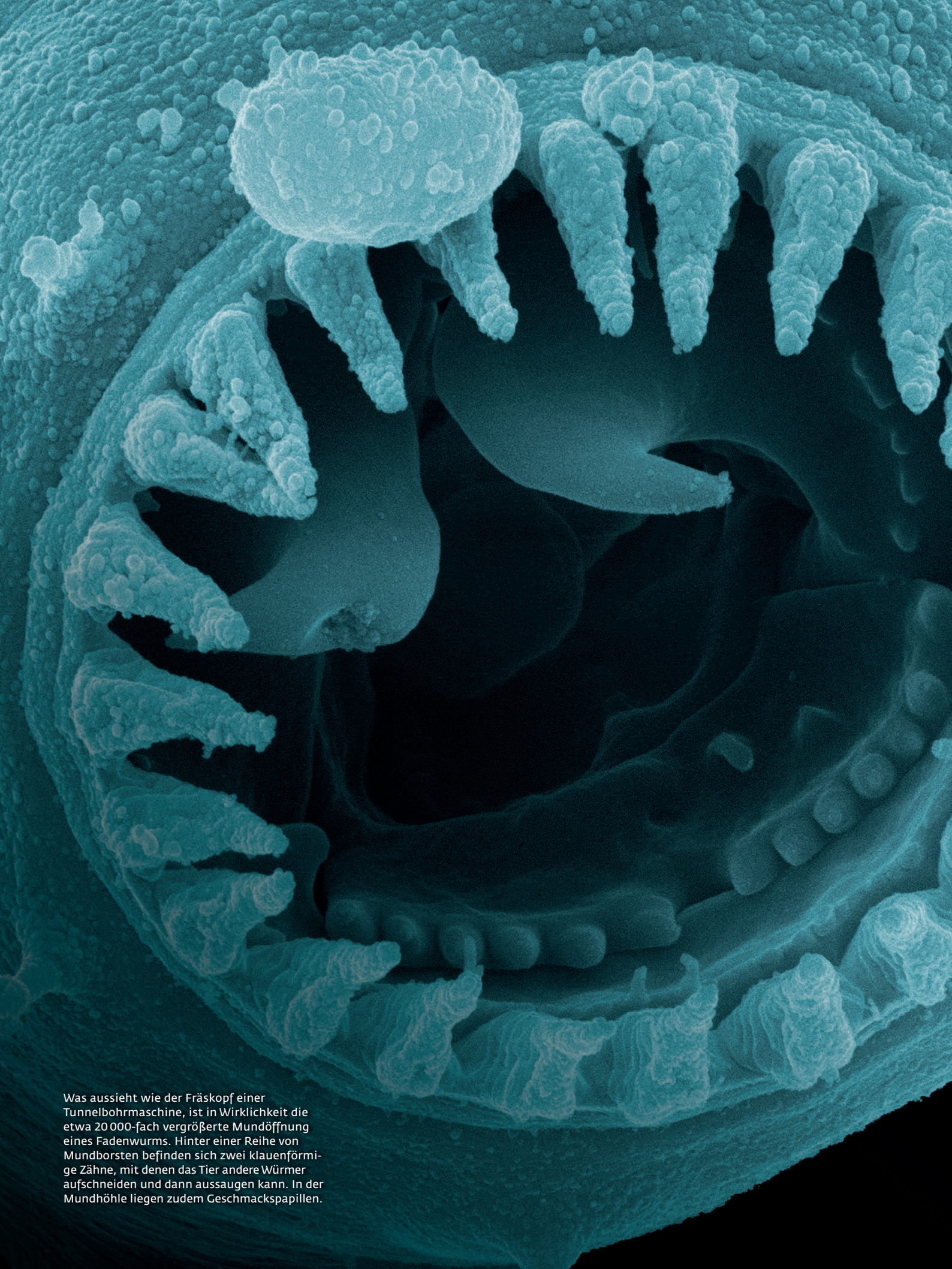


Was aussieht wie der Fräskopf einer Tunnelbohrmaschine, ist in Wirklichkeit die etwa 20 000-fach vergrößerte Mundöffnung eines Fadenwurms. Hinter einer Reihe von Mundborsten befinden sich zwei klauenförmige Zähne, mit denen das Tier andere Würmer aufschneiden und dann aussaugen kann. In der Mundhöhle liegen zudem Geschmackspapillen.

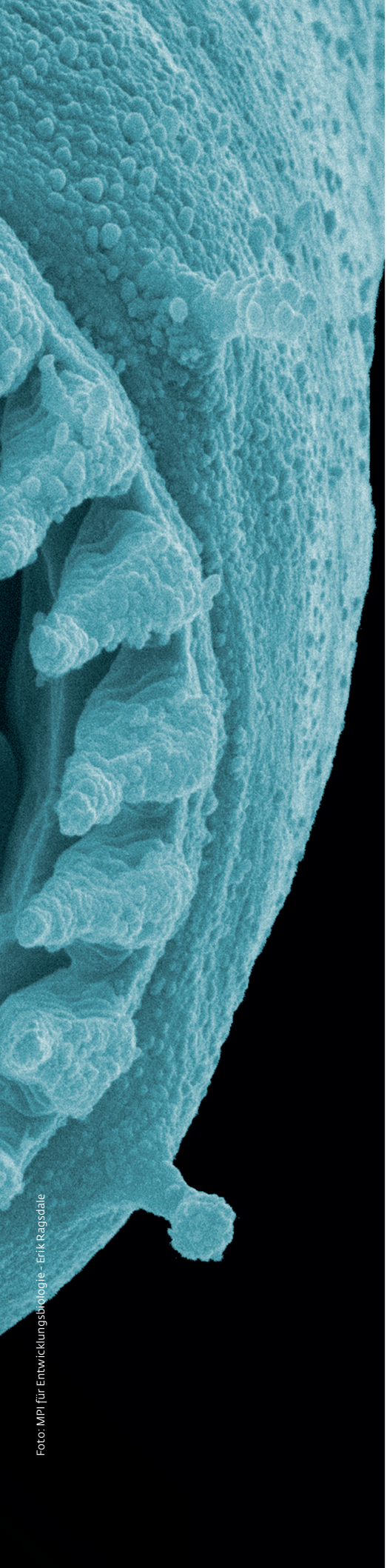


Foto: MPI für Entwicklungsbiologie · Erik Ragsdale

Und der Rundwurm, **der hat Zähne**

Würmer, Käfer und eine kleine Insel inmitten des Ozeans. Für den Entwicklungsgenetiker und Evolutionsbiologen **Ralf Sommer** vom **Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie** in Tübingen sind die Fadenwürmer und Käfer die Akteure und die Insel La Réunion die Kulisse in einem großen Drama: einem Lehrstück über die Evolution, über die Vielfalt in der Natur und wie sie entsteht.

TEXT **CATARINA PIETSCHMANN**

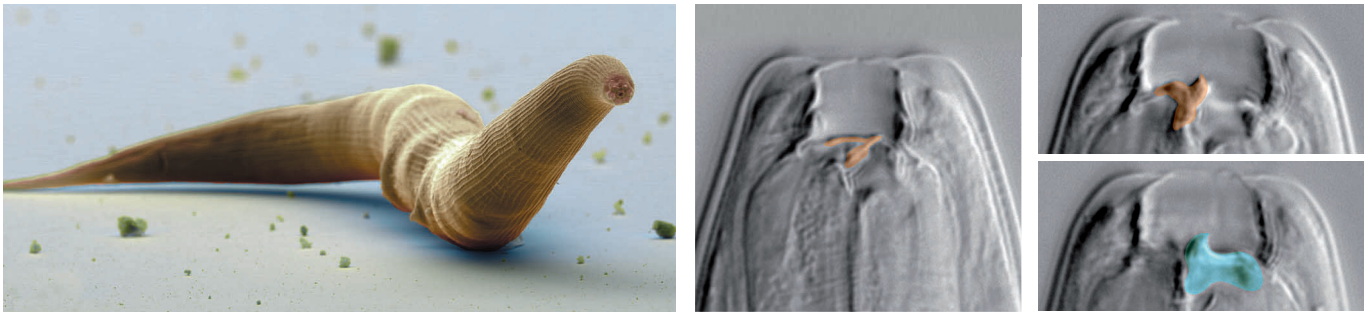
Es ist kaum elf Uhr, und schon herrschen 29 Grad. Die feuchte Luft ist zum Schneiden. Erste Wolken ziehen auf, und spätestens in einer Stunde wird es schütten wie aus Kübeln, sechs Stunden lang. Es ist Januar, Hochsommer auf La Réunion. Und der ist berechenbar.

Im Max-Planck-Forschungscontainer in der Hafenstadt Le Port herrscht Hochbetrieb. Ralf Sommers Mitarbeiter gießen Nährlösung in ungezählte kleine Petrischalen – das provisorische Zuhause für die Beute des heutigen Tages. Die Biologen kommen von weit her. Mehr als 9000 Kilometer sind sie vom Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie in Tübingen auf die 800 Kilometer östlich von Madagaskar im Indischen Ozan gelegene Insel geflogen, um hier ein ungewöhnliches Forschungsobjekt zu sammeln: einen nicht mal einen Millimeter langen Fadenwurm namens *Pristionchus pacificus*.

Seit 2008 arbeiten die Wissenschaftler auf der Tropeninsel, die einst für ihre Vanille berühmt war und Île Bourbon genannt wurde. La Réunion, das jüngste der drei Eilande der Maskarenen-Inselkette, hob sich vor rund zwei Millionen Jahren aus dem Indischen Ozean empor. Im Südosten rumort noch immer einer der aktivsten Feuerspeier der Erde. Der Hauptvulkan erlosch jedoch vor etwa 150 000 Jahren nach einer totalen Eruption und hinterließ den 3070 Meter hohen Piton des Neiges sowie drei tiefe Kratertäler, die Cirques.

Nichts, was hier lebt, kann also älter sein als zwei Millionen Jahre. Das macht die Insel für Ralf Sommer zu einem einzigartigen Freiluftlabor zur Erforschung der Evolution.

La Réunion oder „Insel der Zusammenkunft“ – ein passender Name, denn hier trifft sich die weltweite Vielfalt von *Pristionchus pacificus*, dem Kosmopoliten in dieser Gruppe von Fadenwür-



Pristionchus pacificus (links) ist nur einen Millimeter groß und hat es trotzdem in sich: Er kann nämlich zwei Mundformen ausbilden (Mitte, rechts). Der schmale Mund (Mitte) besitzt nur einen Zahn (braun) und eignet sich zum Fressen kleinster Bakterien. Der breite Mund (rechts) trägt zwei unterschiedlich geformte Zähne (braun, blau). Damit kann der Wurm andere Würmer fressen.

mern. Als blinde Passagiere auf Käfern sind die Würmer angereist. Zu unterschiedlichen Zeiten und aus allen Himmelsrichtungen sind sie angekommen, vorwiegend jedoch mit günstigen Winden aus dem weit entfernten Asien. Und sie entwickelten sich fortan gemeinsam mit „ihrem“ Insekt.

DAS RÄTSEL DER VIELFALT

Ralf Sommer will wissen, wie Vielfalt entsteht und warum sie so groß ist. Ein Teil der Antwort: „Durch ständige Anpassung an die Umwelt verändert sich bereits Vorhandenes. Dieses Prinzip geht schon auf Darwin zurück“, erklärt der Fünfzigjährige. Aber da ist noch etwas anderes. „Manchmal entsteht Vielfalt auch aus völlig Neuem.“

Anfangs sind Neuheiten oft nicht mehr als eine Laune der Natur, Spielerei also. Oft genug bringt jedoch genau dies die Evolution voran. Eine zentrale Rolle für die Entstehung von Neuem scheint den Ergebnissen von Sommer und seinem Team zufolge die Fähigkeit zu spielen, unterschiedliche Erscheinungsformen auszubilden – Fachleute bezeichnen dies als phänotypische Plastizität. Der Winzling *Pristionchus pacificus* soll Sommer dabei helfen, diese These zu untermauern.

Der Wurm ist dabei auch die Galionsfigur eines provokanten Forschungsansatzes. Denn fragt man fünf Evolutionsbiologen, was Evolution eigentlich ist, erhält man mindestens drei Antworten: „die Veränderung von Entwicklung“, sagen Entwicklungsgenetiker; „die Veränderung von Genfrequenzen“, sagen Populationsgenetiker; „der Einfluss der Umwelt“, sagen Ökologen. Sommers Kommentar dazu: „In Wirklichkeit haben alle drei recht. Aber leider gehen sie auf unterschiedliche Konferenzen, publizieren in verschiedenen Journalen und sprechen nur selten miteinander.“

Er will all diese Forschungsfelder zusammenführen. In seiner Abteilung am Tübinger Max-Planck-Institut ist das bereits Realität. „Wir analysieren dieselben Abläufe aus drei verschiedenen Perspektiven: im Labor die Anpassungen des Erbguts und der molekularen Vorgänge und auf der Insel die Populationsgenetik der Würmer. Die Beziehung zwischen Wurm und Käfer stellt die ökologische Ebene dar.“ Deshalb gehören zu Ralf Sommers Team Experten der verschiedensten Fachrichtungen: klassische Zoologen, Entwicklungsgenetiker, Neurobiologen, Molekularbiologen, Bioinformatiker, Ökologen und Populationsgenetiker.

Die Arbeit auf La Réunion ist für Außenstehende sicherlich die spektakulärste. Sobald der tägliche Regenschauer

Eine Kette erloschener Vulkane zieht sich über die bis zu 70 Kilometer breite Insel La Réunion. Der einzige derzeit aktive, der 2600 Meter hohe Piton de la Fournaise, bricht im Schnitt alle zwei Jahre aus und zählt damit zu den aktivsten Vulkanen der Erde.

Fotos: MPI für Entwicklungsbiologie - Jürgen Berger, Ralf Sommer (links), Bento et al. Nature 2010 (rechts, 3), istockphoto (unten)

Simple Fangtechnik: Wie die sprichwörtlichen Motten werden Blatthornkäfer und andere Insekten nachts von UV-Lampen angezogen.

Foto: MPI für Entwicklungsbiologie

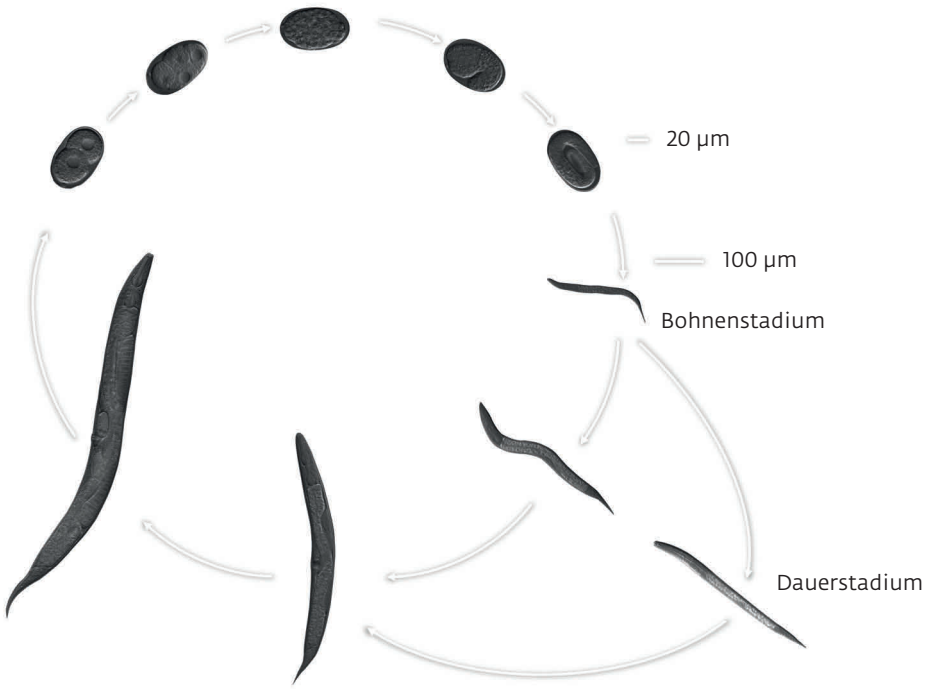
aufgehört hat, brechen die Forscher auf. In Zweierteams fahren sie quer über die Insel. Mit Probenröhrchen und starken Taschenlampen bewaffnet, geht es dann zu Fuß weiter durch den tropischen Regenwald. Ihre Pfade führen vorbei an hohen Wasserfällen und schroffen Felswänden, die Hunderte Meter steil zum Meer hin abfallen.

KÄFERFALLE AUS BETTLAKEN

Am Ziel der Wanderungen werden Lichtfallen installiert: von hinten angestrahlte weiße Tücher, auf denen sich nach Einbruch der Dunkelheit allerlei nachtaktive Krabbeltiere niederlassen. Sechs Blatthornkäfer-Arten sind zwischen Dezember und Februar auf der Suche nach Weibchen unterwegs und werden wie zahllose andere Insekten auch vom Licht magisch angezogen. Von den Laken können die Biologen ihre Käfer dann leicht absammeln.

My home is my beetle – nicht nur *Pristionchus pacificus*, sondern fast jedes Mitglied des weltweiten *Pristionchus*-Clans hat den Hang zu pummeligen Sechsfüßlern der Familie *Scarabaeidae*, zu denen auch heimische Maikäfer, Mistkäfer, Pillendreher und Hirschkäfer gehören.

Jedem Tierchen sein Plaisierchen, und so wählte denn auch jede *Pristionchus*-Art einen anderen Käfer als Residenz. Ein Wohnsitz, der ideal zum morbiden Wurm-Lifestyle passt. Schon während sich der Käfer als Larve im



Der Lebenszyklus des Fadenwurms, von links oben im Uhrzeigersinn: Er beginnt mit der ersten Zellteilung. Im sogenannten Bohnenstadium sind alle Zellen des Embryos vorhanden. Das Größenwachstum erfolgt in den Jugendstadien (rechts unten). Bei ungeeigneten Lebensbedingungen wie hoher Temperatur oder Nahrungsmangel kann die Larve ihre Entwicklung unterbrechen und in ein bewegungsloses Dauerstadium verfallen.

(1 µm = ein tausendstel Millimeter)

Boden entwickelt, schlängeln sich die Würmer darauf. Sie drosseln ihren eigenen Stoffwechsel, schließen den Mund, verstärken ihre wächserne Schutzschicht und gehen in eine Art Halbschlaf über, das sogenannte Dauerstadium.

Und dann warten sie … und warten … und warten. Bis die Umwandlung des Engerlings vollendet und der Käfer endlich geschlüpft ist, losfliegt, sich einen Partner sucht, Eier ablegt, sich danebenlegt – und stirbt. Die gesamte Entwicklung des Käfers kann zwei, drei, ja vier Jahre dauern. Aber Würmer haben Zeit. Erst wenn der Käfer tot ist, schlägt ihre Stunde, denn dann kommt die Zeit des großen Fressens: Bakterien und Pilze zersetzen jetzt langsam den Kadaver. Nun werden die Würmer wach, fressen und vermehren sich. „Nekromenisch“ nennen Biologen diese Lebensweise.

Doch zurück zu den Käfern aus den Fallen der Wissenschaftler. In Le Port endet das Käferleben mit einem schnellen Schnitt, die Hälften werden „auf Platte“ gelegt, in vorbereitete Petrischalen. Sofort beginnen die Würmer sich zu vermehren, sodass auf dem Rückweg nach Tübingen mit etwa 500 verwesenden Insekten das Gepäck ziemlich müffelt.

Pristionchus pacificus ist für Sommers Studien einfach perfekt. „Die Tiere sind Zwitter und können sich selbst befruchten. Zudem dauert es vom Ei bis zum ausgewachsenen Tier nur vier Tage. Das ergibt fast hundert Generationen im Jahr.“ Da kann keine Labormaus mithalten, und viel Platz braucht die Zucht auch nicht. Zwei Räume mit Regalen voll Plastikdosen genügen, in denen es jeweils in Dutzenden Petrischalen vor Würmern nur so wimmelt. Die Tiere lassen sich sogar in eisigen Tiefschlaf legen und wieder auftauen. Über tausend *Pristionchus*-Stämme harren in Tübingen bereits in flüssigem Stickstoff aus.

AUS ALT MACH NEU

Auf den Wurm kam Ralf Sommer Anfang der 1990er-Jahre, als er im kalifornischen Pasadena bei Paul Sternberg arbeitete. Der Entwicklungsbiologe erforscht den Klassiker, *Caenorhabditis elegans*, hatte in seiner Sammlung aber auch andere Fadenwürmer. Darunter ein merkwürdiges Exemplar. Er war *Caenorhabditis elegans* sehr ähnlich, aber die Geschlechtsöffnung sah ganz anders aus. Wie sich zeigte, handelte es sich um *Pristionchus pacificus*. Es sind die gleichen Vorläuferzellen, aber andere Gene, die bei beiden Arten die Vulva bilden. Wie geht das?

Heute weiß Sommer, dass die Moleküle, die ihre Entstehung steuern, anders verschaltet sind. Und das ist nicht nur bei der Vulva so. So entdeckten die Forscher auch deutliche Unterschiede in der Mundform. Bei *Pristionchus pacificus* gibt es zwei: Münder mit nur einem Zahn und solche mit zweien, die die Nahrung zerkleinern können.

Phänotypische Plastizität also. Seit Jahren wird diskutiert, dass dieses Konzept aus der Ökologie auch in der Evolutionsbiologie eine Rolle spielen könnte. Bildet eine Art unterschiedliche Formen eines Merkmals aus, erhöht dies die Chance, dass eine der Varianten einen Vorteil bietet. Im extremen Fall setzt sich diese Form dann vollständig durch.

Bleibt die Frage, welche Auslöser zu neuen Merkmalen führen können. Bei den unterschiedlichen Mundformen der Fadenwürmer ist es das Nahrungsangebot: Unmittelbar nach dem Tod des Käfers vermehren sich Bakterien explosionsartig. Diese Nahrung können viele Fadenwürmer ohne Zähne problemlos bewältigen.

So sind auf den Käfertrick auch andere Fadenwürmer gekommen, die machen sich ebenfalls über die Mikroorganismen her, bis für *Pristionchus* nicht mehr genug übrig bleibt. Jetzt haben die *Pristionchus*-Würmer mit ihrem großen Mund und den Zähnen einen Vorteil: Sie fressen nun die Konkurrenz. Allerdings nur fremde Arten, denn ein Kannibale ist *Pristionchus* nicht.

Zähne sind nicht nur von *Pristionchus*, sondern auch von einigen verwandten Fadenwürmern bekannt. „Tauchen sie in der Evolution auf, gibt es fast immer zwei Formen, deren Ausbildung sich manipulieren lässt, beispielsweise durch Hungern“, sagt Sommer.

Foto: MPI für Entwicklungsbiologie

Das sieht man auch im Labor: Sind reichlich Bakterien in der Petrischale, haben Nachkommen mit nur einem Zahn einen Vorteil. Damit können die Tiere leicht Bakterien fressen. Würmer auf Diät entwickeln dagegen fast ausschließlich ein Gebiss mit zwei Zähnen. Inzwischen kennen die Biologen auch das für diese Umstellung verantwortliche Gen *eud-1*. Schaltet man es aus, gibt es nur noch Tiere mit einem Zahn.

Wie bei der Vulva-Entwicklung setzt die Evolution auch bei der Nahrungsaufnahme zum Teil auf Bewährtes: *Pristionchus*-Würmer nutzen die gleichen Gene und die gleichen Nervenzellen wie ihr zahnloser Verwandter *Caenorhabditis elegans*. Allerdings sind sie bei den Räubern anders miteinander verschaltet.

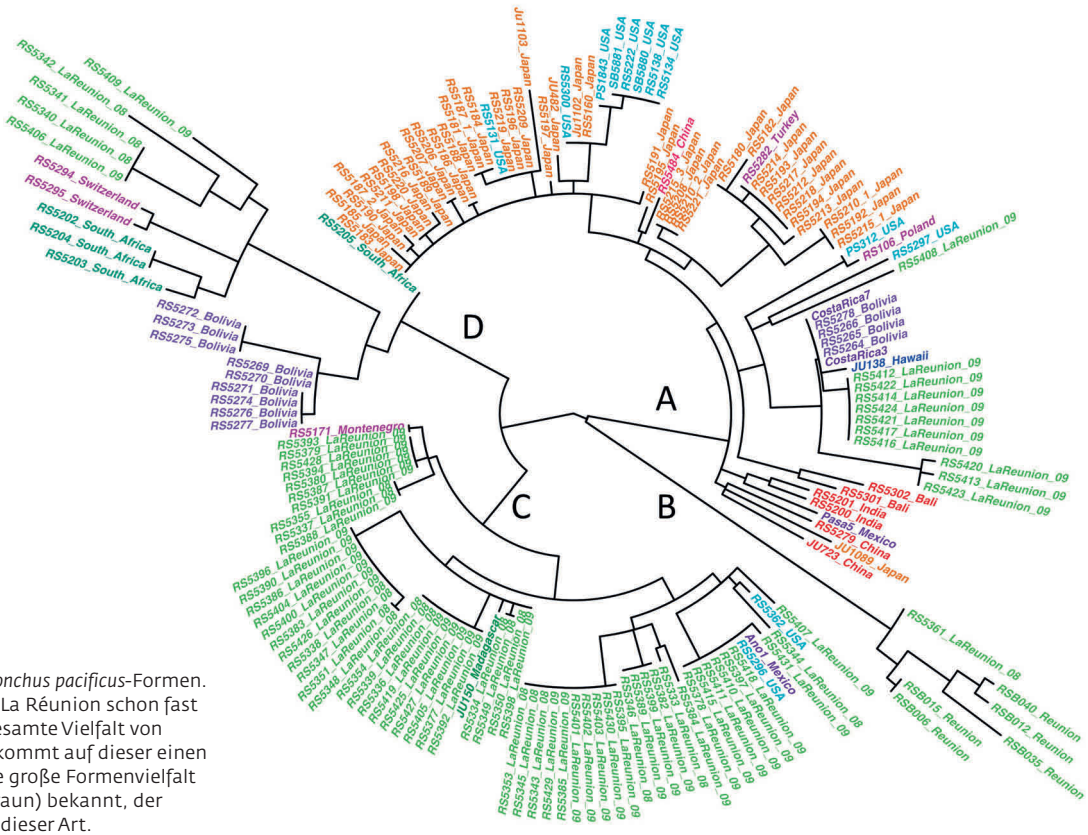
Überhaupt scheint die Evolution die Bausteine für die Gebissentwicklung von unterschiedlichen Baustellen eingesammelt zu haben. Die Forscher haben nämlich einen Hormonrezeptor identifiziert und das zugehörige Steroidhormon, das sowohl Zahnbildung als auch die Entwicklung zum Dauerstadium kontrolliert. Ein cleverer Schachzug der Natur, denn auch das evolutionär ältere Ruhestadium ist vom Nahrungsangebot abhängig: Nur wenn es nicht ausreichend Futter gibt, legen die Larven eine Pause ein.

Kooption nennen Biologen dieses wichtige evolutionsbiologische Prinzip. „Um eine Neuheit zu produzieren, nimmt man ein schon existierendes genetisches Modul und widmet es um. Die Evolution ist schlicht faul. Statt immer wieder etwas Neues zu erfinden, zweckentfremdet sie schon Existierendes." Das geht so weit, dass sich die Funktion eines Gens ins Gegenteil verkehrt. *Quod licet Iovi, non licet bovi* – wenn zwei das Gleiche tun, ist es noch lange nicht dasselbe.

Je mehr Artgenossen vor Ort sind, desto mehr Dauerstadien bildet *Pristionchus*. Doch wie zählt er die Konkurrenz um sich herum? Und woran merkt er im Schlafmodus, dass sein Käfer tot ist? >

Käfer wie der nur auf La Réunion vorkommende Nashornkäfer *Oryctes borbonicus* (links oben) werden aus den Fallen im Bergland von La Réunion (rechts) in Nährschalen ins Max-Planck-Institut nach Tübingen gebracht (links Mitte). Unterwegs erwachen die Fadenwürmer aus ihrem Dauerschlaf und beginnen die Käferleichen zu besiedeln (links unten).

Fotos: MPI für Entwicklungsbiologie

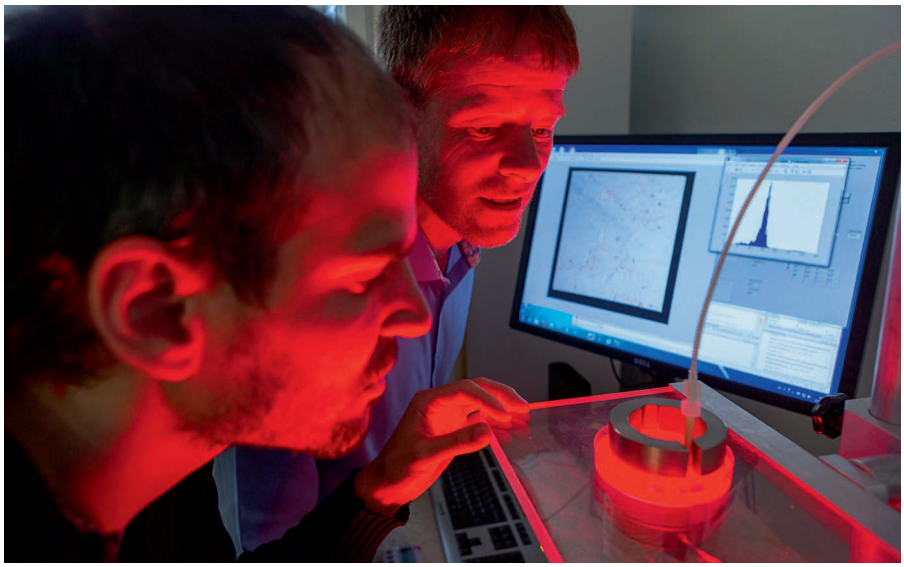


Stammbaum aller *Pristionchus pacificus*-Formen. Für den Fadenwurm ist La Réunion schon fast die Welt: Beinahe die gesamte Vielfalt von *P. pacificus* auf der Erde kommt auf dieser einen Insel vor (hellgrün). Eine große Formenvielfalt ist zudem aus Japan (braun) bekannt, der ursprünglichen Heimat dieser Art.

Durch kleine Moleküle. „Unsere Würmer kommunizieren über chemische Botenstoffe miteinander.“ Ralf Sommer kommt nun richtig ins Schwärmen. Schon von *Caenorhabditis elegans* war bekannt, dass er Botenstoffe abgibt, um mit Artgenossen und der Umwelt zu kommunizieren. Und ab einer bestimmten Konzentration werden die Schotten dicht gemacht, und der Wurm geht „ins Dauer“, wie Sommer sagt.

Pristionchus pacificus kann aber noch mehr: Er hat einen völlig neuen chemischen Wortschatz entwickelt, den nur er versteht. Ralf Sommer öffnet am Bildschirm eine Datei mit Strukturformeln und fährt begeistert fort. „Seine Pheromone sind viel komplexer als alles, was *Caenorhabditis* aufzubieten hat.“ Schon die einzelnen *Pristionchus*-Stämme auf La Réunion unterscheiden sich in ihrem Pheromon-Repertoire – sogar wenn sie auf demselben Käfer sitzen.

Eduardo Moreno (links) und Ralf Sommer messen mit einer hochauflösenden Kamera das Bewegungsverhalten der Würmer in einer Kulturschale. Mit einem Schlauch können sie zudem die Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentration in der Schale verändern und so die verschiedenen Höhenlagen auf La Réunion nachstellen.



HILFE BEI DER PARASITENABWEHR

Unterschiedlichste chemische Verbindungen wie Fettsäuren, Zucker oder Aminosäuren sind miteinander verknüpft. Einige Moleküle erinnern an Antibiotika. Möglicherweise sind auch pharmakologisch interessante Stoffe dabei. Manche von Sommers Kollegen vermuten, dass die Würmer ihrem Käfer zu dessen Lebzeiten bei der Parasitenabwehr helfen, denn im *Pristionchus*-Genom wurden entsprechende Abschnitte für Antipilzgifte gefunden. Einige der Substanzen sind inzwischen im Labor hergestellt worden. „Wir wissen nun, dass manche davon Dauerstadien induzieren, andere steuern die Mundform.“

Mit phänotypischer Plastizität und Kooption schafft die Evolution also Vielfalt. Auf diese Weise sind die Fadenwürmer mit über einer Million Arten

Grafik: MPI für Entwicklungsbiologie; Foto: Axel Griesch

Auf Eis gelegt: Mehr als tausend *Pristionchus*-Stämme hat Ralf Sommer in flüssigem Stickstoff konserviert. Inzwischen versteht er immer besser, wie diese Vielfalt entstanden ist.

die größte Tiergruppe überhaupt geworden. Sie kommen im Boden, Süßwasser und auf dem Meeresgrund vor. Manche Arten leben als Parasiten in Pflanzen, Tieren und im Menschen.

Auf allen Kontinenten haben die Tübinger Wissenschaftler inzwischen Käfer und Würmer gesammelt, dabei dreißig neue *Pristionchus*-Arten und vier verwandte Gattungen entdeckt. Von 300 Stämmen haben sie das Erbgut entschlüsselt und Stammbäume erstellt.

Und laufend kommen neue wundersame Entdeckungen hinzu. Etwa die Formation, in der sie Durststrecken überdauern. Während andere Fadenwürmer einzeln bleiben, kriechen mehrere *Pristionchus* aneinander hoch, bis sie mit ihren Leibern einen etwa einen Zentimeter langen Fortsatz gebildet haben, einen Wurm-Turm oder „Dauer-Tower" sozusagen. So können sie leichter von einem neuen Käfer übernommen werden, wenn der alte nichts mehr zu fressen hergibt.

Und dank eines wasserabweisenden Wachses können sie im Gegensatz zu andern Würmern sogar auf dem Wasser schwimmen. „Noch so ein Knaller: Es ist das längste bekannte Wachs im Tierreich. Ein symmetrischer Ester mit insgesamt sechzig Kohlenstoffeinheiten."

Wenn die Natur schon bei den unscheinbaren Fadenwürmern einen solchen Einfallsreichtum an den Tag legt, wie unendlich vielfältig muss sie dann erst bei größeren Organismen sein.

Für Ralf Sommer ist das ein Beleg dafür, dass die Unterschiede zwischen den Lebewesen doch größer sind als zuletzt angenommen. „Wir haben uns lange von der relativ kleinen Anzahl an Genen und der Tatsache blenden lassen, dass sich die gleichen Signalkaskaden in unterschiedlichen Organismen wiederfinden", meint Ralf Sommer. „Auch wenn die Biomedizin es nicht gern hört: Wurm, Fliege oder Fisch zu untersuchen, um den Menschen besser zu verstehen – das funktioniert nicht. Im Detail unterscheiden sich Lebewesen auf der Erde dann doch zu sehr." ◂

Foto: Axel Griesch

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- **Unterschiedliche Varianten eines Merkmals wie die Mundformen des Fadenwurms *Pristionchus pacificus* schaffen das Rohmaterial für die Evolution. Im Wettstreit um die beste Anpassung können so neue Arten entstehen.**
- **Die Evolution geizt mit Neuerfindungen. Lieber greift sie auf Bewährtes zurück, baut es um und setzt es dann neu ein. So werden Gene für das Ruhestadium des Fadenwurms für die Steuerung der Mundform zweckentfremdet.**

GLOSSAR

Dauerstadien: Fadenwürmer können wie viele andere Organismen auch Ruhephasen einlegen, in denen sie ihren Stoffwechsel drastisch herunterfahren. Manche Wissenschaftler vermuten, dass die infektiösen Stadien von parasitischen Fadenwürmern aus Dauerstadien hervorgegangen sind. Denn genauso wie Parasiten sind die Dauerstadien häufig mit der Besiedelung anderer Organismen verbunden. Außerdem gleichen sie den infektiösen Formen nicht nur äußerlich, sie nutzen auch ganz ähnliche Gene und Signalwege in ihren Zellen.

Nekromenie: Nekromenisch lebende Tierarten profitieren vom Tod eines anderen Organismus, ohne dass sie diesen in irgendeiner Weise beschleunigen. Der Fadenwurm *Pristionchus pacificus* beispielsweise verharrt auf Käfern in einem Ruhestadium, aus dem er erst mit dem Tod des Insekts erwacht. Er ernährt sich von den Mikroorganismen und anderen Fadenwürmern auf dem toten Tier. Nekromenie könnte eine Vorstufe zu Parasitismus sein, dann nämlich, wenn beispielsweise der Wurm dazu übergeht, schon zu Lebzeiten des Käfers auf dessen Kosten zu leben.