwachstum zu  
analysieren.  
Foto: Institut für  
Chemie und Dy-  
namik der Geo-  
sphäre im  
FZ Jülich*

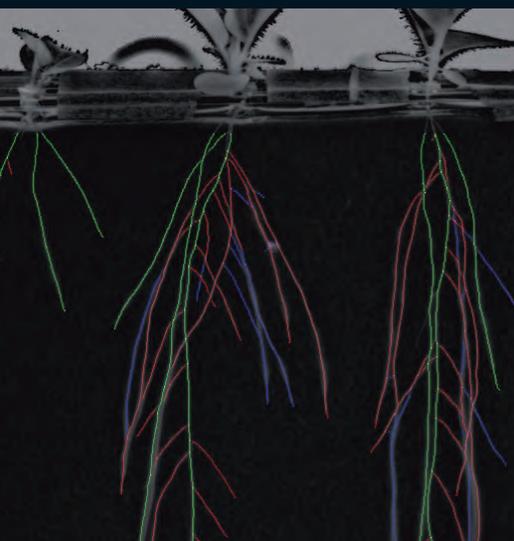


dynamischen Größen der Entwicklung der Wurzel ist jedoch ein genauer Vergleich zwischen aufeinanderfolgenden Bildern unabdingbar. In einem ersten Verarbeitungsschritt müssen die zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommenen Bilder einer Pflanze deshalb zuerst präzise zur Deckung gebracht oder „registriert“ werden, indem der Einfluss der unterschiedlichen Schalenpositionen bestimmt und herausgerechnet wird. Auch an die nachfolgenden Schritte der digitalen Bildanalyse werden bei diesem Massen-Screening deutlich erhöhte Anforderungen gestellt. Verglichen mit den Bildern von ausgegrabenen und dann eingescannten Wurzelsystemen sind die Bilddaten von Wurzeln in Agarose von ungleich geringerer Qualität. Die Aufnahmen müssen im nahen Infrarotbereich erfolgen, da sichtbares Licht das natürliche Wachstumsverhalten einer Pflanze ändert, indem es beispielsweise ihren Tag/Nacht-Zyklus stört. Die Wurzeln werden dann mittels Durchlicht aufgenommen. Die aufzunehmende Petrischale befindet sich im Moment der Bildaufnahme dabei zwischen Infrarot-Lichtquelle und Kamera. Das Wurzelsystem erscheint dann als dunkler Schatten vor hellem Hintergrund. Eine gleichmäßige Ausleuchtung mit Infrarot-

Leuchtdioden ist jedoch nur angenähert realisierbar. Außerdem sind weitere Helligkeitsschwankungen aufgrund variierender Agarosedicke und anderer Störeinflüsse wie Lufteinschlüsse zwischen Glasplatte und Nährgel in der Praxis nicht zu vermeiden.

Darüber hinaus ist die Auflösung handelsüblicher und unserer Laboranforderungen genügender Kameras wesentlich geringer als die Auflösung von Scannern, was die Bildqualität weiter reduziert. Wurzelzweige werden deshalb nur wenige Pixel oder Bildpunkte breit abgebildet. Die Aufgabe, die relevanten Größen wie Dicke von Wurzelzweigen computergestützt aus den Kamerabildern zu bestimmen, wird durch erheblich erschwert. Da verfügbare Standardalgorithmen hier versagten, wurden in dem gemeinsamen Forschungsprojekt neue und optimal auf diese Anforderungen zugeschnittene Verarbeitungsverfahren entwickelt.

Die aufgezeichneten Infrarotaufnahmen sind Grauwertbilder mit 256 Helligkeitsstufen. Aufgrund der Durchlichttechnik weisen sie dort niedrige Werte auf, wo sich Wurzeln befinden, und höhere Werte im restlichen Bild. Allerdings sind die helleren Werte durch die ungleichmäßige Ausleuchtung und die Schwankungen der Agarose-



**Bild 2:** *Invertiertes Kamerabild des Wurzelsystems mit überlagertem Analyseergebnis. Die farbliche Darstellung gibt die Wurzelordnung jedes Zweiges an, also ob es sich um einen Primärzweig (grün), Sekundärzweig (rot) oder Tertiärzweig (blau) handelt. Foto: Lehrstuhl für Bildverarbeitung der RWTH Aachen*

dicke über das gesamte Bild sehr unterschiedlich. Diese Helligkeitsunterschiede zwischen den besser und schlechter ausgeleuchteten Bildbereichen werden zunächst in einem Vorverarbeitungsschritt ausgeglichen.

Der anschließende, zentrale Bestandteil des Analyseverfahrens ist das Erkennen von Wurzelstücken. Wie bringt man diese Aufgabe einem Computer bei? Im Prinzip geht man vor wie das menschliche Gehirn: das komplexe Gebilde „Wurzelsystem“ wird in kleine Strukturmerkmale zerlegt: Diese sind Wurzelursprung, Verzweigungspunkte, Wurzelspitzen und Wurzelstücke als Verbindungselemente zwischen diesen. Wurzeln können nun, beispielsweise zwischen Wurzelursprung und der ersten Verzweigung, beliebig gekrümmt sein. Ein charakteristisches Merkmal erhält man, wenn man auf einer sehr kleinen Skala, also in vielen sehr kleinen Regionen von wenigen Pixeln Größe arbeitet, die insgesamt das ganze Bild abdecken. In einer kleinen Region erscheinen die Wurzelemente von beliebig komplexen Wurzelsystemen gleich, nämlich als eine annähernd gerade dunkle Linie vor hellerem Hintergrund. Nach solchen kleinen Mustern kann man nun durch einen geeigneten Algorithmus suchen lassen. Man beginnt nun im oberen Bereich des Bildes mit der Suche

nach Bildpunkten, die Wurzeln darstellen könnten. Für jeden Bildpunkt wird ein Wahrscheinlichkeitswert für das Vorhandensein einer Wurzelstruktur und ihre Ausrichtung oder Orientierung berechnet. Überschreiten die so berechneten Wahrscheinlichkeitswerte festgelegte Entscheidungsschwellen, so werden die gefundenen Wurzeln als Primärwurzeln identifiziert. Diese werden dann nach unten weiterverfolgt, indem man in Richtung ihrer Orientierung weitersucht, ob sich dort die Wurzel fortsetzt. Meist ist das der Fall, aber nicht immer: Wurzeln können auch krumm und abknickend wachsen, sich verzweigen oder sich kreuzen. Für Biegungen lässt sich dies modellieren, indem man die Differenz zwischen alter und neu gefundener Wachstumsrichtung bestimmt und als Wahrscheinlichkeitsmaß für die gefundene Richtung benutzt. Kleine Richtungsabweichungen, also geringe Krümmungen, sind wahrscheinlicher als stark gekrümmt wachsende Wurzeln. Das heißt: in nur un sicher erfassbaren Fällen wird deshalb angenommen, dass die Wurzel eher geradeaus weiterwächst. Gelegentlich sind auch abrupte Knicke der Wurzelstrukturen möglich. Die Analyse fordert hier aber, dass die Bildaten diese Hypothese entsprechend stark stützen: je krummer der wahrscheinliche Ver-

lauf, desto mehr Übereinstimmung zwischen Modell und Daten wird verlangt. Das den Algorithmen zugrunde liegende physikalische Modell ist das gleiche, welches das Biegen eines elastischen Stabes und die dazu notwendige Kraft beschreibt.

Kreuzungen von Wurzelzweigen erfordern eigene Vorgehensweisen. Kreuzungen sind Punkte, die durch zwei oder mehr ankommende und zwei oder mehr abgehende Wurzelstücke gekennzeichnet sind. Dabei ist die Zuordnung, welche ankommende Wurzel sich wo fortsetzt, nicht immer eindeutig. Bei manchen Wurzelbildern sind sogar menschliche Betrachter bei dieser Aufgabe überfordert. Nimmt man Informationen aus zu anderen Zeitpunkten aufgenommenen Bildern derselben Pflanze hinzu, lassen sich die Wurzelstücke jedoch fast immer eindeutig zuordnen: man weiß dann, welcher Wurzelzweig zuerst vorhanden war, und von welchem anderen Zweig er danach gekreuzt wurde.

Bild 2 zeigt die in einem Infrarotbild erkannten Wurzelsegmente. Die farbliche Darstellung gibt die Wurzelordnung jedes Zweiges an, also ob es sich um einen Primärzweig, Sekundärzweig oder Tertiärzweig handelt.

Aus den drei Analyseschritten – Wurzeln finden, Wurzeln weiterverfolgen, Abzweigungen detektieren – wird eine verkettete Datenstruktur erstellt, die der Struktur der Pflanzenwurzel gleicht. Sie besteht aus Elementen wie „Knoten“ oder „Zweig“, die jeweils eine bestimmte Menge von Datenfeldern zur Beschreibung ihrer Eigenschaften besitzen. So enthält beispielsweise jedes Wurzelstück ein Feld „Dicke“ und jeder Knoten ein Feld „Knotenordnung“. Direkt im Anschluss an das Hinzufügen eines Knotens oder eines Zweiges werden die entsprechenden Daten durch geeignete Auswertungsalgorithmen ermittelt und in die Datenfelder eingetragen. So erhält man eine Struktur, aus der sich alle erforderlichen biologi-

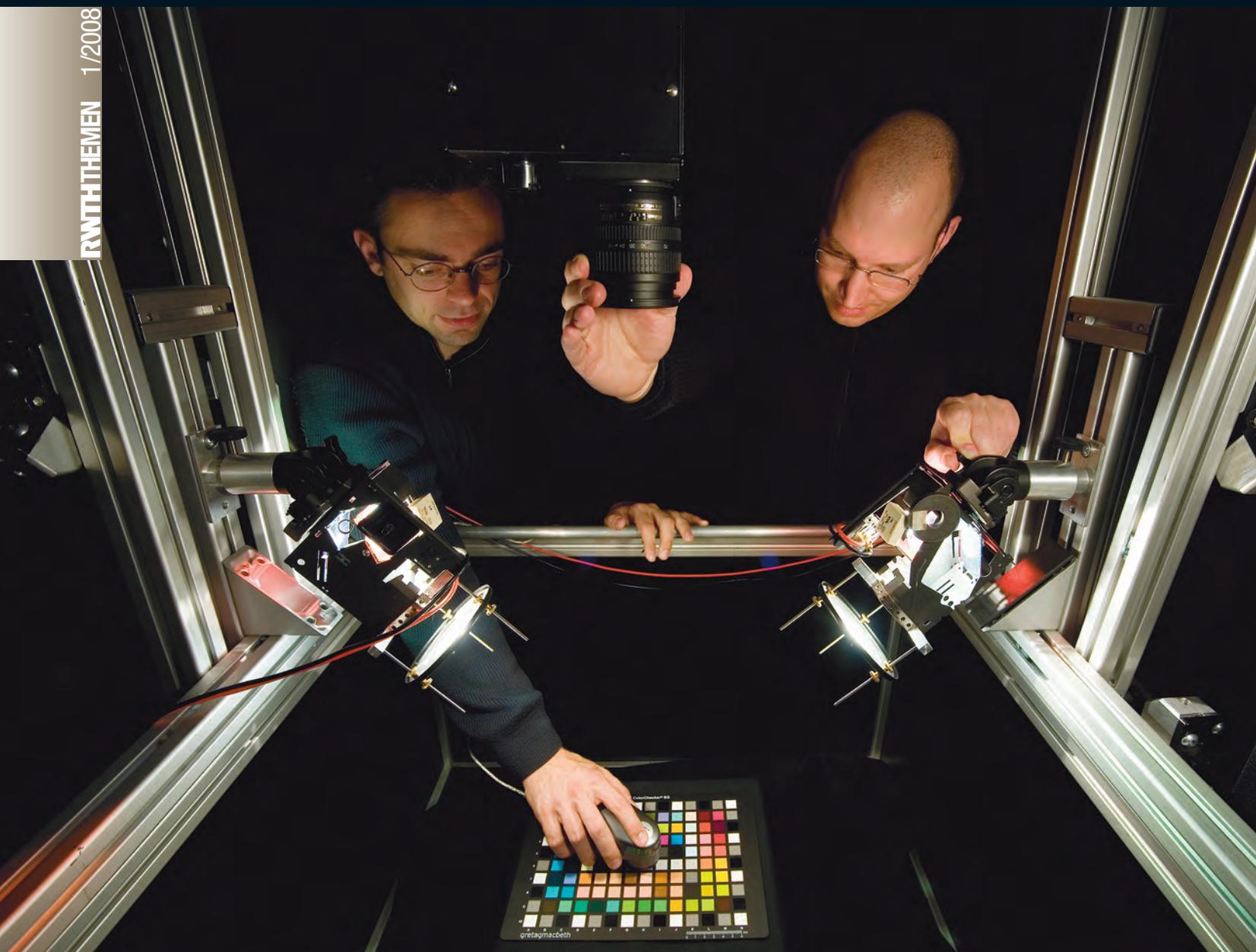
schen Merkmale und Kennzahlen ablesen lassen. Auch komplexe Abfragen – etwa „Wie groß ist die durchschnittliche Dicke aller Primärzweige?“ – sind so möglich.

Diese computergestützte Vermessung von Wurzelsystemen ermöglicht einen hohen Zeitgewinn gegenüber der manuellen Auswertung, wodurch ein hoher Durchsatz an Pflanzen erreicht wird. Vor allem aber waren dynamische Größen wie Zuwachsraten bisher gar nicht oder nur grob erfassbar. Mit der gewonnenen Präzision und Zeitauflösung werden neue Erkenntnisse sowohl in der biologischen Grundlagenforschung bei der Aufklärung von Wachstumsmechanismen ermöglicht, als auch in anwendungsnahe Bereichen wie Pflanzenschutz und Düngemitteln.

[www.lfb.rwth-aachen.de](http://www.lfb.rwth-aachen.de)  
[www.fz-juelich.de/icg/icg-3](http://www.fz-juelich.de/icg/icg-3)

#### Autoren:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Til Aach ist Inhaber des Lehrstuhls für Bildverarbeitung. Dr.phil.nat. Matthias Mühlich ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Bildverarbeitung, Dipl.-Phys. Dipl.-Inform. Daniel Truhn erstellte dort seine Diplomarbeit. Dr. Frank Gilmer ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Chemie und Dynamik der Geosphäre im Forschungszentrums Jülich, kurz ICG-3, und Leiter des Jülich Plant Phenomics Center. Dr.rer.nat. Kerstin Nagel ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin der Arbeitsgruppe „Wachstum“ des ICG-3. Dr.rer.nat. Hanno Scharr ist Leiter der Arbeitsgruppe Bildverarbeitung des ICG-3. Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Ulrich Schurr ist Leiter des ICG-3. Dr.rer.nat. Achim Walter ist Stellvertretender Institutsleiter und Leiter der Arbeitsgruppe „Wachstum“ des ICG-3.



*Bild 3: Dr. Matthias Mühlich und Johannes Brauers vom Lehrstuhl für Bildverarbeitung kalibrieren eine Farbkamera mit sieben Farbkanälen, indem sie 140 Farbproben auf einem Testmuster vermessen.  
Foto: Peter Winandy*



**Der**  
**Veranstaltungs-**  
**ort der Region.**

Ob Kongress, Tagung,  
Konzert, Ballettaufführung,  
Ball oder Ausstellung:  
hier finden Sie stets  
den richtigen Rahmen.

Top-Technik, variables  
Raumangebot, Spitzen-  
gastronomie, Kongress-  
Service etc. sind hier  
selbstverständlich!

**Das gewisse "Mehr" bei uns:  
Individueller Service.**

**Wir informieren Sie!**

**Eurogress Aachen**  
Monheimsallee 48  
52062 Aachen  
Telefon 0241/9131-230  
Telefax 0241/9131-200  
info@Eurogress-Aachen.de

www.monheimsallee.de/signatur

SEW-EURODRIVE—Driving the world




**Wir suchen technikbegeisterte  
Mitarbeiter mit Drive**

Mit mehr als 12.000 Mitarbeitern weltweit bringen wir Bewegung in fast alle Branchen. Das Erfolgsrezept: Getriebemotoren und Antriebselektronik vom Feinsten. Und jede Menge Drive in allem was wir tun.

Sie wollen mehr bewegen als andere, und was Sie antreibt, ist der Spaß an einer Aufgabe, die Sie wirklich fordert. Dann starten Sie jetzt durch bei SEW-EURODRIVE – dem erfolgreichen Familienunternehmen und Global Player.

Sie haben Ihr Studium der Fachrichtung Elektrotechnik, Wirtschaftsingenieurwesen, Maschinenbau, Mechatronik, Informatik oder Wirtschaftswissenschaften erfolgreich abgeschlossen? Und Sie wollen mit uns in einem internationalen Umfeld etwas bewegen? Interessante Herausforderungen in den Bereichen Engineering, Entwicklung, Vertrieb und Services warten auf Sie.

**Kommen Sie zu uns!**

SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG  
Personalreferate Bruchsal  
Postfach 30 23, 76642 Bruchsal  
→ [www.jobs-sew.de](http://www.jobs-sew.de)



# Neurons on Chips

**K**ann man Nervenzellen auf Computerchips wachsen lassen und wozu sollte das gut sein? Nervensysteme sind die komplexesten natürlichen Systeme auf diesem Planeten. Dies trifft nicht nur auf unser eigenes Gehirn zu, sondern gilt bereits für die Nervensysteme einfacher Lebewesen wie Würmer und Insekten. Die Analyse dieser Systeme ist auch aus technischen Gründen sehr schwierig. Nervensysteme lösen Aufgaben durch die gleichzeitige Aktivität von Hunderten, teilweise bis Tausenden von Nervenzellen, den so genannten Neuronen. Im Versuch beobachten lässt sich aber immer nur eine sehr kleine Anzahl solcher Zellen. Meist sind es nur zwei bis drei, deren Aktivität man gleichzeitig aufzeichnen kann. Zudem schädigen die gängigen Methoden oft die Zellen, so dass man ihre Aktivität meist nur für Minuten, höchstens Stunden messen kann. Schließlich macht auch die Anordnung der Zellen im Nervensystem bestimmte Versuche unmöglich, weil man mit den zur Ableitung verwendeten Elektroden aus räumlichen Gegebenheiten nicht gleichzeitig

an alle für eine bestimmte Fragestellung interessanten Zellen herankommt.

Aus diesen Gründen hat es schon lange Versuche gegeben, Nervenzellen außerhalb des Körpers in Kultur zu nehmen, um ihre Eigenschaften unter einfacheren Bedingungen zu untersuchen. Aber auch hier sind die Methoden für die Ableitung ihrer Aktivität meist invasiv, das heißt Elektroden werden in die Zellen eingebracht, was diese schädigt und damit Langzeituntersuchungen unmöglich macht. Ein relativ neuer Ansatz ist es, Neurone auf Halbleiterchips zu kultivieren, in die die Elektroden bereits integriert sind.

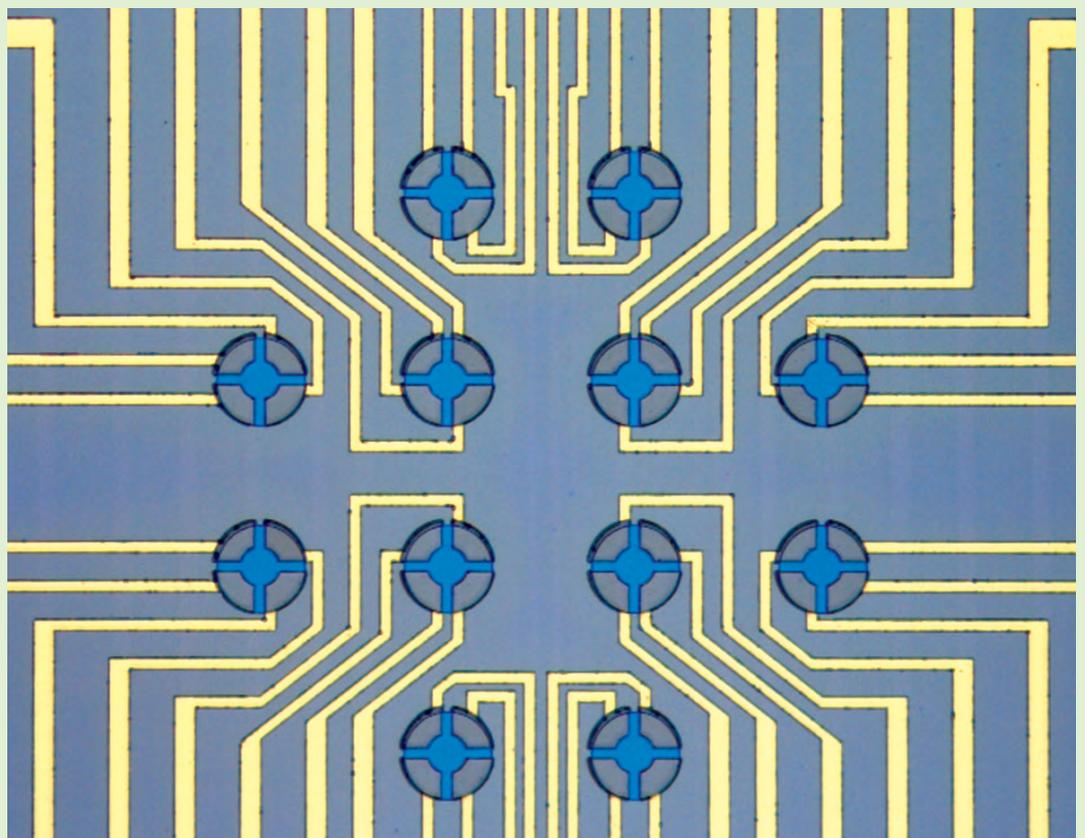
Auf Halbleitersubstraten kann im Prinzip eine große Anzahl von Ableitelektroden in bestimmten Anordnungen konstruiert werden, so genannte multi electrode arrays, kurz MEAs. Hierbei sind die Elektroden entweder kleine Metallflächen aus Gold oder Titan beziehungsweise im Chip integrierte Transistoren. Diese elektronischen Bauteile können kleine elektrische Ereignisse verstärken. Sind Nervenzellen

aktiv, so entstehen Spannungsänderungen über ihrer Zellmembran und es fließen kleine Ströme. Wenn der Transistor so konstruiert ist, dass er durch diese schwachen Ereignisse gesteuert wird, dann verstärkt er diese Signale und man kann damit die Aktivität der Zelle von außen messen. Voraussetzung ist allerdings, dass die Zelle in unmittelbarer Nähe des Transistors liegt. Dies ist eine nicht-invasive Ableitmethode, denn es muss keine Elektrode in die Zelle eingebracht werden.

Im Prinzip könnte man also Nervenzellen auf einen solchen Chip mit vielen Transistoren legen und ihre Aktivität messen. Im Idealfall könnte man die Zellen, die im Nervensystem für eine bestimmte Aufgabe zuständig sind, gezielt entnehmen, auf ein solches Elektroden-Array aufbringen und dann die Eigenschaften dieses Schaltkreises über lange Zeit, also Stunden, Tage, vielleicht Wochen oder Monate, und unter den verschiedensten Bedingungen studieren.

Hierfür müssen zunächst die Kulturbedingungen erforscht

*Bild 1: Ein Mikroelektrodenarray zur Ankopplung und Stimulation von biologischen Zellen.*



# Mikroelektronische Bauelemente zur Stimulation und Ableitung von Nervenzellen

werden, unter denen Nervenzellen sich wohlfühlen und überleben. Dazu gehören Untersuchungen, ob die Zellen auf der Chipoberfläche überhaupt wachsen oder ob man diese Oberflächen mit zellverträglichen Materialien beschichten muss. Die Ableitungen funktionieren nur dann, wenn die Nervenzellen direkt auf den Ableit Elektroden sitzen. Also müssen Techniken entwickelt werden, die Zellen in die richtige Position zu bringen und dort auch zu halten. Damit auch auf dem Chip wieder neuronale Schaltkreise entstehen, müssen die Nervenzellen Ausläufer ausbilden, miteinander in Kontakt treten und - wie im intakten Nervensystem - wieder so genannte Synapsen, speziell geformte Endstrukturen, ausbilden, über die sie dann wieder miteinander kommunizieren können. Zum Teil muss man auch das Auswachsen der Nervenfasern steuern, um das gewünschte Ziel zu erreichen. Wenn diese Fragen gelöst sind, benötigt man zur Untersuchung solcher Schaltkreise aus Nervenzellen jedoch noch ein zusätzliches Werkzeug. Zur Erfor-

schung des Verhaltens der Neurone im Netzwerk ist es notwendig, dass man die Aktivität einer einzelnen Zelle oder einer Zellgruppe im Netz beeinflussen kann. Die einfachste Form der Beeinflussung ist die elektrische Stimulation. Kleine Strompulse oder auch elektrische Felder können in Nervenzellen einen Impuls auslösen, der dann über die Ausläufer zu den nachgeschalteten Zellen geleitet wird. Für diese Stimulation benötigt man zusätzliche Elektroden.

Um diese Möglichkeiten zu schaffen, wird versucht, Elektroden zum Ableiten und Elektroden zum Stimulieren auf einem Chip zu vereinen. Als optimales Material für Stimulationselektroden haben sich dünne Schichten aus Iridiumoxid erwiesen. Dieses wird in einem Zerstäubungsprozess, sputtering genannt, auf das Trägermaterial aufgebracht. Wir wissen inzwischen auch durch Bioverträglichkeitsstudien, dass dieses Material den Nervenzellen nicht schadet und sie gut darauf wachsen. Im fertigen Chip sollen dann Iridiumoxid-Stimulationselektroden ringförmig

um die Ableittransistoren angeordnet sein. Dies findet alles im Mikromaßstab statt, das heißt die gesamte Einheit für eine Nervenzelle soll einen Durchmesser von 50 µm nicht überschreiten.

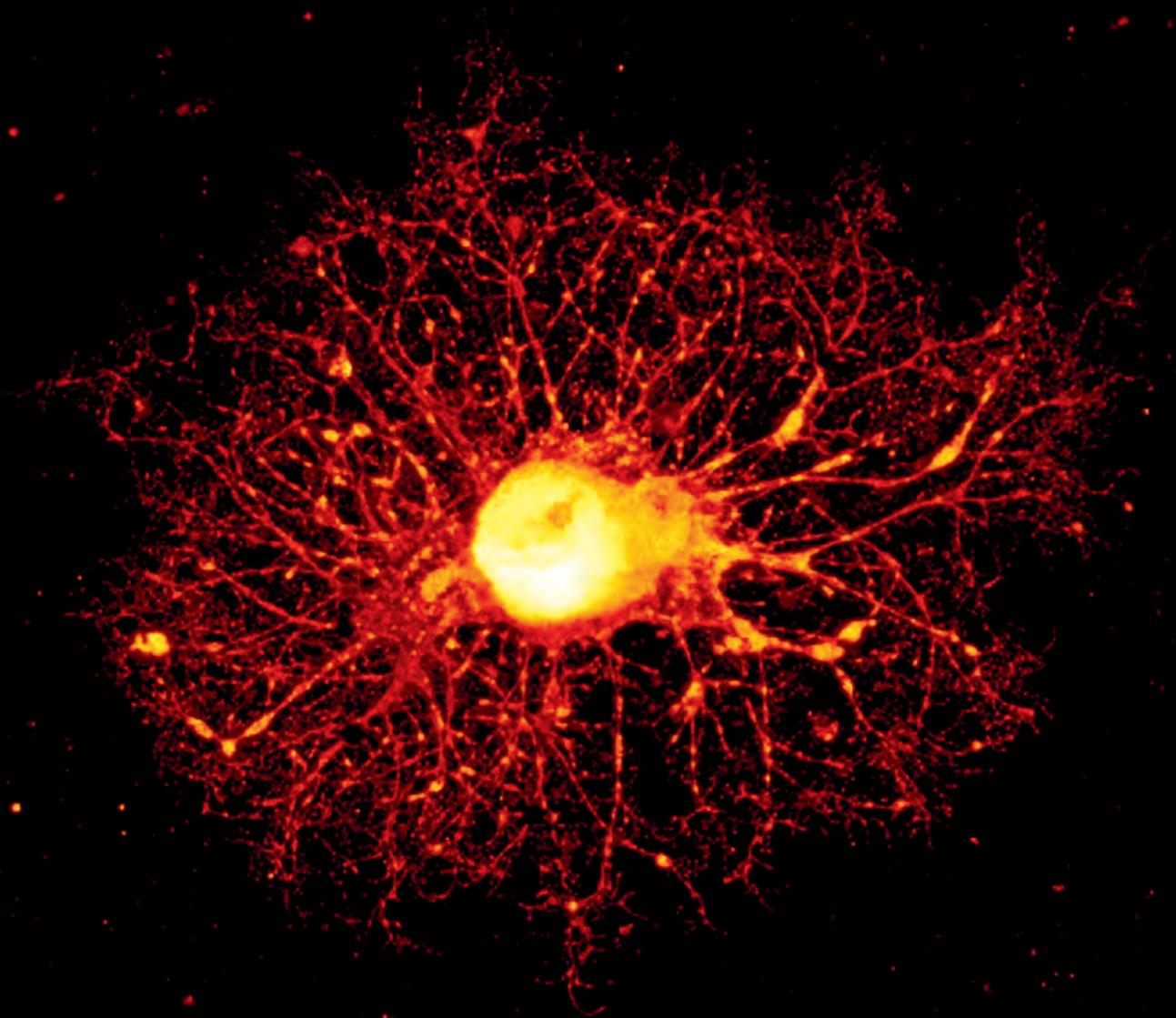
Trotz dieser Miniaturisierung sind solche Elektroden-Kombinationen für viele Nervenzellen, insbesondere diejenigen aus den Nervensystemen von Wirbeltieren wie Mäusen oder Ratten, noch zu groß. Die Nervenzellen von Wirbeltieren umfassen selten mehr als 10 bis 20 µm. Dies ist auch einer der Gründe, warum für die Versuche bisher Nervenzellen von Insekten benutzt wurden. Obwohl Insekten recht kleine Tiere sind, haben sie zum Teil sehr große Zellen in ihren Nervensystemen. In den verwendeten Wanderheuschrecken gibt es einige Zellen, die mehr als 100 µm groß sind, die man also - einmal dem Nervensystem entnommen - schon mit bloßem Auge erkennen kann. Außerdem lassen sich diese Insekten leicht in großen Mengen züchten und ihre Zellen stellen eher geringe Ansprüche an die Kulturbedingungen.

Trotzdem ist für die Zukunft die weitere Miniaturisierung der Elektrodengeometrien geplant. Eine weitere Verkleinerung der Elektroden würde dann auch die Ableitung und Beeinflussung der Aktivität einzelner Wirbeltiernervenzellen ermöglichen. Hiermit könnten dann zentralnervöse Schaltkreise, die bisher nur im Tier und damit mit den oben geschilderten Einschränkungen untersucht werden konnten, auf dem Chip nachgebaut und genauer unter die Lupe genommen werden. Von Interesse sind dabei zum Beispiel neuronale Schaltkreise zur Mustererkennung oder zur Ortung akustischer Signale. Von besonderem Interesse sind natürlich auch alle Netzwerke, die etwas mit dem Thema „Lernen“ zu tun haben.

Mit verkleinerten Elektroden ist auch der Einsatz von Nervenzellen aus der Fruchtfliege, *Drosophila melanogaster*, denkbar. Im Vergleich zu den großen Heuschrecken ist diese Fliege sehr klein und hat daher auch keine riesigen Neurone im Nervensystem. Andererseits ist *Drosophila* das

Bild 2: Die Afrikanische Wanderheuschrecke, *Locusta migratoria*.





42

genetisch am besten untersuchte Tier und es gibt für diesen Organismus viele molekularbiologische Verfahren, die Eigenschaften auch von Nervenzellen gezielt zu verändern. Dieses würde Studien darüber erlauben, wie sich die Eigenschaften von Netzwerken verändern, wenn einzelne oder auch alle Mitglieder genetisch verändert wurden. Damit lassen sich dann wieder grundlegende neurobiologische Fragestellungen auch auf molekularer Ebene untersuchen.

Schließlich ist es denkbar, die „biohybriden Systeme“, die wir entwickeln, mit technischen oder auch biologischen Sensoren, also bestimmten spezialisierten Zellen, zu koppeln. Solche Systeme könnten als Biosen-

soren für Pharmaka, Umweltgifte oder andere Substanzen eingesetzt werden. Des Weiteren sind natürlich die Erfahrungen, die man im Rahmen dieser Forschung sammelt, auch für medizinische Anwendungen wichtig. Die Bioverträglichkeitsstudien, die wir im Rahmen unseres Projekts durchführen, sind auch für jegliche Art von Implantaten aus ähnlichen Materialien relevant. Man kann also die eingangs gestellte Frage, ob es Sinn macht, Nervenzellen mit Computerchips zu vereinigen, durchaus bejahen. Allerdings sollte klar sein, dass das Ziel nicht darin liegen kann, einen biohybriden Computer zu bauen, der eine Mischung aus PC und Gehirn darstellt.

[www.bio2.rwth-aachen.de](http://www.bio2.rwth-aachen.de)

#### Autoren:

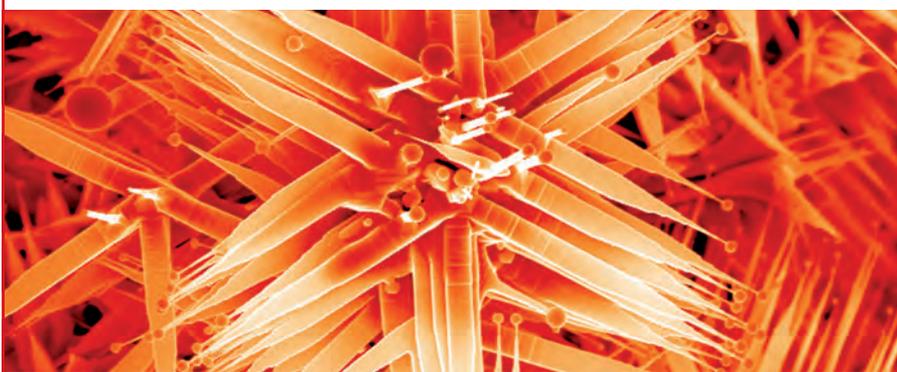
Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Peter Bräunig leitet das Lehr- und Forschungsgebiet Entwicklungsbiologie und Morphologie der Tiere.

Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Andreas Offenhäusser ist Direktor am Institut für Bio- und Nanosysteme im Forschungszentrum Jülich.

Dr.-Ing. Uwe Schnakenberg ist Akademischer Direktor am Lehrstuhl für Werkstoffe der Elektrotechnik I.

*Bild 3: Neuron der Heuschrecke in Kultur auf einer Iridiumoxid-Oberfläche.*

Venture Capital für Start-ups



## Bringen Sie Ihre Ideen in den Markt. Mit uns.

**Sie sind Wissenschaftler oder Ingenieur und Unternehmer?  
Sie arbeiten an einem innovativen Produkt mit Potential?  
Sie gestalten die Welt von morgen?**

Als Venture-Capital-Gesellschaft investiert Stars Innovation in Nanotechnologie, Bionik und Erneuerbare Energien. Wir beteiligen uns an jungen Unternehmen und sind Partner bei deren Aufbau.

Wir wollen Wachstum. Sprechen Sie uns an.

Stars Innovation Aktiengesellschaft  
Berliner Allee 52 · 40212 Düsseldorf

**Telefon +49-211-882 555-0**  
**[www.stars-innovation.com](http://www.stars-innovation.com)**

# Training für Neuronale Netze

Neuronale Netze sind lernfähige Computerprogramme. Ihr Funktionsprinzip ähnelt dem eines menschlichen Gehirns aber natürlich sind sie wesentlich einfacher aufgebaut. Ebenso wie das Gehirn ist ein neuronales Netz ein Verbund von einfachen Informationsverarbeitungseinheiten, die Neuronen oder Knoten genannt werden. Durch sie werden Informationen parallel verarbeitet.

Im Gegensatz zu konventionellen Verfahren ist es mit neuronalen Netzen möglich, analytisch nicht beschreibbare Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangsdaten zu ermitteln. Dazu ist der 1986 in den USA entwickelte „Backpropagation-Algorithmus“ besonders geeignet. Seit etwa 20 Jahren werden mit Hilfe solcher Programme Maschinen und Anlagen gezielt optimiert und gesteuert. Am Institut für Textiltechnik, kurz ITA, wurden dazu spezielle Systeme entwickelt, die mittlerweile in fast allen Forschungsgruppen mit Erfolg eingesetzt werden. Eine typische Aufgabenstellung ist die Bestimmung der erforderlichen Maschineneinstellung, um ein vorgegebenes Produkt herzustellen. Die typische Vorgehensweise zur Lösung einer solchen Fragestellung wird am Beispiel eines textilen Prozesses erläutert.

44

Zunächst wird das neuronale Netz „trainiert“. Ziel des Trainings ist es, dass das neuronale Netz die Zusammenhänge zwischen den erforderlichen Maschineneinstellungen und den Produktkennwerten erlernt. Das heißt, es werden Datensätze vorgelegt, die sowohl aus den Produktkennwerten - Eingabe - als auch den entsprechenden Maschineneinstellungen - Ausgabe - bestehen. Üblicherweise sind 50 bis 500 Datensätze ausreichend, je nach Komplexität des Problems. Diese Datensätze müssen repräsentativ für den gewünschten Prozess sein. Der Verlauf des Trainings kann durch mehrere Faktoren beeinflusst werden. Diese werden so gewählt, dass während des Trainings das absolute Fehlerminimum gefunden wird. Dabei besteht die Gefahr, dass der Lernfehler womöglich nur gegen ein lokales und nicht gegen ein glo-

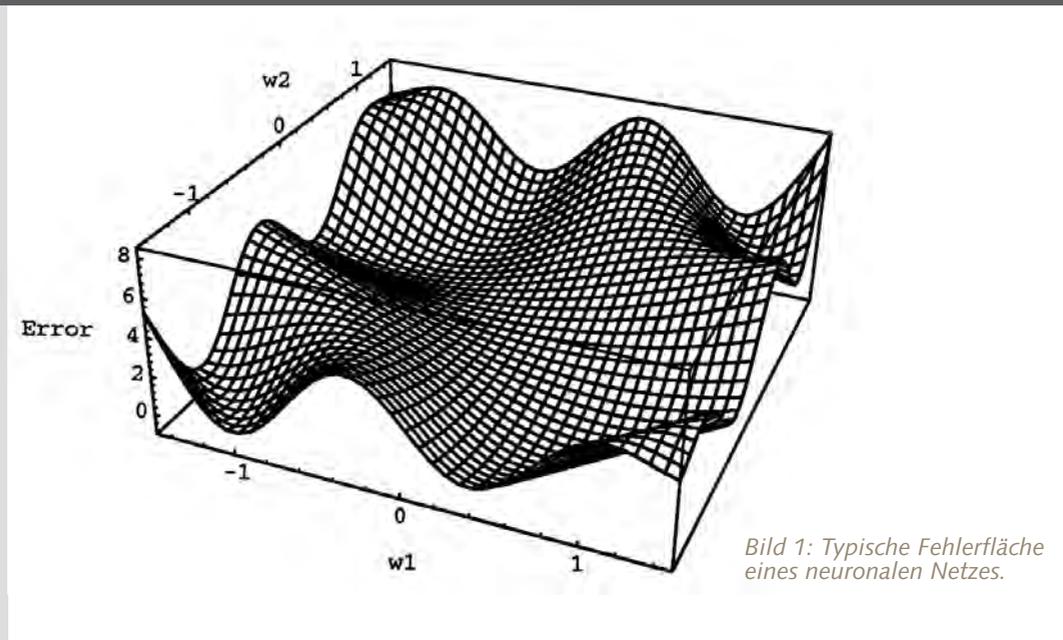


Bild 1: Typische Fehlerfläche eines neuronalen Netzes.

bales Minimum konvergiert. In Bild 1 ist eine typische Fehlerfläche eines neuronalen Netzes in Abhängigkeit zweier Faktoren dargestellt.

Die Überprüfung, ob ein Training erfolgreich war, erfolgt in der „Recall-Phase“. Nach Eingabe von Produktkennwerten, die das neuronale Netz noch nicht kennt, liefert es eine Voraussage der erforderlichen Maschineneinstellungen. Es werden nun Versuche durchgeführt, um zu überprüfen, ob mit den vorausgesagten Einstellungen tatsächlich die gewünschten Produktkennwerte erzielt werden. Letztere werden mit den gewünschten originalen Daten verglichen. In Bild 2 wird als Beispiel der Produktkennwert „Höchstzugkraftdehnung“ mit den erzielten Werten der Original-Vorgaben verglichen. Dieses gute Ergebnis belegt, dass das trainierte neuronale Netz nun die Zusammenhänge zwischen den erforderlichen Maschineneinstellungen und den Produktkennwerten erkannt und erlernt hat. Es ist auch möglich, den Datenbereich des Trainings zu verlassen, also beispielsweise größere Festigkeiten des Produkts zu fordern, als diese dem System bisher bekannt waren. Auch die umge-

kehrte Vorgehensweise ist möglich. In diesem Fall werden als Eingabewerte die Maschineneinstellungen vorgegeben. Die Ausgabe des so trainierten Neuronalen Netzes besteht dann aus den zu erwartenden Produktkennwerten. Dies funktioniert in der Regel noch besser, weil die Zuordnung Maschineneinstellung → Produkt eindeutig ist, während die Zuordnung Produkt → Maschineneinstellung zu nicht-eindeutigen Ergebnissen führen kann. Ein und dasselbe Produkt kann unter Umständen mit unterschiedlichen Maschineneinstellungen erzeugt werden.

Solche und ähnliche Fragestellungen wurden schon in zahlreichen Forschungsprojekten des ITA, in der Regel in direktem Industriesauftrag, mit Erfolg bearbeitet und gelöst. Entsprechende Systeme finden sich daher mittlerweile in vielen Industrieunternehmen, zum Beispiel bei der Garn- und Flächenherstellung, aber auch in der Produktentwicklung für technische Textilien sowie im Komponenten- und Anlagenbau.

[www.ita.rwth-aachen.de](http://www.ita.rwth-aachen.de)

**Autoren:**  
Cand.-Ing. Achim Besen studiert am Institut für Textiltechnik.  
Dr.-Ing. Dieter Veit ist Akademischer Oberrat am Institut für Textiltechnik.

Recallvergleich Höchstzugkraftdehnung

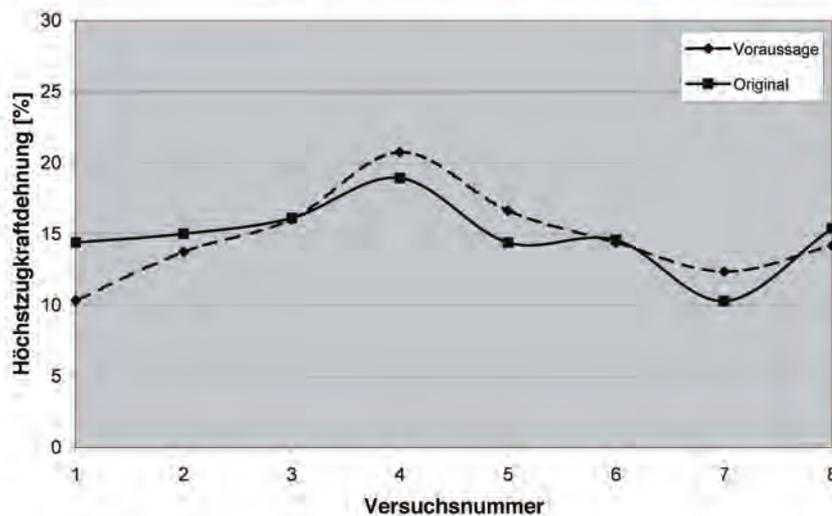


Bild 2: Vergleich der mit vorausgesagten Maschineneinstellungen erzielten Höchstzugkraftdehnungen mit den Originalwerten.



**DER EIGENE WEG**

**GRÜNENTHAL** ist ein unabhängiges, forschendes und international tätiges Pharmaunternehmen. Die Zukunftssicherung durch innovative Forschung ist ein wesentlicher Bestandteil unserer Unternehmensphilosophie. Mit hohem Engagement konzentrieren wir uns auf unseren eigenen Weg: das Schmerz-Management in relevanten Indikationen.

**GRÜNENTHAL GMBH**  
52099 Aachen, Deutschland

Sie sind

**Mediziner, promovierte Naturwissenschaftler oder Diplom-Kaufleute (m/w)**

und **Sie suchen** breite Aufgaben- und Verantwortungsbereiche in einem internationalen Umfeld und möchten dabei Ihre eigenen Ideen einbringen und verwirklichen können? Außerdem arbeiten Sie gerne in interdisziplinären Teams, sind begeisterungsfähig, Neuem gegenüber aufgeschlossen und wollen Dinge bewegen?

Dann sind Sie bei uns genau richtig!

**Wir bieten** Ihnen in unterschiedlichen Unternehmensbereichen die Chancen und Möglichkeiten, die Sie suchen.

Wir freuen uns darauf, Sie kennen zu lernen!

Nähere Informationen erhalten Sie unter [www.gruenthal.de](http://www.gruenthal.de)

Kontakt: Heike Dautermann, Corporate Human Resources,  
E-Mail: [heike.dautermann@gruenthal.com](mailto:heike.dautermann@gruenthal.com)



# Evolutionäre Clustering-Algorithmen

In vielen Bereichen der technisch-naturwissenschaftlichen Forschung sowie in zahlreichen alltäglichen Anwendungen entstehen zunehmend große und multidimensionale Datenmengen. Diese Datenmengen sind auf Grund ihrer Größe und Komplexität nicht mehr manuell zu durchsuchen oder zu analysieren. Für Genomdatenbanken stellen sich etwa Fragen wie „Welche Gene sind für ähnliche Funktionen zuständig?“ oder „Unter welchen Bedingungen werden ähnliche Gene aktiviert?“ In medizinischen Bilddatenbanken beispielsweise treten Fragen nach dem Vorkommen von Gruppen ähnlicher pathologischer Fälle oder nach Behandlungserfolgen bei Therapien mit ähnlichen Problembefunden auf. Auch im Internet trifft man auf vergleichbare Fragestellungen, etwa bei der Suche in Videoportalen: „Welche Filme sind ähnlich zu dem, den ich gerade angesehen habe?“ Die automatisierte Zusammenfassung von komplexen Objekten wie Gene, Bilder oder Videos in Gruppen ähnlicher Objekte wird als Clustering-Problem bezeichnet: In den gefundenen Clustern sollen ähnliche Objekte zusammengefasst werden, während Objekte aus verschiedenen Clustern möglichst unterschiedlich sein sollen.

46

Klassische Datenbankanfragen finden Objekte an Hand von beschreibenden Merkmalen, etwa Datum oder Ort einer Bildaufnahme oder die Angabe von Temperaturen, pH-Werten und Wirkstoffkonzentrationen bei Daten über Genexpressionsexperimente. Diese Merkmale, auch Attribute genannt, werden von den Benutzern für die Suche bestimmter Objekte vorgegeben. Heutige Datenbanktechniken haben kein Problem damit, klar spezifizierte Anfragen auch in großen Datenbeständen schnell zu bewältigen. Im Gegensatz dazu fällt die oben skizzierte Clustersuche in die Klasse der explorativen Anfragen, des so genannten Data Mining. Die Benutzer geben in der Regel keine klaren Beschreibungen ihrer Anfrage ab, sondern suchen nach Mustern und Regelmäßigkeiten



Bild 1: Subspace Clustering von Sensornetzwerken.

in der Datenbank, ohne diese im Vorhinein genau beschreiben zu können. Vielfach sind sie auch an Abweichungen von häufigen Mustern interessiert, die auf interessante Sonderfälle schließen lassen. Konkrete Anwendungen hierzu stellen die Betrugserkennung bei Kreditkarten oder die Mobilkommunikation dar.

Die explorative Suche im Sinne des Data Mining ist Teil eines Prozesses, der in der Literatur als Wissensentdeckung in Datenbanken – englisch „Knowledge Discovery in Databases“ – bezeichnet wird. Hier werden die zu analysierenden Daten zuerst aufbereitet und bereinigt, um sie für die Analyse in geeigneter Form vorliegen zu haben. Das eigentliche Data Mining sucht nach neuen, bisher unbekannt Mustern in den Daten. Abschließend werden diese Muster für eine benutzerorientierte Darstellung visuell aufbereitet, so dass die Fachexperten oder auch

die Alltagsbenutzer vertiefte Einsichten über in den Daten bislang verborgene Schätze gewinnen können.

Eine wichtige Aufgabe des Data Mining ist das bereits erwähnte Clustering: Ähnliche Objekte sollen zu Gruppen zusammengefasst werden, wobei die Objekte aus verschiedenen Gruppen sich deutlich unterscheiden sollen. Beispielsweise illustriert Bild 1 ein Clustering auf Sensoren für die Brandbekämpfung. Um Energie zu sparen, werden diejenigen Sensoren automatisch zu Clustern zusammengefasst, die die gleichen Umgebungsbedingungen messen. Aus diesen Clustern wird dann abwechselnd nur ein repräsentativer Sensor genutzt, und die übrigen können in den Bereitschaftsmodus geschaltet werden.

Weitere wichtige Anwendungsgebiete für Clustering sind die automatische Kundensegmentierung, also beispielsweise

die Feststellung, ob es Kundengruppen gibt, die bezüglich ihres Konsumverhaltens Ähnlichkeiten aufweisen. Clustering ist auch in der Biologie von zentraler Bedeutung für die Auswertung von Experimenten, um Vorschläge für die Gruppenbildung sich ähnlich verhaltender Gene oder Proteine zu erzeugen. In all diesen Anwendungsbereichen hat Clustering zu neuen Erkenntnissen für die Benutzer geführt. Die konkrete Aufgabe des Clustering stößt bei Datenbanken mit zahlreichen Attributen schnell an ihre Grenzen. In der Informatik wird aktiv daran geforscht, wie Clusteralgorithmen für den Einsatz auf hochdimensionalen Daten funktionieren können. Von hochdimensionalen Daten spricht man, wenn sehr viele Attribute zur Objektbeschreibung vorliegen. Beispielsweise sind Genexpressionsexperimente durch pH-Werte, Temperaturen, Konzentrationen von

# Bionik-Methoden für Knowledge Discovery in Datenbanken

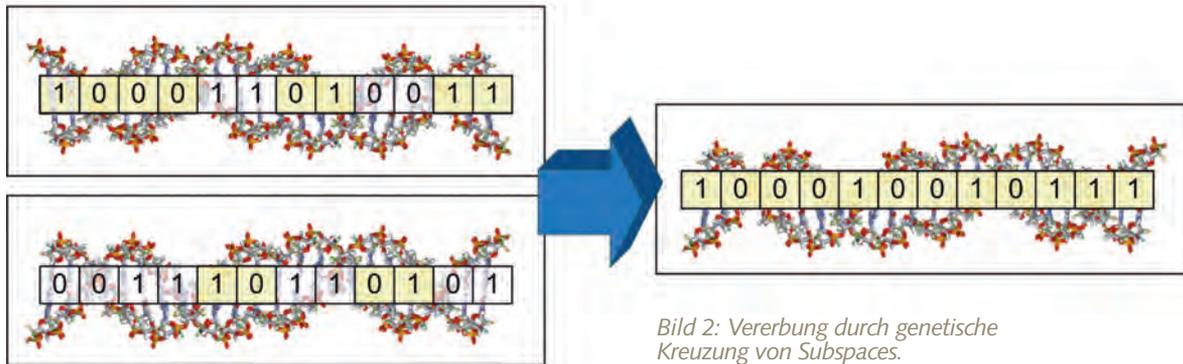


Bild 2: Vererbung durch genetische Kreuzung von Subspaces.

Stoffen der Zelle sowie von externen Wirkstoffen und eine Fülle weiterer Parameter beschrieben. Kundendaten können neben persönlichen Angaben auch bisherige Konsumparameter oder weitergehende soziodemographische Merkmale beinhalten. In diesen hochdimensionalen Daten tritt ein Effekt auf, der in der Informatik als „Fluch der Dimensionalität“ bezeichnet wird. Dies bedeutet, dass traditionelle Clusteringalgorithmen keine Muster mehr finden können, da zu viele Unterscheidungen möglich werden.

Es ist eben bei Weitem nicht klar, welche Attribute und Merkmalskombinationen dazu führen, dass Objekte in Gruppen zusammenfallen. Die Suche beginnt nun damit, die für die Cluster bestimmenden Attribute überhaupt erst festzustellen. Man versucht daher die Menge der betrachteten Attributkombinationen einzuschränken. Die Suche nach relevanten Merkmalen wird in der Literatur als Subspace Clustering bezeichnet, da durch die Beschränkung auf wenige Attribute nur Unterräume des ursprünglichen Raumes betrachtet werden.

Ein solches Subspace Clustering ist in Bild 1 dargestellt. Für den untersten Subspace Cluster sind lediglich die drei blau unterlegten Merkmale Temperatur (temperature), Lichtverhältnisse (illumination) sowie Geräuschpegel (noise level) relevant. Die übrigen Merkmale variieren sehr stark in ihren Werten und spielen für diesen Subspace Cluster daher keine Rolle.

Die Frage beim Subspace Clustering ist also, in welchen der vielen Unterräume sich signifikante Clusterstrukturen finden lassen. Eine einfache Rechnung zeigt, dass bei zehn ursprünglichen Merkmalen schon über Tausend Unterräume existieren, bei zwanzig und dreißig gegebene

nen Attributen gibt es über eine Million beziehungsweise eine Milliarde mögliche Unterräume. Es ist offensichtlich, dass auf Grund dieses exponentiellen Wachstums eine vollständige Überprüfung aller Unterräume schlichtweg zu lange dauert. Während in diesem Umfeld schon einige nützliche heuristische und approximative Ansätze entstanden sind, geht die Suche nach effizienten Verfahren unvermindert weiter, um auch große Parameterräume bewältigen zu können.

Diese Situation ist wie geschaffen für einen bionikorientierten Ansatz. Die Natur hat an vielen Stellen mit großen Parameterräumen zu tun, für die sie in vielfältiger Weise optimale Lösungen hervorgebracht hat. Der Schlüssel hierzu ist in den Mechanismen der Evolution zu finden, die wir uns auch bei der Unterraumsuche zu Nutzen machen. Anstatt nach einer Methode zu suchen, mit der alle Subspaces berechnet werden, imitieren wir den evolutionären Prozess der Auslese. In unserer Simulation evolutionärer Prozesse wird eine Population möglicher Lösungen bezüglich ihrer „Fitness“ einer Selektion für die Fortpflanzung unterworfen. Nach mehreren „Generationen“ kristallisieren sich gemäß dem Prinzip des „survival of the fittest“ geeignete Lösungen heraus. Wir modellieren Attributkombinationen als Individuen einer Population und messen ihre Fitness als Grad der Neigung, Cluster zu bilden. Im Ergebnis erhalten wir diejenigen Unterräume, die die Datenbank in möglichst gute Gruppen zusammenfassen. Der zentrale Modellierungsschritt für das Subspace Clustering besteht darin, Unterräume als Individuen für den evolutionären Prozess zu kodieren. Dazu werden mehrdimensionale Bitvektoren verwendet, in denen jede

einzelne Stelle anzeigt, ob ein bestimmtes Attribut dem individuellen Unterraum angehört oder nicht, ob das Attribut also für die Clustersuche an- oder abgeschaltet ist. Die Länge der Bitvektoren entspricht damit der Dimension des ursprünglichen, vollständigen Raums. Im zweiten Modellierungsschritt wird eine für die evolutionäre Modellierung unabdingbare Fitnessfunktion gewählt. Diese bestimmt in unserem Fall die Eignung eines Individuums, also eines Unterraums, gute Clusterstrukturen auszubilden. Hier sind große Unterschiede in den Unterräumen zu beobachten. Attribute, die zum Untersuchungsziel nur Rauschen beitragen, werden durch eine niedrige Clusterfitness entlarvt. Attribute hingegen, die häufig zu Clusterstrukturen beitragen, bekommen eine hohe Fitness zugesprochen. Unterräume mit stark rauschenden Merkmalen. Sie werden entsprechend häufig mit anderen ebenfalls geeigneten Individuen gekreuzt, wodurch sich gute Clusterattribute dauerhaft durchsetzen können.

Bild 2 zeigt die Kreuzung von Unterräumen. Die einzelnen Unterräume sind genetisch als so genannte Bitcodes modelliert, die in der Grafik als Folge von Nullen und Einsen dargestellt sind. Eine Eins kodiert dabei ein für das Clustering relevantes Merkmal, Nullen zeigen irrelevante Merkmale an. Bei der Kreuzung wird eine Kombination der genetischen Codes der Ausgangsindividuen gebildet. Dabei entsteht ein neues Individuum mit entsprechendem Bitcode, der eine neue Auswahl relevanter Merkmale kodiert. In unserer Darstellung erbt das neue Individuum die gelb markierten Teile im

Bitcode seiner Eltern. Durch diese Kreuzung und ebenfalls erlaubte Mutationsvorgänge entstehen nacheinander neue Generationen von Unterräumen, bei denen sich im evolutionären Modell, diejenigen mit der höchsten Fitness durchsetzen.

Evolutionäre Unterraumsuche begeht auch Nebenwege und untersucht weitere Möglichkeiten. Ausgehend von einer zufällig gewählten Menge von Unterräumen kristallisieren sich auf diese Art und Weise mit der Zeit gute Lösungen in dem riesigen Suchraum heraus.

Am Lehrstuhl für Informatik 9 (Datenmanagement und -exploration) werden diese Verfahren derzeit mit prototypischen Implementierungen evaluiert. Erste Ergebnisse auf synthetisch erzeugten Clustern in mehrdimensionalen Daten zeigen den Erfolg des evolutionären Ansatzes, weitere Untersuchungen sind auf Daten aus realen Anwendungen geplant. Da gleichzeitig auch die klassischen algorithmischen Lösungen in aktiven Forschungsprojekten weiterentwickelt werden, bleibt der Vergleich in diesem Wettbewerb auch in der Zukunft spannend. In jedem Fall profitieren die Anwendungen von den Fortschritten, die auf beiden Seiten erzielt werden.

[www-i9.informatik.rwth-aachen.de](http://www-i9.informatik.rwth-aachen.de)

#### Autoren:

Dipl.-Inform. Ira Assent und Dipl.-Inform. Ralph Krieger sind Wissenschaftliche Mitarbeiter am Lehrstuhl für Informatik 9 (Datenmanagement und -exploration). Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Thomas Seidl ist Inhaber des Lehrstuhls für Informatik 9 (Datenmanagement und -exploration).

# Haften oder nicht haften – Das ist die Frage

D

„Die Oberfläche hat der Teufel gemacht“, sagte einst der Physiker und Nobelpreisträger Wolfgang Pauli. Während in Festkörpern oder in Lösungen die physikalischen Verhältnisse zumeist relativ klar sind, bereiten die Phänomene an Oberflächen den Wissenschaftlern einige Kopfschmerzen. Allein die Definition des Begriffs Oberfläche ist schwieriger, als man annehmen könnte. Die Definition als „Alle Flächen, die einen Körper von außen begrenzen“ wird im mikroskopischen Bereich problematisch. Die Oberflächenatome sind gemäß der Heisenbergschen Unschärfetheorie keine scharf begrenzten Kugeln. Zwischen ihnen können Lücken vorliegen, die um vieles größer sein können, als die Atome selbst. Insbesondere an biologischen Oberflächen gibt es häufig langkettige Moleküle, beispielsweise langkettige und verzweigte Zucker, die von der Oberfläche wegragen und ihr einen fraktalen Charakter geben. In wässrigen Lösungen bewirkt eine Oberfläche eine Strukturierung des Wassers in der unmittelbaren Umgebung. Außerdem können gelöste Stoffe lose an die Oberfläche adsorbieren, sich also lose anlagern. Wo exakt beginnt also die Oberfläche? Wie man sieht, sind die Phänomene an Oberflächen kompliziert. Aber auch interessant: Mit ihren Oberflächen treten Körper in Kontakt miteinander und mit ihrer Umwelt. Jede Form von Signalübertragung erfolgt in irgendeiner Weise über Oberflächen. Daher haben sich in der Natur durch die Evolution unterschiedlichste, teilweise hoch spezialisierte Oberflächen entwickelt. Selbstreinigende oder selbstheilende Oberflächen faszinieren die Biologen und Ingenieure in gleichem Maße.

Ein wesentliches Phänomen, welches an Oberflächen auftritt, ist die Adhäsion, also die Haftung zwischen zwei unterschiedlichen Körpern und eng damit verbunden auch die Reibung. Haftung und Reibung sind manchmal erwünscht, so zum Beispiel sollen Autoreifen die Kraft des Motors über Reibung auf die Straße übertragen, und das Auto soll nicht aus der Kurve

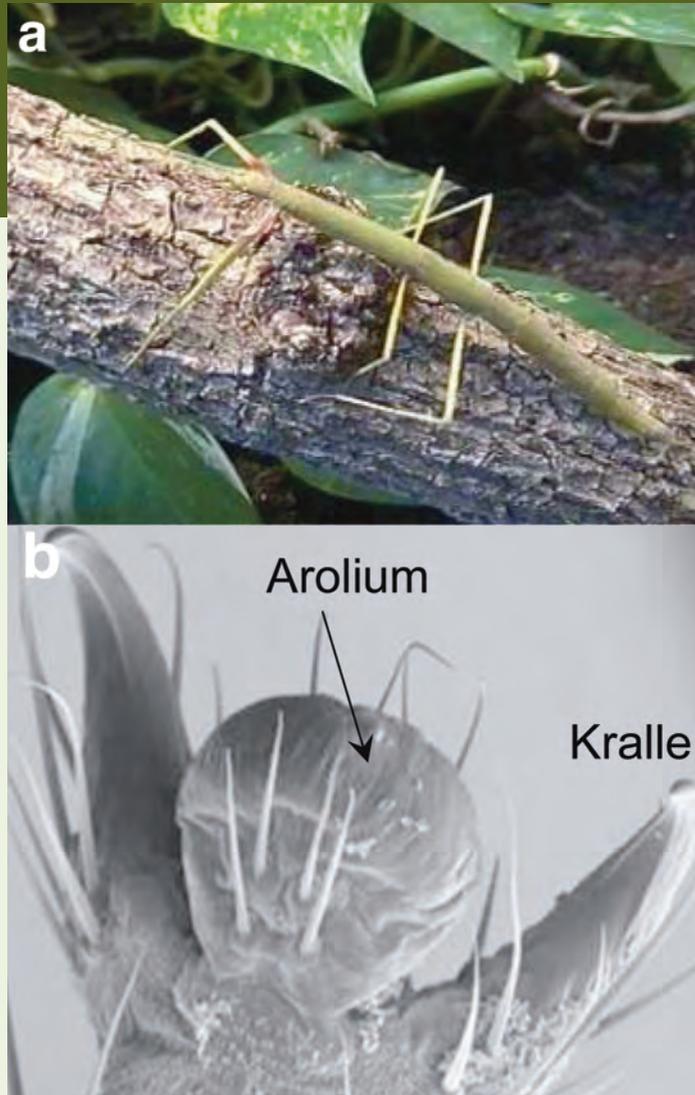
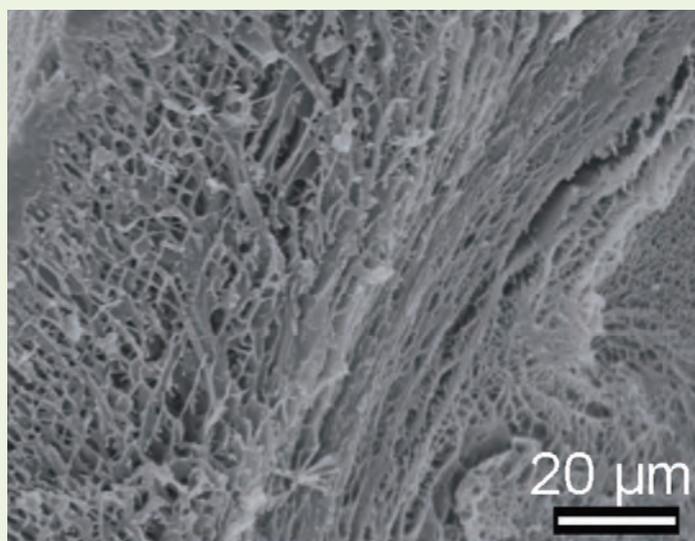


Bild 1: Indische Stabheuschrecke a) und eine elektronenmikroskopische Aufnahme ihres Haftorgans b).

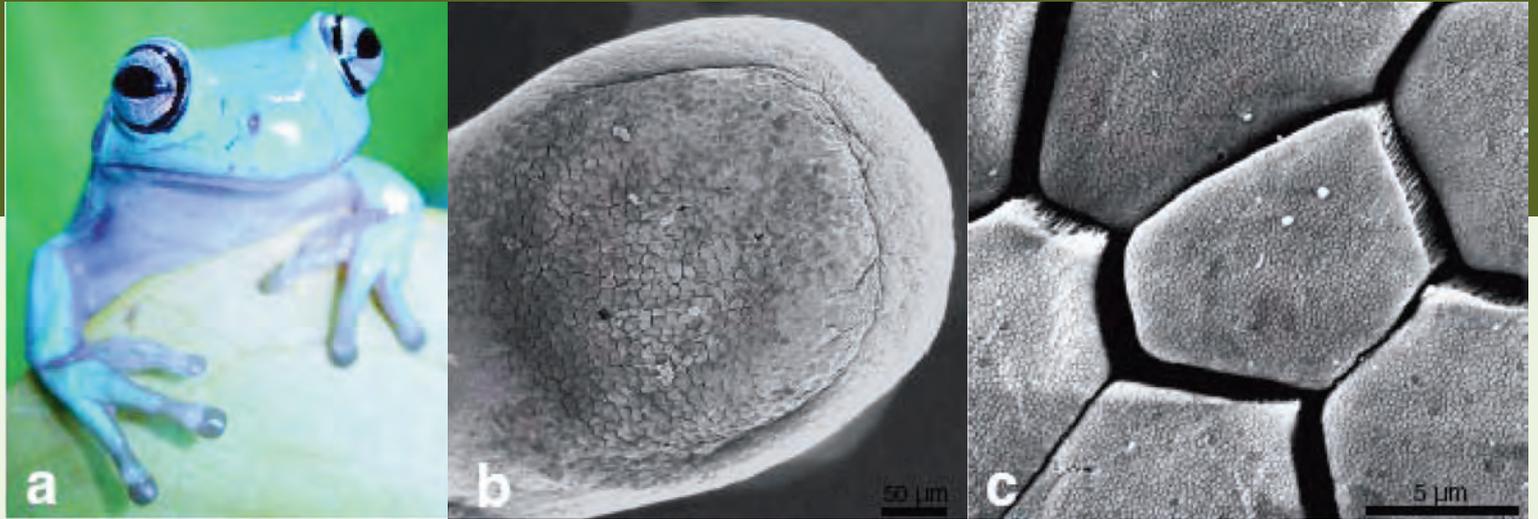
Bild 2: Elektronenmikroskopische Aufnahme der Fasern im Haftorgan der Stabheuschrecke.



fliegen, sondern an der Straße haften. Auf der anderen Seite soll Schmutz nicht an Gegenständen haften, und Reibung ist häufig gleichbedeutend mit Energieverlusten, welche Ingenieure zu minimieren suchen.

An der Abteilung für Zelluläre Neurobionik beschäftigt man sich daher unter anderem mit haftenen und nicht haftenen biologischen Oberflächen. Dabei ist an biologischen Haftstrukturen wie zum Beispiel den Haftorganen von Insekten oder Baumfröschen nicht nur die starke Haftung als solche interessant, sondern vielmehr die dynamische Regulation derselben. Eine Fliege haftet an der Decke und kann dabei noch ein Mehrfaches ihres Körpergewichts halten. Das alleine ist zwar bemerkenswert, durch moderne Klebstoffe könnte ein Haften an der Decke aber von Ingenieuren problemlos nachgeahmt werden. Allerdings kann die Fliege in Sekundenbruchteilen loslassen, die Haftung also sehr schnell regulieren. Das ist für die Fluchtreaktion, aber auch für das Gehen an der Decke extrem wichtig. Mit permanent klebrigen Füßen zu gehen, wäre zu energieaufwändig. Haftorgane, die es Tieren ermöglichen, an Wänden und der Decke zu gehen, wurden im Laufe der Evolution mehrfach erfunden. Mit zwei typischen Vertretern haben sich die Wissenschaftler des Lehr- und Forschungsgebiets für Zelluläre Neurobionik in Zusammenarbeit mit Kollegen der Universität Cambridge und der Universität Glasgow beschäftigt und zwar mit den flächigen Haftorganen an den Beinen von Stabheuschrecken und den Haftkissen an den Fingern des australischen Baumfrosches. An den Beinen der Stabheuschrecken findet sich neben Krallen ein so ge-

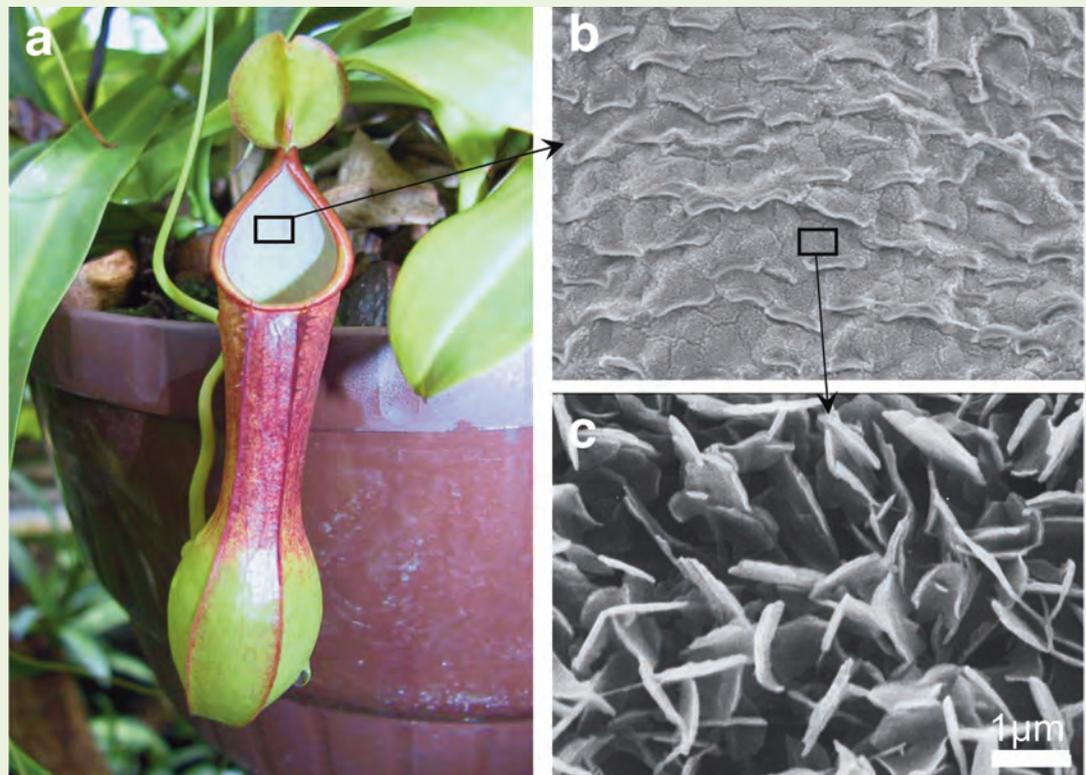
# Adhäsive- und antiadhäsive biologische Oberflächen



nanntes Arolium, siehe Bild 1. Dieses ist, abgesehen von einigen recht flachen, längs verlaufenden Falten glatt und auf den ersten Blick unspektakulär. Im Querschnitt erkennt man aber, dass dieses Arolium recht kompliziert aufgebaut ist, siehe Bild 2. Es handelt sich um eine faserverstärkte Struktur mit einer auffälligen Ausrichtung der sich verzweigenden Faserbündel. Der Baumfrosch hat an seinen Fingern eine wabenförmige Struktur, siehe Bild 3. Auch innerhalb dieser Waben finden sich speziell ausgerichtete Faserbündel. Das Geheimnis der Haftung liegt aber auch in den mechanischen Eigenschaften. Sowohl das Arolium als auch das Haftorgan der Frösche besteht aus zum Teil sehr dünnen Schichten von unterschiedlich hartem Material. Die weichsten Schichten haben eine Härte, die etwa der eines Quallenkörpers entspricht, die härtesten Schichten sind von der Konsistenz von weichem PVC. Weiches Material schmiegt sich prinzipiell einer Oberfläche sehr gut an und dringt auch in Oberflächenrauigkeiten ein. Durch die große Kontaktfläche haftet - oder besser gesagt - adheriert dieses Material sehr gut. Ein Haftorgan komplett aus weichem Material zu machen, würde aber einen zu hohen Verschleiß nach sich ziehen. Darum hat sich offensichtlich ein Schichtdesign aus unterschiedlich harten Materialien im Laufe der Evolution als sinnvoll erwiesen. Die Geometrie und die Faserausrichtung erleichtern zusätzlich das Anschmiegen der Haftorgane an unterschiedlich raue Oberflächen. Außerdem sorgen die Fasern und die Anordnung der Schichten für eine mechanische Anisotropie, das heißt, dass sich das Material je nach

Bild 3: a) Australischer Baumfrosch und elektronenmikroskopische Aufnahmen seiner Finger b) und c).

Bild 4: Kannenpflanze a) und elektronenmikroskopische Aufnahmen der „rutschigen“ Oberfläche bei unterschiedlichen Vergrößerungen b) und c).





mechanischer Belastungsrichtung anders verhält. Dadurch kann das Haftorgan durch eine Abrollbewegung leicht von einer Oberfläche gelöst werden, wogegen relativ hohe Zugkräfte parallel oder senkrecht zur Oberfläche vom Haftorgan auf die Oberfläche übertragen werden können. Dies scheint das energieeffiziente Gehen zu ermöglichen. Sollte die Oberfläche sehr rau sein, kommen bei den Insekten die Krallen zum Einsatz, mit welchen Sie auf diesen Oberflächen einen sicheren Halt finden.

Es ist durch diese Untersuchungen klar, dass Haftorgane dafür konzipiert sind, sowohl auf glatten wie auch auf rauen Oberflächen zu haften. Dies entspricht auch der Erfahrung im täglichen Leben. Fliegen und Ameisen klettern auf praktisch allen Oberflächen: Fensterscheiben, Baumrinde, Blättern, Steinen, Obstschalen und so weiter. Insofern ist es umso erstaunlicher, dass es Oberflächen gibt, an welchen Insekten nicht haften können. Eine derartige Oberfläche findet sich in so genannten Kannenpflanzen. Diese fleischfressenden Pflanzen besitzen spezialisierte Blätter, welche zu bauchigen Kannen umgebildet sind, siehe Bild 4. Sie locken Insekten mit Hilfe von Duftdrüsen in die Kanne. Der Halsbereich einer derartigen Kanne weist innen eine Oberfläche aus kristallinen Wachsstrukturen auf, auf denen Insekten nicht haften können. Die Insekten rutschen auf dieser Oberfläche aus und fallen in die Kanne. Der bauchige Bereich der

Kanne ist etwa zur Hälfte mit Flüssigkeit gefüllt, in welches die Pflanze, über spezielle Drüsen, Verdauungsenzyme abgibt. Das Insekt wird verdaut, und die Nährstoffe werden von der Pflanze aufgenommen. Die Oberfläche im Halsbereich ist nicht nur antiadhäsiv in Bezug auf die Haftorgane der Beutetiere, sondern sie ist auch selbstreinigend, ähnlich den Blättern der Lotuspflanze. In den vergangenen Jahren ist man davon ausgegangen, dass die Wachse aus dem Halsbereich der Kannen kristalline Plättchen mit einer Sollbruchstelle sind, und dass diese unter der Last eines Insekts oder eines Schmutzpartikels abbrechen. Durch das Abbrechen und das damit verbundene Verunreinigen des Haftorgans, sollte das Insekt unfähig sein, weiter zu haften. Diese Theorie konnte teilweise falsifiziert werden.

In Zusammenarbeit mit dem Gemeinschaftslabor für Elektronenmikroskopie ist es mit Hilfe der FIB-Technik – FIB steht für focused ion beam – gelungen, die exakte Morphologie der Kannenoberfläche zu ergründen. Anstelle von vielen einzelnen Plättchen besteht die Wachs Oberfläche im Halsbereich aus einem schwammartigen, porösen Wachs. Man erkennt mit herkömmlicher Rasterelektronenmikroskopie nur die Wände der Poren. Daraus wurde fälschlicherweise gefolgert, dass es sich um einzelne Plättchen handelt. Mit Hilfe der Rasterkraftmikroskopie konnte festgestellt werden, dass diese Wachsstrukturen nicht –

wie ursprünglich angenommen – sehr fragil, sondern im Gegenteil sehr rigide sind. Es ist praktisch unmöglich, dass ein typisches Beutetier, wie zum Beispiel eine Ameise, mit seinem Körpergewicht Teile der Wachsbeschichtung abbricht. Wie erklärt sich aber dann der antiadhäsive Effekt? Mittels theoretischer Modellierung des Haftorgans und untermauert durch experimentelle Befunde konnte gezeigt werden, dass das Geheimnis in der exakt abgestimmten Rauigkeit der Wachs Oberfläche, also des porösen Materials liegt. Die Oberfläche ist bereits zu rau für die Haftlappen, aber noch nicht rau genug für die Krallen der Insekten, um zu haften.

Derzeit laufen Versuche, die Oberflächen der Haftorgane und der Kannenpflanzen künstlich nachzubauen. Ein Nachbau im Maßstab 1:1, wie im Falle der Kannenpflanze bereits gelungen, soll zuerst zeigen, ob mit der Morphologie und den bisher gemessenen mechanischen Eigenschaften alle wesentlichen Einflussgrößen ermittelt wurden. Sollte das 1:1-Modell ähnliche Eigenschaften wie die Originaloberfläche zeigen, kann nach Möglichkeiten der Skalierung gesucht werden. Es soll also festgestellt werden, ob die Prinzipien auf einen größeren Maßstab übertragen werden können. Wenn das gelingt, kann man davon ausgehen, dass die dem Phänomen Haftung-Antihaftung zugrunde liegenden Prinzipien verstanden wurden.

Die hier vorgestellten bisher-

gen Untersuchungen sind noch in den Bereich der Grundlagenforschung zu zählen. Es ist die primäre Intention zu verstehen, wie geregelte Haftung und Antihaftung funktionieren. Natürlich spuken in den Köpfen der Experimentatoren schon die unterschiedlichsten möglichen Anwendungen herum. Insbesondere verbesserte Kupplungs- oder Bremsbeläge oder Autoreifen wären erstrebenswert, die eine gute Haftung an der Straße beim Bremsen oder Beschleunigen beziehungsweise in der Kurvenfahrt gewährleisten und gleichzeitig einen geringen Rollwiderstand haben. Auch Haftstrukturen für Vorrichtungen und Maschinen zur Gebäudereinigung sind denkbar. Einfache Vorrichtungen zum Positionieren und vorübergehenden Fixieren von Werkstücken im Montagebereich, die nach abgeschlossener Fertigungsschritten schnell und spurlos gelöst und entfernt werden können, sind prinzipiell nicht uninteressant. Antiadhäsive, selbstreinigende Oberflächen nach dem Vorbild der Kannenpflanzen sind sicherlich ebenfalls nutzbringend einsetzbar und das wohl nicht nur zum Schutz von Zuckerdosens vor Ameisen. Der Phantasie sind hier nur wenige Grenzen gesetzt. Es bleibt abzuwarten, ob in einigen Jahren Insekten- oder Froschautoreifen und kannenpflanzeninspirierte Antihaftpfannen oder Bügeleisen auf den Markt kommen werden.



*Bild 5: Die Charakterisierung funktioneller Morphologie ist eine Aufgabe der Abteilung Zelluläre Neurobionik. Hier begeistert die Haftung – beziehungsweise Nichthaftung – eines australischen Laubfrosches.  
Fotos: Peter Winandy*

**Autoren:**  
Univ.-Prof. Dr.techn. Werner Baumgartner leitet das Lehr- und Forschungsgebiet Zelluläre Neurobionik am Institut für Biologie II (Zoologie).  
Dipl.-Biol. Ingo Scholz ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehr- und Forschungsgebiet Zelluläre Neurobionik.

# Mit Licht Werkstoffe funktionalisieren



Medizinische Implantate erfordern spezielle Werkstoffe, Strukturen und biokompatible Oberflächen für ein verbessertes Einwachsen von Gewebe sowie andere biologisch-medizinische Funktionalitäten. Im Idealfall sollten die künstlichen Komponenten dem Vorbild der Natur nachempfunden sein. Ihre Struktur und Oberfläche sollten derart gestaltet werden, dass sie dem natürlichen Umfeld der Zellen möglichst nahe kommen. Für eine optimale Bauteilgestaltung sind deshalb Fertigungstechniken gefordert, mit denen die vielfältigen Werkstoffe der Medizintechnik mit den hohen Anforderungen an Genauigkeit und Biokompatibilität bearbeitet werden können.

Die Lasertechnik bietet ein breites Spektrum unterschiedlicher Bearbeitungs- und Fertigungsprozesse zum Struktur- und Oberflächenaufbau sowie zur Oberflächenfunktionalisierung. Am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, kurz Fraunhofer-ILT, sowie am Lehrstuhl für Lasertechnik, kurz LLT, werden hierfür photonische Technologien und Laserverfahren entwickelt, mit denen Werkstoffe mit neuen Funktionalitäten für innovative Anwendungen in der Medizin und Biotechnologie ausgestattet werden können. Auf der Mikro- und Nanometerskala lassen sich Oberflächen so strukturieren oder ganze makroskopische Bauteile derart herstellen, dass sie bewährten Konstruktionsprinzipien der Natur gehorchen beziehungsweise diese nachahmen. Beispiele aus aktuellen Forschungsprojekten am Fraunhofer-ILT sind strukturoptimierte Implantate aus Titanlegierungen als Knochenersatz, Mikrostrukturen auf Polymeroberflächen, die das Zellwachstum leiten, sowie künstlich hergestellte Nanostrukturen, die der Oberfläche der Lotus-Blume gleichen.

Strukturoptimierte Implantate werden mit dem innovativen Fertigungsverfahren Selective Laser Melting, kurz SLM, hergestellt. SLM ist ein neues generatives Fertigungsverfahren, bei dem Bauteile schicht-

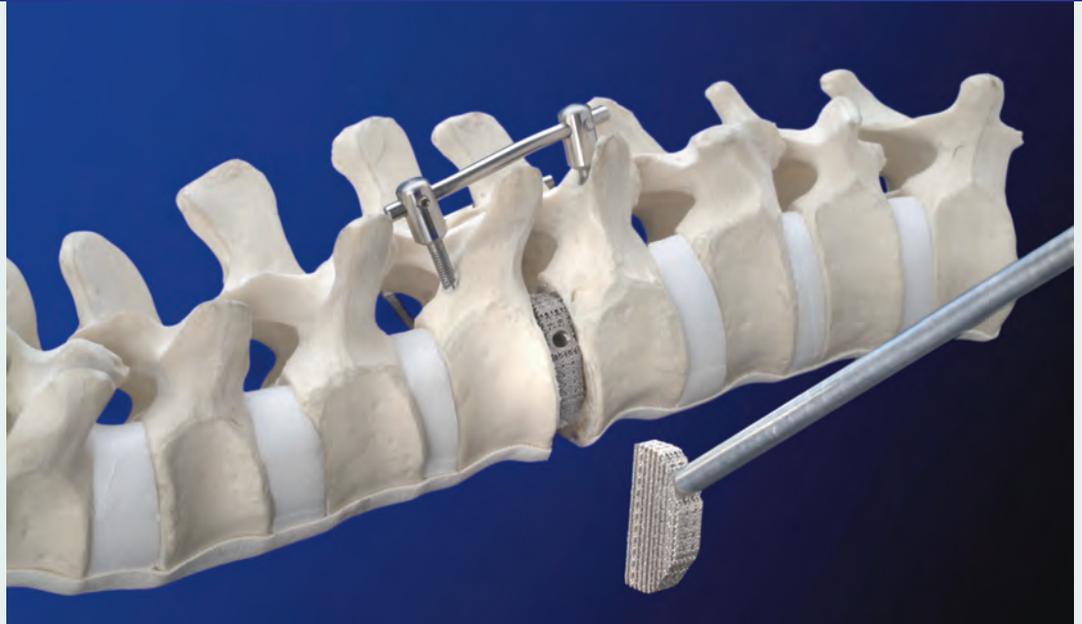


Bild 1: SLM-Wirbelfusionskörper aus Ti6Al4V.

weise durch lokales Verschmelzen eines Pulverwerkstoffs mit Laserstrahlung aufgebaut werden können. Der generative Ansatz ermöglicht im Gegensatz zu konventionellen Fertigungsverfahren die wirtschaftliche Herstellung von Individualgeometrien und Kleinstserien sowie die Herstellung von Geometrien mit internen Hohl- oder Gitterstrukturen, die konventionell nicht herstellbar wären.

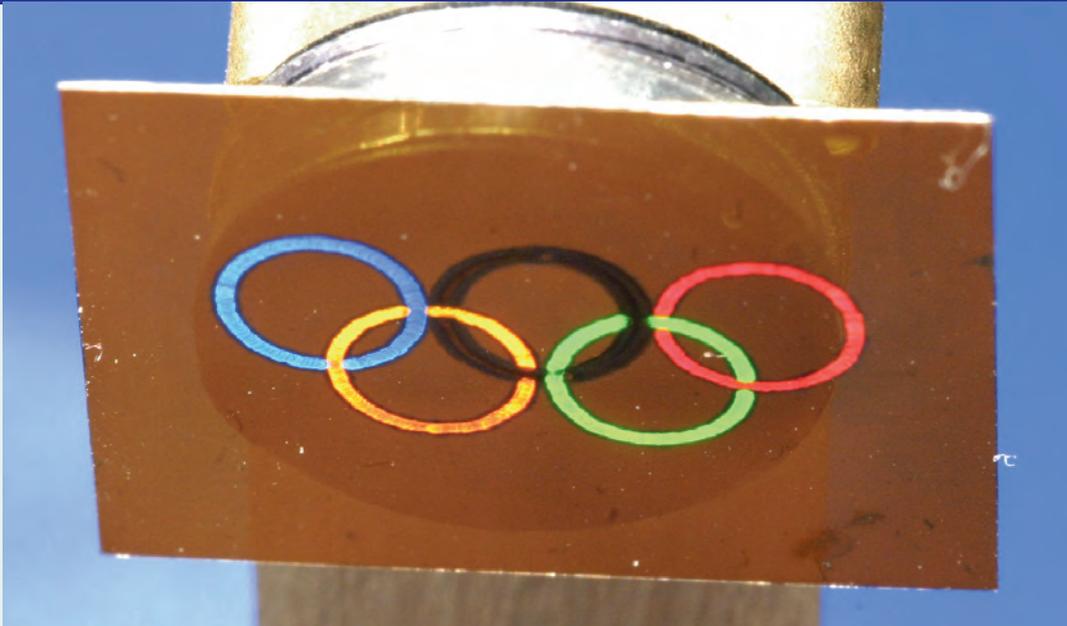
Zur Herstellung von permanent im Körper verbleibenden Titanimplantaten wurde das SLM-Verfahren für die Werkstoffe Titan und die Titanlegierung Ti6Al4V qualifiziert. Mit einer geeigneten Wärmebehandlung der Implantate aus diesem Material werden die für die medizinische Anwendung notwendigen mechanischen Materialspezifikationen erfüllt. Untersuchungen zur Biokompatibilität der mit SLM erzeugten Implantate lieferten positive Ergebnisse und sind vergleichbar mit den Untersuchungen bei

durch Fräsen hergestellten Implantaten.

Die durch das Fertigungsverfahren ermöglichte Geometriefreiheit lässt nun bisher undenkbbare neue Anwendungen im Bereich der medizinischen Implantologie zu. Das Verfahren kann einerseits zur Fertigung von Individualimplantaten zum Beispiel in der Gesichts- und Schädelchirurgie angewendet werden, wo das Implantat aus ästhetischen Gründen dem individuellen Fall angepasst werden muss. Andererseits kann durch die Integration von Hohl- und Gitterstrukturen in die Implantatgeometrie die Steifigkeit von Implantaten beeinflusst werden und eine Anpassung an die strukturellen Eigenschaften der natürlichen Knochenumgebung erfolgen. Ein weit verbreitetes Problem bei der Verwendung von metallischen Implantaten ist die Lockerung im Bereich der Grenzfläche zwischen Knochen und Implantat. Die Ursache dafür sind die stark unter-

schiedlichen mechanischen Eigenschaften des Metalls und dem angrenzenden Knochengewebe. Bei lasttragenden Implantaten, beispielsweise im Hüftgelenkersatz oder Wirbelfusion, wird durch die Belastung ein erhöhter Druck vom Implantat auf das Knochengewebe ausgeübt. Dies führt zu einer Rückbildung des Gewebes, so dass eine Lockerung des Implantates folgt. Wird nun ein Material verwendet, das die Steifigkeit des Knochens imitiert, so wird dieser Effekt vermieden. Die so angepassten Implantate besitzen damit eine erhöhte Lebenszeit und Revisionsoperationen zum Austausch werden vermieden. In Bild 1 ist ein Prototyp einer möglichen Anwendung dargestellt. Diese betrifft den häufig auftretenden Fall eines Bandscheibenausfalls, wobei man die Bandscheibe durch ein Titanimplantat ersetzt und damit die zwei benachbarten Wirbel fixiert. Die so hergestellten Implantate sind makroskopisch. Die internen Struktu-

# Neue Fertigungstechniken ermöglichen künstliche Bauteile nach dem Vorbild der Natur



*Bild 2: Farbig schillernde Nanostrukturen unterschiedlicher Perioden, angeordnet in der Form der Olympischen Ringe. Die ein-*

*zelnen Ringe haben einen Durchmesser von circa vier Millimeter. Die Strukturperiode des blauen Ringes beträgt 290 nm.*

ren zur Adaption der Steifigkeit an den Knochen sind jedoch im Größenbereich mehrerer Mikrometer.

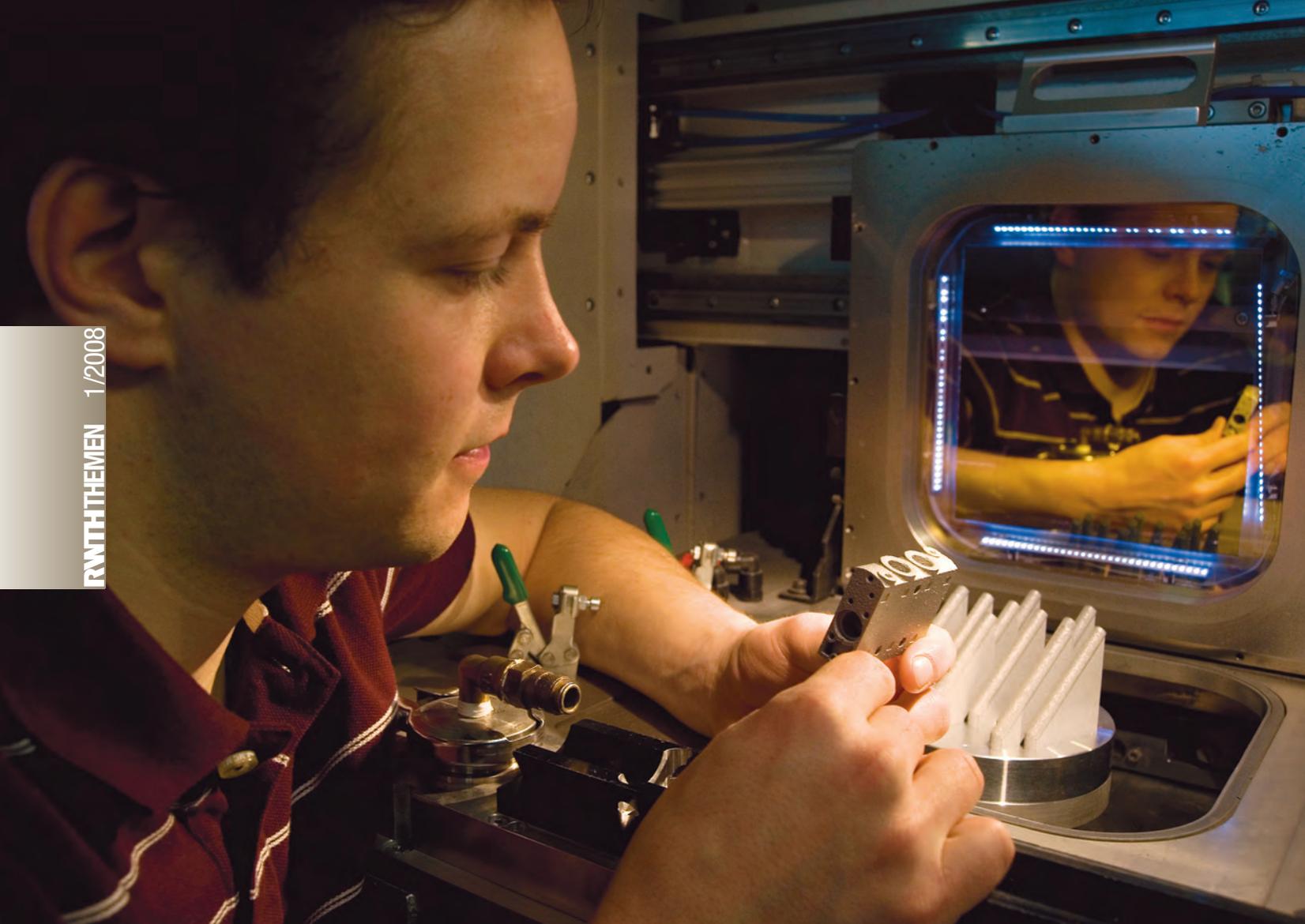
Neben der Herstellung makroskopischer Implantate durch selektives Aufschmelzen metallischer Werkstoffe liegt der Schwerpunkt der Arbeiten am Fraunhofer-ILT auf Veränderungen von Polymeroberflächen im Mikro- und Nanometermaßstab. Die Herstellung solcher mikro- und nanostrukturierter Substrate ermöglicht es, die Interaktion von Zellen mit künstlichen Oberflächen zu untersuchen. Auf diese Weise können biologische Funktionen erzeugt werden, die die Zellen gezielt beeinflussen beziehungsweise steuern, zum Beispiel durch Stimulation der Zelladhäsion oder Leitstrukturen entlang derer sich die Zellen ausrichten. Durch Laserablation – das heißt Abtrag von Material durch direktes Verdampfen mittels energiereicher Laserstrahlung – werden beispielsweise Polymere, die für biomedizinische An-

wendungen geeignet sind, mit Mikrostrukturen versehen. Diese topographisch veränderten Oberflächen führen im direkten Zellkontakt zu spezifischen Wechselwirkungen wie dem gerichteten Wachstum, wobei für unterschiedliche Zelltypen verschiedene Strukturen geeignet sind. So konnte beispielsweise in einer Kooperation mit Prof. Diane Hoffman-Kim von der amerikanischen Brown University in Providence gezeigt werden, dass Neuronen in der Lage sind, Gräben von mehr als 100 Mikrometern Tiefe und Breite zu überspannen. Die mit Strukturen im Sub-Mikrometerbereich versehenen Wände der lasergenerierten Struktur helfen bei der Verankerung der Zellfortsätze. Diese Untersuchungen liefern wichtige Erkenntnisse für die Nervenregeneration, mit dem Ziel, Nervenzellen gezielt in verletzte Bereiche einzuwachsen zu lassen oder zwei Nervenenden wieder miteinander zu verbinden.

Außer den rein topographi-

schen Materialveränderungen lassen sich mit Laserverfahren auch photochemische Modifizierungen an Oberflächen erzielen, bei denen beispielsweise Oxidationsreaktionen in den bestrahlten Zonen zum Einbau von Sauerstoff in die Substratoberfläche führen. Ebenso können auch andere photoaktivierbare Verbindungen zielgerichtet an die Oberfläche angebunden werden, mit denen sich Proteine oder andere Biomoleküle auf Implantatoberflächen oder Biochips immobilisieren lassen. Durch die hohe Ortsauflösung der Laserverfahren werden Strukturen und Auflösungen der Modifizierung möglich, die wiederum natürlichen Gegebenheiten nachempfunden werden können, so dass hier ein weiteres Werkzeug zum Studium zellulärer Prozesse zur Verfügung steht.

Nicht nur Mikrostrukturen sondern auch die sehr viel kleineren Nanostrukturen haben Einfluss auf das Verhalten von Zellen. Oberflächen mit Struk-



*Bild 3: Am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik werden umfangreiche Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften*

*eines Werkstoffes durchgeführt, beispielsweise statische und dynamische Belastungstests. Foto: Peter Winandy*

turen im Bereich einiger 100 Nanometer werden derzeit dahingehend untersucht, ob sie eher anziehend oder abstoßend auf Zellen wirken. Erste Beobachtungen von Zellen, die exakt der Ausrichtung von laser-generierten Nanorillen folgen, weisen darauf hin, dass in Zukunft solche künstlichen faserigen Strukturen als Zelleitstrukturen genutzt werden können. Nanostrukturen bergen ein hohes Potenzial, neue Funktionalitäten zu erzeugen, ohne dabei die Eigenschaften der Werkstoffe zu verändern. Durch das große Oberflächen zu Volumenverhältnis lassen sich sowohl optische als auch chemische Funktionalitäten einstellen, die mit glatten Oberflächen nicht zu erzielen sind. Durch eine Nanostrukturierung lassen sich beispielsweise auf bestimmten Polymeren superhydrophobe Oberflächeneigenschaften erzeugen, die zu einer wasserabweisenden Funktion, ähnlich einer Lotusblume, führen. Zur Generierung dieser Nanostrukturen wurde am

Fraunhofer-ILT eine Anlage aufgebaut, mit der es möglich ist, durch Interferenztechnik Strukturauflösungen im Bereich einiger 100 nm zu realisieren. Durch Variation des Bestrahlungswinkels und der Bestrahlungstrategie kann die Struktur in weiten Bereichen verändert und periodische Linien- und Noppenstrukturen erzeugt werden. Die durch Laserablation realisierten Streifenmuster auf Materialoberflächen können neben der Untersuchung von Zellwachstumseigenschaften auch für weitere technische Anwendungen genutzt werden. Durch eine Kombination von Streifenmustern mit unterschiedlichen Periodizitäten ist es möglich, farbiges Schillern zu erzeugen, ähnlich dem bestimmter Schmetterlinge wie beispielsweise dem des männlichen *Ancyluris meliboeus*. Solche schillernden Farbkombinationen, siehe Bild 2, können als Sicherheitskennzeichnung genutzt werden, indem – ähnlich dem bekannten Barcode – jedes gewünschte Produkt mit einer

individuellen Farbcodierung in Form von unterschiedlichen Farbfolgen zur Produktkennzeichnung und Sicherung versehen wird.

Weiterhin bieten sich nanoskalige Strukturen zur ortsselektiven Einstellung von Oberflächenfunktionalitäten für Mikrofluidik-Bauteile an. Durch eine geeignete Mehrfachstrukturierung lassen sich funktionale Muster erzeugen, mit denen zum Beispiel die Benetzbarkeit der Oberfläche so verändert werden kann, dass in bestimmten Bereichen superhydrophobe und hydrophile Eigenschaften erzeugt werden.

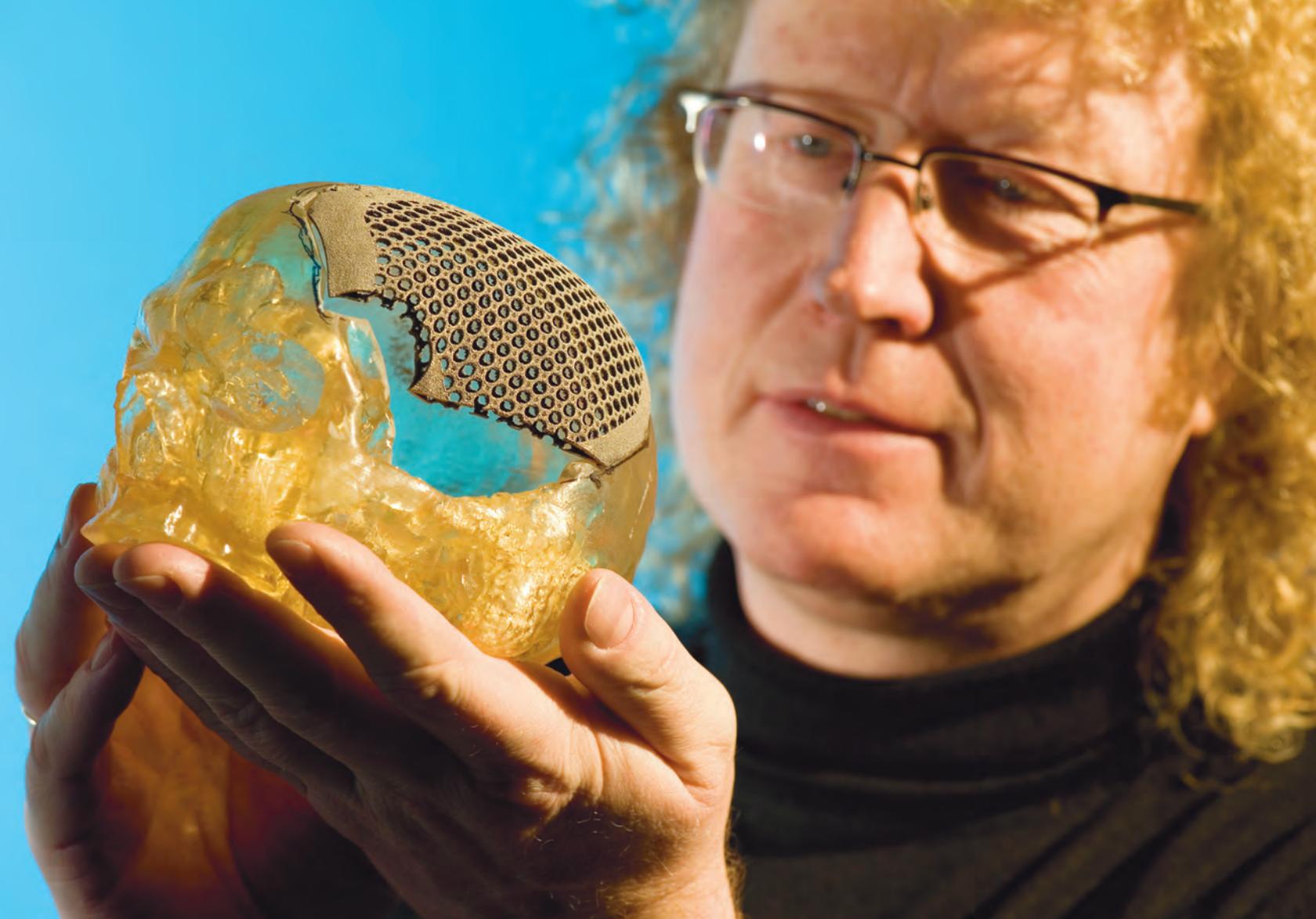
Die genannten Beispiele zeigen, dass durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Ingenieuren, Physikern, Chemikern, Biologen und Medizinern die Vorteile neuer Fertigungsverfahren schnell in biomedizinische Anwendungen überführt werden können. Gleichzeitig stellen Vorgaben, die der Natur entnommen werden, ständig neue Anforderungen an die technische Machbarkeit. Die

Verbindung von Biologie und Technik bietet daher die Perspektive für innovative Anwendungen in der Medizintechnik und angrenzenden Bereichen.

[www.ilt.rwth-aachen.de](http://www.ilt.rwth-aachen.de)

#### **Autoren:**

Dipl.-Phys. Stefan Beckemper und Dr.rer.nat. Elke Bremus-Köberling sind Wissenschaftliche Mitarbeiter der Abteilung Mikrotechnik am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik. Dr.-Ing. Arnold Gillner leitet die Abteilung Mikrotechnik am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik. Dipl.-Phys. Simon Höges ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Lehrstuhls für Lasertechnik. Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Reinhart Poprawe, M.A. ist Inhaber des Lehrstuhls für Lasertechnik und Leiter des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik. Dr.rer.nat. Konrad Wissenbach leitet die Abteilung Oberflächentechnik am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik.



*Bild 4: Das Selective Laser Melting-Verfahren ermöglicht patientenspezifische Implantate aus Titanlegierungen.  
Foto: Peter Winandy*

# Metallische Gussteile nach dem Vorbild der Natur

Jahrtausende währende Evolutionsprozesse haben in der Natur dreidimensionale Strukturen und Oberflächenreliefs hervorgebracht, welche optimal an ihre Umgebung angepasst und für spezielle Funktionen ausgelegt sind. „Bionik“ ist die Bezeichnung für die technische Nutzung der zu Grunde liegenden Prinzipien und der daraus entstandenen Evolutionsergebnisse.

Insbesondere der „Lotuseffekt“ ist im allgemeinen Sprachgebrauch bereits zu einem Synonym für „selbstreinigende Oberflächen“ geworden. Weitere Vorbilder für Oberflächen aus der Natur wie die „Haifischhaut“ zur Strömungsoptimierung, das „Mottenaugen“ als Vorbild für Antireflexbeschichtungen oder der „Sandfisch“ als „reibungssarme Technologie“ für den Transport granularer Medien haben ebenfalls schon Umsetzungen in technische Anwendungen gefunden.

Neben zweidimensionalen, natürlichen Oberflächenstrukturen sind auch eine Vielzahl dreidimensionaler Strukturen wie zum Beispiel ein Schachtelhalm, ein Pelikanknochen oder auch nur eine einfache Astgabel sehr interessante Vorbilder für optimal an eine zu erwartende mechanische Belastung angepasste Konstruktionen beziehungsweise Werkstoffe.

56

Die Nutzung biologischer Prinzipien und die Realisierung technischer Entwicklungen auf der Basis solcher „natürlicher“ Vorbilder sind für die Entwicklung technischer Elemente hochinteressant. Biologische Phänomene zeigen hierbei Strategien auf, um technische Horizonte zu erweitern. Entsprechende Lösungsansätze sind jedoch nicht zwangsläufig besser als existierende technische Lösungen und sollten auf ihre Vorteile überprüft werden, da die Vielschichtigkeit der Ursachen natürlicher Entwicklungen nicht in ihrer Gesamtheit erfassbar ist.

Die in der Natur auftretenden Strukturen sind in der Regel an die jeweiligen Anforderungen gut angepasst. Die Haifischhautstruktur beispielsweise ist optimal für einen mit hoher Geschwindigkeit durch Wasser



*Bild 1: Strukturen an Bäumen zeigen eine Vielfalt an Topologien. So findet die Ausbildung von Wülsten zur Verstärkung von Stellen an denen ein Ast*

*abgesägt wurde ein Abbild bei der Verstärkung von Kernlöchern an gegossenen Fahrwerksteilen im Automobilbau. Bild: Georg-Fischer AG*

schwimmenden Fisch. Die Übertragung und Nutzung des dabei wirkenden Grundprinzips auf technische Anwendungen wie zum Beispiel auf ein mit noch höherer Geschwindigkeit durch die Luft fliegendes Flugzeug oder auf eine in einer extrem heißen Umgebung rotierende Turbinenschaufel, erfordert neben dem grundlegenden Verständnis des Prinzips insbesondere eine Anpassung sowohl des Werkstoffes als auch der typischen Längenskalen der Ober-

flächenstruktur an den jeweiligen Anwendungsfall.

Erfolgreiche biologische Evolutionsprinzipien wie Mutation und Selektion haben in der Natur in einem langjährigen Prozess zur Ausbildung solcher – für den jeweiligen Anwendungsfall optimierten – Strukturen geführt.

Dieselben Prinzipien finden aktuell in so genannten evolutionären Algorithmen Anwendung, in welchen beispielsweise optimale Bauteilkonstruktionen im Hinblick auf spezielle Lastfälle

bei gleichzeitiger Randbedingung eines minimalen Werkstoffeinsatzes in einem iterativen Simulationsverfahren ermittelt werden. Jede der numerisch erzielten und prinzipiell möglichen Lösungen entspricht hierbei einer „Mutation“. Aus der Menge der Mutationen wird schließlich iterativ diejenige Lösung selektiert, welche für den vorgegebenen Lastfall den geringsten Werkstoffeinsatz erfordert. Das Ergebnis solcher Optimierungen sind in der Regel komplexe Bauteilgeometrien, welche nur schwer mit klassischen Fertigungsverfahren realisierbar sind. Die erste Umsetzung der im Computer berechneten, virtuellen Bauteilgeometrie in ein erstes „handhabbares“ Modell oder in eine Form erfordert moderne Methoden des „Rapid Prototyping“. Bei solchen Verfahren, wie dem Selective Laser Sintering oder mit den Tintenstrahldruckern vergleichbarem 3 D-Wachsdrukken, wird ein aus reiner Information bestehender Bauplan erstmals in ein reales Bauteil mit der gewünschten Form umgesetzt. Ein Vorgang, der dem Wachstum und der Diversifikation von biologischem Gewebe auf Basis von DNA-Informationen im Grundprinzip entspricht, auch wenn hier offensichtlich riesige Unterschiede vorhanden sind.

Im Allgemeinen sind die für Rapid-Prototyping Methoden verwendeten Werkstoffe nicht für die letztlich gewünschte Anwendung des Bauteils geeignet. Der Werkstoff muss daher an seine Umgebung, das heißt seine spätere Anwendung, optimal angepasst sein. Diese Anpassung erfolgt auf Basis einer Replikation, bei welcher die Geometrie des aus dem Rapid-Prototyping Prozess resultierenden Modells in einen anderen Werkstoff umkopiert wird.

Technische Prozesse, die das Umkopieren eines vorhandenen Modells aus einem Werkstoff in eine Vielzahl anderer Werkstoffe (Metalle, Keramiken, Polymere oder Elastomere) ermöglichen, finden insbesondere beim Feingussverfahren Anwendung. Das Modell, zum Beispiel aus Wachs, wird hierbei mit einem kerami-



*Bild 2: Replikation der Strukturen eines Pelikanknochens in einem metallischen Gussteil. Die mittels Computertomographie vermessene und erfasste Geometrie wird durch ein Ra-*

*pid-Prototyping Verfahren in ein Modell umgesetzt (rechts, hell) und im Feingussverfahren in einem Aluminiumbauteil reproduziert (dunkel).*

schon Schlicker umhüllt. Nach dem Trocknen des Schlickers, dem Ausschmelzen des Wachsmodells und dem Brennen zur Keramik entsteht ein keramisches Negativ des gewünschten Bauteils. In diesen Hohlraum wird dann flüssiges Metall gegossen und die keramische Formschale nach der Erstarrung des Metalls entfernt. Das entstandene Bauteil kann bei sorgfältiger Einstellung der Parameter beim Giessen in einer Qualität hergestellt werden, die keiner weiteren Nachbearbeitung bedarf. Viele Prozessschritte sind automatisierbar und es können so unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten in einem replikativen Verfahren günstig individuelle Bauteile hergestellt werden, die höchsten Qualitätsanfor-

derungen genügen.

Die Verfahren der Gießertechnik sind somit Urformverfahren. Sie zeichnen sich in Bezug auf Bionik durch die Möglichkeit der Herstellung kompliziertester Bauteile aus metallischen Werkstoffen aus wie beispielsweise astgabelartig ausgestaltete Querlenker/Lager, mit fischförmigen Verrippungen versteifte Maschinenbetten oder knochenähnliche, zelluläre Strukturbauteile. Simultan – im wahrsten Sinne des Wortes in einem Guss – können die Bauteile durch die Erzeugung reliefartiger Oberflächen mit Strukturgrößen im Bereich weniger Mikrometer funktionalisiert werden.

Die Oberflächenqualität hat im Feinguss klassische Weise eine bedeutende Rolle. Da jeder

weitere Prozessschritt bei der Herstellung eines Bauteils die Kosten steigert, ist das Verfahren auf die Erzeugung höchst präziser, glatter Oberflächen optimiert. Die Erzielung definierter Oberflächen mit geometrischer Funktionalität stellt eine neue Herausforderung an die verwendeten Materialien und Verfahren dar. Die als Matrizenmaterialien verwendeten Wachse sind in der Lage, Strukturen im Bereich einiger Nanometer abzubilden. Die üblichen Schlickermaterialien können Rauheiten im Mikrometer-Bereich darstellen. Daher ist es möglich, feinste Strukturen im Mikrometer- und im Einzelfall sogar Submikrometerbereich im Feingussverfahren auf metallische Bauteile zu übertragen, um ihnen so eine zusätzliche Funk-

tionalität zu verleihen.

Die Modifikation von Oberflächen nach biologischem Vorbild eröffnet vielfältige Möglichkeiten in Bezug auf eine Funktionalisierung von Oberflächen durch Mikrostrukturierung. Derzeit werden feine Oberflächenstrukturen in Metallen in der Regel durch chemische Verfahren wie Ätzen, oder durch physikalische Verfahren wie Laserstrukturierung oder mikrospanende Bearbeitung erzeugt. Diese Verfahren stellen einen zusätzlichen Schritt bei der Herstellung eines metallischen Bauteils dar. Im Vergleich zu bisher verfügbaren Kunststoffbauteilen mit strukturierter Oberfläche ergeben sich die Vorteile entsprechender metallischer Bauteile und Halbzeuge insbesondere durch eine größere physikalische und chemische Belastbarkeit. Ein geringer Verschleiß führt zu einer längeren Lebensdauer, eine größere Härte zu höherer mechanischer Belastbarkeit und die große thermische Stabilität bietet die Möglichkeit des Einsatzes bei höheren Temperaturen. Auch andere Eigenschaften wie die Leitfähigkeit eines Metalls, elektrisch und/oder thermisch, können zur Funktionalisierung von Oberflächen genutzt werden.

Die Bereiche Struktur- und Oberflächenbionik behandeln im Allgemeinen unterschiedliche technische Inhalte. So gewinnt nach biologischem Vorbild auch die Kombination von Werkstoffen zu Verbunden an Bedeutung, denn die charakteristischen Eigenschaften der einzelnen Werkstoffklassen können sich hier vereinen und neue Maßstäbe setzen. Insbesondere der Verbund biologischer Gewebe mit technischen Werkstoffen wird in Zukunft immer weiter an Bedeutung gewinnen.

In der Medizintechnik wird die Biomimetik unter anderem zur Lösung von Inkompatibilitätsproblemen untersucht. Im Gießerei-Institut wurde eine Studie zur gießtechnischen Nachbildung der Spongiosa-Struktur eines Pelikanknochens angefertigt. Die Spongiosa ist im Gegensatz zu der äußeren Schicht eines Knochens schwammartig aufgebaut, bietet aber durch ihre gute

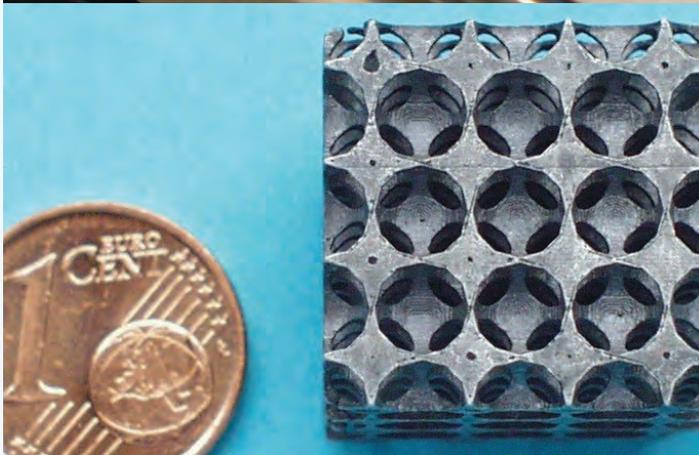


Bild 3: 3D-Drucker zur Herstellung von Wachsprototypen auf Basis von CAD Datensätzen (oben) und Beispiel für eine so hergestellte periodische Struktur (unten).

Anpassung an die real auftretenden mechanischen Spannungen eine hohe Belastbarkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht des Knochens. Durch die gießtechnische Herstellung dieser filigranen Strukturen ist auf der einen Seite die individuelle Anpassung und Anfertigung von Implantaten möglich, die in Zukunft Patienten einen deutlich höheren Komfort durch bessere Passungen, größere Sicherheiten und geringere Gewichte der Implantate bieten wird. Auf der anderen Seite ist die Übertragung des Bauprinzips – eine kompakte Randschicht, die im Inneren von an die Spannungsverläufe angepassten, filigranen Strukturen stabilisiert wird – auf andere Bereiche interessant, in denen hohe Stabilität bei kleinem Gewicht gefordert ist.

In einem aktuellen Forschungsprojekt wird ein Verfahren zur Erzeugung schwammartiger Strukturen aus der biokompatiblen Titanlegierung TiAl6Nb7 zur Untersuchung ihrer Eignung als Knochenimplantatwerkstoff entwickelt. Die knochenähnlichen Strukturen werden mit einer bioaktiven Reaktionsschicht versehen, die eine Anbindung der Knochenzellen an das Implantat induzieren soll. In diesem Projekt vereinen sich die Aspekte

von Werkstoff-, Volumen- und die Oberflächenbionik. Mit der filigranen Struktur wird nicht nur der natürliche Aufbau eines Knochens imitiert, auch die mechanischen Eigenschaften des künstlichen Materials können, besser als mit klassischen Fertigungsverfahren, an die Eigenschaften eines vitalen Gewebes angepasst werden. Ziel dieser Arbeit ist ein aktiver Verbund der Knochenzellen mit dem Metall über eine große, aktive Oberfläche zur Vermeidung der häufigsten Versagensfälle bei Implantaten: der Lösung der Verbindung zwischen dem Knochen und dem künstlichen Werkstoff. Der Rotor einer Miniaturblutpumpe ist eine weitere typische mögliche Anwendung, in der sowohl die hohe Oberflächengüte des Feingusses als auch die Integration funktionaler Oberflächen und Biokompatibilität eine wichtige Rolle spielen.

Neben den obigen Beispielen für natürliche Vorbilder von Oberflächenstrukturen und mechanisch optimalen Konstruktionen aus bekannten Werkstoffen, liefert die Natur darüber hinaus auch Hinweise auf völlig neue Werkstoffe mit vollkommen neuartigen optischen und akustischen Werkstoffeigenschaften aufgrund spezieller, periodischer

Strukturen. In der Natur werden diese zum Beispiel an Opalen, an den Stacheln der Seemaus oder bei Schmetterlingsflügeln beobachtet. Derartige periodische Strukturen – so genannte „photonische“ und/oder „phononische“ Kristalle – haben ein hohes Anwendungspotenzial in der Optoelektronik beziehungsweise der Akustik. Während die im Bereich der Lichtwellenlänge liegenden Längenskalen „photonischer Kristalle“ konventionellen Gießverfahren in der Regel nicht zugänglich sind, lassen sich „phononische Kristalle“ mit besonderen akustischen Eigenschaften bereits als Gussbauteile darstellen.

Zusammenfassend steht die Bionik als ein recht neuer Bereich der Wissenschaften am Anfang ihrer Entwicklung. Die auf Jahrtausende alten Traditionen beruhende, aber dennoch hochmoderne, höchst innovative und gestalterisch extrem flexible Gießereitechnik wird bei der Umsetzung bionischer Prinzipien in technische Bauteile und Produkte zukünftig höchstwahrscheinlich eine wesentliche Rolle spielen.

[www.gi.rwth-aachen.de/](http://www.gi.rwth-aachen.de/)

**Autoren:**  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Bührig-Polaczek hat den Lehrstuhl für Gießereiwesen inne. Dipl.-Ing. Katrin Hagemann ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Gießerei-Institut. Dr.rer.nat. Georg J. Schmitz ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei ACCESS e.V., einem An-Institut der RWTH Aachen.



*Bild 4: Der Nachbau biologischer Strukturen erfolgt im Gießerei-Institut. Die filigrane Struktur des Knochenmodells kann durch Feinguss abgebildet werden. Foto: Peter Winandy*

# Biomechanik sorgt für maximale Festigkeit und minimales Gewicht

In technischen Anwendungen ist es wichtig, Bauteilformen so zu wählen, dass das Material möglichst optimal ausgenutzt werden kann. Dünnwandige Profile wie Laternenmasten oder Doppel-T-Träger sind beispielsweise so konzipiert, dass sie mit möglichst wenig Material eine hohe Steifigkeit besitzen und sich somit bei mechanischer Belastung nur gering verformen. Diese Materialausnutzungen kann man in der Natur wiederfinden. Ein Grashalm besitzt ebenfalls ein dünnwandiges Hohlprofil, so dass er sein Material optimal verteilen kann. Nachdem man somit erkannt hat, dass technische Optimierungen, die sich Ingenieure über viele Jahre überlegt haben, bereits in der Natur vorhanden sind, bietet es sich an, die Situation umzukehren und zunächst nach optimalen Materialausnutzungen in der Natur zu suchen und sie dann auf technische Probleme zu übertragen.

Dies kann auch für dünnwandige flächenhafte Strukturen geschehen, die in zahlreichen technischen Anwendungen vorliegen. Beispiele dafür sind Druckbehälter, Unterwasserboote, Dächer oder auch Tunnel im Bergbau, die über ihre Oberfläche mit hohen Drücken belastet werden. Die Tragfähigkeit der dünnen Struktur hängt dabei maßgeblich von der Form des Bauteils ab. Man denke beispielsweise an die Kuppel eines Atomreaktors, die durch ihre Form die Einwirkung besonders großer Kräfte aushalten kann. Das Ziel der Formgebung einer dünnwandigen Struktur ist es daher, die Form so zu wählen, dass das Material möglichst optimal ausgenutzt werden und somit den größtmöglichen Kräften standhalten kann, ohne zu versagen.

Bei der Optimierung geht es aber nicht immer nur um die äußere Struktur, sondern auch die innere Struktur des verwendeten Materials kann optimal angeordnet werden. Beispielsweise stellen Streben und Verstärkungen, wie sie im Inneren von Knochen auftreten, eine optimale Verteilung der Kno-

chenmasse dar. Dabei besteht das Optimum daraus, mit so wenig Masse wie möglich eine besonders dehn- und biegesteife Struktur zu formen. Alle Einzelteile sind so zusammengesetzt, dass Knochen elastisch und bruchfest zugleich sind. Bei alltäglichen Bewegungen denkt man kaum daran, welchen Belastungen die Knochen permanent ausgesetzt sind. Relativ selten versagt das Baumaterial Knochen, was aber durch Überbeanspruchung bei einem Unfall oder durch Erkrankungen beziehungsweise Veränderungen im höheren Lebensalter geschehen kann. Die mechanischen Eigenschaften, die die Stütz- und Schutzfunktionen der Knochen gewährleisten, werden aus den Grundbestandteilen, wie Eiweißstoffen, Knochenzellen, Blutgefäßen und dem Mineral Kalzium, gebildet. Des Weiteren sind auch in sehr geringen Mengen Phosphat, Magnesium und Kalium enthalten. Kalzium ist dabei für den Aufbau der Knochen von entscheidender Bedeutung, während Vitamin D den Einbau des Kalziums in das Knochengewebe realisiert.

Die Knochenzellen werden nach ihrer Funktion unterschieden. Die Bildungszellen, Osteoblasten, scheiden solange Knochengrundsubstanz ab, bis sie davon eingeschlossen sind. Danach werden diese Zellen Osteozyten genannt. Damit der Knochen aber nicht ständig weiterwächst, verfügt er über die Osteoklasten, die das Knochengewebe wieder abbauen. Während des gesamten Lebens wird Knochensubstanz auf- und abgebaut. Bis zum 35. Lebensjahr überwiegen hierbei die Aufbauprozesse, bei denen die Knochenmasse ständig zunimmt. Danach vermindert sie sich jährlich um etwa 1,5 Prozent.

Vor der Pubertät wirken sich genetische Veranlagungen, Kalzium, Vitamin D und körperliche Belastungen auf das Knochenwachstum aus. Später sind auch Östrogen und Testosteron daran beteiligt. Die Knochendichte wird ebenfalls durch das Körpergewicht beeinflusst. Bei

magersüchtigen Menschen nimmt die Knochendichte ab und erholt sich selbst nach erfolgreicher Behandlung nicht mehr. Auch körperliche Bewegung regt den Knochenstoffwechsel an, wobei auch Extremsportler unter verminderter Knochenmasse leiden können. Bemerkenswert ist, dass Knochen bei einem Sturz das 20-Fache des Körpergewichts auffangen können, ohne zu brechen. Dabei sind sie sehr leicht. Das gesamte Skelett eines Menschen ist etwa so schwer wie zwölf Prozent des Körpergewichts. Der Aufbau des Knochens folgt nach Pauwels (1965) dem so genannten Minimum-Maximum-Prinzip, einem Leichtbauprinzip. Es wird mit einem Minimum an Material und Gewicht ein Maximum an mechanischer Festigkeit erreicht, so wie es auch in technischen Anwendungen der Fall sein muss. Dabei sollen Knochen nicht nur hart und fest, sondern auch elastisch und biegsam sein. Deshalb bestehen sie auch nicht aus einer homogenen Masse wie Beton oder Stahl, sondern weisen komplizierte Strukturen auf, die von Knochen zu Knochen beziehungsweise Individuum zu Individuum unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Nur etwa 20 Prozent des Knochenvolumens besteht aus Knochenmasse. Die restlichen 80 Prozent sind ein System aus Hohlräumen. Hohlräume und Knochenmatrix ähneln in ihrer Mikroarchitektur den Streben und Balken eines technischen Bauwerks. Sie gleichen den Konstruktionen von großen frei tragenden Gebäudedekuppeln, da sie sich so ausrichten, dass Druck- und Zugspannungen von einer idealen Architektur aufgenommen werden. Verändert man diese Druck- und Zugspannungen zum Beispiel durch krankhafte Verformungen des Knochens oder den Einbau von Implantaten, verändern sich auch die Struktur des Knochenmaterials und die Dichte in der Form, dass eine den neuen Belastungen entsprechende ideale Konstruktion aus minimaler Masse und maximaler mechanischer

Festigkeit entsteht. Gestaltoptimierungen können auch in anderen Lebensformen gefunden werden und als Vorlage für eine technische Anwendung dienen. Dazu eignen sich dünnwandige Strukturen aus der Natur als Vorlage, die auf ihre mechanischen Eigenschaften hin untersucht werden können. Hierbei ist darauf zu achten, unter welchen Gesichtspunkten man davon ausgehen kann, eine natürliche Struktur als Optimum zu bezeichnen. Schließlich könnte auch im Zuge eines Evolutionsprozesses ein Optimum noch in der Entwicklung sein. Aus diesem Grund bietet es sich an, Lebensformen zu wählen, die sich seit Jahrtausenden nicht mehr verändert haben, so dass man von einer möglichen Optimierung ausgehen kann. Eine derartige rezente Art stellt das Nautilusgehäuse dar. Diese dünnwandige Struktur besteht aus einem planspiralen Gehäuse eines Cephalopoda oder auch Kopffüßler, in dessen Inneren zusätzliche Scheidewände, die Septen, angeordnet sind.

In der Natur besitzt diese dünnwandige Struktur eine ausgeprägte Festigkeit gegenüber der Wasserdruckbelastung. Aus Studien ist bekannt, dass diese Gehäuse Wasserdrücken bis zu 80 bar standhalten. Das spiralförmige Gehäuse ist zusätzlich mit inneren Septen versehen, die die Stabilität erhöhen. Durch die Anordnung der Scheidewände entsteht ein Kammersystem, das von einem Siphon durchzogen wird, der sowohl die Kammern mit Gas füllt, als auch Wasser aus den Kammern entfernen kann. Auf diese Weise kann der Innendruck erhöht werden, so dass dadurch nicht nur die Auftriebeigenschaften, sondern auch die Stabilität des Gehäuses beeinflusst werden. In technischen Anwendungen ist es von Bedeutung, Flächen-tragwerke so zu konstruieren, dass ihr Material durch eine günstige Formgebung der Struktur optimal ausgenutzt wird. Beispielsweise können Tunnel im Bergbau oder Druck-

# Optimale Materialausnutzung natürlicher Strukturen als Vorlage für technische Anwendungen

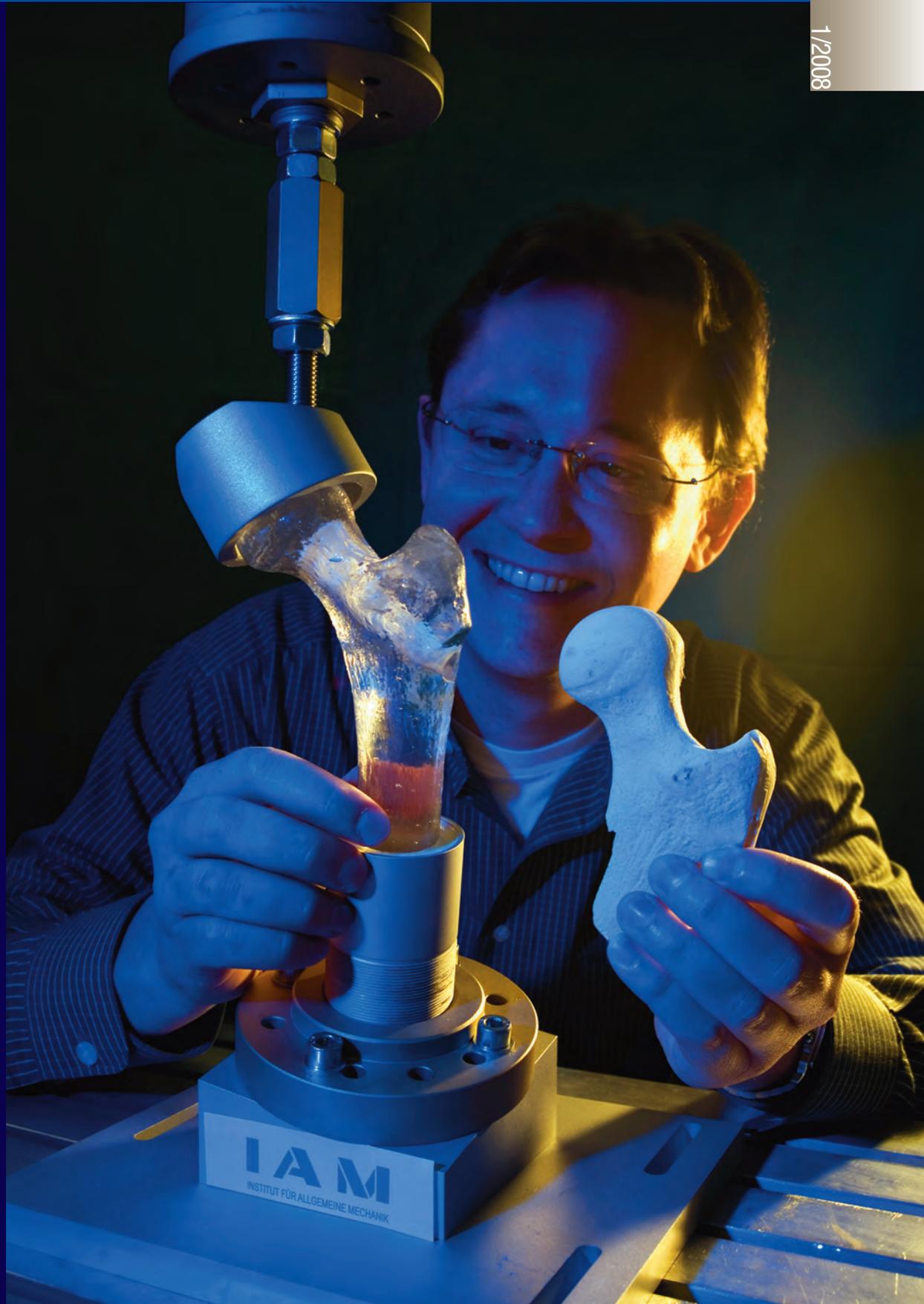
behälter aus dünnen Membranschalen bestehen, die durch eine günstige Form mit möglichst wenig Material die Belastungen optimal verteilen und dabei nur kleine Formänderungen erfahren. Ziel derartiger Studien in der Bionik ist es daher, das mechanische Verhalten von Gehäusestrukturen aus der Natur mathematisch zu beschreiben, so dass sich die Spannungs- und Dehnungsverteilungen im Gehäuse berechnen lassen. Hierbei sind auch Computermodelle hilfreich. Auf diese Weise soll untersucht werden, ob durch die Gehäusestruktur eine optimale Lastverteilung erreicht werden kann, so dass auch eine technische Anwendung möglich wäre.

[www.iam.rwth-aachen.de](http://www.iam.rwth-aachen.de)

#### Autoren:

Dipl.-Ing. Monique Albrand ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Allgemeine Mechanik. Dr.-Ing. habil. Marcus Stoffel ist Oberingenieur am Institut für Allgemeine Mechanik. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Weichert ist Leiter des Instituts für Allgemeine Mechanik.

*Bild 1: Im Institut für Allgemeine Mechanik führen Wissenschaftler Struktur- und Materialprüfversuche mit Oberschenkelknochen durch. Die Ergebnisse dienen als Validierungsdaten für biomechanische Modelle.  
Foto: Peter Winandy*



# Umformtechniker walzen metallische Haifischhaut

Die Notwendigkeit zur Senkung des globalen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes fordert eine höhere Energieeffizienz moderner technischer Produkte in vielen Bereichen des täglichen Lebens. Beispielsweise kann der Treibstoffverbrauch und damit der Schadstoffausstoß eines Flugzeuges durch kleinste Rippenstrukturen – so genannte Riblets – auf der Außenhaut und auf Triebwerksteilen, wie beispielsweise Fan- und Verdichterschaufeln, merklich reduziert werden. Ein Team aus Ingenieuren beschäftigt sich in dem durch die VolkswagenStiftung finanzierten Verbundprojekt „RibletSkin“ mit der Herstellung und Optimierung eben dieser Riblet-Strukturen durch angepasste Walztechniken. Funktionale Oberflächenstrukturen spielen eine zunehmende Rolle bei modernen Produkten. Sie haben nicht nur einen Einfluss auf das Aussehen, sondern auch auf das Verschleißverhalten, das Reflexionsvermögen und viele weitere Eigenschaften. Eine gezielte funktionale Optimierung der Produkte ist je nach gewünschter Funktion durch geeignete Oberflächenstrukturen möglich. Doch wie sehen solche Strukturen aus? Nicht selten greifen Ingenieure bei der Produktentwicklung auf Lösungsansätze aus der Natur zurück. So hat auch im Bereich funktionaler Oberflächen der bionische Gedanke zur Umsetzung beeindruckender Natur-Effekte in technischen Anwendungen beigetragen, wie die Ausnutzung des Lotus-Effektes zur Reinigung von Oberflächen und das Prinzip des Klettverschlusses eindrucksvoll beweisen.

Vor diesem Hintergrund kommt im Bereich der Strömungsmechanik speziell den oben genannten Riblets eine herausragende Bedeutung zu, siehe Bild 1. Diese kleinen Rippenstrukturen, die der Paläontologe Ernst Reif in den 1980er Jahren auf den Hautschuppen schnell schwimmender Haie nachgewiesen hat, ermöglichen eine Reduzierung der Reibungsverluste an der Haihaut und verschaffen dem Hai somit Vorteile bei der Jagd. Übertragen auf technische Anwendungen können Riblet-Strukturen beispiels-

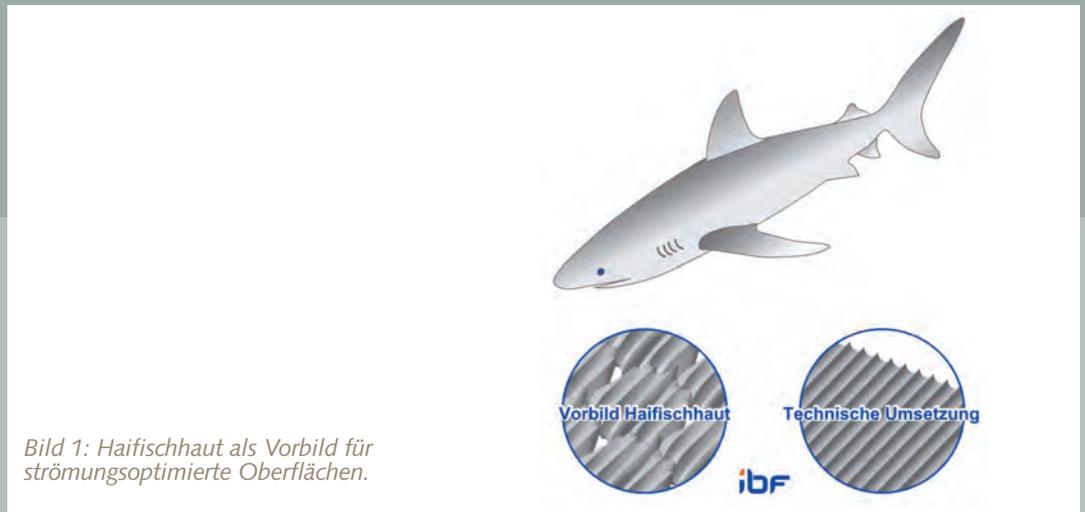
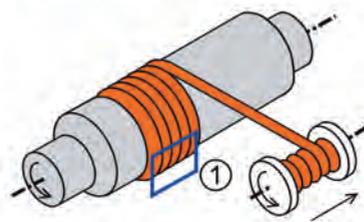
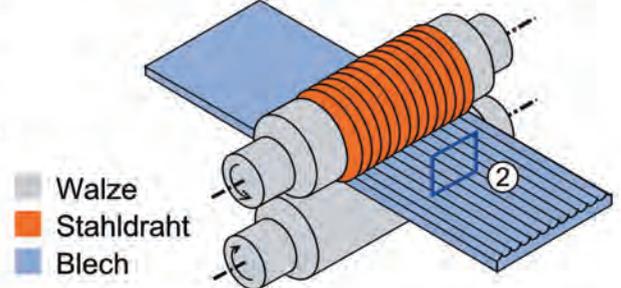


Bild 1: Haifischhaut als Vorbild für strömungsoptimierte Oberflächen.

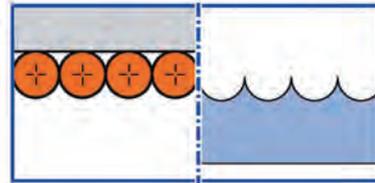
## Walzenstrukturierung



## Riblet-Walzprozess



Schnittansicht ①  
Walze



② Schnittansicht  
Riblets

Bild 2: Strukturierte Walzen zur Riblet-Herstellung.

weise eingesetzt werden, um die Reibungsverluste an der Außenhaut von Flugzeugen, Hochgeschwindigkeitszügen oder auf Verdichterschaufeln in Flugzeugtriebwerken zu vermindern. Dadurch kann die Energieausnutzung und somit der Wirkungsgrad erhöht werden, was einen verringerten Schadstoffausstoß mit sich bringt.

Bislang konnten einsatzfähige Riblet-Strukturen nur auf Kunststofffolien realisiert werden. Diese können jedoch den mechanischen oder thermischen Anforderungen der genannten Anwendungsbeispiele nicht immer nachkommen. Zudem wird das Bauteilgewicht durch aufgeklebte Folien zusätzlich erhöht, was dem Ziel der Treibstoffeinsparung entgegensteht. Daher

werden vermehrt Ansätze verfolgt, Riblet-Strukturen direkt in metallische Oberflächen einzubringen.

Bei der Auswahl eines geeigneten Strukturierungsprozesses für metallische Oberflächen müssen neben der gewünschten Funktionsstruktur auch die Größe und Form des Bauteiles sowie das Material als wichtige Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Die sehr großen Außenhautteile von Zügen oder Flugzeugen können zum Beispiel aus relativ weichem Aluminium bestehen, wohingegen die vergleichsweise kleinen Verdichterschaufeln in Flugzeugturbinen aus sehr festen Stahl- oder Titanwerkstoffen hergestellt werden müssen. Da sich bei der Strukturierung dieser sehr unterschiedli-

chen Bauteilgrößen und Werkstoffe spezifische Anforderungen ergeben, sind auch angepasste Verfahren bei der Bearbeitung dieser Materialien notwendig. Walzen ist in der Blechverarbeitung eine weit verbreitete Technik, die zu den Verfahren der Umformtechnik zählt. Umformtechnische Verfahren besitzen gegenüber anderen Fertigungsverfahren einige Vorteile, von denen hier beispielhaft zwei genannt werden: Das Material wird fast vollständig eingesetzt, um das fertige Bauteile zu formen. Das bedeutet, dass beispielsweise im Gegensatz zum Fräsen keine Späne anfallen, die in nachgeschalteten Prozessen recycelt werden müssen. Zudem weisen umformtechnisch hergestellte Produkte durch Effekte im We-

# Untersuchung neuer Methoden zur Herstellung strömungsoptimierter Metalloberflächen

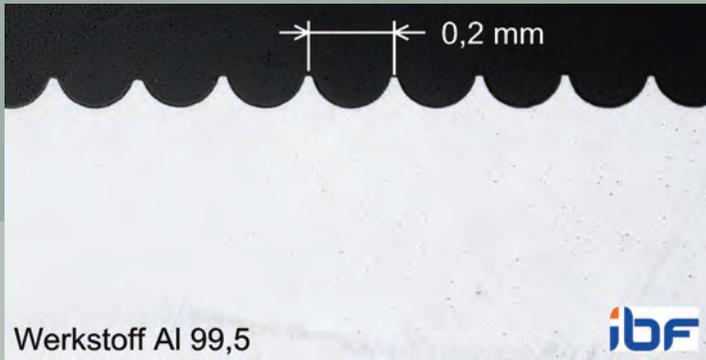


Bild 3: Querschliff gewalzter Riblet-Strukturen.

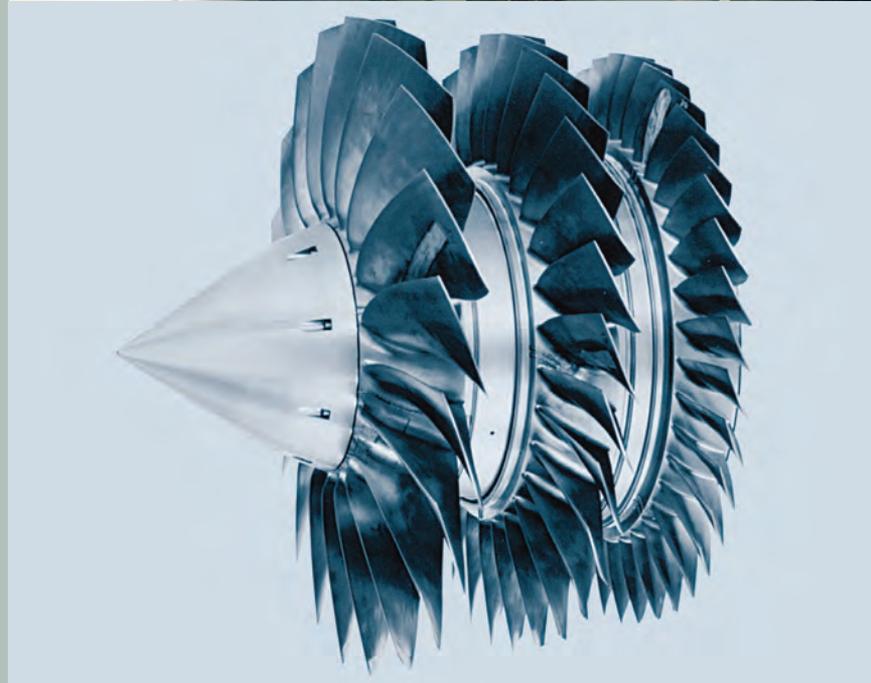
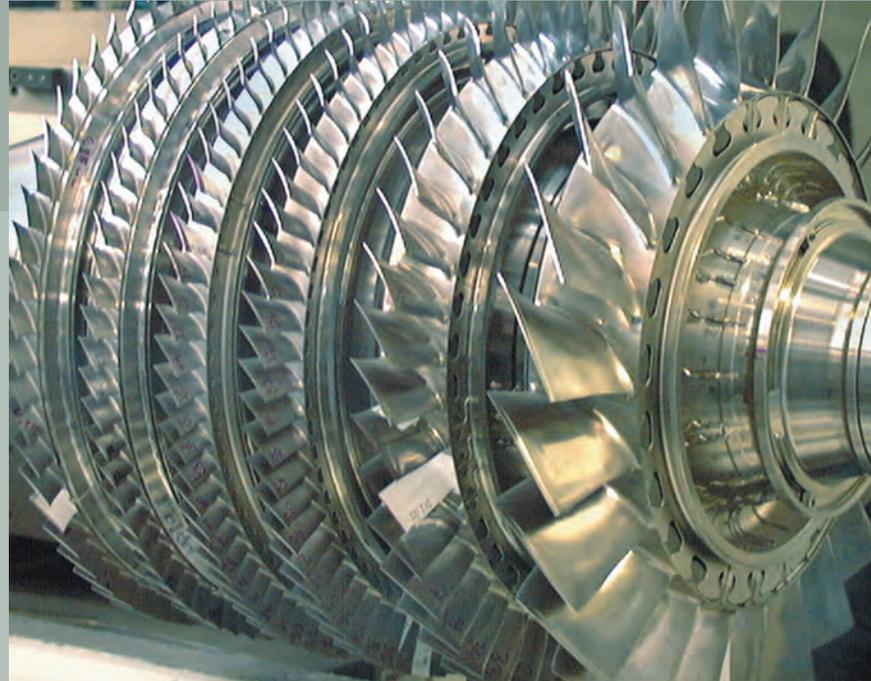


Bild 4: Hochdruckverdichter (oben) und Niederdruckverdichter (unten).  
Quelle: MTU Aero Engines

stoffgefüge verbesserte Festigkeitseigenschaften im Vergleich zum Ausgangswerkstoff auf. Darüber hinaus können insbesondere Walzverfahren auch zur Herstellung feiner Rillenstrukturen eingesetzt werden, wie beispielsweise das Walzen von Schraubengewinden zeigt. Aus diesen Gründen wird an der RWTH Aachen der Walzprozess zur Herstellung reibungsverminderter Riblet-Strukturen untersucht. Hierbei werden zur Strukturierung von Aluminiumbauteilen einerseits und Titanbauteilen andererseits zwei unterschiedliche und jeweils neuartige Walzverfahren eingesetzt.

Am Institut für Bildsame Formgebung, kurz IBF, erfolgt das Walzen von Riblet-Strukturen in Aluminiummaterialien, wie

sie für die Flugzeughaut benötigt werden. Hierzu werden speziell hergestellte Walzen mit negativen Riblet-Strukturen eingesetzt, um ein flaches Ausgangsblech in einem Walzschrift mit einer Vielzahl fertiger Riblets zu versehen. Eine besondere Herausforderung stellt in diesem Fall die Herstellung der Walze dar. Effiziente Riblets für Flugzeuge weisen nach Berechnungen des Aerodynamischen Instituts, kurz AIA, eine Höhe von rund  $40\ \mu\text{m}$  auf und besitzen eine möglichst scharfe Spitze. Darüber hinaus soll der Abstand rund  $100\ \mu\text{m}$  betragen, was ungefähr dem Durchmesser eines Menschenhaares entspricht. Um einen ein Zentimeter breiten Aluminiumstreifen zu strukturieren, muss die verwendete Stahlwalze

Bild 6: Wissenschaftler des Instituts für Bildsame Formgebung und des Werkzeugmaschinenlabors untersuchen die Möglichkeiten zum Walzen von feinsten Haifischhaut-Strukturen, so genannten Riblets, auf unterschiedlichen Materialien für Anwendungen im Flugzeugbau.  
Foto: Peter Winandy

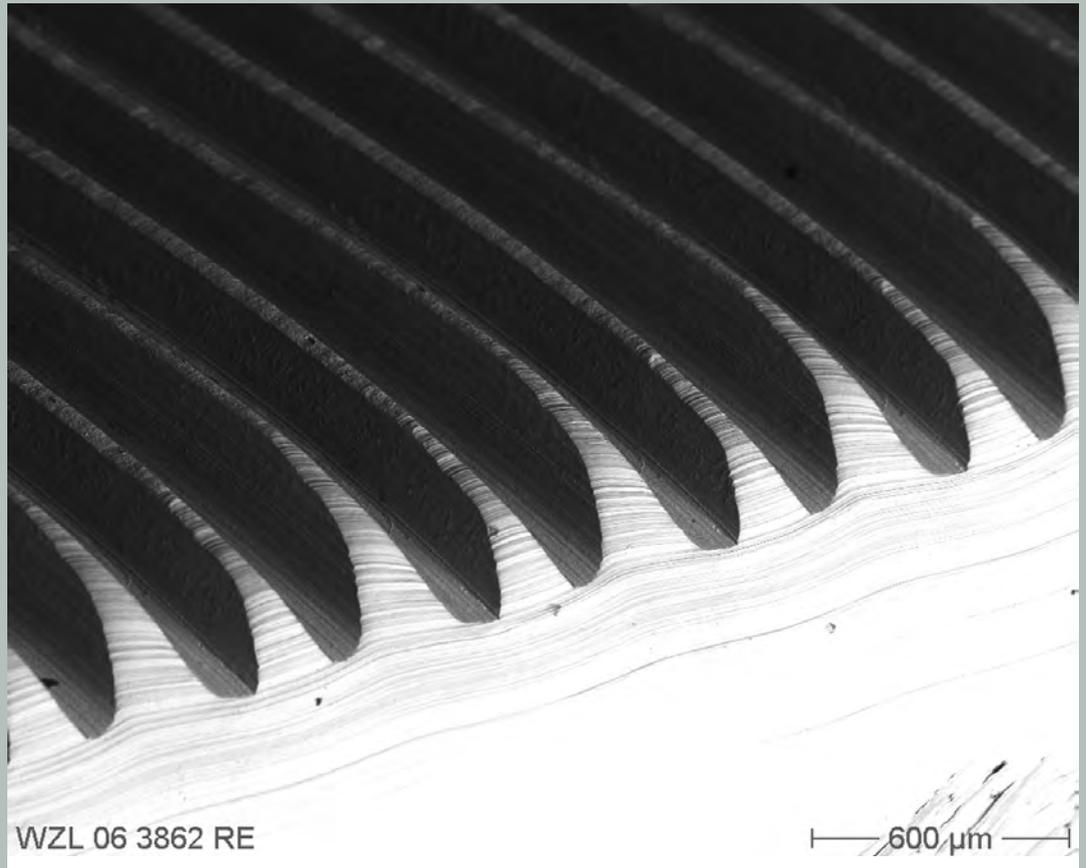


Bild 5: Gewalzte Ribletstruktur auf Ti6Al4V.  
Quelle: WZL

64

demnach einhundert gleichmäßige scharfkantige Rillenstrukturen aufweisen. Denkt man an die Größe von Flugzeugbeplankungen, stellt diese Anforderung selbst für die derzeit eingesetzten Fertigungsverfahren eine kaum zu lösende Herausforderung dar. Daher wurde am Institut für Bildsame Formgebung ein alternatives Konzept zur Walzenstrukturierung ausgearbeitet: Die erfolgreich eingesetzte Strukturierungstechnik beruht auf dem einfachen Prinzip der Umwicklung. Ein Stahldraht von geringem Durchmesser wird ähnlich wie bei einer Seilwinde um die glatte Walze gewickelt. Liegen die Drähte nach der Wicklung Schulter an Schulter, so weist die resultierende Oberflächenstruktur eine nahezu perfekte negative Riblet-Kontur auf, siehe Bild 2. Die resultierende Oberflächenqualität entspricht der sehr guten

Qualität von gezogenen Drähten, die sich nach dem Walzprozess auch auf der Produktoberfläche wiederfindet. Mit derartig strukturierten Walzen wurden bereits vielversprechende Walzergebnisse erzielt. Riblets mit einem Abstand von 200 µm konnten mit hoher Genauigkeit in Aluminiumstreifen gewalzt werden, siehe Bild 3. Derzeit sind die gewalzten Streifen allerdings nur etwa zwei Zentimeter breit. Zudem muss zur Erzielung einer gut ausgeformten Riblet-Kontur der Aluminium-Werkstoff von zwei Millimeter auf rund einen Millimeter Blechdicke gewalzt werden. Diese große erforderliche Abnahme könnte durch die Verwendung von Walzen mit größeren Durchmessern verringert werden.

Nach erfolgreichen Experimenten zur Überprüfung des Walzprinzips, sollen nun auch

breitere Walzen mit Riblet-Strukturen versehen werden. Diese Riblets sollen nur noch einen Abstand von 100 µm besitzen und kommen somit den Anforderungen der Strömungsmechanik entgegen. Außerdem können anstelle der bisher verwendeten kleinen Walzen mit einem Durchmesser von 110 mm solche mit einem Durchmesser von 300 mm verwendet werden. Dies ermöglicht die Realisierung von effizienten Aluminium-Riblet-Oberflächen bei geringeren Dickenabnahmen.

Am Werkzeugmaschinenlabor, kurz WZL, hingegen wird die Herstellung von Riblet-Strukturen auf Fan- und Verdichterschaukeln untersucht. Der Forschungsfokus liegt dabei auf der Entwicklung eines Verfahrens, welches die Belastungen der Triebwerksschaukeln während des Einsatzes berücksichtigt.

Triebwerksschaukeln gehören zu den sicherheitskritischen Bauteilen, deren Lebensdauer unter keinen Umständen reduziert werden darf. Während des Einsatzes wirken auf die rotierenden Verdichterschaukeln große mechanische Lasten, die sich zu einer hohen dynamischen Zug-schwell- und Biegebelastung aufsummieren.

Grundsätzlich sind Triebwerksschaukeln so gestaltet, dass die dynamischen Betriebslasten die Schwingfestigkeit der Schaukeln nicht überschreiten und somit eine Dauerfestigkeit beziehungsweise eine ausreichende Zeitfestigkeit gewährleistet ist. Diese Zeitfestigkeit kann aber durch Kerben auf der Oberfläche erheblich reduziert werden. In den Kerben entstehen unter Belastung lokale Zugspannungsspitzen, die eine Rissentstehung und Rissausbreitung begünstigen.



gen, was letztendlich zum Versagen der Schaufel führt. Aus diesem Grund werden Triebwerks-schaufeln vor Ihrem Einsatz oft kugelgestrahlt, um Druckeigen-spannungen in die Bauteilrand-zone zu induzieren. Diese Druck-eigen-spannungen wirken den auftretenden Zugspannungen entgegen und steigern dadurch die Zeitfestigkeit der Triebwerks-schaufeln erheblich. Ein gleicher Effekt, durch den aber noch höhere und tieferreichendere Druckeigen-spannungen erzeugt werden, lässt sich durch Festwal-zen erreichen. Hierzu wird mit einer Kugel oder Walze über die Bauteiloberfläche gewalzt. Sollen nun Triebwerksschaufeln aus hochfesten Materialien wie der Titanlegierung Ti6Al4V mit Riblets strukturiert werden, müs-sen zwei wesentliche Aspekte bei der Auswahl beziehungsweise Entwicklung eines geeigneten

Fertigungsverfahren berücksich-tigt werden. Zum einen ist eine Riblet-Struktur nichts anderes als eine Vielzahl kleiner Kerben, wo-durch die Zeitfestigkeit und dar-mit die Lebensdauer einer Schaufel erheblich reduziert werden könnte. Zum anderen ist die Oberfläche einer Triebwerks-schaufel eine Freiformfläche und damit schwer strukturierbar. Damit die mit der Riblet-Struktur einhergehende Kerbwirkung kompensiert werden kann, ist es notwendig, ein Fertigungsver-fahren zu wählen, welches gleichzeitig die Riblet-Struktur erzeugt und Druckeigen-spannungen im Kerbgrund induziert. Aus diesem Grund wurde am WZL ein inkrementelles Walzver-fahren entwickelt. Die Walzen werden dazu mit einer negativen Riblet-Struktur mittels definierter Zerspanung profiliert. Für Fan- und Verdichterschaufeln beträgt

die Riblet-Höhe rund 35  $\mu\text{m}$  bei einem Riblet-Abstand von 70  $\mu\text{m}$ . Unter Verwendung eines speziell für diesen Anwendungs-fall entwickelten hydraulischen Walzwerkzeugs wird die Riblet-Struktur Bahn für Bahn auf die Schaufeln gewalzt, siehe Bild 5.

Die beiden vorgestellten Riblet-Walzverfahren verdeutli-chen das Potenzial der Umform-technik zur Herstellung bionisch-inspirierter, mikro-funktionaler Oberflächen für unterschiedliche fluid-dynamische Anwendungen. Die erzielten Ergebnisse stellen hierbei einen Impuls für ökonomische Strukturierungs-verfahren der Zukunft dar, mit deren Hilfe technische Produkte nach dem Vorbild der Natur ökologisch vorteilhaft gestaltet werden können.

[www.wzl.rwth-aachen.de](http://www.wzl.rwth-aachen.de)  
[www.ibf.rwth-aachen.de](http://www.ibf.rwth-aachen.de)

#### Autoren:

Dipl.-Ing. Björn Feldhaus ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren am Werkzeugmaschinenlabor. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt hat den Lehrstuhl Bildsame Formgebung inne. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Fritz Klocke ist Inhaber des Lehrstuhls Technologie der Fertigungsverfahren am Werkzeugmaschinenlabor. Dipl.-Ing. Mario Thome ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bildsame Formgebung.

# R

Biomaterialien spielen eine wichtige Rolle in der regenerativen Medizin einschließlich des „Tissue Engineerings“, der Gewebezüchtung. Dabei versteht man unter Biomaterialien nicht nur Implantate und Prothesen, sondern auch alle weiteren Werkstoffe, die mit biologischen Systemen interagieren und dort eine Funktion übernehmen. Als aktuelle Beispiele sind Materialien zur Züchtung von Ersatzgeweben und polymere Partikel für die Freisetzung von pharmakologischen Wirkstoffen zu nennen. Der Einsatz dieser Materialien ist für die Behandlung von verschiedenen Krankheiten unabdingbar und notwendig. Dafür müssen sie aber mit dem menschlichen Körper harmonieren. Die Biomaterialoberfläche müsste dazu so modifiziert werden, dass sie der natürlichen Mikroumgebung der Zellen ähnelt. Da eine Zelle direkt mit dem Implantat im Tissue Engineering interagiert, könnte ihr zelluläres Verhalten und ihre Funktion durch die Modifikation von Biomaterialoberfläche mit entsprechenden Signalstrukturen kontrolliert werden. Signalstrukturen der Zelle sind auf ihrer Oberfläche lokalisiert und treten mit der „Außenwelt“, der extrazellulären Matrix, kurz ECM, in Kontakt. Die ECM repräsentiert die biophysikalische und biochemische Mikroumgebung einer Zelle im Gewebe und koordiniert zelluläre Antworten wie Adhäsion, Differenzierung, Proliferation und Apoptose. Daher sind bei der Entwicklung von Biomaterialien innovative Strategien gefragt, die auf die Imitation der ECM abzielen, um damit die natürliche Umgebung einer Zelle nachzubilden.

Signalstrukturen der Zelloberfläche sind Zuckerstrukturen, die Zelladhäsion, Zelldifferenzierung, Zellproliferation und die Gewebebildung über den Kontakt zur ECM initiieren. In diesem Zusammenhang spielt Poly-N-Acetyllaktosamin (Poly-LacNAc), ein Oligosaccharid auf Glykoproteinen und Glykolipiden, das aus sich wiederholenden Disaccharideinheiten,

dem N-Acetyllaktosamin (LacNAc) zusammengesetzt ist, eine wichtige Rolle, siehe Bild 1. Das Disaccharid LacNAc besteht aus Galaktose und N-Acetylglukosamin. Poly-LacNAc dient als zelluläres Erkennungssignal für die Interaktion mit Galaktose erkennenden Proteinen, den Galektinen, und vermittelt auf diese Weise den Kontakt der Zelle mit Glykoproteinen der ECM. Galektine, siehe Bild 2, gehören zu einer Gruppe von zuckerbindenden Proteinen, die spezifisch bestimmte Kohlenhydratstrukturen binden. Durch ihre Spezifität für Galaktose erkennen die oligomeren Galektine Poly-LacNAc, das sich einerseits auf der Zelloberfläche, andererseits auf Glykoproteinen der ECM (Laminin, Fibronectin, Kollagen IV) befindet. Auf diese Weise initiieren Galektine die Zelladhäsion, den Kontakt zwischen der Zelloberfläche und der ECM, und spielen so möglicherweise eine Rolle in der Regulation und Modulation der

Zellproliferation und -differenzierung.

Die Arbeiten am Lehr- und Forschungsgebiet Biomaterialien zielen auf die Nachahmung des beschriebenen biologischen Prinzips. Durch Biofunktionalisierung von Biomaterialoberflächen mit Poly-LacNAc Zuckerstrukturen sollen über Galektine ECM Glykoproteine gebunden und damit die Zelladhäsion ermöglicht werden. Dazu haben wir einen Baukasten aus Enzymen und Galektinen erstellt, der es uns ermöglicht, Zuckerstrukturen der Zelloberfläche zu synthetisieren und Galektine auf ihre Bindungseigenschaft hin zu charakterisieren. Wir verfügen über mehrere rekombinante und modifizierte Konstrukte des Enzyms  $\beta$  1-4Galaktosyltransferase und der N-Acetylglukosamin-transferase, mit deren Hilfe wir Poly-LacNAc-Strukturen und ihre Derivate synthetisieren. Durch die Modifikation des ersten Zuckermoleküls mit geeigneten chemischen Gruppen

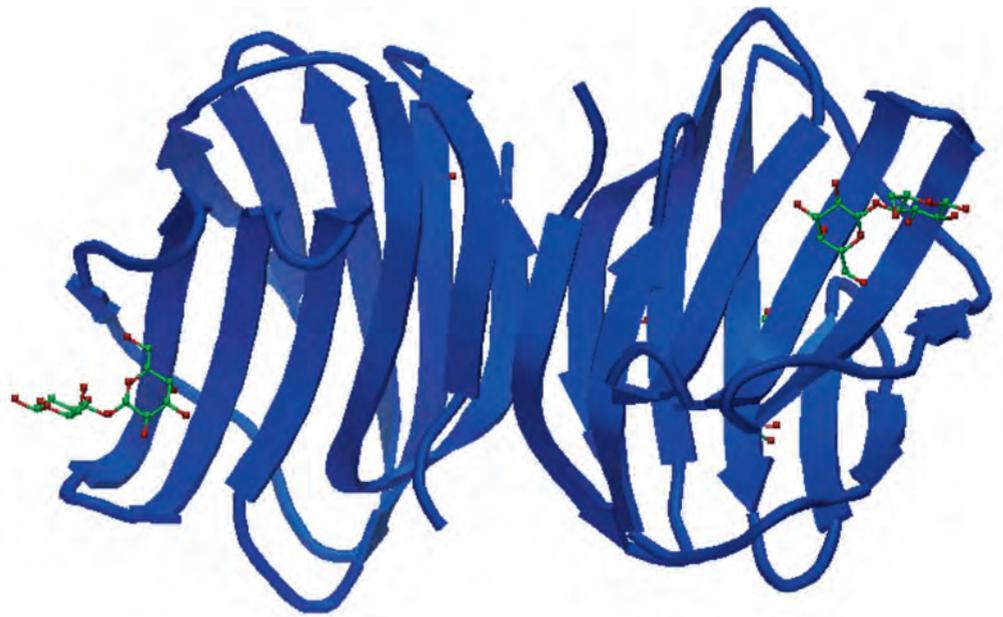
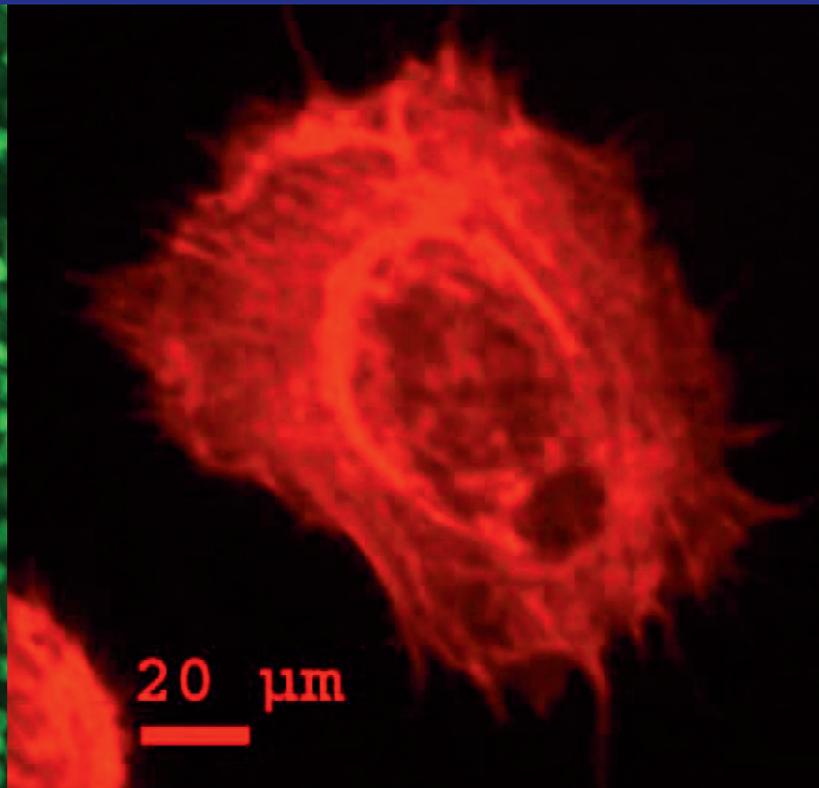
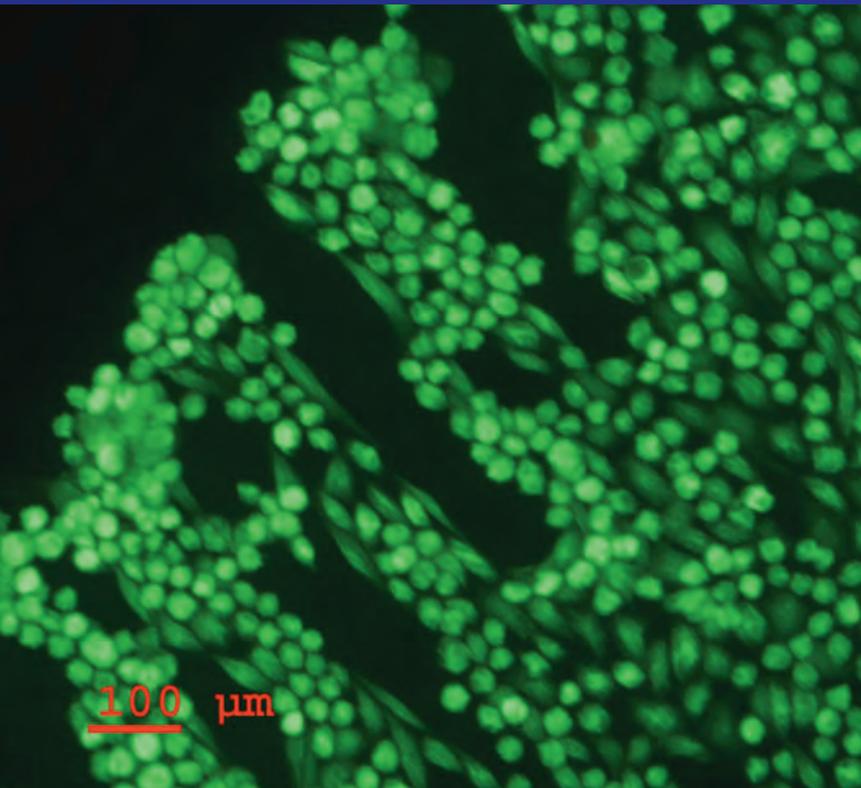


Bild 1: Bindung des Zuckers Laktose an das humane Galektin-1-Dimer (protein data bank file 1W6O). Illustration durch AstexViewer™ Software (M. J. Hartshorn (2002) "AstexViewer™: An aid for structure-based drug design", J.Computer Aided Mol. Design 16, 871-881).

(Amino-, Azid-, pNP-Gruppen) können die Glykane auf funktionalisierte Oberflächen immobilisiert werden. Unsere synthetisierten Poly-LacNAc Strukturen erwiesen sich in so genannten small-scale Testsystemen, also in kleinem Maßstab, als sehr gute Erkennungsstrukturen für verschiedene Galektine. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass die gebundenen Galektine weiterhin in der Lage sind, Glykoproteine der ECM zu binden. Das biologische Prinzip der Galektin-vermittelten Bindung von ECM Glykoproteinen konnte damit in vitro nachgeahmt werden. Diese Ergebnisse ermutigen, das System auf Hy-

# Die Funktionalisierung von Biomaterialoberflächen mit Zuckerstrukturen



drogel-Oberflächen in Kooperation mit Univ.-Prof. Dr. Martin Möller vom Institut für Technische und Makromolekulare Chemie und DWI zu übertragen. Diese werden aus sternförmigen Polyethylenglykol-Bausteinen hergestellt und tragen reaktive Isocyanatgruppen. Diese ermöglichen neben der Verknüpfung der PEG-Sternmoleküle untereinander auch die Bindung von Signalstrukturen. Die Hydrogel-Oberflächen haben günstige Eigenschaften für den Einsatz in Zellexperimenten: Sie formen ein dichtes Netzwerk, das eine unkontrollierte Proteinanbindung verhindert. Sie sind einfach in der Handhabung und ermöglichen die kontrollierte Bindung von biologischen Signalstrukturen. Mit Hilfe dieser Polyethylenglykol-Stern-Hydrogele ist es gelungen, die Poly-LacNAc Zuckerstrukturen auf einer Oberfläche zu immobilisieren. Der Aufbau einer künstlichen ECM wurde durch Zugabe von Galektinen und ECM-Glykoproteinen

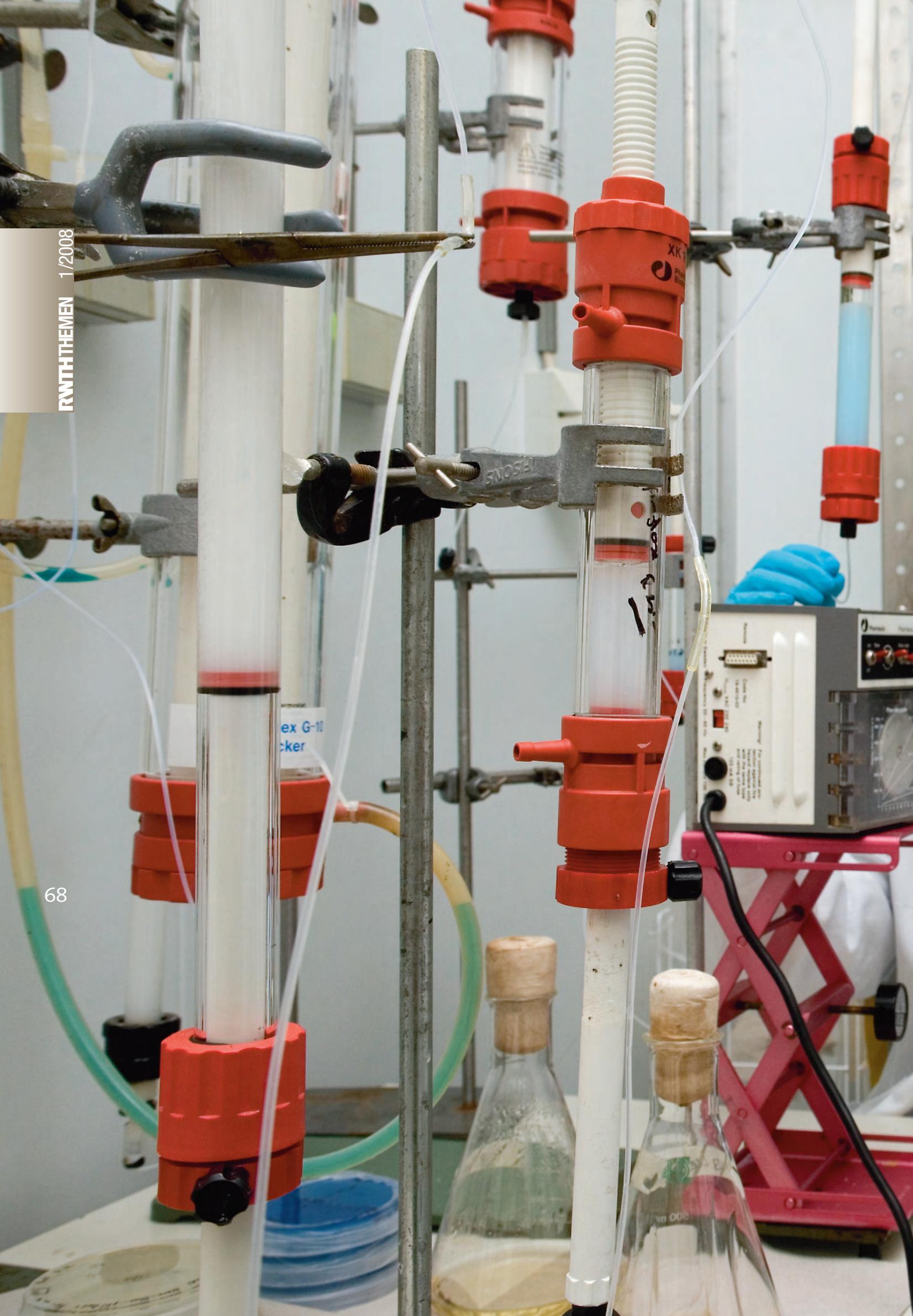
teinen und Schicht für Schicht in der Layer-by-layer-Technologie erfolgreich durchgeführt. Erste Zellexperimente demonstrieren bereits, dass Fibroblasten die „süßen“ Oberflächen „mögen“, siehe Bild 3. Die Untersuchung weiterer Zelltypen auf solchen Zuckeroberflächen, die Klonierung weiterer menschlicher Galektine sowie die Charakterisierung ihrer Bindungseigenschaften und das Design verzweigter Kohlenhydratstrukturen auf Hydrogeloberflächen sind Bestandteil der aktuellen Forschung, die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert wird. In Zukunft wird die Glykobiotechnologie in der Biomaterialforschung eine bedeutende Rolle einnehmen. Der neuartige Ansatz, biokatalytisch hergestellte Zuckerstrukturen auf Polymeroberflächen zu immobilisieren, könnte für das Tissue Engineering und Drug-Targeting, dem erzielten Medikamententransport durch Trägermoleküle, Bedeutung erlangen.

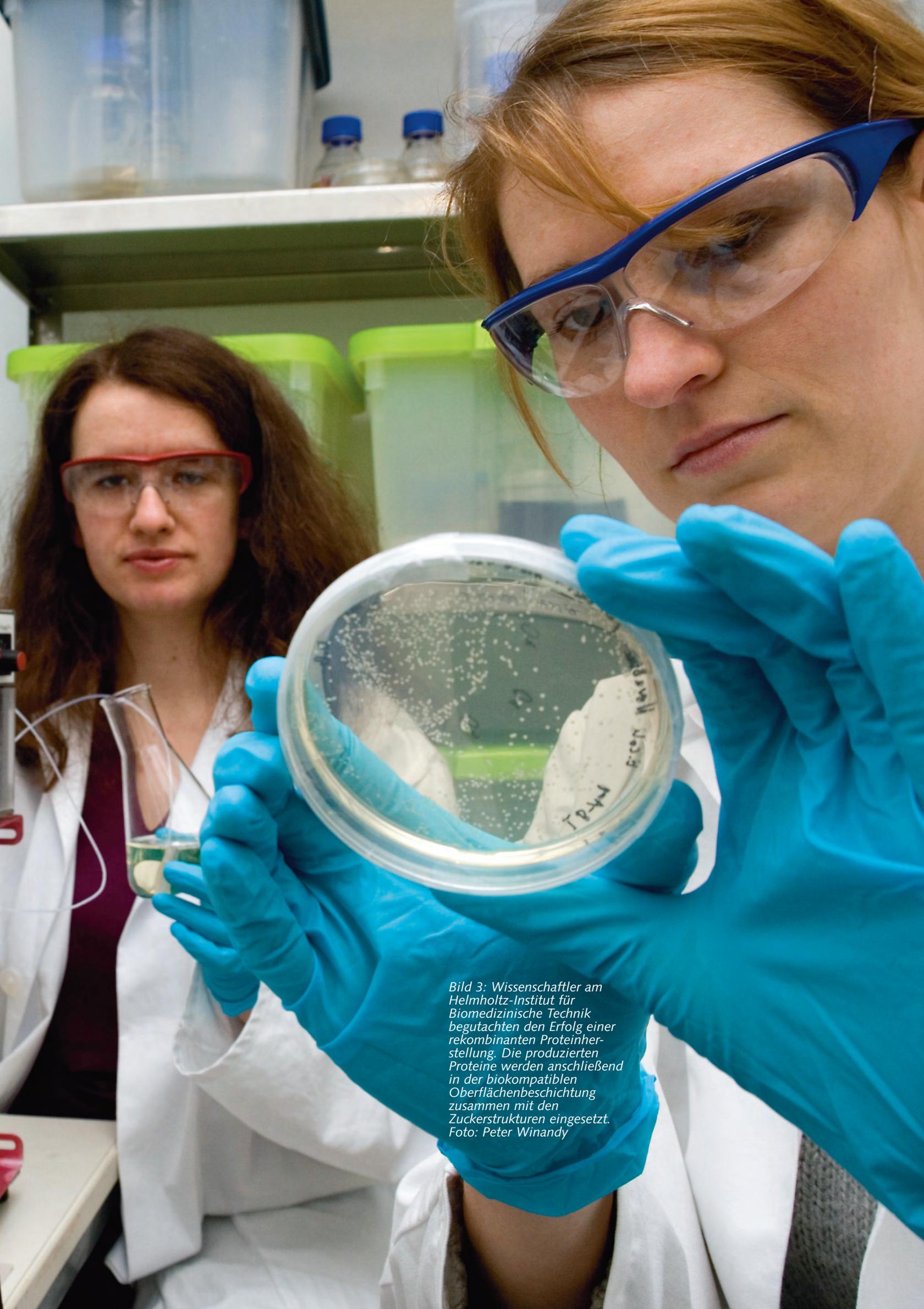
Es ist bis jetzt zwar immer noch eine Zukunftsvision, für jede klinische Applikation maßgeschneiderte Ersatzgewebe oder -organe im Labor entwickeln zu können. Aber dennoch kann die Glykobiotechnologie Schritte in diese Richtung mitbestimmen.

[www.hia.rwth-aachen.de](http://www.hia.rwth-aachen.de)

**Autoren:**  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Lothar Elling ist Leiter des Lehr- und Forschungsgebietes Biomaterialien am Lehrstuhl für Biotechnologie im Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik.  
Dipl.-Biol. Claudia Rech, Dipl.-Biol. Birgit Sauerzapfe und Dipl.-Biol. Kathrin Adamiak sind Wissenschaftliche Mitarbeiterinnen am Lehr- und Forschungsgebiet Biomaterialien.

*Bild 2: Fibroblasten, kultiviert auf einer künstlichen Poly-LacNAc-Galektin-ECM-Hydrogelschicht  
Links: Lebend/Tot-Färbung,  
Rechts: Aktinfilament Färbung.*





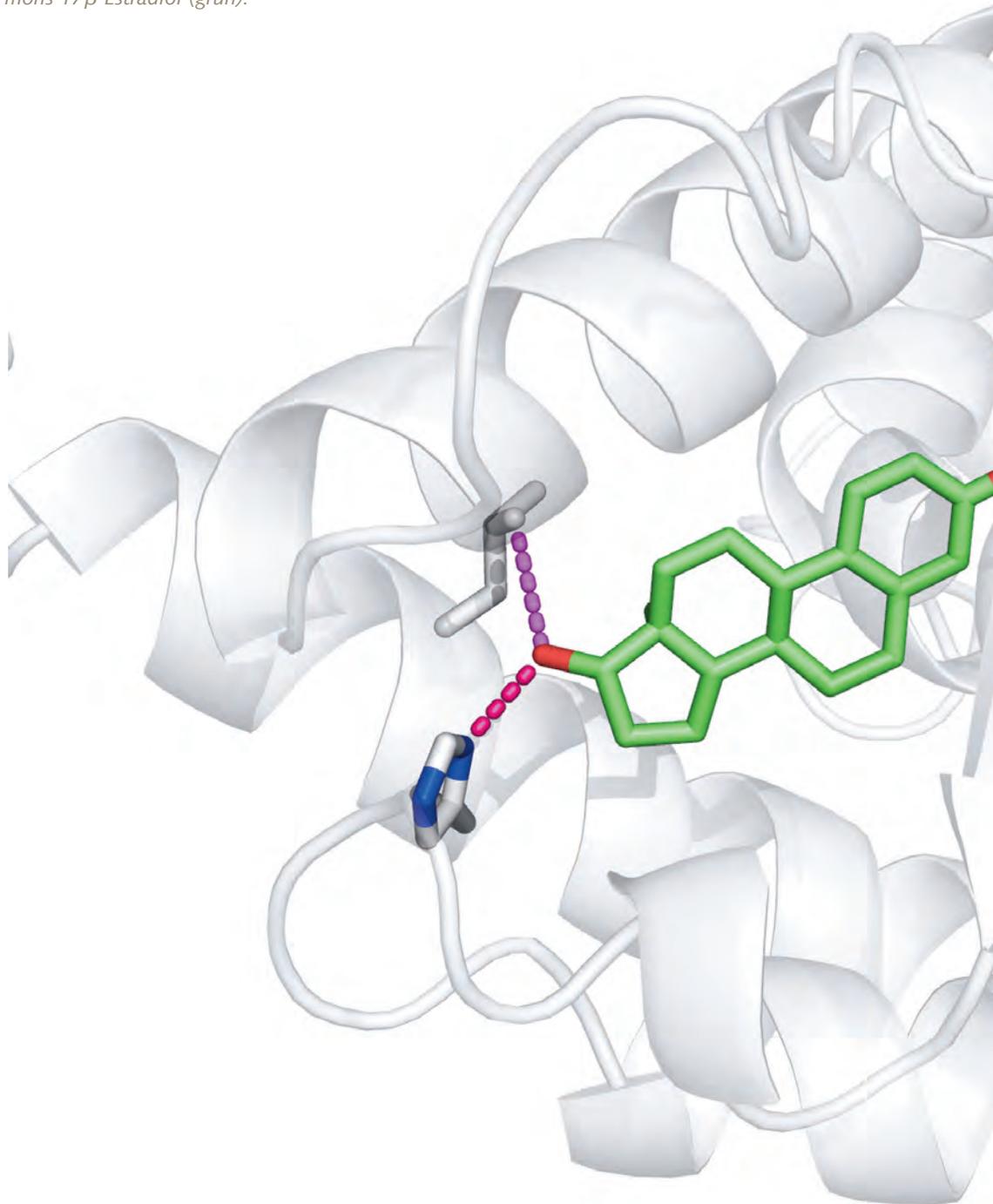
*Bild 3: Wissenschaftler am Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik begutachten den Erfolg einer rekombinanten Proteinherstellung. Die produzierten Proteine werden anschließend in der biokompatiblen Oberflächenbeschichtung zusammen mit den Zuckerstrukturen eingesetzt. Foto: Peter Winandy*

# Hormonähnlichen Umweltchemikalien auf der Spur

In den 30er Jahren des vergan-  
genen Jahrhunderts wurde in  
Laborversuchen deutlich, dass  
einige Chemikalien im Tierver-  
such die Ausbildung der Organe  
beeinflussten. So wurden bei  
Ratten nach Gabe der Testche-  
mikalien eine Vergrößerung  
und damit ein erhöhtes Ge-  
wicht der Eierstöcke festge-  
stellt, während unbehandelte  
Tiere diese Veränderungen  
nicht zeigten. Diese waren nur  
erklärbar, wenn man einen Ein-  
fluss der Chemikalien auf das  
noch relativ unerforschte Hor-  
monsystem voraussetzte. Mit  
zunehmender Untersuchungs-  
dauer wurden immer mehr  
Chemikalien, aber auch natürli-  
che Ausscheidungsprodukte  
von Mensch und Tier sowie  
natürliche Stoffe in Pflanzen  
und Pilzen mit einem Einfluss  
auf das Hormonsystem von  
Tieren in Verbindung gebracht.  
Mit Beginn der 60er Jahre des  
letzten Jahrhunderts wurden  
die im Labor nachgewiesenen  
Veränderungen auch in freier  
Wildbahn beobachtet. So war  
die Fortpflanzung von Alligato-  
ren in den Everglades in Florida  
so massiv gestört, dass diese  
auszusterben drohten. Durch  
weitere Beobachtungen von  
Tierfreunden konnten an ver-  
schiedensten Orten ähnliche  
Veränderungen wie in Florida  
beobachtet werden. Dabei  
ließen sich die Abläufe von  
Kläranlagen als Quelle estrogen  
wirkender Substanzen erken-  
nen. Als Estrogene werden die  
weiblichen Sexualhormone be-  
zeichnet.

Da die Konzentrationen an  
Umweltchemikalien in den Tier-  
versuchen sehr hoch waren,  
konnte man die in der Natur  
auftretenden Effekte nur als  
chronische Effekte erklären, da  
die Substanzen in den Umwelt-  
proben noch nicht nachgewie-  
sen werden konnten oder aber  
nur dann, wenn sie in hohen  
Konzentrationen vorlagen.  
Welche Art von Stoffen können  
derartige Wirkungen hervorru-  
fen? Diese Frage zu beantwor-  
ten ist nicht leicht, da sich diese  
Stoffe in ihren chemischen Ei-  
genschaften sehr stark vonein-  
ander unterscheiden. So wur-  
den Polychlorierte Dibenzodio-

*Bild 1: Bindungstasche (grau)  
des hER mit eingelagertem  
Molekül des natürlichen Hor-  
mons 17 $\beta$ -Estradiol (grün).*



# Ausnutzung biospezifischer Wechselwirkungen zur Bioanalytik

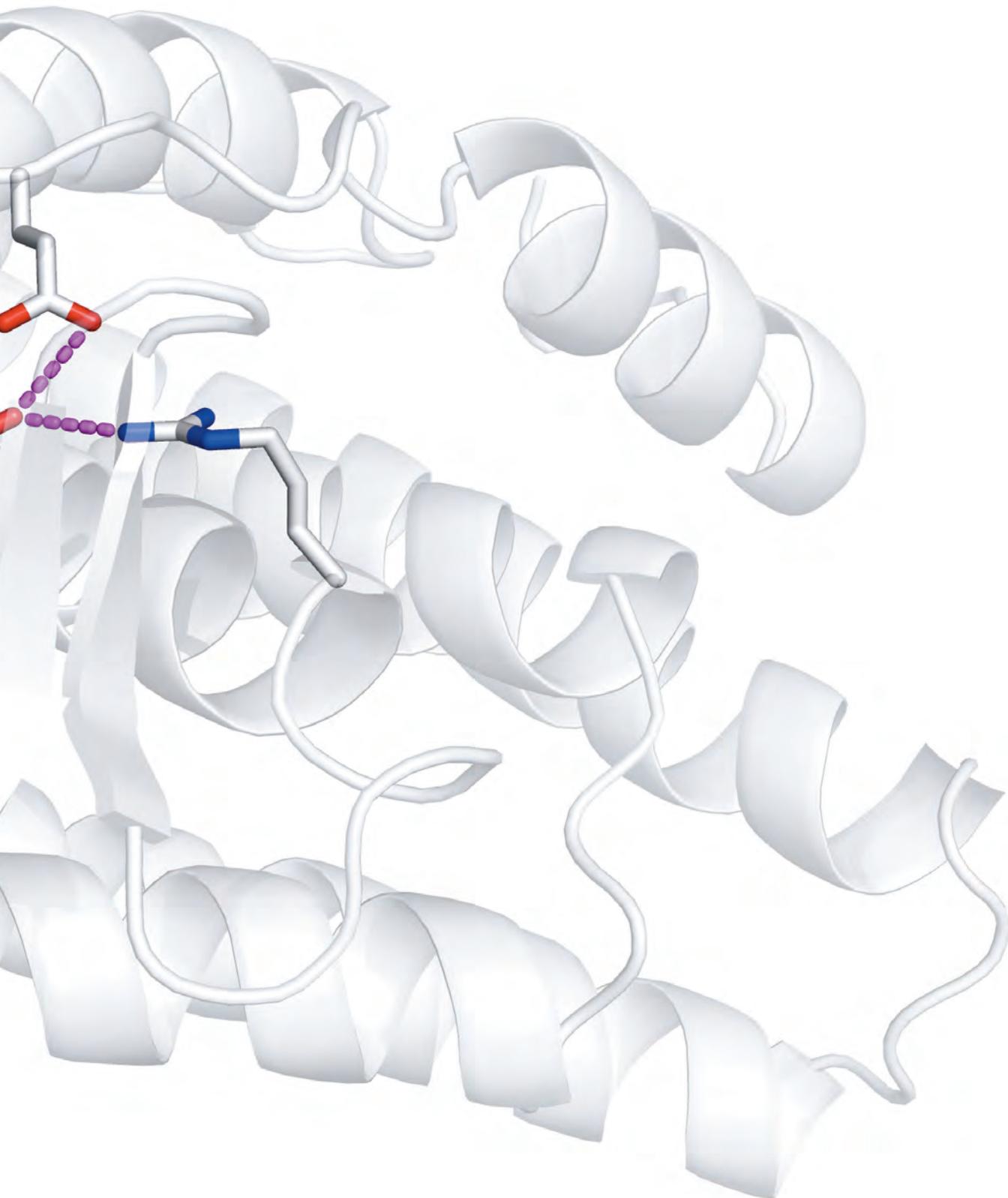




Bild 2: Probenpräparation zur Bioanalytik hormonähnlicher Chemikalien.  
Foto: Peter Winandy

xine (PCDD) und Dibenzofurane (PCDF), Polychlorierte Biphenyle (PCBs), Pflanzenschutzmittel (Pestizide), Phenole (Nonylphenol, Octylphenol, Bisphenol A) aber auch Pharmaka wie zum Beispiel Diethylstilberol (DES) als estrogen synthetische Stoffe identifiziert. Auch die Abbauprodukte des weiblichen Sexualhormons 17 $\beta$ -Estradiol Estron und Estriol zeigen eine Wirkung auf das Hormonsystem. Allen diesen Substanzen ist gemein, dass sie aufgrund ihrer ähnlichen Molekülstruktur an den natürlichen Bindungspartner im Organismus, dem Estrogenrezeptor (ER), binden und damit eine Signalkette auslösen können,

an deren Ende die bereits genannten Wirkungen hervorgerufen werden.

Das Ziel der Forschungsarbeit im Umweltanalytischen Laboratorium des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft liegt in der Bestimmung der Substanzen mit estrogen Wirkung nach einer selektiven Anreicherung dieser Stoffe auf eigens hergestellten Säulen. Diese Säulen enthalten den menschlichen Estrogenrezeptor (hER) und werden im Institut für Biologie IV (Mikrobiologie und Genetik) hergestellt. Da die Gewinnung des hER aus menschlichen Zellen sehr schwierig ist, wurde der genetische Code so modifiziert, dass der Rezeptor

auch durch Hefezellen gebildet werden kann. Der Vorteil, in Säulen gebundenen ER einzusetzen, liegt darin begründet, dass der hER die Stoffe mit estrogen Wirkung selektiv zurückhält und somit für die anschließende Analytik von Störstoffen befreit. Um eine Vorstellung entwickeln zu können, wie der hER, in Bild 1 grau dargestellt, das natürliche Sexualhormon 17 $\beta$  Estradio, in Bild 1 grün dargestellt, bindet, ist ein Blick in die Bindungstasche des hER in Bild 1 modellhaft dargestellt.

Nachdem die Substanzen wieder vom ER abgelöst sind, können sie einer weiteren chemischen Analytik zugeführt



werden. Diese Analytik wird im Umweltanalytischen Laboratorium mittels modernster substanzspezifischer Nachweistechiken durchgeführt, indem die Identifizierung der Substanzen nach gas- und/oder flüssigkeit-schromatographischer Trennung mittels massenspektrometrischer Detektion erfolgt. Weil die Substanzen aufgrund ihrer Affinität direkt am Estrogenrezeptor angereichert werden, ist ihr Einfluss auf das Hormonsystem des Menschen sichergestellt. Substanzen, welche am hER der Anreicherungssäule mit einer hohen Bindungskraft andocken, üben im Körper ein hohes estrogenes Potenzial aus. Stoffe mit geringer Bindungs-

kraft am ER sind dagegen weniger potent.

Die Ergebnisse dieser Forschung vermögen einen Beitrag zu leisten, die Qualität der Abwasserreinigung zu verbessern. Dies erreicht man, indem man die Stoffe überhaupt erst als estrogen wirksam erkennt und darauf basierend den Eintrag dieser estrogen wirkenden Substanzen in das Abwasser und somit letztendlich in die Umwelt vermindert beziehungsweise deren Entfernung aus dem Abwasser verbessert.

[www.isa.rwth-aachen.de](http://www.isa.rwth-aachen.de)

**Autoren:**

L.-Chem. Uwe Bieling ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Siedlungswasserwirtschaft.

Prof. Dr.rer.nat.habil. Horst Friedrich Schröder ist Leiter des Umweltanalytischen Laboratoriums des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft. Dr.rer.nat. Martin Zimmermann ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Biologie IV (Mikrobiologie und Genetik).

*Bild 3: Voraussetzung für die Analyse organischer Spurenstoffe ist die Justage der Ionenquelle eines Massenspektrometers.*

*Foto: Peter Winandy*

# Das Insektenkarussell

## Schüler erforschen die Haft Eigenschaften von Tieren auf Oberflächen

RWTHTHEMEN 1/2008

Weshalb können Tiere an Wänden entlang kriechen und fallen selbst von der Decke nicht herunter? Gibt es Insekten, die nicht in der Lage sind, sich an einer Glasscheibe festzuhalten? Haft alle Insekten auf den gleichen rauen Untergründen gleich gut? Lassen sich Materialien finden oder gezielt herstellen, die für laufende Insekten schwer überwindlich sind oder sogar eine Barriere darstellen? Die Haft Eigenschaften von Insekten auf den verschiedenartigsten Oberflächen können in der Schule mit dem „Insektenkarussell“ erforscht werden. Es ist eine Art Zentrifuge, die durch die Verwendung von leicht zugänglichen und kostengünstigen Materialien aufgebaut werden kann. Sie ist in Kooperation der Lehr- und Forschungsgebiete Zoologie und Humanbiologie sowie Zelluläre Neurobionik im Institut für Biologie II im Rahmen einer Staatsexamensarbeit entwickelt worden. Schulministerin Barbara Sommer hat diesen Versuchsaufbau im vergangenen Jahr auf der Bildungsmesse „didacta“ mit dem ersten Preis beim Landeswettbewerb „ExaMediaNRW“ ausgezeichnet.

### Bionik in der Schule?

In den naturwissenschaftlichen Lehrplänen für die Schulen in Nordrhein-Westfalen sind derzeit keine bionischen Inhalte zu finden. Auf der anderen Seite wird dem Lernen in Kontexten und dem interdisziplinären Lernen große Bedeutung beigemessen. Schon aus diesem Grund bietet die Bionik einen für Schüler hochinteressanten und für deren wissenschaftspropädeutische Ausbildung nutzbringenden Ansatz. Dass Bionik mehr ist als „Klettverschluss“ und „Lotus-Effekt“, lassen die Beiträge in dieser Ausgabe der „RWTH-Themen“ erkennen. Am Beispiel der Interaktion von Insekten und Oberflächen soll hier gezeigt werden, dass es mit verhältnismäßig einfachen Mitteln möglich ist, aktuell in der Forschung interessierende Themen in der Schule zu behandeln, und dies nicht nur theoretisch: Biologische, physikalische und mathematische Unterrichtsinhalte finden gepaart mit experimentellen

Untersuchungen Anwendung und führen trotz der Verwendung von „Spielzeug“ zu Ergebnissen, die sich nicht zu verstecken brauchen. Schüler können den Weg der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung selbst beschreiten, indem sie das Versuchsgerät mit entwickeln und die gewonnenen Messwerte fach- und sachgerecht auswerten.

Die eingangs gestellten Fragen können als Ausgangspunkt dienen, um Schüler zum Nachdenken anzuregen, wie die Füße verschiedener Tierarten beschaffen sein müssen, um sich an senkrechten und/oder extrem glatten Flächen fortbewegen zu können. Das Phänomen ist den Schülern bekannt: Sie haben Spinnen beobachtet, die beispielsweise in einer Badewanne gefangen sind, weil sie immer wieder von den Seitenflächen abrutschen. Viele kennen die bemerkenswerte Eigenschaft der Geckos, eine senkrechte Glasfläche zu erklimmen. Für den realen Einsatz in der Schule sind Insekten, wie beispielsweise Stabheuschrecken oder Ameisen, gut geeignet, da sie sich leicht beschaffen und halten lassen. Nicht alle Ameisenarten stehen unter Naturschutz, und ein Konflikt mit dem Tierschutzgesetz besteht bei Insekten generell nicht. Das Experimentieren wird vereinfacht, weil diese Tiere im Gegensatz zu den meisten anderen Insekten keine Flügel besitzen. Möchte man im bionischen Sinne die grundlegenden Prinzipien ergründen und verstehen, müssen einerseits die morphologischen Strukturen der Insekten sowie der Oberflächen untersucht und andererseits das Zusammenwirken der Eigenschaften planvoll im Experiment erforscht werden.

### Bau der Insektenfüße

Der Mensch und die meisten Tiere stehen nicht durch ihren gesamten Körper mit Oberflächen in Kontakt, sondern nur über eine verhältnismäßig geringe Fläche. So muss bei Insekten dem Aufbau der Füße, auch Tarsen genannt, besondere Beachtung geschenkt werden. Am letzten Tarsenglied, dem Prätarus,

befinden sich bei den Stabheuschrecken ein Paar Krallen und ein Haftlappen. Beschaffenheit, Form und Größe dieser tarsalen Anhänge lassen sich mit raster-elektronenmikroskopischen Aufnahmen untersuchen. Die Kenntnis des Tarsenbaus dient im Unterricht dazu, Vermutungen über die Funktion der identifizierten Strukturen experimentell zu überprüfen. So werden die Schüler herausfinden können, dass Insekten je nach Beschaffenheit des Untergrundes teils ihre Krallen, teils ihre Haftlappen benutzen.

### Mögliche Oberflächen

Zur experimentellen Untersuchung bedarf es also glatter und rauer Oberflächen. Hier bieten sich wegen der leichten und kostengünstigen Beschaffbarkeit CDs, Schreibpapier und Schmirgelpapiere diverser Körnungen zwischen P 320 und P 4000 an. Kleine Zahlen bedeuten große Körner und damit raue Oberflächen, hohe Zahlen bedeuten weniger raue Eigenschaften. Aufgrund der industriellen Fertigung darf man bei all diesen Oberflächen von jeweils konstanten Bedingungen ausgehen, sodass die Untersuchungsergebnisse reproduzierbar sein werden. Nach Analyse der genannten Oberflächen können die Schüler eine Hypothese aufstellen und ihr Experiment entwickeln.

### Entwicklung der Methodik

Schüler haben große Freude daran, selbst erfinderisch tätig zu sein, wenn es darum geht, eine Methodik zu entwerfen. Zur Untersuchung des Haltevermögens der Insekten entwickeln sie mannigfache Vorschläge, die teilweise ohne große Hilfsmittel getestet werden können. Man kann beispielsweise die Insekten mittels eines Trinkhalmes von verschiedenen Seiten und in unterschiedlicher Intensität anblasen, um Unterschiede im Haltevermögen zu untersuchen. Dabei entdeckt man den „Freezing-Reflex“, bei dem die Tiere bei höherer Kraft einwirkung die Fortbewegung einstellen, um auf der Stelle zu verharren. Ein anderer Vorschlag ist es, mittels einfacher Federkraftmesser experimentell die

Kraft zu bestimmen, bei der sich die Stabheuschrecken von verschiedenen Oberflächen lösen lassen.

Bald wird man mit den Schülern zu der Erkenntnis gelangen, dass es verfeinerter Messmethoden bedarf, um die wirkenden Kräfte zu bestimmen. Dies ist mit dem „Insektenkarussell“ möglich. Die Grundausstattung bietet dabei beispielsweise das Baukastensystem fischertechnik®. Regulierbares Netzgerät, Motor und passendes Getriebe erlauben es, CDs, die mit verschiedenen Materialien beklebt worden sind, mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in Rotation zu versetzen. Bei Kenntnis der durchschnittlichen Masse des Versuchstiers, dessen Entfernung vom Mittelpunkt und der Drehzahl der Scheibe kann die auf das Insekt wirkende Zentrifugalkraft errechnet werden.

Die Krafteinwirkung auf das Insekt wird nach und nach durch Steigerung der Geschwindigkeit erhöht. Bewegt sich das Tier zu Beginn noch über die rotierende Scheibe, bleibt es wegen des einsetzenden Freezing-Reflexes nach kurzer Zeit stehen. Somit bleibt der Abstand des Insekts zum Mittelpunkt ab einer gewissen Krafteinwirkung konstant. Ab diesem Zeitpunkt hängt die einwirkende Kraft nur noch von der Geschwindigkeit der rotierenden Scheibe ab. Bei erwarteten Umdrehungsgeschwindigkeiten von bis zu 1.200 Umdrehungen pro Minute kann das Insekt auf der Scheibe mit bloßem Auge nicht mehr wahrgenommen werden. Um den Versuchsverlauf dennoch verfolgen zu können, bedient man sich des folgenden Tricks: Ein Stroboskop wird extern so angesteuert, dass pro Umdrehung der Scheibe genau ein Lichtblitz ausgelöst wird. Das Signal erhält das Stroboskop von einer Gabellichtschranke, deren Lichtstrahl durch eine Markierung auf einer zweiten CD rundenweise unterbrochen wird. Hierdurch erscheint das Tier für das menschliche Auge immer an der gleichen Stelle. Doch lässt sich nicht nur unser Auge täuschen: Den gleichen Eindruck erhält man, wenn man zur späteren exakten Auswertung die Versuchsdurchgänge mit einer Vi-

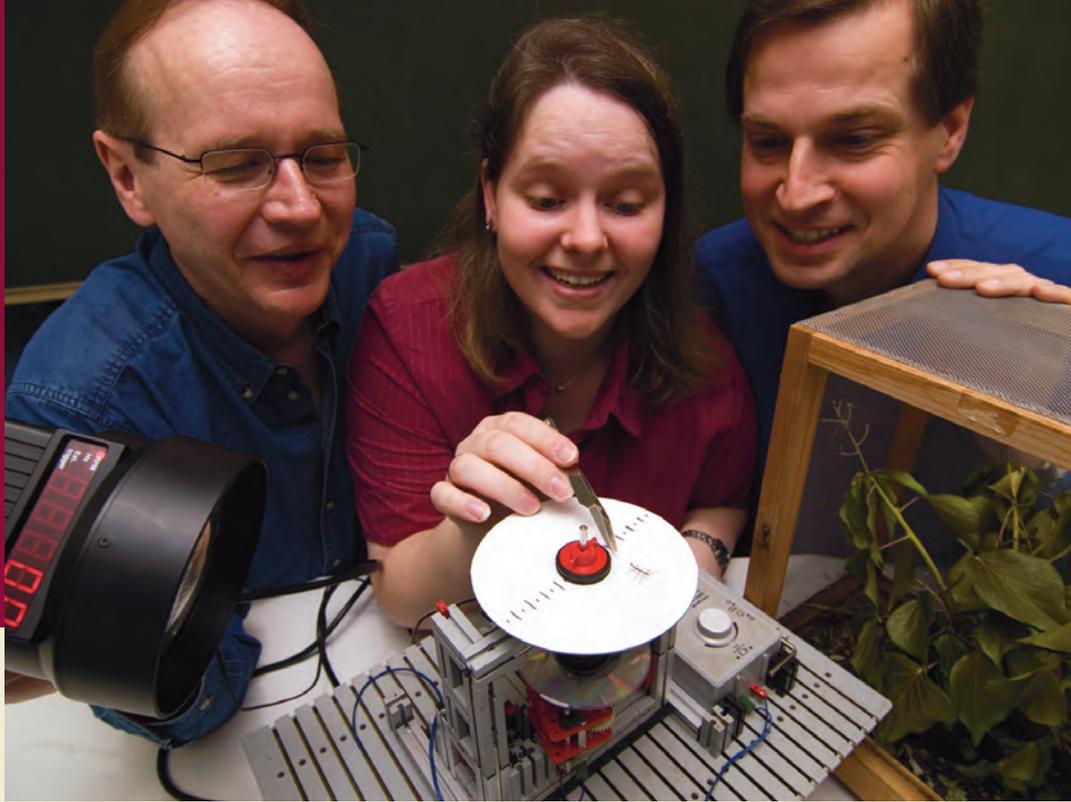


Bild 1: Eine Stabheuschrecke wird auf den Versuch vorbereitet. Foto: Peter Winandy

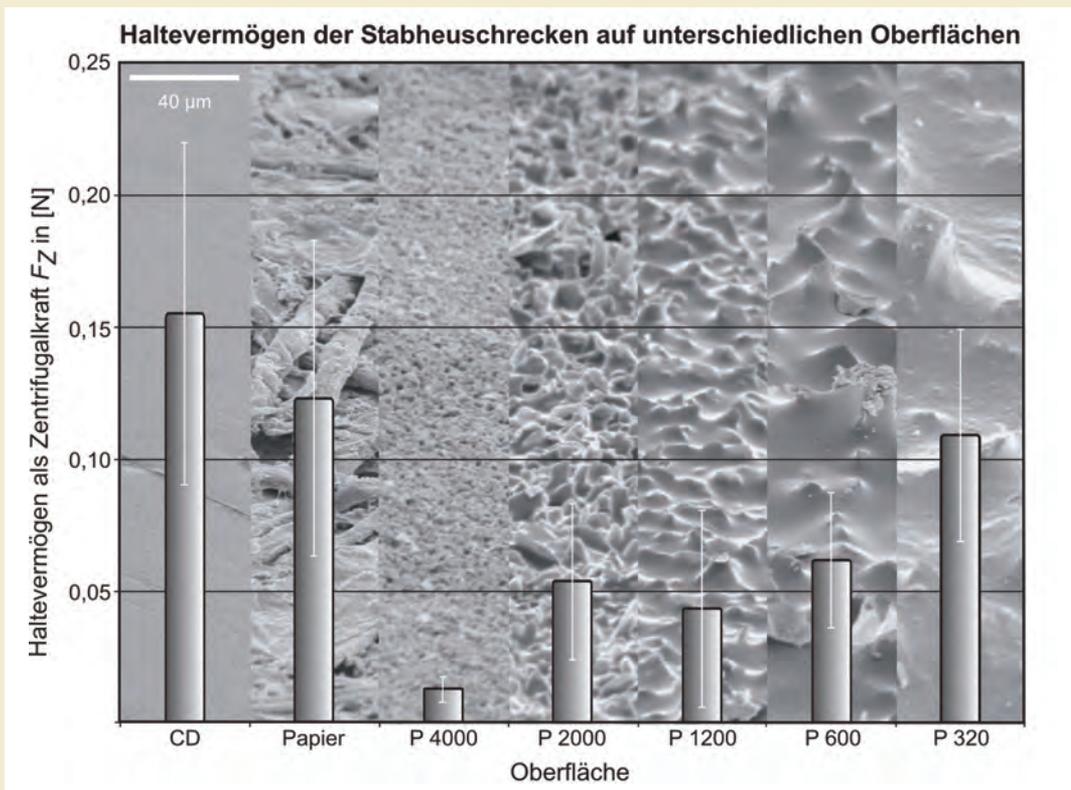


Bild 2: Stabheuschrecken können sich je nach Oberfläche unterschiedlich gut festhalten. Die Anzahl der Versuchsdurchläufe variierte zwischen  $n=21-33$ . Der Balken zeigt als Standardabweichung die Streuung der Messwerte vom Mittelwert an.

deokamera aufzeichnet. Die Drehzahl wird am Stroboskop fortwährend angezeigt. Der Endwert wird abgelesen, wenn die Stabheuschrecke schließlich von der Scheibe geschleudert wird. Dies überstehen die Insekten übrigens ohne sichtbaren Schaden, wovon sich die Schüler überzeugen können, wenn man die Insekten durch einen Pappzylinder auffängt, der die Apparatur umgibt.

#### Ergebnisse

Während des Experimentierens stellen die Schüler fest, dass Lebewesen mitunter sehr unterschiedlich reagieren. Das gleiche Individuum verlässt dieselbe Scheibe in den verschiedenen Versuchsdurchgängen bei höheren oder niedrigeren Drehzahlen. Ebenso

hat der Winkel der Körperlängsachse des Tieres zum Radius einen Einfluss. Damit ist ein wichtiges Lernziel erreicht, nämlich die Einsicht, dass man gesicherte Aussagen nur nach häufiger Wiederholung gewinnen kann, und die Werte statistisch ausgewertet werden müssen. Nach Bestimmung der Drehzahlen kann man anschließend diejenigen Zentrifugalkräfte errechnen, die jeweils in dem Moment auf die Tiere gewirkt haben, als sie von der rotierenden Scheibe geschleudert wurden. Je größer diese Kraft ist, desto besser können sich die Tiere auf den jeweiligen Oberflächen halten. Dementsprechend bedeutet ein geringer Wert ein geringes Haltevermögen. Die Ergebnisse lassen sich durch gängige Computerpro-

gramme in eine anschauliche, grafische Form bringen.

Bei der Auswertung der Ergebnisse fällt auf, dass sich Stabheuschrecken offensichtlich auf der glatten CD-Oberfläche besser halten können als auf jeder (untersuchten) anderen. Es ist naheliegend, hier den Einsatz der Haftlappen zu vermuten. Mit den Krallen können sich diese Tiere offensichtlich gut an den in der Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme sichtbaren Papierfasern oder dem rauen Schmirgelpapier festhalten. Das vielleicht interessanteste Ergebnis zeigt sich beim äußerst feinen Schmirgelpapier P 4000: Das sehr geringe Haltevermögen lässt darauf schließen, dass weder die Haftlappen noch die Krallen optimale Strukturen für diese Oberfläche bieten.

Die Schüler werden aus dieser experimentellen Erfahrung die Erkenntnis gewinnen, dass die exakte Erforschung eines Sachverhaltes zwar ein mitunter aufwändiges, aber immer sehr spannendes Unterfangen ist. Es ist vorstellbar, Oberflächen zu (unter-)suchen, die durch laufende Insekten schwer überwunden werden können. Nach Analyse deren Eigenschaften könnte es gelingen, gezielt Oberflächen herzustellen, die laufende Insekten – wie zum Beispiel Küchenschaben – davon abhalten in Wohnungen einzudringen.

#### Autoren:

Univ.-Prof. Dr.techn. Werner Baumgarten betreut das Lehr- und Forschungsgebiet Zelluläre Neurobionik. Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Johannes Bohrmann betreut das Lehr- und Forschungsgebiet Zoologie und Humanbiologie. Petra Hüttermann fertigte als Lehramtsstudentin ihre Staatsexamensarbeit am Lehr- und Forschungsgebiet Zoologie und Humanbiologie an. Martin Wüller ist Oberstudienrat und arbeitet als abgeordneter Lehrer am Lehr- und Forschungsgebiet Zoologie und Humanbiologie.

# Erfinderwerkstatt Natur

## Materialien zu bionischen Projekten für Schüler

Im Institut für Biologie II und damit auch im Zentrum Bionik Aachen machte man sich schon frühzeitig Gedanken über die Vermittlung bionischer Inhalte und Denkweisen. Dr. Harald Luksch baute ab 2003 die Lehrveranstaltungen des Zentrums Bionik Aachen auf und organisierte die Ringvorlesungen, das Seminar und das neurobionische Praktikum. Als Bionik kurz darauf zur biologischen Nebenfachprüfung und zur technischen Anwendungsfachprüfung zugelassen wurde, kamen auch Anfragen interessierter Studierender und Schüler. Die zahlreichen Anfragen zeigten, dass seitens junger Menschen ein großes Interesse an der Bionik vorhanden ist. Sie bietet auch solchen Schülern einen Zugang zur Technik, die diesen sonst nur schwer finden.

Die Fachgruppe „Aus- und Weiterbildung, Methodik und Didaktik“ entwickelte daher die Idee, Material für die Verbreitung bionischer Denkweisen unter Schülern zu entwickeln. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützte dieses Vorhaben und war bereit, die Entwicklung solcher Materialien zu finanzieren. Auf mehreren Fachgruppensitzungen wurden Standorte gefunden, die die Materialien für bionische Experimente in Schüler-Arbeitsgruppen entwerfen wollten. Zu diesen Standorten gehörten neben dem Institut für Biologie III, auch das Institut für Technik und ihre Didaktik der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, das Biotechnik-Zentrum der Technischen Universität Darmstadt, das Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn und das ebenfalls dort angesiedelte Institut für Zoologie.

Im Laufe mehrerer Treffen der kooperierenden Wissenschaftler wurden sieben Themen formuliert: Lotuseffekt (Bonn), Biologische Oberflächen (Bonn), Klettverschluss (Münster), Eisbärenfell als Wärmedämmung (Münster), Fotosynthetische Solarzelle nach Grätzel (Darmstadt), Fliegen wie Vögel (Darmstadt), Richtungshören wie Eulen (Aachen).

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung finanzier-

te mehrere Stellen für wissenschaftliche Hilfskräfte und stellte zudem Mittel für die redaktionelle Bearbeitung sowie den Druck und die Verbreitung von 5.000 Exemplaren der entsprechenden Materialien zur Verfügung. Die Arbeitsmaterialien wurden für Gymnasiasten und Realschüler der sechsten bis achten Jahrgangsstufe konzipiert, die die vorgestellten Projekte in Form einer Arbeitsgemeinschaft oder innerhalb einer Projektwoche durchführen können. Als betreuende Fachlehrer eignen sich insbesondere Biologie-, Physik-, Chemie- und Techniklehrer. Nach dem Prinzip des naturorientierten Lernens werden die Schüler zum „Nach-Denken“, „Nach-Entdecken“ und „Nach-Erfinden“ biologischer Vorbilder angeregt. Sie können die Prinzipien der biologischen Vorbilder herausarbeiten und technische Anwendungen entwickeln. Damit soll selbstständiges Entdecken und Erforschen gefördert werden. Zusätzlich verbessert das gemeinsame Experimentieren die soziale Kompetenz und eigenständiges Lernen. Ziel ist es, die Schüler möglichst früh an wissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen im naturwissenschaftlichen und technischen Bereich heranzuführen. Den Schülern werden sowohl die Entdeckungsgeschichte der natürlichen Phänomene als auch ihre technische Umsetzung nahe gebracht. So sollen sie beispielsweise nachvollziehen können, wie Erkenntnisse aus der Erforschung des Vogelfluges im Flugzeugbau nutzbar gemacht werden. Zudem können sie eigenständig eine Bio-Solarzelle bauen. Die einzelnen Projekte bestehen aus einer kurzen Einführung in die Thematik für Lehrer und Schüler und detaillierten Anleitungen zu Versuchsaufbau, -durchführung und -auswertung. Innerhalb der Projekte bauen die einzelnen Experimente und Aufgaben aufeinander auf und sollen daher in der angegebenen Reihenfolge durchgeführt werden. Zu vertiefenden Recherchen und weiteren Versuchen werden Anregungen gegeben. Jedem der Projekte sind Informationen für die Lehrer beigelegt, die Angaben zu den fachlichen Voraussetzungen beinhalten, die die Schüler mitbringen sollten, zu dem Zeitaufwand der Projekte und zu erforderlichem Material und möglichen Kosten.

Zur Mappe gehört auch eine DVD. Auf dieser ist Material zu

jedem der sieben Projekte zu finden. Zusätzlich zu elektronischen Versionen der gedruckten Materialien im PDF-Format enthält die DVD auch Lösungsblätter und Zusatzinformationen zu allen Aufgaben sowie detaillierte Bauanleitungen für die Projekte mit umfangreichen Experimenten. Auch ein von der Fachgruppe „Medien, Internet, Datenbanken, Öffentlichkeitsarbeit, Presse“ produzierter Film zur Bionik gehört dazu. In diesem Film gibt es mehrere Interviews mit führenden Bionikexperten aus Deutschland, so zum Beispiel mit Prof. Barthlott, dem Entdecker des Lotuseffekts. Teilweise stehen diese Interviews in direktem Zusammenhang mit den in den Materialien beschriebenen Projekten. Johanna Kern und Dr. Marcus J. Wirth, beide vom Institut für Biologie II, bearbeiteten den Projektteil „Können Roboter von Schleiereulen hören lernen?“. Die Schleiereulen sind Spezialisten für die nächtliche Jagd. Da die Sicht im Dunkeln eingeschränkt ist, hören diese Tiere besonders gut. Sie können ihre Beutetiere in völliger Dunkelheit finden. Dabei jagen sie bevorzugt im offenen Gelände. Die Fähigkeit der Eulen, Geräusche im Dunklen genau zu orten, wird am Institut für Biologie II untersucht. Präzise Schallortung ist auch für technische Anwendungen wie hörende Roboter interessant. Es ist lange bekannt, dass für die Fähigkeit Schallquellen zu orten, zwei Ohren notwendig sind. Fraglich war allerdings, wie die Information ausgewertet wird. Heute weiß man, dass die Zeitunterschiede des Eintreffens des Schalls am linken verglichen mit dem rechten Ohr für diese Fähigkeit genutzt werden. Da die Schleiereule in diesem Projekt als Vorbild dient, beschäftigt sich der erste Projektteil mit der Zoologie der Schleiereule: Wie sieht sie aus? Wann ist sie aktiv? Was frisst sie? Wie ortet sie ihre Beute? Um den Schülern Wissen zu Schall, seiner Ausbreitung, der Schallgeschwindigkeit und dem Richtungshören zu vermitteln, wurden verschiedene Experimente entworfen. In einem Projektteil soll die Wellencharakteristik des Schalls mit einfachen Mitteln sichtbar gemacht werden. In einem anderen Projektteil wenden die Schüler das Gelernte in einem Modell der Schallortung an und entdecken das Prinzip der Laufzeitunterschiede. Auch testen die Schüler ihr eigenes Vermögen,

Schallquellen zu lokalisieren. Im letzten Projektteil erkunden sie den Mechanismus im Gehirn der Eule, der die Laufzeitunterschiede misst und daraus die Position der Schallquelle bestimmt.

Dieses Projekt macht die Schüler schon in einem frühen Alter mit physikalischen Gesetzen der Akustik spielerisch vertraut. Damit fehlt ihnen später im Physikunterricht die Schwellenangst vor vermeintlich trockenem und schwierigerem Schulstoff. Die Eule ist hier ein Vehikel aus der Biologie, mit dem physikalische Sachverhalte transportiert werden können. Gerade Schülerinnen finden über den Bezug zu Tieren einen leichteren Zugang zu „trockener“ physikalischer Materie. Außerdem lernen die Schüler etwas über das Aussehen, das Verhalten, den Lebensraum und die Lebensweise einer Eule. Biologische Kenntnisse dieser Art sind heute wenig verbreitet.

Aktiver Schutz von Tieren und ihren Lebensräumen setzt aber Kenntnisse der Art und Interesse an diesen Tieren voraus. Die Vermittlung biologischer Kenntnisse ist also auch ein Baustein der Erziehung zur Nachhaltigkeit und zum Schutz der Umwelt. Da das Projekt auch Selbstversuche enthält, entdecken die Schüler Möglichkeiten, Grenzen und Mechanismen der eigenen Wahrnehmung. Da für einige Versuche immer mindestens zwei Schüler kooperieren müssen, werden auch soziale Kompetenzen und Teamfähigkeit trainiert.

Das Interesse der Lehrer an den Materialien zur Bionik ist groß. Schon vor dem Erscheinen der Mappe im September 2007 gingen im Institut für Biologie II Anfragen ein. Innerhalb von nur zwei Monaten war mehr als die Hälfte der Auflage trotz der Schutzgebühr bereits vergriffen. Zurzeit besteht der Plan, die Materialien nach Verteilung dieser ersten Auflage im Internet zum Download bereit zu stellen.

[www.biokon.net](http://www.biokon.net)

**Autor:** Dr.rer.nat. Marcus J. Wirth ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Biologie II und Geschäftsführer des Zentrums Bionik Aachen.

# BIOKON – Das nationale Kompetenznetzwerk

## Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert Netzwerkarbeit in der Bionik

Das Bionik-Kompetenz-Netz, kurz BIOKON, ist ein seit 2001 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförder- tes Projekt, das zum Ziel hat, der Industrie und Wissenschaft die Potenziale der Bionik aufzu- zeigen und weiter auszuschöp- fen. Gefördert wird das BIOKON im Rahmen der Nachhaltigkeits- förderung des Bundes. Der Auf- ruf verzeichnete von Anfang an einen großen Zulauf. Im Juni 2004 trat das BIOKON in eine zweite Phase ein und die Grün- dungsstandorte wurden durch weitere kompetente Institute und Einrichtungen erweitert. So gehörte auch die RWTH Aa- chen zu den ersten Partnern der zweiten Runde. Im gleichen Jahr wurde der gemeinnützige Verein Forschungsgemein- schaft-Bionik-Kompetenznetz, BIOKON e.V., gegründet. Von den ursprünglich sechs Stan- dorten wuchs das BIOKON bis 2006 auf 28 Mitglieder an.

Das bundesweite Netzwerk umfasst damit die wichtigsten Arbeitsgruppen in Deutschland im Bereich Bionik und bildet die ideale Plattform für den fachli- chen Austausch, die Erarbei- tung von schulischen und uni- versitären Bildungsinhalten und -konzepten sowie die Vermitt- lung von Ansprechpartnern für Anfragen aus der Industrie.

Seit Mai 2007 lief die För- derung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung plan- mäßig aus und das BIOKON fi- nanziert sich nun durch Beiträge, Spenden, Auftragsarbeiten und andere Drittmittel. Im gleichen Zeitraum wurde beschlossen, die erfolgreiche Arbeit auf den gesamteuropäischen Raum aus- zudehnen. Damit wuchs die Zahl der Mitglieder weiter an. Aktuell sind fast 60 Standorte im In- und Ausland Mitglied im BIOKON e.V.

Die BIOKON Homepage bildet die zentrale Plattform für die Kommunikation der Mit- glieder und gibt interessierten Besuchern die Möglichkeit, sich über die verschiedenen Stan- dorte und deren Aktivitäten und Forschungsprofile zu infor- mieren. Dort findet man im Standortverzeichnis die Kontak- tinformationen kompetenter Ansprechpartner und kann

Neuigkeiten aus der bionischen Forschung publik machen. Die Homepage stellt weiterhin eine erste Kontaktstelle zur Industrie dar.

Um die Arbeit im BIOKON effektiv zu organisieren, wurde ein Koordinationsbüro in Berlin installiert. Vorsitzender ist Dr. Rudolf Bannasch, der seit vielen Jahren im Bereich Bionik arbei- tet und auch Geschäftsführer des Bionikunternehmens Evolo- gic ist. Die ökonomische Lei- tung als Geschäftsführer über- nahm Dr. Ingo Klein. Die Arbeit im Netzwerk findet auf der Ba- sis von ständigen und themati- schen Fachgruppen statt. Während die ständigen Arbeits- gruppen organisatorische Auf- gaben im BIOKON überneh- men, sollen die thematischen Fachgruppen flexibel die aktu- ellen Arbeitsschwerpunkte der bionischen Forschung der Mit- glieder umfassen.

### Ständige Fachgruppen

- A1:** Medien, Internet, Datenbanken, Öffentlich- keitsarbeit, Presse
- A2:** Aus- und Weiterbildung, Methodik und Didaktik
- A3:** Ausstellungen, Messen, Kongresse, Workshops, Tutorials, Exponate
- A4:** Industrielle Umsetzung

### Thematische Fachgruppen

- B1:** Architektur, Design
- B2:** Leichtbau, Materialien
- B3:** Oberflächen und Grenzflächen, Strukturen und Funktionen
- B4:** Fluidodynamik, Fliegen, Schwimmen, Robotik
- B5:** Biomechatronik, Biomedizintechnik, Aktuatorik, Robotik
- B6:** Sensorik, Informationsverarbeitung, Kommunikation
- B7:** Bionische Optimierungsmethoden

Die RWTH Aachen, vertreten durch das Zentrum Bionik Aa- chen, arbeitet aktiv in der stän- digen Fachgruppe A2 „Aus- und Weiterbildung, Methodik und Didaktik“ mit und leistet unterstützende Arbeit in den anderen ständigen Fachgrup- pen. Bei den thematischen Fachgruppen liegt der Aache- ner Schwerpunkt bisher im Be- reich B6 „Sensorik, Informati-

onsverarbeitung, Kommunikati- on“. In Aachen wird allerdings auch Arbeit auf den Gebieten B2, B3, B4 und B5 geleistet. Über die Fachgruppen kommt es zu einem verstärkten Aus- tausch der Mitglieder.

Dieser Austausch gipfelt idealerweise in langfristigen Ko- operationen, die dann auch zu Drittmittelinwerbungen führen. Ein Beispiel für eine sol- che Drittmittelinwerbung ist das DFG-Schwerpunktpro- gramm „Strömungsbeeinflus- sung in Natur und Technik“, an dem die Institute für Biologie II, Aerodynamik und die Institute für Strömungslehre und Aero- dynamik der Technischen Uni- versität Darmstadt teilnehmen. Die Kooperation dieser Institute hat sich aus der Arbeit in der Fachgruppe „Fluidodynamik, Fliegen, Schwimmen, Robotik“ entwickelt. Ein Projekt zur Schalllokalisierung von Robotern nach dem Schleiereulenvorbild ist in der Fachgruppe „Sensorik, Informationsverarbeitung, Kommunikation“ angesiedelt und wird in Kooperation der In- stitute für Biologie II und Infor- matik V durchgeführt.

In der ständigen Fachgrup- pe „Aus- und Weiterbildung, Methodik und Didaktik“ sind neben dem Zentrum Bionik Aa- chen die Standorte Bochum, Darmstadt, Ilmenau und Mün- ster aktiv vertreten. Das Aache- ner Engagement konzentrierte sich auf die Erstellung eines Fragebogens zum Ist-Zustand der bionischen Lehre an den Standorten und den Entwurf ei- ner Richtlinie des BIOKON für bionische Studiengänge. Zur Verbreitung bionischer Themen auch an den Schulen entstand in Kooperation verschiedener Mitglieder der Fachgruppe ein Schulbuch der Bionik. Ebenfalls in Kooperation mit dem Verlag konnte eine Mappe mit Ar- beitsmaterialien und einer DVD für schulische Arbeitsgruppen erstellt werden.

Die Fachgruppe „Ausstel- lungen, Messen, Kongresse, Workshops, Tutorials, Expona- te“ ist maßgeblich für die hohe Außenwirkung des BIOKON verantwortlich. Ihre Mitglieder organisierten beispielsweise die Teilnahme des BIOKON über

mehrere Jahre auf der Hannover Messe. Die Präsenz bei der größten Industriemesse Deutsch- lands soll die Sichtbarkeit der bi- onischen Forschung erhöhen und Industriekontakte schaffen. Im Bestreben, die Industriekon- takte zu intensivieren, wurde 2006 ein Bionik-Industriekon- gress in Berlin durchgeführt. Neben Vertretern der bioni- schen Forschung aus den ver- schiedenen Standorten nahmen auch Firmen teil, die das Prinzip der Bionik in ihrer Produktent- wicklung verwenden. Dabei prä- sentierten die Daimler-Chrysler AG das „Bionic Car“, BMW eine entsprechende Motorradfelge und Continental ein bionisches Reifenprofil. Insgesamt wurde eine hohe Austauschrate zwischen For- schern und Industriepartnern er- reicht.

Das Kompetenznetz BIOKON hat in den sechs Jahren seines Be- stehens die Kooperation bion- isch Forschender untereinan- der massiv erhöht. Die Sicht- barkeit in der Öffentlichkeit und unter Industriepartnern konnte bedeutend gesteigert werden. BIOKON bietet bisher eine nationale Plattform der Bi- onik-Kompetenz in Deutsch- land. Die Ausweitung der Ar- beit auf das europäische Aus- land erscheint angesichts der Erfolgsgeschichte des BIOKON natürlich. Eine Ausweitung in den europäischen Raum liegt gerade für einen Standort wie Aachen nahe. Das Wachsen des nationalen BIOKON zu ei- nem europäischen „Bionik- EuNet“ bietet die Chance, die größte Bionik-Plattform der Welt zu schaffen und damit auf diesem Gebiet einen europäi- schen Vorsprung zu etablieren.

[www.bikon.net](http://www.bikon.net)

### Autoren:

Dr.rer.nat. Marcus J. Wirth ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Biologie II und Geschäftsführer des Zentrums Bionik Aachen.

### Forschungspreis für Professor Beneke

Univ.-Professor Dr. Martin Beneke vom Institut für Theoretische Physik, erhält als ein Preisträger im Rahmen des Gottfried Wilhelm-Leibniz-Programms des Jahres 2008 für seine Forschungen 2,5 Millionen Euro. Insgesamt drei Wissenschaftlerinnen und acht Wissenschaftler waren zuvor vom zuständigen Nominierungsausschuss aus 158 Vorschlägen für den höchstdotierten deutschen Forschungspreis ausgewählt worden. Martin Beneke studierte Physik, Mathematik und Philosophie in Konstanz, Cambridge und Heidelberg, wo er 1991 sein Diplom ablegte. Nur zwei Jahre später promovierte er an der TU München mit Untersuchungen zur Struktur von Störungsreihen in hohen Ordnungen. Die Habilitation folgte 1998 wiederum in Heidelberg. Bereits 1999 wurde Beneke, gerade 33 Jahre alt, Inhaber des Lehrstuhls Theoretische Physik E an der RWTH Aachen. Wie die DFG mitteilte, trägt die Forschung von Professor Beneke wesentlich dazu bei, dass die theoretischen Vorstellungen der Elementarteilchenphysik überprüft, Abweichungen davon aufgezeigt und neue Strukturen überhaupt erkannt werden können. Insbesondere führt Beneke hochpräzise Messungen durch, um Messdaten von Beschleunigungsexperimenten mit den Vorhersagen des Standardmodells der Teilchenphysik vergleichen zu können. Beneke hat seine weltweit als einzigartig geltenden Methoden nicht nur entwickelt, sondern selbst auch auf aktuelle physikalische Fragestellungen angewandt, so etwa auf die Lebensdauer und den Zerfall besonders schwerer Mesonen. Diese Untersuchungen erlauben neue Einsichten in die Materie-Antimaterie-Asymmetrie und damit in das Verständnis des Mikrokosmos und der Entwicklung des frühen Universums.

### Abschiedsvorlesung von Professor Sigurd Daecke

Univ.-Prof. Dr. theol. em. Sigurd Daecke hielt auf vielfachen Wunsch eine Abschiedsvorlesung für das Fach Evangelische Theologie. Prof. Daecke hatte bis 1998 den Lehrstuhl für Systematische Theologie inne und ließ in seiner Rede die Geschichte des Faches in Aachen Revue passieren. Sie begann 1954 mit der Eröffnung einer Außenstelle der Evangelisch-Theologischen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. 1972 kam der Lehrstuhl für Evangelische Theologie an der Pädagogischen Hochschule hinzu. Beide wurden 1989 in die Philosophische Fakultät der RWTH integriert. Daecke erinnerte in seiner Rede an zahlreiche Kollegen, die in Aachen das Fach lehrten oder nach ihrer Promotion den Ruf an renommierte Universitäten erhielten. Außerdem würdigte der emeritierte Hochschullehrer die gute Zusammenarbeit mit dem „Schwesterfach“ Katholische Theologie. So boten die evangelischen Dozenten Veranstaltungen zum Neuen Testament und die katholischen Kollegen zum Alten Testament an, die von allen Lehramts- und Magisterstudierenden des Faches Theologie besucht werden konnten. „Diese Tatsache ist ein erfreuliches und ermutigendes Zeichen guter ökumenischer Zusammenarbeit nicht nur der beiden theologischen Institute, sondern auch der Kirchenleitungen, die dieses Modell tolerierten“, würdigte Prof. Daecke diese Praxis. Abschließend erinnerte er noch an den Beitrag, den sein Fach bei der Entstehung von interdisziplinären Gesprächsreihen an der RWTH leistete, die beispielsweise im Rahmen von Ringvorlesungen den Dialog zwischen Geisteswissenschaften sowie Natur-, Ingenieur- und Lebenswissenschaften förderten. Angesichts der mehr als 53-jährigen Geschichte des Fachs und der geleisteten Arbeit schloss Prof. Daecke mit den Worten: „Und so hoffen wir, dass dieses halbe Jahrhundert evangelischer Theologie in Aachen nicht so schnell in Vergessenheit gerät, weder an der Hochschule noch in der Stadt. Wenn wir dazu beitragen dürfen, brauchen wir heute nicht zu trauern, sondern können froh und zufrieden auf unser Werk zurückblicken.“

### EU fördert Softwareentwicklung für intelligente Geräte

Das EU-Forschungsprojekt „Quasimodo“ soll die Wettbewerbsfähigkeit deutscher und europäischer Firmen, die eingebettete Systeme entwickeln, fördern und verbessern. Der Lehrstuhl für Softwaremodellierung und Verifikation unter Leitung von Univ.-Prof. Dr. ir. Joost-Pieter Katoen ist gemeinsam mit europäischen Partnern an den Forschungsarbeiten beteiligt. Das Projekt wird durch das siebte Forschungsrahmenprogramm der EU finanziert, ist auf eine Dauer von drei Jahren ausgelegt und umfasst ein Budget von insgesamt 2,7 Millionen Euro. Der Name Quasimodo steht für „Quantitative System Properties in Model-Driven-Design of Embedded Systems“. Die Partner kommen aus Belgien, Dänemark, Deutschland, den Niederlanden und Frankreich. Als akademische Institutionen nehmen die Universitäten Aachen, Saarland, ULB Brüssel, Nijmegen, Twente, ENS Cachan Paris und Aalborg teil, als Wirtschaftspartner Terma Space (DK), Hydac (D), Chess (NL) und das Embedded Systems Institute (NL).

### Forschungskooperation mit KUKA Roboter

Die KUKA Roboter GmbH, die RWTH Aachen und das Universitätsklinikum Aachen wollen im Rahmen einer Forschungskooperation in mehreren Bereichen neue Medizinrobotik-Anwendungen erforschen. Der Kooperationsrahmenvertrag wurde von Rektor Burkhard Rauhut, Prof. Henning Saß, dem Ärztlichen Direktor und Vorstandsvorsitzenden des Universitätsklinikums Aachen, sowie Bernd Liepert, dem Vorsitzenden der Geschäftsführung der KUKA Roboter GmbH und Vorstand der KUKA AG, unterzeichnet. In dem Verbund vertritt Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Abel, Inhaber des Lehrstuhls für Regelungstechnik, die RWTH. In seinem Institut werden die komplexen neuen Regelungssysteme entwickelt, die die Roboter zum Einsatz am Patienten befähigen und einen sicheren, interaktiven Einsatz ermöglichen. Im Universitätsklinikum Aachen ergänzen Univ.-Prof. Dr.med. Dipl.-Ing. Thomas Schmitz-Rode, Lehrstuhl für Angewandte Medizintechnik, und Univ.-Prof. Dr.med. Michael Eble, Direktor der Klinik für Strahlentherapie, die Partnerschaft.

### PACE fördert die praxisnahe Ausbildung

Die RWTH Aachen wurde im Rahmen eines Festaktes in die PACE-Kooperation aufgenommen. PACE steht für Partners for the Advancement of Collaborative Engineering Education und ist eine Zusammenarbeit von General Motors/Adam Opel GmbH, EDS, Hewlett Packard, Siemens PLM Software und Sun Microsystems zur Verbesserung der praxisnahen Ausbildung von Ingenieuren und Designern. PACE stellt ausgewählten Universitäten für ihre Studierenden Software oder Rechnerarbeitsplätze zu besonders günstigen Konditionen – teilweise sogar kostenlos – zur Verfügung. Mit der Aufnahme bei PACE befindet sich die RWTH Aachen in einem Kreis von weltweit renommierten Universitäten wie MIT, Virginia Tech, Georgia Tech sowie weiteren Institutionen aus Australien, Kanada, China, Mexiko, Süd-Amerika, Süd-Korea und Schweden.

### **Katalysezentrum eröffnet**

Mit einem Festakt wurde das neue Katalysezentrum, eine Kooperation der RWTH sowie der Firmen Bayer MaterialScience und Bayer TechnologyServices, eröffnet. Wissenschaftlicher Leiter des Zentrums ist Univ.-Prof. Dr. Walter Leitner, Inhaber des Lehrstuhls für Technische Chemie und Petrolchemie. Das neue Zentrum wird eine Plattform zur Umsetzung von Grundlagenforschung in Innovation darstellen. Im Fokus des wissenschaftlichen Interesses stehen langfristige, fundamentale Fragen der Katalyseforschung, die gleichzeitig die wirtschaftlichen Interessen des Industriepartners im Blick haben. Vor diesem Hintergrund konzentrieren sich die Arbeiten auf die Erforschung neuer Katalysatoren, alternativer Reaktionswege und umweltverträglicher oder energieeffizienter Herstellungsverfahren. Das Konzept der Zusammenarbeit beruht auf wechselseitiger Anregung und gemeinsamer Definition wissenschaftlicher Herausforderungen. Ziel ist es, ein Maximum an Synergie im Bereich der Infrastruktur und der Methodenentwicklung zu erreichen. Von der Zusammenarbeit wird das Institut mit seiner unabhängigen Forschung und seinen Lehraufgaben ebenso profitieren wie der Industriepartner, der durch die intensive Kooperation Ergebnisse aus dem Bereich der Grundlagenforschung schneller und effizienter für künftige Anwendungen nutzen kann. Die Kooperation zwischen der Hochschule und Bayer ist zunächst auf einen Zeitraum von fünf Jahren angelegt. Die Partner aus der Wirtschaft werden jährlich mehr als 1,5 Millionen Euro in das Aachener Forschungszentrum investieren und damit unter anderem Arbeitsplätze für zehn bis zwölf hochqualifizierte Nachwuchswissenschaftler finanzieren. Die Rahmenbedingungen zum Ausbau eines Kompetenzzentrums Katalyse mit einer Laborfläche von rund 400 Quadratmetern am Institut für Technische und Makromolekulare Chemie wurden durch die Unterstützung des Ministeriums für Innovation, Wissenschaft, Forschung und Technologie des Landes Nordrhein-Westfalen geschaffen, das mit einer Investition von 1,7 Mio. Euro die Basis sicherte. Zudem investierte die RWTH, die auch die Räume zur Verfügung stellt, eine Million Euro in das neue Zentrum.

### **RWTH Aachen überprüft Raumfahrt-System der ESA**

Der Lehrstuhl für Softwaremodellierung und Verifikation leitet ein Projekt, mit dessen Hilfe die Zuverlässigkeit aktueller und zukünftiger Raumfahrten erheblich verbessert werden soll. Das Projekt der Europäischen Weltraumbehörde ESA ist auf zwei Jahre angelegt und mit einem Budget von 500.000 Euro ausgestattet. Unter Leitung von Univ.-Prof. Dr. ir. Joost-Pieter Katoen arbeiten die Fondazione Bruno Kessler aus dem italienischen Trient und das französische Unternehmen Thales Alenia Space aus Cannes daran, künftig Fehler in der Kontrollsoftware beispielsweise von Ariane-5 und Mars Pathfinder in einer frühen Entwurfsphase zu finden.

### **Kooperation mit Universität in Tokio**

Die RWTH Aachen kooperiert jetzt mit dem Tokyo Institute of Technology (TITech), einer der angesehensten technischen Universitäten Japans. Vorgesehen ist unter anderem der Austausch von Wissenschaftlern und Studierenden. Die Vereinbarung baut auf bereits seit mehreren Jahren bestehenden guten Kontakten in verschiedenen naturwissenschaftlichen Fachgebieten, beispielsweise in der Chemie und Informatik, auf. TITech mit seinem Hauptcampus in Ookayama mitten in Tokyo ist vor allem auf Ingenieur- und Naturwissenschaften spezialisiert. Derzeit studieren dort 5.000 Studierende und 2.000 Graduierte, betreut von 1.800 Lehrenden. Im japanischen Exzellenzwettbewerb, dem „Global Center of Excellence Programm“ des japanischen Bildungsministeriums gehört das TITech zu den Gewinnern.

### **RWTH-Team gewinnt Wettbewerb**

Autonom fahrende Autos, die selbstständig ihren Weg finden, einparken oder Hindernissen ausweichen – der Traum vieler gestresster Autofahrer. Fünf RWTH-Studierende haben ein solches Fahrzeug im Rahmen des Carolo-Cup der Technischen Universität Braunschweig im Maßstab 1:10 realisiert und können sich als Gewinner über ein Preisgeld in Höhe von 5.000 Euro freuen. Bei dem in diesem Jahr zum ersten Mal ausgetragenen Wettbewerb müssen von Studierenden aufgebaute Modellautos ohne Fernsteuerung selbstständig geeignete Parklücken finden, fahrschulgerecht einparken und möglichst schnell um einen Rundkurs fahren, ohne Hindernisse zu berühren oder die Fahrbahn zu verlassen. Die vier Aachener Informatiker und ein Elektrotechniker – Philipp Fischer, Yves Duhr, Julian Krengel, Stefan Kockelkoren und Hugues Tchouankem – setzten sich gegen fünf Teams aus Hamburg, Bremen und Braunschweig durch. Ihr aus einem handelsüblichen Modellauto entstandenes Fahrzeug erzielte 917 von 1000 möglichen Punkten.

### Erstmalig Alumni-Stipendium vergeben

Fabian Bachmann, Arne Bohl, Sarah Kolder, Christina Scherrers und Matthias Schlottbom konnten jetzt als erste Studierende der RWTH ein Alumni-Stipendium aus den Händen von Rektor Rauhut und Professor Lutz F. Hornke, dem Rektoratsbeauftragten für die Alumni-Arbeit, entgegen nehmen. „Die RWTH bemüht sich seit vielen Jahren durch unterschiedliche Aktivitäten die Betreuung der Studierenden zu verbessern. Dazu gehört nun auch das Alumni-Stipendium,“ so Rektor Burkhard Rauhut bei der offiziellen Übergabe. Mit dieser neuen Förderung wird der Studienbeitrag in Höhe von 500 Euro von ausgewählten Studierenden für ein oder mehrere Semester von ehemaligen Studierenden finanziert. „Ziel des Alumni-Stipendiums ist es nicht nur, Studierende frühzeitig mit der Alumni-Idee und dem Netzwerk-Gedanken bekannt zu machen. Wir hoffen natürlich, dass die Stipendiaten später als Ehemalige ihrerseits Studierende auf diese Weise fördern“, so Rauhut. Mit dem Alumni-Stipendium ist neben der finanziellen Unterstützung ein persönliches Mentoring durch die fördernden Firmen verbunden.

### DAAD-Preis für Darwin Wijaya Tonny

Darwin Wijaya Tonny aus Indonesien wurde in diesem Jahr mit dem DAAD-Preis ausgezeichnet. Der Preis wird an Studierende mit besonderen akademischen Leistungen und bemerkenswertem gesellschaftlich-interkulturellem Engagement verliehen und vom Deutschen Akademischen Austauschdienst, kurz DAAD, zur Verfügung gestellt. Neben seinem Studium der Elektrotechnik engagiert sich Wijaya Tonny für die Belange der internationalen Studierenden an der Aachener Hochschule. Er setzt sich als ehrenamtlicher Mitarbeiter von INCAS, dem „Interkulturellen Centrum Aachener Studierender“, für die Verbesserung des interkulturellen Dialoges ein.

### Verleihung der Lehrpreise 2007

Zur Förderung und kontinuierlichen Optimierung der Lehre wird seit 2001 ein Lehrpreis ausgelobt, mit dem herausragende und beispielhafte Lehrleistungen gewürdigt und unterstützt werden. Vergeben wurden insgesamt 18.000 Euro Preisgeld, das in vollem Umfang in die Bereiche Lehre und Forschung investiert werden soll, wobei mindestens zwei Drittel für die Lehre zu verwenden sind. Den mit 9.000 Euro dotierten ersten Preis erhielten die am Interdisziplinären Skillslab, dem Aachener Interdisziplinären Trainingszentrum für Ärzte (AIXTRA), beteiligten Lehrenden Dr. Stefan Beckers, Dr. Sasa Sopka, Prof. Dr. Irmgard Claßen-Linke und Dr. Michaela Weishoff-Houben von der Medizinischen Fakultät. Mit dem Skillslab AIXTRA schufen sie eine fachübergreifende Plattform zur Durchführung eines praktischen Unterrichts, welcher von der Kooperation der Grundlagenfächer mit den klinischen Fächern lebt. Univ.-Prof. Dr. Ullrich Englert, Professor am Institut für Anorganische Chemie, erhielt in Zusammenarbeit mit Univ.-Prof. em. Dr. Gerhard E. Herberich den mit 6.000 Euro dotierten zweiten Lehrpreis für die Entwicklung und Durchführung eines freiwilligen Kurses zum Verständnis der Chemie und chemischer Reaktionen. Prof. Dr. Ursula Rudnick, Hochschuldozentin am Lehrstuhl für Systematische Theologie, wurde für die Vielfältigkeit ihrer Lehrveranstaltungen, die sich durch höchste Aktualität, eine kritische Auseinandersetzung mit den Lehrinhalten sowie meisterhafte Diskussionsleistungen auszeichneten, mit einem Preisgeld von 3.000 Euro geehrt.

### RWTH forscht gemeinsam mit Ukraine

Das Institut für Allgemeine Mechanik arbeitet seit sieben Jahren erfolgreich mit der Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture in der ukrainischen Stadt Dnipropetrovsk zusammen. Die Kooperation wurde Ende 2007 in die Förderprogramme der Alexander von Humboldt-Stiftung aufgenommen. „Wir ergänzen uns wunderbar in unserer Forschungsarbeit“, berichtet Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Weichert, Leiter des Instituts für Allgemeine Mechanik. Die Partnerschaft der Hochschuleinrichtungen geht auf mehrere Forschungsaufenthalte eines ukrainischen Wissenschaftlers in Aachen zurück. Dnipropetrovsk ist mit rund einer Million Einwohnern die drittgrößte Stadt der Ukraine. Zu Zeiten der Sowjetunion gehörte sie zu den so genannten „geschlossenen Städten“. Dort forschten das Militär und die Rüstungsindustrie meist in geheimer Mission. Durch die Partnerschaft mit der RWTH Aachen konnten sich die ukrainischen Wissenschaftler aus ihrer langjährigen Abgeschlossenheit von der internationalen wissenschaftlichen Gesellschaft schnell befreien.

### **Claas Michalik mit MATHEON-Medienpreis ausgezeichnet**

Für seinen Artikel „Bei der Echtzeitoptimierung sitzt die Zeit im Nacken“ wurde Dipl.-Ing. Claas Michalik in Berlin mit dem dritten Preis des MATHEON-Medienwettbewerbs ausgezeichnet. Claas Michalik promoviert zurzeit am Institut für Prozesstechnik und veröffentlichte den Text in Ausgabe „Exzellenzinitiative – Impulse für die Forschung“ der „RWTH-Themen“.

Das DFG-Forschungszentrum MATHEON hat den Medienpreis 2007 zum zweiten Mal ausgeschrieben. Teilnehmern konnten Nachwuchsjournalisten, die einen Artikel zu Fragen der angewandten Mathematik in verständlicher Form adressiert an eine breite Öffentlichkeit veröffentlicht hatten. Michalik erläutert in seinem Text, wie Mathematiker und Verfahrenstechniker mit Einsatz von Multiskalenmethoden industrielle Abläufe optimieren. Am Beispiel des täglichen Kaffeekochens macht der Autor deutlich, wie viele Parameter Einfluss haben und kontrolliert werden müssen, um ein stets gleiches Ergebnis zu erzielen. Anschließend überträgt er das Beispiel auf Abläufe bei der Arzneimittelherstellung und der entsprechenden Simulation. Das DFG-Forschungszentrum MATHEON arbeitet zusammen mit der Industrie und Wissenschaft an mathematischen Lösungen für komplexe Probleme. Der Medienpreis wurde ins Leben gerufen, um die Bedeutung solcher Lösungen für den Alltag bewusst zu machen.

### **Spatenstich zum E.ON Energy Research Center**

Mit einem offiziellen Spatenstich begannen jetzt die Arbeiten zum Neubau des E.ON Energy Research Centers. Zum Spaten griffen NRW-Innovationsminister Andreas Pinkwart, Rektor Burkhard Rauhut, Wulf H. Bernotat, E.ON-Vorstandsvorsitzender, Gisela Nacken, Beigeordnete für Planung und Umwelt der Stadt Aachen, Prof. Rik W. De Doncker, Direktor des E.ON Energy Research Centers sowie der Geschäftsführer Rolf Krähmer und der Niederlassungsleiter Harald K. Lange vom Bau- und Liegenschaftsbetrieb NRW.

Auf dem 18.000 Quadratmeter großen Grundstück in Melaten werden in den beiden nächsten Jahren das Institutsgebäude und eine Versuchshalle gebaut sowie die zum Betrieb notwendige Infrastruktur geschaffen. Der im Rahmen eines Architekturwettbewerb ermittelte Sieger-Entwurf stammt aus dem Londoner Büro der international renommierten Architektin Zaha Hadid. Die Nutzung regenerativer Energien, ihre Erforschung und die ästhetische Integration der technischen Anlagen in eine hochwertige Architektur waren wichtige Kriterien bei der Vergabe.

Auf insgesamt 4.300 Quadratmeter Nutzfläche entstehen Büros, Labore, Seminarräume und Experimentierflächen. Die Gesamtinvestitionskosten in Höhe von rund 25,5 Millionen Euro tragen Bund und Land gemeinsam.

Das E.ON Energy Research Center forscht an innovativen Lösungen für eine umweltgerechte, sichere und preisgünstige Energieversorgung der Zukunft.

**Zwei neue Forschungsschulen**  
Das Ministerium für Innovation, Wissenschaft, Forschung und Technologie des Landes Nordrhein-Westfalen hat zwei Forschungsschulen für die RWTH Aachen bewilligt. Ab dem Wintersemester 2008/09 werden dort herausragende Studierende schnell und systematisch innerhalb von drei Jahren zur Promotion geführt.

In der Forschungsschule „Brennstoffgewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen“ unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schröder vom Aerodynamischen Institut steht die Entwicklung neuer Kraftstoffe im Mittelpunkt. Vor dem Hintergrund knapper werdender Ressourcen sollen hier neue Energieträger erschlossen und für die industrielle Verwertung nutzbar gemacht werden. Bis zu 25 Studierende sollen in den nächsten fünf Jahren an der Forschungsschule promovieren können.

Die „Bonn-Aachen International Research School on Applied Informatics (B-IT Research School)“ ergänzt die erfolgreichen internationalen Masterprogramme des Bonn-Aachen International Center for Information Technology (B-IT) um eine strukturierte Doktorandenförderung. „Das Besondere an unserem Ansatz ist, dass nicht nur die von der Forschungsschule finanziell geförderten Stipendiaten, sondern darüber hinaus schätzungsweise 150 bis 200 Informatik-Doktoranden aus den Forschungsprojekten der RWTH Aachen, der Universität Bonn und der Fraunhofer-Institute von den Angeboten und Strukturen der

B-IT Research School profitieren“, betonte der Sprecher, Univ.-Prof. Dr.rer.pol. Matthias Jarke, Inhaber des Lehrstuhls für Informatik 5 (Informationssysteme und Datenbanken) der RWTH Aachen und Leiter für das Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT. Er formulierte – gemeinsam mit der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn und dem Fraunhofer-Institutszentrum Schloss Birlinghoven IZB – den Antrag für die Forschungsschule „B-IT Research School“. Die Förderung umfasst Stipendienmittel für rund 20 Doktoranden sowie Mittel zum Aufbau eines internationalen Angebots von Kompaktkursen und Forschungsseminaren für die nächsten fünf Jahre.

In der nächsten Ausgabe:

RWTHTHEMEN 1/2008

# Mathematik ist überall?!

Unendliche Spiele

---

Staus auf Straßennetzen

---

Ein elastischer Körper  
fällt in eine zähe Flüssigkeit

---

Stochastische Modelle für  
geordnete Daten

---

Online-Detektionsverfahren  
für stochastische Prozesse

---

Mathematische Modellierung  
und Simulation  
geophysikalischer Strömungen

---

Mathematik für Schulen

---

Neue Medien in der Statistik

---

Fallzahlplanung in  
klinischen Studien

---



Denken ist Handeln. Bei BCG.

## Bringen Sie Ihre Ideen zur Serienreife.

Um bleibende Werte zu schaffen, genügt es nicht, brillante Pläne zu entwerfen. Erst in der Umsetzung zeigt sich, ob daraus auch messbare Wettbewerbsvorteile für unsere Kunden werden. Bei BCG setzen Sie Ihren Erfindergeist daher nicht nur gezielt ein, um zukunftsweisende Strategien zu entwickeln, Sie bringen sie auch auf die Straße. Dabei werden Sie entdecken, was uns täglich zu Höchstleistungen antreibt: der Stolz, wirklich etwas zu bewegen. Wir suchen herausragende Universitätsstudierende und Professionals (w/m) aller ingenieurwissenschaftlichen Fachrichtungen, die das Beste aus ihren Plänen machen wollen: Realität. Bewerben Sie sich bei der weltweit führenden Strategieberatung für den Einstieg als Associate oder Consultant, für das Junior-Associate-Programm (Bachelor) oder für ein studienbegleitendes Praktikum.

Ingrid Samuel (02 11) 30 11-32 00 oder Ortrud Wiegleb (089) 23 17-43 61, [www.bcg.de/ingenieure](http://www.bcg.de/ingenieure)

THE BOSTON CONSULTING GROUP

