

Bild der Vissenschaft

Sonderdruck

„Statt dreimal pro Woche ins Krankenhaus, zweimal im Jahr nach Rhodos.“

„Ich führe ein ganz neues Leben“, sagt Doris Waber aus Frankfurt. „Weil meine Nieren nicht mehr funktionierten, mußte ich früher jeden dritten Tag für zwölf Stunden ins Krankenhaus. Ich war total von der Maschine abhängig, die mein Blut entgiftete.“

Heute sonnt sich Frau Waber ganz gern ein paar Tage an griechischen Stränden. Sie lebt so wie wir alle. Nur mit einer fremden Niere.

Die ersten Versuche, gesunde Organe auf kranke Menschen zu übertragen, waren wenig ermutigend. Denn der Körper wehrt sich gegen das fremde Organ. Die Folge: Es wird abgestoßen.

Erst mit Hilfe von Medikamenten gelang es, diesen Abwehrmechanismus zu beherrschen. Von da an konnte man mit Erfolg Organe transplantieren. Neue Kombinationen von Medikamenten und neue Wirkstoffe ermöglichen den Kranken ein fast völlig normales Leben.

Eine amerikanische Studie weist nach, daß die Transplantation für 100 Patienten im Laufe von 10 Jahren 15 Millionen Dollar gegenüber der Blutwäsche einspart.

Ein Beispiel dafür, wie uns Arzneimittel helfen können, besser zu leben und gleichzeitig die Kosten der Gesundheitsfürsorge zu senken.

Die fast 5 Millionen Mark, die von der deutschen Pharma-Industrie Tag für Tag für Forschung ausgegeben werden, sind also gut angelegtes Geld.

**Pharma-Forschung ist teuer.
Aber ein Menschenleben ist unbezahlbar.**

COUPON

BO 18

Bitte schicken Sie mir kostenlos Informationen über die Forschung, Entwicklung und Herstellung von Arzneimitteln.

Bundesverband der Pharmazeutischen Industrie e. V.

Karlstraße 21,
6000 Frankfurt/Main



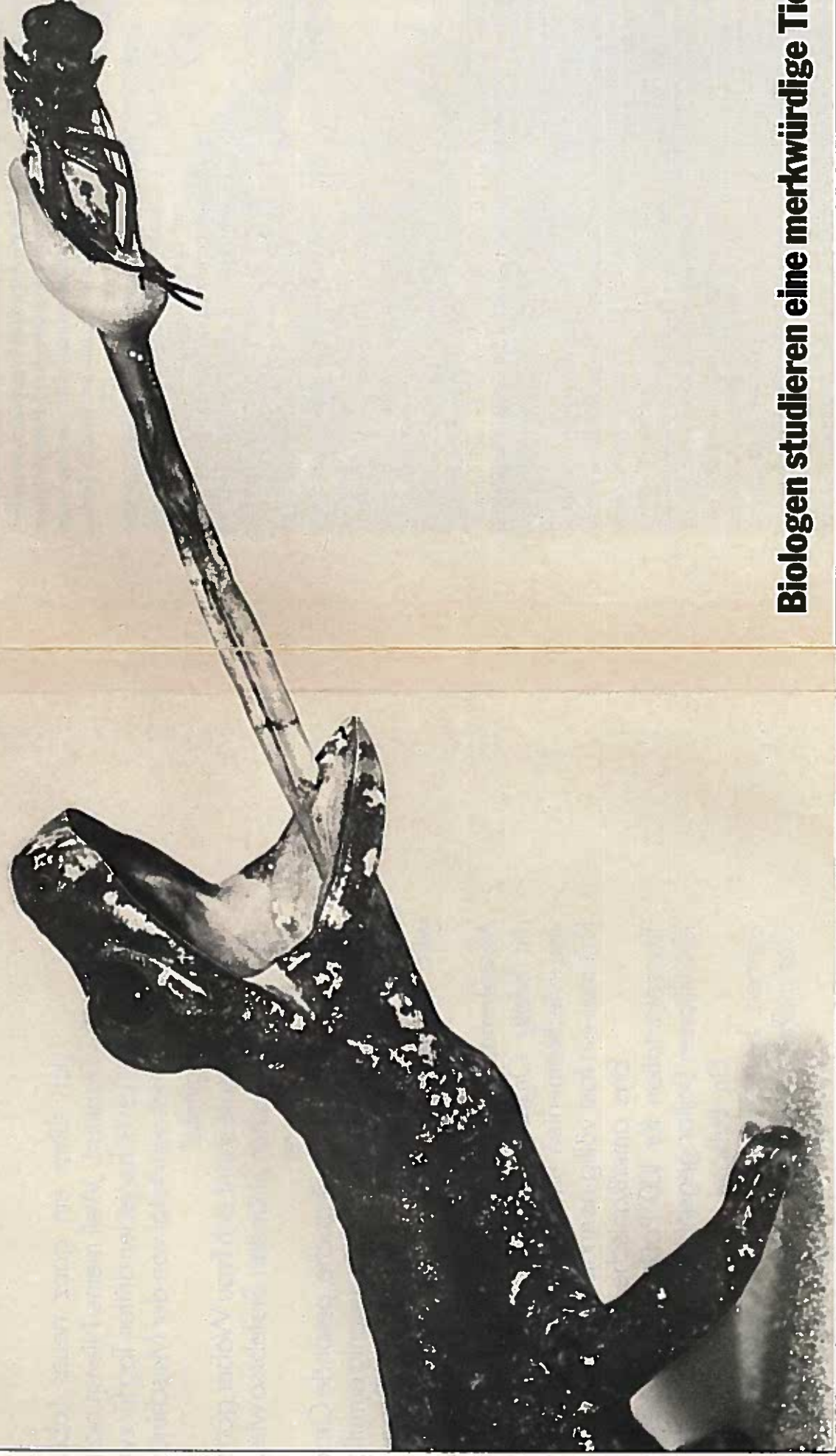
in ganzen Erdball ver-
von den Kalksteinhöhlen
ns bis in die dampfenden
ir Südamerikas, lebt
kwürdige Tierfamilie der
xsen Salamander. Bio-
forschen an ihnen eine
le Organ-Evolution. Aus
innötig gewordenen –
r Atmungsapparat formte
e tödliche Jagdwaffe:
leuderzunge, die auf
zielte Beute abge-
n wird wie ein Projektil.

enerie: 6 Uhr morgens, auf
öhe im tropischen Nebelwald
kos. Die Akteure: Zwei bis
aut durchweichte Zoologen –
Wake von der University of
in Berkeley und Gerhard
der Universität Bremen.
schon ein schweißtreibendes
womit wir uns abmühen: Wir
in den Urwaldbäumen hoch
n mit der Machete möglichst
neliaceen herunter. Das sind
wäxse, die als Schmarotzer-
iese Bäume besiedeln.
ißrig-trübe Inhalt der Stau-
ßt sich mit unschöner Regel-
über uns. Wir starren vor
und Nässe und sind ziemlich
. In den vergangenen 24 Stun-
n wir nichts Eßbares auftrei-
en. Drei Indios, die wir tra-
ßen selbst nur zwei 20 Tage
ereier.

lich haben wir etwa 30 Bro-
beisammen. Wir entfernen
die ringförmig angeordneten
und entdecken im Inneren der
wonach wir suchten: schlän-
shmale, blaßgelbe Tiere, die
i mit dem überdimensionier-
nz kaum 6 cm lang sind.
ttungsname lautet Chiropte-
ie sind typische Vertreter der
umilie der lungenlosen Sala-
methodontiden).
esondere Art, Chiropterotri-
lebt ausschließlich in den
erpflanzen des tropischen
les, zum Teil 80 m über dem
. Feuchtigkeit, Kühle und ein
tes Angebot an Beute-Insek-
en den kleinen Raubtieren
radies.

Gerhard Roth/David B. Wake

Lungenlose Salamander



Wir verstauen die Tiere in den mit-
gebrauchten Transportbehältern und
treten den Rückmarsch zum Lager an.
Daheim, im Labor, werden wir uns mit
der faszinierenden Biologie dieser Exo-
ten befassen.

Faszinierend sind diese Tiere für
uns, weil sie eine erstaunliche Entwick-
lung hinter sich haben: vom einstigen
Lungenatmer zum lungenlosen Sala-
mander, der nur noch über die Körper-

Der italienische Salamander Hydro-
mantes italicus beim Beutefang: Die in
Sekundenbruchteilen „abgefeuerte“
Schleuderzunge läßt auch fixen Insek-
ten kaum eine Chance. Die Gattung
Hydromantes hat unter allen lungen-
losen Salamandern die am weitesten
reichende Zunge – 5 cm bei nur 9 bis
11 cm Gesamtkörperlänge. Der an der
Spitze sitzende, herzförmige Zungen-
muskel umfaßt die Beute wie eine Hand.

bild der wissenschaft 2-1983

haut und die feuchte Mundschleimhaut
atmet. Und Gewebe, das einst zum
Ausdehnen der Lungen nötig war, wur-
de im Verlauf ihrer Evolution zu einer
im Tierreich einmaligen Jagdwaffe um-
gerüstet: zu einer Schleuderzunge, die
abgeschossen wird wie ein Projektil.

Durch die Erforschung dieses Pro-
zesses lernen Zoologen und Entwick-
lungsbiologen, wie Umbau- und An-
passungsschritte in Lebewesen ablau-

fen. Und es ist exemplarisch für die
Evolution eines Organs, wie bei diesen
lungenlosen Salamandern aus einem
ehemaligen Lungenexpansions-Appa-
rat, der nach Verlust der Lunge nicht
mehr benötigt wurde, eine Schleuder-
zunge entstand.

Blenden wir 100 Millionen Jahre zu-
rück, zum Ausgangspunkt der Ent-
wicklungsgeschichte der Plethodonti-
den. Dieser Ausgangspunkt waren –

nach allem, was wir heute wissen – die
Gebirgsbäche der Appalachen im
Osten Nordamerikas.

Durch eine Mutation entstanden
dort unter den Salamandern, die räube-
risch am Grunde der Bäche lebten, In-
dividuen mit verkleinerten Lungen.
Diese zufällige Abweichung von der
Norm erwies sich als höchst vorteilhaft:
Luftgefüllte Lungen erzeugen notwen-
digerweise Auftrieb und damit die stete
Gefahr, vom wild strudelnden Wasser
fortgerissen zu werden.

Durch diesen Überlebensvorteil kam
ein Anpassungsprozeß in Gang, der
schließlich zu einer neuen, lungen-
losen, haut-atmenden Salamanderart
führte: den Plethodontiden.

Nachkommen dieser Tiere verließen
die Bergbäche, an die sie sich so erfolg-
reich angepaßt hatten. Mit diesem
Schritt aufs feste Land drehten sich die
Zahnräder der Anpassungs-Mechanis-
men wiederum ein Stück weiter.

Die meisten übrigen Salamander-
Arten leben halb-aquatisch: Sie leben
als erwachsene Tiere an Land, legen
aber ihre Eier im Wasser ab und ma-
chen dort auch ihr Larvenstadium
durch. Nur wenige Arten der lungenlo-
sen Salamander jedoch haben diese
halb-aquatische Lebensweise beibehal-
ten: Die meisten entwickelten sich zu
strikten Landbewohnern.

Bei ihnen entfiel das Stadium was-
serlebender Larven, die äußere Kie-
men besitzen und Sauerstoff nur aus
dem Wasser aufnehmen können. Die
gesamte Larval-Entwicklung der Ple-
thodontiden findet im Ei statt. Nach
zwei bis neun Monaten, je nach Art,
schlüpfen sie als fertig umgewandelte
Salamander aus dem Ei.

Die Eier werden in Paketen von 5 bis
60 Stück an feuchten Orten abgelegt,
aber stets außerhalb des Wassers. Das
Weibchen zeigt eine für Amphibien un-
gewöhnliche Brutfürsorge: Es legt sich
während der gesamten Entwicklungs-
zeit der Larven um das Gelege.

Diese „direkte“ Larval-Entwicklung
machte die Plethodontiden von der Nä-
he zu Bächen und Teichen völlig unab-
hängig. Sie konnten daher Lebensräu-
me besiedeln, die amphibien mit aqua-
tischem Larval-Stadium eigentlich ver-
schlossen sind – zum Beispiel Hoch-
gebirge, Bäume, trockene Gebiete mit
„Feuchtnischen“, Kalksteinhöhlen und
Erdrreich.

Biologen studieren eine merkwürdige Tiergruppe

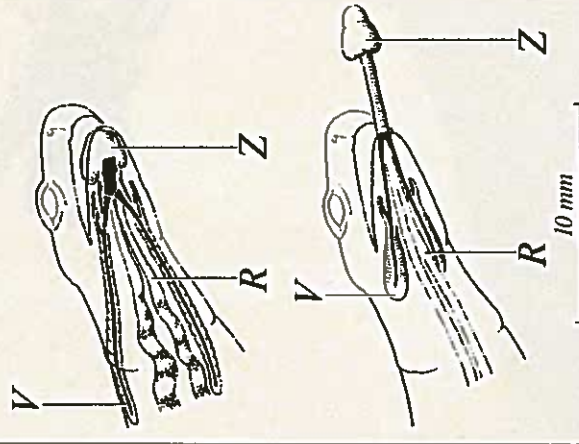
bild der wissenschaft 2-1983

bild der wissenschaft 2-1983

Salamander

thodontiden verbreiteten sich in Nordamerika über das Gebiet der heutigen Vereinigten Staaten und Lebensweise verblüffend ähnlich geblieben. Wie bei allen räuberisch lebenden Tieren spielt auch bei den Amphibien der Beutefangmechanismus eine wichtige Rolle. Bei den Froschlurchen (Frösche, Kröten, Unken) wird die Beute

Schub mit der Zunge



Im Lauf der Evolution der lungenlosen Salamander bildete sich aus dem funktionslos gewordenen Atmungsapparat ein bewegliches Zungen-Skelett, grundlegendes Bauelement der Schleuderzunge. In der oberen Zeichnung sieht man das Zungen-Skelett (schwarz) in Ruhestellung. Soll die Schleuderzunge auf ein Beutetier abgefeuert werden, zieht sich der spiralig um das hintere Ende des Zungen-Skeletts gewickelte Vorschnell-Muskel (V) zusammen. Dadurch wird das Zungen-Skelett regelrecht aus dem Muskel „Lager“ hinausgeschleudert und schließt aus dem Maul (untere Zeichnung). Im Moment des „Abschusses“ zieht sich gleichzeitig der Rückzieh-Muskel (R) zusammen, bis dessen Schlaufen (obere Zeichnung) aufgezogen sind, vergehen einige Millisekunden, in denen die Schleuderzunge ganz aus dem Maul herausgeschossen und die Beute gepackt kann. Dann erst zieht der Rückzieh-Muskel unter maximaler Spannung (untere Zeichnung) und reißt das Zungen-Skelett mitsamt dem Zungenmuskel (Z) ins Salamandermaul zurück.

mit dem einige Zentimeter weit herausgeschleunigten Zungenmuskel gepackt. Bei den landlebenden Salamandern, die nicht zur Familie der Plethodontiden gehören, wird der massive Zungenmuskel meist nur wenig hervorstreckt. Hier verrichten Ober- und Untertierkiefer die Hauptarbeit beim Ergreifen der Beute.

Dies bedeutet, daß die Beute verfolgt werden muß, bis sie sich in einer

nahen, „mundgerechten“ Position befindet. Auch sind die Treffer-Eigenschaften der Salamandriden-Zunge nicht besonders günstig: Ein Feuersalamander schnappt häufig vergeblich zu – auch deswegen, weil schnell bewegliche Beutetiere nicht selten im letzten Moment der plumpen Zunge ausweichen.

Die Mehrzahl der lungenlosen Salamander dagegen entwickelte einen Beutefang-Apparat, der die Reichweite der Zunge – relativ zu ihrer Körperlänge – erheblich vergrößerte, zum Teil bis auf die halbe Kopf-Rumpf-Länge. Außerdem wurde eine Geschwindigkeit entwickelt, die den meisten Beutetieren keine Chance läßt.

Der biophysikalische Trick der Plethodontiden: Sie schleudern nicht mehr nur den Zungenmuskel heraus, sondern ein kompliziert aufgebautes, langgestrecktes Knorpel-Projektill, das an seinem vorderen Ende den Zungenmuskel trägt.

Das „Rohmaterial“ zu dieser evolutionären Neuentwicklung bildete der vom Zungenbein (Hyoid) und den Kiemenbögen (Branchien) abstammende „Hypobranchial-Apparat“, der noch heute bei den lungenatmenden Salamandern durch Expansion die Lungen füllt; von dieser Aufgabe befreit, konnte sich dieser Apparat bei den lungenlosen Plethodontiden relativ schnell zu einem beweglichen Zungenskelett umbilden.

Bei den „primitiven“ Plethodontiden ist der vordere Zungenmuskel am Vorderrand des Unterkiefers angewachsen und liegt nur seitlich und nach hinten frei. Der Vorschnell-Mechanismus unterscheidet sich hier kaum von dem der lungenatmenden Landsalamander.

Der nächste Schritt in der Zungen-Evolution bestand in der Verlängerung – und damit in der größeren Dehnungsmöglichkeit – des Muskels (Genioglossus), mit dem der Zungenmuskel am vorderen Unterkiefer befestigt ist. Nun konnte das Zungenskelett viel weiter aus dem Maul herausgeschoben und der Zungenmuskel vorgeschleunigt werden.

Die größte Gruppe der Plethodontiden jedoch hat den Genioglossus-Muskel ganz verloren, so daß das Zungenskelett in voller Länge herausgeschleudert ist. Da dieses Skelett jedoch relativ „sperrig“ in der Mund- und Kehle liegt, muß es, um ein wirksames Pro-

jektill zu werden, wie ein Regenschirm zusammengeklappt sein.

Die beste Kraftübertragung und damit die größte Leistungsfähigkeit und Schnelligkeit der Schleuderzunge ist bei der Gruppe der „Bolitoglossini“ verwirklicht. Sie umfaßt neben der Gattung Hydromantes und der kalifornischen Gattung Batrachoseps alle tropischen Salamander.

Das Herausschnellen der Zunge wird im wesentlichen durch einen äußerst merkwürdigen Muskel, den Subarcualis rectus I, bewirkt. Er ist am hinteren Ende des Zungenskeletts befestigt. Von dort wickelt er sich wie

Effektivität der Schleuderzunge von größter Wichtigkeit sind.

Im selben Moment, in dem die Zungualis rectus I hinausgeschleudert wird, zieht sich auch der Rückzieh-Muskel zusammen. Doch hat er einen viel längeren Kontraktionsweg zurückzulegen als der Vorschnell-Muskel, da er erst einmal die Schlaufen in der Kehle „aufziehen“ muß.

Das dauert zwar nur ein paar Millisekunden, reicht aber für ein volles Herausschnellen der Zunge aus. Dann erst steht der Rückzieh-Muskel unter voller Spannung und zieht die Zunge zurück.

Ist dieser Vorgang des Vorschnellens bereits außerordentlich genug, wird er an konstruktiver Genialität durch den Retraktions-Mechanismus noch übertraffen: Das Zurückschnellen der Zunge wird nämlich im wesentlichen durch einen Muskel (Rectus cervicis profundus) bewirkt, der – eine muskelanatomische Einmaligkeit – in einem einzigen Stück von der Zungenspitze durch den ganzen Salamanderleib bis zum Becken läuft.

Dieser Muskel liegt bei Ruhestellung der Zunge schlaff an der Bauchseite und besitzt in der Kehle des Tieres schlaufenartige Windungen, für die



eine feste Bandage spiralförmig um den hinteren Teil des Zungenskeletts.

Kontrahiert dieser Muskel, zieht er durch seine Verkürzung nicht nur das Zungenskelett nach vorn, sondern preßt aufgrund seiner Windungen den hinteren Teil des Skeletts heraus – wie Zahnpasta aus einer Tube. Das geht mit einer derartigen Beschleunigung, daß das Zungenskelett in seiner vollen Länge aus dem Maul schießt.

Anpassungsfähige Schleuderzungen-Salamander: Bolitoglossa franklinii (oben links) jagt im guatemaltekischen Urwald, Hydromantes italicus (oben rechts) in den kühlen Kalksteinhöhlen Sardinien. Der in Guatemala lebende Bolitoglossa salvini (unten rechts) wirkt fast riesenwüchsig gegenüber dem – Bananenstauden bewohnenden – mexikanischen Winzling mit Namen Bolitoglossa rufescens (unten links).

Wir haben hier also ein Federsystem mit eingebauter mechanischer Verzögerung zwischen Vorschellen und Rückziehen vor uns. Dadurch wird im wesentlichen der unglaublich schnelle Ablauf der Schleuderzungen-Reaktion möglich. Diese Reaktion dauert zum Beispiel bei winzigen Salamandern der tropischen Gattung Bolitoglossa, die ihre Zunge 2 cm weit hinausschleudern, rund zehn Millisekunden – wobei

auf das Herausschnellen nur zwei Millisekunden entfallen.

Eine derart effektive Koordination von Vorschneilen und Rückziehen der Zunge kann offenbar nur noch mechanisch gesteuert werden: durch eine eingebaute Verzögerung. Da die Erzeugung eines einzelnen Nervenimpulses bereits eine Millisekunde benötigt, wäre ein sukzessives Starten von Vorschneil- und Rückzieh-Muskel durch verschiedene Nervenstränge wahrscheinlich zu ungenau. Die gleichzeitige Aktivierung beider Muskeln und eine mechanische Verzögerung war viel genauer und verlässlicher.

Der extremste Fall ökologischer, gestaltlicher und verhaltensphysiologischer Anpassung unter den lungenlosen Salamandern, seit ihre Vorfahren vor 100 Millionen Jahren die Gebirgsbäche in den Appalachen verließen, ist die Gattung *Thorius* im süd-mexikanischen Urwald. Die verblüffendste Anpassung an ihren Lebensraum ist ihre Größenreduktion: *Thorius pennatulus* ist mit zirka 20 mm Gesamtlänge eines der kleinsten Landwirbeltiere.

Thorius lebt, wie viele andere Salamander, im tropischen kühlen Bergnebelwald am Erdboden unter Laub und Moos. Doch in trockener Umgebung oder während der Trockenzeit kann er sich auch in verrottende Baumstämme unter die Rinde oder sogar in Borkenkäfergänge zurückziehen. Dort ist noch ausreichende Feuchte vorhanden, und das Mini-Raubtier findet Kleinstinsekten als Beute.

Thorius weist die extremste Fortentwicklung der Schleuderzunge auf: Das Zungenskelett ist hier nicht mehr dreidimensional zusammengefaltet, sondern kann beim Herausschnellen in einer Ebene zusammengeklappt werden, was die Kräfteübertragung besonders wirkungsvoll ablaufen läßt.

Angesichts des Winzlings *Thorius* fragen sich Zoologen: Wie klein kann ein Wirbeltier überhaupt werden?

Die Augengröße ist offenbar ein begrenzender Faktor: Bei sehr kleinen Linsenaugen nehmen die optischen Fehler drastisch zu. Da außerdem die Größe der Photorezeptoren in der Netzhaut nicht gleichzeitig mit abnehmender Körpergröße reduziert wird, nimmt die Zahl der Rezeptoren und damit das Auflösungsvermögen der Augen erheblich ab.



Lungenlose Salamander durchlaufen als meist strikte Landbewohner ihre Larvenstadien im Ei. Die Eier werden an Land abgelegt. Oben: Hydromantes-Larven – im Ei ganz links erkennt man einen fertig entwickelten Fuß. Unten: Ein Hydromantes-Weibchen bewacht sein Gelege. Nach zwei bis neun Monaten, je nach Art, schlüpfen die fertigen Salamander-Jungtiere.



So wurden im Verlauf der Evolution bei *Thorius* die Augen, aber auch die Nasenhöhlen und das Innenohr, nicht in demselben Maße reduziert wie der Schädel und der übrige Körper – hier gibt es „keine Experimente“. Wie James Hanken an der Dalhousie University in Halifax (Kanada) nachwies, hat *Thorius* die – relativ zum Schädelvolumen – größten Augen und Innenohren unter allen Salamandern.

Dies gilt, wie Wolfgang Grunwald von der Universität Bremen feststellte, auch für das Gehirn. Dennoch ist dieses Gehirn mit einer Länge von 1,5 mm winzig und kommt in die Nähe des Gehirnvolumens großer Insekten.

So schließt sich die Frage an: Wie klein kann ein Wirbeltiergehirn werden und trotzdem noch in der Lage sein, „normale“ Verhaltensweisen zu steuern wie zum Beispiel für Beutefang und Fortpflanzung?

Wahrscheinlich stößt das *Thorius*-Gehirn bereits an die untere Grenze.

Wolfgang Grunwald und Gerhard Roth haben mit verschiedenen Färbemethoden die neuronale Feinstruktur im Gehirn von *Thorius* – die Zahl und das Aussehen der Nervenzellen sowie insbesondere deren Verästelungen – untersucht. Dabei kam etwas scheinbar Paradoxes heraus: Anstatt wegen der starken Größenabnahme des Gehirns immer schlanker zu werden, breiten sich die dendritischen Verzweigungen der Neuronen, beispielsweise im Mittelhirndach (Tectum), immer weiter aus. Manche dieser „Bäume“ erstrecken sich im Querschnitt über die halbe Tectumseite.

Die Auflösung dieses Widerspruchs: Da die Dicke der innen um den Hirnhohlraum liegenden Zellkorperschicht stärker abnimmt als die der außen liegenden Nervenfaserschicht, wo die von den Augen kommenden Fasern mit den Dendriten der Tectumzellen Kontakt aufnehmen, muß eine einzelne Tectumzelle mit ihrem Dendritenbaum relativ mehr Volumen an Faserschicht „bedienen“, als dies bei größeren Gehirnen der Fall ist.

Die Feinstruktur der Nerven des Mittelhirndachs kommt offenbar den Verhältnissen in Insektengehirnen sehr nahe. Hier muß die einzelne Nervenzelle angesichts der geringen Gesamtzahl sehr viel mehr leisten als eine Nervenzelle im menschlichen Gehirn, wo sie nur eine von etwa 100 Milliarden ist.

So sind die einzelnen Entwicklungsschritte innerhalb der erstaunlichen Evolution der lungenlosen Salamander unmittelbar miteinander verzahnt: Lungen-Verkleinerung, Anpassung an das feste Land, Schleuderzunge, Entwicklung von Augen und Gehirn.

Eine „Erfindung“ fordert die nächste. Gelingt sie nicht, bricht die Kette ab. Ω