

Was ist Leben?

M. Spitzer, Ulm

Was ist Leben? – „Dumme Frage!“ werden viele meinen. „Leben, das sind Pflanzen, Tiere und Menschen, es gibt vielfältige Formen und man sieht doch, was da alles wächst und krabbelt, frisst und ausscheidet, sich fortpflanzt, sich bewegt und vielleicht sogar Geist hervorbringt.“ Wer in der Schule in Chemie aufgepasst hat, könnte noch hinzufügen, dass es zu den gesicherten Erkenntnissen der organischen Chemie gehört, dass sämtliches Leben auf der Erde im Wesentlichen aus sechs Elementen besteht, nämlich aus Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Stickstoff (N), Sauerstoff (O), Phosphor (P) und Schwefel (S). Aus diesen wenigen Elementen sind die Bausteine aller Lebewesen – Proteine, Fette und Nucleinsäuren – gemacht.

Nicht nur bei der begrifflichen Bestimmung von Leben als

- Aufnahme, Umsetzung und Abgabe von Materie und Energie (Metabolismus),
- Fortpflanzung (Genetik),
- Bewegung und
- Informationsverarbeitung,

sondern auch beim chemischen Aufbau und sogar bei der begrifflichen Abgrenzung gegenüber dem Unbelebten gibt es jedoch durchaus Probleme. Die Sache mit dem Leben ist also, kurz gesagt, nur dann einfach, wenn man keine Ahnung hat bzw. weder forscht, noch denkt. Dann ist sie aber auch langweilig! Wie aufregend die Frage danach sein kann, wie Leben ein- und abzugrenzen ist, sei im Folgenden anhand von Beispielen aus der jüngeren und jüngsten Vergangenheit dargestellt.

Zur Grenze von Leben gegenüber dem Unbelebten: Prionen

Geht man die Leiter der Lebewesen vom komplexen zum einfachen abwärts, so stößt man letztlich auf Einzeller, auch Eukaryoten (bzw. Eukaryonten) genannt (karyon, gr. Kern). Noch kleiner sind Bakterien, die keinen echten Zellkern besitzen und deshalb auch Prokaryoten (Prokaryonten) genannt werden. Bakterien wurden erstmals von Antoni van Leeuwenhoek im Jahr 1676 mithilfe eines selbst gebauten Mikroskops entdeckt und wissenschaftlich beschrieben. Trotz mehr als drei Jahrhunderten Forschung geht man davon aus, dass die meisten Bakterien auf unserem Planeten nicht bekannt sind.

Noch einfacher und noch kleiner als Bakterien sind Viren. Diese können sich nicht selbst vermehren, denn sie bestehen nur aus einer Eiweißhülle und einer darin verpackten Nucleinsäure, welche die Informationen zum Bau des Virus enthält. Zur Vermehrung brauchen Viren andere Lebewesen (vom Menschen bis hinunter zu den Bakterien), deren Stoffwechselmaschinerie sie benutzen, um die Information in die Tat umzusetzen und sich selbst zu vermehren. Ob man Viren als Lebewesen bezeichnet hängt davon ab, was man Leben nennt. Einerseits bestehen sie aus zwei der Bausteine, die alle Lebewesen charakterisieren, nämlich Eiweißkörper und Nucleinsäuren; andererseits besitzen sie keinen Metabolismus und bewegen sich nicht.

Ohne anderes Leben sind Viren letztlich also nichts weiter als sehr komplexe Moleküle.

Ohne anderes Leben sind Viren letztlich also nichts weiter als sehr komplexe Moleküle. Treffen diese Moleküle auf ein Lebewesen, so veranlassen sie das Lebewesen, viele dieser Moleküle zu produzieren.

Noch einfacher als Viren sind Prionen, bei denen es sich um nichts weiter als um Eiweißkörper handelt. Diese haben jedoch

die Eigenschaft, auf verschiedene Weise zusammengefaltet, also in verschiedenen Formen, vorzuliegen. In der einen Form kommen sie in gesundem Gewebe ganz normal vor, in der anderen Form bewirken sie Krankheiten. Gefährlich sind diese krankhaft gefalteten Formen der Prionen deswegen, weil sie allein durch die Art ihrer Faltung dazu führen, dass sich andere gesunde Prionen so wie sie, also krankhaft, falten. Dadurch werden nicht pathogene Prionen in pathogene Prionen umgewandelt. Der Kontakt mit pathogenen Prionen gleicht damit der Übertragung (Transmission) einer „Infektion“: Die Krankheit breitet sich im Körper aus, betrifft vor allem das Gehirn und führt dort zu einer schwammartigen (spongiformen) Veränderung des Gehirngewebes (Enzephalopathie). Bislang existiert keine Therapie, weswegen die übertragbaren schwammartigen Gehirnerkrankheiten (Transmissible Spongiforme Enzephalopathie, TSE) tödlich verlaufen.

Die am längsten bekannte Prionenerkrankung ist die Traberkrankheit (Scrapie; engl. to scrape, kratzen) der Schafe, die populärste ist der „Rinderwahn“ (Bovine Spongiforme Enzephalopathie, BSE, zu deutsch etwa schwammartige Gehirnerkrankung der Rinder). Die humanmedizinisch wichtigste Prionenerkrankung ist hierzulande die Jakob-Creutzfeldtsche Erkrankung (engl. Creutzfeldt Jakob Disease, CJD), eine sehr seltene (ein Fall pro Jahr auf eine Million Einwohner) schwere Form der Demenz, die meist innerhalb eines halben Jahres mit dem Tod endet. In wissenschaftlicher Hinsicht ist die Krankheit Kuru besonders wichtig, eine bei einem unter Steinzeitbedingungen lebenden Stamm auf Papua-Neuguinea häufige Krankheit, die sich in Bewegungsstörungen äußert und innerhalb von Monaten tödlich verläuft („Kuru“ heißt in der Sprache der einheimischen Bevölkerung „Muskelzittern“). Sie wird durch den Verzehr des Gehirns eines infizierten Verstorbenen übertragen, setzt also Kannibalismus voraus. Männer, die beim kannibalistischen Verzehr der Verstorbenen die „besseren“ Stücke abbekamen (das Muskel-

Nervenheilkunde 2011; 30: 7–11

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. Dr. Manfred Spitzer
Universitätsklinikum Ulm
Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie III
Leimgrubenweg 12-14, 89075 Ulm

fleisch) waren seltener von Kuru betroffen als Frauen und Kinder, die sich mit den Innereien und damit unter anderem mit dem Gehirn begnügen mussten. Nachdem in den 1950er-Jahren der Kannibalismus offiziell verboten worden war, nahm die Häufigkeit der Krankheit entsprechend ab. Zudem konnte man durch klinische und genealogische Untersuchungen bei mehr als 3000 Mitgliedern des Stammes (von denen 709 an kannibalistischen Leichenfeiern teilgenommen und 152 verstorben waren) eine Mutation des Prionproteins am Codon 129 nachweisen, die sich innerhalb des Stammes rasch ausbreitete und vor der Kuru-Krankheit schützt (10). Die Erforschung dieser komplexen Zusammenhänge und der Prionen als Infektionsweg wurde 1976 mit dem Nobelpreis an den US-amerikanischen Virologen Daniel Carleton Gajdusek ausgezeichnet.

Bei der Frage, ob Prionen Lebewesen sind, bleibt also einzig die Berufung auf die Tatsache, dass es sich bei ihnen um Eiweißkörper handelt und die Tatsache, dass sie offensichtlich eine Art Information enthalten, die sie an andere Prionen weitergeben können (die Art wie sie gefaltet sind) übrig. Zu allem anderen, was Lebewesen sonst normalerweise auch können, sind Prionen nicht fähig. Man bezeichnet sie daher auch einfach als Giftstoffe mit virusähnlichen Eigenschaften. Dann wären Viren genau genommen auch „nur“ Giftstoffe.

Gift als Nahrung? – Arsen zum Leben

Wo wir gerade beim Gift sind: Arsen gehört zu den giftigsten Stoffen überhaupt: Für den Menschen können Dosen ab 60 mg tödlich wirken, sodass Arsen seine einschlägige Bekanntheit nicht zuletzt sehr vielen Giftmorden verdankt. Es war über lange Zeit leicht zugänglich und ist relativ geschmacksarm, wenn auch nicht völlig geschmackslos, wie der New Yorker Forensiker Rudolph Witthaus in heroischen Geschmackstestsversuchen sowie durch Befragen von 822 überlebenden Giftopfern bereits im vorletzten Jahrhundert herausfand (3). Ebenso wie unser Wissen über Bakterien, aber vor allem Viren und Prionen, die Grenze des Lebendigen kräftig verwaschen haben, zeigt eine neue

Studie, dass auch die Chemie des Lebens möglicherweise in weiteren Grenzen liegt, als man bislang ahnte. Die Wissenschaftlerin Felisa Wolfe-Simon am astrobiologischen Institut der NASA züchtete Bakterien aus dem giftigen Schlamm eines an der Ostgrenze von Kalifornien gelegenen Salzsees (Mono Lake) (17). Der Schlamm dieses Sees ist reich an Arsen, enthält aber dennoch Bakterien, und es gelang nicht nur das einfache Züchten, sondern vor allem das weitere Züchten im Labor, wobei dem Nährmedium immer weniger Phosphor beigefügt wurde.

Die Autoren der im Fachblatt *Science* publizierten Arbeit gehen von der Überlegung aus, dass Arsen im Periodensystem der Elemente direkt unterhalb von Phosphor gelegen ist und ähnliche chemische Eigenschaften wie Phosphor hat. Es könnte somit sein, dass manche Lebewesen den Phosphor in ihren strukturellen Bauteilen durch Arsen ersetzen können, dass es sich also für sie beim Arsen nicht um Gift, sondern um ein lebensnotwendiges Element handelt. Auch wenn die Befunde noch heftig und kontrovers diskutiert werden (9), besteht kein Zweifel daran, dass man hier einer Lebensform auf die Spur gekommen ist, die gelernt hat, mit einem hochgiftigen Stoff auf ganz kreative Weise umzugehen. Wenn sich bestätigt, dass das gefundene Bakterium (Halomonadaceae, Stamm GFAJ-1) tatsächlich Arsen in seine Bausteine (Proteine, Nukleinsäuren) einbaut, würde dies für die Möglichkeit von völlig anderen Lebensformen sprechen, als wir diese bisher kennen. Dann wäre es mit dem CHNOPS-Chauvinismus wohl endgültig vorbei¹.

Eine Grenze, die nicht existiert: Pflanzentiere

Man unterscheidet bekanntlich Pflanzen von Tieren dadurch, dass Tiere ihre Energie durch das Aufnehmen von Pflanzen oder

anderen Tieren bekommen, wohingegen Pflanzen mittels des grünen Blattfarbstoffes Chlorophyll aus Licht, CO₂ und Wasser energiereiche organische Verbindungen wie beispielsweise Zucker oder Stärke herstellen. Diese Fähigkeit zur Fotosynthese (Zusammenfügung durch Licht) wurde von den Pflanzen im Laufe der Evolution dadurch erworben, dass vielzellige Organismen sich die Cyanobakterien, die den Pflanzenfarbstoff Chlorophyll enthalten, einverleibten und sie zu zellulären Organellen machten. Auch andere Organellen, beispielsweise die Mitochondrien, sind Produkte eines ähnlichen Schicksals von Bakterien, die von Zellen aufgenommen wurden, um eine bestimmte Funktion zu realisieren.

Christina Agapakis (1) von der Harvard Universität injizierte Cyanobakterien in befruchtete Eier des Zebrafisches. Zur ihrer Verwunderung (11) überlebten die Bakterien (!), trugen allerdings wenig zur Energieversorgung der Fische bei. Dies ist bei entsprechenden „Experimenten“ in der Natur anders, gibt es doch eine Reihe von Tieren, die einen Teil ihrer Energie durch Fotosynthese gewinnen. Tropische Korallen beispielsweise, manche Schwämme, Anemonen und andere im Meer lebende wirbellose Tiere können ihren Kalorienbedarf über Fotosynthese teilweise decken. Man könnte nun meinen, dass diese Tiere, die nicht nur aussehen wie Pflanzen, sondern sich zudem nicht von der Stelle bewegen, sich eben auch „chemisch“ wie Pflanzen verhalten. Dies muss jedoch nicht so sein. Manche (höchst mobilen) Meeresschnecken beispielsweise nehmen Cyanobakterien mit der Nahrung auf und speichern sie innerhalb der Zellen ihrer Darmwand. Da der Darm den ganzen Körper der Meeresschnecke durchzieht, sind sie damit nicht nur grün, sondern auch in der Lage, in großem Stil Fotosynthese zu betreiben. Sie leben also zumindest teilweise vom Licht.

Leben aus der Retorte

Die künstliche Erschaffung von Leben aus unbelebter Materie wurde lange als unerreichter und vermeintlich unerreichbarer heiliger Gral der Erforschung des Lebens

¹ Bereits im Jahr 1973 hat der Astrophysiker Carl Sagan die bisherige Konzentration der Suche nach Leben auf die genannten Elemente entsprechend bezeichnet, zumal in der philosophischen Diskussion der Ausdruck „Kohlenstoff-Chauvinist“ für Leute, welche die Idee von bewussten Computern nicht mögen, von den Funktionalisten bereits seit Langem eingeführt ist (13).

bezeichnet. Es ist wahrscheinlich kein Zufall, dass einer der für die Entschlüsselung des menschlichen Genoms, das auch als die Bibel des Lebens bezeichnet wurde, wesentlichen Wissenschaftler – Craig Venter – sich nach dem Entziffern des Book of Life (noch ein viel gebrauchter Name für das menschliche Genom) diesem Gral zuwandte. Im Jahr 2010 war es dann soweit: In einer viel beachteten, in *Science* publizierten Arbeit gelang es einem internationalen Team um Craig Venter erstmals, das Genom eines Organismus zu synthetisieren (also chemisch herzustellen), dieses Genom in eine Zelle, aus der zuvor sämtliches genetisches Material entfernt wurde, einzusetzen, und nachzuweisen, dass der auf diese Weise „künstlich“ hergestellte Organismus lebensfähig war. „Leben aus der Retorte“, wie man dieses Ziel über lange Zeit auch nannte (mit Bezug auf ein in der Alchemie weit verbreitetes und mittlerweile veraltetes Glasgerät für chemische Synthesen), war damit erstmalig geschaffen worden: „Wir berichten über das Design, die Synthese und den Zusammenbau des aus 1 080 000 Basenpaaren bestehenden Genoms von *Mycoplasma mycoides* JCVI-syn1.0. Wir begannen mit der digitalen Version der genetischen Information, synthetisierten das Genom, verpflanzten es in eine *Mycoplasma capricolum*-Empfängerzelle und schufen so neue *Mycoplasma mycoides*-Zellen, die nur durch das synthetische Chromosom kontrolliert wurden. Die einzige DNA dieser Zellen ist die entworfene synthetische DNA-Sequenz, die „Wasserzeichen“ und andere Genauslassungen, -varianten und -mutationen enthält, die während des Herstellungsprozesses eingebaut wurden. Die neuen Zellen weisen die erwarteten phänotypischen Eigenschaften auf und teilen sich fortlaufend².“ So lautet die Zusammenfas-

sung der bahnbrechenden Arbeit kurz und lapidar (7; Übersetzung durch den Autor). Noch kürzer wäre nur noch „Wir haben Leben künstlich erzeugt und es funktioniert“ gewesen. Der heilige Gral der Biologie, die Erschaffung von Leben aus Nichtleben, wurde damit erreicht. Es bliebe vielleicht nachzutragen, das es den Wissenschaftlern keineswegs nur um einen Existenzbeweis ging: Vielmehr geht es darum, dem minimalen Bauplan von Bakterien auf die Spur zu kommen, um ihn zu optimieren und für bestimmte Zwecke nutzbar zu machen. Hierzu gehören nicht nur die Produktion von Medikamenten und Impfstoffen, sondern auch die bakterielle Produktion von Kohlenwasserstoffen, also letztlich von „Erdöl“ bzw. dessen langfristigen Ersatz (15).

Ewiges Leben?

Wer wollte nicht ewig leben? Wenn es noch einen Gral in der Biologie gibt, den wahren zumal, da er das gleiche Ziel bezeichnet, dann ist es das ewige Leben. Auch das gibt es schon beim Menschen in Form von Zelllinien bestimmter Tumoren: Henriette Lacks beispielsweise verstarb am 4. Oktober 1951 an einem Zervixkarzinom. Ihre Tumorzellen leben in Form der HeLa-Zelllinie noch heute und stellen die weit verbreitetste und am meisten beforschte menschliche Zelllinie dar (12). Als Tumorzelle lebt also so mancher Mensch schon lange „ewig“ in den verschiedensten biomedizinischen Labors der Welt weiter.

Aber das meinen wir nicht, wenn wir vom Gral des unsterblichen Lebens sprechen. Wir meinen vielmehr den uralten Traum von der Unsterblichkeit der ganzen Person. Wenn wir auch noch nicht ganz soweit sind, so gibt es doch bedeutende Fortschritte. Nach einer weit verbreiteten Theorie werden die Enden der Chromosomen (die Telomere) bei jeder Zellteilung etwas kürzer und zeigen damit letztlich an, wie alt der gesamte Organismus ist. Es gibt jedoch das bereits 1985 entdeckte Enzym Telomerase, das die Funktion hat, die Telomere zu verlängern und damit die Alterung des Organismus hinauszuzögern – eine Entdeckung, die 2009 mit dem Nobelpreis für Medizin an drei US-amerikanische Wissenschaftler, Eli-

zabeth Blackburn, Carol Greider und Jack Szostak, gewürdigt wurde.

Mäuse mit einer Schädigung dieses Enzyms altern erwartungsgemäß sehr rasch, wobei dieser Alterungsprozess alle Körperfunktionen betrifft, von schlaffer Haut bis zu schlafem Denken. Wissenschaftlern der Harvard Universität gelang es nun, diesen Prozess nicht nur aufzuhalten, sondern umzukehren (8). Sie züchteten zunächst Mäuse mit kurzen Telomeren und inaktiver Telomerase, bei deren Alterungsprozess man regelrecht zuschauen konnte. Dann wurde deren Telomerase wieder aktiviert, und bereits vier Wochen später zeigten sich bei den Mäusen deutliche Regenerationserscheinungen in praktisch allen betroffenen Geweben, bis hin zu einer Verbesserung der altersbedingten Schlafstörungen. Die Tiere alterten also nicht nur nicht weiter, nein, sie wurden wieder jünger!

Bevor Sie zur Apotheke laufen, warten Sie einen Moment: Erstens gibt es noch keine käuflichen Produkte der Anwendung dieser Prinzipien. Und zweitens würden Sie dies vielleicht sogar dann nicht kaufen wollen, wenn es sie denn gäbe: Man hat nämlich allen Grund zur Annahme, dass es sich bei Unsterblichkeit einerseits und Krebserkrankungen andererseits um zwei Seiten der gleichen Medaille handelt. Wie schon die Substanz p53, die in der Lage ist, das Wachstum von Tumoren zu unterdrücken, vor Jahren nachgewiesen, gehen vorzeitiges Altern und der Schutz vor Krebs bzw. langes Leben und das erhöhte Risiko für Krebs Hand in Hand (6, 16). Ganz analog ist erwiesen, dass eine hohe Konzentration von Telomerase das Wachstum von Krebszellen begünstigt. Mit anderen Worten: Nichts in der Medizin ist ohne Nebenwirkungen, nicht einmal die Unsterblichkeit, so wir sie denn therapeutisch bewerkstelligen könnten.

Die Bibel, der Gral und die Leute

Es ist vielleicht kein Zufall, dass es beim Leben mit dem Spaß ein Ende hat und die Leute entweder religiöse Anwendungen bekommen oder sich am Rande des „normalen“ befinden bzw. diesen deutlich überschreiten. Francis Collins, seit 1993 Leiter des Human Genom Projekts und damit der

² We report the design, synthesis, and assembly of the 1.08-mega-base pair *Mycoplasma mycoides* JCVI-syn1.0 genome starting from digitized genome sequence information and its transplantation into a *M. capricolum* recipient cell to create new *M. mycoides* cells that are controlled only by the synthetic chromosome. The only DNA in the cells is the designed synthetic DNA sequence, including “watermark” sequences and other designed gene deletions and polymorphisms, and mutations acquired during the building process. The new cells have expected phenotypic properties and are capable of continuous self-replication.

offizielle Chef der Entschlüsselung des menschlichen Genoms („Bibel“), war früher Atheist und wandelte sich zum gläubigen Christen, der ein viel diskutiertes Buch dazu verfasst hat, wie man Evolutionstheorie und Christentum unter einen Hut bringen kann (4, 14). Sein damaliger Gegenspieler, Craig Venter, dagegen erreichte zweifelhafte Berühmtheit daher, weil er sein eigenes Genom verwendete, um das menschliche Genom zu entziffern, und weil er mit über 6000 Patenten auf die Früchte seiner Arbeit als „rücksichtsloser Privatisierer von Allgemeingut“ (Wikipedia) gilt.

Als die NASA mit dem Arsenleben herauskam, gab es weltweite Empörung über die Art und Weise, wie dieser Befund über die Nachrichtenticker verbreitet wurde (2):

Man sprach von extraterrestrischen Lebensformen, obwohl man ja nichts weiter als Leben auf der Erde gefunden hatte.

Man sprach von extraterrestrischen Lebensformen, obwohl man ja nichts weiter als Leben auf der Erde gefunden hatte. Aber die Grenze dessen, was wir unter Leben verstehen, war verschoben worden. Und wenn man nun im All nach Leben sucht, wird der Suchraum – im wahrsten Sinne des Wortes – größer.

Die vielleicht schillerndste Person stellt jedoch der am 12. Dezember 2008 verstorbe-

ne Gajdusek dar. Ich erinnere mich an einen Vortrag von ihm bei einem jährlichen Treffen der amerikanischen Psychiater (American Psychiatric Association, APA), das schon länger her ist. Nancy Andreasen, die damalige Vorsitzende der APA, saß zufällig in meiner Nähe und stand nach einer guten Stunde (der Vortrag sollte 45 Minuten dauern) wutschraubend mit den Worten „this man is mad“ auf und ging. Die anderen Zuhörer im überfüllten Saal lauschten dem Nobelpreisträger gebannt, wie er – sichtlich getrieben und sich beim Sprechen schier selbst überholend – die Ereignisse um Kannibalismus, viele Kranke und Tote, die hilflosen Versuche, einen Erreger zu finden, und den nach Jahren des genauen Beobachtens und immer wieder erneuten Herumprobierens sich schließlich einstellenden Erfolg vortrug. Ja, er wirkte hypoman, mindestens, was vielleicht auch erklärt, dass einige Zeit später eine schreckliche Wahrheit ans Tageslicht kam: Er hatte während seiner Forschungsaufenthalte 56 (!) Kinder aus Neuguinea und Mikronesien adoptiert und sexuell missbraucht (und wurde 1997 verurteilt).

Vielleicht muss man besonders schnell, weit und ungewöhnlich denken, um die Grenzen des Lebens zu erfassen und vielleicht sogar zu verschieben! Man gerät dabei auch an die eigenen Grenzen, die hinderlich sein können. Wie so oft liegen damit Kreativität und Krankheit nicht weit voneinander entfernt, auch und vielleicht gerade dann, wenn es um das Leben selbst geht.

Literatur

1. Agapakis C. Publikation eingereicht.
2. Anonymus. Curb your enthusiasm for aliens, NASA Editorial. New Scientist 8.12.2010.
3. Blum D. The Poisoner's Handbook. Murder and the birth of forensic medicine in Jazz Age. New York: Penguin Press 2010.
4. Collins F. The language of God. New York: Free Press 2006.
5. Coglan A. Nobel insights into ageing and cancer. New Scientist 5.10.2009.
6. Ferbeyre G, Lowe SW. The price of tumor suppression? Nature 2002; 415: 26–27.
7. Gibson DG et al. Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. Science 2010; 329: 52–56.
8. Jaskelioff M et al. Telomerase reactivation reverses tissue degeneration in aged telomerase-deficient mice. Nature doi:10.1038.
9. Katsnelson A. Microbe gets toxic response. Nature 2010; 468: 741.
10. Mead S et al. A novel protective prion protein variant that colocalizes with Kuru exposure. N Engl J Med 2009; 361: 2056–2065.
11. MacKenzie D, Le Page M. Light diet: Animals that eat sunshine. New Scientist 8.12.2010.
12. Rahbari R et al. A novel L1 retrotransposon marker for HeLa cell line identification. Biotechniques 2009; 46: 277–284.
13. Sagan C. The cosmic connection. New York: Anchor Books Doubleday 1973.
14. Spitzer M. Neurotheologie? Nervenheilkunde 2006; 25: 761–765.
15. Synthetic Genomics. www.syntheticgenomics.com/what/ (abgerufen am 27.12. 2010).
16. Tyner SD et al. p53 mutant mice that display early ageing-associated phenotypes. Nature 2002; 415: 45–53.
17. Wolfe-Simon F et al. A bacterium that can grow by using arsenic instead of phosphorus. Science www.sciencexpress.org/2 December 2010/Page 1/10.1126/science.1197258.