



## Unser tägliches Sterben

Weitere Scripte finden Sie unter [www.quarks.de](http://www.quarks.de)

Script zur WDR-Sendereihe Quarks&Co



**Unser tägliches Sterben**

## Unser tägliches Sterben

### Inhalt

S <sub>4</sub>	Sterben von Anfang an
S <sub>8</sub>	Runderneuerung im Körper
S <sub>9</sub>	Die Lebensdauer verschiedener Zelltypen
S <sub>14</sub>	Unsterbliche Hydra
S <sub>16</sub>	Der Traum von Unsterblichkeit
S <sub>18</sub>	Die Körperpolizei: programmierter Zelltod
S <sub>22</sub>	Krebs - wenn das Sterben nicht funktioniert
S <sub>24</sub>	Sterben um zu überleben
S <sub>37</sub>	Lesetipps

### Impressum

**Text:** Tristan Chytroschek, Falko Daub,  
Martin Rosenberg, Ismeni Walter

**Redaktion  
und  
Koordination:**

Wolfgang Lemme

**Copyright:** WDR, September 2005

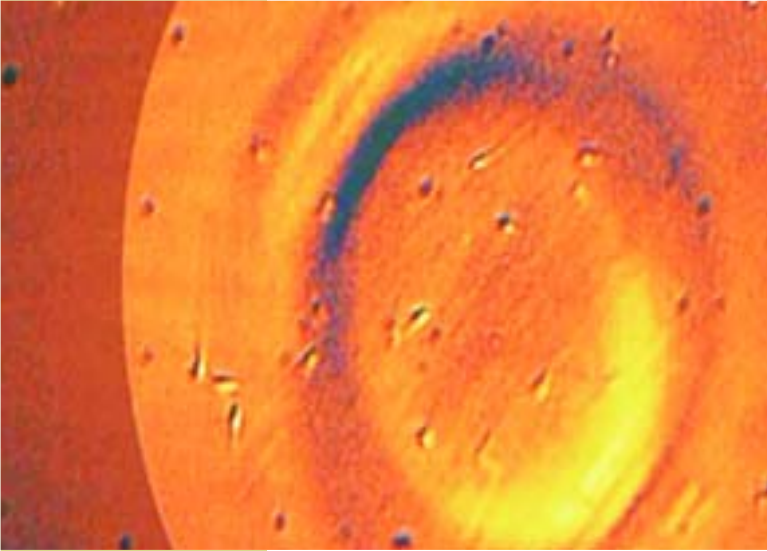
**Gestaltung:** Designbureau Kremer & Mahler, Köln

### Bildnachweise

alle Abbildungen WDR außer:

S <sub>5</sub>	Entwicklungsstadien der Hand; Rechte: Dr. Heinz Jacob - Ruhr Universität Bochum
S <sub>6</sub>	Entwicklungsstadien des Auges; Rechte: Prof. Dr. J. Graw - GSF Neuherberg
S <sub>7</sub>	Nervenzellen; Rechte: Jürgen Berger - Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie
S <sub>24-27</sub>	Sterben um zu überleben; Rechte: SWR

## Sterben von Anfang an



Samenzellen versuchen, in die Eizelle einzudringen

### In den ersten Tagen sind alle gleich

Alles beginnt mit dem Zusammenschluss von nur zwei Zellen: der größten und der kleinsten Zelle des Menschen. Die Eizelle der Frau und das Spermium des Mannes. Mit dem Verschmelzen entsteht die so genannte Zygote, aus ihr sollen einmal Billionen von Zellen werden. Eine gewaltige Aufgabe, für die nur neun Monate Zeit sind. In den ersten Tagen nach der Befruchtung sind die sich etwa alle 15 bis 20 Stunden teilenden Zellen noch identisch. Doch im Lauf der Menschwerdung sollen daraus einmal Nerven-, Haut- oder Muskelzellen entstehen: über 200 verschiedene Zellarten werden für den komplexen Aufbau des menschlichen Organismus benötigt.

### Das Leben nimmt Formen an

Schon nach einem Monat ist ein etwa 6 Millimeter großes Wesen entstanden, das noch mehr einem Urzeittierchen als einem Menschen ähnelt. Der Embryo wächst jetzt pro Tag einen Millimeter. Und schon jetzt hat jede Zelle ihre spezifische Aufgabe: Ein winziges Herz schlägt und pumpt das Blut durch den winzigen Körper. Mit Hilfe eines Ultraschallgeräts ist sogar schon die Tätigkeit beider Herzhälften sichtbar zu machen. Zu Beginn des zweiten Monats entwickeln sich die Anlagen für Arme, Beine, Hände und Füße. Eine gute Woche später sind die Strahlen der Finger in der Handanlage zu erkennen. Doch dann gibt es in der Weiterentwicklung ein Problem: Wenn sich die Zellen einfach nur weiter teilen, ist die Entwicklung der Hände und Füße nicht abzuschließen.



Ein rund vier Wochen alter Embryo

### Zellen werden in den Tod geschickt

Die Entwicklung des Embryos, die bisher offensichtlich von ständigem Zellwachstum geprägt war, steht an einem Punkt, wo Wachstum allein keine Lösung mehr bietet. Der Bauplan für die Hand benötigt jetzt nicht noch mehr Zellen, sondern scheinbar genau das Gegenteil – den Tod von eben erst gebildeten Zellen. Nach etwa sechs Wochen sehen die Hände des Embryos noch wie kleine Paddel aus. Kurz danach sind einzelne Finger zu erkennen, die jedoch mit einer Art Schwimmhaut verbunden sind. Für eine funktionierende Hand müssen die Zellen dieser Schwimmhäute sterben. Und das tun sie – in ihnen läuft in dieser Zeit eine Art vorprogrammierter Selbstmord ab. Nur so werden die einzelnen Finger beweglich. Genauso läuft es mit den Zehen – innerhalb nur weniger Tage sterben tausende von Zellen der Haut, die die Zehen verbunden hat. Um den Tag 52, also gut sieben Wochen nach der ersten Zellteilung, ist das Sterben der Schwimmhäute an Händen und Füßen weitgehend beendet, jetzt müssen die Hände und Füße wieder weiter wachsen. Kurz da-



Entwicklungsstadium der Hand nach ca. 6 Wochen

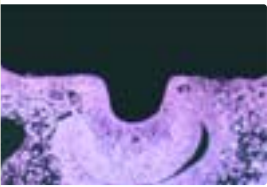


Für eine funktionierende Hand müssen die Zellen dieser Schwimmhäute sterben

rauf kann man schon im Ultraschall entdecken, wie der Daumen des inzwischen zum Fetus herangereiften Embryos seinen Weg zum Mund findet – eine für alle Beteiligten beruhigende Entdeckung.

### Die Augen: erst trüb, dann klar

Aber nicht nur bei der Konstruktion von Händen und Füßen spielt der Zelltod eine ganz bedeutende Rolle. Auch die Augäpfel könnten ohne gezielten Selbstmord nicht vollständig gebildet werden und unser Blick wäre im wahrsten Sinne des Wortes getrübt. Die Augen entwickeln sich aus einer einfachen Einstülpung der Haut zu einem komplexen Sinnesorgan. Auch hier werden Schritte erst getan, dann zurückgenommen: Die Zellkerne in der ausgebildeten Linse müssen sterben, damit die Linse durchsichtig wird und wir sehen können. Würde dies nicht geschehen, müsste der Säugling mit einem angeborenen Grauen Star auf die Welt kommen und wäre praktisch blind.



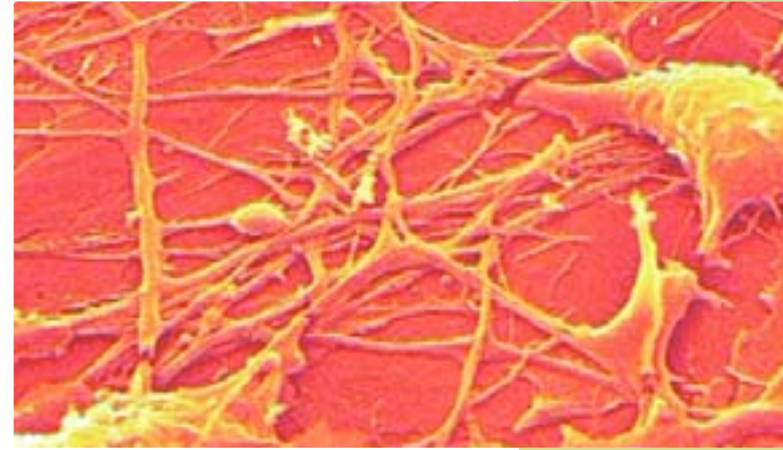
Das Auge entwickelt sich aus einer einfachen Einstülpung ...



... zu einem komplexen Sinnesorgan

### Bauprinzip Überfluss auch im Gehirn

Auch in dem noch kleinen Gehirn wird Unglaubliches vollbracht. Pro Minute entstehen über 500.000 Nervenzellen. Und sie vernetzen sich untereinander mit Schaltstellen, so genannten Synapsen. In Spitzenzeiten werden in bestimmten Hirnregionen 1,8 Millionen Synapsen pro Sekunde erzeugt. Kein Wunder, dass dabei auch mal was daneben gehen kann. Vereinfacht ausgedrückt gibt es Nervenzellen, die das ihnen vorbestimmte Ziel nicht finden. Andere kommen zwar am Ziel an, aber zu spät. Alle Kontakte zu benachbarten Nervenzellen sind schon besetzt. Diese Zellen sind unnützlich und begehen deshalb Selbstmord. Je nach



Hirnregion gehen zwischen 35 und 80 Prozent der Nervenzellen zu Grunde. Das große Sterben im Nervensystem beginnt schon in den ersten Wochen der Entwicklung und hält bis weit nach der Geburt an. Wenn der Säugling also das erste Mal das Licht der Welt erblickt, hat sein Organismus schon Millionen von Zellen in den Tod geschickt – ohne das fortwährende Sterben gäbe es keine Entwicklung.

Nervenzellen unter dem Mikroskop – sie leben, weil viele andere vor ihnen gestorben sind



## Runderneuerung im Körper

### Ständiger Wandel hält uns frisch

Manchmal fragt man sich, wie viel von einem alten Auto noch dasselbe ist, wenn nicht nur die Reifen und die Zündkerzen, sondern auch Kotflügel, Bodenbleche und der Motor ausgetauscht sind. Durch regelmäßigen Austausch von Teilen bleibt ein Auto nur scheinbar dasselbe – in Wirklichkeit wird es permanent verändert. Und genauso funktioniert es auch beim Menschen: regelmäßig werden Bestandteile ausgewechselt, nach einigen Jahren ist man fast ein völlig neuer Mensch. Dabei hat jede Gewebeart und jeder Zelltyp seinen eigenen Rhythmus und seinen eigenen Mechanismus, mit dem er ausgetauscht wird.

So jung kommen die beiden nie wieder zusammen. Beide können durch Erneuerung in Form bleiben

### Jeden Monat eine neue Haut

Tief in der Keimschicht bilden sich neue Zellen und wandern langsam nach außen. Dabei werden sie immer stärker zusammengequetscht, verlieren nach einiger Zeit sogar den Kern. Schließlich bilden sie eine etwa 20 Schichten starke Schutzschicht – die tote Außenhaut, die wir sehen. Nach etwa zwei bis vier Wochen ist die Zelle nur noch eine leblose Hautschuppe – sie fällt ab.

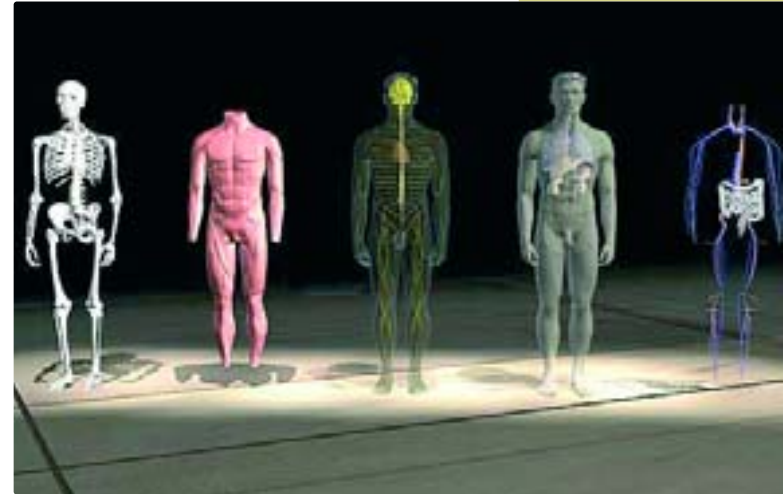
Die oberste Hautschicht besteht nur aus toten Zellen, die sich nach und nach ablösen

### Lebenslange Baustelle: die Knochen

Bestimmte Knochenzellen, so genannte Osteoklasten, bauen altes Knochengewebe ab, indem sie dem Knochen Mineralien entziehen. Eine kleine Mulde entsteht – Platz für neues Gewebe. Was die einen Zellen abbauen, baut eine andere Sorte wieder auf: Osteoblasten füllen diese Mulden mit Kalzium aus. In dem neuen Knochengewebe mauern sie sich nach und nach ein, bis sie selbst nicht mehr überleben können und verknöchern. Das Gleichgewicht von ständigem Abbau und Erneuerung sorgt dafür, dass der Knochen stabil und elastisch bleibt.

Was die Osteoklasten abbauen, bauen Osteoblasten später wieder auf

## Die Lebensdauer verschiedener Zelltypen



Fast alle im menschlichen Körper versammelten Zelltypen verändern sich ständig. Dabei ist die Geschwindigkeit des Umbaus sehr unterschiedlich. So sind die Zellen der Blutgefäße und des Darms schon nach wenigen Tagen komplett ausgetauscht. Bei der Haut und einigen Organen ist der Wechsel eine Sache von Wochen bis Monaten. Der Umbau der Knochen dauert dann schon länger: Erst nach rund zehn Jahren ist das gesamte Skelett ausgetauscht. Noch länger leben die Muskelzellen: Wenn sie sich zum Verbund der Muskelfasern zusammengeschlossen haben, teilen sie sich nicht mehr. Nur bei Verletzungen werden sie repariert. So erreichen sie eine durchschnittliche Lebensdauer von etwa 15 Jahren. Doch einige wenige Teile des Körpers bleiben lebenslang dieselben: Teile des Gehirns und des Nervensystems, das Herz und die Schweißdrüsen ändern sich nie. Nur sie sind genauso alt wie der Mensch, zu dem sie gehören.

Verschiedene Zelltypen haben unterschiedliche Lebensspannen

# Die Lebensdauer verschiedener Zelltypen

## Haarfollikelzellen

Haarfollikelzellen werden nicht erneuert. Deshalb gibt es auch keine Hoffnung mehr, wenn sich die ersten Anzeichen einer Glatze bilden: was weg ist, ist weg.

## Ohren

Die Hautzellen an den Ohren leben länger als viele andere Hautzellen, statt zwei bis vier Wochen sind es hier fünf Wochen.

## Augenlinsen

Linsezellen im Auge und die lichtempfindlichen Sinneszellen auf der Netzhaut werden nicht erneuert. Sie müssen ein Leben lang halten und sind deshalb im Alter oft schon ziemlich abgenutzt.

## Lippen

Hautzellen halten sich im Durchschnitt rund zwei bis vier Wochen – an den Lippen ist die Haut aber besonders dünn und ist schon nach etwa zwei Wochen komplett erneuert.

## Lunge

Nach acht Tagen ist die Oberfläche der Lunge ausgetauscht. Raucher haben aber Pech: der Teer, der sich bei ihnen bildet, bleibt viel länger dort kleben, etwa ein ganzes Jahr.



## Die Haut an Bauch und Fußsohlen

Hautzellen halten sich im Durchschnitt rund vier Wochen – am Bauch und an den Fußsohlen nutzen sie sich schneller ab und sind schon nach fast drei Wochen ersetzt.

## Sinneshaarzellen im Ohr

Sinneshaarzellen im Ohr bleiben lebenslang erhalten, wenn man sie nicht mutwillig durch laute Musik zugrunde richtet. Schlechte Musik hingegen verkürzt ihre Lebenserwartung nicht.

## Riechzellen in der Nase

Riechzellen überleben ein bis zwei Monate. Dann haben sie offensichtlich die Nase voll.

## Weißer Blutkörperchen

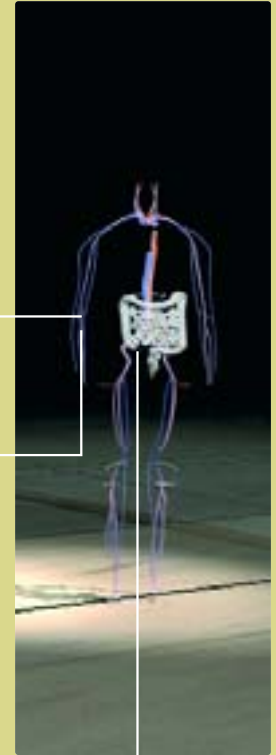
Auch die weißen Blutkörperchen haben nur eine Lebensdauer von einigen Tagen. Ähnlich wie ihre roten Brüder haben sie enorme Strecken zurückzulegen.

## Rote Blutkörperchen

In 120 Tagen legen die roten Blutkörperchen rund 1.600 km in den Weiten der Blutgefäße zurück. Danach sind sie fix und fertig. Und reif für's Recycling in der Milz.

## Magenschleimhaut

Hier ist viel los, und das nimmt auch die Schleimhäute mit: ein ständiges Kommen und Gehen von Säuren und Basen und permanent neue Substanzen, die hier umgesetzt werden – das hält keine Zelle länger als eine Woche aus.



## Darm

Im Darm sind die unterschiedlichsten Lebenserwartungen vertreten: Die Zellen, die den Dünndarm auskleiden, halten es gerade mal ein bis zwei Tage aus, die im Dickdarm leben immerhin 10 Tage. Und im Leerdarm, einem Teil des Dünndarms, überleben sie fast 16 Jahre.

# Die Lebensdauer verschiedener Zelltypen

## Gehirnzellen

Bislang ging man davon aus, dass Gehirnzellen nicht erneuert werden, wenn das Gehirn erst einmal ausgebildet ist. Mittlerweile hat sich aber herausgestellt, dass sich auch manche Gehirnzellen verändern. Erwiesenermaßen lebenslang treu bleiben aber die Zellen in den Bereichen, die für das Sehen, das Riechen und das Speichern von Erinnerungen zuständig sind.

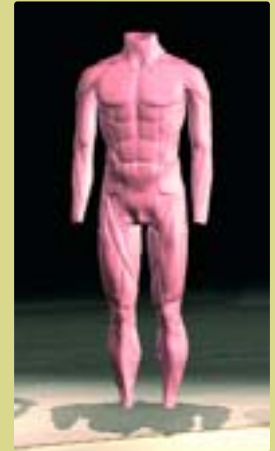
## Herzmuskelzellen

Wenn die Zellen des Herzmuskels absterben, können sie nicht repariert werden. Deshalb muss man nach einem Herzinfarkt besonders vorsichtig sein. Und wahrscheinlich ist das auch der Grund dafür, dass man sich vom gebrochenen Herzen nur so mühsam erholt.



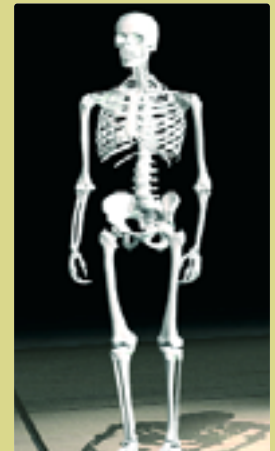
## Muskelzellen

Muskelzellen teilen sich nicht so wie andere Zellen. Sie verbinden sich zu Muskelfasern und bleiben dann erst einmal in diesem Verbund erhalten. Allerdings können Reservezellen, so genannte Satellitenzellen, bei Verletzungen nachwachsen und die Faser reparieren. Dadurch erreichen Muskelzellen eine durchschnittliche Lebensdauer von 15 Jahren.



## Knochen

Ein ständiges Auf- und Abbauen verschiedener Zelltypen hält die Knochen permanent jung. Nach ungefähr 10 Jahren ist das gesamte Skelett erneuert – im Alter dauert es etwas länger.



# Unsterbliche Hydra

## Unscheinbarer Überlebenskünstler



Es gibt ein Lebewesen, das tatsächlich unsterblich ist, und es lebt direkt vor der Haustür: die Hydra, ein nur wenige Millimeter großer Süßwasserpoly. Das unscheinbare Hohltier lebt in heimischen Teichen, Seen und Flüssen, wo es in Massen auf Blättern und Stängeln von Unterwasserpflanzen sitzt. Dort fischt es mit seinen Tentakeln nach Nahrung. Der Süßwasser-

Die Hydra ist unscheinbar – und unsterblich

poly ist eines der primitivsten Lebewesen überhaupt, hat aber das Unglaubliche geschafft: nie zu sterben. Als einziger Mehrzeller hat die Hydra ein perfektes System der Runderneuerung entwickelt. Indem der Polyp ständig alte Zellen abtötet und neue Zellen bildet, erneuert er sich fortlaufend. Im Labor beobachtet man seit Anfang der fünfziger Jahre Exemplare, die immer noch so jung wie am ersten Tag sind – die Hydra wird nie alt.

## Ständig Sterben macht unsterblich



Die Hydra ist eine Überlebenskünstlerin

Dabei ist die Hydra klein, nackt und hat viele Feinde. Außerdem hat der Polyp mit denselben Problemen zu kämpfen wie Menschen: Schadstoffe in der Umwelt greifen seine Zellen an, Giftstoffe sammeln sich in seinem Körper, Strahlung verändert sein Erbgut. Doch anstatt Schäden in den Zellen zu reparieren, tötet die Hydra sie ab und ersetzt sie in rasantem Tempo. Alle fünf Tage erneuert sich das Tier, das Gewebe ist in ständigem Fluss. Zeitlebens entstehen neue Stammzellen – Zellen, aus denen neue Zelltypen für ganz unter-

schiedliche Organe entstehen können. Aus ihnen entwickeln sich später sämtliche anderen Zelltypen, die der Organismus braucht. Sie wandern durch den Körper und ersetzen die alten Zellen, die am Fuß und an den Tentakeln des Tieres abgestoßen werden. Die Hydra kann sogar Nervenzellen erneuern – einmalig im Tierreich!

## Warum können wir nicht so sein wie Hydra?

Die Hydra ist ein sehr einfaches Lebewesen, neben den Schwämmen eines der primitivsten mehrzelligen Tiere überhaupt. Sie besitzt nur drei verschiedene Stammzell-Linien. Aber anders als die primitive Hydra haben höher entwickelte Tiere viel mehr und differenziertere Zelltypen, aus denen ihr Organismus aufgebaut ist. Und der menschliche Körper ist sehr kompliziert, deswegen funktioniert die ständige Erneuerung bei uns nicht.

## Lernen von der Hydra

Doch Wissenschaftler sind fasziniert von der Hydra-Strategie und versuchen herauszufinden, warum diese ständige Erneuerung so perfekt funktioniert. Denn das Erstaunliche ist, dass es keine Entgleisungen gibt, zum Beispiel keinen Krebs. Krebs ist ein unkontrolliertes Zellwachstum, das normales Gewebe verdrängt oder zerstört. Die Krebszellen ignorieren die Bremssignale des Körpers, weil die Gene für den Empfang dieser Signale verloren gegangen sind oder abgeschaltet wurden. Bei der Hydra passieren solche genetischen Pannen trotz wildem Zellwachstum nicht. Ein Erklärungsversuch dazu besagt, dass die Zellen des Polypen so schnell eliminiert werden, dass es erst gar nicht zu Krebs kommen kann. Die Überlebensstrategie der Hydra kann somit viel zum Verständnis von Krankheiten und Alterungsvorgängen beim Menschen beitragen.



Die Hydra pflanzt sich normalerweise ungeschlechtlich fort, hat aber auch Sexualorgane zur geschlechtlichen Fortpflanzung

# Der Traum von Unsterblichkeit

## Das Leben ist ungesund und endet tödlich...

Am Sterben führt bisher kein Weg vorbei – Umweltgifte setzen unseren Zellen zu. Strahlung verändert unser Erbgut. Abfallprodukte des Stoffwechsels lagern sich in unseren Körpern ein. Dieses Bombardement schädlicher Einwirkungen verursacht Defekte, die zum Absterben von Zellen, zum Verlust von Körperfunktionen und schließlich zum Tod führen. Altern und Tod sind also das Ergebnis einer Ansammlung von Defekten – anders gewendet: ein Versagen des Immunsystems, das die Schäden nicht reparieren kann.

## Der Tod als Energiespar-Modell

Mehrzellige Organismen sind möglicherweise genetisch darauf programmiert, die Reparatur ihrer Körper zu vernachlässigen, und so Altern und Sterben zuzulassen. Um Zellschäden zu beseitigen, setzen Organismen viele Enzyme ein, die Giftstoffe aus den Zellen abtransportieren und ausscheiden. Forscher haben Gene entdeckt, die die Produktion dieser Enzyme kontrollieren und zum Teil abschalten. Diese Gene bremsen damit das Immunsystem und sparen so Energie, die der Körper dann zum Beispiel in die Fortpflanzung investieren kann. Möglicherweise hat also die Evolution Individuen begünstigt, die Energie aus ihrem Reparatursystem in ein aktiveres Reproduktionssystem umgeleitet haben. Altern und Sterben wäre somit genetisch vorprogrammiert und kein Zufall.

## Die Suche nach dem Todesgen

Tatsächlich sind Wissenschaftler dem Todesprogramm auf der Spur. 1988 bemerkte Tom Johnson an der Universität von Kalifornien in Irvine, dass eine Veränderung in einem einzigen Gen, AGE-1, Fadenwürmer bis zu 70 Prozent länger leben ließ. Seine Ergebnisse stießen in der Fachwelt auf Unglauben.

Doch fünf Jahre später, im Dezember 1993, publizierte Cynthia Kenyon an der Universität von Kalifornien in San Francisco eine ähnlich aufregende Entdeckung: Sie fand heraus, dass Veränderungen in einem anderen Gen, DAF-2, Fadenwürmer doppelt so lang leben ließ wie normal. Immer noch waren die Kritiker skeptisch. Aber der Beweis für Todes-Gene wurde immer stärker: 2003 entdeckte Martin Holzenberger am Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale in Paris, dass Mäuse mit einer Mutation im Gen IGF-1R im Schnitt 26 Prozent länger lebten als ihre nicht mutierten Artgenossen. Dies war das erste Mal, dass die Wirkung einer solchen Mutation bei Säugetieren festgestellt werden konnte. Und was für Mäuse gilt, gilt möglicherweise auch für Menschen: Wir sind genetisch zum Sterben programmiert.

## Eine Pille für das ewige Leben

Wenn der Tod also genetisch bedingt ist, kann man ihn dann auch verhindern? Im Jahr 2000 hat Cynthia Kenyon eine Firma gegründet: Elixir Pharmaceuticals, die sich auf die Entwicklung von Therapien gegen das Altern spezialisiert. Durch Erkenntnisse, die sie bei Würmern gewonnen hat, möchte Kenyon zunächst altersbedingte Krankheiten wie Diabetes, neurodegenerative Krankheiten und Krebs therapieren. Auf lange Sicht will sie aber den Tod an sich hinauszögern. Damit ist sie in guter Gesellschaft: In den USA ist eine Gruppe von Unternehmern aktiv, die an Zukunftswissenschaft interessiert ist und unter anderem die bemannte Raumfahrt sponsert. Sie hat das „Institute of Biomedical Gerontology“ gegründet, eine Einrichtung, die das „Problem“ des Todes erforschen – und beseitigen soll. Dazu haben die Initiatoren 2003 einen Preis ausgelobt, den Methusalem-Maus-Preis: eine Million Dollar für den, der entweder die Lebensspanne einer Maus in bisher unerreichte Dimensionen verlängert oder eine alte Maus jünger machen kann.



Warum können wir nicht ewig jung bleiben?



Fadenwürmer können uralter werden, wenn man ihre Gene verändert



Die Pille gegen das Sterben – in vielen Labors wird schon daran geforscht

# Die Körperpolizei: programmierter Zelltod

## Schöner leben mit dem Sebstmordprogramm

Irgendwann müssen wir sterben. Doch bevor es soweit ist, möchten wir so lange es irgend geht gesund bleiben. Paradoxerweise gelingt das nur, wenn jeden Tag viele unserer Körperzellen sterben – Leben und Gesundheit hängen davon ab, dass Zellen rechtzeitig zugrunde gehen. Der programmierte Zelltod ist lebensnotwendig. Denn die eigenen Zellen können für den Körper zur unnötigen Last oder sogar gefährlich werden. Deshalb entscheidet ein in die Zellen eingebauter Sicherheitsmechanismus, ob und wann sie in den Tod gehen müssen. Bei diesem gezielten Selbstmord – die bekannteste Form ist die so genannte Apoptose – stirbt die Zelle nach einem festgelegten Programm. Dabei starten Signale von außen oder in der Zelle selbst eine Lawine von Reaktionen, in deren Verlauf sie sich sozusagen selbst zerlegt.

## Nur keinen Müll ansammeln



Der programmierte Zelltod sorgt dafür, dass Zellen, die der Körper nicht mehr benötigt, wieder eingeschmolzen werden. So verbrauchen sie nicht nutzlos Energie. Nach erfolgreicher Abwehr einer Infektion zum Beispiel kursieren im Blut noch massenweise Immunzellen, obwohl der Erreger nicht mehr da ist. Also begehen die meisten von ihnen Selbstmord. Und jedes Mal, wenn eine Frau nach ihrem Eisprung nicht schwanger wird, hat sich ihre

Gebärmutter-schleimhaut mit vielen zusätzlichen Zellschichten und neuen Blutgefäßen auf eine befruchtete Eizelle vorbereitet, die gar nicht kommt. Auch in diesem Fall wird ein Teil dieser Zellen durch Apoptose wieder vernichtet. Die Apoptose sorgt auch dafür, dass

Beim Abstillen staut sich die Milch in einigen Milchdrüsen. Jetzt sind die Zellen unterversorgt – und begehen Selbstmord

die Mutter nicht endlos weiter Milch produziert, wenn sie ihr Kind abstillen will: weil die Mutter das Kind immer seltener anlegt, kommt es in Teilen der Milchdrüse zu einem Milchstau. Er führt in den Drüsenzellen zu einer Unterversorgung mit Sauerstoff und Nahrung. Jetzt häufen sich Signalstoffe an, die ihr Selbstmordprogramm auslösen. Es begehen aber nicht alle Milch bildenden Zellen Selbstmord. Ein Teil bleibt erhalten und verharrt in Wartestellung, bis es wieder ein Kind zu stillen gibt.

## Der Feind im Inneren

Bei einer Virusinfektion können die eigenen Zellen zum trojanischen Pferd im Körper werden. Denn Viren können in Körperzellen eindringen und sie dazu zwingen, das Viren-Erbgut zu vervielfältigen. Nach einer gewissen Zeit setzen diese Körperzellen viele neue Viren frei. Der Körper hat jedoch einen Weg gefunden, dieser Gefahr zu begegnen: mit bestimmten Immunzellen, den T-Zellen, die auch als cytotoxisch, also zelltötend, bezeichnet werden. Sie können virusinfizierte Zellen häufig ausschalten. Denn diese tragen auf ihrer Oberfläche Eiweißbruchstücke der Viren in ihrem Inneren. Die T-Zellen erkennen diese Bruchstücke und docken mit einem speziellen Rezeptor an infizierten Zellen an. Auf ihrer Oberfläche tragen die T-Zellen zusätzlich so genannte „Todesbotenstoffe“. Dazu besitzen fast alle Körperzellen das passende Gegenstück. Doch der Todesbote rastet nur ein, wenn eine Körperzelle tatsächlich von einem Virus befallen ist und vom Virendetektor schon erkannt wurde. So bekämpft die T-Zelle nur kranke, virentra-



Zelltötende T-Zellen können mit speziellen Rezeptoren virusinfizierte Körperzellen erkennen und mit Todesbotenstoffen zum Selbstmord zwingen

gende Körperzellen und zieht sie aus dem Verkehr, bevor diese neue Erreger produzieren – die Infektion wird eingedämmt.

### Nur keinen Müll weitergeben

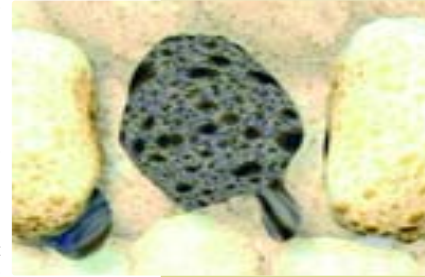


Sonnenstrahlen schädigen die DNA von Hautzellen und rufen den „Wächter des Genoms“, das Protein p53, auf den Plan

Körperzellen können auch dann zur Gefahr werden, wenn ihr Erbgut geschädigt ist. Dies kann zum Beispiel durch bestimmte Substanzen geschehen, die das Erbgut angreifen, oder auch durch ganz normalen Sonnenschein. Denn die UV-B-Strahlen der Sonne dringen in die Hautzellen ein und gelangen bis zum Zellkern. Dort, wo die Strahlung auftrifft, zerstört sie ein Stück DNA. Das betroffene Gen wird damit fehlerhaft oder völlig unbrauchbar. Durch die Schädigung der DNA wird im Zellkern das Eiweiß p53 im Kern angehäuft, das auch als „Wächter des Genoms“ bezeichnet wird. Es stoppt die Zellteilung. Wenn der Schaden an der DNA zu groß ist um repariert zu werden, schaltet p53 das Selbstmordprogramm der Zelle an und aktiviert die dafür notwendigen Gene. Damit verhindert es, dass sich stark geschädigte Zellen teilen und sich so fehlerhafte Gene im Körper anhäufen. Dies passiert vieltausendfach, während wir uns in der Sonne aufhalten. Doch man merkt nichts davon. Sehr gefährlich wird es allerdings, wenn dieser Schutzmechanismus versagt, Zellen defekte Gene anhäufen und sich trotzdem weiterhin teilen: In diesen Fällen kann Krebs entstehen, zum Beispiel der schwarze Hautkrebs.

### Chronik eines durchorganisierten Todes

Egal, ob eine Zelle Selbstmord begeht, weil sie überflüssig ist, eine Gefahr für den Körper darstellt oder einfach nur das Ende ihrer natürlichen Lebensdauer erreicht hat: ab einem bestimmten Punkt, nachdem das Signal zum Selbstmord gegeben wurde, verläuft die Apoptose immer gleich. Die Zelle stirbt in ihrer intakten Hülle – eine ganze Weile sieht man ihr von außen fast nichts an. Sie verliert nur den Kontakt zu ihren Nachbarzellen und kugelt sich etwas zusammen. In ihrem Inneren sind aber inzwischen ihre Selbstmord-Gene aktiv und ein Räderwerk von Signalstoffen und Enzymen arbeitet. Es sorgt dafür, dass verschiedene Zellbestandteile löchrig werden und auslaufen, und dass der Zellkern aufgelöst wird. Schließlich wirft die Außenschicht Blasen, es sieht fast so aus, als würde die Zelle kochen. Ganz zum Schluss zerfällt sie in kleine Kügelchen, die so genannten „apoptotischen Körper“. Diese Kügelchen werden dann von benachbarten Zellen oder Fresszellen aufgenommen und recycelt. Dieser Vorgang dauert etwa eine dreiviertel Stunde. Die betroffenen Zellen – und das sind meistens nur einzelne im Gewebe – verschwinden dabei spurlos.



Zellen werden bei der Apoptose löchrig

# Krebs - wenn das Sterben nicht funktioniert

## Ewiges Leben kann tödlich sein

Wenn im Körper normale Zellen zu Krebszellen werden, fallen zwei wichtige Regelmechanismen aus. Zum einen teilen sich die entarteten Zellen immer weiter, so erzeugen Krebszellen immer neue Krebszellen. Zum anderen funktioniert ihr Selbstmordprogramm nicht mehr. Dieses sorgt normalerweise dafür, dass Zellen zugrunde gehen, die schwere Schäden im Erbgut haben, oder die sich aus ihrem Heimat-Gewebeverband gelöst haben und im Körper herum vagabundieren. Das Ergebnis sind unsterbliche Zellen, die sich immer weiter vervielfältigen und im Körper Tumoren und Metastasen bilden.

## Therapieziel: Mord und Selbstmord

Krebstherapien zielen auf diese zwei Krankheitsursachen ab. Zum einen versucht man, die entarteten Zellen zu vernichten. Dazu dient die Strahlentherapie, oder bestimmte Mittel, die Zellen töten oder in ihrem Wachstum behindern (so genannte Zytostatika). Allerdings trifft man damit auch viele andere, gesunde Zellen, die sich ebenfalls schnell teilen. Sie sitzen zum Beispiel in den Haarwurzeln und im Knochenmark. Deshalb fallen den Patienten bei der Strahlen- oder Chemotherapie die Haare aus, und es kommt zu anderen schweren Nebenwirkungen. Zum anderen versucht man, das Selbstmordprogramm der Krebszellen zu aktivieren. Auch das geschieht teilweise bei Strahlen- und Chemotherapie. Doch wieder greift man bei der Aktivierung des Selbstmordprogramms auch gesunde Körperzellen an. Forscher und Mediziner suchen deshalb nach Wegen, ausschließlich in den Krebszellen die Selbstmordgene zu aktivieren, so dass sie sich selbst beseitigen. Bisher noch ohne durchschlagenden Erfolg, doch weltweit arbeiten viele Krebsforscher an einer solchen Therapie.

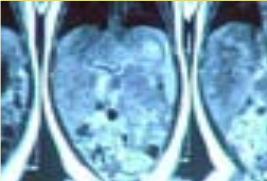
## Vorbild Natur

In sehr seltenen Fällen geschieht es, dass das Selbstmordprogramm der Krebszellen von selbst, ohne medizinische Therapie, wieder anspringt und Tumoren oder Metastasen wieder verschwinden. Dies sind jedoch extreme Ausnahmen, Fachleute schätzen die Wahrscheinlichkeit mit 1:100.000 ein.

Leider bedeutet diese spontane Besserung nicht in jedem Fall eine Heilung, denn es kann sich auch nur um ein vorübergehendes Verschwinden oder eine Rückbildung handeln, die nur teilweise erfolgt. Die Ursachen für diese so genannten Spontanremissionen sind leider noch unbekannt, dabei könnten gerade sie den Medizinern Wege zur Heilung aufzeigen. Doch weil sie so selten und nicht vorhersagbar sind, sind sie nur schwer zu erforschen.

## Ausnahme Neuroblastom

Es gibt jedoch eine Krebsform, bei der spontane Besserungen sehr viel häufiger sind als bei allen übrigen: das so genannte Neuroblastom im Stadium 4S. Es ist eine Krebsart, bei der Teile des Nervengewebes angegriffen werden, hauptsächlich bei Säuglingen. Der Krebs entsteht dabei aus Zellen links und rechts von der Wirbelsäule. Bevor das Kind auf die Welt kommt, sollten diese Zellen eigentlich das Nebennierenmark bilden. Aber das tun sie nicht - stattdessen bleiben sie in ihrem unfertigen, embryonalen Zustand und teilen sich immer weiter. Sie bilden Tumoren und teilweise sogar Metastasen. Beim 4S-Neuroblastom sind auch das Knochenmark und die Leber betroffen. Trotzdem stehen bei dieser Variante die Chancen auf Heilung durch Spontanremission besonders gut, etwa bei 80 Prozent. Die Gründe dafür werden im Moment intensiv erforscht. Die Onkologen der Universitäts-Kinderklinik Köln sind Spezialisten auf diesem Gebiet. Sie haben inzwischen festgestellt, dass eine spontane Rückbildung auch bei den anderen Neuroblastom-Formen vorkommen kann - allerdings nicht so häufig.



Wenn das Selbstmordprogramm der Körperzellen versagt und sie sich unkontrolliert teilen, entstehen Tumoren und Metastasen



Mit dem Szintigraphen können Ärzte feststellen, wie weit sich Krebszellen im Körper verteilt haben



Nur unter dem Mikroskop lässt sich erkennen, ob die Krebszellen beim Neuroblastom auch schon ins Knochenmark vorgedrungen sind

# Sterben um zu überleben

## Erfolgsmodell Altruismus: Alle für den Staat

Der Tod für die Gemeinschaft – bei Insekten, die in Staaten leben, ist er fast an der Tagesordnung. Weil in gefährlichen Situationen wenige Individuen ihr Leben lassen, kann das Überleben der Gemeinschaft gesichert werden. Einige Arten von Ameisen, Termiten, Wespen, Hornissen und Bienen organisieren ihr Zusammenleben so als sehr leistungsfähiges System – Biologen bezeichnen diese Insektenstaaten auch als Superorganismus. Dass dieses Modell bei unterschiedlichen Insektenarten auftritt, beweist, dass es sich in der Evolution als erfolgreich erwiesen hat.

## Ameisen als todesmutige Kämpfer

Im Reich der Ameisen sind zwei Beispiele von scheinbar lebensmüden Einzelkämpfern bekannt. Die malaysische Ameise „Camponotus Saundersi“ kann bei Gefahr ihren Hinterleib derart zusammenziehen, dass er platzt. Eine klebrige Flüssigkeit ergießt sich dann über den Angreifer und macht ihn kampfunfähig. Die Ameise selbst stirbt bei dieser Aktion. Eine Ameise, die in Brasilien zuhause ist, vollbringt ähnlich spektakuläre Heldentaten. Wenn man gegen Abend geduldig den Nesteingang der Gattung „Forelius posillus“ beobachtet, stellt man Erstaunliches fest: Die im sandigen Boden lebenden Ameisen stellen noch vor Sonnenuntergang ihre auswärtige Arbeit ein. Alle verschwinden in ihrem trichterförmig angelegten Loch.

Dann tauchen ein oder zwei Ameisen wieder auf und schütten das Loch von außen mit Sand zu. Innerhalb von einer Stunde ist das Nest nicht mehr auszumachen. Doch die, die das Nest von außen sicher verschlossen haben, können jetzt nicht mehr hinein – mit großer Wahrscheinlichkeit überleben sie die Nacht nicht. In beiden Fällen opfern sich Einzelne für die Gemeinschaft.

## Honigbienen arbeiten unermüdet für die Gemeinschaft

Die heimischen Bienen, schon seit Jahrtausenden als Haustiere und Honiglieferanten beliebt, leben ebenfalls nach dem Altruismus-Prinzip.

Denn die einzelne Honigbiene sammelt keineswegs für den Eigenbedarf. Sie ist Teil eines großen Volkes, das in den Sommermonaten auf über 50.000 Einzeltiere anwächst. Eine einzelne Honigbiene wäre allein nicht überlebensfähig. Im Bienenstaat ist sie ein winziger Bestandteil einer sozial lebenden Gemeinschaft, von Imkern als „der Biene“ bezeichnet. Dabei ist das Bienenvolk streng genommen eine einzige Familie, die sich aus drei unterschiedlichen Familienmitgliedern zusammensetzt: der Bienenkönigin als Mutter des gesamten Staates samt ihren Nachkommen, den weiblichen Arbeitsbienen und den Drohnen, den einzigen Männchen im Staat.

## Eine für alle – alle für den Staat

Eine Honigbiene opfert sich ohne Bedenken für ihren Staat – sie sticht ohne zu zögern zu, wenn es gilt, das Volk zu verteidigen, obwohl sie dabei ihr Leben verliert. Denn wird die Biene nach dem Einstich abgestreift, reißt der Stachel mitsamt der Giftdrüse aus und bleibt in der Haut des Opfers stecken. Die Drüse pumpt aber auch ohne Biene weiter Gift in das Opfer. Gleichzeitig wird beim Abstreifen ein Alarm-Duftstoff freigesetzt, der die anderen Bienen auffordert, an dieselbe Stelle zu stechen. So nützt



Bienen bei Ankunft und Abflug am Bienenstock



Honigbiene bei der Nahrungssuche



Bienen auf Waben



Bienenstachel in der Haut des Opfers

der Tod einer einzelnen Biene dem Staat mehr als ihr Überleben.

### Ein Leben für die Königin

Auch die Drohnen müssen schließlich im Dienst der Königin ihr Leben lassen. Die, die bei der Befruchtung zum Zuge kommen, sterben sofort danach – ihr Leben dient einzig und allein der Fortpflanzung. Und wenn Ende August die Begattung der neuen Königinnen abgeschlossen sind und zum Herbst die Nahrungsvorräte geringer werden, kommt es zur so genannten Drohnenschlacht. Die im Stock verbliebenen, unnützen Männchen werden von den Arbeiterinnen heraus geworfen und müssen draußen, auf sich allein gestellt, verhungern. So wenig wie die einzelne Biene alleine überlebensfähig ist, so wenig zählt sie auch als Individuum im Bienenstaat. Ähnlich wie bei einem menschlichen Körper ist jedes einzelne Tier wie eine kurzlebige Zelle im Gesamtorganismus des Bienenvolkes. Wenn die einzelne Zelle stirbt, wird sie einfach ersetzt – der Bienenstaat als Einheit überlebt. So ist „der Bien“ praktisch unsterblich.

## Lesetipps

Sterben von Anfang an

**Ein Kind entsteht – Bilddokumentation über die Entwicklung des Kindes im Mutterleib**  
 Autor: Lennart Nilsson  
 Verlagsangaben: Aus der Reihe „Mosaik bei Goldmann“, ISBN 3442390508  
 Sonstiges: 440 Farbfotos, zahlreiche Farbzeichnungen

Klassiker mit einzigartigen Aufnahmen aus dem Mutterleib.

**Der wunderbare Weg ins Leben**  
 Autor: Rainer Jonas  
 Verlagsangaben: Suedwest Verlag, ISBN 3517060240  
 Sonstiges: 15,95 Euro

Schön bebildertes Buch über die 38-Wochen-Reise ins Leben.

**Taschenatlas der Embryologie**  
 Autor: Ulrich Drews  
 Verlagsangaben: ISBN 3131099011, erschienen 1994  
 Sonstiges: 29,95 Euro, 421 Seiten

Medizinisches Übersichtswerk zur Embryologie mit vielen Abbildungen, für fachlich interessierte und vorgebildete Leser.

Runderneuerung im Körper

**Lehrbuch der Molekularen Zellbiologie, mit CD-ROM**  
 Autoren: Bruce Alberts, Dennis Bray, Karen Hopkin  
 Verlagsangaben: Wiley-VCH, ISBN 3527311602  
 Sonstiges: 938 Seiten, 3. Aufl. April 2005  
 Preis: 69 Euro

Nicht nur für Biologiestudenten ist dieser über 900 Seiten starke Wälzer eine lohnenswerte Anschaffung. Auch interessierte Nichtbiologen können sich ausführlich über die mehr als 200 Zelltypen informieren, die hier dargestellt werden. Und das Beste: man versteht die Erklärungen sogar ohne Studium.

**Der Mensch in Zahlen**  
 Autoren: Konrad Kunsch und Steffen Kunsch  
 Verlagsangaben: Spektrum Akademischer Verlag, ISBN 3827409020

Wie lange leben die roten Blutkörperchen, wie viele Zellen sterben pro Sekunde ab und werden wieder neu gebildet? Die Antworten auf solche Fragen (120 Tage und über 50 Millionen) finden sich zusammen mit den Antworten auf über 20.000 weitere Fragen in dieser Datensammlung – Zahlen über Zahlen, Tabellen ohne Ende. Und trotzdem spannend.

...Unsterblichkeit

**The Long Tomorrow**  
 Autor: Michael Rose  
 Verlagsangaben: Oxford University Press, September 2005, ISBN 0195179390  
 Sonstiges: Gebundene Ausgabe, 224 Seiten, Sprache: Englisch, Preis: 22,90 Euro

Michael Rose, Biogerontologe an der Universität von Kalifornien in Irvine, hat durch gezielte Selektion Furchtfliegen gezüchtet, die länger leben und vor allem länger gesund leben als ihre wilden Artgenossen. In diesem Buch beschreibt er seine Forschung und erklärt, warum er glaubt, dass nicht zuletzt auch durch seine Arbeit die Lebenserwartung der Menschen eines Tages zumindest verdoppelt wird.

Krebs

**Wunder sind möglich**  
 Autor: Herbert Kappauf  
 Verlagsangaben: Herder, ISBN 3-451-28108-2  
 Sonstiges: 192 Seiten

Der Onkologe Dr. Herbert Kappauf beschäftigt sich seit 15 Jahren intensiv mit Spontanremission. In seinem gut verständlich geschriebenen Buch nähert er sich dem Phänomen anhand von Fallbeispielen, aber auch in allgemeinen, wissenschaftlich fundierten Erklärpassagen sehr differenziert. Die Häufigkeit (oder besser Seltenheit) von Spontanremissionen bei verschiedenen Krebserkrankungen werden ebenso aufgezeigt wie die verschiedenen Mechanismen, über die es zur Spontanremission kommen kann.

Sterben um zu...

**Was ist was? - Wunderwelt der Bienen und Ameisen, Band 19**  
 Verlagsangaben: Tessloff Verlag, ISBN 3788602597  
 Sonstiges: 48 Seiten, gebunden  
 Preis: 8,90

Dieser „Was ist was-Band“ will seine jungen Leser mit dem Wandervolk der Bienen und Ameisen bekannt machen. Warum stechen Bienen? Wo kommt der Honig her? Was ist der Unterschied zwischen einer Biene und einer Wespe oder Hornisse? Wie bauen Ameisen ihre Nester? Fragen über Fragen, die dieses Buch, unterstützt durch viele Abbildungen, aufklärt.