



Ein Wurm sucht seine Mitte

Symmetrie in der Natur hat Künstler und Architekten zu allen Zeiten inspiriert. Kein Wunder, gilt sie doch als Inbegriff für Schönheit. Das Erfolgsmodell schlechthin ist dabei die Spiegelsymmetrie. **Jochen Rink** will am **Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik** in Dresden deshalb herausfinden, wie Organismen die Spiegelebene festlegen und damit die Voraussetzung für symmetrisch aufgebaute Lebewesen schaffen. Er erforscht dafür urtümliche Plattwürmer und ihre erstaunliche Fähigkeit zur Neubildung fehlender Körperteile.

Planarien sind kaum totzukriegen – jedenfalls nicht durch Zerstückeln. Selbst aus kleinen Teilen kann wieder ein vollständiger Wurm entstehen. Voraussetzung dafür ist, dass sich eine neue Körperachse bildet.



TEXT CATARINA PIETSCHMANN

Während die meisten Würmer entspannt am Boden liegen, ziehen einige wenige lässig eine Bahn durch den Pool. Mit kaum wahrnehmbaren Bewegungen gleiten sie elegant auf Tausenden von mikroskopisch kleinen Flimmerhärchen über den Boden ihrer Tupperchale. Ein majestätischer Anblick, wären da nicht ihre drolligen, reglosen Punktaugen. Planarien schielen und schauen nicht nach vorn, sondern starr nach oben.

Mehr als 60 Arten der tatsächlich sehr platten Plattwürmer tummeln sich hier in Dresden in einem speziell für sie reservierten Zuchttraum. Gesammelt wurden sie in aller Welt, darunter seltene weiße Exemplare aus Höhlen und solche, die eine Borte aus Augenpunkten an der Körperkante tragen. Plattwürmer sind normalerweise zwischen 0,8 Millimetern und 2,5 Zentimetern lang, aber es gibt unter ihnen auch regelrechte Riesen mit einem Meter Körperlänge. Meist sind sie bräunlich und farblich unscheinbar, manche aber auch apart getüpfelt. Sie sind pflegeleicht und stürzen sich in ihren Plastikboxen auf Kalbsleberhäppchen und Mehlwürmer.

Bei ihrem skurrilen Äußeren könnte man fast meinen, dass die Tiere vor Jahrmillionen einen Deal abgeschlossen haben: Sollen andere ruhig schön ausschauen und beispielsweise schicke rote Deckflügel mit schwarzen Punkten

bekommen wie die Marienkäfer. Darauf können wir verzichten. Aber wir wollen etwas im Gegenzug: ewige Jugend!

Dafür verzichten Plattwürmer zur Not auch auf Sex und vermehren sich ungeschlechtlich. Nicht alle Arten tun das – aber die, die sich asexuell fortpflanzen, sind quasi unsterblich. Jede zehnte Zelle des Wurmkörpers ist nämlich eine Stammzelle, die sämtliche Zelltypen hervorbringen kann. Aus diesem Grund erneuern sich Planarien pausenlos. Für jede sich teilende Stammzelle stirbt eine spezialisierte Zelle, so dass sich die Würmer in Form und Größe nicht mehr verändern.

AUS EINS MACH ZWEI

Zur Fortpflanzung reicht es ihnen, sich mit der Schwanzspitze irgendwo festzuhalten und mit dem Kopfende weiterzumarschieren. „Nach einigen Stunden reißt der Körper auseinander, und aus beiden Teilen bildet sich innerhalb von zwei Wochen jeweils wieder ein vollständiger Wurm“, erzählt Jochen Rink vom Dresdner Max-Planck-Institut. Daher gehören Planarien zu den gefragtesten Untersuchungsobjekten der Stammzellforschung. Ihre außergewöhnliche Regenerationsfähigkeit verheißt ewige Jugend und die Heilung vieler Leiden.

Doch Rink fasziniert an Plattwürmern etwas anderes: Ihnen gelingt es nicht nur, aus jedem beliebigen Körperschnipsel wieder einen kompletten Organismus aufzubauen. Sie legen die-

sen auch perfekt symmetrisch an! Und zwar egal, ob das Ursprungstier in zwei oder in 20 Stückchen zerschnitten wurde. Aus der Seite geschnittene Gewebestreifen zum Beispiel schnurren zunächst wie eine Korkenzieherspirale zusammen und entwickeln sich binnen Tagen zu einem kompletten eigenständigen Organismus. Dies unterscheidet Plattwürmer von anderen Regenerationspezialisten wie dem Axolotl. Diese salamanderartigen Tiere können zwar fehlende Körperteile, Organe und sogar Teile ihres Gehirns regenerieren. Aber aus einem abgetrennten Stück wächst kein neuer Lurch heran, sondern es geht zugrunde.

Beiden Tieren gemeinsam ist ihre Symmetrie. Schon in der Embryonalphase muss sichergestellt werden, dass ein symmetrisch aufgebauter Organismus entsteht. Auch die Regeneration der Plattwürmer muss so verlaufen, dass der neue Körper wieder symmetrisch ist oder sich die neuen Teile in die Symmetrie des Körpers einpassen. „Die sogenannte bilaterale Symmetrie – zwei spiegelbildliche Körperhälften – ist ein fundamentales Konstruktionsprinzip höherer Lebewesen“, sagt Rink.

Dazu ist zunächst einmal eine Symmetrieachse nötig. Aber wie definiert ein Organismus überhaupt eine Linie? Klar ist: nicht bei allen Lebewesen auf die gleiche Art, denn die Evolution hat dafür verschiedene Wege gefunden. Während der frühen Embryonalentwicklung von Wirbeltieren zum Bei-



Linke Seite Planarien sind pflegeleicht: Abgesehen von Füttern und gelegentlichem Wasserwechseln muss sich Jochen Rink (links oben) nicht viel um sie kümmern. Im Labor des Dresdner Max-Planck-Instituts leben sie in haushaltsüblichen Plastikdosen (rechts oben). Darin können sie sich in kürzester Zeit stark vermehren (unten).

Diese Seite Planarien brauchen den Hedgehog-Signalweg für die Regeneration von verlorenem Gewebe. Normalerweise (links) bildet ein Mittelstück einen Kopf mit Gehirn (blau) und den Schwanz mit zwei Darmsträngen (grün). Ist zu wenig Hedgehog vorhanden (Mitte), wächst ein normaler Kopf, aber kein Schwanz. Mit zu viel Hedgehog (rechts) wird anstelle des Kopfes ein kompletter Schwanz gebildet.



spiel wandern sich teilende Zellen vorwärts und stülpen sich allmählich wie eine Mütze über die Dotterkugel. Ein anderer Zelltyp macht am Umkehrpunkt – dem sogenannten Organizer – kehrt und läuft zwischen der äußeren Zellschicht des Embryos und dem Eidotter wieder zurück. Eine Halbkugel entsteht – wie ein eingestülpter Fußball, aus dem die Luft entwichen ist.

STARTPUNKT FÜR DIE MITTELLINIE

„Der Umkehrpunkt wird später zur Mittellinie des Körpers, an deren Enden Kopf und Schwanz entstehen.“ Signalnetzwerke in den Zellen kontrollieren diesen Prozess, indem sie rechtzeitig bestimmte Gene an- oder abschalten. Zusammengefasst geht die Natur also so vor: Man lege einen Punkt fest, von dem ausgehend die Zellen in entgegengesetzter Richtung wegwandern. Fertig ist die Linie!

Die Fruchtfliege *Drosophila* macht es anders. Der Fliegenembryo ist nicht kugel-, sondern zigarrenförmig. Signalstoffe in den Zellen definieren „oben“ und

„unten“, also Bauch und Rücken. Bauch- und Rückensignale unterdrücken sich gegenseitig, weil aber die Bauchsignale sinnbildlich überwiegen, bleibt am Ende nur noch eine scharf abgegrenzte Rückenlinie übrig. Sie wird zur Mittellinie des entstehenden Fliegenkörpers.

Und die Planarien? Rink und seine Kollegen haben zunächst nach Genen gesucht, die nur an der Mittellinie aktiv sind. Dabei sind sie unter anderem auf die Gene *bambi* und *slit* gestoßen. Beide sind nur in Zellen aktiv, die exakt auf der Mittellinie sitzen: *bambi* nur in einem schmalen Streifen entlang des Rückens, *slit* markiert dagegen auf der Bauchseite zusätzlich einen breiteren, V-förmigen Streifen vom Kopf bis zur Schwanzspitze. Die Mittellinie wird also nicht durch eine einzelne, sondern durch mehrere unterschiedliche Gruppen von Zellen festgelegt. Auch in diesem Fall nutzt die Natur wohl die gleichen molekularen Mechanismen quer durch das Tierreich, denn *slit* ist auch bei Fliege und Mensch an der Mittellinie aktiv.

Anfang der 1960er-Jahre entdeckten Biologen durch Zufall, welche dramatische Konsequenzen es hat, wenn die

Symmetriebildung im Organismus nicht funktioniert. In Kalifornien wurden auf einigen Wiesen missgebildete Lämmer geboren, die nur ein Auge hatten. Es saß mittig am Kopf, wie bei den Zyklopen in der griechischen Mythologie. Wie sich herausstellte, hatten die Mutterschafe Kornlilien gefressen. Diese Pflanzen enthalten ein Toxin, das die Erkennung des Signalproteins Hedgehog in den embryonalen Zellen hemmt. Erstaunlicherweise war der Defekt auf den Kopf beschränkt. Die Lämmer, die bald nach der Geburt starben, hatten vier völlig normal ausgebildete Beine.

„Wenn wir den Hedgehog-Signalweg bei Planarien stören, passiert Ähnliches“, erzählt Rink. Seine Kollegen und er variierten die Menge von Hedgehog im Wurmkörper, schnitten Kopf und Schwanz ab und beobachteten, was passiert: Hatte der Torso deutlich zu wenig Hedgehog-Signal, entwickelte sich zwar ein perfekter neuer Kopf, aber nur ein kurzer Stummelschwanz. War das Signal im Überfluss vorhanden, gelang die Schwanzregeneration exakt, doch statt des Kopfes wuchs ebenfalls ein Schwanz. Und wurde das Hedge-



hog-Signal nur geringfügig erhöht, entstanden Würmer mit verkümmerten und augenlosen Köpfen oder eben zyklische Würmer – genau andersherum als bei den Schafen: Einäugige Lämmer besaßen zu wenig Hedgehog-Signal.

NERVENBAHNEN VERBINDEN SICH ZUR SCHLEIFE

Gespannt sahen sich die Forscher nun die Gene an, die die Mittellinie markieren. Bei den Tieren mit verkümmertem Kopf war das Mittellinien-Gen *bambi* bis zur Schwanzspitze durchgehend aktiv, aber nicht mehr in der Kopfregion. Auch die Nervenbahnen fehlten hier – sie verbanden sich unterhalb der Kopfregion zur Schleife. „Das Tier hat kein Gehirn mehr, sondern nur noch ein peripheres Nervensystem.“ Da dem neuen Kopfgewebe jegliche Information über seine eigene Mitte fehlt, ist es nicht spiegel-, sondern radiärsymmetrisch – wie eine Kugel oder ein Kreis also. Beim einäugigen Wurm wiederum ist *bambi* von Kopf bis Schwanzende sichtbar, aber die Nervenbahnen der beiden Körperhälften sind viel dichter zusammengedrückt.

Rinks Fazit: „Die Mittellinie steuert die Endpunkte Kopf und Schwanz an. Sind diese Teile voll ausgebildet, finden wir auch eine komplette Mittellinie. Ist

die Kopfneubildung weniger ausgeprägt, bekommt auch die Mittellinie Probleme, und es entstehen Tiere mit nur einem Auge.“ Das Signalsystem für die Mittellinienbildung ist offenbar so fein austariert, dass es keinerlei Störung verträgt.

Um verfolgen zu können, wie sich eine „neue Mitte“ herausbildet, haben die Forscher Würmern einen schmalen Seitenstreifen abgeschnitten und in diesem dann die Aktivität des *slit*-Gens mithilfe eines grünen Farbstoffs sichtbar gemacht.

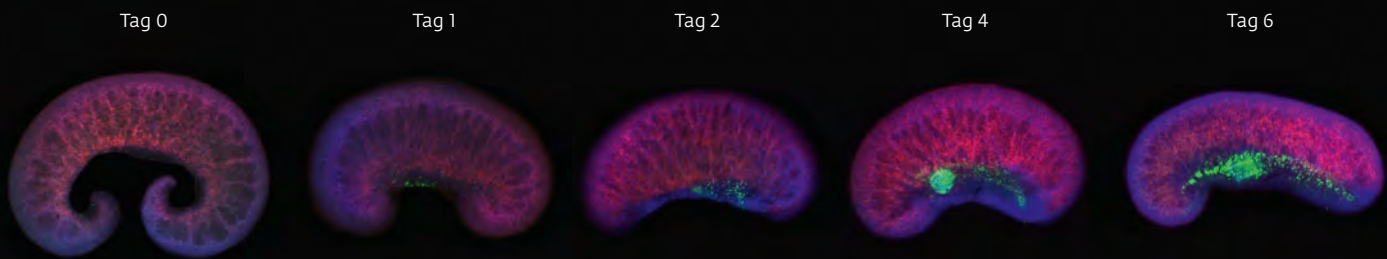
Direkt nach der Abtrennung hat der Streifen zunächst offenbar keine Information über eine Mittellinie. Doch bereits nach einem Tag leuchten unter dem Mikroskop erste Zellen grün. „Allerdings nicht in der Mitte, sondern an der Wundkante“, erzählt Jochen Rink.

Am zweiten Tag bilden sich bereits zwei unterschiedliche grüne Zellpopulationen heraus – eine zentrale und eine andere weiter vorn, die sich später wahrscheinlich zur Kopflinie ausgewachsen wird. Und es sind auch bereits erste Zellen zu erkennen, die sich jenseits der „neuen Mitte“ – der ehemaligen Wundkante – ansiedeln. „Woher diese Zellen kommen, das wissen wir noch nicht.“ Nach sechs Tagen hat sich das Augenpaar gebildet. Der zentrale grüne Zellhaufen ist stetig größer

und zum Schlund geworden, der in der Bauchmitte liegt und zugleich als After dient. Erst wenn der Verdauungstrakt fertiggestellt ist, verlängert sich die Mittellinie bis hin zur Schwanzspitze. Die Zellen gehen dabei so wie ein Arbeitstrupp vor, der zunächst eine Baustelle abarbeitet und anschließend zur nächsten weiterzieht.

POSITIONSBESTIMMUNG MIT SIGNALSTOFFEN

Doch woher weiß der Streifen eigentlich, dass er ursprünglich auf der rechten Körperseite lag und ihm jetzt die linke Seite fehlt? Und was sagt ihm, wann seine Regeneration abgeschlossen ist und er aufhören muss zu wachsen? „Wir wissen noch nicht genau, wie diese Prozesse funktionieren; die Konzentration von Signalstoffen im Körper könnte beispielsweise diese Abläufe kontrollieren.“ Nimmt ein Botenstoff beispielsweise von vorn nach hinten kontinuierlich ab, so kann eine Zelle ihre Position anhand der Konzentration erkennen. Wird die Zelle vom restlichen Körper getrennt, so wächst an der Stelle des Streifens, an der beispielsweise vorher der Kopf war, wieder ein Kopf, niemals ein Schwanz – und umgekehrt.



Oben Ein schmaler seitlicher Gewebestreifen beinhaltet zunächst keine Mittellinien-Zellen. Bereits nach einem Tag bilden sich die ersten Mittellinien-Zellen (grün), jedoch nicht in der Mitte des Gewebestücks, sondern am Wundrand. Während der folgenden Tage bildet sich an der Grenze zwischen altem (violett) und neuem Gewebe (blau) eine Linie aus. Durch die Integration von neuen Zellen außerhalb dieser Linie (blaue Bereiche) rückt diese immer mehr in die Mitte, bis sie schließlich zur Mittellinie wird.

Linke Seite Regeneration der Mittellinie: Wird ein schmaler Streifen von der Seite eines kompletten Tieres abgeschnitten (grau in der Grafik), rollt sich der Streifen zunächst kornenzieherförmig zusammen. Zwei Tage später hat sich sein Gewebe wieder entspannt, und der Schnitt ist verheilt. Nach sechs Tagen hat sich schon viel neues Gewebe an der ehemaligen Schnittkante des Streifens gebildet (hellbraun). Am zehnten Tag hat der Streifen die fehlenden Teile beinahe vollständig nachgebildet. Nach 14 Tagen ist aus ihm wieder ein spiegelsymmetrischer Wurm geworden.

Auch der Körper- beziehungsweise Wundkante kommt eine wichtige Rolle bei der Regeneration zu, da hier Zellen von Bauch- und Rückenseite aufeinandertreffen. Das Gewebe kann dies erkennen. Außerdem müssen manche Signale quer durch den Körper reichen, denn pikst man den Wurm mit einer Nadel, läuft ein Alarm durch den Körper, und alle Stammzellen beginnen sich schneller zu teilen.

Das System ist so gut kontrolliert, dass es sogar die Schwere der Verletzung einschätzen kann. „Das ist wichtig“, sagt Jochen Rink, „denn nicht bei jedem kleinen Riss im Gewebe darf dort ja gleich ein neuer Kopf wachsen.“

Rinks Team hat nebenbei die Verwandtschaftsbeziehungen zwischen den Plattwürmern aus der institutseigenen Sammlung untersucht sowie ihre Regenerationsfähigkeit. Die Wissenschaftler haben nachgewiesen, dass die Arten, die sich nicht mehr regenerieren können, diese Fähigkeit einst besaßen, sie aber im Laufe der Evolution verloren haben. „Ein einziger Signalweg hat sich bei ihnen verändert. Interessanterweise geschah dies mehrfach und an unterschiedlichen Stellen.“ Rink will nun herausfinden, warum das so ist.

Und ein weiterer Zusammenhang ist auffällig: Arten, die nicht mehr rege-

nerationsfähig sind, vermehren sich sexuell. „Wir vermuten daher inzwischen, dass die außergewöhnliche Regenerationsfähigkeit von Planarien gar nicht der Wundheilung dient, sondern der Fortpflanzung.“ In einer Wasserpfütze, die schnell austrocknet, ist es eben von Vorteil, sich einfach teilen zu können, statt mühsam nach einem Partner suchen zu müssen.

EIN INDIVIDUUM, VIELE STAMMZELLEN

Anders als bei Fruchtfliege oder Zebrafisch sind Genveränderungen bei Plattwürmern bislang nicht möglich. Es würde die Forschung sehr erleichtern, könnte man in das Erbgut der Würmer das Gen für ein fluoreszierendes Protein einschleusen und der Mittellinie einfach beim Wachsen zusehen.

Dass dies bisher fehlschlug, liegt vermutlich an den vielen Stammzellen. „Wenn sich in einem Tier, das nicht altert, Stammzellen ständig teilen und jede Teilung das Risiko einer Mutation trägt, müsste es eigentlich in dem Tier viele Stammzelllinien geben, die unabhängig voneinander mutieren. Der Wurm ist somit vielleicht gar kein Individuum, sondern viele“, spinnt Rink den Faden weiter. Ein Kollektiv quasi.

Zusammen mit Kollegen vom Dresdner Max-Planck-Institut hat Rinks Arbeitsgruppe kürzlich das Erbgut der Planarien entschlüsselt. Damit lässt sich nun die Kollektivtheorie testen.

Plattwürmer sind frühe Nachkommen des letzten gemeinsamen Vorfahren aller heute lebenden Tiere, einschließlich des Menschen. „Dieser Urahn muss bereits einen Kopf gehabt haben und bilateral symmetrisch gewesen sein.“ Diese Form der Spiegelsymmetrie gab es demnach schon, bevor die ersten Tiere eine starre Wirbelsäule erfanden und Flossen, Beine oder Flügel entwickelten. Heute haben die meisten Lebewesen einen spiegelsymmetrischen Körperbau.

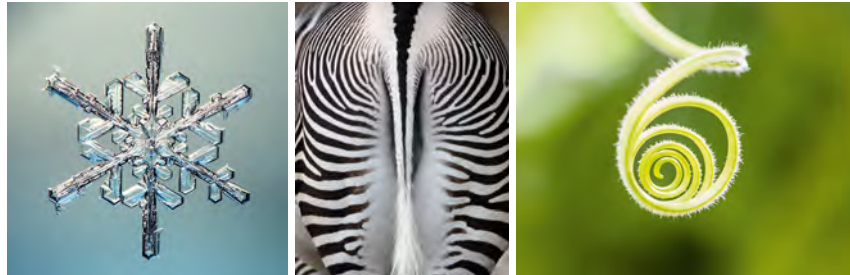
„Symmetrie steckt ganz tief in der Biologie. Das molekulare Programm dafür war schon vor 500 Millionen Jahren im Kambrium angelegt“, sagt Rink. Alles, was danach kam, waren lediglich Variationen.

Doch eine bilaterale Symmetrie ist mehr als ein Konstruktionsmerkmal. Sie ist Voraussetzung für die Definition von „vorn“ und „hinten“, „links“ oder „rechts“. Mit der Kopf-Schwanz-Achse ist somit auch die Bewegungsrichtung vorgegeben. „Vielleicht wurde ein bilateraler Körperbau unerlässlich, als Organismen begannen, sich mit seitlichen Fortsätzen zu bewegen“,

SYMMETRIE IN DER NATUR

Symmetrie gibt es in der belebten wie in der unbelebten Natur. So können Zucker- oder Aminosäuremoleküle eine Spiegelebene besitzen oder sich wie Bild und Spiegelbild verhalten – ein Phänomen, das auch als Chiralität bezeichnet wird. Obwohl ansonsten chemisch identisch, kann eine unterschiedliche räumliche Anordnung die Eigenschaften eines Moleküls maßgeblich verändern: bei spiegelbildlichen Duftmolekülen etwa von krautigem zu „Citrus“-Geruch, bei Arzneistoffen wie dem Thalidomid (Contergan®) gar von wirksam zu schädlich. Auch die meisten Mineralien ordnen ihre Atome in symmetrisch aufgebauten Kristallgittern an wie die Doppelpyramiden im Diamant oder die Würfel im Kochsalz. Selbst Schneeflocken besitzen stets eine sechszählige Drehachse.

Eine spezielle Symmetrie zeigt die Natur beim Aufbau von Spiralen. Sie schrauben sich durch alle Größenordnungen – von der DNA-Doppelhelix über die Anordnung von Sonnenblumenkernen, Tierhörnern bis zu Galaxien. Da Spi-



ralen keine Spiegelebene enthalten, sind sie an sich asymmetrisch. Sie können sich aber wie Bild und Spiegelbild zueinander verhalten – genau wie die rechte zur linken Hand. Organismen bevorzugen meist eine Drehrichtung: Bei den Gehäusen der Weinbergsschnecken liegt das Rechts/links-Verhältnis bei 20 000 zu 1. Ackerwinden dagegen schlängeln sich ausschließlich links herum.

Während im Tierreich die Spiegelebene meist das einzige Symmetrieelement ist, besitzen Pflanzen häufig eine Kombination aus Spiegelebenen, mehrzähligen Drehachsen oder Drehspiegelachsen.

meint Rink. „Wenn die rechte Flosse größer ist als die linke, kann man nur im Kreis schwimmen.“ Sind Flügel oder Beine rechts und links ungleich verteilt, ist das auch eher hinderlich. Andererseits haben aber auch die meisten Pflanzenblätter eine Spiegelachse, obwohl sie sich niemals bewegen. Vielleicht liegt der tiefe Grund für Symmetrie deshalb in Transport- oder Wachstumsprozessen.

Die Symmetrie muss also einen Zweck erfüllen. Sie ist jedoch nie perfekt – sie muss nur gut genug für diese Aufgabe sein. „Der rechte Arm wird also nie exakt die gleiche Anzahl von Zellen besitzen wie der linke.“

War Symmetrie somit eine Grundlage für Komplexität? Vermutlich ja. Eine Ausnahme gibt es jedoch. Ein einziges mehrzelliges Lebewesen ist bekannt, das keine Symmetrie aufweist: *Trichoplax adhaerens*, was etwa bedeutet „Haarige anhaftende Platte“. Es sieht aus wie ein missglückter Pfannkuchen. Dank Muskelzellen und einem fransigen Teppich aus Wimpernhärchen auf der Bauchseite kann sich das nur drei Millimeter große Wesen dennoch amöbenartig fortbewegen. „Ein spannender

Fall, denn Symmetrie ist folglich für vielzelliges Leben keine zwingende Voraussetzung.“ Vielleicht hat *Trichoplax*

aber auch früher einmal Symmetrie besessen und sie durch eine Laune der Natur wieder verloren. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Die Gene *bambi* und *slit* sind bei den Plattwürmern – und möglicherweise auch bei anderen Organismen – an der Festlegung der Körpermitte beteiligt.
- Konzentrationsgefälle von Signalstoffen verraten Zellen, wo sie sich befinden. So können sie sich auch nach Trennung vom übrigen Organismus an ihre Lage und Orientierung im Körper „erinnern“. Fehlende Teile werden dann an korrekter Stelle neu gebildet.
- Die Fähigkeit von Planarien, ganze Körperteile neu zu bilden, dient möglicherweise gar nicht dem Zweck der Wundheilung, sondern könnte eine extreme Form der asexuellen Fortpflanzung sein.

GLOSSAR

Bilateralsymmetrie: Vorherrschende Symmetrieform im Tierreich: Mehr als 95 Prozent der Tierarten zählen zu den Bilateria, darunter auch der Mensch. Die Körpermitte stellt die Symmetrieachse dar, an der jeder Punkt rechts und links davon gespiegelt und mit seinem Gegenüber zur Deckung gebracht werden kann. Manche Gruppen wie die Seeigel und die Seesterne sind als Larven bilateral, später aber radiärsymmetrisch.

Hedgehog: Signalprotein, das die Embryonalentwicklung der meisten Tiere steuert. Das Protein ist Teil eines Signalweges aus verschiedenen Enzymen und Rezeptoren innerhalb von Zellen. Der Signalweg muss schon sehr früh in der Evolution entstanden sein, denn er kommt bei fast allen Tiergruppen vor. Bei Insekten kontrolliert er die korrekte Bildung der Körpersegmente und Flügel. Bei Wirbeltieren ist der Hedgehog-Signalweg für die bilaterale Symmetrie und die Anlage der Gliedmaßen verantwortlich. Schäden führen zu massiven Fehlbildungen und können Krebs verursachen.

Forschung leicht gemacht.

Schafft die Papierstapel ab!

Das Magazin der Max-Planck-Gesellschaft
als ePaper: www.mpg.de/mpf-mobil

Internet: www.mpg.de/mpforschung

Kostenlos
downloaden!



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT