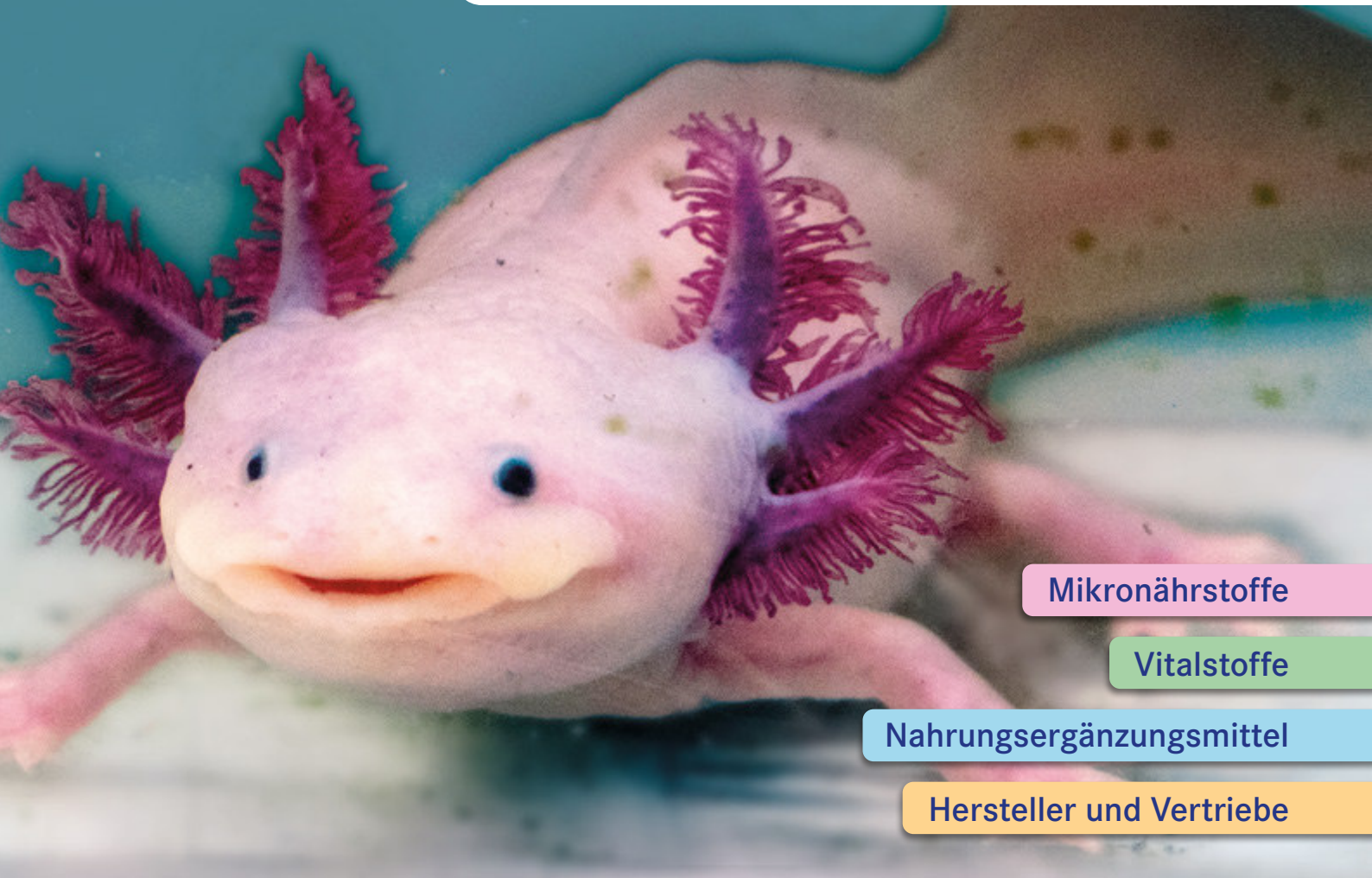


nutrition-press

Fachzeitschrift für Mikronährstoffe

Altersforschung Axolotl – Das Regenerationswunder



Mikronährstoffe

Vitalstoffe

Nahrungsergänzungsmittel

Hersteller und Vertriebe

Mit Nahrungsergänzungsmitteln
können Sie *gesund älter werden!*





Axolotl

(*Ambystoma mexicanum*)

Axolotl – das Regenerationswunder! Dem Geheimnis der Selbstheilung auf der Spur

Der Axolotl ist ein einzigartig erstaunliches Unikum unter den Wirbeltieren – ein wundersames Wesen und Überlebenskünstler aus den mexikanischen Seen. Der mexikanische Schwanzlurch fasziniert Forscher bereits seit Jahrzehnten, denn sie beherrschen eine beneidenswerte Fähigkeit: Amputierte Gliedmaßen, wie ein abgerissenes Bein oder ein abgebissener Schwanz wachsen bei ihm perfekt nach, sogar Teile von Herz, Hirn und Wirbelsäule samt Rückenmark erneuern sich nach Verletzungen von allein, und zwar komplett funktionstüchtig.

Ausblick in die Zukunft

Ziel der Axolotl-Forscher ist es, eines Tages auch das Regenerationsvermögen des Menschen zu steigern. Indem sie herausfinden, welche Zellen und Mechanismen an der Regeneration beim Axolotl beteiligt sind, um seine Fähigkeiten für die Medizin nutzen zu können, beispielsweise um die Wundbehandlung in der Medizin zu verbessern, etwa in der Therapie von Menschen mit schweren Brand- und Unfallverletzungen. Ein weiteres Ziel der heutigen Forschung ist, die regenerativen Eigenschaften des Axolotls zu nutzen, um Wege zu finden, die menschlichen Organen zugutekommen, etwa die Heilung des Herzens oder der Leber. Darüber hinaus sollen Axolotl Wissenschaftlern dabei helfen, die offensichtliche Krebsresistenz zu verstehen, die alle Amphibien zu haben scheinen. Interessanterweise sind Fälle von bösartigen Tumoren bei Axolotl nicht bekannt. Es wird vermutet, dass ihre Fähigkeit, Zellen und Körperteile zu regenerieren, ihnen dabei hilft.

Gewiss wäre es ein großer Fortschritt, wenn menschliche Zellen so programmiert werden könnten, dass sie ihren embryonalen Entwicklungsprozess wiederholen könnten. Beispielsweise könnte statt einer Narbe, eine Hand oder ein neues Organ, z. B. eine Niere wachsen, oder im Idealfall Rückenmarksgewebe ...

Auch wenn sich nur ein Bruchteil dieser Forschung für den Menschen nutzen ließe, wäre vielen Patienten geholfen. Denn schon die Entwicklung neuer Medikamente, mit deren Hilfe sich großflächige Wunden narbenfrei verschließen ließen, ohne dass später die Funktion des verletzten Gewebes beeinträchtigt ist, wäre ein großer Fortschritt. Damit würde man das Leiden vieler Menschen, die Kosten und auch das Infektionsrisiko senken können. Bis dahin ist es aber noch ein langer und weiter Weg.



Ausgewachsene Axolotl, ca. 10 Jahre alt, Bildnachweis: Benjamin Luckas, Koi Zentrum Hunsrück www.koizentrum-hunsrueck.de

Geschichte

Als die Azteken im 14. Jahrhundert das Tal von Mexiko besiedelten, fanden sie ein seltsames Wesen, das in dem See lebte, der die Insel umgab, in der sie ihre Hauptstadt Tenochtitlán errichteten. Sie nannten das Wesen "Axolotl". Der Trivialname "Axolotl" stammt aus der Sprache der Azteken Nahuatl: „Atl“ steht für Wasser und „Xolotl“ ist der Name eines Aztekengottes des Todes, des Blitzes und des Unglücks. Axolotl bedeutet so viel wie „Wassergott“, "Wassermonster" oder "Wasserhund", auch als „gemeiner Hund“ übersetzt.

Axolotl können sich zwar wieder komplett regenerieren, unsterblich sind sie deshalb nicht:

Sie erreichen durchschnittlich ein Alter von 10 bis 17 Jahren. Einige können sogar 20 bis 25 Jahre alt werden.

Ausgewachsen heißt nicht erwachsen

Das seltsame Aussehen des Axolotls hat einen besonderen Grund: Eine Besonderheit ist, dass Axolotl keine Metamorphose durchlaufen, sondern ihr gesamtes Leben als Kiemenatmer im Wasser verbringen. Normalerweise wandeln sich Amphibien vom Ei zur Larve (die Kaulquappe eines Frosches ist eine Larve) und schließlich zur erwachsenen Form. Das Axolotl bleibt während seines gesamten Lebens in seiner Larvenform. Dies bedeutet, dass es seine Kiemen und Flossen behält und die hervorstehenden Augen, Augenlider und Eigenschaften anderer erwachsener Salamander nicht entwickelt. Ein anderer Begriff zur Beschreibung dieses Zustands ist "perennibranchiate". Das Tier ist vollständig aquatisch und obwohl es rudimentäre Lungen besitzt, atmet es hauptsächlich durch seine Kiemen und in geringerem Maße durch seine Haut. Doch gelegentlich kann man die Axolotl beim Aufsteigen zur Oberfläche beobachten, wo sie kurz nach Luft schnappen, um die Lungen zu füllen. Dass das Axolotl ewig „Kind“ bleibt, ist in seinem Erbgut festgeschrieben. Vermutlich ist der dauerhafte Larvenstatus auch die Ursache dafür, dass seine Gliedmaßen nachwachsen, wenn es sie verliert, – allerdings mit zunehmendem Alter erheblich verlangsamt. Das heißt im Gegensatz zu den allermeisten Amphibien werden Axolotl geschlechtsreif, ohne vorher eine Metamorphose zu durchlaufen. Der Grund für das Ausbleiben der sonst typischen Metamorphose ist ein angeborener Defekt der Schilddrüse. Die Neotenie (Jugendreife) des Axolotls ist zwar evolutionär bedingt (die Vorfahren der heutigen Form waren Landtiere), aber nicht direkt genetisch konditioniert: Genetisch bedingt wird nur die Produktion der Schilddrüsenhormone Trijodthyronin und Thyroxin unterdrückt, die bei Amphibien die Metamorphose auslösen. Eigentlich produziert die Schilddrüse diese Hormone (= Botenstoffe), doch beim Axolotl funktioniert sie nicht richtig. Dadurch fehlt ihm genau das Hormon, durch das es sich in einen erwachsenen Schwanzlurch entwickeln würde. Würde das Axolotl das Hormon Thyroxin auf künstliche Weise erhalten, könnte es sich tatsächlich in einen terrestrischen landlebenden und lungenatmenden Salamander verwandeln. Auch durch jodhaltiges Wasser oder Ernährung, kann diese Metamorphose ausgelöst werden. Doch seine Lebenserwartung würde danach nur 4-5 Jahre sein. Als Larve kann es bis zu 20 Jahre und älter werden. Die Entwicklung des Axolotls zu einem zeitlebens vollaquatischen Lurch konnte sich vollziehen, weil seine Wohngewässer nicht austrockneten und sich genug Futter im Wasser befand. Die Metamorphose bot somit für die Individuen dieser Art keine Überlebensvorteile.

Biologie

Der gedrungene Körper des Axolotls gleicht dem Körper eines Molchs oder eines Salamanders. Sie verfügen über einen kräftigen, seitlich abgeflachten Ruderschwanz mit Flossensäumen, die sich weit nach vorne fortsetzen. An den Flanken sind Rippenfurchen deutlich ausgeprägt. Die Gliedmaßen sind recht kurz, aber kräftig. Die kurzen Beine

haben vorne 4, hinten 5 Zehen, die nicht durch Schwimmhäute verbunden sind. Am flachen, breiten Kopf findet man beidseitig jeweils drei äußere Kiemenäste, die wie Haare oder kleine Bäume aussehen und dahinterliegend mit Knorpelzähnen besetzte Kiemenspalten. Das breite Maul ist unterständig, die Schnauze ist abgerundet und die kleinen lidlosen Augen stehen weit auseinander. Ihr breites großes Maul befähigt sie, ziemlich große Beutetiere zu fangen und zu verschlingen. Wichtigstes Sinnesorgan, ist ihr Geruchssinn, da Axolotl sogar tote Beute aufspüren. Australier und Neuseeländer bezeichnen den Axolotl häufig als den Mexican Walking Fish, obwohl er kein Fisch, sondern eine Amphibie ist, ein Salamander, der zur Ordnung Schwanzlurche Caudata / Urodela gehört. Salamander gehören zur Familie der Querschnitzmolchen (Ambystomatidae, *Ambystoma mexicanum*). Die Männchen werden größer als die Weibchen und haben auch einen dickeren Kopf und einen größeren Schwanz.

In der Natur ist er braun marmoriert bis dunkel-grau gefärbt, trägt dunkle Flecken, und ist bauchseits etwas heller. In der Aquaristik wurden darüber hinaus viele Farbvarianten gezüchtet. Hierzu zählen albinotische (milchweiße Tiere mit roten Augen), leuzistische Tiere (weiße Tiere mit dunklen Augen, bei denen sich die Kiemen rot leuchtend vom Körper abheben), olivgrüne oder tintenschwarze Tiere sowie gescheckte „Harlekine“. Weiß und beigefärbend, goldig und gefleckt. Etwas untypisch kommt der sogenannte Wildling daher. Die Haut ist bei ihm in hellem Grau eingefärbt und mit dunklen Flecken betupft. Die Kiemenäste ragen mit roten kleinen Lamellen aus den beiden Kopfseiten heraus. Relativ selten kommen die kupfernen Axolotl vor. Noch seltener ist der axantische Axolotl, der bisweilen keine Farbe hat und durchsichtig wirkt. Es gibt darüber hinaus Axolotl, die albinotisch mit metallischem Glanz als „Harlekin“ daherkommen. Dieser ist eigentlich ein Weißling, der über einige Zellen verfügt, die Pigmen-



Bild 2: ca. 6 Monate alt, Bildnachweis: Benjamin Luckas, Koi Zentrum Hunsrück www.koizentrum-hunsrueck.de

te ausbilden können. Hierdurch entsteht die typische „Gesichtsmaske“ in verschiedenen Formen. Ihre Größe beträgt 15 bis 30 cm, im ganz seltenen Fall sogar bis ca. 45 cm. Je nach Größe liegt ihr Gewicht bei 60-200 g.

Wie alle Amphibien sind Axolotl wechselwarm und haben ein 3-Kammer-Herz (anders als Säugetiere mit 4 Kammern). Als Kaltwassertiere bevorzugen sie kühles und sauerstoffreiches Süßwasser. Deshalb besiedeln sie vor allem den Grund der Seen. Anders als die übrigen Lurche, die sowohl im Wasser als auch auf dem Land leben, verbringen Axolotl ihr ganzes Leben in dieser Umgebung. Zwischen 15 bis 18°C warmen Wasser fühlen sich die kleinen Lurche wohl. Sobald die Wassertemperatur über 24°C steigt, beginnen sie jedoch panisch umher zu schwimmen. Je höher die Temperaturen, desto stärker wird der Stoffwechsel der Tiere angeregt. Wodurch in diesem Fall Krankheiten ausbrechen können, die bis zum Tod führen. Temperaturen von 1°C bis 2°C hingegen sind ungefährlich für die Tiere. Der Axolotl fühlt sich in hartem Wasser mit einem pH-Wert über 6,5 bis 8 wohl. In zu weichem Wasser können die Tiere für einen kurzen Moment ihre Färbung verlieren. Dies ist zwar nicht gefährlich, kann jedoch Stress auslösen. Bei einem steigenden PH-Wert über 8 kann sich schon ein geringer Gehalt von Amoniak toxisch auf die Salamander auswirken und auf Dauer zum Tode führen. Axolotl sind dämmerungs- und nachtaktive Lichtmuffel und verstecken sich tagsüber gern in ihren Unterschlüpfen.

Sie zeigen kein ausgeprägtes Sozialverhalten. Im Gegenteil. Die Tiere können zwar einzeln, paarweise oder in Gruppen leben, sofern ausreichend Platz sowie Verstecke und geeignete Strukturen vorhanden sind. Aber bei mangelndem Nahrungsangebot kommt es schnell zu Beißereien. Bei unterschiedlich großen Exemplaren kommt es nicht selten vor, dass kleinere Artgenossen als Futter angesehen werden.

Axolotl sind Fleischfresser. Ihr großes Maul ist an den Winkeln nach oben gebogen, damit sie ihre Beute gut einsaugen können. Mit ihren abgeflachten Zähnen schnappen sie blitzschnell ihre Nahrung und bringen sie in eine geeignete Position, um sie vollständig herunterzuschlucken. Als Lauerjäger fressen Axolotl fast alles, was ihnen vor die Nase schwimmt. Bevorzugt werden kleine Fische, Schnecken, Bachflohkrebse, Frösche, Würmer, Insektenlarven, Wirbellose, Mücken und Fliegen, kleine Garnelen und auch Regenwürmer zählen zu den Lieblingsspeisen. Leider fressen sie auch ihre eigenen Eier, sowie frischgeschlüpften Nachwuchs, bzw. Artgenossen, die kleiner sind als sie selbst. Warum sie das tun, ist nicht bekannt. Vermutlich passiert das im Versehen, weil die Salamander reflexartig nach allem schnappen, was in ihre Nähe kommt. Wie die meisten Lurche hat der Axolotl in seiner natürlichen Umgebung viele Fressfeinde. Dazu gehören neben größere Fische und Vögel sogar die eigenen Elterntiere.

Axolotl verfügen über eine sehr effektive antimikrobielle Abwehr. Die Tiere brauchen die antimikrobiellen Peptide zum Überleben, weil sie kein Immunsystem haben mit Antikörpern und Fresszellen. Die Eiweiße schützen sie gegen Mikroorganismen und Viren. Es wird vermutet, dass die Wirksamkeit sogar effektiver ist als Antibiotika. In ganz Mexiko werden Axolotl aufgrund dieses Wissens traditionell als Heilmittel gegen Krankheiten wie Gebrechlichkeit und Atemwegserkrankungen eingesetzt. Nonnen züchten dort seit etwa 100 Jahren Axolotl, um aus ihnen Hustensaft zu gewinnen.

Mit etwa 8 bis 15 Monaten sind Axolotl geschlechtsreif. Geschlechtsreife Tiere können anhand der Kloakenregion (der gemeinsame Ausgang von Blase, Darm und Geschlechtsorganen) unterschieden werden, die beim Männchen deutlich größer und aufgewölbt und beim Weibchen flacher ist. Weibchen haben meistens einen runderen (dickeren) Körper und bei den Männchen ist die Kloake stärker ausgeprägt. Männchen erreichen die Geschlechtsreife etwas früher als Weibchen. Bei geschlechtsreifen weißen, goldenen und Albino Axolotl, sind die Zehenspitzen dunkel gefärbt. Umgekehrt verhält es sich bei den Wildlingen und den melanoiden Tieren, dort erscheinen sie weißlich. Sie können das ganze Jahr über ablaichen. In seinem natürlichen Lebensraum pflanzen sich Axolotl bevorzugt eher in den Winter- und Frühjahrsmonate fort. Die Paarungszeit beginnt somit im Februar, wenn in den Bergen der Schnee schmilzt und kühles Tauwasser die Wassertemperatur der Heimatseen vorübergehend deutlich absenkt. Die Balz des Männchens ist eine Art Tanz. Während der aufgerichtete Schwanz häufig schnelle schlingelnde Bewegungen ausführt, wird der Körper gebeugt. Nach einiger Zeit der Balz vor dem Weibchen wird das Männchen versuchen, es zu einem passenden Ablageplatz, z. B. Steine zu lotsen. Dort werden eine oder mehrere Samenpakete (die so genannte Spermatophore(n)) auf dem Boden abgesetzt und das Weibchen dazu gebracht, über die Absatzstelle zu kriechen und die Spermatophore mit der Kloake aufzunehmen. Im Körper des Weibchens gibt die Spermatophore die Spermien frei, die dann die Eier befruchten. Der Zeitabstand zwischen Befruchtung und Eiablage variiert bei den Weibchen erheblich und beträgt ca. vier bis fünf Stunden bis zu einem Tag. In der Literatur werden auch längere Zeitspannen beschrieben. Die Eier werden vorzugsweise an Blättern von Wasserpflanzen angeheftet. Da der Axolotl, ebenfalls wie die meisten ihrer Art, keinerlei Brutpflege betreibt, sichert er das Überleben der Spezies durch Masse statt Klasse und legt wahre Unmengen von Eiern ab. In der freien Wildbahn liegt die Chance, daß aus einem befruchteten Ei einmal ein adultes Tier wird, bei ungefähr 1:800. Das Weibchen legt also zwischen 80 und 800 Eier. Die Larven schlüpfen, stark temperaturabhängig, nach ungefähr 15 bis 20 Tagen Embryonalentwicklung. Zunächst zehren sie noch zwei Tage von ihrem Dottervorrat, bevor sie selbständig auf Nahrungssuche gehen. Larvale Axolotl erscheinen die ersten Wochen ihres Lebens durchsichtig,



Bild 1: ca. 14 Tage alt, Bildnachweis: Benjamin Luckas, Koi Zentrum Hunsrück www.koizentrum-hunsrueck.de

bis die Haut sich verdickt und die Pigmentzellen sich über dem Körper vermehren.

Insgesamt können Axolotl vier Mal im Jahr bis zu 1500 Eier legen. Bereits in diesen kleinen Axolotl-Eiern steckt das Geheimnis. Des Weiteren gilt als wahrscheinlich, dass sein Kannibalismus ein wesentlicher Grund für die extreme Regenerationsfähigkeit ist. Angesichts dieses Fressverhaltens ist das Nachwachsen von Gliedmaßen und Nerven ein Selektionsvorteil. Nach einer Verwundung bildet sich ein Wundepithel (Hautüberzug), der die Wunde nach außen hin abschließt und darunterliegendes Gewebe zur Heilung veranlasst. Nach wenigen Tagen bildet sich bei verlorenen Körperteilen eine Art Regenerationsknospe, aus welcher das Körperteil nachwächst. Bis das Körperteil vollständig regeneriert ist, dauert es meist nur wenige Monate (ca. 5-7 Monate) und bei ganz jungen Tieren sogar nur einige Wochen. Die Tiere zeigen dabei keine Wachstumsdefizite.

Erstaunlicherweise haben auch Säugetiere diese Fähigkeit. Aber eine normale Wundheilung bei Tieren erfolgt durch das Wachstum von Narbengewebe, das weder dem ursprünglichen Gewebe gleicht noch so robust ist. Bei normaler Wundheilung können die meisten Tiere auch keine verlorenen Gliedmaßen nachwachsen lassen. Der Axolotl ist jedoch vollständig in der Lage, die Gliedmaßen wieder nachwachsen zu lassen. Der ganze Metabolismus ist beim Axolotl langsamer, so dass die ganzen lebenswichtigen Funktionen weiter ablaufen können.

Was viele nicht wissen: Auch wir Menschen haben zum Teil diese Fähigkeit – zumindest im Kleinkindalter. Hier kann eine abgetrennte Fingerspitze noch regeneriert werden, wenn die Wunde nicht vernäht wird. Leider geht diese Fähigkeit nach wenigen Jahren wieder verloren. Im Unterschied zum Axolotl lassen beim Menschen diese

Zellen nämlich keinen neuen Arm wachsen. Stattdessen wird eine Art Notprogramm ausgelöst und es bildet sich eine Narbe, damit der Patient noch einigermaßen funktioniert. Nicht sehr einfallsreich, aber zweckdienlich. Denn bei besonders großer Verletzung haben wir große Schwierigkeiten diese zu heilen und deswegen war es wichtiger, dass es möglichst schnell heilt und man vor den Tieren weglaufen konnte.

Lebensraum – Trotz ihrer ungewöhnlichen Fähigkeiten zur Regeneration kämpfen wildlebende Axolotl ums Überleben.

Axolotl existieren schon seit ca. 350 Millionen Jahren auf der Erde und gehören damit zu den ältesten, noch anzutreffenden Amphibienarten. Als Mexiko-Stadt noch keine Millionenmetropole war, lebte in ihrer Umgebung dieses erstaunliche Wesen. Ihre spezielle Ausprägung könnte etwas mit dem vulkanischen Ursprung der Region und ihrer Wassersysteme zu tun haben. Denn früher war der Lebensraum der Axolotl das gesamte Seensystem im Hochland von Mexiko – Tiefe Seen und die verbindenden Kanäle mit reichlichem Pflanzenwuchs. Diese Seen sind Überbleibsel eines ausgedehnten Gewässersystems, das heute teilweise nur noch kanalartig ausgeprägt ist. Es erstreckte sich einst über rund 250 Quadratkilometer. Dort führten die Axolotl ein relativ ruhiges Leben und hatte nur wenige Feinde. Doch die schnelle und unkontrollierte Ausbreitung von Mexiko-Stadt hatte die Fläche der Seen auf etwa ein Hundertstel reduziert. Somit ist heute der natürliche Lebensraum des Axolotls nahezu verschwunden, vor allem in den Bundesstaaten Mexiko, Puebla und Michoacán. Das trifft besonders auf den größten Teil des ursprünglichen Areals, etwa dem (ehemaligen) Texcoco-See und dem Zumpango-See zu. Auch hier schränken Tourismus und Überfischung die Lebensmöglichkeiten des Axolotls stark ein, so wie am Pátzcuaro-See. Die Zahl der Tiere in ihrer mexikanischen Heimat ist dadurch in den letzten Jahren dramatisch zurückgegangen. Einige Arten verwandeln sich auf Grundlage von Umweltstressoren in erdwandelnde Salamander, indem sie ihre kaulquappenartigen Schwänze und Kiemen vom Kopf verlieren. Dies hängt jedoch von der Umgebung ab. So eine Verwandlung kann für das Tier stressig sein, da sie für diesen Zeitraum ganz aufhören Nahrung aufzunehmen. Einige Tiere verenden dadurch qualvoll an Verhungern. Die letzten Exemplare seiner Art, die in freier Wildbahn leben, kommen endemisch nur in dem See Xochimilco und im Chalco-See, sowie einigen wenigen weiteren hochgelegenen kleinen Seen westlich von Mexiko-Stadt in Mittelamerika vor, die intensiv für Landwirtschaft und Naherholung genutzt werden. Der Chalco-See, eines der beiden letzten Refugien der Art, ist mittlerweile nahezu ausgetrocknet. Der Xochimilco-See ist zu einem zerfaserten Kanalsystem mit künstlichen Inseln verkommen.

Mittlerweile leben mehr Axolotl in Aquarien, Laboren und Zuchtstationen als in freier Wildbahn. Das Tier ist zwar

streng geschützt, der Wildbestand jedoch stark vom Aussterben bedroht und seit 2006 ist er in der Roten Liste der bedrohten Arten aufgeführt. Um die Tiere zu retten, untersuchten Forscher die Gründe für das dramatische Schrumpfen der Populationen. Hintergrund ist demnach die Verschmutzung seines Lebensraums in den Feuchtgebieten südlich von Mexiko-Stadt. Verantwortlich dafür soll die schlechte Wasserqualität sein, verursacht von Abwässern, der nahe gelegenen Metropole und von Pestiziden auf den Feldern. Hinzu kommen die Abfälle der Touristen, die jede Woche zu Tausenden auf bunten Booten über die Kanäle schippern. Abfälle, Kunststoffe, Schwermetalle und viel Ammoniak aus Abfallbehandlungsanlagen verstopfen die Kanäle, in denen die Salamander leben. Auch die Trockenlegung von Seen, Feuchtgebieten und der Staudambau machen dem Axolotlbestand zu schaffen. In den Siebzigerjahren wurden zudem tausende gebietsfremde chinesische Karpfen, Barsche und afrikanische Tilapias für die Fischerei in die Gewässer gesetzt. Diese Tiere konkurrieren mit dem Axolotl um Nahrung und fressen seinen Laich. Darüber hinaus gelangen illegal wildgefangene Axolotl vereinzelt auf örtliche Märkte und werden zum Verzehr angeboten. In Japan wurde der Axolotl in den 1985er Jahren durch eine Werbekampagne von



Nisshin, einem Instantnudeln-Produzenten populär. Unter der Bezeichnung Wooper Looper werden Zuchtexemplare inzwischen auch frittiert als kulinarische Spezialität zum Verzehr angeboten. Einige Wissenschaftler sind demnach der Meinung, dass in erster Linie der Mensch die Axolotl vertrieben habe. Im Washingtoner Artenschutzübereinkommen wird die Art im Anhang II gelistet, in der EG-Verordnung 318/2008 im Anhang B.

Die Entnahme aus ihren Heimatseen ist inzwischen streng verboten. Die Forscher versuchen Schutzräume innerhalb des ursprünglichen Lebensraums der Axolotl anzulegen

und die Tiere in Mexico wieder heimisch zu machen. Das ist allerdings nicht so einfach. Denn die Tiere zu züchten und dann einfach in die Kanäle zu setzen, ist nicht die Lösung, da es eine große Herausforderung darstellt, das Ökosystem wieder so zu gestalten, dass sich Axolotl wohlfühlen und fortpflanzen können. Es bleibt also abzuwarten, ob diese Umsiedlung des Axolotls aus den Aquarien zurück in die Natur erfolgreich verläuft.

Den Selbstheilungskräften auf der Spur

Der Axolotl ist das älteste Labortier der Welt und faszinierte die Wissenschaft und Öffentlichkeit schon im 19. und Anfang 20. Jahrhundert. Angefangen von den naturhistorischen Beschreibungen und Illustrationen der frühen Neuzeit über die in Alkohol konservierten Exemplare Humboldts von 1804 bis hin zu lebenden Tieren. 1864 hatte der Axolotl immer konkretere Formen in der europäischen Wissenschaft angenommen. Doch diese Entwicklung wäre kaum möglich gewesen, wenn nicht etwa zeitgleich mit der Ankunft der Tiere in Europa die ersten Aquarien konstruiert worden wären. Sie stießen auf großes Interesse bei naturkundlich gebildeten Zeitgenossen und verband wissenschaftliches Interesse mit Unterhaltung und Ökonomie. Aquarien wurden in der Zoologie zu wichtigen Forschungsinstrumenten und begünstigten so die Nutzung der Axolotl als Forschungsobjekt.

Heute ist der Axolotl weltweit in Aquarien heimisch. In der biomedizinischen Forschung ist er gegenwärtig ein wichtiges Versuchstier in der Entwicklungsbiologie und der Regenerationsforschung. Denn die erstaunliche Heilungs- und Regenerationsfähigkeit des Axolotls fasziniert Wissenschaftler damals wie heute.

Viele Abläufe seines erstaunlichen Heilungsprozesses sind zwar mittlerweile bekannt, aber noch nicht alle im Detail verstanden. Zum Beispiel ist noch unklar, warum sich die Zellen beim Axolotl anders verhalten als beim Menschen. Vielleicht liegt die Antwort im Genom der Schwanzlurche, das etwa zehnmal so groß ist wie das von Menschen. Früher nahm man an, dass die Größe des Genoms auch mit der Komplexität zusammenhängt, aber das konnte man wissenschaftlich widerlegen. Die Genom-Größe sagt vielmehr etwas über die Zellteilung aus und die geht beim Axolotl sehr langsam. Zwar hat das Tier nur 28 Chromosomen und damit weniger als zum Beispiel der Mensch mit 46 Chromosomen. Doch die Chromosomen der Lurche sind viel größer. Dazu kommt, dass das Axolotl-Erbgut viele Sequenzen enthält, auf denen keine Gene sind, die also keine Bauanleitung für Proteine enthalten. Welche Funktion diese Bereiche haben, ist unklar. Möglicherweise sind sie dazu da, Gene an- oder abzuschalten. Sicher ist aber, dass sie irgendeine Aufgabe erfüllen. Wären sie überflüssig, hätten die Tiere sie im Lauf der Evolution längst verloren. Hängen sie vielleicht mit der sagenhaften Regenerationsfähigkeit des Axolotls zusammen? Und gibt es ähnliche Bereiche im Menschen?

Um Antworten auf diese Fragen zu finden und die Regeneration vollständig zu verstehen und herauszufinden, warum sie bei den meisten Arten nur sehr eingeschränkt funktioniert, müssen Wissenschaftler die gesamte DNA-Sequenz kennen, um die Regulation und Evolution von Genen zu erforschen. Bisher konnte man das Axolotl-Genom aufgrund seiner gigantischen Größe nicht komplett entschlüsseln. Die Entschlüsselung des Axolotl-Genoms mit Hilfe bisheriger Techniken stellte sich durch die beträchtliche Anzahl langer, sich wiederholender Sequenzen schwierig da. Internationalen Forschern ist es jedoch gelungen, die Regeneration bei Axolotl auf Zellebene zu beobachten. Dabei haben sie untersucht, welche Körperregionen für die erstaunliche Regeneration verantwortlich sind. Auf magische Zellen sind sie allerdings nicht gestoßen. Stattdessen lassen offenbar gewöhnliche Zellen des Bindegewebes ganze Gliedmaßen nachwachsen. Denn Axolotl beherrschen einen Trick: Bestimmte Bindegewebszellen von Axolotl spulen in ihrer Entwicklung einfach zurück. Dadurch werden aus hochspezialisierten Körperzellen, sogenannte Fibroblasten, wieder Vorläuferzellen, die verschiedene Bindegewebetypen bilden können – egal ob Haut, Knochen oder Sehnen. Ihre Körperzellen machen sozusagen eine Verjüngungskur. Ähnliche Alleskönner-Zellen gibt auch in den Armknospen von Embryonen. Sie verfügen quasi über den Bauplan der Gliedmaßen und sorgen dafür, dass alles exakt so heranwächst, wie es soll.

Zunächst markierten und isolierten die Forscher Bindegewebszellen der Tiere, um anschließend einzelne Gensequenzen zu entschlüsseln. Dabei haben sie das Erbgut der Lurche wie bei einem Puzzle aus Millionen Stücken zusammengesetzt. Es ist das bisher größte entzifferte Genom, das jemals sequenziert wurde. Sie fanden heraus, dass mit 32 Milliarden Basenpaaren dessen Erbinformation mehr als zehnmal so groß sei wie das menschliche Genom. Dabei entdeckten sie mehrere Gene, die nur beim Axolotl und anderen Amphibienarten vorkommen und in regenerierendem Gewebe aktiv sind. So konnten sie genau bestimmen, welche der abertausenden Zellen für die erstaunliche Heilung sorgen. Diese Erkenntnisse sind ein echter Meilenstein für die Axolotl-Forschung. Bei der Reparatur sind also die gleichen Gene und Zellarten aktiv wie beim Menschen. Wieso kann das Tier, was wir nicht können?

Denn auch der Mensch verfügt über Fibroblasten. Doch eine Wunderheilung wie beim Axolotl bringen sie nicht zustande. Stattdessen verwandeln sie sich bei Verletzungen in sogenannte Myofibroblasten, die Narbengewebe bilden. Nachdem die Forscher die Zellen ausgemacht hatten, die an diesem Regenerationsprozess beteiligt sind, mussten sie noch die Gene finden, die die Zellen stimulieren, indem sie die daran beteiligten Gene und Botenstoffe identifizieren. Dabei wurden gezielt nach Botenstoffen gesucht, die bei der Wundheilung eine Rolle spielen und die man auch in der Humanmedizin einsetzen kann. Dabei haben sie einen interessanten Wirkstoff gefunden, der



Autorin

Liane Schmidt

Fachjournalistin
Öffentlichkeitsarbeit
NEM Verband

an der Wundheilung beim Axolotl beteiligt ist: das Enzym AmbLOXe. Sie entwickelten zudem eine Methode, das Enzym in Bakterien zu vervielfältigen. Dabei konnten sie bei Versuchen mit menschlichen Zellkulturen nachweisen, dass die Zellen sich schneller bewegen und neu bilden, wenn sie mit dem Enzym in Kontakt kommen und somit das Axolotl-Enzym die Wundheilung beschleunigt. Doch bis die Forschung soweit ist, dass ein Medikament entwickelt wird, in dem das Axolotl-Enzym enthalten ist und bis das Medikament für die Menschen verfügbar ist, vergehen wohl noch viele Jahre ...

FAZIT

In der Geschichte des Axolotls verbinden sich Naturgeschichte und die Biologiegeschichte auf eindrückliche Weise. Sie zeigt zum einen die spezifische Geschichte des mexikanischen Axolotls, einer endemischen Amphibienart, die paradoxerweise gleichzeitig vom Aussterben bedroht und weltweit verbreitet ist. Zum anderen wird die Geschichte der Labortiere in der Biologie sichtbar, die in einem Zusammenhang in die Forschung gelangten, der nicht nur von wissenschaftlichen Fragen geprägt war, sondern auch von der Begeisterung für Aquarien und den öko-

nomischen Interessen der Akklimatisierung. Auf diesem Feld entwickelte sich eine Praxis der Haltung exotischer Tiere, die bestimmend wurde für die experimentelle Forschung, wie sie seit dem späten 19. Jahrhundert in den Lebenswissenschaften bestimmend ist. Der mexikanische Axolotl war ein Pionier dieser Entwicklung und er prägt sie noch heute. «

Ein Dankeschön an Benjamin Luckas, Koi-Zentrum Hunsrück (www.koizentrum-hunsrueck.de) für die Unterstützung in Form von Informationen über die Biologie des Axolotls, sowie für die zur Verfügung gestellten Fotos.

Fotos: Eric Isselée – stock.adobe.com (S. 13), lms_lms – stock.adobe.com (S. 13), Omar Alpizar – stock.adobe.com (S. 17)

Quellen:

Benjamin Luckas, Koi Zentrum Hunsrück www.koizentrum-hunsrueck.de

Literaturnachweise:

- Joachim Wistuba: Axolotl. 2. Auflage. Natur- und Tier-Verlag, Münster 2008, ISBN 978-3-86659-086-1.
- John Corbon: Das große Buch der Amphibien. Bede, Ruhmannsfelden 1996, ISBN 978-3-931792-00-8.
- Christian Reiß: Der Axolotl. Ein Labortier im Heimaquarium 1864-1914. Göttingen 2019 © Springer-Verlag 2016 ó ó Literatur Reiß C (2014) Die Geschichte des mexikanischen Axolotls als Labortier, 1864–1914: Verbreitungswege, Infrastrukturen, Forschungsschwerpunkte. Dissertation, Friedrich-Schiller Universität Jena Duméril A (1866) Observations faites a la ménagerie du Muséum d'Histoire naturelle sur la reproduction des Axolotls batraciens urodèles a branchies extérieures et sur les métamorphoses qu'ils y ont subies. Bulletin de la Société impériale zoologique d'acclimatation 3:79–89 Bade E (1899) Praxis der Aquarienkunde (Süßwasser-Aquarium, Seewasser-Aquarium, Aqua-Terrarium). Creutz'sche Verlagsbuchhandlung, Magdeburg Reiß C (2012) Gateway, Instrument, Environment: The Aquarium as a Hybrid Space between Animal Fancying and Experimental Zoology. NTM 24:309–336 Reiß C, Olsson L, Hoßfeld U (2015) The History of the Oldest Self-Sustaining Laboratory Animal: 150 years of axolotl research. J Exp Zool B Mol Dev Evol 324:393–404 Christian Reiß, Uwe Hoßfeld und Lennart Olsson (v. l. n. r.)
- Joachim Wistuba: Axolotl. 2. Auflage. Natur- und Tier-Verlag, Münster 2008, ISBN 978-3-86659-086-1.
- Ambystoma mexicanum in der Roten Liste gefährdeter Arten der IUCN 2009. Eingestellt von: Luis Zambrano u. a., 2006.
- Heise-News: Schwanzlurch-DNA soll Rätsel um nachwachsende Gliedmaßen lösen helfen. Hoedt/Schneider/Weinzierl: Axolotl-Fibel, Dähne Verlag 2015, 14,80 Euro, ISBN-13: 978-3-944821-15-3. (dpa), Gebundene Ausgabe: 96 Seiten, Verlag: Dähne Verlag; Auflage: 2. Aufl. (16. März 2015), Sprache: Deutsch, ISBN-10: 9783944821153, ISBN-13: 978-3944821153, ASIN: 3944821157
- Arbeitspapier der DGHT zum Axolotl (Memento vom 24. November 2013 im Internet Archive).
- Lieblingstier der Forscher vom Aussterben bedroht. (welt.de vom 15. September 2014)
- Thomas Wolff: Das Original. Helene Hegemanns Roman hat viele Vorbilder. Der namensgebende Axolotl kommt aus Mexiko. In: Berliner Zeitung. 17. März 2010, S. 32.
- ORF: Mexikanische Forscher wollen Axolotl retten vom 14. Juni 2015
- C. McCusker, S. V. Bryant, D. M. Gardiner: The axolotl limb blastema: cellular and molecular mechanisms driving blastema formation and limb regeneration in tetrapods. In: Regeneration. Band 2, Nummer 2, April 2015, S. 54–71, doi:10.1002/reg.2.32, PMID 27499868, PMC 4895312
- B. Menger, P. M. Vogt u. a.: Applying amphibian limb regeneration to human wound healing: a review. In: Annals of plastic surgery. Band 65, Nummer 5, November 2010, S. 504–510, ISSN 1536-3708. doi:10.1097/SAP.0b013e3181d376f9. PMID 20948421. (Review).
- Michael Engel: Ein Lurch beflügelt die Wissenschaft – Mediziner wollen vom Axolotl-Molch lernen. In: Deutschlandradio Kultur – Radiofeuilleton – Wissenschaft und Technik. 13. Februar 2011.
- Forscher lüften Geheimnis nachwachsender Gliedmaßen. In: Spiegel Online. 2. Juli 2009.
- M. Kragl, D. Knapp u. a.: Cells keep a memory of their tissue origin during axolotl limb regeneration. In: Nature. Band 460, Nummer 7251, Juli 2009, S. 60–65, ISSN 1476-4687. doi:10.1038/nature08152. PMID 19571878.
- B. Urban-Eicheler: Regeneration von Körperteilen beim Axolotl entschlüsselt, K. Roensch, A. Tazaki u. a.: Progressive Specification Rather than Intercalation of Segments During Limb Regeneration. In: Science. 342, 2013, S. 1375–1379, doi:10.1126/science.1241796.
- S. Nowoshilow, S. Schloissnig, J. F. Fei, A. Dahl, A. W. Pang, M. Pippel, S. Winkler, A. R. Hastie, G. Young, J. G. Roscito, F. Falcon, D. Knapp, S. Powell, A. Cruz, H. Cao, B. Habermann, M. Hiller, E. M. Tanaka, E. W. Myers: The axolotl genome and the evolution of key tissue formation regulators. In: Nature. Januar 2018, doi:10.1038/nature25458, PMID 29364872.
- nytimes.com: The Smiling Axolotl Hides a Secret: A Giant Genome
- J.: Geht der Axolotl? In: Die Presse. 21. Oktober 2009, S. 28.
- Matt Walker: Axolotl verges on wild extinction. In: BBC Earth News. 26. August 2009.
- Axolotl ist wahrscheinlich ausgerottet. In: Die Welt. 29. Januar 2014.
- Eintrag zum Axolotl bei www.wisia.de
- gigazine.net: Deep-Fried Salamander Served In A Peculiar But Cosy Pub Outside Osaka, vom 11. August 2010.
- Smithsonian Institution: How to Save the Paradoxical Axolotl, vom 8. Januar 2018.
- Julia Seeliger: Guttenberg-Plagiate, die FAZ und das Netz: Der Lurch des Jahres. In: die tageszeitung. 17. Februar 2011.
- Florian Güßgen: Plagiatsvorwurf: Die Nöte des Dr. Axolotl zu Guttenberg. In: stern. 16. Februar 2011.