

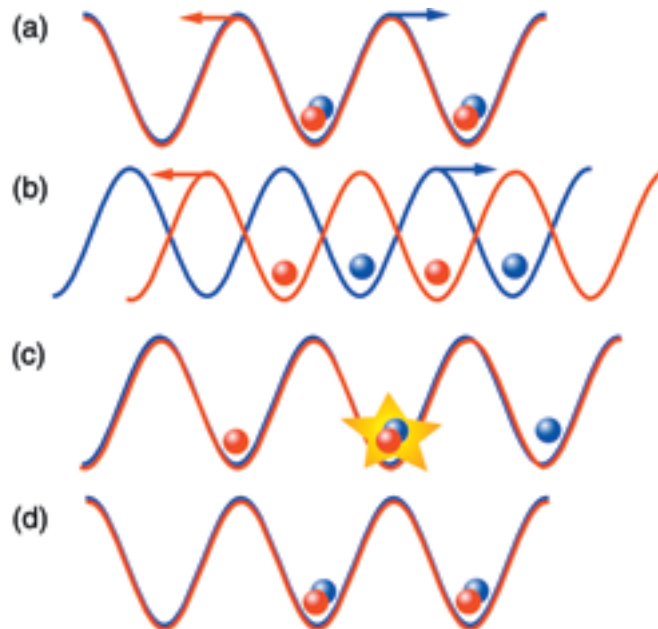


## QUANTENPHYSIK

### Vom Abakus zum „Quabakus“

Bose-Einstein-Kondensate bestehen aus vielen Hunderttausend ultrakalten Atomen im quantenmechanischen Gleichtakt. Physikern ist es jetzt gelungen, eine solche ultrakalte Atomwolke in einen Kristall aus reinem Laserlicht zu zwingen – und dadurch ein räumliches Quantengatter zu erzeugen, das im Prinzip einen massiv parallelen Quantencomputer mit über 100 000 Schaltelementen verkörpert. Zwar lassen sich die Atome innerhalb des Gatters noch nicht einzeln ansprechen, doch in ihrer Gesamtheit bereits trickreich manipulieren: Mit der Steuerung eines solchen quantenmechanischen Vielteilchensystems ist man zu einer Art „Quabakus“ gelangt (NATURE, 30. Oktober 2003).

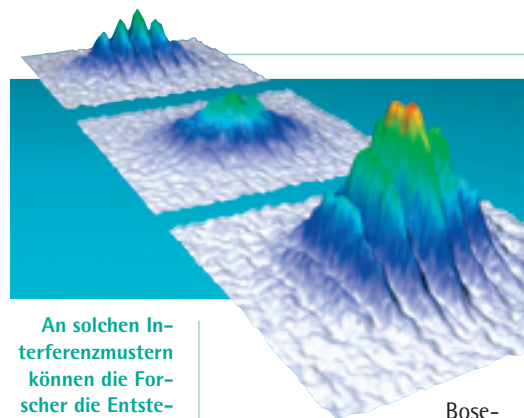
Eine dünne Gaswolke aus einigen Hunderttausend bis Milliarden Atomen, deren Temperatur weniger als ein millionstel Grad über dem absoluten Nullpunkt liegt: Derart exotisch präsentiert sich ein Bose-Einstein-Kondensat. In dieser Ultrakälte können die Atome der Gaswolke kollektive Eigenschaften ausbilden. Denn ein Atom, anschaulich ein festes Teilchen, verhält sich quantenphysikalisch als eine Welle oder



als ein Wellenpaket. In einer „normalen“ Gaswolke überlagern sich die Wellenpakete der einzelnen Atome völlig ungeordnet – wie die Töne eines Ensembles, dessen Musiker ihre Instrumente wild durcheinander stimmen. Wird diese Gaswolke auf extrem niedrige Temperaturen abgekühlt, dann können die Atome in eine gemeinsame Materiewelle „kondensieren“ – und verhalten sich dann wie ein Musikensemble, das hoch geordnet im präzisen Gleichtakt spielt. Dafür müssen die Atome allerdings zur quantenmechanischen Familie der Bosonen

gehören, benannt nach dem indischen Physiker Satyendra Nath Bose (1894 bis 1974). Er hatte gemeinsam mit Albert Einstein (1879 bis 1955) schon in den zwanziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts vorausgesagt, dass Bosonen bei tiefen Temperaturen kollektiv in einen Zustand niedrigster Energie kondensieren können. 1995 gelang in zwei amerikanischen Labors erstmals die Erzeugung eines solchen Bose-Einstein-Kondensats, wofür die drei führenden Köpfe 2001 den Nobelpreis für Physik erhielten (MAXPLANCKFORSCHUNG 4/2001, S. 62 ff.). ▶

Eine Rechenoperation im Quantengatter: Ein Radiopuls hat zuerst die Atome im gemischten blau-roten Zustand präpariert (a). Das Laserlicht verschiebt die Atome nun zugleich nach rechts und links (b), wo sie mit Atomen auf den Nachbarplätzen im Gatter zusammenstoßen (c). Dabei verschränken sich ihre Quantenzustände. Am Schluss rückt das Laserlicht die Atome wieder zurück auf ihre alten Plätze, wobei sie den verschränkten Zustand mitnehmen (d).



An solchen Interferenzmustern können die Forscher die Entstehung ihres Quantengatters verfolgen. Das hintere Bild zeigt die Atomwolke im ursprünglichen Mott-Isolator-Zustand. Nach der Rechenoperation entsteht ein neuer, hochgradig verschränkter Quantenzustand, der durch einen flachen Hügel ohne ausgeprägte Interferenzstruktur erkennbar ist (Mitte). Diese Operation lässt sich wieder vollständig rückgängig machen (vorne).

Bose-Einstein-Kondensate faszinieren die Physiker, weil mit ihnen erstmals eine Materiewelle aus vielen Quantenteilchen im Laborversuch offen zugänglich ist. Sie lässt sich direkt manipulieren und eröffnet so einen völlig neuen experimentellen Zugang zur Welt der Quantenmechanik. Dem Forscherteam um Immanuel Bloch an der Universität Mainz und Theodor W. Hänsch am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching und an der Universität München sind dazu in den letzten Jahren eine Reihe bahnbrechender Experimente gelungen. Das Neueste ist ein Gatter aus etwa 100 000 ultrakalten Atomen, die sich mit Laserlicht wie die Kugeln eines Quanten-Abakus verschieben lassen – ein wichtiger Schritt auf dem Weg zum Quantencomputer. Um das Quantengatter herzustellen, präparieren die Münchener Physiker ein dreidimensionales Kristallgitter aus reinem Laserlicht. An seinen Kreuzungspunkten sitzen kleine Energiefallen, deren Wände sich einfach hoch und wieder hinunter fahren lassen. Dieses Gitter wird wie ein Netz über ein Bose-Einstein-Kondensat aus etwa 100 000 Atomen geworfen. So fängt sich jedes Atom in einer der Fallen – wie Eier, die sauber in einen großen Eierkarton einsortiert werden. Physiker nennen das Mott-Isolator-Zustand: In ihm verschwindet die kollektive Materiewelle des Bose-Einstein-Kondensats. Sie taucht jedoch sofort wieder auf, sobald die Physiker die Wände der Lichtfallen herun-

terfahren und die Atome frei lassen. Dieses verblüffende „Gedächtnis“ der Quantenmechanik erlaubt es, die Atomwolke zwischen dem Mott-Isolator-Zustand und dem Bose-Einstein-Kondensat hin und her zu schalten. Das wollen

die Physiker nutzen, um ein Rechenregister für hochparallele Computeroperationen herzustellen. Dabei übernimmt jedes der gut 100 000 Atome die Rolle eines Quanten-Bits (Qubit). Für einen Rechenschritt verschieben nun die Forscher einzelne Atome von ihren Gitterplätzen im Lichtkristall – wie die Kugeln eines Abakus. Dazu benutzen sie natürlich keine Finger, sondern Radiofrequenz- und Laserlicht-Pulse. Die atomaren Qubits können die Information 0 oder 1 (Nein oder Ja) in Form zweier innerer, quantenmechanischer Zustände speichern: Diese sollen einfach rot und blau heißen. Verschiebt der Laserfinger nun zum Beispiel die roten Atome im Gitter nach links, dann wandern die blauen um den gleichen Abstand in die entgegengesetzte Richtung, also nach rechts. Doch die Speicherfähigkeit der atomaren Qubits beschränkt sich nicht allein auf die Informationen 0 oder 1: Sie können auch einen blauen Mischzustand speichern, also eine Art „Quanten-Jein“. Im Gegensatz zum unentschiedenen und daher unbeliebten Jein unseres Alltags birgt dieser Mischzustand allerdings eine präzise Quanteninformation und erlaubt daher ganz neue Rechenoperationen.

Ein mit einem Radiopuls blaurot präpariertes Atom reagiert mit einer erstaunlichen Quanteneigenschaft auf den Laserfinger: Es rückt gleichzeitig nach links und nach rechts. So kommt es zugleich dem rechten und dem linken Nachbaratom im Gitter näher. Der Zusammenstoß zwischen den drei Atomen zerstört jedoch nicht

deren empfindliche Quantenzustände, wie dies bei höheren Temperaturen zu erwarten wäre. Vielmehr „verschränken“ sie sich zu einem neuen, gemeinsamen Quantenzustand: Dieses Verhalten erinnert an drei nebeneinander stehende Sänger eines Chors, die sich durch Anstoß des mittleren Sängers auf einen gemeinsamen, neuen Ton einschwingen. Dieser Ton dringt auch zu den Chorsängern auf den entfernteren Plätzen und beeinflusst diese ebenfalls. Ganz ähnlich wirkt der neue verschränkte Zustand auf die entfernteren der mehr als 100 000 Qubits. Mit solchen Operationen können die Münchener Forscher ein hochparalleles Quantengatter produzieren, dessen Qubits sich in einem komplexen, verschränkten Quantenzustand befinden. Dabei bietet das Bose-Einstein-Kondensat gegenüber anderen Versuchen, Rechenregister für Quantencomputer herzustellen, einen großen Vorteil: Es kann sehr viele Atome bereitstellen, und darüber hinaus ist die Zahl dieser Qubits breit variierbar. Somit könnten die Entwickler eines Quantencomputers dessen Größe und Rechenleistung leicht an ihre Erfordernisse anpassen.

Quantencomputer sind für Physiker besonders interessant, weil sie das Verhalten jedes Quantensystems im Prinzip perfekt berechnen können. Sie bergen außerdem das Potenzial, eines Tages komplexe mathematische Probleme aus Technik und Gesellschaft mit ansonsten unerreichbarer Rechengeschwindigkeit zu lösen. ●



**@ Weitere Informationen erhalten Sie von:**  
**PROF. DR. THEODOR W. HÄNSCH**  
 Max-Planck-Institut für Quantenoptik und Ludwig-Maximilians-Universität, Garching und München  
 Tel.: 089/2180-3212  
 Fax: 089/285192  
 E-Mail: t.w.haensch@physik.uni-muenchen.de

VERHALTENSPHYSIOLOGIE

Savoir-vivre – im Genom verankert

Seit langem ist bekannt, dass der Stoffwechsel warmblütiger Tiere von der geographischen Lage ihres Verbreitungsgebiets abhängt: Der während Ruhephasen gemessene Sauerstoffverbrauch eines Tiers liegt umso höher, je weiter vom Äquator entfernt die untersuchte Tierpopulation lebt. Forscher der Princeton University (USA) und der Max-Planck-Forschungsstelle für Ornithologie in Seewiesen haben jetzt an Schwarzkehlchen nachgewiesen, dass der Ruhestoffwechsel genetisch bestimmt ist – und zwar als Resultat der in verschiedenen Lebensräumen unterschiedlichen Selektionsfaktoren (Proc. R. Soc. Lond. B, DOI 10.1098/rspb.2003.2500, 2003).

Die meisten Reptilien leben in wärmeren Gebieten der Erde, weil ihre niedrige Stoffwechselrate ein Leben in nördlicheren Breiten verhindert. Andererseits zeigen Vögel und Säugetiere hohe Stoffwechselraten, die es ihnen ermöglichen, auch in kälteren Regionen zu leben, weil sie die Temperatur ihres Körpers weit über der ihrer Umgebung halten können. Doch viele Säugetier- und Vogelarten findet man sowohl in warmen als auch in kalten Regionen – wobei ihr Stoffwechsel je nach Population auf sehr unterschiedlichen „Touren“ läuft. Bisher gab es zwei Erklärungen: Entweder können Tiere auf verschiedene Umweltbedingungen unmittelbar mit unterschiedlichen Stoffwechselraten reagieren, oder sie haben ihren Stoffwechsel im Lauf der Evolution an die unterschiedlichen Umweltbedingungen angepasst; im zweiten Fall wären die Unterschiede genetisch bedingt. Das deutsch-amerikanische

Ornithologen-Team untersuchte dazu vier unterschiedliche Populationen von Schwarzkehlchen – einer Singvogelart, die sich für vergleichende Untersuchungen besonders empfiehlt. Denn ihr Brutverbreitungsgebiet erstreckt sich vom Nordosten Asiens über Europa bis nach Südafrika. Schwarzkehlchen aus Kasachstan brüten im kontinentalen Klima Zentralasiens; sie haben nur eine kurze Brutsaison und verbringen den Winter 6000 Kilometer vom Brutgebiet entfernt in Indien und Pakistan. Verglichen mit diesen asiatischen Populationen ist die Brutsaison der im gemäßigten Klima Österreichs beheimateten Schwarzkehlchen sehr viel länger, und ihre Zugwege in den Mittelmeerraum sind deutlich kürzer. Auch die jährliche Brutperiode der im atlantischen Klima Irlands brütenden Schwarzkehlchen ist lang; als typische Teilszieher wandern nur manche dieser Vögel im Winter weg, der Rest der Population überwintert auf der Insel. Schwarzgetiere hohe Stoffwechselraten, die es ihnen ermöglichen, auch in kälteren Regionen zu leben, weil sie die Temperatur ihres Körpers weit über der ihrer Umgebung halten können. Doch viele Säugetier- und Vogelarten findet man sowohl in warmen als auch in kalten Regionen – wobei ihr Stoffwechsel je nach Population auf sehr unterschiedlichen „Touren“ läuft. Bisher gab es zwei Erklärungen: Entweder können Tiere auf verschiedene Umweltbedingungen unmittelbar mit unterschiedlichen Stoffwechselraten reagieren, oder sie haben ihren Stoffwechsel im Lauf der Evolution an die unterschiedlichen Umweltbedingungen angepasst; im zweiten Fall wären die Unterschiede genetisch bedingt. Das deutsch-amerikanische



weltbedingungen lebten. Das Ergebnis der Untersuchungen fiel eindeutig aus: Sowohl während der Ruhezeit im Januar als auch während der Mauserperiode im Spätsommer zeigten die tropischen Schwarzkehlchen aus Kenia einen niedrigeren Stoffwechsel als die Schwarzkehlchen aller anderen Populationen. Signifikant höher lag der Stoffwechsel bei den irischen Vögeln, gefolgt von den Schwarzkehlchen aus Österreich – und die höchsten Werte fanden die Forscher bei den Vertretern aus Kasachstan. Die unterschiedlichen Stoffwechselraten dieser vier Populationen gehen Hand in Hand mit bedeutsamen Unterschieden in ihrer Lebensweise. So mausern sich Schwarzkehlchen aus hohen geografischen Breiten rascher, und sie legen auch mehr Eier als ihre tropischen Artgenossen. Beides, das belegten Kreuzungsexperimente, ist genetisch bedingt. Von anderen Tiergruppen weiß man, dass auch das jugendliche Wachstum bei tropischen Arten schneller verläuft als bei verwandten Arten aus gemäßigten Breiten. In den nördlicheren Breiten scheint demnach der

Kleiner Vogel mit großen Unterschieden: Schwarzkehlchen leben in verschiedenen Klimazonen und zeigen entsprechend unterschiedliche Stoffwechselraten. Wissenschaftler der Max-Planck-Forschungsstelle für Ornithologie und der Princeton University haben jetzt nachgewiesen, dass diese Anpassung in den Genen der Vögel verankert ist.

FOTO: MP-FORSCHUNGSSTELLE FÜR ORNITHOLOGIE

„Lebensmotor“ hochtouriger zu laufen als in den Tropen – und das vielleicht deshalb, weil die Tiere im Norden extremere Umweltbedingungen zu bewältigen und dafür aufwändige Mechanismen entwickelt haben, die es ihnen beispielsweise erlauben, Energiereserven anzulegen oder als Zugvögel wegzuwandern. Möglicherweise fördern auch die im Frühjahr und Sommer in nördlichen Breiten günstigeren Ernährungsbedingungen – und die dadurch erhöhte Fortpflanzungsrate – die Evolution eines höheren Ruhestoffwechsels. Die jetzt vorgelegten Ergebnisse zeigen erstmals, dass sich der Ruhestoffwechsel in einer Population aufgrund genetischer Faktoren unterschiedlich ausprägt und Teil der Verknüpfung zwischen Physiologie und Lebensweise ist. Die Befunde sind auch insofern bedeutsam, als es einen Zusammenhang zwischen Stoffwechselrate und Lebensdauer zu geben scheint: Säugetiere mit niedrigerem Ruhestoffwechsel (und langsamerem Herzrhythmus) leben in der Regel länger als solche mit höherem Umsatz. In der Tat scheinen tropische Vogelarten länger zu leben als ihre Verwandten in höheren Breiten. „Noch sind die Ursache-Wirkungs-Beziehungen für eine solche mögliche Regel unklar. Doch vielleicht können weitere vergleichende Untersuchungen an Tieren mit großem Verbreitungsgebiet helfen, unser Verständnis dieser Zusammenhänge zu vertiefen“, sagt Eberhard Gwinner, Leiter der Experimente in Seewiesen und Direktor an der Max-Planck-Forschungsstelle für Ornithologie. ●



**@ Weitere Informationen erhalten Sie von:**  
 PROF. EBERHARD GWINNER  
 Max-Planck-Forschungsstelle für Ornithologie, Andechs und Radolfzell, Andechs/Seewiesen  
 Tel.: 08152/373-112  
 Fax: 08152/373-133  
 E-Mail: gwinner@erl.ornithol.mpg.de

LIMNOLOGIE

## Krebse mit Immungedächtnis

**Auch wirbellose Tiere verfügen offenbar über ein spezifisches immunologisches Gedächtnis: Sollte sich dieser Befund, erhoben von Wissenschaftlern des Max-Planck-Instituts für Limnologie in Plön, bestätigen, könnte das erhebliche Konsequenzen für die Bekämpfung von Krankheiten haben, die – wie etwa Malaria – durch Wirbellose übertragen werden (NATURE, 4. September 2003).**

Eine herausragende Eigenschaft des Immunsystems von Wirbeltieren und Menschen ist die Fähigkeit, nach Infektion durch einen Krankheitserreger ein Gedächtnis für dessen spezifische Eigenschaften aufzubauen (Antigen-Erkennung). Gerät der Betroffene dann erneut an diesen Erreger, so reagiert sein Immunsystem rascher und zielgenauer. Diesen Effekt macht man sich bei Impfungen zu Nutze. Im Gegensatz dazu galt die Parasiten-Abwehr von Wirbellosen, wie Insekten und Krebsen, bislang als vergleichsweise unspezifisch. Zwar können auch Wirbellose nach Kontakt mit Krankheitserregern oder Parasiten die Aktivität ihrer Abwehrmechanismen steigern; die Spezifität dieser Mechanismen schien jedoch nicht über die grobe Unterscheidung zwischen verschiedenen Klassen von Erregern hinaus zu gehen. Neue Daten aus dem Labor von Joachim Kurtz und Karoline Franz vom Max-Planck-Institut für Limnologie in Plön liefern nun jedoch erste Hinweise dafür, dass auch winzige, im Wasser lebende Krebse (Copepoden) über ein spezifisches immunologisches Gedächtnis verfügen. In ihren Experimenten setzten die beiden Forscher diese Kleinkrebse zweimal hintereinander dem Befall durch parasitische Bandwürmer aus. Dabei nahmen sie beim Zweit-

kontakt entweder Geschwisterparasiten, deren Antigene natürlich große Ähnlichkeit hatten mit jenen vom Erstbefall, oder sie setzten die Krebstierchen Parasiten einer anderen Geschwistergruppe mit deutlich anderen Antigen-Eigenschaften aus. Die Arbeitshypothese der Wissenschaftler lautete: Falls die Krebse ein spezifisches immunologisches Gedächtnis besitzen, dann sollte die Gefahr einer Infektion bei erneutem Kontakt mit sehr ähnlichen Parasiten geringer sein. Im Experiment konnten die Biologen tatsächlich einen solchen Gedächtnis-Effekt beobachten. Und er war, wie erwartet, umso stärker, je mehr sich die nacheinander attackierenden Parasiten ähnelten.

Unklar ist für die Forscher derzeit, welcher immunologische Mechanismus zu dieser erstaunlichen Spezifität führt. „Sollten auch andere Wirbellose über ein spezifisches immunologisches Gedächtnis verfügen, dann könnte dies weitreichende Konsequenzen haben – und zwar nicht nur für das Verständnis der Evolution von Immunsystemen, sondern darüber hinaus für die Bekämpfung von Krankheiten, die wie zum Beispiel Malaria durch wirbellose Tiere übertragen werden“, sagt der Leiter der Studie, Joachim Kurtz. ●



**@ Weitere Informationen erhalten Sie von:**  
 JOACHIM KURTZ  
 Max-Planck-Institut für Limnologie, Plön  
 Tel.: 04522/763-256  
 Fax: 04522/763-310  
 E-Mail: kurtz@mpil-ploen.mpg.de



**Infizierter Copepode (*Macrocyclops albidus*). Im Rücken des nur knapp ein Millimeter großen Krebses kann man einen parasitischen Bandwurm (*Schistocephalus solidus*) erkennen.**

Foto: MPI für Limnologie

ASTRONOMIE

## Junge Galaxien nahe der Milchstraße?

**Sie erscheinen, so könnte man sagen, fehl am Platz: jene acht extrem metallarmen Galaxien, die jüngst in der engeren kosmischen Nachbarschaft der Milchstraße aufgespürt wurden. Denn ihrem chemischen Erscheinungsbild nach sind diese Sternsysteme noch sehr jung – und sollten demnach in den fernsten Bereichen des Universums stehen, nicht aber im Umfeld der Milchstraße, in dem man eigentlich nur Sternsysteme „gesetzteren“ Alters erwartet.**

Der Urknall vor etwa 14 Milliarden Jahren lieferte ein Universum aus Wasserstoff und Helium. Sämtliche schwerere Elemente, insbesondere Metalle, wurden erst später bei thermodynamischen Reaktionen „erbrütet“, die im Innern der Sterne ablaufen. Über Generationen von Sternen, die mit ihrem Leben jeweils auch schwere Elemente an das interstellare Medium aushauchten, reicherten sich in den Galaxien Metalle an – aus deren Häufigkeit sich deshalb das Alter einer Galaxie

ablesen lässt: je jünger eine Galaxie, desto geringer ihr Metallgehalt. Und umgekehrt sollten extrem metallarme Galaxien sehr jung sein – und sich dementsprechend nur in sehr entfernten Regionen finden, in denen man Objekte aus der Frühzeit des Alls beobachtet. Deshalb überraschte die Fachwelt, was ein internationales Team von Astronomen unter der Leitung von Alexei Kniazev und Eva Grebel vom Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg unlängst meldete: Die Forscher konnten in der näheren Umgebung der Milchstraße acht Sternsysteme identifizieren, die nur ein Zwanzigstel des Metallgehalts der Sonne aufweisen – und demnach als extrem metallarme Galaxien einzustufen sind. Gemessen an ihrem Metallgehalt sollten diese Objekte nicht älter als einige hundert Millionen bis maximal eine Milliarde Jahre sein. Sie hätten also nahe unserer Milchstraße, deren Alter um 13 Milliarden Jahre liegt, eigentlich nichts zu suchen, sondern sollten sich annähernd so viele Lichtjahre entfernt in der „Kin-

derstube“ des Kosmos tummeln. Sind die Sternsysteme tatsächlich so jung, wie ihr Metallgehalt anzeigt? Dann würden sich Galaxien auch lange nach dem Urknall noch heute zwischen den älteren bilden – und die Astronomen könnten Milchstraßen in ihrer frühen Entwicklung praktisch aus nächster Nähe beobachten und studieren. Doch Kniazev warnt vor solch vorschneller Euphorie, denn: „Ein geringer Metallgehalt muss nicht zwingend ein niedriges Alter der Galaxien bedeuten.“ So gibt es unter den extrem metallarmen Galaxien solche, die eine Phase heftiger Sternentwicklung durchlaufen. Dabei entstehen in diesen so genannten blauen kompakten Galaxien stellare Winde. „Und die könnten die schweren Elemente aus den Galaxien regelrecht fortgeblasen haben“, sagt Eva Grebel. Von anderen metallarmen Galaxien wiederum weiß man, dass sie sich sehr langsam – mit sehr niedriger Sternentstehungsrate – entwickeln und wegen dieses verminderten „Stoffwechsels“ nur wenig Metalle anreichern. Unter diesen Aspekten wollen die Forscher die neu entdeckten, metallarmen Galaxien im Umfeld der Milchstraße jetzt genau unter die Lupe nehmen. Und ob sie sich nun als jung oder alt erweisen: In jedem Fall, dessen sind sich die Wissenschaftler sicher, wird ihre systematische Erforschung zu einem tieferen Verständnis der Entstehung und Entwicklung von Galaxien beitragen. ●

**Vier der neu entdeckten, extrem metallarmen Galaxien im Umfeld der Milchstraße.**



Fotos: The Sloan Digital Sky Survey



**@ Weitere Informationen erhalten Sie von:**  
 DR. JAKOB STAUDE  
 Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg  
 Tel.: 06221/528-229  
 Fax: 06221/528-246  
 E-Mail: staude@mpia.de

**MOLEKULARBIOLOGIE**

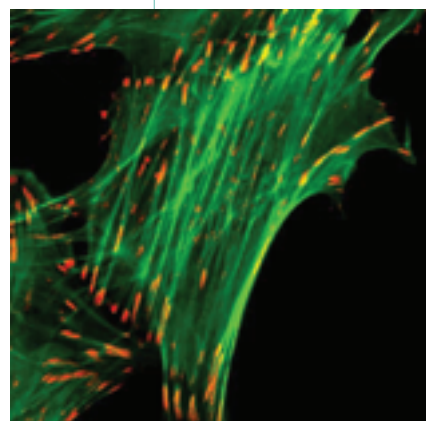
## Zellen lieben's soft

Zellen verhalten sich in weichen Umgebungen anders als auf harten Glasunterlagen, auf denen sie traditionellerweise untersucht werden. Jüngste Experimente zeigen, dass die Kräfte an den Kontaktstellen zwischen Zellen und ihrer Umgebung die Entwicklung und das Verhalten der Zellen beeinflussen. Am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Golm bei Potsdam ist es jetzt gelungen, das Verhalten von Zellen auf und in weichen Materialien modellhaft zu erklären und sogar vorauszusagen (PNAS, 5. August 2003).

Der menschliche Körper umfasst etwa zehn Billionen ( $10^{13}$ ) Zellen, die sich in mehr als 200 verschiedene Zelltypen untergliedern. Damit er seine Funktionen erfüllen kann, müssen zwei scheinbar gegensätzliche Prinzipien erfüllt sein: Die Zellen müssen aneinander haften, aber zugleich die Möglichkeit haben, sich schnell umzugruppieren – etwa, um auf Infektionen oder Verletzungen reagieren zu können. Die Natur hat dafür vorgesorgt: Zum einen liegt zwischen den Gewebezellen die extrazelluläre Matrix, ein löchriges Proteinnetzwerk, über das die Zellen zwar miteinander verbunden sind, das ihnen aber auch ausreichend Bewegungsspielraum bietet. Zum anderen sondieren Zellen ihre jeweilige Nachbarschaft: Über Hunderte von Kontaktpunkten ziehen sie ständig an ihrem „Haftgrund“ und gewinnen dadurch Informationen über dessen mechanische Beschaffenheit. Die dabei „erfühlten“ Kräfte werden dann in biochemische Signale und schließlich in entsprechende Reaktionen der Zelle umgesetzt. Ulrich Schwarz, Leiter einer Emmy-Noether-Nachwuchs-

gruppe am Golmer Max-Planck-Institut hat in enger Zusammenarbeit mit Materialwissenschaftlern und Zellbiologen vom Weizmann-Institut in Israel schon vor einiger Zeit nachgewiesen, dass die Wechselwirkung zwischen den elastischen Eigenschaften der Umgebung und den biochemischen Entscheidungsprozessen in einer Zelle über „Fokalkontakte“ vermittelt wird – über relativ große Proteinaggregate an der Zellmembran, die das innere Proteinskelett der Zelle mit der extrazellulären Umgebung verbinden. Die Fokalkontakte werden umso größer, je stärker die an ihrem Ort von der Zelle auf ihre Umgebung ausgeübte Kraft wächst. Zudem zeigt sich, dass auch von außen auf die Zelle ausgeübte Kräfte zu vergrößerten Fokalkontakten führen – ein weiteres Indiz dafür, dass physikalische Kräfte an den Fokalkontakten zunächst eine verstärkte Proteinaggregation auslösen und biochemische Vorgänge innerhalb der Zelle beeinflussen. Demnach gewinnen Zellen über die Fokalkontakte Aufschluss über die elastischen Eigenschaften ihrer unmittelbaren Umgebung. Und bestimmte Zelltypen verhalten sich physiologisch optimal in einer Um-

gebung mit relativ geringer Steifigkeit – unter Verhältnissen also, wie sie natürlicherweise im Körper vorliegen. Darüber hinaus reagieren Zellen äußerst empfindlich, sobald sich die elastischen Eigenschaften ihrer Umgebung verändern. Fazit: Physiologische Prozesse in Zellen, die von den elastischen Eigenschaften des engeren Umfelds dieser Zellen abhängen – wie etwa die Aufrechterhaltung von Bindegewebe, die Heilung einer Wunde oder die Bewegung von Zellen, darunter insbesondere von Krebszellen – lassen sich nur dann voll verstehen und eventuell beeinflussen, wenn man weiß, wie sich Kräfte an den Fokalkontakten einer Zelle auf deren Verhalten auswirken. Inzwischen ist es Schwarz gemeinsam mit seiner Mitarbeiterin Ilka Bischofs gelungen, ein Modell zu entwickeln, mit dem sich erstmals das Verhalten einer Zelle in weichen Materialien vorhersagen lässt. Dieses Modell beruht auf zwei experimentellen Befunden: Zellen zeigen „normales“ Verhalten bevorzugt in weichen Umgebungen, und sie orientieren sich dann jeweils in Richtung höherer Steifigkeit, suchen also



**Aufsicht auf eine fluoreszierend markierte Fibrinblastenzelle: Bündel von Aktinfilamenten (grün), die zum inneren Skelett der Zelle gehören, enden an Fokalkontakten (rot), welche die Zelle mit ihrer Umgebung verbinden.**

**Vorhersage des Zellverhaltens in weicher Umgebung: (a) Zellen bevorzugen die Richtung der größten effektiven Steifigkeit in ihrer Umgebung und orientieren sich deshalb zum Beispiel senkrecht zu einer festgehaltenen Grenzfläche. (b) Bei freien Grenzflächen ist die parallele Orientierung für Zellen optimal. (c) Eine entsprechende Anordnung ergibt sich auf einem elastischen Substrat in der Nähe einer Grenzlinie zwischen einer weichen (links) und einer harten Region (rechts). (d) Mehrere Zellen ordnen sich bevorzugt in einer Reihe an, weil jede Zelle die elastische Umgebung an ihren Enden versteift.**

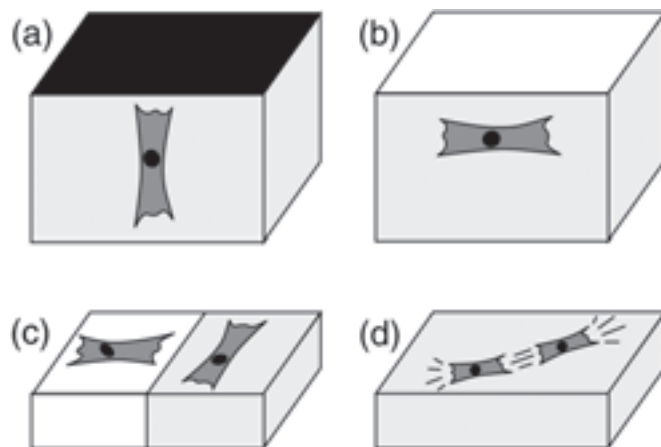


Foto: Weizmann-Institut

gewissermaßen festeren Halt – vermutlich, weil die Zellen dort an ihren Fokalkontakten höhere Kräfte aufbauen können, die für sie physiologisch wichtig sind. Mittels elastizitätstheoretischer Rechnungen konnten die Forscher voraussagen, wie eine Zelle in bestimmten Situationen abhängig von den äußeren Gegebenheiten reagiert. Demnach ordnen sich einzelne Zellen in einer weichen Umgebung nahe einer Oberfläche, die sich nicht deformieren lässt, bevorzugt senkrecht zu dieser Fläche an. An frei verformbaren Oberflächen hingegen sollten sich einzelne Zellen parallel ausrichten; denn in diesem Fall würde eine senkrechte Orientierung weicher erscheinen. Außerdem besagt das Modell, dass sich mehrere Zellen wegen der Verformung des zwischen ihnen befindlichen elastischen Materials bevorzugt in Reihen anordnen, die sich in einem von außen erzeugten Verformungsfeld wiederum parallel lagern. Diese Voraussagen zu Zellorientierung und -positionierung stimmen mit zahlreichen experimentellen Beobachtungen überein, die nun mit der neuen Theorie eine einheitliche Basis finden. Viele Aussagen der Modelle sind auch neu und sollen in weiteren Experimenten überprüft werden. Doch schon jetzt ist gewiss, dass die Modelle von Bischof und Schwarz zu wichtigen Anwendungen in der Biotechnik und Medizin führen werden – zum Beispiel dort, wo es um das Verhalten von Zellen in künstlichen Geweben oder an der Grenzschicht zu Implantaten geht. ●



**Weitere Informationen erhalten Sie von:**

DR. ULRICH SCHWARZ  
Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung, Golm  
Tel.: 0331/567-9610  
Fax: 0331/567-9602  
E-Mail: Ulrich.Schwarz@mpikg-golm.mpg.de

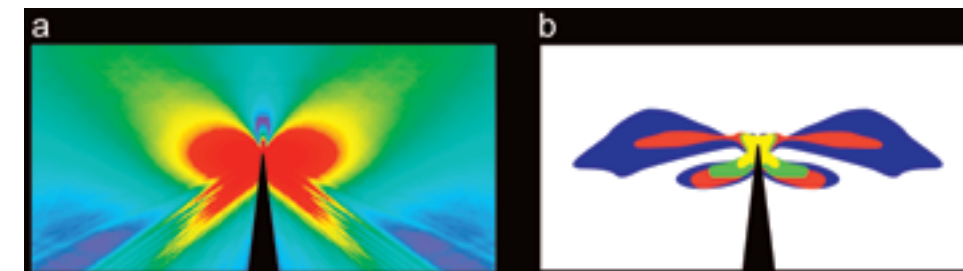
**MATERIALFORSCHUNG**

## Risse sprengen Schallmauern

In spröden Materialien können sich Risse mit Überschall-Geschwindigkeit ausbreiten – und damit sehr viel schneller als es die klassische Theorie erlaubt. Zu diesem Befund kamen Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Metallforschung in Stuttgart und des IBM Almaden Forschungszentrums in San José (USA) anhand umfangreicher Computersimulationen. Die Untersuchungen begründen ein vertieftes Verständnis der Entstehung und Ausbreitung von Rissen, das für künftige wie auch für herkömmliche technische Konstruktionen – etwa in Flugzeugen oder Raumfahrzeugen – bedeutsam ist (NATURE, 13. November 2003).

Doch inzwischen stellt sich heraus, dass eine solche „kontinuierliche“ Betrachtung von Werkstoffen nicht ausreicht – dass es vielmehr darauf ankommt, Materialien in ihren Eigenschaften und in ihrem Verhalten auf atomarer Ebene zu verstehen, um ihre Eignung für bestimmte Zwecke abzuschätzen. Wo es um Abmessungen im Mikrometer- oder gar Nanometer-Bereich geht, sind Fragen der Werkstoff-Kunde allerdings nicht mehr experimentell zu ergründen: Nur über (oft sehr aufwändige) Simulationen im Computer lässt sich herausfinden, wie Materialien in diesen winzigen Dimensionen reagieren. Auf diese Weise haben jetzt auch Wissenschaftler des Stuttgarter

Foto: MPI für Metallforschung



**Zone mit hohem Energiefluss zum Riss und Ausdehnung der hyperelastischen Bereiche. Bild (a) zeigt die Verteilung des lokalen Energieflusses in der Nähe des Risses. Die rot gefärbte Region definiert eine charakteristische Längenskala für den Energietransport. Bild (b) zeigt Regionen mit nichtlinearem (hyperelastischem) Materialverhalten.**

Glas bricht, Stahl reißt, Gummi platzt: Materialien können unter Belastung auf vielerlei Art versagen. Zu berechnen, wann das geschieht, gehört zu den vordringlichen Aufgaben von Ingenieuren und Konstrukteuren – die dafür noch heute meist Rechenverfahren anwenden, die auf der klassischen Physik des so genannten Kontinuums beruhen: Bauteile von statisch oder dynamisch belasteten Konstruktionen werden allein mit ihren makroskopischen Materialeigenschaften in Rechnung gestellt, das heißt ohne Berücksichtigung ihrer Mikrostruktur.

Max-Planck-Instituts für Metallforschung und des IBM Almaden Forschungszentrums die Dynamik von Rissen in spröden Materialien analysiert – und dabei herausgefunden, dass die gängigen Theorien zur dynamischen Ausbreitung von Rissen einen wesentlichen Aspekt vernachlässigen: die Tatsache, dass die Elastizität eines Festkörpers vom Ausmaß seiner Verformung abhängt. So werden etwa Metalle weich, Polymere hingegen hart, wenn sie bis an die Grenze ihrer Festigkeit gedehnt werden. Dazu Huajian Gao, Direktor am Max-Planck-Institut für

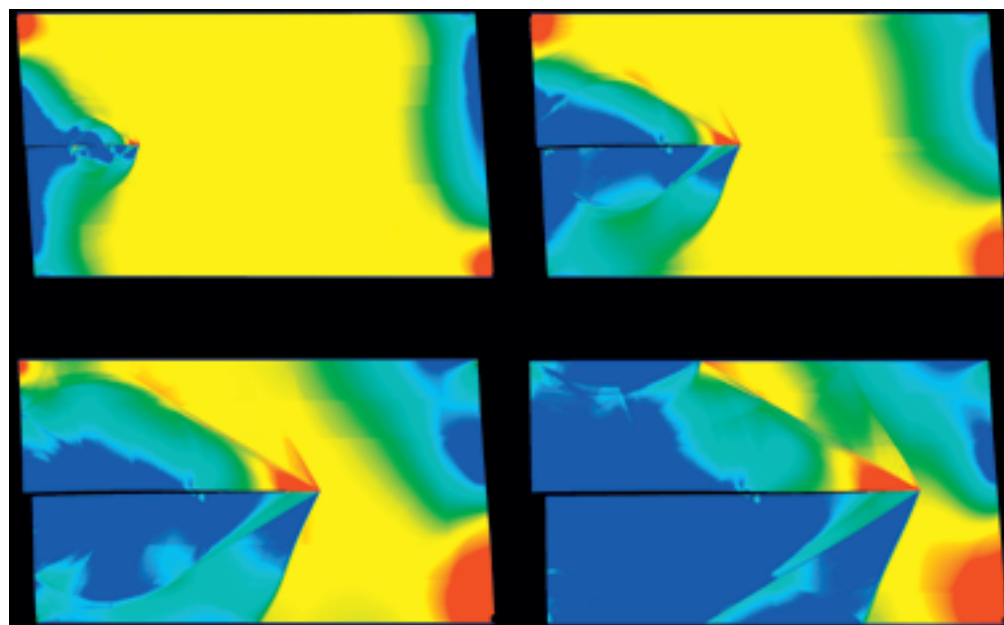


Foto: MPI für Metallforschung

Rissausbreitung jenseits der Schallmauer. Die Abbildung zeigt Momentaufnahmen eines Risses unter Scherbelastung, wobei sich der Riss mit einer Geschwindigkeit jenseits der longitudinalen Wellengeschwindigkeit in Feststoffen ausbreitet. Die zwei Machkegel oder Schockwellen (in Analogie zum Überschallknall bei Überschallflugzeugen) zeigen, dass sich der Riss schneller als der Schall ausbreitet.

Metallforschung: „Dass die Elastizität eines Materials konstant bleibt, dass sich das Material also linear verhält, gilt nur für unendlich kleine Deformationen – nicht aber bei größeren oder gar extremen Dehnungen. Viele der klassischen Theorien behandeln die Rissausbreitung auf der Grundlage linearer Elastizität und berücksichtigen nicht, dass sich Materialien bei kleinen Deformationen anders als bei großen verhalten – und sind deshalb aus unserer Sicht zu korrigieren. Denn an der Spitze eines Risses bricht das Material genau deshalb, weil dort extrem starke Verformungen auftreten.“

Diese extremen Verformungen führen zu „Hyperelastizität“, die in einem umschriebenen Bereich um die Spitze des Risses auftritt und dessen Verhalten entscheidend beeinflussen kann. Ob und wie das geschieht, so fanden die Stuttgarter Wissenschaftler, hängt von einer charakteristischen Länge ab: Sie bezeichnet die Ausdehnung jener Zone, aus der Energie in die Spitze des

Risses fließt und damit dessen weitere Ausbreitung fördert. Diese charakteristische Länge kann je nach den Eigenschaften des betreffenden Materials unter extremen elastischen Spannungen bis auf wenige Dutzend Nanometer (Millionstel eines Millimeters) schrumpfen – und dabei weit hin mit jener Region um die Spitze des Risses zusammenfallen, in dem Hyperelastizität vorliegt. Damit aber, so könnte man sagen, verlässt der Riss den Rahmen dessen, was die herkömmlichen Theorien vorgeben. Denn hyperelastisches Material verhält sich nichtlinear. Das bedeutet: Zusammen mit dem hohen Energiefluss innerhalb eines kleinen, durch die charakteristische Länge definierten Arealen können Risse eine ganz andere Dynamik entfalten, als das nach klassischer Sicht möglich erscheint.

Ein Beispiel dafür lieferte den Forschern die Computersimulation eines Risses, ausgelöst durch Scherbelastung in Glas: Kommt Hyperelastizität ins Spiel, setzt sich ein solcher

Riss mit mehr als der Schallgeschwindigkeit fort – mit mehr als 5300 Metern in der Sekunde. Nach herkömmlichen Rechnungen galt das als unmöglich; denn danach bezeichnete die Geschwindigkeit, mit der sich Längs- (und somit Schall-)wellen innerhalb eines Mediums fortpflanzen, auch das oberste, unüberwindbare Tempolimit für die Ausbreitung eines Risses.

Hyperelastische Effekte, wie der Fall der Grenzgeschwindigkeit für Risse, sind nach Meinung der Forscher überall dort zu erwarten, wo es um Mikro- oder Nanotechnik geht, wo man es mit dünnen Schichten oder raschen Verformungsprozessen zu tun hat – und dementsprechend hohe Spannungen innerhalb kleinster Materialbezirke auftreten. Daraus erwächst Ingenieuren, nach dem „klassischen Rechnungswesen“, wohl bald ein neues und sehr interessantes Arbeitsfeld. ●



④ Weitere Informationen erhalten Sie von:  
**PROF. HUAIJIAN GAO**  
 Max-Planck-Institut für Metallforschung, Stuttgart  
 Tel.: 0711/689-3510, Fax: 0711/689-3512  
 E-Mail: [hjgao@mf.mpg.de](mailto:hjgao@mf.mpg.de)

**MARKUS J. BUEHLER**  
 Max-Planck-Institut für Metallforschung, Stuttgart  
 Tel.: 0711/689-3579, Fax: 0711/689-3512  
 E-Mail: [m.buehler@mf.mpg.de](mailto:m.buehler@mf.mpg.de)

# Panorama

**WIE MULTIPLE SKLEROSE ENTSTEHT** ist noch immer unklar. Doch wächst der Verdacht gegen ein bestimmtes Protein – kurz MOG genannt –, das auf den Myelinhüllen der Nervenfasern im zentralen Nervensystem sitzt: Dieses Eiweiß scheint Auslöser und Ziel eines Fehlgriffs der Immunabwehr zu sein, in deren Verlauf das Myelin um die Nervenfasern attackiert und zerstört wird. Jetzt haben Forscher der Max-Planck-Institute für Biochemie und Neurobiologie sowie der Technischen Universität München die räumliche Struktur dieses Proteins aufgeklärt – und damit weitere „belastende Indizien“ gewonnen. Denn sie fanden am MOG-Molekül eine schleifenförmige Struktur, die als entscheidende Ankerstelle für einen spezifischen Antikörper dient, der bereits in Tierversuchen als Zerstörer des Myelins aufgefallen war. Diese Ankerstelle erwies sich als identisch mit dem Strukturdetail eines Proteins auf Chlamydien – auf Bakterien, deren mögliche Beteiligung an der Entstehung von Multipler Sklerose schon seit längerem diskutiert wird. Über diese neue Spur hofft man nun zu weiteren Einblicken (und vielleicht sogar zu Eingriffsmöglichkeiten) in das Krankheitsgeschehen der Multiplen Sklerose zu kommen.

**ALS „VORKOSTER“ AM MEERESBODEN** wirken kleine Krebse und Würmer: Sie sind die Ersten, die sich über alles organische Material hermachen, das aus den oberen Schichten zum nachtdunklen Grund der Ozeane absinkt. Diese überraschende Entdeckung machten deutsche Meeresbiologen, darunter auch Wissenschaftler des Bremer Max-Planck-Instituts für marine Mikrobiologie, mittels eines Tiefsee-Roboters, den sie rund 1000 Seemeilen südwestlich von Irland auf den Atlantikboden absenkten. Die Forscher fanden, dass die bis zu einen Zentimeter großen Würmer und Krebse den „Segen von oben“ zunächst in ihre Gänge transportieren, die etwa 10 Zentimeter tief in das Sediment reichen und es durchlüften. Und dort sitzen dann auch Nematoden, die ihrerseits die Ausscheidungen der Krebse und Würmer verwerten. Erst danach übernehmen dann Mikroorganismen – Bakterien verschiedener Art – die weitere Umsetzung der organischen Substanz in anorganische Bestandteile. Bislang war man der Meinung, dass die Abbauprozesse am Boden der Ozeane allein über Mikroorganismen erfolgen.

**PFLANZEN REAGIEREN GIFTIG**, wenn sie von Pilzen befallen werden: Sie bilden in ihren Zellen Vesikel (Transportbläschen), gefüllt mit „Kampfstoffen“, und transportieren diese chemischen Bomben gezielt an die Stellen der Zellmembran, an denen der schädliche Pilz einzudringen versucht. Dort angelangt, setzen die Vesikel ihre Giftfracht frei und den Angreifer außer Gefecht.

Der zielgerichtete Transport dieser Vesikel sowie die Ausschüttung der Abwehrstoffe erfolgt unter der Regie bestimmter Proteine in der Membran der Pflanzenzellen, wie Wissenschaftler am Kölner Max-Planck-Institut für Züchtungsforschung kürzlich nachgewiesen haben. Die Forscher fanden diese Membranproteine sowohl an Zellen der Ackerschmalwand *Arabidopsis thaliana* als auch der Gerste – an Pflanzen, die seit 200 Millionen Jahren getrennte Entwicklungswege gehen: Demnach handelt es sich um einen evolutionär alten Verteidigungsmechanismus – der allerdings auch nach der späteren „Erfindung“ der spezifischen Immunabwehr bei Pflanzen beibehalten wurde und noch heute als eine Art vorgeschobene Verteidigung dient. Bei der Gerste allerdings scheint diese Art der chemischen Abwehr gegen den Mehltau-Pilz inzwischen nicht mehr sonderlich zu wirken: Das könnte daran liegen, dass der Pilz den Vesikeltransport zu unterbinden gelernt hat – oder dass er gegen den chemischen Kampfstoff resistent ist und ihm das Gift nichts mehr anhaben kann.

**EINE ZU „SCHARFE“ IMMUNABWEHR** schadet eher, als dass sie Nutzen bringt, wie Forscher am Max-Planck-Institut für Limnologie in Plön jetzt herausgefunden haben: Sie untersuchten an Stichlingen, ob und wie deren Immunlage von der Zahl der so genannten MHC-Moleküle abhängt – von jener genetisch bedingten Vielfalt an molekularen „Schablonen“, über die das Immunsystem körperfremde Eiweißstrukturen als solche erkennen und dann bekämpfen kann. Dabei zeigte sich, dass eine mittlere Zahl an MHC-Varianten das Optimum bedeutet: Fische mit solch maßvoller Immunausrüstung waren am besten gegen Parasiten-Befall gefeit und wiesen auch den besten Allgemeinzustand auf. Dass daneben zu wenige MHC-Varianten eine zu „lasche“ Abwehr bedingen, leuchtet ein. Mit einem zu vielfältigen MHC-Repertoire hingegen wächst die Wahrscheinlichkeit, dass darunter auch Schablonen auftreten, die auf körpereigene Eiweiß-Konfigurationen passen und deshalb Autoimmun-Reaktionen auslösen können. Diese Zweischneidigkeit macht ein übertrieben reichhaltig sortiertes Immunsystem von einer gewissen Grenze an zu einer Belastung für den Organismus – denn mit der Gefahr von „friendly fire“ wächst auch der Aufwand für die Kontrollmechanismen, die vor Fehlgriffen der eigenen Abwehr schützen. ●

Stichlinge mit einer mittleren Anzahl an MHC-Varianten sind am besten gegen Infektionen durch Saugwürmer (links) oder Fadenwürmer (Mitte, rechts) geschützt.



Abb.: MPI für Limnologie



**www**  
 Mehr zu diesen Themen finden Sie unter [www.maxplanck.de](http://www.maxplanck.de)