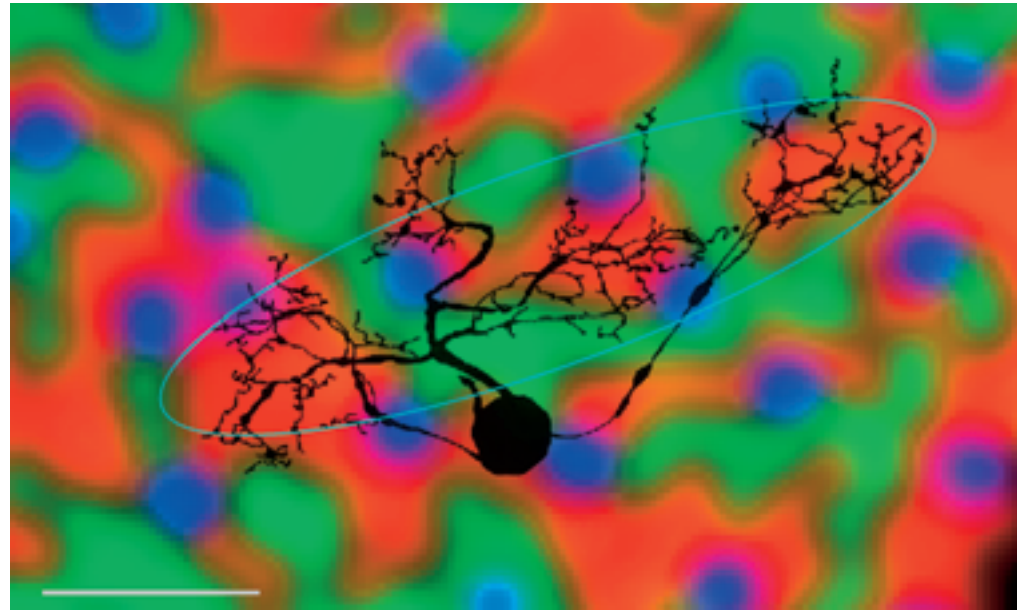




FORSCHUNG aktuell



Die Dendritenbäume von Ganglienzellen in der Augennetzhaut sind gewöhnlich rund und empfangen Signale von allen Rezeptoren in ihrem Einzugsgebiet; zur Peripherie hin sind die Dendritenbäume von „midget cells“ aber oft unregelmäßig. Das Bild zeigt eine Zelle mit einem extrem unregelmäßigen Dendritenbaum. Das anatomische Bild wurde einer (absichtlich verschwommenen) Abbildung der Rezeptorenverteilung überlagert; die blauen Felder markieren S-Rezeptoren (die regelmäßig angeordnet sind), die roten und grünen Felder entsprechen den Orten von L- und M-Rezeptoren (mit unregelmäßiger Anordnung).

BIOCHEMIE

Farbsehen am Rand des Gesichtsfelds

Wissenschaftler aus Göttingen, Sydney und New York haben herausgefunden, wie Farbreize im äußeren Gesichtsfeldbereich verarbeitet werden (NATURE, 19. April 2001). Während die meisten Menschen Farben bei direktem Hinsehen gut unterscheiden können, nimmt die Farbwahrnehmung zur Peripherie des Auges hin deutlich ab. Liegt das an einer ungenauen Verschaltung der Farb Rezeptoren in der Netzhaut des Auges oder an der weiteren Verarbeitung von Farbsignalen im Gehirn? Das war lange eine offene Frage.

Ein Team um Prof. Barry Lee am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen hat nun nachgewiesen, dass auch in Randberei-

chen des Gesichtsfelds die Augen noch farbspezifisch reagieren. Der Verlust der Farbwahrnehmung im äußeren Gesichtsfeld muss also im Gehirn passieren. Das menschliche Sehsystem enthält zwei unterschiedliche, jeweils kontrastierende Farbkanäle (rot-grün und blau-gelb), in denen unsere gesamte Farbwahrnehmung repräsentiert ist. Das blau-gelbe System ist bei den Säugetieren entwicklungsgeschichtlich alt, das rot-grüne System kommt dagegen nur bei Affen und Menschen vor – andere Säugetiere sind rot-grün-farbenblind. Die Farbkanäle kommen durch die drei Gruppen von Fotorezeptoren zu Stande, die nur bei Tageslicht reagieren (Zäpfchen) und vorwiegend Licht kurzer Wellenlänge (S, blau), mittel-

(M, grün-gelb) oder langwelliges Licht (L, rot) absorbieren; andere Säugetiere als Affen und Menschen besitzen nur M-Rezeptoren. Durch Kombination dieser Signale entstehen die beiden Farbkanäle: +S-(M+L) ergibt den blau-gelben Farbkanal, +M-L (und +L-M) den rot-grünen. Diese Verrechnung erfolgt schon bald hinter den Rezeptoren in der Augennetzhaut (Retina). Die anatomischen Grundlagen dieser Verschaltung sind für den blau-gelben Farbkanal verstanden, aber die Grundlage des Rot-Grün-Kanals ist noch unsicher. Man weiß, dass das verantwortliche Zellsystem in der Augennetzhaut aus den so genannten Midget cells (Zwergzellen) besteht. Im zentralen Gesichtsfeld ist ein einzelner M- oder L-Rezeptor auf

eine einzelne bipolare Zelle des Midget-cell-Systems verschaltet und dann weiter auf eine einzelne Ganglionzelle, die ihre Signale zum Gehirn sendet. Entweder reicht diese spezifische Verschaltung aus, dass Rot-Grün-Farbsignale die Hirnrinde erreichen, oder es muss weitere Verschaltungsmechanismen im Auge geben, die das rot-grüne Farbsignal spezifisch herausfiltern. Nach solchen Mechanismen haben die Forscher anatomisch gesucht, sie aber nicht gefunden. Ein kritischer Test, um diese beiden Hypothesen zu unterscheiden, ist das Farbsehen in Randbereichen der Retina, in Gesichtsfeldbereichen von 20 bis 30 Grad von der Mitte entfernt. Hier sieht es so aus, als ob die spezifische Verbindung des Midget-cell-Systems zusammengebrochen ist; jede Ganglionzelle hat Kontakt mit etwa 20 bis 30 verschiedenen Rezeptoren. Ohne die spezifische Verbindung einzelner Rezeptorentypen auf dieselbe Zelle sollten diese peripheren Zellen daher nicht rot-grünfarbempfindlich sein. Bei Affen und Menschen ist die Farbempfindlichkeit im äußeren Gesichtsfeldbereich tatsächlich deutlich verringert: Offenbar ist die zelluläre Grundlage für eine Rot-Grün-Unterscheidung bereits auf retinaler Ebene verloren gegangen. Nur durch spezifische Verschaltungsmechanismen könnten diese Zellen ihre Rot-Grün-Empfindlichkeit beibehalten. Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für biophysikalische Chemie in Göttingen, der Universität in Sydney und dem State College für Optometrie in New York haben jetzt mit quantitativen Methoden die Rot-Grün-Farbempfindlichkeit von Ganglionzellen in Randbereichen der Augennetzhaut untersucht. Die Ergebnisse sind eindeutig: Die Eigenschaften von peripheren Rot-Grün-Zellen waren denen von zentralen Rot-Grün-

Zellen sehr ähnlich. Der Verlust der Farbempfindlichkeit im peripheren Gesichtsfeld muss also cortikalen Ursprung haben, also durch die weitere Verarbeitung im Gehirn zu Stande kommen. Der jetzt in NATURE veröffentlichte Befund wirft die Frage auf, wie diese Zellen in der Retina anatomisch verschaltet sind. Die Dendritenbäume peripherer Zwerg-Ganglionzellen haben oft sehr unregelmäßige Form; in Modellrechnungen konnten die Autoren zeigen, dass diese Unregelmäßigkeiten einer spezifischen Auswahl von ausschließlich M- oder L-Rezeptoren entsprechen könnten – bisher dachte man, dass die verschiedenen Rezeptoren zufällig auf eine Ganglionzelle konvergieren. Zwei Mechanismen sind denkbar, wie sich solche spezifischen Verbindungen entwickeln könnten: entweder durch so genanntes Hebb'sches Lernen während der frühen Entwicklung des visuellen Systems, zum Beispiel wenn Säuglinge Farbreize sehen, oder durch biochemische Marker, die helfen, spezifische Verbindungen aufzubauen. Die letztere Möglichkeit erscheint zwar plausibler, aber die Gensequenzen der M- und L-Rezeptoren unterscheiden sich nur in wenigen Aminosäuren, so dass es schwer vorstellbar ist, wie ein solcher Marker generiert werden könnte. Dies herauszufinden ist eine Herausforderung für weitere Untersuchungen. ●



@ Weitere Informationen erhalten Sie von:
PROF. DR. BARRY B. LEE
Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie, Göttingen
derzeit erreichbar am:
SUNY, State College of Optometry, New York
Tel.: +1/212/780-5149
Fax: +1/212/780-5137
E-Mail: blee@sunyopt.edu

MEDIZINISCHE FORSCHUNG Das erhellte Gehirn

Wissenschaftlern am Heidelberger Max-Planck-Institut für medizinische Forschung ist es gelungen, die neuronalen Verschaltungen zwischen Gehirnzellen im Hippocampus von Mäusen nicht nur sichtbar zu machen, sondern durch die Gabe von Antibiotika auch zu regulieren (SCIENCE, 29. Juni 2001). Mit diesem experimentellen Ansatz könnte es möglich werden, die Kluft zwischen unseren Kenntnissen über die molekularen Vorgänge in einzelnen Nervenzellen und unserem Verständnis von Lern- und Gedächtnisleistungen des ganzen Gehirns zu überbrücken.

Die moderne Neurobiologie fragt heute nach den molekularen und zellulären Mechanismen, die unserem Gehirn die so genannte Plastizität (griech.: plastokos = zum Formen geeignet) geben und es auf diese Weise anpassungsfähig machen. Diese Mechanismen bestimmen – entwicklungsabhängig – die Verknüpfung der Nervenzellen zu spezialisierten neuronalen Netzen wie dem sensorischen oder dem visuellen System. Sie sind die Grundlage von Lern- und Gedächtnisvorgängen im Gehirn. Darüber hinaus ermöglichen sie, motorische, sensorische oder kognitive Störungen zu korrigieren, wie sie zum Beispiel nach einem Schlaganfall eintreten. Die plastischen Veränderungen finden vorrangig an den Synapsen statt. Das sind die Schnittstellen für die Kommunikation zwischen Nervenzellen. Bis zu 50.000 Synapsen kann eine Nervenzelle ausbilden. Jede Synapse hat eine präsynaptische Komponente, vergleichbar einem Sender, sowie eine postsynaptische (entsprechend einem Empfänger). Die Informationen werden als chemischer Botenstoff weitergegeben. Dabei werden an der präsynaptischen Senderseite Neurotransmitter ausge-

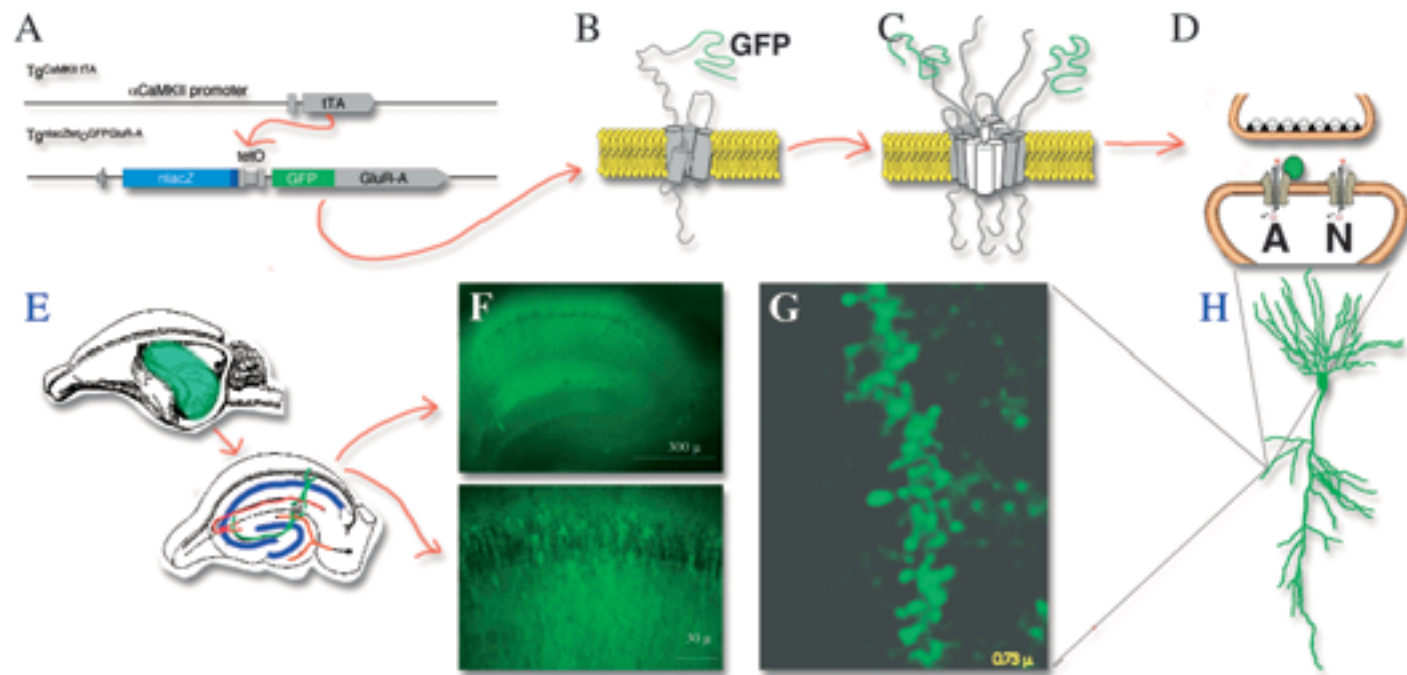


ILLUSTRATION: MPI FÜR MEDIZINISCHE FORSCHUNG / SPRENGEL

schüttet und gelangen per Diffusion zur postsynaptischen Empfänger-Seite. An vielen Synapsen ist diese Signalübertragung nicht statisch, sondern kann – abhängig von ihrem Einsatz – optimiert werden. Die Forscher sprechen von synaptischer Plastizität. Die chemische Neurotransmission kann auf unterschiedliche Weise verstärkt werden: Entweder schützt die sendende Nervenzelle eine größere Menge an Botenstoff-Molekülen aus; oder es wird eine größere Zahl von Empfangsstrukturen, wie zum Beispiel Rezeptorkanäle auf der nachgeschalteten Nervenzelle bereitgestellt. Bei den molekularen Mechanismen, die der Erinnerung und dem Lernen zu Grunde liegen, spielen durch den Neurotransmitter Glutamat gesteuerte Ionenkanäle eine zentrale Rolle. Den Wissenschaftlern um Rolf Sprengel und Volker Mack vom Max-Planck-Institut für medizinische Forschung in Heidelberg ist es gelungen, in Mäusen einen wichtigen glutamat-gesteuerten Ionenkanal gegen seine grün fluoreszierende Variante auszutauschen. Eine wesentliche Feststellung dabei

war, dass auch mit dem eingebauten grün fluoreszierenden Protein (GFP) der Ionenkanal im zentralen Nervensystem der Mäuse einwandfrei arbeitete. Zudem fanden die Heidelberger Wissenschaftler mit der Zugabe des Antibiotikums Doxycyclin zum Trinkwasser der Versuchstiere einen einfachen Weg, um auch die Funktion dieses Ionenkanals zu regulieren. Die Forscher können jetzt den Ionenkanal direkt beobachten – seine Lokalisation, seine Funktion und seine Interaktionen mit anderen Strukturen. Eine der wichtigsten Eigenschaften der neuronalen Verschaltungen im Hippocampus ist die aktivitätsabhängige Optimierung der Reizweitergabe. Genau diese Eigenschaft kann über das Doxycyclin reguliert werden. Mit vergleichenden Untersuchungen von Mäusen, die mit oder ohne das Antibiotikum aufgewachsen sind, wollen die Wissenschaftler in der nächsten Zeit herausfinden, bei welchen Lernvorgängen diese Form der synaptischen Plastizität in den verschiedenen Bereichen des Hippocampus eine Rolle spielt. ●

In Nervenzellen des Vorderhirns einer Maus wird die Bildung des fluoreszierenden Glutamat-Rezeptorproteins (GFP-GluR-A) durch einen Transkriptionsfaktor (tTA) ausgelöst (A). Das Rezeptorprotein lagert sich mit anderen Untereinheiten zusammen (B) und bildet einen Glutamat-rezeptorkanal (AMPA-Typ) in der Membran der Nervenzellen (C). Der durch das grün fluoreszierende Protein markierte Rezeptorkanal (D) befindet sich in den Synapsen neben anderen Glutamat-rezeptoren (NMDA-Typ). Der Hippocampus der Mäuse erscheint nach Bestrahlung mit blauem Licht grün (E). Dank der fluoreszierenden Grünfärbung sind im Schnittpräparat Zellkörper und Zellfortsätze (Dendritenbäume) gut zu erkennen (F). Bei hoher Auflösung (G) sind sogar die Spitzen der Dornfortsätze (Synapsen) und der Schaft eines Dendriten (H) zu sehen.

Weitere Informationen erhalten Sie von:
DR. ROLF SPRENGEL
 Max-Planck-Institut für medizinische Forschung, Heidelberg
 Tel.: 06221/486-101
 Fax: 06221/486-110
 E-Mail: Sprengel@mpimf-heidelberg.mpg.de

STRAFRECHT

Elektronische Fußfessel nimmt erste Hürde

Seit Mai 2000 wird im Rahmen eines Modellprojekts des Hessischen Justizministeriums erstmals in Deutschland die elektronische Fußfessel eingesetzt (MAXPLANCKFORSCHUNG 2/2000, S. 42f.). Das Max-Planck-Institut für ausländisches und internationales Strafrecht in Freiburg begleitet dieses Modellprojekt. Nach Ablauf des ersten Jahres lassen sich nun anhand der bislang erhobenen Daten erste – allerdings noch vorläufige – empirische Informationen zum Experiment mit der elektronischen Überwachung vorstellen. Fazit: Sowohl die überwachten Personen als auch die Projektmitarbeiter zeigen sich überwiegend zufrieden mit den Möglichkeiten, welche die elektronische Überwachung bietet.

festzustellen und zu melden. Das vom Hessischen Justizministerium unter der Leitung von Dr. Wolfram Schädlert entwickelte Modellprojekt sieht vor, die elektronische Überwachung als Bewährungsweisung beziehungsweise als Auflage bei U-Haft-Verschonung einzusetzen. Außerdem kann die Fußfessel im Rahmen von Führungsaufsicht oder bei Begnadigungen angewandt werden. Bis Juli 2001 wurden den Projektmitarbeitern 75 Personen vorgeschlagen, bei denen die Voraussetzungen zur Teilnahme am Modellprojekt geprüft werden sollten; 34 von ihnen wurden für die Maßnahme ausgewählt. Verteilt auf die vorgesehenen Zugangsmöglichkeiten ergibt sich folgendes Bild:

Elektronische Überwachung im Rahmen von	
Strafaußsetzung zur Bewährung	15
Vermeidung von Untersuchungshaft	10
Vermeidung des Widerrufs der Bewährung	7
Gnadenentscheid	2
Summe	34
davon noch an der Fußfessel	14
davon Maßnahme beendet	20

Die elektronische Fußfessel besteht aus einem Sender, den die überwachten Personen am Fußgelenk tragen und der beständige Signale abgibt. Die Signale werden von einem Empfangsgerät registriert, das in der Wohnung der überwach-



ten Person steht und über einen Telefonanschluss mit einem Rechner der Hessischen Zentrale für Datenverarbeitung verbunden ist. So lässt sich feststellen, ob sich die Person in ihrer Wohnung aufhält oder nicht. Verstößt der Überwachte gegen den festgelegten Wochenplan, wird dies unmittelbar per SMS an die Projektmitarbeiter gemeldet. Ebenso ist das Gerät in der Lage, Manipulationen am Sender oder Empfänger

Grund für die Nichtteilnahme war vor allem, dass viele Personen nicht gefunden werden konnten. Andere erfüllten die Teilnahmebedingungen nicht – zum Beispiel wegen akuten Drogenmissbrauchs – oder waren grundsätzlich nicht zur Teilnahme bereit. In einigen Fällen machten die Gerichte keinen Gebrauch von der elektronischen Überwachung, obwohl die Angeklagten die Voraussetzungen erfüllten.

Im Rahmen des Forschungsprojekts führt Markus Mayer, Soziologe und Doktorand am Max-Planck-Institut für ausländisches und internationales Strafrecht, mit den überwachten Personen zu Beginn und nach Abschluss der Maßnahme ein Leitfadeninterview. Auf der Basis der bislang erhobenen Daten lassen sich bereits erste Eindrücke zusammenfassen. Als Einschränkung oder Kontrolle wird vor allem die ständige Erinnerung an die Überwachung empfunden, die durch das Fühlen des Fußbandes entsteht. Die überwachten Personen sehen sich gezwungen, ihren Tagesablauf stärker als bisher zu strukturieren, was der Mehrzahl mit fortschreitender Überwachungsdauer auch gelingt. Die vertraute Art

der Freizeitgestaltung ist nicht mehr möglich, da die Überwachten in aller Regel die Abende und das Wochenende – von einigen Stunden „Aus-

oder eine Ausbildung handeln kann. Hierbei ergaben sich weniger Einschränkungen als im Freizeitbereich, da der Tages- und Wochenplan den Arbeitszeiten der Probanden, besonders bei Schichtarbeit oder Überstunden, flexibel angepasst wird. Allerdings befürchten die Probanden negative Folgen, sollte der Arbeitgeber von der Fußfessel erfahren. Leben die Überwachten in dörflichen oder kleinstädtischen Milieus, sorgen sie sich auch um das Gerede der Nachbarn. Weiter befürchten einige, die Fußfessel könne von Dritten entdeckt werden. Diesen Ängsten steht allerdings die Tatsache gegenüber, dass die Träger der Fußfessel bisher nur äußerst selten von Fremden als solche erkannt wurden. Die Betreuung und Förderung durch die Mitarbeiter des Modellprojekts wird von den Überwachten positiv bewertet. Hervorgehoben wird, dass die Mitarbeiter neben ihren Kontrollaufgaben den Überwachten Unterstützung beim Umgang mit Behörden, bei der Suche nach einem Arbeitsplatz oder

der Schuldenregulierung bieten. In verschiedenen Fällen hat sich dadurch die Zukunftsperspektive für die Betroffenen aus ihrer eigenen Sicht deutlich verbessert. Dies macht klar,

dass eine Kombination von effizienter Kontrolle und Resozialisierungsbemühungen bei einem entsprechenden Konzept grundsätzlich möglich und Erfolg versprechend ist. ●

Weitere Informationen erhalten Sie von:
RITA HAVERKAMP und **MARKUS MAYER**
 Max-Planck-Institut für ausländisches und internationales Strafrecht, Freiburg
 Tel.: 0761/7081-274
 Fax: 0761/7081-294
 E-Mail: M.Mayer@iuscrim.mpg.de

QUANTENOPTIK

Starke Laser leuchten Elektronen heim

Mit neuen Laser-Experimenten haben vier Wissenschaftlergruppen aus Deutschland und Frankreich detailliert die Prozesse beschrieben, die bei der Ablösung eines Elektrons aus dem atomaren Verbund sowie bei verwandten Phänomenen auftreten. Um die Phänomene zu erklären, haben sie ein Modell entwickelt, das auf dem Feynman'schen Pfadintegral, eine von dem amerikanischen Physiker Richard Feynman eingeführte Version der Quantenmechanik, beruht. Die Gruppe am Max-Planck-Institut für Quantenoptik unter Leitung von Prof. Herbert Walther hat dabei die Photoionisation untersucht (SCIENCE, 4. Mai 2001). Sie ist das Basiselement, wenn man die Wechselwirkung zwischen intensivem Laserlicht mit Materie verstehen will.

Die Photoionisation war das Experiment, das am Beginn der Quantenmechanik stand. Indem Licht mit Materie wechselwirkt und Elektronen aus dem Atomverbund herausgelöst werden, erfahren Wissenschaftler viel über den atomaren Aufbau der Materie. Mit Einzug der modernen Lasertechnik wird dieses Verständnis weiter präzisiert. Beispielsweise verwenden die Forscher heute Laser, deren Felder so stark sind, dass sie die Felder im Inneren der Atome übertreffen. Dadurch können molekulare Prozesse beobachtet werden, und es werden Effekte sichtbar, die bei der Photoionisation mit schwächerem Licht verborgen bleiben. Die Phänomene, die bei der Bestrahlung mit intensivem Laserlicht ($0,7 \text{ mal } 10^{14} \text{ W/cm}^2$) auftreten, haben Physiker schon vor zehn Jahren registriert, doch konnten sie sie

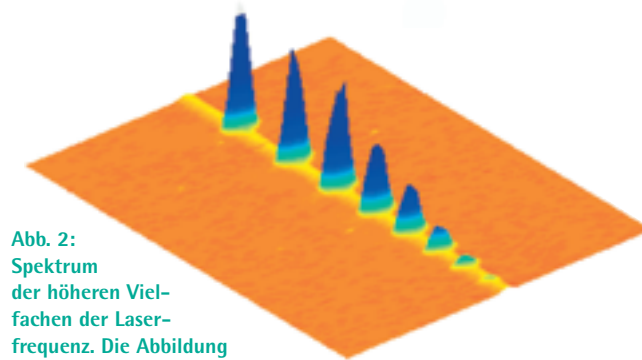
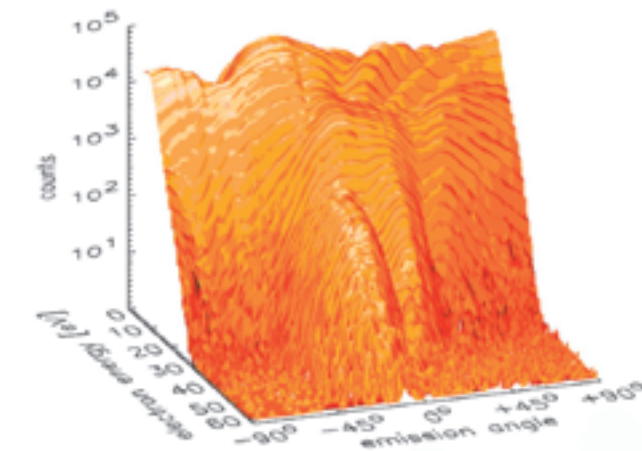


Abb. 2: Spektrum der höheren Vielfachen der Laserfrequenz. Die Abbildung zeigt die ungeraden Harmonischen von der 19. bis zur 33. Ordnung, die in einem Vakuum-UV-Spektrometer analysiert und mit einer pn-CCD Detektoranordnung aufgenommen wurden.

bisher theoretisch nicht erklären. Bekannt war zum Beispiel, dass mit starken Lasern mehrere Elektronen gleichzeitig herausgelöst werden. Außerdem nehmen die Elektronen mehr Energie auf, als sie für den eigentlichen Ablösungsprozess (die Ionisation) benötigen. Im Energiespektrum bildet sich deshalb aus den Maxima, die jeweils einem herausgelösten Elektron entsprechen, ein Plateau. Um dies zu erklären, haben Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik eine neue Theorie entwickelt. Sie

beruht auf dem Feynman'schen Pfadintegral der Quantenmechanik und ist trotzdem eng an die klassische Physik angelehnt. Das klassische Modell beschreibt den Laser als oszillierendes elektrisches Feld, in welchem das Elektron beschleunigt wird. Mit diesem Modell lässt sich zwar das Plateau sehr gut berechnen. Es erklärt jedoch nicht die Interferenzeffekte, die bei der Photoionisation mit intensivem Laserlicht entstehen (Abb. 1). Die Garching Forscher haben deshalb auf die Feynman'sche Version der Quantenmechanik zurückge-

Abb. 1: Winkelaufgelöstes Photoelektronenspektrum bei elliptischer Laserpolarisation. Die höhenlinienartigen Konturen deuten die Absorption einer entsprechenden Anzahl von Photonen oberhalb der Ionisationsenergie an. Die charakteristische Aufspaltung des hochenergetischen Teils des Spektrums ist ein Interferenzeffekt. Dieser Interferenzeffekt kommt dadurch zustande, dass bei der Ionisation jeweils zwei verschiedene Elektronenbahnen möglich sind, die nach dem Muster eines Doppelspaltes experimenten miteinander interferieren.

Abb.: MPI für Quantenoptik

griffen. Sie ist mathematisch identisch zur Heisenberg'schen oder Schrödinger'schen Version, aber anders als in diesen spielen die Bahnen, auf denen sich die Elektronen bewegen können, eine Schlüsselrolle. Sämtliche denkbaren Bahnen, auch die „verrücktesten“, werden mit dem Feynman'schen Pfadintegral aufaddiert, sofern sie nur bestimmte Bedingungen erfüllen. Zuvor wird den Bahnen nach gewissen Regeln eine Phase zugeordnet, damit sie sich gegenseitig verstärken oder auch auslöschen können. Für ein klassisches Teilchen würden sich alle Bahnen bis auf die von der klassischen Physik vorhergesagten auslöschen.

Wie Herbert Walther und seine Kollegen nach dieser Theorie herausgefunden haben, kommen die Interferenzeffekte zustande, weil das durch starkes Laserlicht herausgelöste Elektron mehrere Bahnen zur Verfügung hat, auf denen es sich unter Einwirkung des Laserfelds bewegen kann. In dem Photoionisationsexperiment sind besonders die Bahnen interessant, auf denen die Elektronen während des Ionisationsprozesses zum Ionenrumpf zurückkehren, bevor sie ihn endgültig verlassen. Je nachdem, ob das Elektron mit dem Atom rekombiniert, streut oder durch Stoß weiter ionisiert, ergeben sich weitere Phänomene. Beispielsweise können Obertöne erzeugt werden. Die entstehen, wenn einige Elektronen vom Ionenrumpf wieder eingefangen werden. Dabei kommt es zu Strahlungen, die ein Vielfaches der eingestrahlten Frequenz besitzen. Diese Obertöne werden auch als hohe „Harmonische“ bezeichnet (Abb. 2). Mit dem neuen Modell sind die Garching Wissenschaftler in der Lage, die Erzeugung der Obertöne zu berechnen. Die von Feynman vor 50 Jahren entwickelte Theorie hat damit erstmals eine erfolgreiche Anwendung gefunden. Bisher

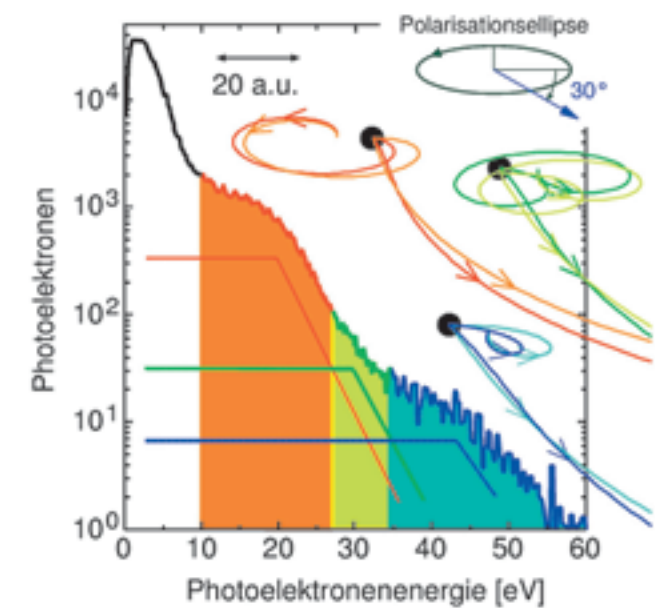


Abb. 3: Das Spektrum der Photoionen zeigt die unterschiedliche Dynamik im Ionisationsprozess. Mit zunehmender Energie der Photoelektronen ändern sich die Bahnen, auf denen die Elektronen den Atomverband verlassen. Zuerst kehren sie auf einfachem Weg zum Ionenrumpf zurück, um ihn dann endgültig zu verlassen (rot). Danach werden die Bahnen immer komplexer (grün und blau). Die doppelten Linien verdeutlichen, dass es jeweils zwei verschiedene Wege gibt, die zum selben Ergebnis führen. Solche Bahnen ergeben in der Quantenphysik Interferenzerscheinungen, wie sie in der Photoionisation (siehe Abb. 1) beobachtet wurden.

haben die mathematischen Schwierigkeiten dies verhindert. Und die Erzeugung von Harmonischen ist zudem ein viel versprechender Ansatz, um kurzwelliges Laserlicht im Vakuum-UV-Bereich und sogar im weichen Röntgenbereich zu erzeugen. Im Labor des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik können die Wissenschaftler erstmals alle Phänomene gleichzeitig mit ein und demselben Lasersystem untersuchen. Durch eine spezielle Polarisation des Laserlichts konnten die Photoelektronen so präpariert werden, dass zu einer bestimmten kinetischen Energie eines Photoelektrons ein bestimmter Typ von Bahnen gehört. Dabei hat sich herausgestellt, dass das Feynman'sche Pfadintegral die natürliche Beschreibung für das Problem ist. Man kann es so vereinfachen, dass man am Ende nur noch eine Handvoll Elektronenbahnen hat, die man skizzieren und sogar anschaulich deuten kann (Abb. 3). Relevant sind die Erkenntnisse für die Plasmaphysik, die Teilchenbeschleunigung, aber auch um Holographien von Zellen zu erzeugen oder chemische Reaktionen kohärent zu steuern. ●



© Weitere Informationen erhalten Sie von:
 PROF. DR. HERBERT WALTHER
 Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching
 Tel.: 089/32905-704
 Fax: 089/32905-710
 E-Mail: herbert.walther@mpq.mpg.de

MARINE MIKROBIOLOGIE

Eine harmonische M^{én}age à trois

Bislang glaubte man, dass Symbiosen mit mehr als zwei Partnern für den Wirt nachteilig wären. Konkurrenzkämpfe um Raum und Nahrung würden zu Lasten des Wirts gehen. Wissenschaftler des Bremer Max-Planck-Instituts für marine Mikrobiologie und ihre Kollegen berichten jetzt über einen Fall von Symbiose (NATURE, 17. Mai 2001), in dem zwei verschiedene Symbionten nicht nur in Frieden in einem Wirt logieren, sondern alle drei Partner auch noch voneinander profitieren.

Diese harmonische M^{én}age à trois wurde in einem in Küstensedimenten vor der Insel Elba lebenden Wurm entdeckt. Der marine Vetter des Regenwurms besitzt weder Mund noch Darm und beherbergt als primären Symbiose-Partner ein Schwefelbakterium, das Energie aus der Oxidation von Schwefelwasserstoff (H₂S) gewinnt. Da H₂S nicht in ausreichender Konzentration innerhalb seines Lebensraums vorkommt, hat sich der Wurm als Zweitpartner eine eigene Quelle „ins Haus



Mikroskopische Aufnahme eines darmlosen oligochaeten Wurms. Diese Würmer sind sehr dünn (0,2 Millimeter Durchmesser), im Verhältnis dazu aber sehr lang (1 bis 2 Zentimeter). Die Tiere sind durch Schwefelkügelchen weiß gefärbt, die in den symbiontischen Bakterien sitzen.

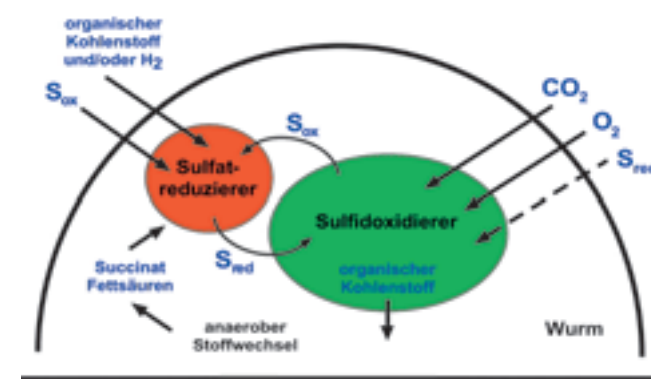
geholt“ – ein sulfatreduzierendes Bakterium, das Schwefelwasserstoff produziert. In ihrem internen Schwefelzyklus tauschen beide Bakterienarten ihre Stoffwechselprodukte untereinander aus und tragen damit gleichzeitig zur Ernährung ihres Wirts bei. Den Bremer Wissenschaftlern gelang es, mit modernen molekulargenetischen und biochemischen Methoden nachzuweisen, wie diese Symbiose im Einzelnen funktioniert. Ohne Symbiosen hätte sich das Leben auf der Erde nicht entwickeln können. Symbiosen zwischen Bakterien und primitiven Einzellern waren entscheidend für die Ausbreitung und Evolution von vielzelligen eukaryontischen Organismen. Noch heute beherbergt jede menschliche Zelle mit den Mitochondrien die Nachfahren früherer bakterieller Symbionten. Ohne Mitochondrien könnte der Mensch nicht atmen. Auch in der jüngeren Evolutionsgeschichte entstanden viele Partnerschaften zwi-

schen Bakterien und Eukaryonten; so gibt es heute kaum eine Pflanzen- oder Tiergruppe, die nicht von bakteriellen Symbionten profitiert. Diese ungeheure Vielfalt von bakteriellen Symbiosen im Pflanzen- und Tierreich entdeckten die Forscher erst vor etwa zehn Jahren mit der Einführung kultivierungsunabhängiger molekularbiologischer Methoden in der Mikrobiologie. Da sich die meisten symbiontischen Bakterien nicht kultivieren lassen, wusste man zuvor wenig über ihre Identität und Funktion. Seit mehreren Jahren arbeitet Dr. Nicole Dubilier am Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie gemeinsam mit Dr. Olav Giere (Universität Hamburg) und Dr. Christer Erséus (Naturhistorisches Museum Schweden) an Symbiosen in so genannten oligochaeten Würmern. Diese marinen Vettern der Regenwürmer ohne Mund und Darm sind für ihre Ernährung auf ihre Symbionten angewiesen. Alle darmlosen Oligochaeten beherbergen in ihrem Inneren sulfidoxidierende Mikroorganismen als primäre Symbionten und wurden bislang nur in schwefelwasserstoffhaltigen Meeresböden gefunden. In den marinen Sedimenten entsteht Sulfid (Schwefelwasserstoff) hauptsächlich durch die Aktivität von sulfatreduzierenden Bakterien. Diese Bakterien wiederum benutzen für ihren Stoffwechsel organische Kohlenstoffverbindungen als Energiequelle und Sulfat als Oxidationsmittel (Elektronenakzeptor), das dabei zu Sulfid reduziert wird. Sulfid ist für die meisten Tiere giftig. Die symbiontischen Schwefelbakterien in den darmlosen Oligochaeten dagegen leben vom Sulfid und oxidieren es zu unschädlichen Produkten. Die dabei gewonnene Energie benutzen die Bak-

terien, um CO₂ in organische Verbindungen zu fixieren. Diese wiederum werden von den Würmern aufgenommen und verdaut. Den beschriebenen Stoffwechselweg nennt man Chemosynthese, vergleichbar der Photosynthese, bei der ebenfalls CO₂ in organische Verbindungen fixiert wird – allerdings mit Licht statt mit Sulfid als Energiequelle. Chemosynthetische Bakterien, die auch in Muscheln und

nachweisen“, sagt Nicole Dubilier, die für das Projekt verantwortliche Wissenschaftlerin. „Diese Würmer leben in der Nähe von Seegrassfeldern in grobem Sand in einer Wassertiefe von acht bis zehn Metern zwischen fünf und fünfzehn Zentimeter tief im Meeresboden. Direkt unter der Haut dieser Würmer haben wir neben den bereits bekannten sulfidoxidierenden Symbionten die neuartigen sulfidprodu-

Schwefelkreislauf, der auf den ersten Blick wie ein Perpetuum mobile wirkt. Tatsächlich aber müssen die sulfatreduzierenden Bakterien zuerst Energie von außen – in Form von organischen Kohlenstoffverbindungen – aufnehmen, damit der Wurm wachsen kann. Durch den zyklischen Austausch von Stoffwechselprodukten zwischen beiden Bakterienarten können diese gemeinsam mehr Energie produzieren als ohne ihren Partner. Diese zusätzliche Energie kommt dem Wirt zugute. Für ihn ist zudem von Vorteil, dass ihm die sulfatreduzierenden Bakterien lästige Stoffwechselprodukte abnehmen, die er sonst ausscheiden müsste. So aber kann der Wurm seine Stoffwechselprodukte durch „symbiontisches Recycling“ intern weiter verwerten und spart dabei sogar Energie. Diese Partnerschaft hat noch einen weiteren Vorteil: Dank der sulfatreduzierenden Bakterien verfügen die Würmer und ihre primären sulfidoxidierenden Mitbewohner stets über eine innere Schwefelwasserstoffquelle. Auf diese Weise sind sie in der Lage, auch Habitate ohne hohe Sulfidvorkommen zu besiedeln und ihren Lebensraum auszuweiten. ●



Schematischer Ablauf der Symbiose: Die beiden Bakterien tauschen ihre Stoffwechselprodukte in einem Schwefelzyklus miteinander aus (Sulfat = S_{ox} und Schwefelwasserstoff = S_{red}). Der Sulfidoxidierer fixiert CO₂ in organische Verbindungen und gibt diese an den Wirt weiter. Stoffwechselprodukte vom Wirt (wie Succinat) können in einer Art „internem Recycling“ vom Sulfatreduzierer wiederverwertet werden. Das scheinbare „Perpetuum mobile“ funktioniert jedoch nur, wenn organische Kohlenstoffverbindungen als Energiequelle aus der Umgebung aufgenommen werden, damit der Wurm wachsen kann. Sollten die sulfatreduzierenden Bakterien autotroph sein, also Kohlenstoff aus CO₂ gewinnen, kann auch Wasserstoff als Energiequelle dienen.

Schnecken vorkommen, wurden erst vor etwa zwanzig Jahren an heißen Quellen in der Tiefsee entdeckt. Eine unabdingbare Voraussetzung für alle chemosynthetischen Symbiosen ist, dass reduzierte Schwefelverbindungen wie Sulfid in der Umgebung vorhanden sind, denn ohne diese Energiequelle können die Bakterien ihre Wirte nicht versorgen und diese würden verhungern. „Wir waren deshalb sehr überrascht, als wir vor der Küste Elbas diesen Wurm mit chemosynthetischen Symbionten entdeckten. Denn in seiner Umgebung konnten wir keinen Schwefelwasserstoff

finden.“ Die sulfatreduzierenden Bakterien als Zweitpartner entdeckt.“ Wie funktioniert diese ungewöhnliche Partnerschaft genau? Die sulfatreduzierenden Bakterien produzieren Schwefelwasserstoff, der von den eng benachbarten sulfidoxidierenden Bakterien aufgenommen wird. Diese verwandeln den Schwefelwasserstoff in oxidierte Schwefelverbindungen wie zum Beispiel Sulfat. Die Verbindungen wiederum werden von den sulfatreduzierenden Symbionten aufgenommen und in reduzierte Schwefelverbindungen wie zum Beispiel Sulfid umgewandelt. So entsteht ein zyklischer oder syntropher

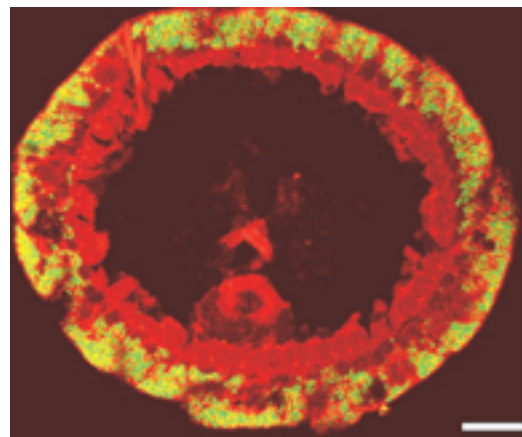


Bild vom Innern eines darmlosen Wurms, aufgenommen im Fluoreszenz-Mikroskop. Die symbiontischen Bakterien sind mit speziellen Gensonden farbig markiert. Die Sulfatreduzierer sind rot, die Schwefelbakterien grün gefärbt. Der Maßstab wird durch den Balken, der 0,02 Millimetern entspricht, angegeben.

FOTOS: MPI FÜR MARINE MIKROBIOLOGIE



@ Weitere Informationen erhalten Sie von:
DR. NICOLE DUBILIER
 Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie, Bremen
 Tel.: 0421/2028-932
 Fax: 0421/2028-580
 E-Mail: ndubilie@mpi-bremen.de

DR. MANFRED SCHLÖSSER
 Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie, Bremen
 Tel.: 0421/2028-704
 Fax: 0421/2028-790
 E-Mail: mschloes@mpi-bremen.de

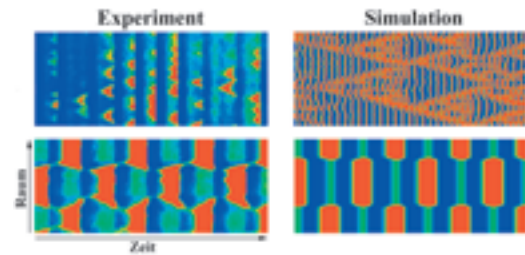
CHAOSFORSCHUNG

Chemiker bändigen den Hurrikan

Spontane Strukturbildung und komplexes Chaos gehören zu den faszinierendsten Phänomenen in der Natur. Zum ersten Mal ist es jetzt Wissenschaftlern des Berliner Fritz-Haber-Instituts der Max-Planck-Gesellschaft unter Leitung von Prof. Gerhard Ertl gelungen, chaotische Strukturen in einer chemischen Reaktion nicht nur zu beobachten, sondern auch zu steuern. Sie haben es geschafft, ein chaotisches System in ein geordnetes umzuwandeln. Die neuen Strukturen hatten die Forscher zuvor durch mathematische Modellierung vorhergesagt (SCIENCE, 18. Mai 2001).

Wenn kleinste Veränderungen am Ausgangszustand riesige Auswirkungen auf das Produkt haben, sprechen Wissenschaftler vom Chaos. Das Klima gehört dazu, die Turbulenzbildung in Flüssigkeitsströmungen oder die Aggregation von Bakterien in biologischen Systemen. Aber auch chemische Reaktionen können chaotisch verlaufen. Die Wissenschaftler des Fritz-Haber-Instituts haben sich für ihre Untersuchungen die katalytisch gesteuerte Umwandlung von Kohlenmonoxid in Kohlendioxid ausgesucht. Die Reaktion findet an einem Platin(110)-Katalysator statt und ist eine Art Modellreaktion. Die aus gasförmigem Sauerstoff gebildeten Atome sind an der Platinoberfläche fest gebunden und erwarten dort ihren Reaktionspartner: das Kohlenmonoxid-Molekül. Dieses ist leicht beweglich und

springt gewissermaßen über die Oberfläche. Wenn es ein Sauerstoffatom findet, können sich die beiden zu Kohlendioxid verbinden, das die Oberfläche sogleich wieder verlässt. Unter bestimmten Bedingungen ist der Produktfluss nicht konstant, und auf der Oberfläche bilden sich selbstorganisierte Muster. Ertl und seine Kollegen haben sich deshalb genauer angesehen, was da passiert. Mit einem speziellen Photoelektronen-Emissionsmikroskop, die ebenfalls am Fritz-Haber-Institut entwickelt wurde, können sie den Prozess sichtbar machen. Dabei fällt auf, dass die räumlichen Bedeckungsmuster von zeitlichen Schwankungen (Oszillationen) im Takt von wenigen Sekunden begleitet werden. Die Sauerstoff- und Kohlenmonoxid-Fronten erscheinen im Videobild unterschiedlich farbig. Man sieht, dass sie spiralförmige Turbulenzen bilden, ähnlich einem Hurrikan. Diesen Hurrikan haben die Wissenschaftler in geordnete Bedeckungsmuster umgewandelt. Theoretiker um Alexander Mikhailov haben anhand mathematischer Modellrechnungen vorhergesagt, dass sich die chaotischen Strukturen mithilfe einer Rückkopplungsschleife unterdrücken lassen. Neue, vorher im Chaos verborgene Muster würden dadurch hervortreten. Die Experimente dazu leitete Harm-Hinrich Rotermund. Er hat aus den Turbulenzen nach und nach schachbrettartige Muster, Streifen oder gleichförmig schwingende

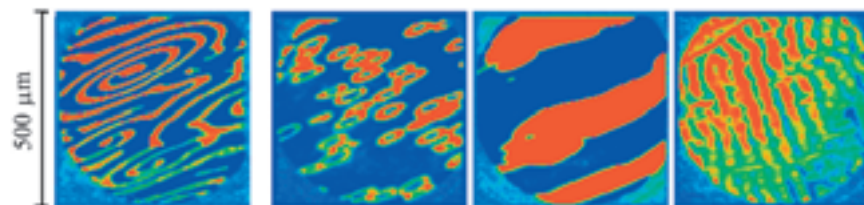


FOTOS: FRITZ-HABER-INSTITUT DER MAX-PLANCK-GESellschaft

Wellen gemacht. Dies gelingt, indem die Information, die von dem Mikroskop kommt, mit dem Reaktionsgefäß rückgekoppelt wird. Ein Computer erhält das aktuelle Bild und berechnet immer wieder neu, ob das Kohlenmonoxid-Ventil weiter geöffnet oder geschlossen werden soll. Das geschieht mit einer gewissen Zeitverzögerung, wobei diese ebenso wie die Intensität des Rückkopplungs-Signals variiert wird. Unter den so veränderten Rahmenbedingungen konnten sich die neuen Muster selbstorganisiert ausbilden. Die Max-Planck-Forscher erbrachten damit den experimentellen Beweis, dass hoch dimensionales Chaos mit einfachen Mitteln beherrscht werden kann. „Die Prinzipien, die wir für dieses einfache System gefunden haben, können auf andere Probleme angewendet werden“, sagt Gerhard Ertl. Die Wissenschaftler sind jetzt dabei, komplexere Rückkopplungssysteme zu entwickeln. Damit wollen sie Systeme synchronisieren, die aus mehr als zwei Beteiligten bestehen. „Möglicherweise kann so bei einer chemischen Reaktion die Ausbeute eines gewünschten Produktes erhöht und die Bildung von Nebenprodukten unterdrückt werden“, nennt Ertl eine weitere Anwendung. ●

Ergebnisse von Experimenten an der CO-Oxidation (links) und deren mathematische Modellierung (rechts). Für jeweils zwei verschiedene Muster sind Raum-Zeit-Diagramme entlang eines Schnittes durch die Oberfläche gezeigt – oben chaotische Ringstrukturen, unten reguläre Domänen.

Verschiedene Muster in der Oxidationsreaktion von Kohlenmonoxid auf einer Platinoberfläche, aufgenommen mit einer speziellen Mikroskopietechnik. Blaue Bereiche sind vorwiegend mit Sauerstoff, rote Bereiche mit Kohlenmonoxid bedeckt. Von links nach rechts: Chaotische Spiralwellen und künstlich durch Rückkopplung erzeugte Ringstrukturen, reguläre Domänen und Streifenmuster.



BIOCHEMIE

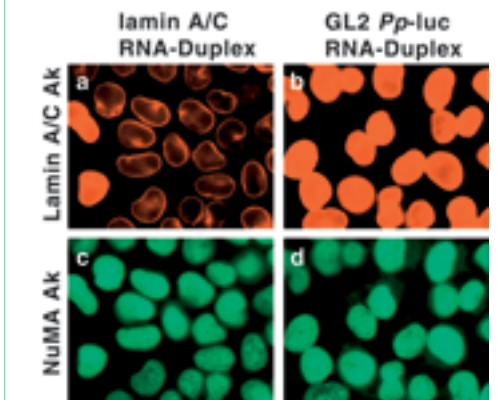
Gene gezielt abschalten

Wissenschaftler aus dem Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen haben eine vergleichsweise einfache und universelle Methode entwickelt, um einzelne Gene abzuschalten. Jetzt wurde die Methode erstmals mit Erfolg in Kulturen menschlicher Zellen getestet. Die Methode der „RNA-Interferenz“ ist konzeptionell einfach und kann prinzipiell auf jede RNA-Sequenz angewandt werden. Sie stellt ein ideales Werkzeug für die funktionelle Genomanalyse dar und könnte langfristig neue Perspektiven in der Therapie eröffnen. (NATURE, 24. Mai 2001)

Seit der Entdeckung der Gene sind Wissenschaftler daran interessiert, einzelne Gene abzuschalten, um deren Funktion zu verstehen oder genetische Fehlentwicklungen und Krankheiten zu verhindern. Oft war jedoch jahrelange Arbeit notwendig, um nur ein einziges Gen gezielt zu blockieren. Mit einem neuen Verfahren scheint das nun in sehr viel kürzerer Zeit und für beliebige Gene möglich zu sein. Thomas Tuschl hat das Verfahren in Boston (USA) am Massachusetts Institute of Technology ausgeklügelt und im vergangenen Jahr zusammen mit Sayda Elbashir in seiner Arbeitsgruppe am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen in die Praxis umgesetzt. In Zusammenarbeit mit Jens Harborth und Klaus Weber gelang es den beiden Wissenschaftlern, gezielt einzelne Gene in Humanzellen abzuschalten. Damit bietet diese Methode einen neuen und sehr effektiven Weg, um die Funktion menschlicher Gene zu untersuchen. Das ist vor allem deshalb so interessant, weil durch die Entzifferung des Humangenoms inzwischen zwar die Sequenz der meisten Gene bekannt, ihre Funktion aber in den meisten Fällen nach wie vor unbekannt ist. Auch verschiedene RNA-

Varianten, die gerade die Komplexität des menschlichen Genoms ausmachen, wird man mit der neuen Methode spezifisch und selektiv ausschalten können. Möglicherweise lassen sich mit dem Verfahren langfristig ebenfalls genspezifische Defekte eliminieren. Letzteres macht es besonders für therapeutische Ansätze interessant. Wie funktioniert das Verfahren der „RNA-Interferenz“? Gene sind eine Aneinanderreihung von Nucleotidbausteinen (DNA). Diese Nucleotidketten werden in so genannte Boten-RNAs (mRNA) umgeschrieben, die der Zelle die Bauvorschrift für die jeweiligen Proteine liefern. Werden siRNA genannte Moleküle in die Zelle eingeschleust, so führt das zur Zerstörung der Ziel-mRNA – sie wird in kleine Bruchstücke zerschnitten und verliert damit ihre Funktion als Bauanleitung für ein spezifisches Protein. Die neue Methode eliminiert nicht das Gen, sondern nur sein funktionelles Produkt – die Boten-RNA wird quasi „abgefangen“. Die passend konstruierten siRNA-Moleküle sind so spezifisch, dass sie jeweils nur die Boten eines einzigen Gens zerstören. „Die RNA-Interferenz ist im Prinzip so etwas ähnliches wie die anti-sense-Methode“, sagt Thomas Tuschl. „Auch dabei verwendet man eine RNA-Sequenz, die komplementär zur Boten-RNA ist. Wir geben die anti-sense-RNA jedoch in Form einer Doppelstrang-RNA hinzu.“ Entscheidend für den Durchbruch war die Entdeckung, dass die eingeschleusten Nucleotidketten genau 21 Nucleotidbausteine umfassen müssen. RNA-Moleküle dieser Länge können offensichtlich bisher noch unbekannte Proteine in der Zelle rekrutieren; diese Proteine bilden dann einen Komplex, der die passenden mRNA-Moleküle erkennt und spaltet. Beobachtungen an der Fruchtfliege Drosophila haben den Forschern hierbei weitergeholfen: Wenn sie sehr lange Doppelstrang-RNA-Sequenzen in die Zellen einführten, wurden diese

von einem Enzym in genau 21 Nucleotide lange Doppelstrang-RNA gespalten. Die einzelnen Stufen des Abschaltprozesses in der Zelle sind noch nicht bekannt. Die Forscher vermuten allerdings, dass es eine „anti-sense-Maschine“ in jeder Zelle gibt, um damit möglicherweise Viren abzuwehren. Ein noch unbekannter Proteinkomplex überprüft offensichtlich alle mRNA-Moleküle der Zelle, die auf ihn treffen. RNA-Stücke, die die gleiche Sequenz haben wie der von außen eingeschleuste RNA-Doppelstrang, werden gespalten. RNA-Stücke mit einer anderen Sequenz bleiben unverändert. Durch die Synthese sequenzspezifischer RNA-Doppelstränge können die Forscher



Um ein Gen in einer Humanzelle abzuschalten, wurde ein spezifischer RNA-Doppelstrang synthetisiert, der gegen eine Komponente der inneren Zellkernmembran gerichtet war (a). Der Effekt wurde durch Immunfluoreszenzmikroskopie nachgewiesen: In den meisten Zellen wurde das entsprechende Protein nicht mehr neu gebildet. In einem Kontrollexperiment, in dem ein RNA-Doppelstrang gegen eine Sequenz verwendet wurde, die in der Humanzelle nicht vorkommt, sieht man keinen Effekt (b). In der unteren Reihe (c + d) wurde der Einfluss der beiden RNA-Doppelstränge jeweils auf ein anderes Gen mit einer anderen Sequenz untersucht. Hier war keine Reduktion zu beobachten. Der Effekt ist also spezifisch.

festlegen, welche Ziel-mRNA zerlegt werden soll. Das Verfahren ist sehr viel empfindlicher als andere, die zum Blockieren eines einzelnen Gens die tausendfache Menge von anti-sense-RNA bereitstellen müssen. Die Forscher sehen darin einen Durchbruch für die funktionelle Genomanalyse. Um die Funktionen der etwa 30.000 Gene des menschlichen Genoms herauszufinden,

Abb.: MPI für BIOPHYSIKALISCHE CHEMIE

④ Weitere Informationen erhalten Sie von: DR. HARM-HINRICH ROTERMUND Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin Tel.: 030/8413-5129 Fax: 030/8413-5106 E-Mail: rotermun@fhi-berlin.mpg.de

müsste man im Idealfall nur 30.000 Doppelstrang-RNA-Stücke synthetisieren, um dann der Reihe nach einzelne Gene abzuschalten und zu prüfen, welche Fehlentwicklungen oder Störungen auftreten. „Das wird in der Realität nicht ganz einfach und schon gar nicht schnell gehen. Aber es gibt dabei kein grundsätzliches Problem“, sagt Thomas Tuschl.

Derartige Untersuchungen werden nicht an Embryonen, sondern an Zellkulturen durchgeführt. Das Modellsystem für menschliche Zellen sind so genannte HeLa-Zellen. Hierbei handelt es sich um transformierte Zellen, die von einem Tumor abstammen. Sie werden weltweit in der genetischen Forschung eingesetzt. Tuschl und seine Mitarbeiter haben gezeigt, dass man mit ihrer Methode auch in HeLa-Zellen verschiedene Gene spezifisch blockieren kann. Wenn es sich dabei um ein für das Überleben der Zelle essenzielles Gen handelt, sollten die Zellen nach der Blockade absterben. Und genau das konnten die Forscher beobachten. Wenn es sich um ein nicht-essenzielles Gen handelt, überlebt und teilt sich die Zelle weiter. Man kann die Auswirkungen der Blockade des Gens dann über viele Zell-Generationen hinweg verfolgen – vorausgesetzt, es liegt genügend RNA-Material zur Interferenz vor.

Daneben gibt es Gene, die das Wachstum der Zelle oder die Zellteilung kontrollieren. Bei einer Blockade dieser Funktionen würden die Zellen zwar weiterleben, aber sich nicht mehr teilen. Auch in Zellkulturen kann man also eine Reihe von funktionellen Aspekten untersuchen. Langfristig möchten die Forscher natürlich die Funktion von Genen in der Entwicklung von ganzen Organismen untersuchen. Dabei gibt es allerdings ein Problem: Die RNA-Stränge dringen nicht von alleine in die Zellen ein, sondern benötigen für ihren Transfer ins Zellinnere eine Art Fähre, also andere Molekülkomplexe wie zum Beispiel Liposomen.

Solche Hürden müssen zunächst beseitigt werden. Wenn das Verfahren aber erst einmal optimiert ist, sollte es möglich sein, auch im lebenden Organismus einzelne Gene gezielt abzuschalten, vielleicht sogar irgendwann einmal Tumorgene im erwachsenen Menschen. Das ist allerdings noch eine Vision. Das nächste, wirklich greifbare Ziel wird der Einsatz des Verfahrens der „RNA-Interferenz“ im Rahmen der funktionellen Genomanalyse sein. ●

④ Weitere Informationen erhalten Sie von:
DR. THOMAS TUSCHL, Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie, Göttingen
 Tel.: 0551/201-1650, Fax: 0551/201-1197
 E-Mail: ttuschl@gwdg.de
DR. SAYDA ELBASHIR, Tel.: 0551/201-1619
 Fax: 0551/201-1197, E-Mail: selbash@gwdg.de
DR. JENS HARBORTH, Tel.: 0551/201-1347
 Fax: 0551/201-1578, E-Mail: jharbor@gwdg.de

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Digitale Keilschrift steht im Internet

Mehr als 3200 Keilschrifttafeln aus dem Vorderasiatischen Museum Berlin sind seit kurzem für Wissenschaftler und Museumsbesucher frei zugänglich. Dazu muss man nicht in die normalerweise verschlossenen Depots des Museums vordringen, sondern lediglich einen Computer besitzen: Die Texte der Tafeln sind im Internet zu bewundern. Die Pionierleistung der digitalen Aufbereitung ist gemeinsamen Anstrengungen des Vorderasiatischen Museums der Stiftung Preußischer Kulturbesitz und dem Berliner Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte (MPIWG) sowie der University of California in Los Angeles (UCLA) zu verdanken. Die Erfassung ist ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zu einer internationalen digitalen Keilschriftbibliothek, an der sich weltweit noch sechs weitere Museen mit bedeutenden Keilschriftsammlungen beteiligen.

Menschliches Denken entwickelt sich in enger Wechselwirkung mit den Formen seiner schriftlichen Darstellung. Von daher sind Überlieferungen in Keilschrift nicht nur aus der Perspektive der Sprachwissenschaft, sondern auch für Disziplinen wie die Wissenschaftsgeschichte von großer Bedeutung. Will man heute die Entstehung menschlichen Wissens bis hin zu den Ursprüngen der Schrift zurückverfolgen und erforschen, braucht man eine sehr breite Basis. „Dazu gehören neue Quellen, neue Techniken des Umgangs mit diesen Quellen und neue Formen der Kooperation über Instituts- und Ländergrenzen



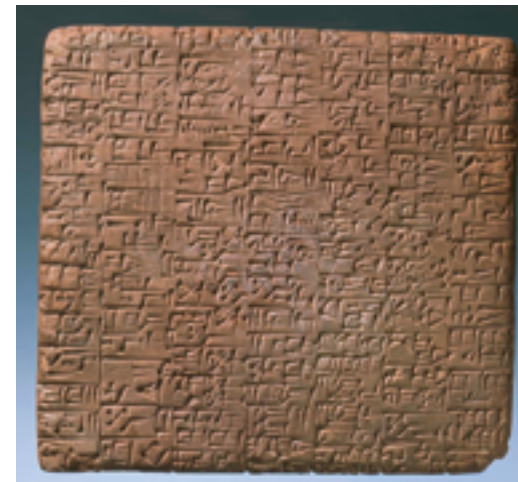
FOTOS: MPI FÜR WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

hinaus“, sagt Prof. Jürgen Renn, Direktor am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte. „Ich bin deshalb für diese Kooperation zwischen unserem Institut und der Stiftung Preußischer Kulturbesitz extrem dankbar, denn es ist nicht selbstverständlich, dass Museen auf diese Weise ihre Türen öffnen.“

Die Digitalisierung der Berliner Keilschriftsammlung – eine der besten ihrer Art auf der Welt – ist Teil eines internationalen Projekts, die 4000 Jahre lang vergessenen Verwaltungsarchive der Stadtstaaten und Großreiche Mesopotamiens, deren Reste nach ihrer Ausgrabung in verschiedensten Museen der Welt gelangten, im Internet als komplette Bibliothek virtuell zusammenzuführen (Cuneiform Digital Library Initiative, kurz CDLI). An dem CDLI-Projekt, das vom Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte und der University of California gegründet wurde, beteiligen sich bislang sieben weltweit bedeutende Museen wie der Pariser Louvre, die Eremitage in St. Petersburg oder die Yale Babylonian Collection in New Haven (USA). Die CDLI wird von der National Science

Dieser Text ist eine Verwaltungsnotiz über verschiedene Posten Ausgaben von drei verschiedenen Biersorten an unterschiedliche Empfänger (Palast, Tempel zum Opferverbrauch) unter Nennung des jeweiligen Materialverbrauchs an Getreide und Biergrundstoffen. Die Entnahme erfolgte aus dem Verantwortungsbestand des Tempelbrauers Amargiri, der ein bekannter Beamter des „Hauses der Frau“ (= Ehefrau des Fürsten), eines agrarischen Großbetriebs des Staates von Lagasch war. Der Text stammt aus dem 6. Jahr der Regierungszeit des Fürsten Lugalanda, um etwa 2370 v. Chr. in Südmesopotamien.

Dieser Keilschrifttext aus der Zeit um 2600 v. Chr. stammt aus dem Bereich der Schreiberschule des Stadtstaates Schuruppak (modern: Fara) in Südmesopotamien und enthält eine umfangreiche Liste sumerischer Homophone (gleichlautender Begriffe). Angefertigt wurde dieser Text sehr wahrscheinlich im Rahmen einer Diktatübung, in der es auf die Erfassung solcher homophoner Lautverbindungen ankam.



Foundation (NSF) sowie von der National Endowment for the Humanities (NEH), beide USA, gefördert.

Auch Robert K. Englund, Professor an der University of California at Los Angeles und Leiter von CDLI, freut sich über den Berliner Durchbruch. Die Berliner Sammlung dokumentiere die Schriftentstehung besser als jede andere auf der Welt. Die Tafeln gäben Aufschluss über den Alltag einer vor Jahrtausenden versunkenen Welt; angefangen bei den Stadtkulturen des 4. Jahrtausends v. Chr. bis zum Großreich der 3. Dynastie um Ende des 3. Jahrtausends v. Chr., das zeitweise ganz Mesopotamien zu einer Verwaltungseinheit zusammenschloss. „Wir gewinnen Einsichten in die Kulturgeschichte, die weit über spezialisierte Fragestellungen hinausgehen. Gerade das motiviert uns, neue Bedingungen für die interdisziplinäre Forschung zu schaffen“, sagt Englund. Für Prof. Klaus-Dieter Lehmann, den Präsidenten der Stiftung Preußischer Kulturbesitz, war die Bereitstellung des Materials für eine derart zukunftsweisende Forschung Ehrensache. So könne man der Verantwortung als „Schatzkammer des Wissens der Menschheit“ noch besser gerecht werden.

Die digitale Aufbereitung der Texte von den Keilschrifttafeln ist sehr aufwändig. In der digi-

talen Keilschriftbibliothek sollen Inhalt und Form aller Tafeln veröffentlicht werden, die von der Entstehung der Schrift etwa 3200 v. Chr. bis zum Ende des dritten Jahrtausends entstanden sind. Für die Erschließung des Inhalts der mehr als 120.000 Texte müssen spezielle Such- und Darstellungstechniken entwickelt werden. Zudem werden weit leistungsfähigere Übersetzungsprogramme als bisher benötigt. Denn obwohl die Entschlüsselung der Keilschrift bereits mehr als 150 Jahre zurückliegt, fehlt es selbst Spezialisten, ganz zu schweigen von Wissenschaftlern anderer Disziplinen, noch immer an geeigneten Hilfsmitteln zur Auswertung der Keilschriftliteratur. Dringend gebraucht werden lexikalische und grammatikalische Glossare, aber auch eine historische Rekonstruktion der Keilschrift.

Angesichts dieser Herausforderungen setzte das CDLI-Projekt von Anfang an auf eine neuartige Zusammenarbeit zwischen Forschungs- und Kulturinstitutionen: Assyriologen, Museumskuratoren, Wissenschaftshistoriker sowie Informatiker arbeiten heute gemeinsam an der Aufbereitung für das Internet. Die Stiftung Preußischer Kulturbesitz und das Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte erwarten deshalb, dass mit der Digitalbibliothek nicht nur neue Hilfsmittel zum Verständnis der Texte entstehen, sondern auch bisher eher getrennt betriebene Forschungen zusammengeführt werden. So wollen die MPI-Wissenschaftler Typologien der Rechnungslegung, der grafischen Darstellung formaler Abläufe der Buchhaltung und umfangreiche Glossare mit technischen Termini sowie zusätzliche Hilfsmittel für die Übersetzung entwickeln. „Wir erwarten von dieser heute noch unüblichen Form der überfachlichen Zusammenarbeit einen entscheidenden Impuls für die Weiterentwicklung



Die Rückseite der Tafel unten links: Sie ist mit Ritzzeichnungen versehen, deren Abbilder jedoch keinen Bezug zum Inhalt der Liste aufweisen. Sie sind möglicherweise Teil einer weiteren, nicht mehr erklärbaren Schreibübung.

der Keilschriftforschung und die Verbreitung ihrer Ergebnisse. Bislang waren diese nur wenigen spezialisierten Experten zugänglich“, sagt Dr. Joachim Marzahn, Kustos der Keilschriftsammlung am Berliner Museum.

Am Ende sollen in der digitalen Keilschriftbibliothek nicht nur alle Keilschrifttafeln in Wort und Bild stehen; vielfältige Werkzeuge sollen es auch Wissenschaftlern anderer Disziplinen erlauben, mit dem Material zu arbeiten. Profitieren werden also nicht nur Assyriologen und Sumerologen, sondern auch Linguisten, Semiotiker, Kognitionshistoriker oder auch Sozialwissenschaftler, die sich mit der Entstehung der ersten Stadtstaaten und ihrer Verwaltung beschäftigen. Der Einzug der Digitalisierung ist nun also auch in den Geisteswissenschaften auf dem Vormarsch. Jürgen Renn sieht diese Entwicklung positiv: „Als Konsequenz neuer Informations- und Kommunikationstechnologien erleben wir heute den Übergang vom internationalen Wissensaustausch hin zur international arbeitsteiligen Erzeugung und Verwendung von Wissen. Zwar drohen einerseits Informationsexplosion und zunehmende Fragmentierung von Wissen, doch andererseits ergeben sich neue Chancen für eine themenorientierte interdisziplinäre Kooperation.“ ●

④ Weitere Informationen erhalten Sie von:
DR. PETER DAMEROW
 Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte, Berlin
 Tel.: 030/22667-106
 Fax: 030/22667-299
 E-Mail: damerow@mpiwg-berlin.mpg.de
 Internet: http://cdli.mpiwg-berlin.mpg.de/ http://www.smb.spk-berlin.de/ http://cdli.ucla.edu/

MATERIALFORSCHUNG

Metalle gut in Form

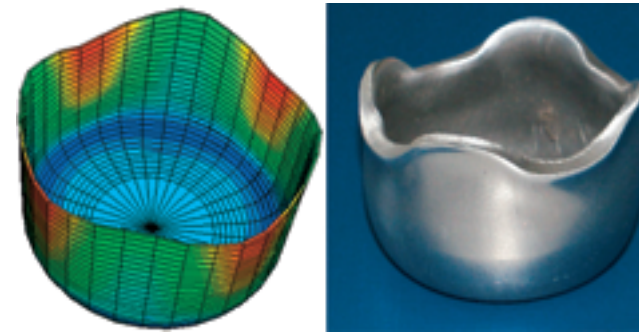
Seit einigen tausend Jahren bearbeitet die Menschheit Metalle. Doch während Chemiker inzwischen ganze Enzymkomplexe am Bildschirm zusammensetzen können, gab es bisher noch kein Verfahren, mit dem sich die Formänderungen, denen die vermeintlich einfach strukturierten metallischen Werkstoffe durch Kräfteinwirkung unterworfen sind, zuverlässig und in vertretbarer Rechenzeit im Computer nachbilden ließen. Ein neues besonders effizientes Rechenverfahren, das Wissenschaftler des Düsseldorfer Max-Planck-Instituts für Eisenforschung entwickelt haben, schafft hier mit einem intelligenten Mix aus Kristallographie, Metallphysik und Variationsmathematik Abhilfe.

Rätselhafte Metalle: „Wer versucht, ein einfaches Aluminiumblech in die Gestalt eines Näpfchens umzuformen, erhält in der Praxis ein Gebilde, das am oberen Rand Zipfel und unterschiedliche Wanddicken aufweist“, sagt Franz Roters, Leiter der Gruppe für Theorie und Simulation am Max-Planck-Institut für Eisenforschung in Düsseldorf. „Im Computer konnte man dieses einfache Phänomen bisher noch nicht simulieren – es sei denn, man betrieb einen unverhältnismäßig hohen Rechenaufwand.“ Mit anderen Worten: Während der Bildschirm den Materialforschern bisher eine perfekte Schale zeigte, holte der Ingenieur ein Objekt aus der Maschine, das eher die Form eines Aschenbechers hatte – fast scheint es, als wäre die Eisenzeit immer noch nicht ganz in den Workstations der Industrie angekommen. „Die Ursache hierfür liegt in der polykristallinen Struktur der Metalle“, sagt Professor

Dierk Raabe, Leiter der Abteilung für Mikrostrukturphysik und Umformtechnik am Düsseldorfer Max-Planck-Institut. Tatsächlich sind die nach außen hin oft glatt wirkenden Metalle in ihrem Inneren keineswegs homogen, sondern zusammengesetzt aus einer Vielzahl kleiner Kristalle, deren Achsen im Werkstoff mehr oder wenig zufällig ausgerichtet sind. Je nach Metall, Legierung und Herstellungsweise sind sie einige wenige Mikrometer bis einige Zentimeter groß; bei verzinktem Stahl kann man diese Kristalle häufig sogar mit bloßem Auge sehen. Grund für die komplexe Struktur sind die Erstarrungs- und Umwandlungsprozesse aus der Metallschmelze. Wenn diese abkühlt, bilden sich in der flüssigen Phase eine Vielzahl von Kristallisationskeimen, die in Konkurrenz zueinander wachsen. Die daraus resultierende Unordnung währt jedoch nicht lange, denn durch weitere Produktionsschritte wie zum Beispiel durch Walzen können die Kristalle in einer bestimmten Weise ausgerichtet werden. Und genau die daraus folgende „Anisotropie“ ist die Ursache der Probleme, die die rechnerische Modellierung vermeintlich einfacher Formgebungsprozesse – Schmieden, Strecken oder Tiefziehen – bislang so schwierig macht. Raabe: „Während der Umformung ändern diese Kristalle ständig ihre kristallographische Orientierung

und mithin auch die Gesamtanisotropie des Werkstücks.“ Denn anders als zum Beispiel ein Stück Gummi kann man Kristalle nicht ohne weiteres in jede beliebige Richtung verformen: Im Kristall sind nur Scherungen in bestimmte Richtungen erlaubt, dabei verschieben sich letztlich benachbarte Atomlagen gegeneinander. Auf bestimmte Formänderungen, etwa durch Ziehen oder Stauchen, muss der Kristall zusätzlich mit Rotationen des Kristallgitters reagieren. Da diese Rotationen für jeden Kristall unterschiedlich ausfallen, kommt es obendrein zu komplizierten Wechselwirkungen der Kristalle untereinander. Diese mikroskopischen Beschränkungen haben einen ganz erheblichen Einfluss auf die makroskopische Formänderung, mit der Metalle auf Kräfteinwirkungen reagieren; Programme, die dies nicht berücksichtigen, kommen daher zu falschen, idealisierten Resultaten. Natürlich hat die Anwendungstechnik auf diese Defizite bereits reagiert; so bringen Crashtests im Computer schon lange brauchbare Ergebnisse – aber nur, weil sie stark auf empirisch gewonnene Zusammenhänge bauen. „Dennoch stößt man hier in vielen Bereichen an Grenzen“, sagt Roters. „Aluminium oder hochfeste Stähle müssen gerade in der Automobiltechnik heute mit immer engeren Toleranzen hinsichtlich ihrer Abmessungen und Eigenschaften produziert werden“,

ergänzt Raabe, „entsprechende Prozesse und Werkzeuge müssen daher vor der eigentlichen Produktionsphase auf dem Computer genauestens ausgelegt werden.“ Bisher setzt man dagegen zum Beispiel bei der Festigkeitsauslegung von Metallbauteilen aus Sicherheitsgründen häufig mehr Material ein als nötig wäre, weil die Simulation eines Tiefziehprozesses die Wanddicken des entstehenden Teils nicht zuverlässig vorhersagt. „Hier wäre es also wünschenswert, die Physik besser zu berücksichtigen“, sagt Roters. Natürlich hat es auch auf dem Gebiet der „reinen Lehre“ nicht an intelligenten Lösungsansätzen gefehlt, die allerdings in der Praxis eine wesentliche Beschränkung mitbrachten: Rechenmodelle, die die Mikrostrukturphysik der Metalle im Detail berücksichtigen, bringen zwar sehr gute Ergebnisse – aber erst nach wochenlangen Rechenläufen. Das Rechenverfahren, das die Düsseldorfer Wissenschaftler um Dierk Raabe nach zwei Jahren Forschung nun vorgestellt haben, überbrückt den Spagat zwischen Genauigkeit und Praxisnähe jedoch auf sehr elegante Weise: Anstatt in jedem einzelnen Simulationsschritt das individuelle Verhalten abertausender einzelner Kristalle zu berechnen, setzt es kurzerhand auf statistische Aussagen über das Verhalten größerer Kristallansammlungen unter Kräfteinwirkung. Dazu messen die Mitarbeiter von Raabe und Roters mithilfe von



„Zipfel“ anstelle eines ebenmäßigen Randes: Erst, wenn man die mikrokristalline Struktur der Metalle angemessen in die Berechnung eines Umformvorgangs einbezieht, nimmt die Simulation die korrekte Form des Metallblechs vorweg.

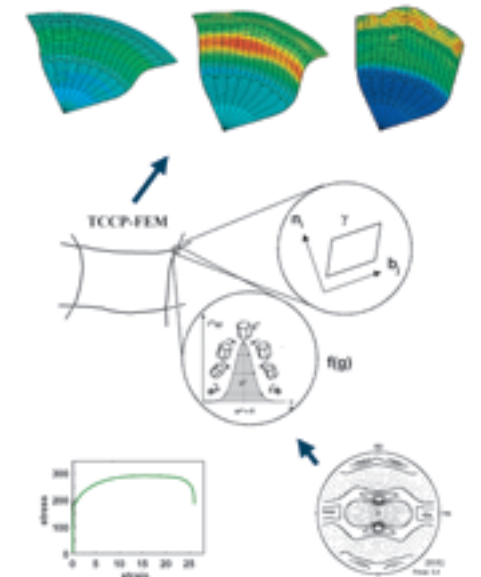
Röntgenbeugungsmethoden zunächst die Orientierungsverteilung der Kristalle (Textur genannt) etwa in einem Aluminium- oder Stahlblech. Kristalle, die zum Beispiel beim Walzen des Werkstoffs in irgendeiner Weise ausgerichtet wurden, werden statistisch in Gruppen zusammengefasst. Diese

Gruppen beschreiben also die Anisotropie des Werkstücks und werden Texturkomponenten genannt. Dann berechnen Raabe und Roters mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM), wie der Umformvorgang die Texturkomponenten an jedem Punkt eines als Gitter angenäherten Blechmodells beeinflusst: Letztlich beschreibt das Verfahren also Schritt für Schritt, wie die orientierten Kristalle an jedem Gitterpunkt unter Einwirkung einer gerichteten Kraft im Mittel gedreht werden.

Der Erfolg ist verblüffend: Die „gefürchteten“ Aluminiumzipfel vorherzusagen ist für das Modell eine leichte Übung. „Für dieses neue Verfahren mussten wir drei zwar schon bekannte, aber bislang getrennt voneinander erarbeitete Konzepte aus der Kristallographie (Texturkomponenten), der Metallphysik (Kristallplastizität) und der Variationsmathematik (FEM) zusammenführen“, sagt Raabe. Der Clou: Weil nun nicht mehr die Wechselwirkung einzelner Kristalle im Detail berechnet wird, sondern lediglich die Änderung der sehr viel einfacher zu beschreibenden, abstrakten Größe „Texturkomponente“, spart das auf den Namen „Texturkomponenten-Kristallplastizitäts-Finite-Elemente-Methode“ getaufte Modell viel Rechenzeit. Im Vergleich zu den aufwändigen „Kristall-für-Kristall-Berechnungen“ ist die Düsseldorfer Methode etwa um den Faktor 100 bis 1000 schneller; die genaue Simulation eines komplexen Umform-

vorgangs ist mitunter schon in wenigen Stunden abgeschlossen. Damit dürfte das Verfahren geeignet sein, die dringenden Auslegungsfragen der Industrie in angemessener Zeit und auf physikalischer Basis zu beantworten. Mehr noch: „Im Prinzip können wir nun obendrein auch besser prognostizieren, wo die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Metallteils unter starker Belastung am höchsten ist“, ergänzt Roters, „denn die erzwungene Orientierungsänderung der Kristallite bei der Umformung führt natürlich zu Spannungen im Material, die sich in der Mikroelektronik und im Automobilbau ebenso wie in meterlangen Bauteilen der Kraftwerkstechnik negativ bemerkbar machen können – auch diese Spannungen können wir nun am Bildschirm darstellen.“ ●

Das Prinzip der neuen „Texturkomponenten-Kristallplastizitäts-Finite-Elemente-Methode“: An jedem Gitterpunkt geben „Texturkomponenten“ stellvertretend für abertausende Einzelkristalle Auskunft über die Anisotropie des metallischen Werkstoffs; zur Simulation des Verformungsvorgangs muss dann nur noch Schritt für Schritt berech-



net werden, wie die einwirkende Kraft diese Komponenten verändert. Im Vergleich zur mühsamen Berechnung „Kristall für Kristall“ spart das viel Rechenzeit – das macht das „physiknahe“ Verfahren auch für die Industrie interessant.



Abb.: MPI für Eisenforschung

CHEMISCHE ÖKOLOGIE

Wie Insekten auf Nektar fliegen



Links Insektenfalle, rechts eine nicht näher bestimmte Fliege auf einem Blatt von *Macaranga tanarius*. Das Insekt zählt zu den effektivsten Verteidigern dieser Pflanze.

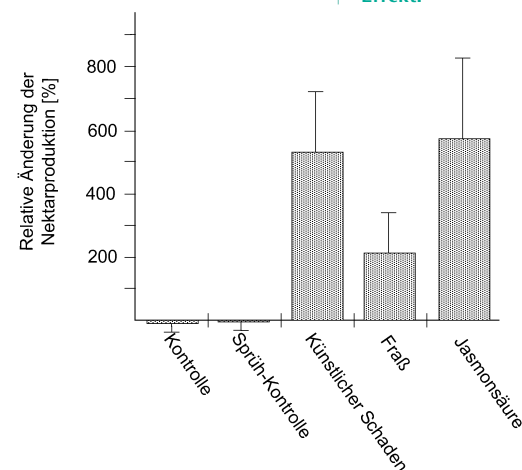
Viele Pflanzen produzieren auf ihren Blättern so genannten extrafloralen Nektar oder Blattnektar. Im Gegensatz zum Blütennektar dient Blattnektar jedoch nicht der Bestäubung; er bildet vielmehr eine Nahrungsquelle für Ameisen, Wespen und andere räuberische Insekten. In einer symbiotischen Wechselbeziehung verteidigen diese Nektarkonsumenten ihre Wirtspflanzen gegen Fraßschädlinge. Bei Untersuchungen an malaysischen „Ameisenpflanzen“ haben Wissenschaftler vom Lehrstuhl für Tropenökologie der Universität Würzburg und vom Max-Planck-Institut für chemische Ökologie in Jena jetzt einen chemischen Signalweg entdeckt, über den die Produktion des Blattnektars gezielt geregelt wird (PNAS, 30. Januar 2001).

Gesteuert durch das Pflanzenhormon Jasmonsäure steigt die Nektarproduktion nach Fraßschädigung stark an. Bereits nach wenigen Stunden finden sich immer mehr Nektarfresser auf den geschädigten Blättern und schützen die Pflanzen vor weiteren Fraßschäden. Blattnektar erlaubt es den Pflanzen also, bei Schädlingsbefall Schutzinsekten „um

Hilfe zu rufen“ und stellt damit eine indirekte Art der Verteidigung dar. Biologische Schädlingsbekämpfung ist keine Erfindung des Menschen. Gerade in den Tropen haben zahlreiche Pflanzen Allianzen mit den unterschiedlichsten Insekten entwickelt, die sie vor Fraßfeinden schützen. Dr. Brigitte Fiala und Prof. K. Eduard Linsenmair vom Lehrstuhl für Tierökologie und Tropenbiologie der Universität Würzburg untersuchen derartige Symbiosen (Lebensgemeinschaften mit gegenseitigem Nutzen) schon seit Jahren am Beispiel der in Südostasien (vor allem in West-Malaysia und auf Borneo) wachsenden Baumgattung *Macaranga*. Viele Arten dieser Gattung sind „Pionierbäume“ – sie besiedeln Straßenränder und Kahlschlag- oder Brandflächen, also Flächen, auf denen der Regenwald zerstört wurde. *Macaranga*-Bäume sind hoch spezialisierte, so genannte Ameisenpflanzen; in ihren Stämmen und Ästen bilden sie besondere Hohlräume aus, die von Ameisenkolonien besiedelt werden. Außerdem produzieren sie kleine eiweiß- und fettreiche Futterkörperchen, die wichtigste Nahrungsquelle der Ameisen. Die Ameisen wiederum revanchieren sich für diese

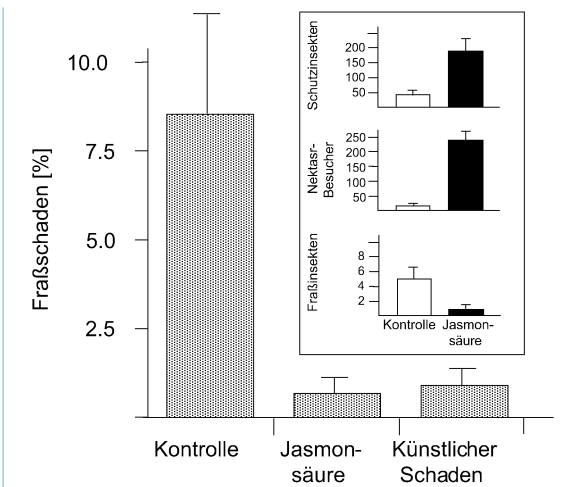
Gastfreundschaft und schützen „ihren“ Wirtsbaum vor Fraßinsekten, aufwachsenden Kletterpflanzen und bestimmten Krankheitserregern, wie zum Beispiel Pilzen. Andere *Macaranga*-Arten haben weniger spezifische Symbioseformen mit Insekten: Auch sie produzieren Futterkörperchen und/oder Blattnektar und locken damit Ameisen, Wespen und zum Teil auch andere Nektarkonsumenten aus der Umgebung an. In der Regel handelt es sich dabei um räuberische Insekten. Einmal auf der Pflanze angekommen, nutzen sie diese als ihr Jagdgebiet und reduzieren so die Zahl der Fraßinsekten wie Raupen, Käfer oder Heuschrecken. Darüber hinaus besetzen viele der Nektarfresser ihre Nahrungsquelle auf Dauer und verteidigen sie aktiv gegen die meisten anderen Insekten. Auch hierdurch wird die Pflanze besser geschützt. Bereits seit einigen Jahren vermuten die Wissenschaftler, dass Pflanzen beim Auftreten von Fraßschäden verstärkt Blattnektar produzieren können. In Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern des Jenaer Max-Planck-Instituts für chemische Ökologie sind die Würzburger Tropenökologen dieser Frage nachgegangen – und wurden in der Tat fündig.

Jasmonsäure und mechanischer Schaden stimulieren die Nektarproduktion von *Macaranga tanarius*: Die Nektarproduktion wurde vor und 24 Stunden nach den verschiedenen Behandlungen gemessen und ist hier als relative Änderung ausgedrückt. Sowohl die mechanische Schädigung der Blätter (Löcher) als auch die natürliche Schädigung durch Fraß hatte eine deutliche Erhöhung der Produktion zur Folge, entsprechende Effekte konnten auch durch Aufspritzen einer Lösung des Pflanzenhormons Jasmonsäure erzielt werden. Unbehandelte Kontrollen und Sprühkontrollen (Applikation des verwendeten Lösungsmittels ohne Jasmonsäure) hatten dagegen keinen Effekt.



Andrea Hilpert und Martin Heil zeigten bei Freilandstudien in West-Malaysia, dass die besonders an Straßenrändern sehr häufig vorkommende *Macaranga tanarius* ihre Blattnektar-Produktion sowohl nach Fraßschäden als auch nach rein mechanischer Beschädigung ihrer Blätter auf das Vier- bis Sechsfache des normalen Wertes anhebt. Ein ähnlicher Effekt lässt sich auch durch das Pflanzenhormon Jasmonsäure erzielen. Jasmonsäure spielt als Signalstoff – das wissen die Wissenschaftler schon seit längerem – in vielen Pflanzen eine zentrale Rolle. Um zu prüfen, ob dieses Pflanzenhormon auch an der Steuerung der Blattnektar-Produktion von *Macaranga tanarius* beteiligt ist, wurden entsprechende Untersuchungen in der Arbeitsgruppe von Prof. Wilhelm Boland am Max-Planck-Institut in Jena durchgeführt. Mit einer von Thomas Koch entwickelten Analyse-methode fanden die Forscher heraus, dass die *Macaranga*-Pflanzen als Reaktion auf Schädigung tatsächlich verstärkt Jasmonsäure produzierten. Dabei ergab sich ein sehr enger Zusammenhang zwischen der Intensität des Schadens und der Menge der von den Pflanzen gebildeten Jasmonsäure: Je stärker die Schädigung, desto mehr Jasmonsäure konnten die Wissenschaftler nach etwa dreißig Minuten in den beschädigten Blättern nachweisen. Diese größeren Mengen an Jasmonsäure führten wiederum zu einer Erhöhung des Nektarflusses. „Die Pflanzen sind also in der Lage, ihre Reaktion in abgestufter Form an die jeweiligen Erfordernisse anzupassen. Wenn wir die Biosynthese der Jasmonsäure durch den Einsatz entsprechender Stoffe hemmen, wurde nach Blattschädigung deutlich weniger Nektar produziert als in Kontrollpflanzen mit voll funktionfähigem Jasmonsäure-Stoffwechsel. Das Pflanzenhormon Jasmonsäure

entpuppt sich also als Schlüsselement für die Regulation der Blattnektar-Produktion“, erläutert Martin Heil. Die Forscher waren über diesen Signalweg hinaus auch an der Bedeutung der Blattnektar-Produktion für das Ökosystem insgesamt interessiert. Deshalb behandelten sie mehrere *Macaranga-tanarius*-Pflanzen mit Jasmonsäure und beobachteten sie während der nächsten 24 Stunden im Zweistunden-Rhythmus. Sie registrierten alle auf den Pflanzen auftretenden Insekten und teilten sie nach ihrem Verhalten in Gruppen ein. Das Ergebnis war beeindruckend: Bereits drei Stunden nach der Jasmonsäure-Behandlung hatte die Anzahl der Insekten auf den Blättern deutlich zugenommen. Viele dieser Insekten (vor allem Ameisen und Fliegen) verteidigten „ihre“ Nektarien gegen Schädlinge. Insgesamt führte die Anregung der Nektarproduktion zu einer dramatischen Erhöhung sowohl der Nektarkonsumenten als auch der verteidigenden Insekten, während umgekehrt die Anzahl der Fraßschädlinge deutlich abnahm. Um die langfristige Wirkung dieses Effektes auf die Pflanzen zu prüfen, haben die Würzburger Biologen einen weiteren Freilandversuch durchgeführt. Über sechs Wochen hinweg wurden alle vier Tage insgesamt dreißig Pflanzen mit Jasmonsäure behandelt oder gezielt mit Nadelstichen traktiert, um die Blattnektar-Produktion permanent auf hohem Niveau zu halten. Auch das Ergebnis dieser Untersuchung war bemerkenswert: Die Schädigung unbehandelter Vergleichspflanzen durch Fraßinsekten war mehr als zehnfach größer als die der behandelten Pflanzen. „Wenn sie von Fraßinsekten angegriffen wird, ist *Macaranga tanarius* also in der Lage, durch eine Erhöhung der Blattnektar-Produktion sehr schnell und sehr effektiv bestimmte räuberische Insekten um Hilfe



zu rufen, die dann als biologische Schädlingsbekämpfer fungieren und die Pflanzen vor weiteren Schäden bewahren“, stellt Prof. Wilhelm Boland fest. Blattnektar wird nicht nur von Pflanzenexoten wie *Macaranga tanarius* produziert. Diese Strategie, um quasi Hilfstruppen anzuheuern, findet sich in den Tropen stellenweise bei bis zu vierzig Prozent aller Pflanzenarten. Auch Nutzpflanzen wie Baumwolle, Feigenkaktus, Balsabaum, Cashewnuss oder auch unsere einheimische Kirsche produzieren Blattnektar und schützen sich so – zumindest teilweise – gegen Fraßschäden. Vielleicht eröffnen diese Erkenntnisse neue Möglichkeiten für den biologischen Pflanzenschutz: Die Forscher wollen deshalb prüfen, ob man sich die gezielte Stimulation der Blattnektar-Produktion oder gar die Zucht von blattnektarüberproduzierenden Pflanzenformen als natürliche Form der Schädlingsbekämpfung im Pflanzenanbau zu Nutzen machen kann. ●



④ Weitere Informationen erhalten Sie von:
PROF. DR. WILHELM BOLAND
 Max-Planck-Institut für chemische Ökologie, Jena
 Tel.: 03641/6436-64
 Fax: 03641/6436-70
 E-Mail: Boland@ice.mpg.de

Mechanische Beschädigung und Jasmonsäure-Behandlung von *Macaranga tanarius* reduzieren den Fraßschaden durch Herbivore: Die durch Fraß auftretenden Blattschäden wurden vergleichend von unbehandelten Kontrollpflanzen und solchen Pflanzen bestimmt, bei denen die Nektarproduktion über sechs Wochen hinweg jeden vierten Tag durch mechanische Schädigung (Löcher) oder Jasmonsäure induziert worden war. Die eingefügte Grafik zeigt Zahlen der auf induzierten und Kontrollpflanzen auftretenden Insekten verschiedener funktioneller Gruppen – auf den induzierten Pflanzen waren deutlich mehr verteidigende Insekten und Nektarbesucher, dafür aber weniger Fraßschädlinge zu beobachten.