

Chaos in Planktongemeinschaften

Unter absolut konstanten Bedingungen zeigten die Populationen von Planktonorganismen bei einem achtjährigen Versuch starke Fluktuationen, die wie zufällig aussahen, aber den Gesetzen der Chaostheorie gehorchten.

Von Klaus Jöhnk

Von Wettervorhersagen wissen wir aus leidiger Erfahrung, dass sie nur bedingt zuverlässig sind. Lediglich für wenige Tage im Voraus ist eine einigermaßen zutreffende Prognose möglich. Wie der Mathematiker und Meteorologe Edward Lorenz schon in den 1960er Jahren mit einfachen Modellen nachwies, führen bereits minimale Änderungen in den Anfangsbedingungen oder Variablen im dynamischen System der Atmosphäre zu unerwartet großen Änderungen in den Vorhersagen – was oft als »Schmetterlingseffekt« bezeichnet wird.

Dabei ist das zu Grunde liegende mathematische System völlig deterministisch. Sein Verhalten lässt sich, obwohl es chaotisch und zufällig scheint, im Prinzip berechnen und folgt bestimmten Mustern (wie dem bekannten »Lorenz-Attraktor«). Nur müsste man für eine längerfristige Vorhersage den Ausgangszustand des Systems unendlich genau kennen, was in

der Natur nicht möglich ist. Bei echtem Zufall wäre jede Prognose grundsätzlich ausgeschlossen, so dass sich nur Wahrscheinlichkeiten angeben ließen.

Vor drei Jahrzehnten zeigte sich, dass auch in der Ökologie unter bestimmten Bedingungen das Chaos regieren kann. So entdeckte Lord May von der University of Oxford in einfachen Populationsmodellen eine komplexe Dynamik, die chaotische Züge trägt. Daran entzündete sich eine heftige Debatte, ob solche Phänomene auch in natürlichen Populationen auftreten. Mit mathematischen Modellen ließ sich zwar zeigen, dass eine Vielzahl von ökologischen Mechanismen zu chaotischem Verhalten führen kann. Der empirische Nachweis ist allerdings äußerst schwer zu erbringen.

Tatsächlich gibt es bis heute nur wenige sehr einfache Modellsysteme, die mit Chaos assoziiert werden. Nach gängiger Meinung sind Änderungen in komplexen Gemeinschaften durch externe Faktoren wie jahreszeitliche Witterschwankungen oder andere Störungen bedingt; werden diese ausgeschaltet, sollte sich das System zu einem Gleichgewichtszustand hin bewegen.

Jetzt konnte eine internationale Forschergruppe aus den Niederlanden, Deutschland und den USA, angeführt von Elisa Benincà und Jef Huisman von der Universität van Amsterdam, erstmals klare Beweise für chaotische Dynamik in einem Nahrungsnetz erbringen. Grundlage war ein langjähriges Experiment des Biologen Reinhard Heerkloß von der Universität Rostock, der im Labor eine aus der Ostsee isolierte Planktongemeinschaft kultivierte. Dazu füllte er ein Fass

mit einer zehn Zentimeter dicken Sedimentschicht und goss 90 Liter filtriertes Wasser mitsamt aller Lebewesen bis zu einer Größe von 0,2 Millimetern aus dem Darß-Zingst-Bodden zwischen Rostock und Stralsund hinein. Mehr als acht Jahre lang hielt er diesen »Mesokosmos« unter konstanten Umweltbedingungen (wie gleich bleibender Beleuchtung und Temperatur) und entnahm zweimal wöchentlich eine Probe, um die Entwicklung der Planktonpopulation zu verfolgen.

Dabei bestimmte er nicht nur die Anzahl der einzelnen Organismen, sondern maß auch die Konzentration der Nährstoffe Phosphor und Stickstoff. Zur Auswertung fasste er die Populationen der zahlreichen Bakterien sowie Phyto- und Zooplankter in zehn verschiedene Gruppen zusammen. Für jede davon stand nach Abzug der Initialisierungsphase am Ende des Experiments ein Datensatz von 690 Messwerten für die mathematische Analyse zur Verfügung.

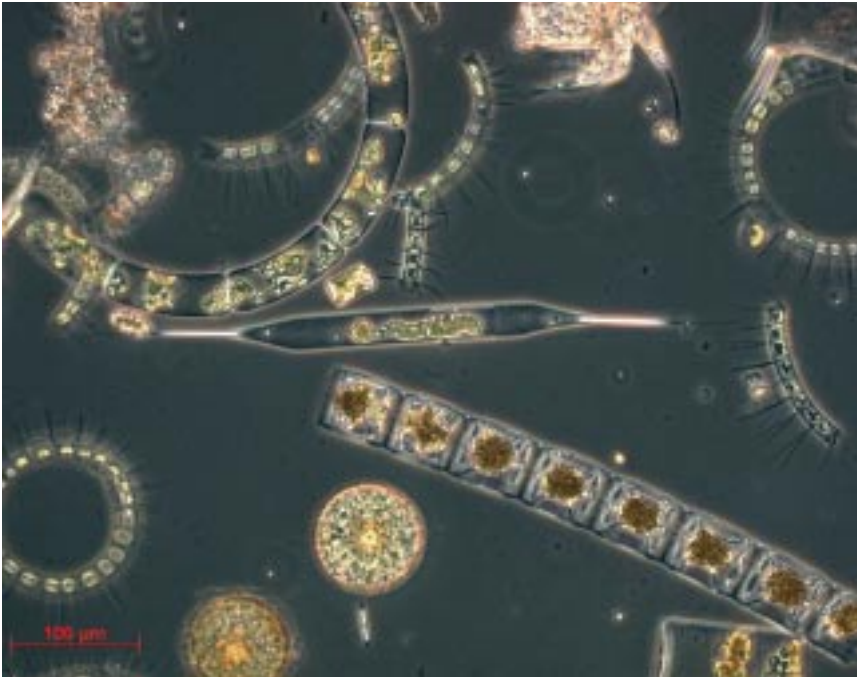
Extreme, unvorhersagbare Populationsschwankungen

Nach klassischer Sicht hätte die Häufigkeit der einzelnen Planktongruppen mit der Zeit einen mehr oder weniger konstanten Gleichgewichtszustand erreichen sollen. Stattdessen zeigte das Langzeitexperiment jedoch ungewöhnlich starke Fluktuationen, ja ein geradezu erratisches Verhalten (Grafik rechts unten). Eine Planktongruppe, die für Monate oder sogar Jahre gar nicht oder nur in geringer Anzahl vorkam, konnte auf einmal explodieren; umgekehrt passierte es, dass die Population regelmäßig auftretender Plankter urplötzlich zusammenbrach.

Verlauf und Zeitpunkt der starken Schwankungen ließen sich nur teilweise mit den schon länger bekannten Räuber-Beute-Zyklen erklären. Demnach sollte eine große Menge an Phytoplankton zu einer starken Vermehrung des Zooplanktons führen, da dieses reichlich Nahrung



In diesem Fass kultivierte Reinhard Heerkloß von der Universität Rostock acht Jahre lang eine aus der Ostsee isolierte Planktongemeinschaft und verfolgte die Populationsdynamik der enthaltenen Organismen.



findet. Sobald alles Futter weggeessen ist, bricht die Zooplanktonpopulation ein. Da nun kaum noch Räuber da sind, kann sich das Phytoplankton erholen, und der Zyklus beginnt von vorne.

Die außergewöhnlich lange Dauer des Experiments von Heerkloß erlaubte eine detaillierte Untersuchung der Ergebnisse mit modernen Methoden der nichtlinearen Zeitreihenanalyse, an der ich beteiligt war. Dabei gelang es, zwischen stochastischer oder chaotischer Dynamik zu unterscheiden. Zuerst untersuchten wir die Vorhersagbarkeit der Artenhäufigkeit. Dazu diente ein nichtlineares Modell vom Typ eines assoziativen neuronalen Netzwerks (Spektrum der Wissenschaft 11/1992, S. 134). Es ist lernfähig und kann anhand der vergangenen Entwicklung eine Vorhersage der Planktonhäufigkeit in der Zukunft machen. Diese Prognose verglichen wir mit den tatsächlich gemessenen Daten. Dabei zeigte

Jeder Tropfen Meerwasser wimmelt von winzigen Planktonorganismen, die miteinander konkurrieren oder in einem Räuber-Beute-Verhältnis zueinander stehen.

sich, dass die Vorhersagbarkeit kurzfristig sehr gut war, sich aber nach 15 bis 30 Tagen rapide verschlechterte.

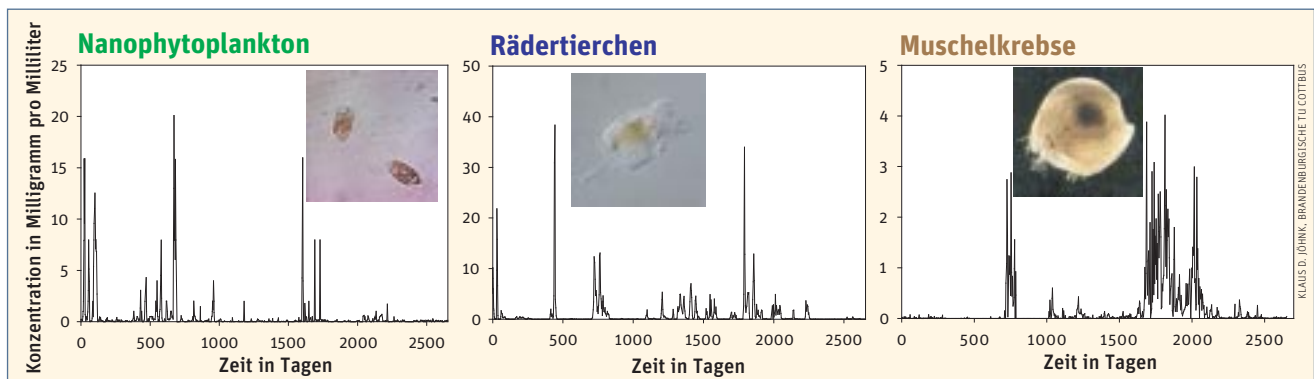
Das stand in Einklang mit chaotischem Verhalten. Allerdings kann auch in linearen, nichtchaotischen Systemen auf Grund von zufälligen Störungen die Vorhersagbarkeit auf längere Sicht abnehmen. Um das zu prüfen, führten wir einen Test mit dem bestmöglichen linearen Vorhersagemodell durch. Dessen Prognosen waren allerdings deutlich schlechter als die des nichtlinearen neuronalen Netzwerks, was für eine starke nichtlineare Komponente im Nahrungsnetz sprach – auch das in Einklang mit chaotischem Verhalten.

Für den endgültigen Beweis berechneten wir den so genannten Ljapunow-Exponenten der einzelnen Zeitreihen. Er gibt an, wie schnell sich die Entwicklungswege (Trajektorien) zweier anfangs nahe beieinanderliegender Zustandsvektoren voneinander entfernen. Ist er negativ, bewegt sich das System auf ein stabiles Gleichgewicht oder einen so genannten Grenzzyklus zu, in dem es zyklisch zwischen verschiedenen Zuständen wechselt. Bei einem positiven Ljapunow-Exponent divergieren die Trajektorien dagegen: Anfangs beieinanderliegende Punkte im Zustandsraum entfernen sich mit der Zeit exponentiell voneinander, was als Beweis für chaotisches Verhalten gelten kann.

Die von uns analysierten Planktongruppen lieferten ein erstaunlich konsistentes Bild: Alle Ljapunow-Exponenten waren nicht nur positiv, sondern hatten fast identische Werte. Als Vorhersagbarkeitshorizont ergab sich ein Zeitraum von etwa 25 Tagen. Indem wir indirekte Methoden zur Bestimmung des Ljapunow-Exponenten anwandten, konnten wir auch mit dieser Methode die Möglichkeit stochastischen Verhaltens ausschließen.

Das erhaltene Bild der Populationsdynamik war also klar und in sich stimmig. Auch ohne den Einfluss äußerer Faktoren, die der Versuchsaufbau ausschaltete, zeigten sich starke Fluktuationen in der Artenhäufigkeit, die auf nichtlinearen internen Wechselwirkungen beruhten. Der Ljapunow-Exponent war durchweg positiv. Die Entwicklung der Planktongemeinschaften ließ sich kurzfristig sehr gut vorhersagen; für Zeiträume von 15 bis 30

Die Häufigkeit der verschiedenen Planktongruppen – hier drei Beispiele – variierte im Lauf der Zeit extrem stark. Die Schwankungen spiegelten, wie eine mathematische Analyse ergab, chaotisches Verhalten wider.



ALS ABONNENT HABEN SIE VIELE VORTEILE!



1. Sie sparen gegenüber dem Einzelkauf und zahlen pro Heft nur € 6,60 statt € 7,40. Als Schüler, Student oder Azubi zahlen Sie sogar nur € 5,55.
2. Sie haben online freien Zugang zu allen Spektrum-Ausgaben seit 1993 mit derzeit über 6000 Artikeln.
3. Unter www.spektrum-plus.de finden Sie jeden Monat einen kostenlosen Zusatzartikel, der nicht im Heft erscheint.
4. Sie erhalten für Ihre Bestellung ein Dankeschön Ihrer Wahl.
5. Sie können die Online-Wissenschaftszeitung »spektrumdirekt« günstiger beziehen.
6. Unter www.spektrum-plus.de finden Sie unser Produkt des Monats, das Sie als Abonnent mit Preisvorteil bestellen können, sowie
7. den Spektrum-Mitgliederausweis mit zahlreichen Vergünstigungen.



Zum Bestellen einfach nebenstehende Karte ausfüllen und abschicken oder

per Telefon: 06221 9126-743

per Fax: 06221 9126-751

per E-Mail: service@spektrum.com

oder per Internet:

www.spektrum.de/abo

ABONNIEREN ODER VERSCHENKEN

Wenn Sie **Spektrum der Wissenschaft** selbst abonnieren oder verschenken, bedanken wir uns bei Ihnen mit einem Präsent. Wenn Sie ein Geschenkabon bestellen, verschicken wir das erste Heft zusammen mit einer Grußkarte in Ihrem Namen.



Buch »Die 7 größten Rätsel der Wissenschaft«
Erfrischend einfach und lebendig erklären David und Arnold Brody die sieben Pfeiler der Naturwissenschaften.

LESER WERBEN LESER

Sie haben uns einen neuen Abonnenten vermittelt?
Dann haben Sie sich eine Dankesprämie verdient!

Technaxx DVB-T-Stick S3.

Der DVB-T-Stick S3 sorgt für hervorragende Bilder und eine hohe Auflösung. Mit EPG-Programmführer, USB-2.0-High-Speed-Verbindung, Kanalvorschau, Videotext und zeitgesteuerter Aufnahme. Lieferumfang: Antenne, Fernbedienung, Treiber und Software



PRODUKT DES MONATS



Tagen, was bei den betrachteten Organismen etwa 5 bis 15 Generationszyklen entspricht, verschlechterten sich die Prognosen jedoch drastisch. Bestenfalls ließ sich dann noch die Schwankungsbreite angeben. Damit war der erste experimentelle Nachweis von Chaos in einem komplexen Nahrungsnetz gelungen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung haben weit reichende Konsequenzen. Wie sie zeigen, ist es bei natürlichen Ökosystemen ebenso wie beim Wetter kaum möglich, den Zustand über längere Zeit hinweg zu prognostizieren. Das gilt

auch für Vorhersagen der Artenvielfalt. Die Frage ist nun, ob dieses chaotische Verhalten bei anderen Populationen in freier Natur gleichfalls auftritt. Möglicherweise wird es dort durch externe Faktoren so weit überlagert, dass man ihm nur mit noch längeren Untersuchungszeiträumen auf die Spur kommen kann.

Bei Plankton-Organismen mit ihren Generationszeiten von wenigen Tagen ergab sich die Antwort in knapp zehn Jahren – was für ein Forscherleben akzeptabel ist. Bei höheren Tieren oder Pflanzen würden daraus leicht tausend oder mehr

Jahre. Ein Nachweis ist damit praktisch ausgeschlossen. Umso größere Bedeutung kommt der Forschung an aquatischen Mikroorganismen zu, die in exemplarischer Weise für dynamisches Verhalten in komplexen Nahrungsnetzen Modell stehen können.

Klaus Jöhnk forscht am Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei in Neuglobsow über die klimagesteuerte Ausbreitung von toxischen Cyanobakterien in Seen und war maßgeblich an den hier beschriebenen mathematischen Analysen beteiligt.

UMWELT ► Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Der Östrogen-Blues

Belastung mit hormonähnlichen Substanzen aus Abwässern verbessert den Gesang von Staren und erhöht ihre Attraktivität für Weibchen. Doch leidet das Immunsystem der Vögel.

Von Lars Fischer

Unter den Substanzen, die durch menschliche Aktivitäten in die Umwelt gelangen, bereiten Wissenschaftlern und Umweltschützern diejenigen besondere Kopfschmerzen, die im Organismus hormonähnliche Effekte auslösen. Dazu gehören Bisphenol A, das als Ausgangsstoff einer wichtigen Klasse von Kunststoffen dient, und in Plastik enthaltene Weichmacher wie Phthalate. Beide werden in großen Mengen industriell verarbeitet und sind in der Natur schwer abbaubar. Als endokrin wirksame Substanzen stören sie – ebenso wie ins Abwasser gelangende Komponenten von Antibabypillen – den Hormonhaushalt vieler wild lebender Tiere und beeinflussen so deren Überleben und Fortpflanzung.

In diesem Zusammenhang haben Wissenschaftler bei Staren (*Sturnus vulgaris*) jetzt einen neuen bedenklichen Effekt nachgewiesen. Dort greifen die Chemikalien in einen entscheidenden Schritt der Populationsentwicklung ein, indem sie den Gesang der Vögel und damit ihre Paarungschancen beeinflussen – allerdings nicht zwangsläufig zu deren Nachteil. Die von den Wissenschaftlern untersuchten Verbindungen erwiesen sich im Experiment nämlich als Hirndoping.

»Das Erstaunliche daran ist, dass die Kontamination mit natürlichen und künstlichen Östrogenen die sexuelle Attraktivität der Männchen erhöht«, erklärt Stefan Leitner vom Max-Planck-Institut für Ornithologie in Seewiesen, der zusammen mit Forschern der Cardiff University die Auswirkungen der Chemikalien auf Singvögel untersucht hat.

Natürliche und künstliche Substanzen mit hormonähnlicher Wirkung (*endocrine disrupting chemicals*, EDC) kommen unter anderem in Siedlungsabwässern vor. Moderne Kläranlagen leiten diese Wässer durch biologische Filterbetten mit humusreichem Material. Darin bleiben die problematischen Stoffe zurück und reichern sich an. Große wirbellose Tiere wie Würmer, Insekten oder Schnecken in den Filterbetten enthalten deswegen bis zu tausendmal so viel EDC wie die ursprünglichen Abwässer.

Belastung mit hormonähnlichen Substanzen

Bei etlichen Arten von Singvögeln stehen solche Makroinvertebraten ganz oben auf dem Speisezettel. In Freilandbeobachtungen stellten Leitner und seine Kollegen fest, dass Stare fast die Hälfte ihres Nahrungsbedarfs daraus decken. Die Vögel sind daher beträchtlichen Mengen hormonähnlicher Substanzen

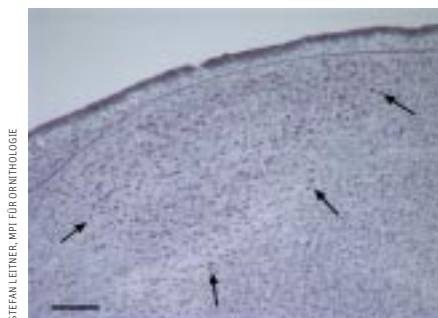
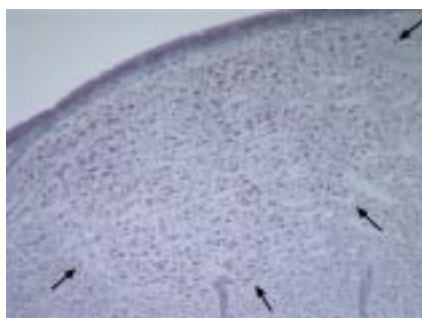


STEFAN LEITNER, MPI FÜR ORNITHOLOGIE

Stare ernähren sich auch von wirbellosen Tieren aus den Filterbetten von Kläranlagen, die hormonähnlich wirkende Substanzen angereichert haben. Solche Stoffe verbessern, wie sich nun zeigte, einerseits den Gesang der Vögel, schwächen andererseits aber ihr Immunsystem.

ausgesetzt. Dazu zählen auch Östrogene und damit verwandte Verbindungen. Sie sind bei Wirbeltieren an der Reifung der weiblichen Geschlechtsorgane und der Fortpflanzung beteiligt. Bei Singvögeln steuern sie außerdem die Entwicklung des Gesangskontrollzentrums im Vorderhirn (*higher vocal center*, HVC) in männlichen Tieren.

Dieser Bereich des Gehirns ist ausgesprochen plastisch. Zum Beispiel schwankt seine Größe, gesteuert von Hormonen, bei vielen Singvogelarten im Jahreslauf. Wie aus früheren Untersuchungen bekannt ist, stören Östrogenantagonisten wie DDT und seine Stoffwechselprodukte bei Rotkehlchen die Entwicklung des Gehirns und lassen



STEFAN LEITNER, MIT FÜR ÖKOTOXIKOLOGIE

Das Gesangskontrollzentrum im Vorderhirn – auf den Gehirnschnitten durch Pfeile markiert – ist bei Staren, deren Nahrung Substanzen mit hormonähnlicher Wirkung enthielt (links), deutlich vergrößert.

den Gesang verarmen. Im Umkehrschluss liegt deshalb die Vermutung nahe, dass die Zufuhr von Östrogenen mit der Nahrung die Virtuosität der Sänger steigern sollte. Aber haben hormonähnliche Verbindungen in ökologisch relevanten Konzentrationen tatsächlich diesen Effekt?

Erhöhte Fortpflanzungschancen durch besseren Gesang?

Um das zu prüfen, setzten Biologen um Shai Markman und Katherine Buchanan von der Cardiff University männliche Stare einer Mischung aus 17-beta-Östradiol, Bisphenol A und Phthalaten aus. Welche Mengen der hormonähnlichen Substanzen die Vögel unter natürlichen Bedingungen aufnehmen, bestimmten die Wissenschaftler, indem sie zunächst

den EDC-Gehalt von wirbellosen Tieren in den Filterbetten biologischer Klärstufen ermittelten. Durch Freilandbeobachtungen fanden sie dann heraus, wie viele solche Tiere ein Star im Schnitt frisst. Die daraus berechnete Tagesdosis wurde den Vögeln verabreicht.

Die Ergebnisse bestätigten die Vermutungen der Forscher. Im Vergleich zu östrogenfrei ernährten Staren vergrößerte sich das Volumen des für den Gesang zuständigen Hirnbereichs bei den Versuchstieren um rund ein Fünftel. Entsprechend steigerten sich Qualität und Quantität des Gesangs. Die Vögel trällerten nicht nur wesentlich mehr, sondern hatten auch ein größeres Gesangsrepertoire: Die Strophen wurden länger, und ihre Anzahl pro Stunde vervierfachte sich.

Das wirkte sich direkt auf die Fortpflanzungschancen der Tiere aus. Die Komplexität des Gesangs ist bei Staren ein zentrales Kriterium der Partnerwahl, und tatsächlich zeigten wild gefangene Weibchen eine deutliche Präferenz für das Zwischern der östrogenedopten

Männchen. Ob das tatsächlich auch einen Vorteil bei der Fortpflanzung bringt, bezweifelt Leitner jedoch: »Wir haben noch nicht prüfen können, wie sich die Belastung tatsächlich auf den Fortpflanzungserfolg auswirkt. Es kann sein, dass sich der Vorteil durch andere Effekte in sein Gegenteil verkehrt und die kontaminierten Vögel insgesamt weniger Nachkommen haben.«

Dafür spricht, dass die Östrogene auch einen weniger positiven Effekt zeigen: Sie schwächen das Immunsystem. Das demonstrierten die Forscher, indem sie das pflanzliche Protein Phytohämagglutinin in die Flügelunterseite der Tiere injizierten. Die Schwellung des Gewebes an der Einstichstelle ist ein Maß für die Stärke der Immunreaktion. Bei den mit Östrogenen behandelten Staren fiel sie deutlich schwächer aus. Weitere Versuche mit Schaf-Erythrozyten bestätigten die immunsuppressive Wirkung.

Diese Ergebnisse unterstreichen die Gefährlichkeit endokrin wirksamer Chemikalien – beweisen sie doch, dass solche Substanzen bei Konzentrationen, wie sie in der Umwelt auftreten, Verhalten, Anatomie und Immunsystem von Wirbeltieren beeinflussen können. Da sie über die Nahrungskette weitergereicht werden, ist das Problem sicher nicht auf Stare beschränkt. »Natürlich betreffen«, so Leitner, »unsere Ergebnisse letztendlich auch den Menschen.«

Lars Fischer ist Chemiker und freier Redakteur in Hamburg.

HOCHTEMPERATURSUPRALEITUNG ► Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Nach dem Kupfer die Eisenzeit?

Japanische Forscher haben nach über 20 Jahren einen neuen Typ von keramischen Hochtemperatursupraleitern entdeckt. Anders als die altbekannten Vertreter dieser Stoffklasse beruht er auf Eisen statt Kupfer.

Von Stefan Maier

Als Karl Müller und Johannes Bednorz im Jahr 1986 entdeckten, dass ein bestimmtes Seltenerdcuprat elektrischen Strom bei tiefen Temperaturen widerstandsfrei leitet, war das gleich aus zwei Gründen eine Sensation: Erstens lag die Sprungtemperatur, ab der die

Substanz supraleitend wurde, mit 35 Kelvin weit über dem seit den 1970er Jahren geltenden Rekord von 23 Kelvin; zweitens handelte es sich um eine Keramik, während alle bis dahin bekannten Supraleiter Metalle oder Legierungen waren. Schon ein Jahr später wurde die Entdeckung deshalb mit dem Nobelpreis gewürdigt.

Schnell stürzten sich Forschergruppen in aller Welt auf das neue, viel versprechende Material. Vor allem suchten sie die Sprungtemperatur weiter zu erhöhen. Das gelang mittels chemischer Dotierung, dem kontrollierten Einbringen von Atomen an bestimmten Stellen in der Elementarzelle des Kristalls: ein bisschen Thallium hier, ein bisschen Queck-

silber dort. Zwar mutet das Verfahren ein wenig wie moderne Alchemie an, doch war es sehr erfolgreich. Schließlich hatte die Sprungtemperatur 138 Kelvin erreicht – ein Wert, den noch ein Jahrzehnt zuvor niemand in seinen kühnsten Träumen für möglich gehalten hätte.

Mit den praktischen Fortschritten konnten die theoretischen allerdings nicht mithalten. Schon früh war klar, dass sich die Supraleitung in den keramischen Materialien nicht mit der gängigen Theorie aus den 1950er Jahren erklären ließe. Seither werden diverse Alternativen diskutiert. Aber noch immer ist keine davon allgemein anerkannt. Keine davon kann auch erklären, wieso ausgerechnet Seltenerd-Kupferoxid-Keramiken Hochtemperatursupraleitung zeigen. Welche Besonderheit ist es, die ihnen diese Fähigkeit verleiht? Liegt es am Kupfer oder allgemein an der chemischen Zusammensetzung? Oder ist die Kristallstruktur, in der ebene Kupfer-Sauerstoff-Schichten als Leitungsbahnen der Elektronen dienen, für den Effekt verantwortlich?

Mehr als 20 Jahre lang blieben diese Fragen trotz intensiver Forschung offen. Doch nun ist die Chance auf Antworten deutlich gestiegen; denn überraschend haben Hideo Hosono und seine Kollegen am Tokyo Institute of Technology einen neuen keramischen Supraleiter mit völlig anderer Zusammensetzung entdeckt (*Journal of the American Chemical Society*, Bd. 130, S. 3296). Als Übergangsmetall enthält er Eisen statt Kupfer. Zwar ist seine Sprungtemperatur mit etwa 26 Kelvin im Vergleich zu derjenigen der bekannten Cuprate nicht berauschend, doch das kann die Begeisterung, welche die Entdeckung allenthalben ausgelöst hat, nicht trüben. Schon allein das Auffinden eines neuen Typs von Hochtemperatursupraleiter nach so langer Zeit elektrisiert die Festkörperphysiker.

Hosonos Gruppe hatte zufällig festgestellt, dass bestimmte Verbindungen von Eisen- oder Nickel mit Arsen und Seltenerdoxid bei sehr tiefen Temperaturen – unterhalb fünf Kelvin – jegli-

chen elektrischen Widerstand verlieren. Eine davon enthielt, wie die Röntgenbeugung an pulverisierten Proben ergab, wechselnde Schichten aus Eisenarsenid und Lanthanoxid (Bild unten). Das erinnerte sehr an den Aufbau des Cuprats von Müller und Bednorz mit seinen alternierenden Lagen von Kupfer- und Lanthanoxid-Schichten. Damals hatte sich durch Dotieren die Sprungtemperatur drastisch anheben lassen.

Frischer Wind bei Supraleitern

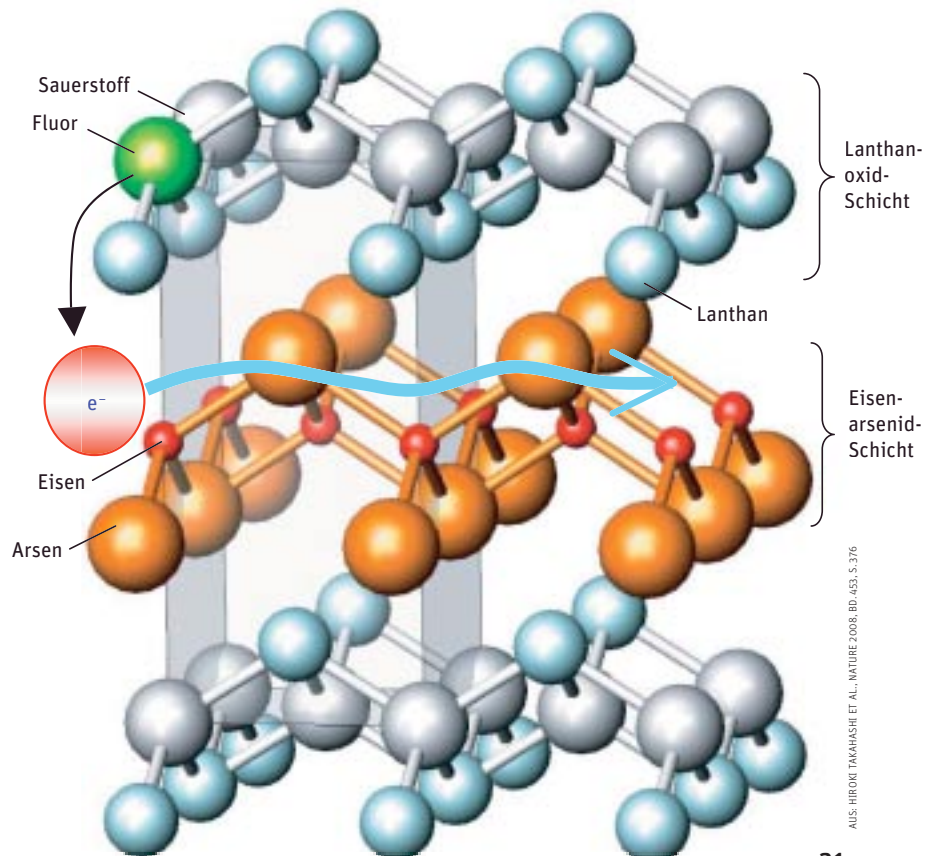
Hosonos Team versuchte deshalb denselben Trick und ersetzte einen kleinen Teil der Sauerstoff- durch Fluoratome. Tatsächlich stieg daraufhin die Sprungtemperatur auf mehr als den fünffachen Wert: 26 Kelvin. Als optimal erwies sich ein Fluorgehalt von elf Atomprozent.

Für die Theoretiker ist die Existenz eines zweiten Typs von keramischen Hochtemperatursupraleitern ein Geschenk des Himmels. Der Vergleich mit den Cupraten verspricht wertvolle Hinweise auf den Mechanismus des widerstandslosen Elektronenflusses. So bestehen etliche Gemeinsamkeiten wie die schon erwähnte Schichtstruktur sowie die Beteiligung eines Übergangs- und eines Seltenerdmetalls. In beiden Fällen steigert eine Dotierung, die zu einem kompakteren Kristallgitter und einer gemischten Valenz (Wer-

tigkeit) des Übergangsmetalls führt – die formale Oxidationsstufe des Eisens liegt zwischen eins und zwei und die des Kupfers zwischen drei und vier –, die Sprungtemperatur. Zudem sind beide Verbindungstypen in der Wärme nur schlechte elektrische Leiter.

Allerdings gibt es auch Unterschiede. So ist die supraleitende Kupferoxidschicht in den Cupraten flach, weil sich die Sauerstoff- quadratisch um die Kupferatome anordnen. Bei dem neuen Substanztyp sind die Eisenionen dagegen tetraedrisch von Arsenatomen umgeben, so dass sich eine gewellte Schicht ergibt. Elementares Eisen ist ferromagnetisch, Kupfer hingegen nicht. Alle diese Feinheiten gilt es nun bei der Suche nach einer einheitlichen Theorie der Hochtemperatursupraleitung zu berücksichtigen.

Sicher ist, dass die Leitungselektronen Paare bilden müssen, um ohne Kollision mit den Atomen durch das Gitter gleiten zu können. Bei herkömmlichen Tieftemperatursupraleitern sorgt eine Kopplung mit Gitterschwingungen für die Paarung. Die zunehmende thermische Bewegung beim Erwärmen stört diese Kopplung jedoch. Deshalb ist die Mehrzahl der Forscher davon überzeugt, dass bei den Hochtemperatursupraleitern kompliziertere Wechselwirkungsprozesse, etwa zwischen den Spins der Elektronen, eine Rol-



Im neuen keramischen Hochtemperatursupraleiter wechseln sich Schichten aus Lanthanoxid und Eisenarsenid ab. Rund elf Prozent der Sauerstoffatome sind durch Fluor ersetzt. Dieses besitzt ein zusätzliches Elektron, das in die Eisenarsenid-Schicht übergeht und dort für die Supraleitung sorgt.

le spielen. Die Eisenarsenide bieten die Gelegenheit zum Testen solcher Theorien an einem völlig anderen Material.

Doch nicht nur den Theoretikern eröffnet der neue Substanztyp glänzende Aussichten. Auch all jene, die auf der Jagd nach einem Supraleiter bei Raumtemperatur sind, wittern nun wieder Morgenluft. Vielleicht wiederholt sich ja die Geschichte von 1986, und die Sprungtemperatur lässt sich mit trickreichen Modifikationen und Verfeinerungen binnen Kurzem erheblich steigern.

Erste Anzeichen dafür gibt es. So berichtete Hosonos Team schon kurz nach seiner Originalveröffentlichung, dass sich die Sprungtemperatur seines Eisenarsenid-Supraleiters unter einem Druck von vier Gigapascal (40 000-fachem Atmosphärendruck) auf 43 Kelvin erhöht.

Gleichzeitig meldete eine Gruppe um Zhong-Xian Zhao vom Physikinstitut der Chinesischen Akademie der Wissenschaften in Peking gar einen Wert von 53,5 Kelvin für ein Material, in dem das Lanthan durch Gadolinium ersetzt ist. Wie weit sich die Sprungtemperatur noch nach oben treiben lässt, ist offen. Doch nachdem es um die Cuprate in letzter Zeit still geworden war, hat die Entdeckung des Eisenarsenid-Supraleiters dem Gebiet neues Leben eingehaucht.

Im Hinblick auf praktische Anwendungen scheint das eisenhaltige Material Vorteile zu haben. Zwar ist es als Keramik ebenso wie die Kupferoxide spröde, aber deutlich härter und bruchfester. Hinzu kommt seine ziemlich einfache Synthese. Die japanischen Forscher erhitzen ein pulverförmiges Gemisch aus

Arseniden und Oxiden von Eisen und Lanthan in einer mit Argon gefüllten Glasröhre 40 Stunden lang auf 1250 Grad Celsius. Zur Dotierung setzten sie kleine Mengen von Lanthanfluorid zu.

In Sachen Hochtemperatursupraleiter darf also wieder gehofft werden – auf eine endgültige Klärung des Mechanismus und auf ein Material, das die enormen Vorteile des verlustfreien Stromtransports schon bei Temperaturen bietet, die keine aufwändige und teure Kühlung erfordern. Nicht zuletzt scheint es plötzlich wahrscheinlich, dass sich unter den Übergangsmetallverbindungen mit Schichtstruktur noch etliche weitere Supraleiter verbergen, die der Entdeckung harren.

Stefan Maier ist Professor für Physik am Imperial College in London.

TUMORTHERAPIE ► Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Nanogel gegen Krebs

US-Pharmazeuten haben eine winzige Kapsel für Antitumorwirkstoffe entwickelt, die auch von resistenten Krebszellen aufgenommen wird und in deren Innern nur genau eine tödliche Dosis Zytostatikum freisetzt. Danach kann sie weitere Tumorzellen abtöten.

Von Brigitte Osterath

Gängige Chemotherapeutika bekämpfen Krebszellen, indem sie in deren Teilung eingreifen. Das hat den Nachteil, dass sie auch für bestimmte Arten gesunder Körperzellen giftig sind und so beträchtliche Nebenwirkungen verursachen. Außerdem verfügen resistente Krebszellen über Mechanismen, um einer für sie tödlichen Substanz den Zutritt zu verwehren. Ideal wäre es deshalb, den Wirkstoff in eine Hülle zu stecken, die gesunde Zellen vor dem toxischen Medikament schützt, aber für Krebszellen attraktiv ist, so dass auch resistente Vertreter das Paket samt giftigem Inhalt aufnehmen und öffnen.

An solchen Trojanischen Pferden arbeiten Pharmazeuten schon länger. Als Verpackung eignen sich beispielsweise nanometergroße Polymere, die Wirkstoffe in ihrem Innern transportieren, nach außen hin aber von einer unauffälligen Hülle umgeben sind. Einige solche Nanopartikel haben es schon bis in klinische Studien geschafft.

Als Eintrittskarte in Krebszellen kann man beispielsweise Folsäure auf der Oberfläche derartiger Minikapseln anbringen. Dieses Vitamin wird für die Synthese neuer DNA im Verlauf der Zellteilung gebraucht. Wuchernde Krebszellen, die sich besonders oft teilen, haben einen erhöhten Bedarf daran. Deshalb tragen sie bei bestimmten Tumorarten – so den meisten Formen von Eierstockkrebs – besonders viele Folat-rezeptoren auf ihrer Membran. Auf diesem Weg können sich mit Folsäure bestückte Nanopartikel Zugang zu resistenten Krebszellen verschaffen.

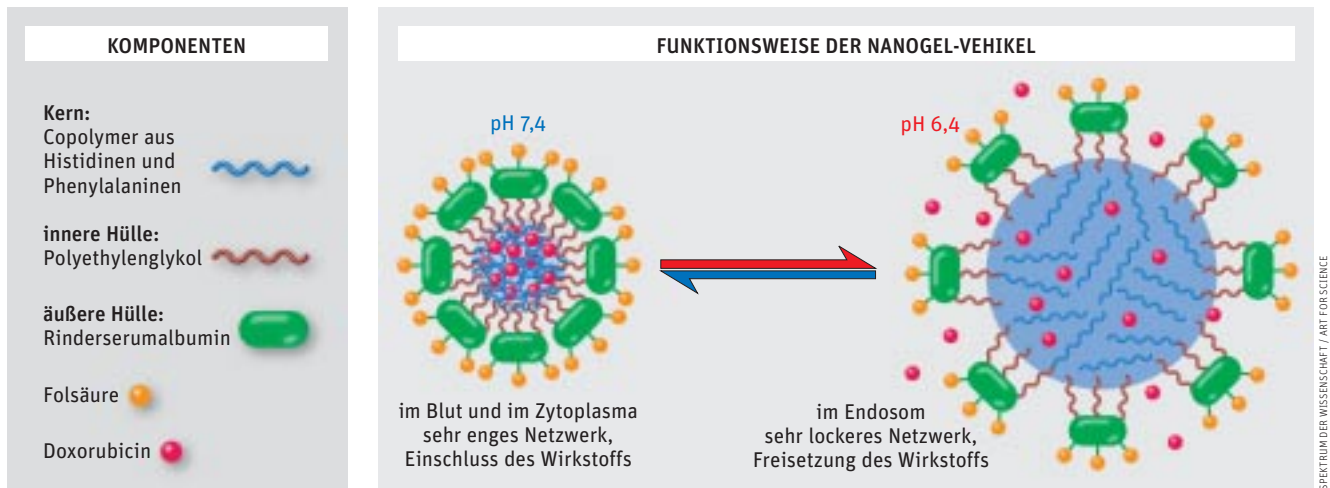
Aber wie wird der Wirkstoff anschließend freigesetzt? Eine Forschergruppe um You Han Bae an der University of Utah in Salt Lake City hat jetzt einen raffinierten Trick dafür entwickelt (*»Angewandte Chemie«, Bd. 120, S. 2452*). Er bietet den zusätzlichen Vorteil, dass jeweils nur so viel Chemotherapeutikum abgegeben wird, wie nötig ist, um die Krebszelle zu töten. Nach deren Absterben kann somit kein überschüssiges Gift in die Umgebung oder den Blutkreislauf

gelangen und gesunde Zellen schädigen. Die Nanopartikel selbst entweichen unversehrt vom Tatort. Sie können dann in benachbarte Tumorzellen eindringen, um ihr Zerstörungswerk fortzusetzen – so lange, bis ihr Vorrat an Giftstoff aufgebraucht ist.

Raffiniertes Trojanisches Pferd

Die Partikel der US-Forscher enthalten einen Wasser abweisenden Kern, in dem das Antitumormittel Doxorubicin untergebracht ist. Er wird von einem so genannten Block-Copolymer aus Histidin und Phenylalanin gebildet. Das Verhältnis zwischen den beiden Aminosäuren bestimmt den so genannten Säureexponenten (pK_s -Wert), der angibt, wie viele Säuregruppen an den Seitenketten des Polymers unter physiologischen Bedingungen ein Proton angelagert haben. Den Kern umschließt eine hydrophile Hülle aus Polyethylenglykol und dem Protein Rinderserumalbumin. An sie ist die Folsäure gekoppelt.

Auf Grund ihres Aufbaus reagieren diese Nanopartikel empfindlich auf den



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ART FOR SCIENCE

Die neu entwickelten Nanopartikel tragen als Köder für Krebszellen Folatgruppen auf der Oberfläche. In saurer Umgebung schwellen sie an, so dass ihre Hülle undicht wird und das enthaltene Zellgift austritt.

pH-Wert (Säuregrad) ihrer Umgebung. Beträgt dieser 7,4 – wie im Blut oder innerhalb des Zellplasmas –, so haben sie einen Durchmesser von nur 55 Nano-

metern. Bei einem pH-Wert von 6,4 oder niedriger – also unter sauren Bedingungen – werden die Histidinreste im Innern des hydrophoben Kerns jedoch protoniert und damit positiv geladen. Als Folge davon stoßen sie sich gegenseitig ab, weshalb das Nanogel stark aufquillt. Die Partikel erreichen so einen Durchmesser von 355 Nanometern und damit ungefähr das 270-Fache ihres ursprünglichen Volumens.

Das hat eine entscheidende Konsequenz: Während in der kompakten Form das Doxorubicin fest eingeschlossen ist, wird die Hülle undicht, wenn sie sich beim Schwellen der Teilchen dehnt, und der gespeicherte Wirkstoff kann entweichen. Der Vorgang ist reversibel. Steigt der pH-Wert, ziehen sich die Partikel wieder zusammen.

Auf der pH-abhängigen Größenänderung der Nanoteilchen beruht ihre

ANZEIGE

Konzentrierter. Belastbarer. Ausgeglichener.

Aktivieren Sie Ihre Kraftwerke der Konzentration.

Konzentration ist Ihre Eintrittskarte zu geistiger Fitness – und die können Sie stärken und zur Höchstform bringen. Ihr Gehirn hat das Potenzial, ein Leben lang konzentriert und geistig aktiv zu sein. Die Energie dazu liefern Ihnen Ihre 100 Milliarden Gehirnzellen. Aktivieren Sie Ihre Gehirnzellen – jetzt NEU auch mit **Tebonin® konzent 240 mg**.


Tebonin®

Mehr Energie für das Gehirn.
Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit.

Tebonin® konzent 240 mg 240 mg/Filmtablette. Für Erwachsene ab 18 Jahren. **Wirkstoff:** Ginkgo-biloba-Blätter-Trockenextrakt. **Anwendungsgebiete:** Zur Behandlung von Beschwerden bei hirnnorganisch bedingten mentalen Leistungsstörungen im Rahmen eines therapeutischen Gesamtkonzeptes bei Abnahme erworbener mentaler Fähigkeit (demenzielles Syndrom) mit den Hauptbeschwerden: Rückgang der Gedächtnisleistung, Merkfähigkeit, Konzentration und emotionalen Ausgeglichenheit, Schwindelgefühle, Ohrensausen. Bevor die Behandlung mit Ginkgo-Extrakt begonnen wird, sollte geklärt werden, ob die Krankheitsbeschwerden nicht auf einer spezifisch zu behandelnden Grunderkrankung beruhen. Zu Risiken und Nebenwirkungen lesen Sie die Packungsbeilage und fragen Sie Ihren Arzt oder Apotheker. Dr. Willmar Schwabe Arzneimittel, Karlsruhe.

Stand: Januar 2008 T/01/08/1

Stärkt Gedächtnisleistung und Konzentration.

Ginkgo-Spezialextrakt
EGb 761®

- Pflanzlicher Wirkstoff
- Gut verträglich

NEU



Mit der Natur.
Für die Menschen.

Dr. Willmar Schwabe Arzneimittel
www.tebonin.de

Springers Einwürfe

Wie natürlich ist der Logarithmus?

Amazonas-Eingeborene haben angeborenen Zahlensinn bewahrt.

Über dem Eingang zur modernen Wissenschaft prangt Galileis Satz: »Das Buch der Natur ist mit mathematischen Symbolen geschrieben.« Wir haben gelernt, Entfernungen und Zeitabstände in Diagramme einzutragen, von Raumzeitkurven Differenziale und Integrale zu bilden. Mein Physikstudium war die ausgiebige Bestätigung für Galileis monumentalen Satz.

Doch gelegentlich kam es mir wie ein Wunder vor, dass die Mathematisierung der Naturprozesse überhaupt funktionieren konnte. Was hatten die Zahlen in meinem Kopf, bei denen ich mich nicht selten verrechnete, mit Vorgängen in der Außenwelt zu schaffen? Wieso ist die Natur so mathematisch oder die Mathematik so natürlich? Dieses philosophische Rätsel wird derzeit – wie so manch anderes Jahrhundertproblem – Gegenstand der Hirnforschung.

Grundvoraussetzung für das Beziffern räumlicher Verhältnisse ist eine Gabe unseres Gehirns, die der französische Neurowissenschaftler Stanislas Dehaene den Zahlensinn nennt: eine intuitiv hergestellte Beziehung zwischen Zahl und Raum. Schon dreijährige Kinder ordnen vorgesprochene Zahlen auf einer Geraden nach der Größe – kleinere Zahlen links, größere rechts. Wie man durch bildgebende Verfahren weiß, sitzt der Zahlensinn in einer bestimmten Hirnregion, die auf das Kodieren räumlicher Parameter wie Größe, Ort und Blickrichtung spezialisiert ist.

In psychologischen Experimenten erwies sich dieser Zusammenhang zwischen Zahl und Raum als linear: Erwachsene ordnen Zahlen zwischen 1 und 100 auf einer endlichen Zahlenstrecke stets proportional zu deren Größe an, also 25 am Ende des ersten Viertels, 50 in der Mitte und so fort. Verallgemeinert ergibt das die vertraute Zahlengerade, auf der die natürlichen Zahlen von Null bis unendlich von links nach rechts in immer gleichem Abstand aufeinanderfolgen.

Dehaene wollte nachprüfen, ob diese Linearität angeboren oder kulturell erworben ist. Zu diesem Zweck erforschte er den Zahlensinn einer isoliert am Amazonas lebenden Eingeborenengruppe. Die Mundurucu kennen nur Worte für die Zahlen 1 bis 5; bei mehr Objekten sprechen sie pauschal von »einigen« oder »vielen«. Mit ihren kleinen Zahlen addieren und subtrahieren sie zuverlässig, können aber auch große Mengen mit bis zu 80 Objekten gut nach Größen ordnen – zwar nur angenähert, aber auch nicht schlechter als europäische Kontrollprobanden.

Dehaene bat die Mundurucu nun, die Größe unterschiedlicher Punktmengen – zwischen 1 und 10, in einem anderen Versuch zwischen 10 und 100 – auf einem Geradenstück anzuzeigen. Seine Probanden machten das geschickt, aber mit überraschendem Ergebnis. Sie ordneten die Zahlen nicht linear, sondern logarithmisch an (*»Science«, Bd. 320, S. 1217*). Bei Zahlen zwischen 1 und 10 setzten die Mundurucu also beispielsweise die 5 nicht in die Mitte der Strecke, sondern wie auf einer logarithmischen Skala mehr dem Ende zu. Auch die 50 landete nicht halbwegs zwischen 1 und 100, sondern stets näher bei 100. Da europäische Kindergartenkinder große Zahlen auf die gleiche Weise »stauchen«, zieht Dehaene den Schluss: Unser angeborener Zahlensinn funktioniert logarithmisch – wie unser Gehör, das Lautstärken nach logarithmischen Dezibel wahrnimmt – und wird erst durch kulturelle Einflüsse zur linearen Zahlengeraden gestreckt (siehe auch »Physikalische Unterhaltungen« auf S. 36).

Eigentlich schade, denke ich nun, dass ich meinen angeborenen Zahlensinn durch den Schuldrill eingebüßt habe. Vielleicht hätte ich im physikalischen Praktikum, statt damals umständlich mit Logarithmentafeln zu hantieren, das meiste im Kopf rechnen können.



Michael Springer

Funktionsweise. Hat sich eines von ihnen an den Folatrezeptor einer Zelle gebunden, stülpt diese ihre Membran zu einem Bläschen ein, das den Rezeptor plus Partikel enthält, und schnürt es ab. Das resultierende Endosom wandert ins Innere der Zelle. Dabei werden durch spezielle Pumpen Protonen eingeschleust, die den pH-Wert in dem Bläschen auf bis zu 6 erniedrigen.

Infolgedessen quillt das Nanoteilchen auf und gibt seinen Wirkstoff ab. Schließlich sprengt es auf Grund seiner enormen Größe das Endosom und gelangt mit dem freigesetzten Medikament ins Zellplasma. Hier zieht es sich wegen des höheren pH-Werts wieder zusammen und setzt keinen Wirkstoff mehr frei.

Eine Krebszelle nimmt nun so lange Nanopartikel auf, bis genau die für sie tödliche Menge an Doxorubicin in ihr freigesetzt wurde. Dann stirbt sie ab und löst sich auf. Damit kommen auch die Nanopartikel wieder frei und können von benachbarten Tumorzellen aufgenommen werden und diese ebenfalls zerstören. Dem Forscherteam gelang es, zwei solcher Zyklen mit denselben Teilchen durchzuführen. Erst danach war die Menge an mitgeführtem Wirkstoff erschöpft.

Natürlich nehmen auch gesunde Körperzellen vereinzelt Nanopartikel auf und können so manchmal ebenfalls eine tödliche Giftdosis abbekommen. Weil sie nur wenige Folatrezeptoren auf der Oberfläche tragen, geschieht das jedoch vergleichsweise selten. Die Verpackung des Zytostatikums lohnt sich vor allem bei resistenten Krebszellen; denn in sie könnte das nackte Medikament gar nicht eindringen, so dass es ausschließlich gesunde Körperzellen angreifen würde.

Bisher haben die Forscher die Wirksamkeit der Nanopartikel nur an Zellkulturen nachgewiesen. Nun müssen Tests in lebenden Organismen folgen. Erst dann lassen sich auch Fragen wie die nach dem Abbau der Teilchen im Körper oder der Art ihrer Verabreichung klären. Falls auch die In-vivo-Tests erfolgreich sind, wäre das nicht nur ein großer Fortschritt bei der Krebsbekämpfung – dann könnten die Nanopartikel auch als Trojanische Pferde für andere Wirkstoffe und zur Behandlung anderer Krankheiten interessant sein.

Brigitte Osterath promoviert im Fach Chemie am Forschungszentrum Jülich.