

1 | 2023

VBio

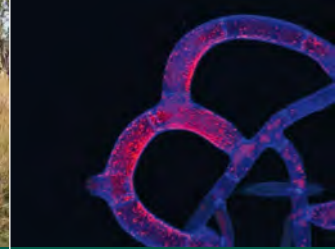
Verband | Biologie, Biowissenschaften
& Biomedizin in Deutschland



ARTENSCHUTZ
Hilfe für den
Wandalbatros



ENTOMOLOGIE
Struktur von
Termitenstaaten



MYKOLOGIE
Räuberische Pilze

BIOLOGIE

IN UNSERER ZEIT

**Kampf
der Zellen**



Goldenes Zeitalter der Biologie

Liebe Leserinnen und Leser, liebe Mitglieder des VBIO, das neue Jahr ist bereits in vollem Gange, doch die Nachwirkungen der vergangenen drei Jahre sind noch zu spüren. Diese waren unerwartet turbulent und stellen Vieles auf den Kopf, was für uns (in den westlichen Industrienationen) lange Zeit garantiert war: unsere Gesundheit, unser Wirtschaftssystem samt der Versorgungssicherheit von Waren und Energieträgern bis hin zum gesellschaftlichen Zusammenhalt. Hinzu kommt, dass die Folgen des Klimawandels immer stärker zu spüren sind. Die jüngeren Generationen nehmen uns wegen der Versäumnisse der letzten Jahrzehnte immer mehr in die Verantwortung.

Bereits 1972 warnte der Ökonom Dennis Meadows mit seinem Forscherteam in „Die Grenzen des Wachstums“ [1], einem Bericht des Club of Rome, vor einer globalen Katastrophe, sollte die Menschheit kein ökologisches und wirtschaftliches Gleichgewicht herstellen können. Anfang der 1990er Jahre wurde dann mit dem Rahmenabkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC) – welches durch das Kyoto-Protokoll, das Pariser Abkommen und letztlich den Glasgower Klimapakt erweitert wurde – ein Grundstein gesetzt, um dem Klimawandel und dessen Folgen für uns und der Biodiversität auf unserem Planeten entgegenzuwirken.

Heute – über 50 Jahre nach dem Bericht des Club of Rome – sind viele Konzepte entwickelt und Ideen realisiert worden, die die Last für unseren Planeten begrenzen sollen. Doch wie so oft in unserer Geschichte ist die Menschheit als Ganzes eine zu träge, unbewegliche Masse, die sich durch die Aufrechterhaltung des Ist-Zustands selbst bis an den Abgrund – und vielleicht schon bald darüber hinaus – manövriert. *„And makes us rather bear those ills we have. Than fly to others that we know not of“* (Hamlet, Shakespeare). Passend dazu ermahnt uns der *Emissions Gap Report* der Vereinten Nationen [2] und der *Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services* [3] jedes Jahr aufs Neue. Die Probleme werden erkannt, doch es passiert zu wenig! Und wir prokrastinieren im Kollektiv weiter vor uns hin?!

Die Komplexität der globalen Zusammenhänge, die unsere Leben heute beeinflussen und die für den einzelnen Menschen häufig schwer zu durchdringen oder gar zu bewältigen sind, sollten uns nicht weiterhin lähmen. Die Zukunft ist jetzt! Es ist Zeit zu handeln! Krisen können immer auch als Chancen verstanden werden. Doch wenn

diese weiterhin ungenutzt bleiben, bleibt am Ende nun mal nur die (unbewältigte) Krise. Die Herausforderungen sind zahlreich und erfordern immer häufiger schnelle Lösungswege. Zielführend ist die gesamtgesellschaftliche Transformation, die unser Handeln, unseren Konsum und unsere Art zu leben von Grund auf erneuert. Diese muss von jedem Individuum getragen und weltweit von der Politik vorangetrieben werden.

Nun ist es an uns Naturwissenschaftlerinnen und Naturwissenschaftlern, unsere Gesellschaft mit unserem Wissen zu unterstützen. Wir haben die Verantwortung breitflächig aufzuklären, um unsere Gesellschaft auf faktenbasierte Diskussionen vorzubereiten und um nachhaltiges und verantwortungsbewusstes Handeln zu ermöglichen. Während der Pandemie wurde sehr deutlich, dass wir in diesem Bereich zukünftig noch mehr leisten müssen. Wo waren wir Biologinnen und Biologen in dieser Zeit? Es wird nun für uns alle Zeit, für das einzustehen, an was wir „glauben“: die evidenzbasierte Wissenschaft, die sich täglich aufs Neue kritisch hinterfragt und versucht die Probleme der Gesellschaft mit zu lösen!

Viele der zukünftigen Herausforderungen verlangen die Expertise und das Handeln von uns Biologinnen und Biologen. Die Biologie ist mehr denn je als Schlüsselwissenschaft mit vielfältigen Anwendungen zu verstehen: beim Klima- und Artenschutz, bei der Beseitigung der bereits bestehenden Umweltverschmutzung, aber auch bei der Versorgungssicherheit einer immer noch wachsenden Weltbevölkerung und der damit verbundenen Notwendigkeit einer hohen Ressourceneffizienz. Bezüglich unseres Wirtschaftssystems brauchen wir mehr nachhaltige Kreisläufe, wie wir sie aus der Natur kennen. Der Schutz der Ressourcen funktioniert nur über Recycling und die Nutzung nachwachsender Rohstoffe und Energien. Diese Technologien werden im Wesentlichen von denjenigen zu erfinden sein, die sich mit den Lebens- und Naturwissenschaften befassen. Die Transformation, die wir in unserem Wirtschaftssystem, der Landwirtschaft, im Bereich der Energie und Mobilität, ja eigentlich in unserem gesamten Lebensmodell schaffen müssen, wird vermehrt von Biologinnen und Biologen zu erforschen und zu entwickeln sein.

Bioteknologie und synthetische Biologie können bereits bestehende metabolische Wege adaptieren, verändern oder gar neue kreieren und werden uns in Zukunft viele neue Werkzeuge liefern, um ressourceneffizienter und nachhaltiger werden zu können. Auch die Mykologie



Dr. Simon Häußler arbeitet seit April 2022 in der Geschäftsstelle des VBIO in München.

Peter Niesslbeck (64) ist freiberuflich niedergelassener Biologe im Bereich Umwelt/Wasser/Boden und Gründer/Seniorpartner von bioConsult-svi – Niesslbeck & Kollegen – Beratende Biologen, Geologen, Chemiker und Ingenieure. Im VBIO (und davor VDBIOL) ist er seit 1985 ununterbrochen in verschiedenen Funktionen tätig. 2006 wurde er in den Vorstand der ECBA – European Countries Biologist Association (www.ecba.eu) gewählt, um den Bereich Freie Berufe zu leiten und ist aktuell Vicepresident (for Liberal Professions).

könnte in Zukunft eine wichtige Rolle spielen. Pilze weisen eine sehr hohe metabolische Komplexität auf, welche sowohl bei der Herstellung natürlicher Werk- und Baustoffe, als auch beim Abbau von Kontaminationen in unserer Umwelt genutzt werden könnte. Technologischer Fortschritt gepaart mit einem radikalen Umdenken zu Gunsten unserer Umwelt und der folgenden Generationen ist es, was wir nun brauchen.

Neue Technologien, von Gentechnik bis zur Entwicklung alternativer Nahrungsmittel für die Ernährung von aktuell acht Milliarden Menschen, und der nötige Wandel in eine nachhaltige Landwirtschaft müssen für die Gesellschaft verständlich aufgearbeitet und präsentiert werden. Gesellschaftliche Akzeptanz und ein produktorientiertes Risikoverständnis sind der Schlüssel für die Anwendung dieser Methoden in der Landwirtschaft. Während neue molekulare Methoden in der modernen Biomedizin bei Mensch und Tier längst zur Anwendung kommen (von Insulin bis zum mRNA-Impfstoff gegen COVID-19), bestehen gegen biotechnologische Lösungen in der Landwirtschaft noch immer sehr große Widerstände, die in der Gesellschaft naturwissenschaftlich begleitet, ethisch und rechtlich geklärt werden müssen. Gezielte, und nicht wie bisher zufällige, Veränderungen von Pflanzengenomen werden in Zukunft helfen, uns an eine immer schneller verändernde Umwelt anzupassen. Die Liste erfolgreicher Anwendungen neuer Züchtungsmethoden wird länger [4]; wobei Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nun auch bei den nötigen gesetzlichen Rahmenbedingungen mitwirken müssen. Wir haben die Verantwortung, das Verständnis der Öffentlichkeit und der Politik für Wissenschaft und Forschung zu verbessern! Wir müssen helfen, die Ressentiments in der Gesellschaft abzubauen und uns wissenschaftsfeindlichem *Framing* entgegenstellen. Wir sollten wieder aufeinander zugehen, uns gegenseitig zuhören und lösungsorientiert gemeinsam die Probleme anpacken.

Beginnt nun, bei so viel Bedarf an biologischem Wissen, endlich die Epoche der Biologie und Bioökonomie? Die Pandemie hat auf die Unverzichtbarkeit der Expertise von uns Biologinnen und Biologen in Biomedizin und Pharmazie hingewiesen. Und es gilt noch viele weitere Berufsfelder zu entwickeln, in denen biologisches Fachwissen wichtig sein wird: in den Bereichen der angewandten *Life Sciences*, in den Ingenieurwissenschaften bis hin zu den Rechtswissenschaften, im Management-, Finanz- und Versicherungssektor. Hier entstehen Nischen, die

zunächst identifiziert und in Zukunft besetzt werden wollen. Doch sind wir in der Biologie schon so weit, dass wir diese Herausforderung auf breiter Front annehmen können? Um diese spannenden, hochqualitativen und auch lukrativen Jobs erschließen zu können, sollten wir unser eigenes, persönliches Repertoire an Fähigkeiten so früh wie möglich überprüfen und uns gegebenenfalls rechtzeitig – ja, auch außerhalb der Hochschulen – fort- und weiterbilden. Wir müssen lernen, Sachverhalte in Kreisen von branchenfremden Experten überzeugend, verständlich und kompetent zu erklären, um uns reibungsarm durchsetzen zu können. Wir müssen lernen, seriös und verbindlich aufzutreten, um Vertrauen aufzubauen und Verantwortung übernehmen zu können.

In Deutschland sind knapp 300.000, in Europa derzeit rund 1,2 Millionen Biologinnen und Biologen berufstätig, doch selbst diese Zahl kann nur sehr grob geschätzt werden. In welchen Fachbereichen welche beruflichen Kapazitäten zur Verfügung stehen, ist schwer zu bestimmen, und wenn ein Fachkräftemangel, wie derzeit beispielsweise im Natur- und Umweltschutz, festgestellt wird, können diese „verlorenen Generationen“ nicht kurzfristig nachgezüchtet werden. So verlieren wir wertvolle Zeit, die uns angesichts der großen langfristigen Krisen nicht mehr ausreichend zur Verfügung stehen wird. Die zu Beginn skizzierte Geschichte der weltweiten Klimatreffen und -pakte zeigt, dass die Politik häufig zu langsam reagiert, um die nötigen Weichenstellungen konsequent umzusetzen. Folglich sind wir alle in der Verantwortung zum gewünschten Wandel beizutragen. Blicken wir also zuversichtlich in das neue Jahr und packen wir es mutig an, damit der Wandel doch noch rechtzeitig geschehen kann!

- [1] D. Meadows et al. (1972). Die Grenzen des Wachstums: Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt.
- [2] United Nations Environment Programme (2022). Emissions Gap Report 2022: The Closing Window – Climate crisis calls for rapid transformation of societies. Nairobi. <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2022>
- [3] IPBES (2019). Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo (editors). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 1148 pages. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>
- [4] www.eu-sage.eu

Ihre



Biologie in unserer Zeit ist die Verbandszeitschrift des Verbandes Biologie, Biowissenschaften & Biomedizin in Deutschland – VBIO e.V. Mehr Informationen finden Sie im Internet unter www.vbio.de.

Verlag:

Verband Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland – VBIO e.V.
Corneliusstr. 12, 80469 München
Telefon +49 (0)89/26 02 45 73
Email: biuz@vbio.de

Alleinvertretungsberechtigter Vorstand:
Prof. Dr. Karl-Josef Dietz, Bielefeld (Präsident)
PD Dr. Christian Lindermayr, Friedberg (Schatzmeister)

Managing Editor:

Dr. Larissa Tetsch (verantwortlich für den Inhalt),
Steinröselweg 9, 82216 Maisach;
Telefon +49 (0)81 41/8 88 06 27
Email: redaktion@biuz.de

Editorial Board:

Erwin Beck, Bayreuth
Ralf Dahm, Mainz
Harald Engelhardt, Martinsried
Jacob Engelmann, Bielefeld
Monika Hassel, Marburg
Christian Körner, Basel
Wolfgang Nellen, Kassel (Chief Editor)
Hannes Petrischak, Wustermark
Felicitas Pfeifer, Darmstadt
Michael Riffel, Hirschberg
Udo Schumacher, Hamburg
Marco Thines, Frankfurt

Herstellung:

Dr. Larissa Tetsch,
Telefon +49 (0)81 41/8 88 06 27
Email: redaktion@biuz.de

Anzeigenleitung:

Dr. Carsten Roller, Corneliusstr. 12, 80469 München
Telefon +49(0)89/26 02 45 73
Email: roller@vbio.de

Mitglieder- und Abo-Service:

VBIO e.V., Geschäftsstelle München,
Corneliusstr. 12, 80469 München
Telefon +49(0)89/26 02 45 73 - Fax +49(0)89/26 02 45 74
Email: mitgliederservice@vbio.de

Preise:

Bibliotheken und Organisationen: Bitte Rückfrage
Bei VBIO-Mitgliedschaft inklusiv
<https://vbio.de/beitritt>

Geschäftsstellen des Verbandes:

Geschäftsstelle München

Dr. Carsten Roller, Corneliusstraße 12, 80469 München
Telefon +49(0)89/26 02 45 73, info@vbio.de

Geschäftsstelle Berlin

Dr. Kerstin Elbing, Luisenstraße 58/59, 10117 Berlin,
Telefon +49(0)30/27 89 19 16, elbing@vbio.de

Satz:

TypoDesign Hecker GmbH, Leimen.

Druck und Bindung:

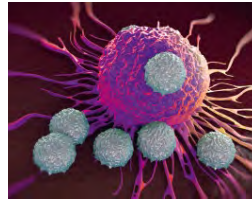
ColorDruck Solutions GmbH, Leimen.

© VBIO e.V., München, 2023.

Printed in the Federal Republic of Germany.
ISSN 0045-205 X

BIOLOGIE

1 | 2023 IN UNSERER ZEIT
www.biuz.de



Unser Titelbild zeigt die künstlerische Darstellung einer Krebszelle (pink), die von mehreren, deutlich kleineren zytotoxischen T-Zellen (weiß) angegriffen wird. Zytotoxische T-Zellen als Teil der erworbenen Immunität sind bestens dazu ausgerüstet, entartete Körperzellen zu erkennen und zu eliminieren. Allerdings haben Krebszellen Tricks auf Lager, um diese Angriffe abzuwehren. Dazu gehören insbesondere Moleküle auf ihrer Oberfläche, die sogenannte Immun-Checkpoint-Moleküle auf der Oberfläche der zytotoxischen T-Zellen ansprechen, und damit ihre Aktivierung verhindern oder sie sogar in den Selbstmord treiben. Wie immunonkologische Therapien T-Zellen im Kampf der Zellen unterstützen, lesen Sie in unserem Titelthema auf S. 45. Bild: iStock-486570034.

MELDUNGEN

6 Forschung & Entwicklung, Preise, Ausstellung

POLITIK UND GESELLSCHAFT

- 12 Befristung und gute wissenschaftliche Praxis
- 15 Nachgefragt! – Kleine Nachlese zum Wissenschaftsjahr 2022
- 18 GENOME EDITING im Gespräch: Wissenschaft trifft Politik – Einladung zum Dialog
- 19 Mathematisch-naturwissenschaftliche Gesellschaften informieren Bundestagsabgeordnete zu Klima und Energie

TREFFPUNKT FORSCHUNG

- 20 Humanpathogene in ungewöhnlichen Lebensräumen
- 22 Die Entwicklung des menschlichen Neocortex aus Sicht der Paläogenetik
- 25 Hornissenraubfliege und Behaarter Kurzflügler: Gefährdete Großinsekten auf Dungkäfer-Jagd
- 27 Massive Gefährdung eines großen Teils der Reptilien
- 28 Stoffwechselraten, Lebenszyklen und Körpergewicht
- 29 Kohlmeisen – Trotzen sie dem Klimawandel?
- 30 Gesangsmimikry bei weiblichen Spottdrosseln
- 31 Klimawandel im Zeitalter des Menschen

MAGAZIN

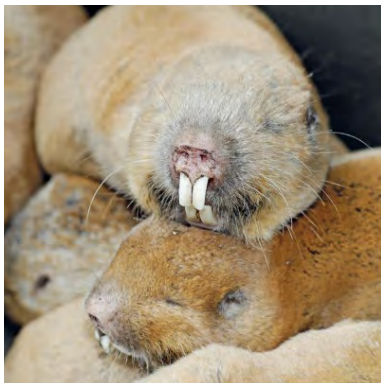
- 86 Bücher und Medien
- 90 Mikroben verstehen: Schwimmstile der Mikroben
- 92 Außerschulische Lernorte: Inatura: Natur, Mensch und Technik in Vorarlberg erleben
- 94 Partner des Menschen: Hanf: Eine alte Kulturpflanze mit dem Versprechen einer grünen Zukunft
- 98 Kolumne: Der Decoy-Effekt

IM FOKUS

- 32** Räuberische Pilze mit Potenzial zur Schädlingsbekämpfung
Jennifer Emser, Anna-Lena Klemke, Marius Kriegler, Reinhard Fischer
- 40** Letzte Chance für die Albatrosse
Peter Ryan
- 45** Kampf der Zellen
Philipp Ivanyi

- 52** „Der See im Glase“
Thomas Leitz
- 58** Auf den Zahn gefühlt
Jana Storsberg
- 67** Ein Königreich in vielen Variationen
Johannes Sander
- 76** Evaluation eines Berufsfeldpraktikums
Alisca Taubach, Silvia Wenning

58 Auf den Zahn gefühlt
Bei Säugetieren sind Zähne für die Nahrungsaufnahme unverzichtbar. Die nötige Stabilität gewährt der Zahnschmelz, dessen Struktur nicht nur die Materialeigenschaften bestimmt, sondern auch Aufschluss über Verwandtschaftsbeziehungen geben kann.

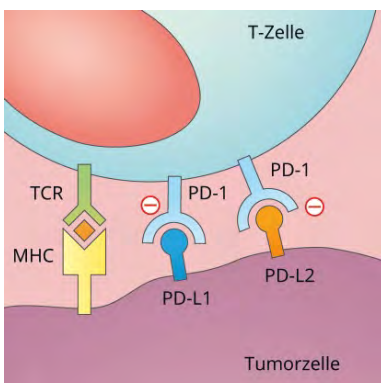


40 Letzte Chance für die Albatrosse
Die subantarktischen Inseln Marion und Prince Edward bieten wichtige Brutplätze für viele Seevögel. Doch deren Bestände werden von eingeschleppten Mäusen bedroht. Das Mouse-Free Marion Project setzt sich für die Ausrottung des Räubers ein.



76 Evaluation eines Berufsfeldpraktikums
Praxisphasen im Studium führen nicht automatisch zu guten Lernerfolgen. Eine Evaluation bestätigt dem biologiedidaktischen Berufsfeldpraktikum an außerschulischen Lernorten der Universität Duisburg-Essen einen hohen Nutzen für Studierende und Lernorte.

45 Kampf der Zellen
Krebszellen nutzen verschiedene Mechanismen, um der körpereigenen Abwehr zu entgehen. Wie sich mit Hilfe von immunonkologischen Therapien das Immunsystem bei der Bekämpfung von Krebszellen unterstützen lässt, erfahren Sie in unserem Artikel.



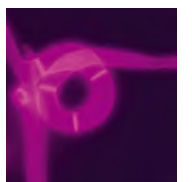
67 Ein Königreich in vielen Variationen
Termiten sind eine ökologisch wichtige Gruppe eusozialer Insekten. Von den bei uns heimischen Hautflüglern unterscheiden sich ihre Staaten jedoch in wesentlichen Punkten. Einen Überblick über die Besonderheiten von Termitenstaaten liefert unser Artikel.



52 „Der See im Glase“
Aquarien spielen heute eine zunehmende Rolle im Artenschutz. Dadurch hat sich die Aquaristik zu einer Bürgerwissenschaft mit vielfältigen Beziehungen zu den benachbarten Naturwissenschaften entwickelt. Wir stellen Initiativen und engagierte Organisationen vor.



32 Räuberische Pilze mit Potenzial zur Schädlingsbekämpfung
Einige Pilze sind in der Lage, bei Nahrungsmangel Fallen auszubilden, um damit Fadenwürmer zu erbeuten. Da letztere oft Schädlinge sind, haben räuberische Pilze ein großes Potenzial als Ersatz für Pestizide.





Oktopusse – hier ein Jungtier – haben komplexe Kamera-Augen, ein zentrales Gehirn, aber auch ein peripheres Nervensystem, das teilweise autark handeln kann. Wie alle Kopffüßer sind sie hochintelligent – ihr komplexes Nervensystem verdanken sie unter anderem einem auffälligen Zuwachs an microRNA-Genen.
 Foto: Nir Friedman.

FORSCHUNG & ENTWICKLUNG

Warum sich unter allen Weichtieren nur bei den Kopffüßlern (Cephalopoden) ein so komplexes Nervensystem entwickeln konnte, fragt sich die Wissenschaft schon lange. Über eine mögliche Ursache berichtet nun ein internationales Team um Forschende des Max Delbrück Centers und des Dartmouth College, USA, im Fachblatt „Science Advances“. Es hat in neuronalen Geweben von Oktopussen entdeckt, **dass das microRNA-Repertoire dieser Kopffüßler erheblich erweitert ist**. Vergleichbare Entwicklungen gab es auch bei Wirbeltieren, was laut Nikolaus Rajewsky, Direktor des Berliner Instituts für Medizinische Systembiologie des Max Delbrück Centers (MDC-BIMSB) und Letzautor der Studie, darauf hindeuten könne, dass microRNAs wahrscheinlich fundamental wichtig für die Entwicklung komplexer Gehirne sind. MicroRNA-Gene kodieren für kleine RNA-Stücke, die wiederum an Boten-RNA binden und darüber die Herstellung von Proteinen beeinflussen. Ihre Anzahl ist im Oktopus um 42 neue Genfamilien erweitert worden, die spezifisch im neuronalen Gewebe und vor allem im Gehirn exprimiert werden. Dass diese Gene funktionell wichtig sind, schließt das Team aus dem Nachweis, dass sie und ihre Bindestellen während der Cephalopoden-Evolution konserviert wurden. „Dies ist die drittgrößte Erweiterung von microRNA-Familien im Tierreich und die größte jenseits der Wirbeltiere“, betont Erstautor Grygoriy Zolotarov, ein ukrainischer Wissenschaftler, der während seines Medizinstudiums in Prag und danach im Labor von Rajewsky am MDC-BIMSB forschte. „Da Kraken keine typischen Modellorganismen sind, waren unsere molekularbiologischen Werkzeuge sehr eingeschränkt“, erklärt Zolotarov. „Daher wissen wir noch nicht, in welchen Zelltypen genau die neuen microRNAs exprimiert werden.“

Als nächstes will Rajewskys Team nun eine Technik, die in seinem Labor entwickelt wurde, beim Oktopus anwenden – nämlich Zellen im Gewebe molekular aufgelöst sichtbar machen.

www.mdc-berlin.de

■ Moderne eukaryotische Zellen beinhalten verschiedene Organellen, die einstmals eigenständige Bakterien waren. Um zu verstehen, wie diese Bakterien im Laufe der Evolution in die Zellen aufgenommen wurden und gesteuert werden, untersuchte ein Forschungsteam um Eva Nowack vom Institut für Mikrobielle Zellbiologie der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf den einzelligen Flagellaten *Angomonas deanei*, der im Darm von Insekten lebt. Das Geißeltierchen ist für diese Frage ein besonders geeigneter Modellorganismus, denn **es trägt genau ein symbiontisches Bakterium in sich, das erst vor vergleichsweise kurzer Zeit (zwischen 40 und 120 Millionen Jahren) inkorporiert wurde** und den Wirt mit Vitaminen und bestimmten Stoffwechselprodukten versorgt. Wie bei Mitochondrien und Chloroplasten ist das Bakteriengenom gegenüber der freilebenden Form reduziert, allerdings noch nicht im selben Ausmaß. Die Integration ist soweit fortgeschrit-



Beim Flagellaten *Angomonas deanei*, einem einzelligen eukaryotischen Organismus, der im Darm von Insekten lebt, enthält jede Zelle einen bakteriellen Symbionten, hier magenta markiert. Der Zellkern des Flagellaten und sein mitochondriales Genom sind cyan gefärbt. Foto: HHU/ Anay Maurya.

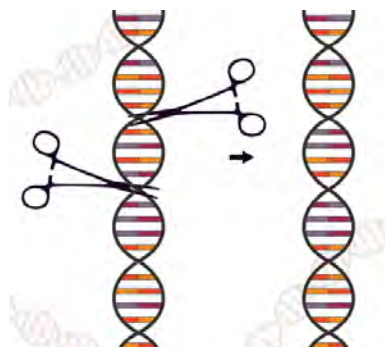
ten, dass die Zellteilung synchron abläuft. Um herauszufinden, wie die Wirtszelle den Endosymbionten kontrolliert, hat das Düsseldorfer Forschungsteam dessen Proteinzusammensetzung untersucht. Dabei stellte es fest, dass eine gewisse Zahl von Proteinen von der Wirtszelle zum Endosymbionten transportiert wird. Drei dieser Proteine bilden einen Ring um dessen Teilungsstelle. Eines davon ähnelt dem Protein „Dynamin“, das sich zu spiralförmigen Ketten zusammenlagern und zusammenziehen kann. Ein weiteres Protein, die sogenannte Peptidoglycanhydrolase, ist dafür bekannt, bakterielle Zellwände abbauen zu können. Auch in Mitochondrien und Chloroplasten formen Dynaminartige Proteine einen Ring um die Teilungsstelle der Organellen, dessen Kontraktion beim Durchschnüren der Organellen hilft. Außerdem wird für die Teilung einiger Chloroplasten eine Peptidoglycanhydrolase benötigt, die Reste der bakteriellen Zellwand an der Teilungsstelle dieser Organellen abbaut. Prof. Nowack: „Unsere Arbeit zeigt, dass eine eukaryotische Wirtszelle relativ früh in der Evolution einer endosymbiontischen Beziehung bestimmte Proteine zum Endosymbionten schicken kann. Diese Proteine ermöglichen es der Zelle, Kontrolle über den Symbionten zu gewinnen.“ www.bbu.de

■ Auch Bakterien können von Viren befallen werden und haben für diesen Fall eigene Immunabwehrstrategien wie CRISPR-Cas-Systeme entwickelt. Forschende um Chase Beisel, Leiter des Lehrstuhls für synthetische RNA-Biologie am Würzburger Helmholtz-Institut für RNA-basierte Infektionsforschung (HIRI) haben nun **eine Nuklease gefunden, die eine gänzlich neue Art der CRISPR-Immunabwehr darstellt**. „Wir haben CRISPR-Nukleasen erforscht, die ursprünglich unter Cas12a subsumiert wurden, also unter Nukleasen, die Bakterien vor Eindringlingen schützen, indem sie invasive

Für die Richtigkeit der Informationen sind die jeweils genannten Institutionen verantwortlich.

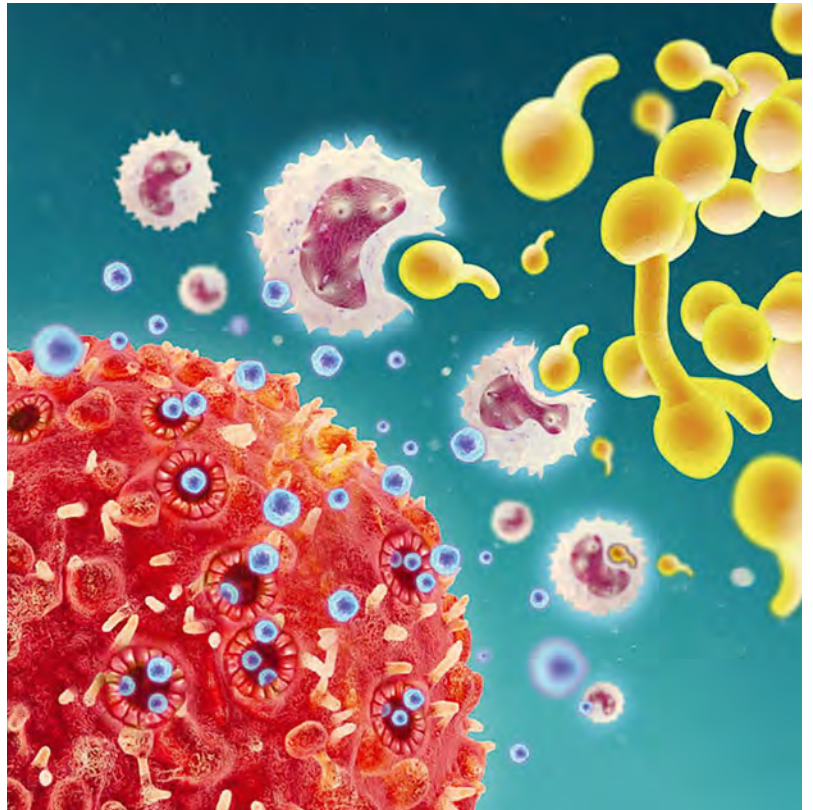
DNA erkennen und spalten“, berichtet Oleg Dmytrenko, Erstautor der Studie. „Dabei entdeckten wir, dass sich diese Nukleasen, die wir Cas12a2 nannten, nicht nur ganz anders verhalten als Cas12a, sondern auch als jede andere bekannte CRISPR-Nuklease.“ Der entscheidende Unterschied: Wenn Cas12a2 invasive RNA erkennt, spaltet die Nuklease diese, kann aber auch andere RNA und DNA in der infizierten Bakterienzelle schädigen. Das beeinträchtigt deren Wachstum und dämmt die Infektion ein. Grundsätzlich seien solche sogenannten abortiven Infektionsabwehrstrategien von Bakterien bereits bekannt, meint HIRI-Postdoc Dmytrenko. Auch einige andere CRISPR-Cas-Systeme funktionierten auf diese Weise. „Ein CRISPR-basierter Abwehrmechanismus, der sich auf eine einzige Nuklease stützt, um den Eindringling zu erkennen und zelluläre DNA und RNA abzubauen, wurde jedoch noch nie beobachtet“, sagt der Wissenschaftler. Cas12a2 kann für die molekulare Diagnostik und den direkten Nachweis von RNA-Biomarkern verwendet werden, wie ein Machbarkeitsbeweis ergeben habe.

www.uni-wuerzburg.de



Grafik: www.pixabay.com.

■ T-Zellen gehören zum adaptiven Immunsystem, das körperfremde Antigene erkennt und Krankheitserreger gezielt bekämpft. Sogenannte T-Helferzellen schütten Zytokine aus, die weitere Immunzellen zum Infektionsherd locken und dort eine Entzündung auslösen. Sie können



Das von T-Zellen (rot) über Löcher in der Membran ausgeschüttete Zytokin IL-1 α (blau) regt Monozyten (Hintergrund) an, *C. albicans*-Hyphen (gelb) zu fressen. Grafik: Luo Yu (Leibniz-HKI).

aber auch einer Entzündung entgegenwirken. Diese Mechanismen besser zu verstehen hilft bei der Entwicklung von Therapeutika gegen Krankheitserreger oder Autoimmunerkrankungen. „Wir haben bei einer Untergruppe der T-Helferzellen, den Th17-Zellen, ein Zytokin gefunden, das bisher als Teil des angeborenen Immunsystems bekannt war“, erklärt Studienleiterin Christina Zielinski, Leiterin der Abteilung Infektionsimmunologie am Leibniz-Institut für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie und Professorin an der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Das Zytokin IL-1 α ist stark entzündungsfördernd und vermutlich an Autoimmunerkrankungen wie rheumatoider Arthritis bei Kindern beteiligt. Über zahlreiche Versuche fanden die Forschenden heraus, dass IL-1 α , anders als andere Zytokine, **durch einen als Inflammasom bezeichneten Multi-proteinkomplex in den T-Zellen**

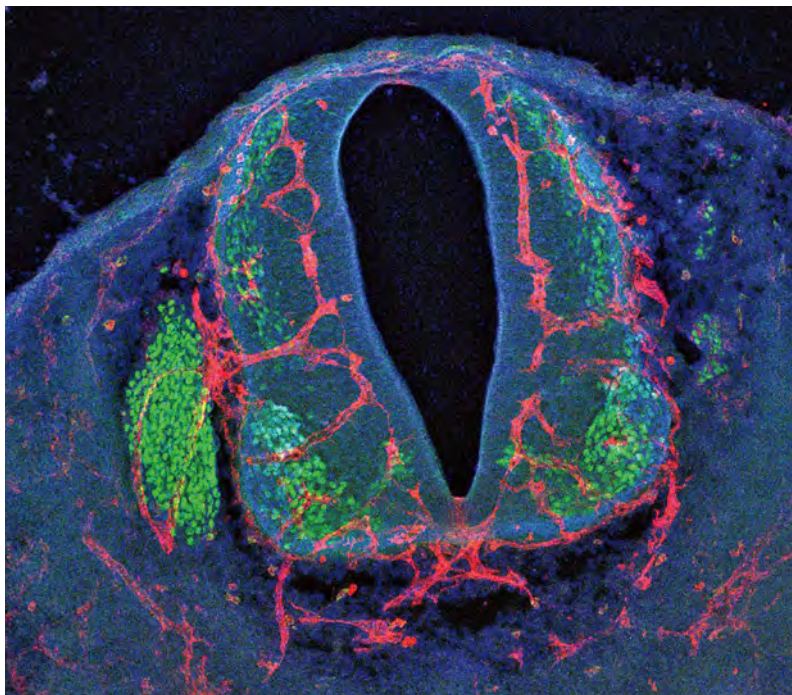
gebildet wird. Dieser Proteinkomplex hat in anderen Zellen ganz andere Aufgaben. „Bisher war unbekannt, dass menschliche T-Zellen solch ein Inflammasom besitzen und dass dieses für die Produktion von IL-1 α umfunktioniert werden kann“, so Zielinski. Ebenso unerwartet war der Transportweg aus den Zellen heraus: Verantwortlich dafür war Gasdermin E, ein Molekül, das Poren in Zellmembranen bildet. Die Ausschüttung des Zytokins IL-1 α beschränkt sich offenbar auf eine Untergruppe von Th17-Zellen, andere T-Helferzellarten bilden es nicht. „Th17-Zellen spielen eine wichtige Rolle bei Pilzinfektionen“, so Zielinski. Das Team untersuchte daher, ob auch IL-1 α daran beteiligt ist und konnte zeigen, dass vor allem Th17-Zellen mit einer Antigen-Spezifität für den infektiösen Hefepilz *Candida albicans* das Zytokin ausschütten. Diese Untergruppe der Th17-Zellen dürfte deshalb relevant

sein für die Abwehr von Infektionen mit dem häufigen Hefepilz. In weiteren Untersuchungen wollen die Forschenden nun herausfinden, bei welchen weiteren Erkrankungen das porenbildende Gasdermin E in T-Zellen eine Rolle spielt.

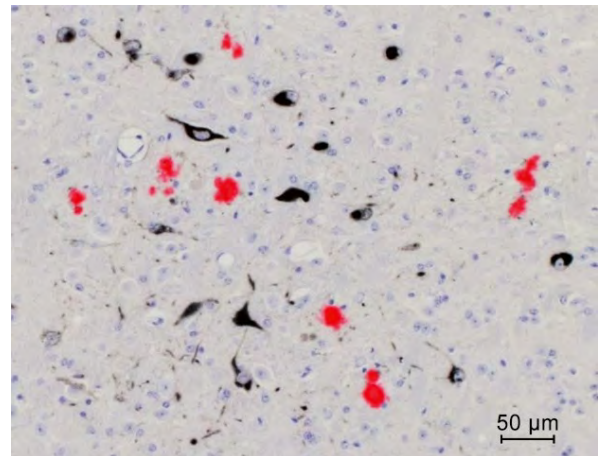
www.leibniz-bki.de

■ Nervenzellen benötigen eine Menge Energie und Sauerstoff. Beides erhalten sie über das Blut. Daher ist Nervengewebe in der Regel von einer Vielzahl von Adern durchzogen. Bei der Embryonalentwicklung sprießen im Gehirn und Rückenmark, aber etwa auch in der Netzhaut des Auges jede Menge Gefäße heran. Zudem entstehen dort massenhaft Neuronen, die sich untereinander und mit Strukturen wie Muskeln und Organen vernetzen. Forschende der Universitäten Heidelberg und Bonn haben zusammen mit internationalen Partnern einen Mechanismus identifiziert, der sicherstellt, dass sich Neuronen und Gefäßzellen bei ihrem Wachstum nicht ins Gehege kommen. „Die Anlage von Gefäßen im Rückenmark be-

ginnt bei den Tieren etwa 8,5 Tage nach der Befruchtung“, sagt Prof. Dr. Carmen Ruiz de Almodovar, Mitglied im Exzellenzcluster ImmunoSensation2 und im Transdisziplinären Forschungsbereich Life & Health der Universität Bonn. „Zwischen Tag 10,5 und 12,5 legen die Gefäßzellen aber eine Pause ein. Und das, obwohl in dieser Zeit in ihrer Umgebung große Mengen wachstumsfördernder Moleküle vorhanden sind. Stattdessen wandern in dieser Zeit zahlreiche Nervenzellen – die Motorneuronen – von ihrem Entstehungsort im Rückenmark zu ihrer endgültigen Position. Dort bilden sie dann Ausläufer, die Axone, die von der Wirbelsäule zu den verschiedenen Muskeln führen.“ **Die Motorneuronen nutzen also die Ruhephase der Gefäßzellen, um sich selbst zu organisieren und heranzuwachsen.** Dazu rufen sie den Gefäßzellen eine „Stopp, jetzt bin ich dran“-Botschaft zu – indem sie das Protein Semaphorin 3C (Sema3C) in ihre Umgebung abgeben. Dieses diffundiert zu den Gefäßzel-



Wenn das PlexinD1-Gen nicht funktioniert, wandern die Blutgefäße (rot) auf unorganisierte Weise in Regionen mit Motorneuronen (grün) ein. Grafik: AG Ruiz de Almodovar/Uni Bonn.



Hirngewebe einer Maus mit Alzheimer-ähnlichen Symptomen. Die Beta-Amyloid-Plaques sind rot angefärbt. Foto: Jucker Lab (HIH/DZNE).

len und dockt dort an einem Rezeptor namens PlexinD1 an. Die Ergebnisse dokumentieren, wie wichtig der koordinierte Ablauf der beiden Prozesse während der Embryonalentwicklung ist. Mittelfristig könnten sie auch zu einem besseren Verständnis bestimmter Erkrankungen beitragen, etwa von Netzhautdefekten, die durch ein starkes und unkontrolliertes Gefäßwachstum entstehen. Auch bei der Regeneration zerstörter Hirnareale, beispielsweise nach einer Verletzung des Rückenmarks, kann die Nutzung des neu entdeckten Mechanismus auf lange Sicht möglicherweise helfen.

www.ukbonn.de

■ Hauptursache für die Entstehung der Alzheimerkrankheit scheint die Ablagerung des Beta-Amyloid-Proteins im Gehirn zu sein. Allerdings fand man bislang bei Erkrankten nur einen schwachen Zusammenhang zwischen der Menge der Ablagerungen und den klinischen Symptomen. Grund dafür könnte sein, dass sich die Krankheit in fortschreitenden Stadien unabhängig von den Plaques weiterentwickelt. Ein Forschungsteam um Professor Dr. Mathias Jucker vom Hertie-Institut für klinische Hirnforschung, der Universität Tübingen und dem Deutschen Zentrum für Neurodegenerative Erkrankungen (DZNE) liefert nun erstmals

experimentelle Belege für diese Hypothese. Das Team reduzierte bei Mäusen, die als Alzheimermodell dienen, in unterschiedlichen Altersstadien gezielt die Plaques. Dann maßen sie im Hirnwasser der Mäuse das Neurofilament-Leichtketten-Protein (NfL) als Anzeiger für den Abbau von Nervenzellen. Das Ergebnis: „Wenn wir die Beta-Amyloid-Ablagerung in frühen Stadien reduzierten, stieg die Menge an NfL-Protein im Hirnwasser nicht mehr an. Wir konnten den Abbau der Nervenzellen stoppen“, so Christine Rother, Erstautorin der Studie. Ein anderes Bild ergab sich im höheren Lebensalter: Hier stieg der Pegel des NfL-Proteins im Hirnwasser unverändert an. „Es scheint bei Alzheimer also zwei Phasen der Krankheitsentwicklung zu geben“, schlussfolgert Jucker. In der ersten Phase trieben die Beta-Amyloid-Plaques die Krankheit voran. Zu diesem Zeitpunkt seien Therapien, die den Ablagerungen entgegenwirken, höchst effektiv. In der zweiten Phase **schreite hingegen die Neurodegeneration unabhängig von den Plaques fort**. Gegen die Beta-Amyloid-Plaques gerichtete Therapien verfehlen nun weitgehend ihre Wirkung. Eine Therapie müsse daher so frühzeitig wie möglich begonnen werden, schließt Jucker.

www.bib-tuebingen.de

PREISE

Der Wissenschaftspreis des Stifterverbandes für die Deutsche Wissenschaft „Forschung in Verantwortung“ geht in diesem Jahr an Jörg Overmann, wissenschaftlicher Direktor des Leibniz-Instituts DSMZ – Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen sowie Professor an der Technischen Universität Braunschweig. **Die Auszeichnung würdigt die Arbeiten des Mikrobiologen zur Biodiversität von Mikroorganismen** sowie sein Engagement zum fairen Interessenausgleich bei der wissenschaft-



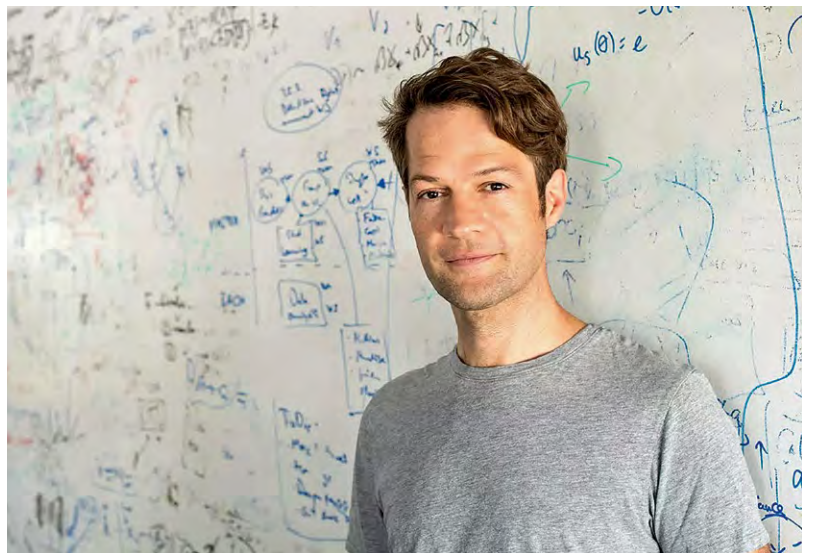
Jörg Overmann erhielt im Jahr 2022 den Wissenschaftspreis des Stifterverbandes für die Deutsche Wissenschaft. Foto: Peter Himsel/Leibniz-Gemeinschaft.

lichen und wirtschaftlichen Nutzung der biologischen Vielfalt weltweit. Overmanns wissenschaftliches Werk spannt sich von Tiefseebakterien und ihrer Rolle im Kohlenstoffkreislauf bis zum Einfluss von Bakteriengemeinschaften an Pflanzenwurzeln. Dabei ist es Overmann vielfach gelungen, zuvor nicht kultivierbare Bakterienarten im Labor zu vermehren und sie damit überhaupt erst für die Forschung und Entwicklung zugänglich zu machen. Auf der

Grundlage seiner eigenen langjährigen Forschungstätigkeit im südlichen Afrika und in Lateinamerika widmet sich Overmann außerdem seit geraumer Zeit der Anwendung der Prinzipien des Übereinkommens über die biologische Vielfalt (Convention on Biological Diversity, CBD) und des Nagoya-Protokolls auf Mikroorganismen. Der mit 50.000 Euro dotierte Preis wurde im Rahmen der Jahrestagung der Leibniz-Gemeinschaft am 23. November 2022 verliehen.

www.leibniz-gemeinschaft.de

■ Fabian Theis erhält den Gottfried Wilhelm Leibniz-Preis 2023 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG). Der renommierteste Forschungspreis in Deutschland ist mit 2,5 Millionen Euro dotiert. Theis ist Leiter des Computational Health Centers bei Helmholtz Munich und Inhaber des Lehrstuhls für Mathematische Modellierung biologischer Systeme an der Technischen Universität München (TUM). Er ist ein international führender **Pionier auf dem Gebiet des maschinellen Lernens in der Biomedizin und der digitalen Gesundheitsforschung**. Theis hat die Munich School for Data Science gegründet, die die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses im Bereich



Leibniz-Preisträger Fabian Theis. Foto: Astrid Eckert/TUM.

Data Science maßgeblich stärkt, ist an zahlreichen internationalen KI-Initiativen sowie am Human Cell Atlas beteiligt, einem internationalen Gemeinschaftsprojekt mit dem Ziel, eine Referenzdatenbank aller menschlichen Zellen als Grundlage für die Diagnose, Überwachung und Therapie von Krankheiten aufzubauen. Während seiner gesamten Laufbahn hat Theis zur Beantwortung medizinischer Fragen beigetragen, beispielsweise zur Risikobewertung von Typ-1-Diabetes, zur Modellierung von Arzneimittelkombinationen bei Diabetes, zur Vorhersage der diabetischen Retinopathie und zur Lösung von Fragen im Zusammenhang mit der aktuellen SARS-CoV-2-Pandemie.

www.belmboltz-munich.de

AUSSTELLUNG

Spürnasen aufgepasst! Tiere sind scheu und schwierig zu beobachten – aber sie hinterlassen Spuren. Wer diese lesen kann, erfährt, wer da alles mit uns zusammenlebt (und ist oft nicht wenig erstaunt darüber). Meist verraten Spuren auch noch wesentlich mehr als die reine Anwesenheit einer Tierart: Ist hier jemand entspannt entlang geschlendert oder war er etwa auf der Flucht? Wurde längs des Weges an Pflanzen genagt oder das Revier markiert? Gehen Sie in der Sonderausstellung „Tierische Gefährten“ im Schloss Rosenstein des **Staatlichen Museums für Naturkunde Stuttgart bis zum 21. Mai 2023** auf Spurensuche und lassen Sie sich überraschen. Vielleicht steht am Ende der Fährte ein ganz anderes Tier, als Sie vermutet haben? So oder so: Sie werden Spaß haben – und nebenher noch eine ganze Menge Inspiration zum Spuren-Knobeln beim nächsten Ausflug in die Natur mitnehmen. Eine unterhaltsame Spurensuche für Groß und Klein!

www.naturkundemuseum-bw.de



Aug' in Aug' mit den Tieren unserer Umgebung. Foto: R. Pflug (SMNS).

Sie ist ein wahres Multitalent: Von der Jeans bis zum Geldschein ist Baumwolle aus unserem Alltag nicht wegzudenken. Die flauschige Faser steckt in Kleidung, Nahrung sowie Kosmetik und bringt Industriemaschinen zum Laufen „wie geschmiert“. Baumwolle war gleichermaßen Motor der Industrialisierung wie der Sklaverei auf den Plantagen – mit Folgen bis in die heutige Zeit. Die Ausstellung „100% Baumwolle“, die **bis zum**

11. April 2023 im Übersee-Museum Bremen zu sehen ist, wirft einen Blick auf die Kulturgeschichten, die diese Pflanze seit 5000 Jahren schreibt und wagt auch einen Blick in die Zukunft. Das Übersee-Museum war bereits mehrfach für den europäischen Museumspreis nominiert und wurde als „Ausgewählter Ort im Land der Ideen 2010“ ausgezeichnet. www.uebersee-museum.de



In „100 % Baumwolle“ kann man unter anderem auf Spurensuche zur Bremer Hafengeschichte und der Baumwollbörse gehen. Foto: Übersee-Museum Bremen.

WISSENSCHAFTSPOLITIK

Befristung und gute wissenschaftliche Praxis

Seit Beginn der Grass-Root-Initiative #IchBinHanna um die prekären Beschäftigungsverhältnisse von Forschenden unterhalb der Professur sind weit über 300 Diskussionsbeiträge in Zeitungen, Büchern, Fernsehsendungen und Podcasts erschienen [1]. Auch der VBIO berichtete über die zunehmend besorgniserregende Situation des wissenschaftlichen Personals [2]. Diese Diskussion hat erneut Schwung erhalten nach der lange überfälligen Evaluierung des 2007 eingeführten und 2016 novellierten Wissenschaftszeitvertragsgesetzes (WissZeitVG) im Mai 2022. Das WissZeitVG regelt als Sonderbefristungsrecht die Vertragsbedingungen von wissenschaftlichem und künstlerischem Personal an Forschungseinrichtungen inkl. Hochschulen. Die Novelle des Gesetzes von 2016 sollte Sorge tragen, in der Qualifizierungsbefristung die Dauer der Befristung so zu bemessen, dass sie der angestrebten Qualifizierung entspricht, und unsachgemäße Kurz- und Kettenbefristungen zu unterbinden [3]. Ferner sollten Vertragslaufzeiten in drittmittelfinanzierten Projekten der bewilligten Projektlaufzeit entsprechen. Tatsächlich war nach 2016 zunächst ein positiver Trend zu beobachten, wonach der Anteil wissenschaftlicher Mitarbeiter/-innen, die einen dreijährigen Erstvertrag erhielten, 2017 auf 62 Prozent gestiegen war. Allerdings verringerte sich dieser Anteil 2019 auf 52 Prozent und 2020 weiter auf 40 Prozent. Da sich hinsichtlich der prekären Vertragslaufzeiten von Nachwuchswissenschaftler/-innen somit keine deutliche Verbesserung zeigte, wurden abermals Stimmen laut, die eine deutlich grundlegendere Reform bis hin zur Abschaffung des WissZeitVG forderten. Eine Verbesserung der Arbeitsbedingungen in der Wissen-

schaft mit stärkerer Planbarkeit und Verbindlichkeit in der Postdoc-Phase versprach die derzeitige Ampel-Regierung bereits in ihrem Koalitionsvertrag [4]. Dort ist auch das Ziel beschrieben, das WissZeitVG zu reformieren sowie (vermehrt) Dauerstellen für Daueraufgaben zu schaffen. Die neue Bundesministerin für Bildung und Forschung Bettina Stark-Watzinger (FDP) machte sich diese Inhalte zu eigen und lud am 27. Juni 2022 Betroffene und Vertreter/-innen zahlreicher Interessensgruppen zur Konferenz „Gute Arbeitsbedingungen in der Wissenschaft – Auf dem Weg zu einer Reform des WissZeitVG“ ins Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) nach Berlin ein [5].

Stakeholder bringen sich in Stellung

Im Nachgang dieser Konferenz positionierten sich verschiedene Interessensgruppen und verfassten teils detaillierte Papiere als Reaktion auf die Evaluation und anstehende Reform des WissZeitVG. Die Hochschulrektorenkonferenz (HRK) verabschiedete im Juli 2022 einen äußerst knappen Diskussionsvorschlag zur Weiterentwicklung des WissZeitVG [6], in der als prägnanteste Neuerung die Höchstbefristungsdauer (ohne familienpolitische Komponente) von 12 auf 10 Jahre reduziert werden soll. Einer maximal sechsjährigen Promotionszeit folgt demnach eine vierjährige Post-Doc-Phase. Auf diese Weise soll die Entscheidung, ob eine dauerhafte Karriere in der Wissenschaft realistisch ist, zu einem früheren Zeitpunkt erfolgen. Ferner wiederholt die HRK ihren Standpunkt, dass Qualifizierungsstellen im Sinne der Generationengerechtigkeit nur befristet besetzt werden dürfen und nicht mit einer Anschlusszusage für

erfolgreiche Postdocs bei Zielerreichung nach dem Berliner Modell von 2021 [7] zu versehen sind. Trotz aller Kritik an der Verkürzung der Höchstbefristungsdauer auf 10 Jahre bekräftigte die HRK diese Forderung jüngst [8].

Bereits im Juni 2022 legte die Junge Akademie (JA) eine deutlich umfangreichere und differenziertere Stellungnahme vor [9]. Im Gegensatz zur HRK erkennt die JA zunächst einmal an, dass trotz aller Novellierungen des WissZeitVG das grundlegende Problem des deutschen Wissenschaftssystems bestehen bleibt: Auch viele Jahre nach der Promotion ist eine verlässliche Planbarkeit der wissenschaftlichen Karriere für viele Personen nicht gegeben. Auch weist die Stellungnahme auf den Umstand hin, dass Karrieren außerhalb Deutschlands besser planbar sind und daher dem deutschen Wissenschaftssystem exzellente Forscher/-innen verloren gehen. Die JA spricht sich für nachhaltige Qualitätssicherung im Zuge der Bestenauslese aus, hinterfragt jedoch kritisch die Gleichsetzung von Wettbewerb mit Qualitätssicherung. Als Instrumente für eine früher planbare wissenschaftliche Karriere fordert sie definierte Karrierestufen (R1–R4) mit klar geregelten Vertragslaufzeiten, ein ausgewogenes Verhältnis zwischen befristeten und entfristeten Arbeitsverträgen, klare Perspektiven via Tenure-Track-Verfahren sowie Dauerstellen neben der Professur. Der Deutsche Gewerkschaftsbund (DGB) hat ein von mehreren Organisationen unterstütztes Plädoyer für eine Reform des Befristungsrechts vorgelegt [10], die Gewerkschaft für Erziehung und Wissenschaft (GEW) im September 2022 gar einen ausgefeilten Gesetzentwurf für ein Wissenschaftsentfristungsgesetz [11]. Demnach soll zum Zwecke der Promotion weiterhin eine Befristung von bis zu sechs Jahren erfolgen. Anschließend wäre auch weiterhin eine Befristung von sechs (in der Medizin neun) Jahren möglich, allerdings nur noch mit

verbindlicher Anschlusszusage gemäß des Berliner Hochschulgesetzes, also einer Entfristung nach Erreichen von vorab definierten Entwicklungszielen. Nach dem Wunsch der GEW dürfe die Befristungsdauer in der Postdoc-Phase vier Jahre nicht unterschreiten. Die GEW sieht dabei als einziges befristungsrelevantes Qualifikationsziel die Promotion vor.

In der Tat verliert das etwaige anschließende Qualifikationsziel der Postdoc-Phase, die Habilitation, in Deutschland zunehmend an Bedeutung und soll laut Peter-André Alt (Präsident der HRK) in 70 Prozent aller Fächer keine Rolle mehr spielen [12]. Alternativ wird häufig vom Erreichen habilitationsäquivalenter Leistungen gesprochen, die jedoch arbeitsrechtlich als Befristungsgrund nicht taugen. Und wer soll schon entscheiden, wann derartige Leistungen erbracht sind, wenn eben keine formale Habilitation mehr angestrebt ist?

Stand der Dinge

Die Stakeholder scheinen sich mittlerweile inhaltlich aufeinander zuzubewegen, wenn HRK-Präsident Alt jüngst beschreibt, er könne sich zwei Varianten für eine verlässlichere Karriereplanung vorstellen: Neben einer sechsjährigen Zeit als Juniorprofessor/-in mit Tenure-Track auch eine fünfjährige Qualifikationsphase mit anschließender Verstetigung in einer Mittelbau-Position (also als Mitarbeiter/-in unterhalb der Professur) in Forschung und Lehre oder im Wissenschaftsmanagement [12].

Ganz aktuell hat die CDU/CSU-Fraktion eine Große Anfrage zu den Plänen der Bundesregierung zur Refom des WissZeitVG gestellt [13]. In dem detaillierten Papier wird die Regierung u. a. aufgefordert, die konkreten Erkenntnisse aus der BMBF-Konferenz zu benennen und offenzulegen, welche Vorschläge der Interessensgruppen und Stakeholder im Gesetzgebungsverfahren berücksichtigt werden sollen. Über die Reform des WissZeitVG hinaus

wird die Regierung zudem aufgefordert, unter Einbeziehung der Bundesländer Zielvereinbarungen mit den Hochschulen und Forschungseinrichtungen zur Weiterentwicklung der Personalstruktur zu schließen, insbesondere zur Erhöhung des Anteils an Dauerbeschäftigungen.

Kein Zusammenhang zwischen Innovation und Befristung

Zeitgleich erschien ein Gutachten des Wissenschaftlichen Dienstes des Bundestages, das die ursprünglich vom BMBF stammende Devise „Innovation durch Fluktuation“ [14] kritisch überprüfte. Einen kausalen Zusammenhang zwischen Innovation im Hochschulsystem und Befristungspraktiken konnten die Gutachter/-innen nicht aufdecken und stellten ferner fest, dass Deutschland auch im internationalen Vergleich, beispielsweise mit den als ausgesprochen innovativ geltenden USA, eine ausgeprägte Befristungspraktik aufweist [15].

Die GEW hatte in dem Vorwort ihres „Dresdner Gesetzesentwurfs“ festgehalten, dass immer mehr Zeitverträge mit immer kürzeren Laufzeiten sowie lange steinige Karrierewege Kontinuität und damit Qualität von Forschung und Lehre substanziell gefährden. In der Tat existieren Hinweise darauf, dass sich Zeitverträge nachteilig auf Forschung und Lehre auswirken und die Einhaltung der Prinzipien guter wissenschaftlicher Praxis bedrohen. Diese Prinzipien fordern u. a. strikte Ehrlichkeit im Hinblick auf den Umgang mit eigenen Forschungsdaten und den Beiträgen Dritter, konsequente kritische Bewertung aller Ergebnisse und Zulassen und Förderung eines kritischen Diskurses in der wissenschaftlichen Gemeinschaft [16].

Gute wissenschaftliche Praxis in Gefahr ?

Einen anderen Aspekt stellt der Verein „RespectScience e. V.“ in den Fokus. RespectScience setzt sich für eine Verbesserung des Wissenschaftssystems in Deutschland ein

und will Aufmerksamkeit für Probleme wie Publikationsdruck und schlechte Arbeitsbedingungen insbesondere für befristete Beschäftigte erzeugen. RespectScience startete am 3. April 2022 eine zweimonatige Umfrage zu den vorherrschenden Arbeitsbedingungen im Wissenschaftssystem [17]. Der Verein sammelte Daten über die Umstände, in denen sich Beschäftigte aus dem akademischen System befinden, und erzeugte damit ein Stimmungsbild. Unter den 2.874 Teilnehmenden befanden sich auch knapp 650 Befragte aus dem Biologiesektor. Bei der Befragung vertreten waren Studierende, wissenschaftliche Mitarbeiter/-innen, Doktorand/-innen, Postdocs, Professor/-innen, Tenure-Track-Beschäftigte, technische Assistent/-innen und Personal außerhalb der Academia.

Die Ergebnisse der Umfrage wurden bereits im Rahmen einer GEW-Tagung vorgestellt, aber noch nicht veröffentlicht. In der Biuz können wir schlaglichtartig erste Teilergebnisse für die Biologie präsentieren. Die Frage „Sind Ihnen Fälle bekannt, in denen die vorherrschenden Arbeitsbedingungen und Bewertungskriterien dazu geführt haben, dass gute wissenschaftliche Praxis missachtet wurde?“, haben 648 Personen aus dem Bereich Biologie beantwortet. Die Ergebnisse sind deutlich: Zwei Drittel der Befragten berichten von Fällen der Missachtung der guten wissenschaftlichen Praxis, die sie auf die Arbeitsbedingungen und Bewertungskriterien zurückführen. 50 Prozent stimmten dabei „sehr zu“ und die andere Hälfte „eher zu“.

Über verschiedene Karrierestufen und Berufsgruppen hinweg stimmen 70 Prozent der Gesamtkohorte dieser Aussage zu. Betrachtet man die Untergruppen separat, fällt die Kategorie Promotion durch ihre große Beteiligung von 312 Personen auf und stellt die größte Gruppe dar. Hier kam es ebenfalls zu einer circa 70-prozentigen Zustimmung. Auch Beschäftigte im Rahmen eines Tenure-Track-Programms (N = 15)

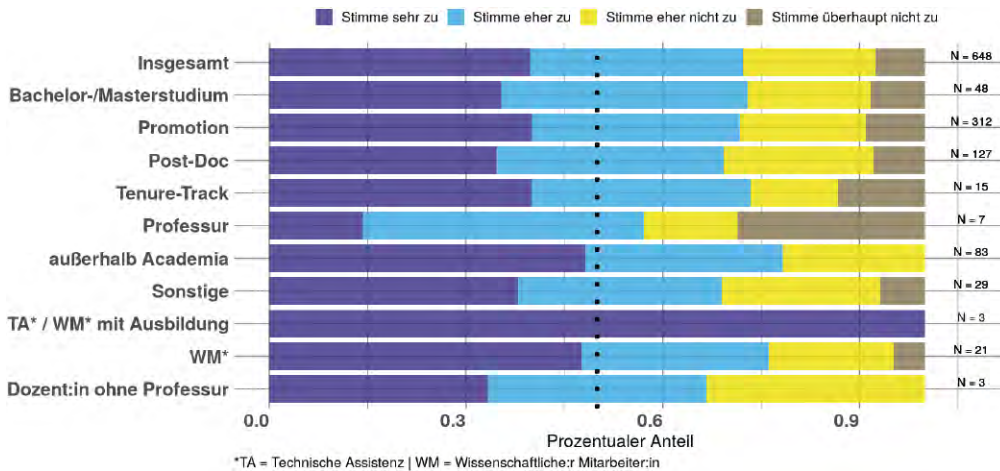


ABB. 1 Umfrage des Vereins RespectScience vom Frühjahr 2022 [17]. Gezeigt ist der prozentuale Anteil der Antworten von Beschäftigten aus den Bereichen Biologie, Biochemie und Biotechnologie auf die Frage „Sind Ihnen Fälle bekannt, in denen die vorherrschenden Arbeitsbedingungen und Bewertungskriterien dazu geführt haben, dass gute wissenschaftliche Praxis missachtet wurde?“. Die Ergebnisse stellen eine nicht repräsentative Momentaufnahme dar.

stimmen zu 70 Prozent zu. Personal außerhalb Academia (N = 83) und wissenschaftliche Mitarbeitende (N = 21) stimmen der Aussage sogar zu 75 Prozent zu. Hingegen haben Professor/-innen (N = 7) mit etwas über 50 Prozent am schwächsten zugestimmt. Die Abbildung dokumentiert damit den Trend, dass Beschäftigte in frühen Karrierestufen die Auswirkungen der Befristung auf die gute wissenschaftliche Praxis kritischer sehen als Beschäftigten in fortgeschrittenen Karrierestufen.

Trotz der Unterschiede zwischen den jeweiligen Karrierestufen wird das Fehlen durchgängig bestehender Arbeitsbedingungen und transparenter Bewertungskriterien als förderlich für schlechte wissenschaftliche Praxis genannt. Gerade in frühen Karrierephasen ist die Belastung im Wissenschaftssystem besonders hoch, weshalb RespectScience die enorme Zustimmung als nicht überraschend empfindet. In fortgeschrittenen Karrierephasen wie einer Professur sind dagegen Faktoren wie Zukunftssicherheit, Jobaussichten und Familienplanung viel stärker gegeben, und der Druck, unter dem die Beschäftigten diesbezüglich stehen, nimmt ab. In der Befragung wurden bestehende gesellschaft-

liche Strukturen, die Probleme im Wissenschaftssystem verstärken können wie Rassismus, Sexismus, Klassismus und Ableismus, nicht mit einbezogen. Es sollte aber erwähnt werden, dass strukturelle Probleme und eine intersektionale Sichtweise bei der Lösungsfindung immer mitbedacht werden müssen.

Ausblick

Die vorgestellten Teilergebnisse der Studie sind nur ein Schlaglicht auf die aktuelle Stimmungslage in den biowissenschaftlichen Instituten, da sich ja nur ein nicht repräsentativer Anteil der Beschäftigten an der Umfrage beteiligt hat. Es wird aber deutlich, dass die Situation insbesondere der befristeten Beschäftigten im Fokus bleiben muss. Davon hängt nicht nur die Zufriedenheit der Belegschaft ab, sondern offensichtlich auch die Qualität der Arbeit und der wissenschaftlichen Ergebnisse. Die Nichtreproduzierbarkeit vieler wissenschaftlicher Ergebnisse, die zunehmend beklagt wird [18], muss unter diesem Aspekt auch kritisch hinterfragt werden. Eine Novelle des WissZeitVG wird auf jeden Fall kommen. Dass damit alle Probleme des wissenschaftlichen Systems in Deutschland gelöst werden können, darf be-

zweifelt werden. Im Gegenteil besteht die Gefahr, dass sich die Bedingungen für die Nachwuchswissenschaftler/-innen sogar verschlechtern, wie es der Senat der Universität Kiel in einer aktuellen Stellungnahme [19] ausführte: Ein etwaig generell verkürzter Qualifizierungszeitraum wird den verschiedenen Fächerkulturen nicht gerecht, behindert innovative Forschung und wertet Lehre weiter ab. Ein erster Referentenentwurf zur Novelle des WissZVG liegt offensichtlich bereits vor. Ob Hanna damit zufrieden sein kann, bleibt abzuwarten.

*Sven Bradler, Göttingen
Carsten Roller, München
RespectScience e. V.*

Literatur

- [1] #IchBinHanna, <https://ichbinhanna.wordpress.com/>
- [2] S. Bradler, C. Roller (2022) Befristung am Scheidepunkt. *BiuZ* 01/22, S. 12.
- [3] BMBF, Mai 2022: Evaluation des novelierten Wissenschaftszeitvertragsgesetzes, www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2022/abschlussbericht-evaluation-wisszeitvg.pdf
- [4] Koalitionsvertrag 2021-2025, www.bundesregierung.de/breg-de/service/gesetzesvorhaben/koalitionsvertrag-2021-1990800
- [5] Konferenz BMBF Juni 2022: Gute Arbeitsbedingungen, www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/veranstaltungen/2022/220627-konferenz-wisszeitvg.html
- [6] HRK-Pressmitteilung, 6. Juli 2022: HRK-Diskussionsvorschlag zur Weiterentwicklung des WissZeitVG, www.hrk.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/meldung/universitaeten-in-der-hrk-legen-diskussionsvorschlag-zur-weiterentwicklung-des-wissenschaftszeitvertr
- [7] Gesetz zur Stärkung der Berliner Wissenschaft, 2021, www.parlament-berlin.de/adoss/18/WissForsch/vorgang/wf18-0149-v.pdf
- [8] HRK-Pressmitteilung, 16. November 2022: HRK zur Weiterentwicklung des Wissenschaftszeitvertragsgesetzes, www.hrk.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/meldung/hrk-zur-weiterentwicklung-des-wissenschaftszeitvertragsgesetzes-4956
- [9] JA-Stellungnahme, 24.06.2022 „Perspektiven auf das Wissenschaftszeitvertragsgesetz“, www.diejungeakademie.de/de/publikationen/perspektiven-auf-das-wissenschaftszeitvertragsgesetz

- [10] DGB Plädoyer für eine Reform des Befristungsrechts vom 11.11.2022: „Arbeit in der Wissenschaft muss fair sein“, www.dgb.de/uber-uns/dgb-heute/bildung-und-bildungsarbeit/++co++45b8a09c-f5f9-11ec-920a-001a4a160123
- [11] GEW 2022: Dresdner Gesetzentwurf für ein Wissenschaftsentfristungsgesetz, <https://www.gew.de/aktuelles/detailseite/her-mit-dem-wissenschaftsentfristungsgesetz>
- [12] Peter-André Alt: Akademische Karrieren brauchen Klarheit! DIE ZEIT 42, 13. Oktober 2022, www.zeit.de/2022/42/habilitation-hochschule-professur-postdoc-entfristung
- [13] Große Anfrage der Fraktion der CDU/CSU Pläne der Bundesregierung zur Reform des Wissenschaftszeitvertragsgesetzes, 30.09.2022, Drucksache 20/3783, <https://dserver.bundestag.de/btd/20/037/2003783.pdf>
- [14] IchBinHanna-Video des BMBF, www.youtube.com/watch?v=Plq5Gly4h4E
- [15] Tagesspiegel 23.9.2022 – Amory Burchard: Dauerstellen an der Uni: GEW-Gesetzentwurf nach Berliner Vorbild, www.tagesspiegel.de/wissen/dauerstellen-an-der-uni-gew-gesetzentwurf-nach-berliner-vorbild-8676940.html
- [16] Leitlinien zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis DFG, September 2019, www.dfg.de/download/pdf/foerderung/rechtliche_rahmenbedingungen/gute_wissenschaftliche_praxis/kodex_gwp.pdf
- [17] Umfrage des Vereins Respect-Science vom Frühjahr 2022, <https://respect-science.org/umfrage/>
- [18] The replication crisis has spread through science – can it be fixed? Wilson C, NewScientist, 6. Juni 2022, www.newscientist.com/article/mg25433810-400-the-replication-crisis-has-spread-through-science-can-it-be-fixed/
- [19] Stellungnahme zum Wissenschaftszeitvertragsgesetz – gemäß Beschluss des Senats der Universität Kiel vom 16.11.2022, www.uni-kiel.de/fileadmin/user_upload/pressemitteilungen/2022/20221129-Stellungnahme-Senat-WissZeitVG.pdf

DOI:10.11576/biuz6206

WISSENSCHAFTSKOMMUNIKATION

Nachgefragt! – Kleine Nachlese zum Wissenschaftsjahr 2022

Das Wissenschaftsjahr 2022 stand unter dem Motto „Nachgefragt!“. Das Ergebnispapier der zentralen Mitmachaktion wurde Ende November an das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und die Allianz der Wissenschaftsorganisationen übergeben. Das Papier versteht sich als Impulsgeber für zukünftige Forschung und Forschungspolitik. Doch was genau heißt das? Und wie ist das Ergebnispapier entstanden? Wolfgang Nellen, Alt-Präsident des VBIO, war als wissenschaftlicher Juror in den Entstehungsprozess eingebunden. Kerstin Elbing hat das Motto des Wissenschaftsjahres aufgegriffen und bei ihm nachgefragt.

Elbing: Im Wissenschaftsjahr 2022 war die Bevölkerung im Rahmen des „IdeenLaufs“ eingeladen, Fragen zu wissenschaftlichen Themen direkt an die Forschung zu stellen. Wie kann ich mir das genau vorstellen?

Nellen: Es gab eine Kampagne „Deine Frage an die Wissenschaft“, die dazu aufgerufen hat, Fragen zu allen Bereichen der Wissenschaft einzureichen. Die Fragen wurden online gestellt oder auch vor Ort (zum Beispiel in Museen) auf Karten eingesammelt. Die Fragen waren (mit besonderen „Hotspots“) sehr ungleichmäßig über Deutschland verteilt. So fiel zum Beispiel auf, dass das Museum für Naturkunde in Ber-

lin sehr aktiv war – folglich gab es viele Fragen zu Dinosauriern.

Elbing: Wie viele Fragen kamen denn zusammen? Was hat die Bevölkerung am meisten interessiert?

Nellen: Es gab etwa 14.000 sehr heterogene Fragen. Da gab es Wissens- und Verständnisfragen wie etwa „Woher kommt die Gravitation?“, die die Wissenschaft ganz gut beantworten kann. Andere Fragen scheinen eher eine Reaktion auf falsche oder selektive Informationen zu sein, wenn beispielsweise jemand fragt „Warum werden wir alle mit Pestizid-verseuchten Lebensmitteln vergiftet?“. Dann waren da noch Fragen, die offensichtlich



ABB. 1 Das Wissenschaftsjahr 2022 stand unter dem Motto „Nachgefragt!“

nicht ganz ernst gemeint waren wie „Warum dreht sich die Erde, warum hüpft sie nicht?“.

Elbing: Das sind ja nicht unbedingt Fragen, die die Wissenschaft erforscht. Wie sieht es mit den „echten Wissenschaftsfragen“ aus?

Nellen: Klar, die gab es natürlich auch! Interessant war, dass viele dieser Fragen tatsächlich in Forschungsprojekten bearbeitet werden. In vielen Fällen, in denen die Antworten bereits vorliegen, war das den Fragenden aber wohl nicht bekannt. Da sehe ich eigentlich weniger Forschungs- als vielmehr Kommunikationsbedarf.

Elbing: Also mehr und vielleicht auch andere Wissenschaftskommunikation?

Nellen: Ja sicher. Was ich in diesem Zusammenhang ausgesprochen inte-

ressant fand: Ein großer Teil der Fragen bezog sich auf Schlüsselbegriffe, die aktuell die Medien dominieren – beispielsweise Klima, Energie, Nachhaltigkeit oder Ernährung. Das zeigt, wie stark die Medien das Interesse an Wissenschaft beeinflussen und auch lenken können.

Elbing: Du bast ja in der Jury mitgewirkt, die aus den 14.000 bunten Fragen Impulse für „zukünftige Forschung und Forschungspolitik“ extrahiert hat. Wie seid ihr da vorgegangen?

Nellen: Von den 14.000 Fragen wurden zunächst ca. 4.500 ausgewählt und fünf Themenfeldern zugeteilt. „Mein“ Themenfeld „Umwelt, Klima, Erde, Universum“ hatte etwa 700 Fragen, die es zu sortieren und etwa zehn Clustern zuzuordnen galt. So ganz einfach war das nicht, zumal einige Fragen durchaus interpretationsbedürftig waren. Zu jedem Fragencluster wurde ein einseitiges Papier erstellt. Dieses fiel angesichts der Heterogenität der Fragen allerdings ziemlich allgemein aus. Im nächsten Schritt wurden die Clusterpapiere aller Themenfelder auf Überschneidungen und Berührungspunkte untersucht. „Passende“ Cluster wurden dann erneut zu neun „Zukunftsräumen“ zusammengefasst – praktisch eine weitere Metaebene. Die Clusterpapiere wurden für eine online-Konsultation ins Internet gestellt. Das Interesse der Öffentlichkeit, die Papiere zu kommentieren, war aber wohl eher begrenzt.

Elbing: Was steht denn nun im Ergebnispapier?

Nellen: Das Ergebnispapier enthält im Wesentlichen die Clusterpapiere und die Papiere zu den Zukunftsräumen. Viele der Erkenntnisse etwa zu „Widerstandskraft zur Bewältigung zukünftiger Krisen“ oder zu „Wandel zur Nachhaltigkeit“ haben mich nicht überrascht. Bemerkenswert sind da eher Cluster, die die Bedeutung von naturwissenschaftlicher

Grundbildung beziehungsweise „Scientific Literacy“ betonen oder die Grundlagenforschung als essenziell darstellen.

Elbing: Das Ergebnispapier wurde an das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und die Allianz der Wissenschaftsorganisationen übergeben. Weiß man schon, welche Schlussfolgerungen diese aus dem Papier ziehen werden?

Nellen: Bundesforschungsministerin Stark-Watzinger hat als erste konkrete Maßnahme zwei Förderrichtlinien mit insgesamt rund 25 Millionen Euro angekündigt. Damit sollen Vorhaben gefördert werden, die die Fragen der Bürgerinnen und Bürger in innovativen partizipativen Forschungsprojekten aufgreifen. Darüber hinaus sollen die Ergebnisse des IdeenLaufs in eine neue Förderrichtlinie zu Sozialen Innovationen einfließen. Ganz generell sollen die Fragen und Anregungen auch über das Wissenschaftsjahr 2022 hinaus als Inspirationsquelle zur Verfügung stehen.

Elbing: Die Bewertungen des IdeenLaufs sind recht positiv. Hinter 14.000 Fragen für die Wissenschaft stünden „Neugier, Kreativität und das ausgeprägte Interesse vieler Menschen an Wissenschaft und Forschung“ konstatiert beispielsweise Bundesforschungsministerin Stark-Watzinger. Wie sieht deine Zwischenbilanz als Juror aus?

Nellen: Ich finde die Zahl der Fragen eher gering. Es ist nicht gelungen, die Bürger/-innen in nennenswertem Maße zu bewegen, am Ideenlauf teilzunehmen. Es haben sich maximal 0,02 Prozent der Bevölkerung überhaupt beteiligt. Zieht man Scherzfragen und völlig unsinnige Fragen ab, kommt man vielleicht auf 0,01 Prozent oder weniger. Repräsentativ sind die Fragen gewiss nicht. Allerdings wird dieser Anspruch auch gar nicht erhoben.

Ein echtes Manko ist, dass es keine demographischen Angaben z. B. für Alter oder Beruf gab. Das kann aber bei der Bewertung der Fragen durchaus eine Rolle spielen. Auch über die Randbedingungen, unter denen die Fragen eingesammelt wurden, wissen wir nichts. Es ist sicher ein Unterschied, ob die Fragen nach intensiver Beschäftigung im Unterricht oder spontan am Rande eines Vortrages oder Museumsbesuchs gestellt wurden.

Elbing: Bundesforschungsministerin Stark-Watzinger zeigt sich „beeindruckt von den vielfältigen Anregungen, die aus dem intensiven Austausch mit den Bürgerinnen und Bürgern entstanden sind“.

Nellen: Aus meiner Sicht verbergen sich unter der eindrucksvollen Überschrift der „transdisziplinären Zukunftsräume“ mehr oder weniger bekannte, einfache Aussagen. Und dass die Wissenschaftskommunikation verbessert werden muss, wusste die wissenschaftliche Community schon vorher.

Elbing: DFG-Präsidentin Prof. Dr. Katja Becker hat darauf hingewiesen, dass Forschung das tägliche Leben von Bürger/-innen beeinflusst und der Ideenlauf im Rahmen des Wissenschaftsjahres 2022 umgekehrt eine Möglichkeit war, gesellschaftliche Anliegen an die Forschung heranzutragen. Wie ist dein Eindruck: Hat der Ideenlauf diese Kommunikation in beide Richtungen befördert?

Nellen: Grundsätzlich wohl eher nicht. Die Fragensammlungen entstanden aus punktuellen Ereignissen, vermutlich ohne nachhaltige Wirkung. Wie schon bei den online-Konsultationen werden die Fragen kaum auf das Ergebnispapier schauen. Wahrscheinlich ist die eigene Frage schon längst wieder vergessen. Dass Bürger/-innen über den Ideenlauf gesellschaftliche Bedürfnisse an die Forschung heran-



ABB. 2 Spannende Diskussionen mit Jury, Wissenschafts- und Bürgerpanel.
Foto: W. Nellen.

tragen haben, sehe ich eher nicht so. Dies umso mehr als die Fragen eben nicht repräsentativ für „die Bevölkerung“ sind. Es gab aus meiner Sicht kein großes Aha-Erlebnis „Hier sind neue, innovative Wissenschaftsfelder und Ideen, die wir völlig vergessen haben!“

Es mag meine selektive Wahrnehmung sein, aber ich habe in den konkreten Diskussionen mit Mitgliedern des Bürger-Panels wenig Forderungen nach „innovativen, partizipativen Forschungsprojekten“ gehört. Im Gegenteil habe ich manchmal eher die Ansicht gehört „Ihr habt das studiert! Sollen wir euch sagen, was ihr forschen sollt?“

Elbing: Das klingt jetzt ziemlich ernüchternd ...

Nellen: Die Akteure aus der Wissenschaft, aber auch aus der Öffentlichkeit haben noch einmal gesehen, wie schwierig Wissenschaftskommunikation ist. Viele bemühen sich und werden ihre Anstrengungen weiter verstärken. Auch etliche Bürger/-innen haben erkannt: Wissenschaftler sind ansprechbar – da werde ich zukünftig wohl häufiger nachfragen, um mich zu informieren und mitzudiskutieren. Auch das BMBF drängt, dass die Wissenschaft mehr Einsatz zeigen muss.

Man sollte jedoch sehen, dass auch das BMBF mit viel Aufwand und professioneller Unterstützung durch mehrere Agenturen und viele ehrenamtliche Akteure gerade einmal 14.000 Fragen eingesammelt hat.

Vielleicht eher unbeabsichtigt wurde jedoch ein Kommunikationsformat realisiert, das tatsächlich funktionieren könnte: Neben mehreren online-Meetings fand im Rahmen des IdeenLaufs auch eine dreitägige Konferenz aller beteiligten Gremien statt – also des Bürger-Panels, des Wissenschafts-Panels und der Jury. Diese Konferenz hat super funktioniert und spannende „after-work-Gespräche“ stimuliert. Das hat mich begeistert und das sollte in viel größerem Rahmen durchgeführt werden.

Elbing: Der IdeenLauf im Rahmen des Wissenschaftsjahres 2022 hat nach Einschätzung der Veranstalter den Wunsch nach mehr Partizipation in Forschungsprozessen erkennbar gemacht. Ist das auch dein Eindruck?

Nellen: Nach meinen Erfahrungen wollen Bürger/-innen vor allem verständlich informiert werden. Sie möchten einigermaßen verstehen, womit sich Wissenschaftler beschäftigen. Einen expliziten Anspruch auf Mitsprache und Mitbestimmung im

Bereich der (naturwissenschaftlichen) Forschung, sehe ich weniger.

Elbing: Sollten Forschungsvorhaben oder gar Förderprogramme von Mehrheitsentscheidungen der Öffentlichkeit bestimmt werden?

Nellen: Der Eindruck wird zumindest von einigen Akteuren erweckt: Mein Eindruck ist, dass es dabei wohl vor allem um eine Mitwirkung bei der Entwicklung und bei der Anwendung von Forschungsergebnissen gehen könnte – wie auch immer man sich das in der Praxis vorstellen kann. Eins muss aber klar sein: „Mitsprache“ bei Grundlagenforschung ist *per se* nicht möglich. Denn: Grundlagenforschung ist frei und erkenntnisgetrieben. Dementsprechend sind ihre Ergebnisse unvorhersehbar, nicht planbar und auch nicht „verhandelbar“.

Es stellt sich auch die Frage nach den Kriterien, nach denen Forschungsschwerpunkte ausgesucht werden sollen. Großes Interesse an Sauriern ist prima und auch ein spannendes Forschungsfeld – aber ist ein zusätzliches Förderprogramm in diesem Bereich ein sinnvoller Weg, wenn man die Herausforderungen der Zukunft bewältigen will? Die Meinungen, was „sinnvolle“ Forschung ist, sind vielfältig – bei Bürgern ebenso wie bei Wissenschaftlern – und das ist gut. Der Versuch der Steuerung von Wissenschaft durch Förderschwerpunkte ist politisch unvermeidbar. Die Politik muss sich aber bewusst sein, dass sie damit eventuell auch große Innovationen abwürgt!

WEITERE INFORMATIONEN:

Ergebnispapier des IdeenLaufs (PDF): wissenschaft-im-dialog.de/fileadmin/user_upload/Projekte/Ideenlauf/Dokumente/Ergebnispapier_IdeenLauf.pdf

Digitale Darstellung des Ergebnispapiers: wissenschaftsjahr.de/2022/ideenlauf

Stellungnahme der Allianz der Wissenschaftsorganisationen zur Partizipation in der Forschung: allianz-der-wissenschaftsorganisationen.de/themen-stellungnahmen/partizipation-in-der-forschung

Elbing: Und welche Erkenntnisse nimmst du nun ganz persönlich aus dem Wissenschaftsjahr mit?

Nellen: Partizipation ist gut, damit sich die Öffentlichkeit einbezogen fühlt. Den Bürger/-innen ist dabei meistens bewusst, dass ihr Beitrag begrenzt ist. Da sollten sich alle Seiten ehrlich machen. Die Beteiligung weckt aber das Interesse und erleichtert die Kommunikation.

Ich nehme die klare Forderung der Öffentlichkeit mit, dass Wissenschaft verständlich erklären muss, was sie tut – und warum. „Verständ-

lich“ heißt dabei, dass sich Wissenschaft auf der jeweiligen „Augenhöhe“ der konkreten Zielgruppe bewegen muss.

Elbing: Höre ich da ein „aber“?

Nellen: Der Begriff „Augenhöhe“ ist entscheidend – Was genau ist das?

Es muss deutlicher definiert werden, was das Ziel ist: Geht es um Mitsprache, gar „Mitentscheidung“? Anhörung? Beteiligung? Oder um den Wunsch nach verständlicher Erläuterung der Zusammenhänge – was letztlich eine Voraussetzung

für eine fundierte eigene Meinung ist. Das sind ja sehr unterschiedliche Dinge. Und – wie ja auch die DFG-Präsidentin Katja Becker bereits betont hat – die Wissenschaftsfreiheit darf dadurch in keiner Weise eingeschränkt werden!

Elbing: Dieser Aussage kann sich auch der VBIO uneingeschränkt anschließen. In diesem Sinne vielen Dank für die Nachlese zum Wissenschaftsjahr 2022!

DOI:10.11576/biuz6255

AUS DEM VBIO

GENOME EDITING im Gespräch: Wissenschaft trifft Politik – Einladung zum Dialog

Unter diesem Titel haben der VBIO und seine Mitgliedsgesellschaft WGG (Wissenschaftskreis Genomik und Gentechnik) Ende November in das Haus der Bundespressekonferenz geladen.



ABB. 1 Holger Puchta, Stephan Clemens, Jana Streubel, Tobias Brüggemann und Moderatorin Gabi Krczal (v. l. n. r.) im Dialog mit Politikern. Foto: VBIO.

Vertreterinnen und Vertreter aus Politik und Forschungsorganisationen folgten der Einladung, mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus der Pflanzenforschung ins Gespräch zu kommen. Für das Podium konnten mit Prof. Dr. Holger Puchta (KIT, Karlsruhe), Prof. Dr. Stephan Clemens (Universität Bayreuth), Dr. Jana Streubel (Universität Hannover) und Tobias

Brüggemann (VTI Großhansdorf) Kolleg/-innen gewonnen werden, deren Forschungsfelder und Erfahrungen sich perfekt ergänzen.

Unter der Moderation von Prof. Dr. Gabi Krczal von der RLP Agrosociencia in Neustadt/W. ging es dabei neben den fachlichen Grundlagen und den gerade unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten interessanten Potenzialen genomeditierter Pflanzen unter anderem auch um das nicht auszuschließende Szenarium eines kompletten Verzichts auf die Anwendung von Neuen Genomischen Techniken und die daraus resultierenden Auswirkungen auf die europäische Pflanzenforschung.

Deshalb wurde auch die Frage der zukünftigen Regulierung neuer genomischer Techniken angesprochen. Adressiert wurde auch die Frage, ob Deutschland komplett auf eine Technologie verzichten kann, die anderenorts zunehmend ange-

wendet wird? Was bedeutet dies unter strategischen Aspekten? Was heißt dies aber vor allem auch für die Pflanzenwissenschaft in Deutschland, die derzeit (noch) gut aufgestellt ist? Und – noch konkreter – welche Folgen hat dies für junge Pflanzenforscher/-innen, die sich zunehmend ins Ausland orientieren?

Deutlich wurde, dass die derzeit in Vorbereitung befindliche Änderung der relevanten EU-Verordnung nicht nur die angewandte Forschung und Entwicklung beeinflussen wird, sondern auch die Grundlagenforschung. Denn auch hier müssen mit neuen genomischen Methoden erstellte Pflanzen irgendwann im Freiland untersucht werden – was in der Praxis vor allem für Hochschulforscher/-innen nicht realisier- bzw. finanzierbar ist.

Die Veranstaltung hat erneut das Spektrum der aus der aktuellen Regulierung erwachsenden Herausforderungen für die Pflanzenforschung in Deutschland und Europa aufgezeigt. Es bleibt zu hoffen, dass die von der EU-Kommission angekündigten Änderungen es der Pflanzenforschung zukünftig erleichtern, das große Potenzial der Neuen Genomischen Techniken unter Beweis zu stellen.

Kerstin Elbing, VBIO

DOI:10.11576/biuz6256

AUS DEM VBIO

Mathematisch-naturwissenschaftliche Gesellschaften informieren Bundestagsabgeordnete zu Klima und Energie

Am 19. Oktober 2022 luden die im Bündnis „Wissenschaft verbindet“ zusammengeschlossenen Gesellschaften aus Physik (DPG), Geowissenschaften (DVGeo), Mathematik (DMV), Chemie (GDCh) und Biologie (VBIO) zu einem gemeinsamen Parlamentarischen Abend ein. Mehr als 30 Abgeordnete und Referent/-innen informierten sich über die in Mathematik und Naturwissenschaften vorhandene Expertise und über aktuelle Lösungsansätze zu den Herausforderungen der Zukunft.

Im Mittelpunkt standen individuelle Gespräche an Thementischen aus den Bereichen „Materialien und Rohstoffe“, „Energiespeicherung und -verteilung“, „Energieerzeugung“, „Klimamodellierung“, „Treibhausgasreduktion“ sowie „Resilienz und Nachhaltigkeit“. Viele Abgeordnete nutzten die Gelegenheit, sich aus erster Quelle zu informieren und gezielt nachzufragen. Der Gesprächseinstieg fiel dabei nicht schwer, denn die Expert/-innen stellten ihre Arbeitsbereiche anhand kreativer Exponate vor: So etwa mit einer Kuh, einem CRISPR/Cas-Sofakissen, kleinen Häuschen oder roten und blauen Wärmflaschen.

Da an den Tischen Expert/-innen aus unterschiedlichen Disziplinen vertreten waren, ergaben sich rasch spannende interdisziplinäre Dialoge, die für den einen oder anderen „Aha-Effekt“ sorgten. Dabei kamen in den Gesprächen mit den Abgeordneten auch Handlungsnotwendigkeiten für die Politik zur Sprache: Etwa, wenn es darum geht, die Gesetzgebung im Bereich der Gentechnik an den Stand der Wissenschaft anzupassen. In Hinblick auf andere Technologien – wie beispielsweise die Geothermie – müsste hingegen ein umfassender gesetzgeberischer Rahmen erst noch geschaffen werden.



ABB. 1 Vertraten die Biowissenschaften beim Parlamentarischen Abend der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fachgesellschaften: PD Gunnar Loh, Prof. Jörg Simon, Prof. Tobias Erb, Prof. Gabi Krzczal (v. l. n. r.). Foto: VBIO.



ABB. 2 Die Kuh als Hingucker beim Parlamentarischen Abend: So kamen Parlamentarier/-innen und Wissenschaftler/-innen schnell ins Gespräch über Möglichkeiten der Reduktion des Treibhausgases Methan. Foto: A. Böttcher.

Insgesamt wurde deutlich, dass die Expert/-innen aus Mathematik und Naturwissenschaften für ihr jeweiliges Forschungsgebiet „brennen“. Mit ihrer Arbeit zeigten sie Lösungsoptionen für die Herausforderungen von Klimawandel, Anpassung und Energiesicherung auf. Interdisziplinäre Denk- und Forschungsansätze werden dabei eine wesentliche Rolle spielen müssen. Dies wurde auch von den Abgeordneten erkannt, die das gemeinsame Auftreten der mathematisch-naturwissenschaftlichen Disziplinen bei einem Parlamentarischen Abend positiv hervorhoben.

Die Biowissenschaften wurden beim Parlamentarischen Abend vertreten durch Prof. Gabi Krzczal (Pflanzenzüchtung in Zeiten des Klimawandels), Prof. Tobias Erb (Synthetische Biologie und Kohlenstofffixierung), Prof. Jörg Simon (Landwirtschaft und Reduktion von Lachgas), PD. Gunnar Loh (Methanreduktion in der Rinderhaltung).

Kerstin Elbing, VBIO

DOI:10.11576/biuz6257

MIKROBIOLOGIE

Humanpathogene in ungewöhnlichen Lebensräumen

Durch Lebensmittel übertragbare Pathogene wie Verotoxin-produzierende Escherichia coli oder Salmonella enterica führen oft zu Krankheitsausbrüchen. Meist werden sie durch Milch, Eier, Fleisch und andere tierische Produkte auf Menschen übertragen. Allerdings wurden in den letzten Jahren auch immer mehr Fälle gemeldet, bei denen die Bakterien vermutlich über den Verzehr von pflanzlichen Erzeugnissen aufgenommen wurden. Die Eintrittswege in die Produktionskette sind dabei nicht vollständig aufgeklärt. Bei einer Besiedlung von Pflanzen in einer landwirtschaftlichen Umgebung stellt sich die Frage, wie die – eigentlich auf tierische Zellen spezialisierten – Bakterien in oder auf den Pflanzen überleben können. Für die Entwicklung präventiver Maßnahmen gegen die Kolonisierung von Nutzpflanzen ist die Erforschung der Mechanismen unabdingbar.

Im Jahr 2018 gehörten Infektionskrankheiten ausgelöst durch *Salmonella* und Verotoxin-produzierende *E. coli* zu den häufigsten im Menschen gefundenen Zoonosen [1]. Sie werden meist durch tierische

Lebensmittel übertragen und können Krankheiten wie das hämolytisch-urämische Syndrom (HUS) oder Salmonellose auslösen. Bemerkenswert ist, dass es zu einigen Ausbrüchen kam, die auf pflanzliche Produkte wie Obst, Blattgemüse oder Sprossen zurück zu führen waren [1]. Das Überleben von Humanpathogenen in der Pflanzenumgebung wird seit einigen Jahren erforscht [2]. Ein möglicher Eintrittsweg ist die Kontamination im Feld während des Anbaus von Nutzpflanzen (Abbildung 1). Die zugrundeliegenden Mechanismen sind jedoch noch in weiten Teilen ungeklärt [3, 4].

Überleben wird durch viele Faktoren beeinflusst

Humanpathogene wie *S. enterica* oder *E. coli* können über verschiedene Wege auf Pflanzen gelangen. Generell kann schlechte Hygiene während des Anbaus und bei der Bewässerung zur Besiedlung von Pflanzen mit Humanpathogenen führen [3]. Auch über Gülle, die zur organischen Düngung genutzt wird, können Bakterien übertragen werden [3]. Direkt auf die Pflanzen kommen die Bakterien durch Kontamination der Bewässerung. Gelangen sie in den Boden, können sie Wurzeln infizieren, aber auch Blät-

ter, wenn bei Regen nasser Boden hochspritzt. Eine wichtige Voraussetzung, um Krankheiten auslösen zu können, ist die Überlebensfähigkeit der Bakterien im Boden. Verschiedenen Studien zufolge können *S. enterica* und *E. coli* mehrere Wochen im Boden überleben [3, 4]. Die Dauer hängt dabei von diversen Faktoren ab. Zum einen sind die Beschaffenheit des Bodens und der Wassergehalt wichtig. Für *S. enterica* und *E. coli* O157:H7 konnte ein besseres Überleben in aluvialem Lehm Boden (AL) als zum Beispiel in diluvialem Sandboden (DS) gezeigt werden [5]. Ein möglicher Grund hierfür ist der höhere Nährstoffgehalt von lehmigem Boden, da auch die Applikation von nährstoffreicher Gülle die Überlebensrate von *E. coli* verlängerte [4]. Untersuchungen an *S. enterica* zeigten, dass sich eine geringere Diversität der Bodenmikroorganismen positiv auf die Überlebensrate des Humanpathogens auswirkt. In autoklavierten Boden waren eingeführte Bakterien deutlich länger nachweisbar als in unbehandeltem Boden [5]. Der Einfluss der Bodenbeschaffenheit und anderer Organismen ist bisher aber nur teilweise erforscht.

Ebenfalls von Bedeutung ist die Temperatur: Die optimale Temperatur für Humanpathogene liegt meist im Körpertemperaturbereich. Im Boden und in/auf Pflanzen ist es jedoch deutlich kälter. Eine Studie an *E. coli* zeigte aber, dass das Bakterium bei einer Temperatur von 5 °C länger im Boden überlebt als bei 21 °C. Zurückzuführen ist dies vermutlich auf den verlangsamt Stoffwechsel der Zellen, durch den die im Boden knappen Nährstoffe langsamer verbraucht werden [4].

Nährstoffmangel und die insgesamt für Humanpathogene suboptimalen Umstände im Boden machen Anpassung besonders wichtig. Diese ist über veränderte Genexpression möglich, die wichtige Prozesse reguliert. In *S. enterica* sind unter anderem Metabolismus und Peptidsynthese angekurbelt [6], während in



ABB. 1 Mögliche Eintrittswege von Humanpathogenen auf und in Pflanzen.

E. coli das für einen Sigma-Faktor kodierende Gen *RpoS* essentiell zu sein scheint, um Stressreaktionen zu regulieren [4]. Beides könnte helfen bei Nährstoffmangel zu überleben. Unklar ist, ob die Anpassungen zeitweise oder dauerhaft sind. Vorherige Anpassungen an untypische Umgebungen scheinen aber vorteilhaft zu sein. In einer Studie konnten Fornefeld und Kollegen zeigen, dass eine Anzucht in Salat-basiertem Medium die Überlebensrate von *S. enterica* in Boden erhöhen kann [7].

Verschiedene Arten agieren unterschiedlich

Je nach Pflanzen- und Bakterienart unterscheiden sich die Besiedlungserfolge. So bevorzugen verschiedene *S. enterica*-Stämme unterschiedliche Pflanzenarten (Abbildung 2). Auch dies wird allerdings durch diverse Faktoren wie die Temperatur, Regenmenge und UV-Strahlung beeinflusst [8]. Die Pathogene müssen sich an die Pflanzenoberfläche anheften, wofür einige besser ausgerüstet sind als andere. Häufig sind sie an Pflanzenhaaren (Trichomen) zu finden oder an Öffnungen wie Stomata und Wunden, durch die sie leicht in die Pflanzen eindringen können [9]. Biofilmbildung ist förderlich für das Überleben auf und in Pflanzen oder im Boden. Einige Bakterien sind in der Lage, sich mit bestimmten biofilmbildenden Pflanzenpathogenen zusammenzuschließen [10]. Flagellen spielen vermutlich auch eine essentielle Rolle bei der Besiedlung von Pflanzen [10]. Untersuchungen dazu ergaben aber widersprüchliche Ergebnisse. Obwohl in einigen Studien die Deletion von Flagellen-Untereinheiten die Anheftung an Blätter einiger Arten verringerte, waren sowohl *E. coli* als auch Salmonellen fähig, Pflanzen ohne funktionsfähige Flagellen zu besiedeln [11]. Tatsächlich fehlt einigen *Salmonella*-Arten die Fähigkeit Flagellen auszubilden, was ein Vorteil sein könnte, weil diese in Pflanzen das Immunsystem aktivie-

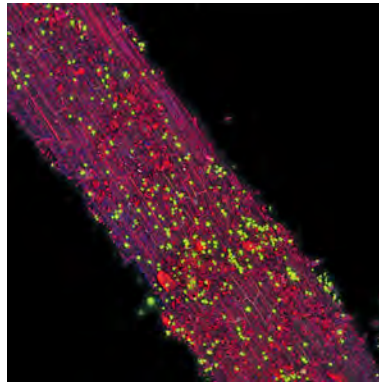


ABB. 2 Aufnahme einer mit *S. enterica* kolonisierten Tomatenwurzel mittels konfokaler Laserscanning-Mikroskopie. Zu erkennen sind mit DAPI angefarbte Zellkerne (blau), mit Propidiumjodid gefärbte Zellwände (rot) und mit GFP markierte Salmonellen (grün). Bild: J. Schierstaedt und S. Jeschalke.

ren können [10]. Ebenfalls wichtig bei der Infektion von Zellen ist das Typ-III-Sekretionssystem (T3SS). Es bildet ein nadelförmiges Injektionssystem, durch das Effektorproteine in Zellen injiziert werden können. Der Aufbau des T3SS bei Tier- und Pflanzenpathogenen unterscheidet sich kaum. Einige Humanpathogene können möglicherweise auch Pflanzenzellen mit ihrem T3SS infizieren oder andere Systeme ausbilden. Bei Salmonellen widersprechen sich die Ergebnisse jedoch. Eventuell können sie einige Pflanzen auch ohne T3SS infizieren, wobei dessen Rolle generell von der Pflanzenart abzuhängen scheint [3].

Pflanzen könnten Humanpathogene abwehren

Es passen sich aber nicht nur Humanpathogene an Pflanzen an. Auch Pflanzen können auf die fremden Bakterien reagieren, indem sie Pflanzen- und Humanpathogene anhand von *Pathogen-Associated Molecular Pattern* (PAMPs) wahrnehmen [12]. Daraufhin werden verschiedene Mechanismen des pflanzlichen Immunsystems aktiviert und Stoffe wie reaktive Sauerstoffspezies (ROS) oder verschiedene sekundäre Pflanzenstoffe freigesetzt. Vermutlich

können die humanpathogenen Eindringlinge auf diese Weise effektiv bekämpft werden, obwohl im Gegensatz zu den Phytopathogenen noch nicht geklärt ist, wie genau dieser Angriff abläuft und in wie weit sich die Mechanismen zur Bekämpfung von Human- und Phytopathogenen ähneln. Eventuell wird die Zellwand der Bakterien beschädigt oder die Biofilmbildung behindert [9].

Ein vielversprechender Ansatz zur Bekämpfung von Humanpathogenen auf Pflanzen ist der Einsatz von Pflanzenstoffen. Einige könnten zur „Reinigung“ des Bodens genutzt werden oder es könnten Pflanzen erzeugt werden, die Bakterien effektiver bekämpfen [9]. Die Entwicklung solcher Strategien benötigt aber noch einige Zeit, weil zu wenig über die Überlebens- und Infektionsmechanismen und Abwehrstoffe der Pflanzen bekannt ist und sich die vorhandenen Daten auch oft widersprechen. Die Verwendung organischen Düngers könnte zum Beispiel die Biodiversität im Boden erhöhen und damit die Ansiedlung Humanpathogener erschweren, gleichzeitig würden aber zusätzliche Nährstoffe eingetragen, die das Wachstum der Pathogene fördern könnten. Hier ist weiterer Forschungsbedarf gegeben, insbesondere um genetische Anpassungen der Pathogene und die Interaktion mit anderen Mikroorganismen und Pflanzen zu entschlüsseln. Bis die Aufklärung der Mechanismen gelungen ist, müssen weiterhin strenge Kontrollen und Hygienebestimmungen vor und nach der Ernte ausreichen, um die Verbreitung von Humanpathogenen in Böden und Pflanzen gering zu halten.

Literatur

- [1] EFSA und ECDC (2019). EFSA Journal 1029, 17(12), 5926.
- [2] A. Schikora et al. (2008) PLoS One 3(5), e2279.
- [3] J. Schierstaedt et al. (2019). FEMS Microbiology Letters, 366, fnaa016.
- [4] K. Detert, H. Schmidt (2021). Pathogens, 20, 1443.
- [5] S. Jeschalke et al. (2019) Front Microbiol. 10.3389/fmicb.2019.00967.

- [6] J. Schierstaedt (2020). *Environmental Microbiology* 22(7), 2639-2652.
- [7] E. Fornfeld et al. (2017). *Front Microbiol.* 8, 757.
- [8] M. Marvasi et al. (2013). *PLoS One* 8, e80871.
- [9] A. S. George, M. T. Brandl (2021). *Microorganisms* 9, 2485.
- [10] S. Yaron, Ute Römling (2014). *Microbial biotechnology* 7(6), 496-516.
- [11] C. N. Berger et al. (2008). *ISME J.* 3, 261–265.
- [12] J. D. G. Jones, J. L. Dangl (2006). *Nature* 444, 323–329, doi:10.1038/nature05286.

Hanna Willenbockel, Masterstudentin an der TU Braunschweig,
h.willenbockel@tu-bs.de

Dr. Jasper Schierstaedt,
Leibniz-Institut für Gemüse- und
Zierpflanzenbau e. V., Großbeeren,
jasper.schierstaedt@julius-kuehn.de.

NEUROBIOLOGIE

Die Entwicklung des menschlichen Neocortex aus Sicht der Paläogenetik

Die Vergrößerung des Neocortex während der Evolution des modernen Menschen erfordert eine enorme Teilungsfähigkeit neuronaler Stamm- und Vorläuferzellen sowie hohe Präzision bei der Verteilung des Erbguts auf die Tochterzellen. Welche Gene dazu beigetragen haben könnten, zeigt ein molekulargenetischer Ansatz.

Die kognitiven Fähigkeiten des modernen Menschen und damit sein Erfolg in der Evolution werden auf die ausgeprägte Vergrößerung des Neocortex der Großhirnrinde zurückgeführt. Im Vergleich zum Schimpansen hat sich dessen Zellzahl auf etwa das Doppelte erhöht. Die genetischen Grundlagen dieser Entwicklung aufzuklären, ist das Ziel einer Kooperation der Arbeitsgruppe um Wieland Huttner vom Max-Planck-Institut für Molekulare Zellbiologie und Genetik mit der des Nobelpreisträgers Svante Pääbo (vgl. BIUZ 4/2022, S. 15). Die Forscher konzentrieren sich auf die Veränderungen, die seit der Trennung des modernen Menschen (*Homo sapiens*) vom Neandertaler und Denisova-Menschen im Genom stattgefunden haben. Diese wirken erstaunlich unspektakulär: Unter reichlich 31.000 Nukleotidpositionen, die sich bei allen bekannten Genomen des modernen Menschen von denen der frühen Menschen unterscheiden, führten lediglich 96 zum Austausch einer Aminosäure im kodierten Protein, ca. 30 betreffen mutmaßliche Spleißstellen und etwas mehr als 3000 liegen in regulatorischen Sequenzen [1].

Interessanterweise sind die Aminosäureaustausche nicht zufällig im Genom verteilt. Eine überdurchschnittliche Häufung findet sich bei Proteinen, die im Verlauf der mitotischen Zellteilung an der Trennung der Chromosomen beteiligt sind: ein Austausch bei dem Kinesin-ähnlichen Motorprotein KIF18a, das für die korrekte Positionierung der Chromosomen am Spindelapparat bedeutsam ist, zwei Austausche bei KNL1, das als Teil des Kinetochors die Chromosomen an die Mikrotubuli des Spindelapparats anheftet, und drei Austausche bei SPAG5, einem mit den Mikrotubuli assoziierten Protein, das den Kontakt zwischen Kinetochor und Spindelapparat stabilisiert.

Zuverlässige Chromosomen-segregation an der Basis des Stammbaums von Nervenzellen

Die drei genannten Proteine werden während der Embryonalentwicklung vor allem im sich entwickelnden Neocortex exprimiert, und zwar genau während der Zeitspanne, in der dort intensive Zellteilungen stattfinden. Innerhalb dieser Zeitspanne fällt auf, dass die apikalen Vorläuferzellen (Abbildung 1) von

Nervenzellen des modernen Menschen während der Mitose eineinhalbmal so lange in der Metaphase verweilen wie die der Menschenaffen Orang-Utan und Schimpanse. Somit steht mehr Zeit für die korrekte Anordnung der Chromosomen in der Metaphaseplatte zur Verfügung, und es ist naheliegend, dass dadurch die Chromosomen zuverlässiger auf die Tochterzellen verteilt werden. Die Präzision der Chromosomenverteilung ist bei diesem Zelltyp besonders relevant, da letztlich alle Neuronen im Neocortex auf apikale Vorläuferzellen zurückgehen und bei frühen Zellteilungen auftretende Chromosomenaberrationen mit jeder weiteren Zellteilung vervielfältigt werden.

Wie lang die Metaphase dauert, bestimmt der so genannte Spindel-Kontrollpunkt: Dieser Mechanismus verzögert den Übergang von der Metaphase in die Anaphase solange, bis alle Chromosomen korrekt in der Metaphaseplatte positioniert sind. Experimentell lässt sich das an organähnlichen Strukturen zeigen, die aus induzierten pluripotenten Stammzellen gewonnen und als Organoide bezeichnet werden. Bei geeigneten Kulturbedingungen können Organoide auch die Entwicklung des Gehirns nachstellen. In derartigen Organoiden aus menschlichen Zellen fanden sich bei den apikalen Vorläuferzellen mehr aktive Komponenten des Spindel-Kontrollpunkts (untersucht wurden die Faktoren BubR1 und Mad1) an den Kinetochoren der Chromosomen im Vergleich zu denen von Schimpansen – passend zur beim modernen Menschen verlängerten Metaphase

[2]. Und bei der Trennung der Schwesterchromatiden während der Anaphase und Telophase blieben bei den menschlichen apikalen Vorläuferzellen nur etwa halb so viele einzelne Chromatiden (1,3%) zurück wie bei denen von Schimpansen (2,6%). Offenbar führt die verlängerte Metaphase beim Menschen tatsächlich zu einer zuverlässigeren Segregation der Chromatiden.

Als nächstes gingen die Forscher der Frage nach, ob die Länge der Metaphase bei apikalen Vorläuferzellen durch die eingangs genannten Proteine KIF18a, KNL1 und SPAG5 beeinflusst wird. Dabei machten sie sich zunutze, dass diese drei Proteine bei Mäusen an den variablen Stellen die gleichen Aminosäuren aufweisen wie bei Schimpansen und archaischen Menschen. Durch Mutagenese im Mausgenom mit Hilfe der CRISPR-Cas-Technologie ersetzten sie einzelne oder alle sechs dieser Aminosäuren durch die des modernen Menschen und untersuchten an embryonalem Gewebe dieser Mäusestämme die Dauer der Metaphase während der Gehirnentwicklung [2]. Sofern KIF18a und KNL1 beide in der Variante des modernen Menschen (im Folgenden kurz als „humanisiert“ bezeichnet) vorlagen, verlängerte sich die Metaphase bei den apikalen Vorläuferzellen um 26 Prozent auf 5,8 Minuten im Vergleich zu Wildtyp-Mäusen (4,6 min). War nur eines dieser beiden Proteine humanisiert, fiel die Verlängerung kürzer aus, die humanisierte Variante von SPAG5 hatte dagegen keinen Effekt. Demnach bewirken KIF18a und KNL1 in den Varianten des modernen Menschen additiv eine Verlängerung der Metaphase bei der Teilung apikaler Vorläuferzellen. Dieser Effekt betraf spezifisch nur die Metaphase, aber weder die Prometaphase noch die Anaphase.

Als Gegenprobe tauschten die Forscher in einer etablierten Linie menschlicher embryonaler Stammzellen (H9 ESC) die variablen Amino-

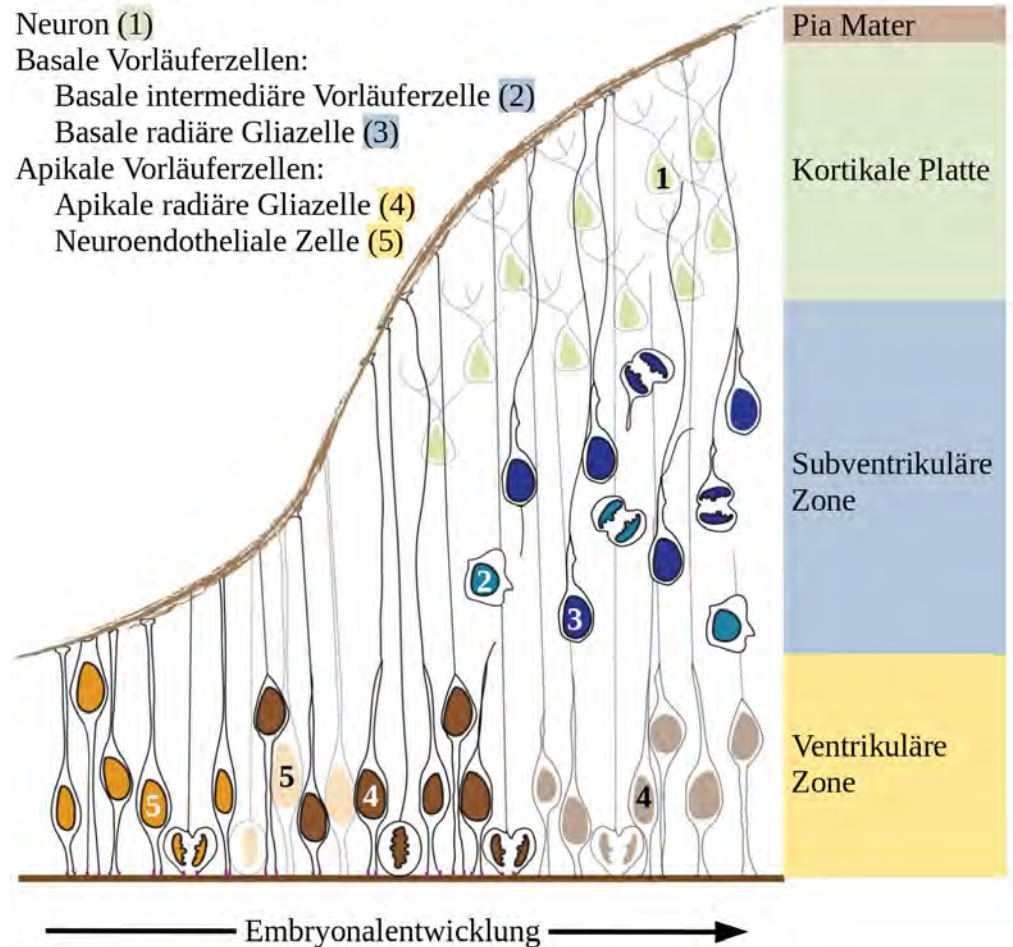


ABB. 1 Entwicklung des Neocortex (von links nach rechts). Neuroendotheliale Zellen bilden zunächst das einschichtige Endothel des Neuralrohrs (links), später entwickeln sie sich zu apikalen radiären Gliazellen. Diese wiederum können sich durch symmetrische Teilung vermehren oder durch asymmetrische Teilung unter Selbsterhalt je eine basale Vorläuferzelle bilden. Die apikalen radiären Gliazellen verbleiben in der ventrikulären, zum Lumen des Neuralrohrs orientierten Zone, während die basalen Vorläuferzellen die periphere, subventrikuläre Zone bilden. Die Subpopulation der basalen radiären Gliazellen vermehrt sich dort durch weitere symmetrische Teilungen. Letztlich bilden die basalen Vorläuferzellen die große Masse der Neuronen, entweder durch asymmetrische Teilung der basalen radiären Gliazellen unter Selbsterhalt oder durch selbst verbrauchende, symmetrische Teilung der basalen intermediären Vorläuferzellen. Die Vergrößerung des Neocortex bei Primaten korreliert mit erhöhter Prävalenz der basalen radiären Gliazellen im Verhältnis zu den intermediären Vorläuferzellen. Abbildung aus [3] CC BY.

säuren von KIF18a und KNL1 gegen die der archaischen Menschen aus [2]. Bei Organoiden aus diesen in den „Ahnenzustand“ zurückversetzten menschlichen Zellen verkürzte sich die Länge der Metaphase der apikalen Vorläuferzellen konsistent um 25 Prozent auf 7,0 min im Vergleich zu 9,2 min bei den unveränderten Zellen. Auch in diesem Experiment waren weder die Prometaphase noch die Anaphase betroffen. Demnach beeinflussen KIF18a und KNL1 auch vor dem Hintergrund

des menschlichen Genoms spezifisch die Länge der Metaphase der apikalen Vorläuferzellen.

Die verlängerte Metaphase bei den bezüglich KIF18a und KNL1 humanisierten Mäusen ging mit deutlich erhöhter Aktivität des Spindel-Kontrollpunkts in den apikalen Vorläuferzellen einher [2]: Die durchschnittliche Zahl der für BubR1- und MAD1-positiven Kinetochore war gegenüber dem Wildtyp um 29 Prozent bzw. 36 Prozent erhöht. Dagegen nahm bei den in

den Ahnenzustand zurückversetzten apikalen Vorläuferzellen des Menschen die durchschnittliche Anzahl der BubR1- und MAD1-positiven Kinetochore um 30 Prozent bzw. 28 Prozent ab – passend zur verkürzten Metaphase. Diese Veränderungen sind vergleichbar mit den zwischen Menschenaffen und modernem Menschen festgestellten Unterschieden. Somit korreliert die Aktivität des Spindel-Kontrollpunkts unabhängig vom genetischen Hintergrund der apikalen Vorläuferzelle mit den jeweils vorliegenden Varianten von KIF18a und KNL1. Passend dazu halbierte sich bei den bezüglich KIF18a und KNL1 humanisierten Mäusen die Anzahl der in der späten Mitose von apikalen Vorläuferzellen zurückbleibenden Chromosomen, während sie sich bei den in den Ahnenzustand zurückversetzten menschlichen Organoiden mehr als verdoppelte. Demnach verbessern KIF18a und KNL1 in der Variante des modernen Menschen die Zuverlässigkeit der Chromosomen-segregation in apikalen Vorläuferzellen. Darüber hinaus zeigte das Gehirn ausgewachsener, bezüglich KIF18a und KNL1 humanisierter Mäuse keine auffälligen morphologischen Veränderungen.

Massive Zellvermehrung dank effizienter Fettsäuresynthese

Transketolase-like1 (TKTL1), ein Enzym des Pentosephosphat-Wegs, zeichnet sich ebenfalls durch einen Aminosäureaustausch aus, nämlich ein Arginin in Position 317 beim modernen Menschen anstelle von Lysin bei archaischen Menschen und Menschenaffen. Auch dieses Protein wird während der Embryonalentwicklung des Menschen vor allem in neuronalen Vorläuferzellen des Neocortex exprimiert. Seine Bedeutung für die Entwicklung des Neocortex wurde in Mausembryonen untersucht, die im Gegensatz zu denen des Menschen keine endogene TKTL1 im Neocortex exprimieren. Wurde die TKTL1 des modernen Menschen im Gehirn embryonaler

Mäuse exprimiert, so stieg der Anteil sich teilender basaler radiärer Gliazellen (Abbildung 1) selektiv auf den vierfachen Wert im Vergleich zu Kontroll-Mäusen [4]. Andere Vorläuferzellen waren von dieser Veränderung nicht betroffen, und die TKTL1-Variante der Affen zeigte keinerlei Wirkung. Entsprechende Veränderungen ergaben sich auch bei Embryonen des Frettchens, bei denen sich die erhöhte Zahl teilungsfähiger basaler radiärer Gliazellen nicht nur in einem Anstieg der Zahl der Neuronen, sondern auch in vergrößerten Hirnwindungen niederschlug [4]. Wurden dagegen menschliche embryonale Stammzellen durch Austausch des Arginins gegen Lysin in den Ahnenzustand versetzt, nahm die Anzahl der sich teilenden basalen radiären Gliazellen ab und letztlich wurden weniger Neuronen gebildet.

Demnach ist die Arginin-Variante der TKTL1 unerlässlich für die hohe Vermehrungsfähigkeit der basalen radiären Gliazellen beim modernen Menschen. Um festzustellen, ob diese Wirkung mit der Enzymaktivität der TKTL1 in Zusammenhang steht, hemmten die Forscher mit spezifischen Inhibitoren den Ablauf des Pentosephosphat-Wegs, in dessen Verlauf die TKTL1 Xylulose-5-phosphat zu Glycerinaldehyd-3-phosphat und Acetat spaltet. Als Inhibitoren verwendeten sie NADP-Analoga wie 6-Aminonicotinamid, die den initialen Schritt des Pentosephosphat-Wegs, die Oxidation von Glucose-6-Phosphat zu 6-Phosphogluconolacton, unterbinden. In Gegenwart der Inhibitoren ging bei bezüglich TKTL1 humanisierten Mausembryonen die verstärkte Teilungsfähigkeit der basalen radiären Gliazellen verloren. Auch in kultiviertem fötalem Cortextgewebe des Menschen verringerte sich unter Einwirkung von NADP-Analoga die Zahl der basalen radiären Gliazellen. Demnach ist die Stoffwechselleistung des Pentosephosphat-Wegs relevant für die hohe Teilungsfähigkeit neuronaler

Vorläuferzellen des modernen Menschen.

Eine plausible Erklärung für diesen Befund ergibt sich aus dem weiteren Schicksal der Produkte Glycerinaldehyd-3-phosphat und Acetat, die durch weitere Umsetzungen im Grundstoffwechsel je ein Äquivalent Acetyl-CoA liefern können – den zentralen Baustein der Fettsäuresynthese. Wenn die ersten Schritte der Fettsäuresynthese – die Umsetzung von Acetyl-CoA zu Malonyl-CoA oder dessen anschließende Kondensation mit Acetyl-CoA – durch spezifische Inhibitoren gehemmt wurden, verringerte sich die Teilungsfähigkeit der basalen radiären Gliazellen in gleicher Weise wie durch die Hemmung des Pentosephosphat-Wegs. Die umfangreichen Befunde, die hier nur in Form eines groben Überblicks vorgestellt werden konnten, stützen die Annahme, dass die beim modernen Menschen vorliegende Variante der TKTL1 aufgrund ihrer Wirkung im Fettsäurestoffwechsel die Vermehrung der basalen radiären Gliazellen und infolgedessen die Entwicklung des Neocortex fördert.

Die vorgestellten Publikationen zeigen, wie die Erkenntnisse der Paläogenetik die Forschung auf dem Gebiet der Zell- und Entwicklungsbiologie beflügeln können. Die Untersuchung von Proteinen mit für den modernen Menschen spezifischen Aminosäureaustauschen liefert erste Einblicke, was den Menschen zum Menschen macht. Zur Faszination über diesen Erkenntnisgewinn gesellt sich der nachdenkliche Wunsch, dass die Menschheit mit diesem Wissen verantwortungsvoll umzugehen in der Lage sein möge.

- [1] S. Pääbo (2014). Cell 157, 216–226.
- [2] F. Mora-Bermúdez et al. (2022). Sci. Adv. 8, eabn7702.
- [3] F. Mora-Bermúdez, W. B. Huttner (2022). Front. Neurosci. 16, 878950.
- [4] A. Pinson et al. (2022). Science 377, eabl6422.

Annette Hille-Rebheld, Stuttgart

NATURSCHUTZ

Hornissenraubfliege und Behaarter Kurzflügler: Gefährdete Großinsekten auf Dungkäfer-Jagd

*Wo große Pflanzenfresser die Landschaft offenhalten und unbehandelte Hinterlassenschaften verteilen dürfen, kann man zwei unserer spektakulärsten Insekten aufspüren: die Hornissenraubfliege (*Asilus crabroniformis*) und den Behaarten Kurzflügler (*Emus hirtus*). Ihre Größe, ihre auffällige Gestalt und ihre räuberische Lebensweise an bzw. in Pferdeäpfeln, Rinderfladen und ähnlichen Dunghaufen machen sie zu Charakterarten naturnaher Weidelandschaften. Doch weil dafür kein Platz mehr in der industriellen Landwirtschaft ist, stehen sie auf den Roten Listen und gelten als Vorzeigarten von Naturschutzprojekten.*

Die Hornissenraubfliege ähnelt sowohl im Hinblick auf ihre Größe (20 bis 25 mm) als auch ihre Färbung tatsächlich einer Hornisse, was als Bates'sche Mimikry gedeutet werden kann [1]. Beine, Thorax und Flügel sind rotbraun gefärbt, der Hinterleib auf den ersten drei Segmenten schwarz, dahinter goldgelb. Aus dem Gesicht ragt nach vorn ein kräftiger schwarzer Stechrüssel auffallend hervor, umrahmt von den langen, struppigen, rötlichen bis gelben Haaren des „Knebelbarts“ auf dem Gesichtshöcker und den weißlichen Haaren des Backenbarts (Abbildung 1). Die Geschlechter sind

auf Anhieb zu unterscheiden: Der Körper der Weibchen (Abbildung 2) endet in einem spitzen Eiablageapparat (Ovipositor), während die Männchen paarige Haltezangen (Ependrien) tragen, mit denen sie bei der Paarung den Ovipositor umgreifen [1].

Ansitzjäger im Offenland

Zu den bevorzugten Lebensräumen der Hornissenraubfliege zählen trockene Heiden, Magerrasen und magere Viehweiden auf sandigen Böden. Hier jagt sie von bodennahen Strukturen wie Totholz oder Dung andere Insekten, und zwar

nicht nur fliegende, sondern auch laufende oder hüpfende Arten wie Heuschrecken [1].

Die Döberitzer Heide, westlich von Berlin gelegen, bietet als ehemaliger Truppenübungsplatz mit hohem Offenlandanteil auf sandigem Boden (Heiden, Dünen, Sandrasen, Flugsandfelder) geeignete Lebensräume für die Hornissenraubfliege: Während in der Kernzone Rotwild, Wisente und Przewalski-Pferde leben (Abbildung 3), weiden in der von Wanderwegen durchzogenen Ringzone unter anderem Wasserbüffel, Galloways und Koniks [2]. In den Sommermonaten besetzt die Hornissenraubfliege zum Beispiel gern die Kothaufen der Przewalski-Pferde. Die imposanten Fliegen wechseln rasant zwischen verschiedenen Ansitzwarten und erbeuten Insekten wie Dungkäfer im Überraschungsangriff (Abbildung 4). Durch das Injizieren von Nervengiften durch den Stechrüssel wird die Beute augenblicklich gelähmt und noch direkt an der Sitzwarte ausgesaugt. Nach der Paarung legen die Weibchen die Eier in den Boden an Dunghaufen, wo die Raubfliegenlarven sich von den Larven der Mistkäfer und anderer koprophager Insekten ernähren [1].

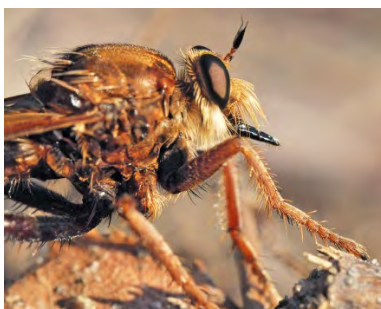


ABB. 1 Porträt einer Hornissenraubfliege (*Asilus crabroniformis*). Alle Fotos: H. Petrischak.



ABB. 2 Dieses Weibchen der Hornissenraubfliege nutzt einen abgebrochenen, toten Ast am Boden als Ansitzwarte.



ABB. 3 Przewalski-Pferde und Wisente in der Döberitzer Heide.



ABB. 4 Eine männliche Hornissenraubfliege hat auf Przewalski-Dung einen Dungkäfer erbeutet.



ABB. 5 Ein Behaarter Kurzflügler (*Emus hirtus*) im Käfergang eines Wisent-Dungfladens.



ABB. 6 Unvermittelt entfaltet der Behaarte Kurzflügler seine Hinterflügel und ergreift die Flucht.

Prächtige Käfer im Wisent-Dung

Den Behaarten Kurzflügler kann man im Sommer am gleichen Ort finden, wenn man einen innen noch weichen, aber oberflächlich schon angetrockneten Wisent-Fladen (stellvertretend auch für anderen Rinder-Dung) aufbricht. Mit etwas Glück werden dann in den Gängen gleich mehrere der farbenprächtigen Käfer sichtbar (Abbildung 5). Sie versuchen sofort, sich tiefer ins Innere zurückzuziehen. Werden sie weiter gestört, drohen sie mit geöffneten Mandibeln und aufgerichteter Hinterleibsspitze oder ergreifen die Flucht: Sie können blitzschnell ihre unter den kurzen Flügeldecken verborgenen Hinterflügel entfalten und auffliegen (Abbildung 6).

Der Behaarte Kurzflügler, auch Zottiger Raubkäfer genannt, kann eine Länge von knapp 30 mm erreichen. Kopf, Halsschild sowie die hintere Hälfte des Hinterleibs sind leuchtend goldgelb behaart, die Flügeldecken im hinteren Bereich grau, der restliche Körper schwarz. Damit ähnelt der Käfer auffallend einer Hummel, was ebenfalls als Mimikry interpretiert werden kann. Als Beute dienen den Käfern und ihren Larven, die sich vom Frühjahr bis zum Sommer rasch entwickeln, verschiedene Insekten, insbesondere Dungkäfer (*Aphodius* sp.). Diese werden mit den kräftigen Mandibeln ergriffen und zerteilt [3].

Die beiden räuberischen Großinsekten sind in Mitteleuropa weit verbreitet, aber selten, in manchen

Regionen sogar verschollen. Der Behaarte Kurzflügler gilt in der Roten Liste Deutschlands als gefährdet (Kategorie 3) [4], die Hornissenraubfliege sogar als stark gefährdet (Kategorie 2) [5].

Insektenschwund auf der Weide

Dabei könnte für sie Beute genug vorhanden sein. Es existieren beeindruckende Zahlen dazu: In Mitteleuropa leben allein rund 200 Käferarten an oder von Dung. Der Dung, den ein Rind im Laufe eines Jahres produziert, kann durch Insektenlarven mit einem Gesamtgewicht von 120 Kilogramm genutzt werden. Ein einzelner Dunghaufen eines Pferdes oder Rindes kann mehrere Tausend erwachsene Dungkäfer enthalten [6]. Doch ist die Lebensgemeinschaft dungbewohnender Insekten gleich doppelt bedroht: In der modernen Landwirtschaft spielen Weidetiere kaum noch eine Rolle – in der industriellen Massentierhaltung stehen Kühe gar nicht mehr auf der Weide. Außerdem werden Rinder und Pferde in der herkömmlichen Nutztierhaltung prophylaktisch mit Antiparasitika behandelt, die auch auf die Insekten im Dung toxisch wirken. Vieles deutet darauf hin, dass darin eine der Ursachen für den vielfach zitierten Insektenrückgang in der heimischen Natur liegt [7].

Ideal für Dungkäfergemeinschaften sind hingegen ganzjährig beweidete Schutzgebietsflächen, die der Erhaltung von offenen und halboffenen Lebensräumen dienen. Deshalb

finden sich Nachweise von Hornissenraubfliege und Behaartem Kurzflügler fast ausschließlich in solchen Gebieten. Dort profitieren auch zahlreiche seltene Vogelarten wie Wiedehopf (*Upupa epops*) und Raubwürger (*Lanius excubitor*) von der auf diese Weise erheblich gesteigerten Insektenbiomasse.

Literatur

- [1] D. Wolff, M. Gebel, F. Geller-Grimm (2018). Die Raubfliegen Deutschlands. Quelle & Meyer, Wiebelsheim.
- [2] H. Petrischak (2019). Expedition Artenvielfalt. Oekom, München.
- [3] <https://www.ukbeetles.co.uk/emus-hirtus>
- [4] J. Schmidl et al. (2021). Rote Liste und Gesamtartenliste der Kurzflüglerartigen, Stutzkäferartigen, landbewohnenden Kolbenwasserkäfer und Ufer-Kugelkäfer (Coleoptera: Polyphaga: Staphylinioidea, Histeroidea, Hydrophiloidea partim; Myxophaga: Sphaeriusidae) Deutschlands. Naturschutz und Biologische Vielfalt 70 (5), 31–95.
- [5] D. Wolff, D. (2011). Rote Liste und Gesamtartenliste der Raubfliegen (Diptera: Asilidae) Deutschlands. Naturschutz und Biologische Vielfalt 70 (3), 143–164.
- [6] J. Buse (2019). Bedeutung des Dungs von Weidetieren für wirbellose Tiere, insbesondere für koprophage Käfer. In: M. Bunzel-Drüke et al., Naturnahe Beweidung und NATURA 2000, 2. Aufl., Arbeitsgemeinschaft Biologischer Umweltschutz, Bad Sassendorf, S. 278–283.
- [7] N. Schoof, R. Luick (2019). Antiparasitika in der Weidetierhaltung – Ein unterschätzter Faktor des Insektenrückgangs? Naturschutz und Landschaftsplanung 51 (10), 486–492.

Hannes Petrischak,
Heinz Sielmann Stiftung,
hannes.petrischak@sielmann-
stiftung.de

ARTENSCHUTZ

Massive Gefährdung eines großen Teils der Reptilien

Erstmals wurde eine umfassende Analyse der Bedrohungssituation der paraphyletischen Klasse der Reptilien durchgeführt. Von den 10.196 in die Studie einbezogenen Arten sind mindestens 1.829 bedroht, also über ein Fünftel. Bereits eingeleitete Schutzmaßnahmen für andere Landwirbeltiere können auch vielen bedrohten Reptilienarten zugutekommen; insbesondere sehr kleinräumig verbreitete Spezies bedürfen jedoch besonderer Aufmerksamkeit.

Wir befinden uns mitten in einem gewaltigen Artensterben. Bei den Landwirbeltieren sind rund 41 Prozent der Amphibien, über ein Viertel der Säugetiere sowie etwa 14 Prozent der Vögel vom Aussterben bedroht. Erstaunlicherweise fehlte eine



ABB. 1 Rund 58 Prozent aller Schildkrötenarten sind bedroht. Hier *Geochelone elegans* (IUCN-Kategorie „gefährdet“). Alle Fotos: Kriton Kunz.



ABB. 2 Südostasien ist eine der Regionen, die überproportional viele bedrohte Reptilienarten beherbergen. Hier *Shinisaurus crocodilurus* (IUCN-Kategorie „stark gefährdet“).

entsprechende globale Untersuchung der Gefährdung von Reptilien bislang. Kürzlich erschienen nun in *Nature* die alarmierenden Resultate einer Studie [1], die den Großteil der aktuell (Stand: Dezember 2022) 11.940 anerkannten Arten von Schildkröten, Krokodilen, Brückenechsen und Schuppenkriechtieren (Schlangen, Echsen, Doppelschleichen) umfasste. Der Bedrohungsstatus wurde anhand der Rote-Liste-Kriterien der IUCN (Weltnaturschutzunion) evaluiert.

Insgesamt sind demnach mindestens 21,1 Prozent aller untersuchten Arten bedroht, also als „gefährdet“, „stark gefährdet“ oder „vom Aussterben bedroht“ eingestuft. Proportional am stärksten betroffen sind Schildkröten (57,9%, Abbildung 1) und Krokodile (50,0%), bei Schuppenkriechtieren sind es 19,6 Prozent. Die Brückenechse als einziger

Vertreter ihrer Ordnung gilt als nicht gefährdet. Schildkröten und Krokodile zählen somit zu den am stärksten bedrohten Gruppen der Landwirbeltiere überhaupt.

Seit dem Jahr 1500 sind mindestens 31 Reptilien bereits ausgestorben, zwei Arten existieren nur noch in Erhaltungszuchten, 40 weitere Arten sind möglicherweise ausgestorben. Von 1.507 Arten (14,8 %) – vor allem grabende oder anderweitig schwierig zu beobachtende Vertreter – liegen nicht genügend Daten vor, um ihre Gefährdung einschätzen zu können. Die meisten gefährdeten Reptilien leben in Regionen, in denen auch viele andere Landwirbeltiere bedroht sind, vor allem in Waldgebieten Südostasiens (Abbildung 2), Westafrikas, dem Norden Madagaskars und den nördlichen Anden sowie der Karibik.

Die vom Menschen verursachten Bedrohungsfaktoren sind ebenfalls großteils dieselben wie für andere Landwirbeltiere: in erster Linie der Verlust der Lebensräume durch immer weiter vordringende Landwirtschaft, Urbanisierung und Abholzung. Für manche Arten – vor allem Krokodile und Schildkröten – stellen auch Jagd und Absammeln für den Handel ein ernstes Problem dar. Vor allem Inselarten leiden zudem unter dem Druck durch invasive Arten – insgesamt sind allein 257 Reptilienspezies durch einge-

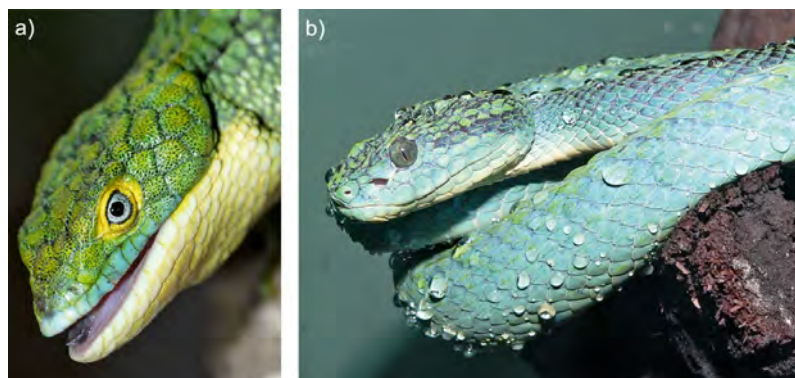


ABB. 3 Kleinräumig in Waldgebieten verbreitete Arten sind besonders stark betroffen. a) Hier *Abronia graminea* (IUCN-Kategorie „stark gefährdet“). b) Auch *Bothriechis thalassinus* bewohnt nur kleine, von Abholzung bedrohte Wälder in Guatemala und Honduras. Die Art ist daher ebenfalls als „stark gefährdet“ gelistet.

schleppte Säugetiere bedroht. Eine zunehmende Gefahr dürfte auch vom Klimawandel ausgehen, indem er beispielsweise die Gebiete einschränkt, die bestimmte Arten aufgrund ihrer Vorzugs- und Aktivitätstemperaturen bewohnen können, oder indem das Geschlechterverhältnis solcher Arten verschoben wird, die eine temperaturabhängige Geschlechtsentwicklung aufweisen.

Angesichts dieser dramatischen Bedrohungssituation sind Schutzmaßnahmen dringend notwendig, insbesondere die Unterschutzstellung der Lebensräume. Teilweise profitieren gefährdete Reptilien bereits von Schutzgebieten, die für andere Tiere eingerichtet wurden, beispielsweise Säugetiere. Gerade für solche Reptilienarten, die nur ein sehr kleines Verbreitungsgebiet bewohnen (Abbildung 3a und b),

das nicht innerhalb bereits bestehender Reservate liegt, müssen jedoch gesonderte Schutzmaßnahmen geprüft werden. Ebenfalls essenziell ist die Bekämpfung invasiver Arten, die Reptilien bedrohen.

[1] N. Cox et al. (2022). A global reptile assessment highlights shared conservation needs of tetrapods. *Nature* 605, 285–290.

Kriton Kunz, Speyer

BIOMATHEMATIK

Stoffwechselraten, Lebenszyklen und Körpergewicht

Unter Lebenszyklen L versteht man Größen wie die durchschnittliche Lebensdauer, Dauer bis zur Fortpflanzungsfähigkeit, Tragzeit, Dauer eines Atemzugs, Dauer eines Herzschlags, Halbwertszeit beim Drogenabbau und andere. Ihre Abhängigkeit von der artspezifischen Durchschnittsmasse wurde seit den 1960er Jahren untersucht und lieferte die empirische Proportionalität $L \sim m^{1/4}$. Hier wird gezeigt, dass sich dieses Gesetz einfach aus dem Dreiviertelgesetz $E \sim m^{3/4}$ für Stoffwechselraten E ableiten lässt. Damit ist ersichtlich, dass auch die Lebenszyklen verschiedener Spezies durch Stoffwechselprozesse bestimmt sind, die im Laufe der Evolution unverändert geblieben sind.

Empirische Untersuchungen von Max Kleiber [1] zeigten bei Säugetieren einen speziesübergreifenden Zusammenhang zwischen Körpermasse m und Stoffwechselrate E , der als Dreiviertelgesetz bzw. Kleibersches Gesetz $E \sim m^{3/4}$ bekannt ist. Hierbei versteht man unter der Stoffwechselrate eines Organismus seinen Energieumsatz pro Zeit in Ruhe. Da die Stoffwechselrate einer Art seine Lebensweise wesentlich mitbestimmt, bietet das Dreiviertelgesetz ein Hilfsmittel zur Erklärung evolutionärer Tendenzen bei der Besiedlung ökologischer Lebensräume und Nischen.

Mitochondrien als Verbindungsglied von Stoffwechsel- und Alterungsprozessen

Erkenntnisse aus der Zellbiologie weisen auf einen Zusammenhang

zwischen Lebensdauer und Stoffwechsel hin, da bei intensiver ATP-Produktion in den Mitochondrien gleichzeitig vermehrt Sauerstoffradikale entstehen, die den Alterungsprozess beschleunigen [3]. Die Abhängigkeit verschiedener Lebenszyklen vom Körpergewicht bzw. den Gewichten verschiedener Organe wie Herz oder Hirn wurde von einer Vielzahl von Autoren untersucht und in der Monographie von W. A. Calder [2] zusammengefasst (Abbildung 1). Empirische Untersuchungen ergaben $L \sim m^\alpha$, wobei der Exponent α je nach gewähltem Lebenszyklus und zugrunde liegender Masse zwischen 0,2 und 0,28 schwankt. Verallgemeinert formulierte William Calder [2] für Lebenszyklen von Säugetieren und Vögeln eine Massenabhängigkeit $L \sim m^{1/4}$.

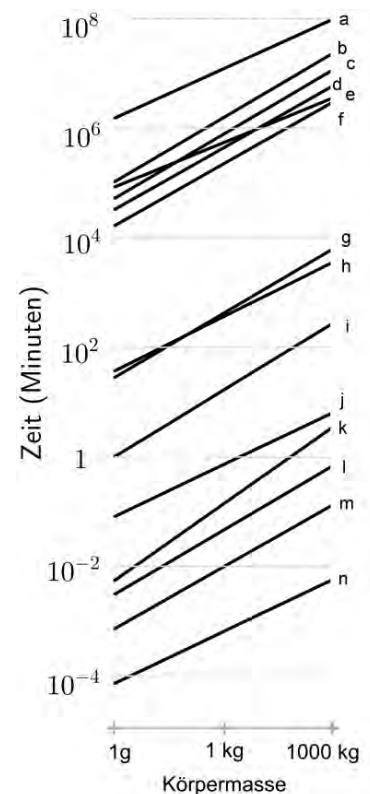


ABB. 1 Beziehung zwischen Körpermasse und Länge biologischer Perioden bzw. Zyklen für Säugetiere. a: max. Lebensdauer in Gefangenschaft; b: Wachstumsdauer bis 98% Masse; c: Mindestdauer zur Populationsverdopplung; d: Dauer zur Geschlechtsreife; e: Wachstumsdauer bis 50% Masse; f: Tragzeit; g: Metabolisierungsdauer für Fett im Äquivalent von 0,1% Körpermasse; h: Inulin-Clearance; i: Para-Aminohippursäure-Clearance; j: Zirkulationsdauer des Blutvolumens; k: Dauer der Darmmotilität; l: Dauer des Atemzyklus; m: Dauer des Herzzyklus; n: Dauer der Muskelzuckung bei *m. extensor digitorum longus*. Abb: R. Spielmann nach [2], Tabelle 6-1.

Verbindung zwischen Lebenszyklus- und Dreiviertelgesetz

Lebenszyklen lassen sich in zwei Kategorien einteilen. Einerseits gibt es kurzzeitige, für das Individuum periodische Zeitabschnitte wie die Dauer eines Herzschlags, Atemzugs oder einer Muskelkontraktion. Andere Lebenszyklen sind für das Individuum einmalige, aber artspezifische Zeitabschnitte wie die Lebensdauer oder die Dauer bis zur Geschlechtsreife.

Für die Massenabhängigkeit in der ersten Kategorie findet man bei W. A. Calder [2] folgende Erklärung: Ebenso wie die Dauer eines Herzschlags mit dem Schlagvolumen ist jede Zykluslänge L mit einem spezifischen Volumen V verknüpft, welches wiederum proportional zu einer spezifischen Masse m ist. Für E als Energieumsatz pro Zeit ist $\frac{V}{L} \sim E$

Also folgt mit dem Dreiviertelgesetz $\frac{V}{L} \sim m^{\frac{3}{4}}$ bzw. $L \sim \frac{V}{m^{\frac{3}{4}}}$. Wegen

$V \sim m$ ergibt sich daraus $L \sim m^{1/4}$.

Nun soll für eine artspezifische Zykluslänge der zweiten Kategorie eine Verbindung zum Dreiviertelgesetz aufgezeigt werden. Mit L_f bezeichnen wir die durchschnittliche

Zeitdauer zum Erreichen der Fertilität, während m_f die Durchschnittsmasse des jungen geschlechtsreifen Organismus ist. Bis zur Geschlechtsreife wird das Massenwachstum durch die Stoffwechselrate bestimmt, also

$$\frac{dm}{dt} \sim E.$$

Mit dem Dreiviertelgesetz folgt daraus

$$\frac{dm}{dt} \sim m^{\frac{3}{4}}$$

bzw. mit einer Konstanten

$$\frac{dm}{dt} = c \cdot m^{\frac{3}{4}}$$

Integrieren wir mittels Trennung der Variablen, so folgt

$$\int_0^{m_f} m^{-\frac{3}{4}} dm = c \cdot \int_0^{L_f} dt$$

$$4m_f^{1/4} = c \cdot L_f$$

und damit $L_f \sim m_f^{1/4}$.

Für alle zu L_f proportionalen Lebenszyklen und alle zu m_f proportionalen Massen folgt nun $L \sim m^{1/4}$.

Damit wird klar, dass die Abhängigkeit der entsprechenden Lebenszyklen von der Masse kein Zufall ist, sondern durch Stoffwechselprozesse bestimmt ist, deren Grundprinzip sich im Verlaufe der Evolution erhalten hat.

Artspezifische Verkürzung der Lebensdauer trotz intensiviertem Immunsystem

Führt man die relative Stoffwechselrate $r = \frac{E}{m}$ als Maß für den spezifischen Energieumsatz pro Zeiteinheit ein, so folgt mit dem Dreiviertelgesetz $r \sim m^{-1/4}$

Gleichzeitig ergibt sich aus $L \sim m^{1/4}$ die Beziehung $L \sim r^{-1}$. Hieraus ist ersichtlich, warum kleinere Tiere verwandter Spezies zwar eine höhere relative Stoffwechselrate und schnellere Immunantworten, jedoch tendenziell eine kürzere Lebenserwartung besitzen [3].

Literatur

- [1] M. Kleiber (1947). Körpergröße und Stoffwechselrate. *Physiologische Bewertungen*. 27(4), 511–541.
- [2] W. A. Calder (1984). *Size, Function and Life History*. Harvard University Press, Cambridge, MA and London, England.
- [3] A. J. Hulbert et al. (2007). Life and death: metabolic rate, membrane composition, and life span of animals. *Physiol. Rev.* 87(4), 1175–1213.
- [4] R. Spielmann (2020). *Biomathematik*. De Gruyter, Berlin.

Raj Spielmann,
Muri bei Bern/Schweiz

ORNITHOLOGIE

Kohlmeisen – Trotz sie dem Klimawandel?

Vögel sind noch immer die wohl am weitesten verbreitete Tierklasse. Sie leben auf allen Kontinenten und das schon seit mindestens 150 Millionen Jahren. Mehr als 10.000 Arten sind bekannt – dies wohl vor allem denjenigen, die sich mit wissenschaftlichem Anspruch mit ihnen beschäftigen. Damit sind sie für die Biologie hervorragende Modellorganismen, um den hochkomplexen Fragen des Klimawandels und deren Auswirkungen nachzugehen – insbesondere Anpassungsmechanismen lebender Organismen an Veränderungen von Klimazyklen aufzuspüren, die bis in die Physiologie hineinreichen können.

Dass Vögel sich durch ihr Zugverhalten an Klimaveränderungen relativ schnell anpassen können, belegen Zugvogelbeobachtungen, die aufzeigen, dass die Rückkehrer aus den Win-

terquartieren hierzulande inzwischen teilweise mehrere Wochen früher ankommen, die Abflugzeiten sich im Herbst nach hinten verlagern und die Individuen einiger Arten inzwischen

immer häufiger ganzjährig hier überwintern [1, 2]. Dass sogar Standvögel wie die Kohlmeise (Abbildung 1) ihre Anpassungsmechanismen an wechselnde Umgebungstemperaturen verfeinern und einzelne Individuen sich dadurch vielleicht innerhalb der Population einen Überlebensvorteil sichern könnten, der sie noch weniger „anfällig“ für Klimaveränderungen macht, ist inzwischen in den Bereich des Möglichen gerückt. Jedenfalls weisen darauf jüngste Ergebnisse des in Gründung befindlichen Max-Planck-Instituts für biologische Intelligenz hin [3].

Sie zeigen auf, dass die Blutwerte von Glukokortikoidhormonen der Vögel bei Änderungen der Umgebungstemperatur unterschiedlich stark schwanken. Dadurch können

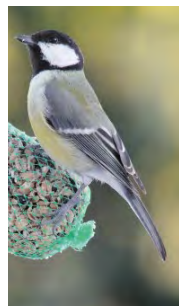


ABB. 1 Die Kohlmeise (*Parus major*) bleibt unseren Gärten auch im Winter treu.

die Vögel sich als Population an Veränderungen der Lebensbedingungen wie häufigere Temperatur-extreme infolge des Klimawandels wohl besser anpassen. Glukokortikoide koordinieren als Stresshormone viele dieser Anpassungen, werden bei niedrigen Temperaturen vermehrt produziert und erleichtern dem Organismus so den Abbau von Kohlehydrat-, Fett- und Proteinreserven, um Wärme zu erzeugen. Bei höheren Temperaturen sinkt der Glukokortikoidspiegel im Blut und damit auch die Umwandlung von Energie in Körperwärme. Je stärker die Umgebungstemperatur schwankt, desto wichtiger wird die Stabilisierung der Körpertemperatur durch Hormone als Botenstoffe. Vor allem für kleinere gleichwarme (homoiotherme) Tiere wie Vögel es sind, ist es wichtig, sich an Temperaturschwankungen rasch anzupassen,

um die eigene Körpertemperatur konstant zu halten.

Über fünf Jahre hatte Forschungsgruppenleiterin Michaela Hau mit ihren beiden Kolleginnen den Glukokortikoidspiegel derselben Kohlmeisen einer Population in Oberbayern im Blick. Als sie die Messwerte schließlich zur Außentemperatur in Beziehung setzte, zeigten sich nicht nur erwartungsgemäß Anpassungen der Hormonspiegel an die Umgebungstemperatur, sondern auch große Schwankungen zwischen den Individuen. „Wir konnten zum ersten Mal bei freilebenden Wirbeltieren beobachten, dass manche Tiere eine stärker ausgeprägte Anpassung der Glukokortikoidwerte an die Umwelttemperatur haben als andere“, so das Fazit der Forscherin. Dieser Variantenreichtum könne es der Population als Ganzes ermöglichen, auf eine größere Bandbreite von Veränderun-

gen zu reagieren. Ob die variablen Blutspiegel der Glukokortikoide jedoch auch tatsächlich zu Unterschieden in der Wärmeproduktion oder -isolation führen, müssten weitere Untersuchungen klären, ebenso die Kernfrage, ob die Variabilität schlussendlich mit einem erhöhten Fortpflanzungs- oder Überlebenserfolg einhergeht.

Literatur

- [1] P. Berthold (2000). Vogelzug, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 4. Aufl. ISBN 3-534-13656-X.
- [2] F. Bairlein, Das große Buch vom Vogelzug, Aula-Verlag, Wiebelsheim, ISBN 978-3-89104-825-2.
- [3] Michaela Hau, Caroline Deimel, Maria Moiron (2022). Great tits differ in glucocorticoid plasticity in response to spring temperature, *Proceedings of the Royal Society B*, <https://doi.org/10.1098/rspb.2022.1235>

Wilhelm Irsch, Reblingen-Siersburg

ORNITHOLOGIE

Gesangsmimikry bei weiblichen Spottdrosseln

Mimikry gibt es nicht nur bei optischen Phänomenen. Insbesondere in der Vogelwelt trifft man durchaus auch auf akustische „Nachahmer“, die durch ihre Lautäußerungen andere Arten „vortäuschen“ können. Hierzulande sprichwörtlich für ein solches Gesangsverhalten sind die „Spötter“. Was sie für Europa, sind die in ihrer Verbreitung auf Amerika beschränkten „Spottdrosseln“ jenseits des Atlantiks.

Dass Vögel die Gesänge oder Teile der Lautäußerungen anderer Arten nachahmen können, ist nicht ungewöhnlich und war bei der Familie der Spötter sogar namensgebend

[1]. Bislang hat man das jedoch ausschließlich den Männchen zugestanden. Das Weibchen die Gesänge anderer Vogelarten imitieren, galt bislang zumindest als äußerst ungewöhnlich und wurde auch noch nicht exakt nachgewiesen. Nun ist es erstmals gelungen, Gesangsmimikry bei weiblichen Gartenspottdrosseln präzise zu dokumentieren. Charles Darwin war noch der Auffassung, dass weibliche Singvögel primär die Rolle der Zuhörerinnen übernehmen. Inzwischen weiß man jedoch, dass Weibchengesang bei vielen Singvogelarten weit verbreitet

ist wie z. B. auch bei der Gartenspottdrossel (*Mimus polyglottos*, Abbildung 1). Weniger bekannt ist bislang allerdings, ob Singvogelweibchen die Laute anderer Arten imitieren. Amerikanische Forscher haben Tonspuren von Nestkameras ausgewertet und dabei nachweisen können, dass Spottdrosselweibchen Gesangsmimikry zeigen, wenn sie auf dem Nest singen. Verglichen mit den Männchen spotten sie jedoch weniger häufig und zeigen dabei auch geringere Variation. Damit eröffnen sich für die Bioakustik „neue Forschungsperspektiven zu Ursache, Entwicklung, Funktion und Evolution weiblicher Gesangsmimikry“, äußern sich die Autoren der Studie David E. Gammon und Christine M. Stracey voller Zuversicht.

Literatur

- [1] W. Irsch (1994). *Abh. Delattinia* 21: 5–58; ISSN 0344-645x.
- [2] D. E. Gammon, C. M. Stracey (2022). *Journal of Ornithology* 163: 749–756.

Wilhelm Irsch, Reblingen-Siersburg

ABB. 1 Die nordamerikanische Gartenspottdrossel (*Mimus polyglottus*, auf englisch *Mockingbird*) ist bekannt dafür, andere Vögel mit ihrem Gesang nachzuahmen.



AUSSTELLUNG

Klimawandel im Zeitalter des Menschen

Die Ausstellung „Das zerbrechliche Paradies“ im Gasometer in Oberhausen nimmt die Besucher bis zum 26. November 2023 mit auf eine virtuelle Zeitrafferreise durch die anthropogen bedingten Umweltveränderungen.

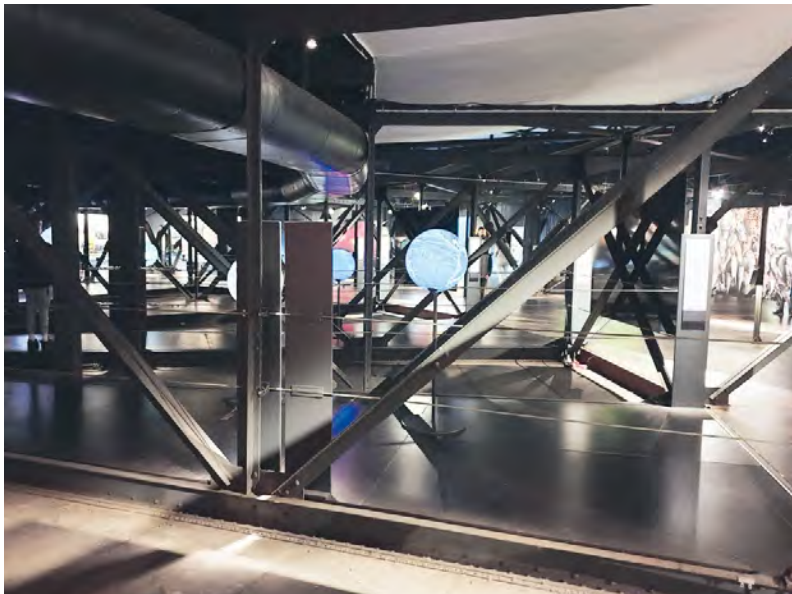


ABB. 1 Der Golfstrom als „Klimamotor“. Alle Fotos: C. Högermann.

Die Ausstellung veranschaulicht die fragile Dynamik der Wechselwirkungen zwischen Klima, Flora, Fauna und Mensch in großformatigen Fotoszenarien. Ein besonders sehenswerter Bereich ist die Wanderung entlang des Golfstroms als „Klimamotor“ (Abbildung 1). In einem Wechselspiel geht es im Gasometer, bereits als Industriedenkmal mit einem ganz besonderen Flair verse-

hen, sowohl um nahezu „noch paradiesische“, jedoch labile Zustände, als auch um solche, wo es bereits zu mehr oder weniger folgenschweren Negativentwicklungen gekommen ist. Thematische Schwerpunkte der technisch brillanten, mit der Perspektive spielenden Fotos sind im Parterre Naturgewalten – z. B. „Monsterwellen“, die den Besucher scheinbar verschlingen, oder ein

Film über Sturmgewalten als Erlebniskino sowie eindrucksvolle Aufnahmen als Belege für überwiegend (noch) intakte, terrestrische, aquatische und urbane Lebensräume. Auf Ebene 1 folgen – drastisch anmutende – bereits erfolgte Schadwirkungen durch die drohende Klimakatastrophe, Rodung, Raubbau, Umweltverschmutzung und vieles mehr. So ist das Foto „Kloake des Reviers“ (Abbildung 2a) ein aufrüttelnder Gegenpol zu den Bildern der Naturschönheiten wie etwa dem „Statussymbol vor dramatischer Kulisse“ (Abbildung 2b).

Die Synopse der Ausstellung bilden noch mögliche Hoffnungsträger, die allerdings auf sofortige Maßnahmen drängen. Alle Bilder erzählen ihre eigene Geschichte und hinterlassen bleibende Eindrücke beim Betrachter. Alles in allem überflutet die Fülle die Sinne ein wenig, vielleicht auch von den Ausstellungsmachern so gewollt, um dadurch die Hektik des Alltags einfließen zu lassen. Auf der 2. Ebene in der Kuppel des Gasometers umschließt in 100 Metern Höhe eine Erdkugel, auf die Satellitenbilder aus Astronautensicht projiziert werden, symbolisch alle Ökosysteme (Abbildung 3). Eindrücke und Informationen zur Ausstellung, die noch bis zum 26. November 2023 zu sehen ist, finden sich unter www.gasometer.de.

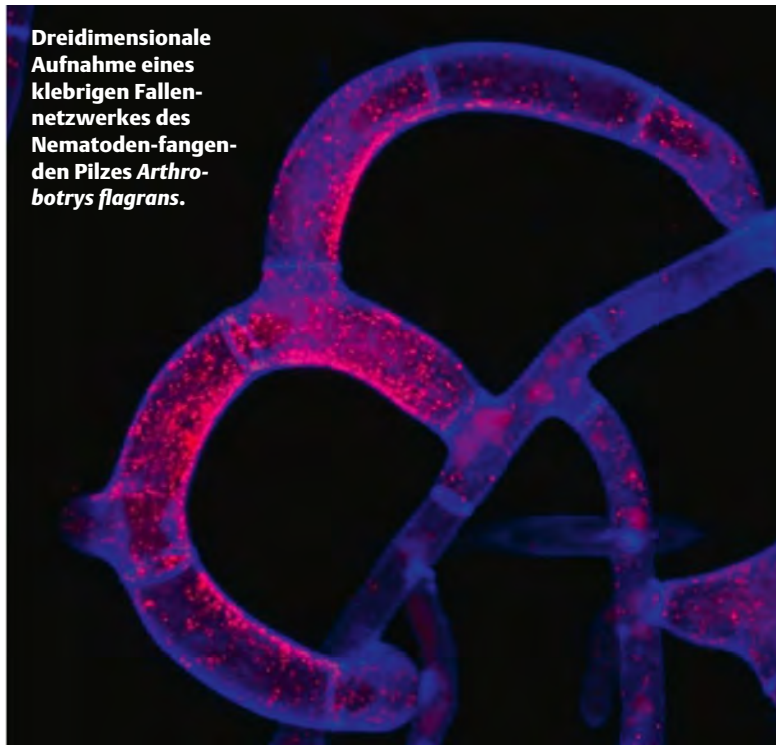
*Christiane Högermann,
Osnabrück*



ABB. 2 Das Foto „Kloake des Reviers“ (a) ist ein dramatischer Gegensatz zum Foto „Statussymbol vor dramatischer Kulisse“ (b).



ABB. 3 Multimediale Erdkugel im Gasraum des Gasometers.



Dreidimensionale Aufnahme eines klebrigen Fallennetzwerkes des Nematoden-fangenden Pilzes *Arthrobotrys flagrans*.

Eine Welt ohne Pilze ist kaum vorstellbar. Neben der kulinarischen Bedeutung sind Böden von einem ausgeprägten Pilzmyzel durchzogen, und Pilze sind maßgeblich als Destruenten am Abbau organischen Materials beteiligt. Es gibt auch pilzliche Symbionten, die mit Pflanzen vergesellschaftet sind und deren Versorgung mit Mineralien verbessern, aber ebenso pflanzenpathogene Pilze. Auch Tiere sind nicht vor Pilzen gefeit, und Pilzinfektionen häufen sich in unserer modernen Zeit. Eine besonders faszinierende Lebensweise findet man bei Nematoden-fangenden Pilzen (NFP). Bei Nährstoffmangel sind sie in der Lage, eine räuberische Lebensweise einzunehmen und lebende Nematoden zu fangen. Die molekulare Analyse der Interaktion von NFP mit ihrer Beute ist ein faszinierendes Forschungsgebiet, um zu lernen, wie sich Pilze und Nematoden erkennen, wie die Pilze Fallen bilden oder wie die Pilze die Nematodenabwehr überwinden. Da es viele pflanzen- und tierpathogene Nematoden gibt, haben NFP außerdem ein großes Potenzial zur pestizidfreien Kontrolle von Nematodenpopulationen in Böden oder der Kontrolle tierpathogener Vertreter.

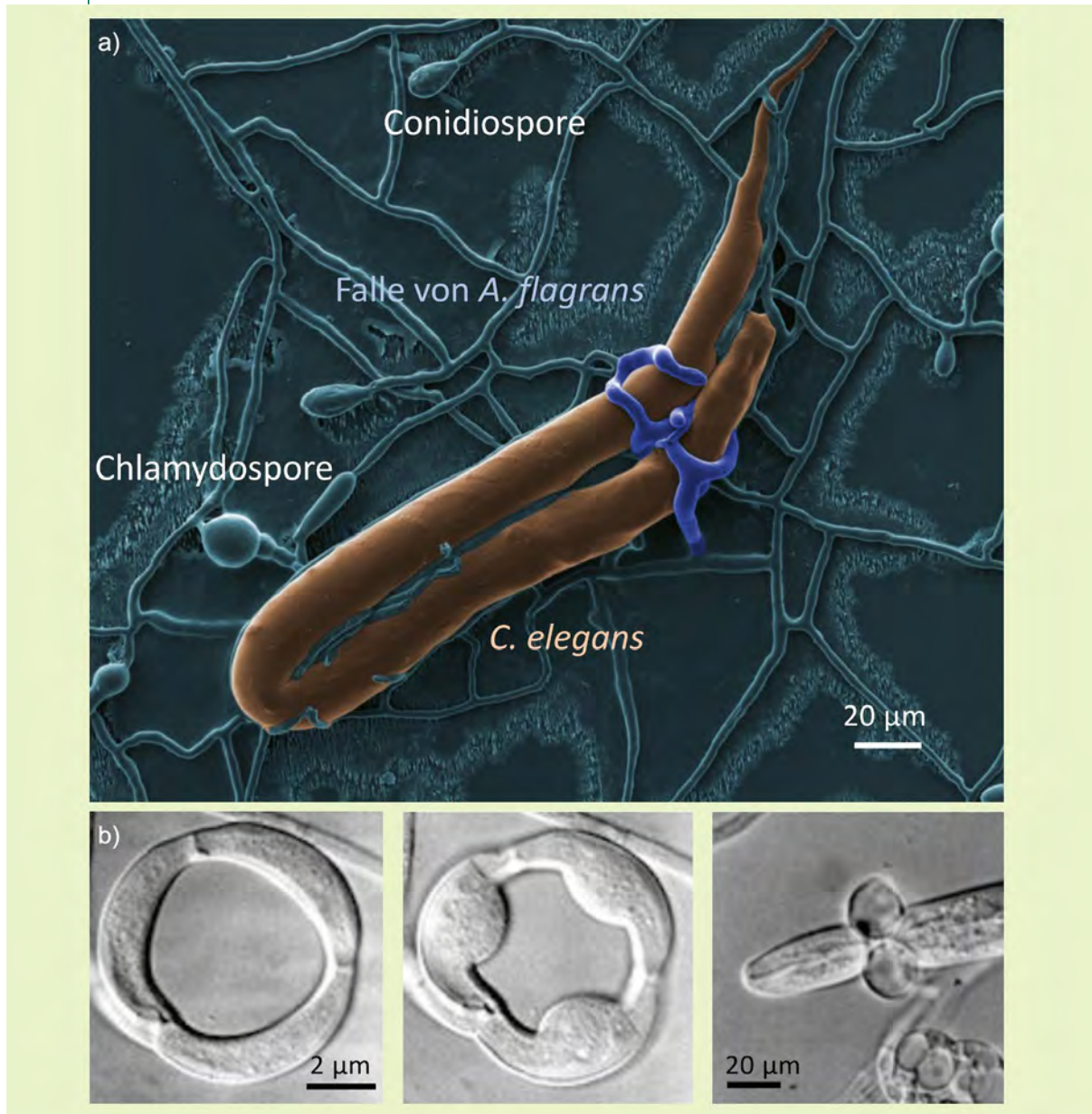
Nicht ganz so friedlich

Räuberische Pilze mit Potenzial zur Schädlingsbekämpfung

JENNIFER EMSER | ANNA-LENA KLEMKE |
MARIUS KRIEGLER | REINHARD FISCHER

Pilze kennt jeder, doch meist vom Pilze sammeln für den Kochtopf. Aber Pilze sind viel mehr. Pilze kommen ubiquitär in vermutlich allen Habitaten auf der Erde vor, vom Boden der Tropen bis zum Boden der Wüste oder der Pole, auf und in Pflanzen und Tieren ebenso wie in aquatischen Lebensräumen. Sie spielen eine prominente Rolle als Destruenten und sind maßgeblich für den Ligninabbau verantwortlich. Aber auch andere Polymere wie Cellulose, Stärke, Proteine und Nukleinsäuren werden von pilzlichen und bakteriellen Enzymen hydrolysiert und nutzbar gemacht. Viele Pflanzen sind mit Pilzen vergesellschaftet und gehen symbiontische Beziehungen ein. Die Mykorrhiza ist das prominenteste Beispiel, aber viele Pflanzen sind auch von sogenannten Endophyten besiedelt, deren genaues Zusammenspiel mit den Pflanzen noch nicht so gut erforscht ist. Schließlich sind viele pflanzenpathogene Pilze wie der Reisbrandpilz *Magnaporthe oryzae* für enorme Ernteschäden verantwortlich. Es gibt auch tier- und humanpathogene Pilze, die vor allem bei immungeschwächten Personen ein großes Problem darstellen [1]. Ihre Fähigkeit ein reichhaltiges Repertoire an Sekundärmetaboliten zu bilden, von denen viele für den Menschen toxisch sind, führt zum Verderb großer Mengen Lebensmittel, und der regelmäßige Verzehr kontaminierter Lebensmittel fördert die Entstehung verschiedener Krebsarten. Allerdings sind eben diese Sekundärmetabolite auch ein Segen für die Menschheit, was am einfachsten am Beispiel von Penicillin ersichtlich ist. Auch viele andere Medikamente gehen auf pilzliche – aber auch auf bakterielle oder pflanzliche – Sekundärstoffe zurück. Daneben spielen Pilze in der modernen Biotechnologie eine wichtige Rolle z. B. zur Herstel-

ABB. 1 | NEMATODEN-FANGENDE PILZE UND IHRE FANGWERKZEUGE



a) Kolorierte elektronenmikroskopische Aufnahme von *Arthrobotrys flagrans* mit einem gefangenen *Caenorhabditis elegans*-Nematoden (braun). Der Pilz bildet Conidio- und Chlamydosporen sowie klebrige Fallennetzwerke (blau). **b)** *A. brachopaga* bildet einen anderen Fallentyp, nämlich konstriktive Ringe. In den linken beiden Bildern wurde die Falle durch Hitze ausgelöst, im rechten Bild ist ein Nematode gefangen. Die Ringe blähen sich innerhalb von 0,1 sec auf. Ein Film, der den Fangvorgang zeigt, kann auf der Internetseite der Autoren angeschaut werden (<https://www.iab.kit.edu/microbio/1085.php>). Fotos aus [19].

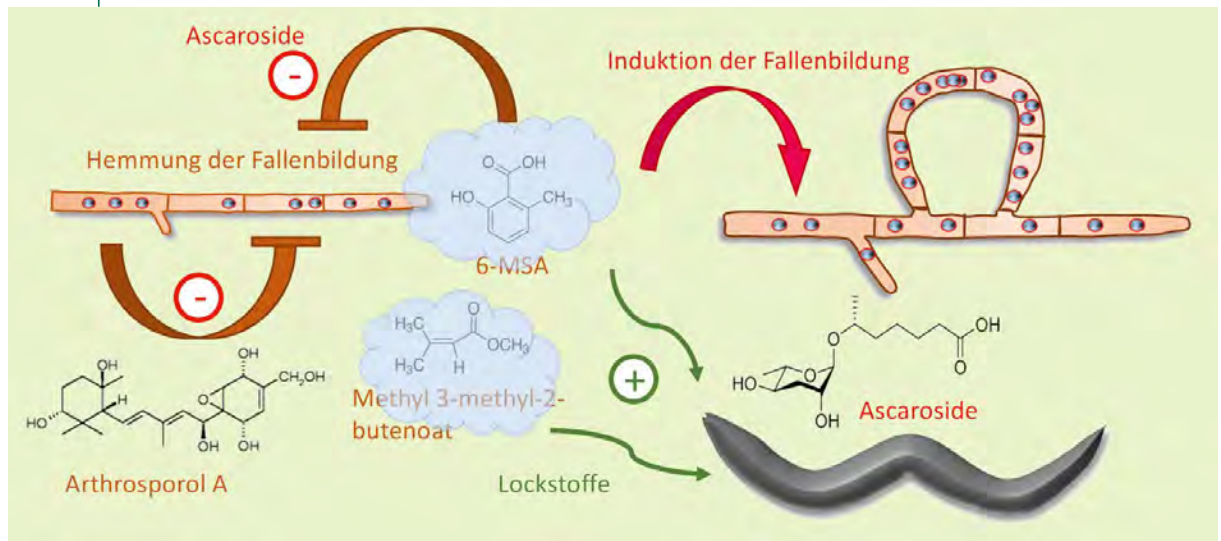
lung von Enzymen, die in der Getränkeindustrie (Pektinasen), der Waschmittelindustrie (Proteasen, Lipasen) oder der Tierernährung (Phytasen) Anwendung finden.

Eine besonders interessante Lebensweise findet man bei Nematoden-fangenden Pilzen (NFP). Sie leben üblicherweise im Boden auf organischem Material, sind also typische Destruenten. Wenn allerdings die Nährstoffe zur Neige gehen, sind sie in der Lage, eine räuberische Lebensweise einzuschlagen. Dazu bilden unterschiedliche

Pilzarten verschiedene Fallenstrukturen aus (Abbildung 1). Eine besonders faszinierende Falle besteht aus einem konstriktiven Ring, der bei Berührung durch einen Nematoden „zuschnappt“ – ähnlich der Falle einer Venusfliegenfalle. Andere Pilze wie *Arthrobotrys flagrans* (früher als *Duddingtonia flagrans* bezeichnet) bilden klebrige Fallennetzwerke [2, 3]. Nematoden bleiben in der Falle kleben und ► Pilzhypphen wachsen in die Nematoden ein, um sie von innen zu attackieren und zu verdauen.

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 38 erklärt.

ABB. 2 | INDUKTION DER FALLENBILDUNG



Die Pilzhyphen bilden Arthrosporole, die die Fallenbildung hemmen. Daneben bilden sie flüchtige Substanzen, die die Nematoden anlocken. Die Nematoden wiederum scheiden Ascaroside ab, die die Bildung der hemmenden Arthrosporole blockieren. Das komplizierte Zusammenspiel garantiert, dass erst dann Fallen gebildet werden, wenn viele Nematoden vorhanden sind und damit der Fangerfolg groß ist. Schema aus [20].

Nematoden (Rundwürmer) sind die häufigsten Tiere der Erde und als typische Bodenbewohner auch maßgeblich am Abbau organischen Materials beteiligt [4]. Der von Sydney Brenner als genetisches Modellsystem etablierte Nematode *Caenorhabditis elegans* ist aufgrund seiner guten methodischen Zugänglichkeit besonders populär. Zahlreiche bahnbrechende Entdeckungen wurden seitdem mit diesem Rundwurm gemacht, und Sydney Brenner wurde 2002 mit dem Nobelpreis in *Physiologie oder Medizin* für seine Arbeiten zur Organentwicklung und dem programmierten Zelltod geehrt.

Es gibt aber auch zahlreiche pathogene Nematoden, die weltweit Schäden in Milliardenhöhe verursachen. Kartoffel, Zuckerrübe oder Wein sind einige heimische betroffene Kulturpflanzen. Einige Nematoden sind Darmparasiten und mindern die Erträge von Wiederkäuern. Da die Behandlung von Nematodenbefall, insbesondere in Böden, schwierig ist, stellen Nematoden-fangende Pilze eine

attraktive Möglichkeit dar, biologische Schädlingsbekämpfungsstrategien zu entwickeln.

Verlockende Signalmoleküle verwirren die Nematoden

Das Bilden der spezialisierten Fallenhypfen ist ein energieaufwendiger Prozess und muss deshalb gut reguliert werden. Die Induktion der Fallenbildung erfolgt erst, wenn der Pilz keine andere Nährstoffquelle mehr zur Verfügung hat und genügend Nematoden in der Nähe sind [5]. Die Nematoden verraten ihre Gegenwart über ▶ Pheromone, welche sie eigentlich zur Entwicklung und Paarung benötigen. Bei diesen Pheromonen handelt es sich um Dideoxyzucker, die mit einem Fettsäurerest über eine Etherbindung verbunden sind, besser bekannt als Ascaroside [6]. Wie der Pilz in der mehr als 400 Millionen Jahre dauernden Evolution der Interaktion „gelernt“ hat, diese Nematoden-spezifischen Moleküle wahrzunehmen, wird derzeit untersucht.

Doch nur eine einzelne Falle auszulegen, reicht meist nicht, um eine Beute zu erlegen. Um die Erfolgchancen zu erhöhen, lockt der Pilz die Nematoden mit flüchtigen Signalmolekülen an. Diese Moleküle ähneln dem Geruch von verrottendem Obst, der Leibspeise vieler Nematoden, oder dem von potenziellen Sexualpartnern [7]. Zwei dieser Stoffe sind 6-Methylsalicylsäure (6-MSA) und Methyl-3-methyl-2-butenolat (MMB). 6-MSA ist das erste Intermediat der Synthese von Arthrosporol A durch die Polyketidsynthese ArtA und wird hauptsächlich an der Hyphenspitze synthetisiert. Während 6-MSA die Nematoden anzieht, unterdrückt es zugleich, zusammen mit Arthrosporol A, im hinteren Teil der Hyphe die Fallen-

IN KÜRZE

- Pilze sind in ihren Ernährungsweisen sehr vielseitig. Viele Pilze leben **saprotroph** und verwerten abgestorbenes organisches Material, einige leben **symbiontisch**, aber viele auch auf Kosten der Wirte und sind **pathogen**.
- Nematoden-fangende Pilze können bei Nährstoffmangel sogar eine **räuberische Lebensweise** einnehmen und lebende Nematoden fangen.
- In einer 400-Millionen-jährigen gemeinsamen Evolution hat sich ein **intensives Wechselspiel** der beiden Partner herausgebildet, was verhindert hat, dass sich resistente Nematoden entwickelt haben.
- Die Pilze haben ein **großes Anwendungspotenzial**, um tier- und pflanzenpathogene Nematoden auf nachhaltige und pestizidfreie Weise zu bekämpfen.

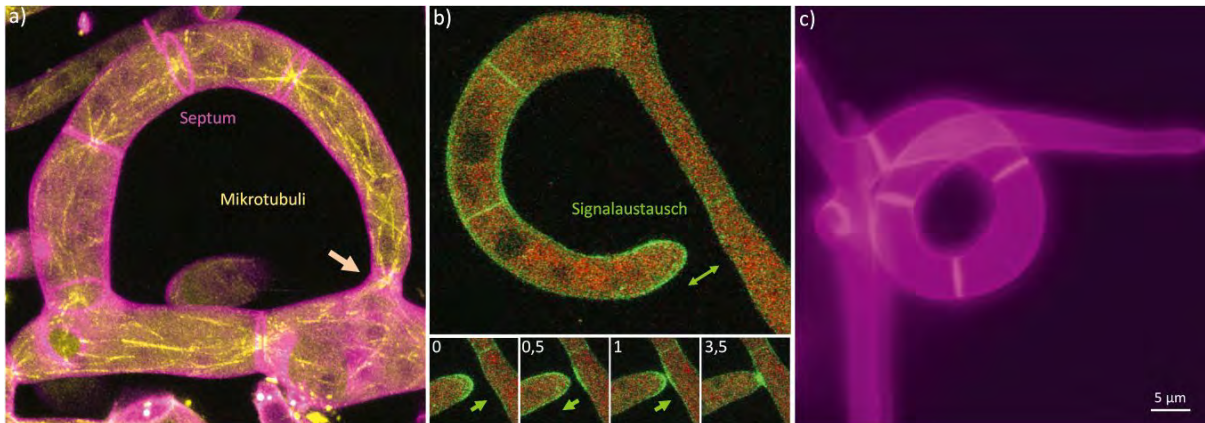


ABB. 3 Fluoreszenzaufnahmen während der Fallenbildung. a) Hier wurden das Mikrotubuli-Zytoskelett in gelb und die Zellwände in pink angefärbt. Es handelt sich um eine 3-D-Aufnahme der Falle. Die Falle besteht aus 4 Kompartimenten, die durch Septen voneinander getrennt sind. Der Pfeil deutet auf die Fusionsstelle hin. Die untere Hyphe ist der von oben kommenden Hyphe entgegengewachsen. b) Das Soft-Protein wurde mit GFP markiert und ist in der Hyphenspitze an der Membran zu sehen. Die untere Bildfolge zeigt den Wechsel der Rekrutierung des Proteins an die Membran der linken, dann der rechten Hyphe. Die Zahlen geben die Zeit in Sekunden an. c) Wenn das Soft-Protein fehlt, kommt es nicht mehr zum Ringschluss. Die Zellwände wurden hier mit Calcofluor angefärbt. Fotos entnommen aus [2, 9, 10].

bildung. Die Ascarosidkonzentration in der Umgebung steigt mit der Anzahl der Nematoden und hemmt ab einem gewissen Schwellenwert die Athrosporol- und 6-MSA-Synthese, wodurch die Fallenbildung möglich wird (Abbildung 2) [8]. Durch dieses ausgeklügelte System wird gewährleistet, dass Fallen erst dann gebildet werden, wenn viele Nematoden zum Pilz gelockt wurden und der Pilz seine Energie nicht verschwendet.

Wie wird ein Faden zur Schlinge?

Um die Nematoden effizient zu immobilisieren, haben Nematoden-fangende Pilze im Verlauf der Evolution die Eigenschaft erworben, ihr Myzel zu fallenartigen Gebilden umzugestalten. Je nach Spezies können dabei Formen von klebrigen Säulen, Noppen und Schlingen bis zu ganzen Schlingennetzwerken auftreten (Abbildung 1). Bei der Wahrnehmung von Nematoden werden Signalwege im Pilz aktiviert, die die pathogene Phase des Pilzes einleiten und die Fallenbildung induzieren. Sekundäre Messenger wie cAMP aktivieren dann cAMP-abhängige Proteinkinasen (PKA), Ionenkanäle und Mitogen-aktivierte Proteinkinasen (MAPK), die die Regulation verschiedener Transkriptionsfaktoren übernehmen. Dadurch werden Zytoskelett und Zellwand umstrukturiert, damit an einer basalen Hyphe eine neue Hyphenverzweigung entsteht. Die neu gebildete Hyphe muss sich dann krümmen, um eine Schlinge zu bilden. Dies wird durch Komponenten des Zytoskeletts wie Mikrotubuli und Aktin gewährleistet. Bei Zugabe von Aktin-depolarisierenden Substanzen wie Cytochalasin wird der Krümmungsprozess unterbrochen, und es bilden sich längliche Myzelstrukturen anstatt der Schlingen [9] (Abbildung 3).

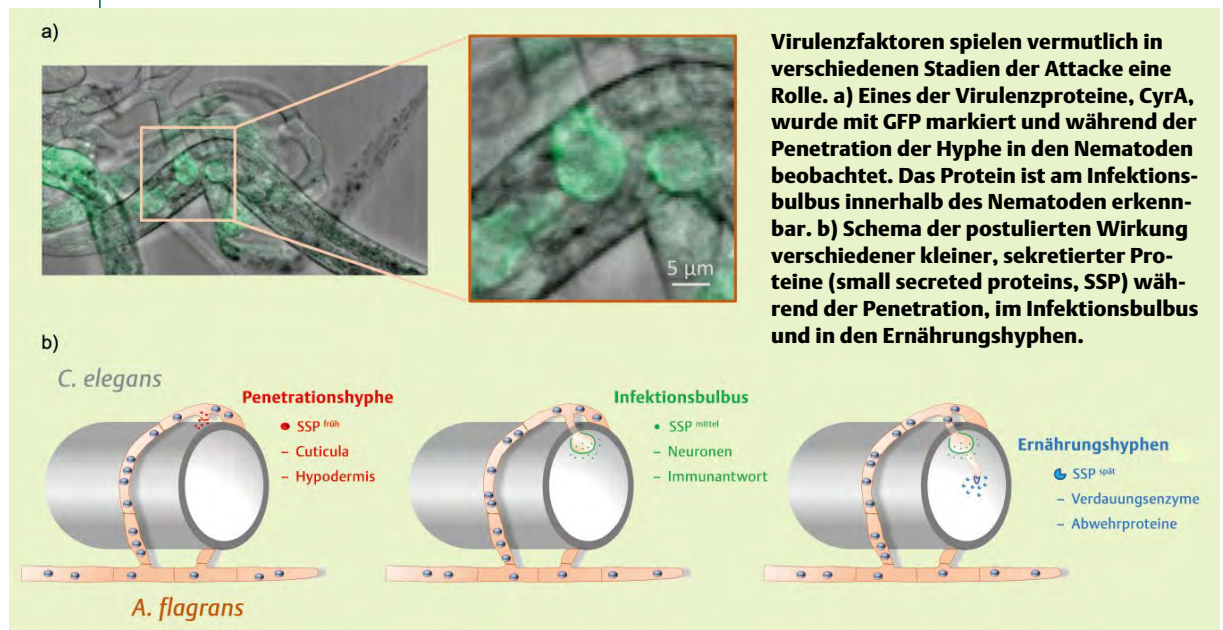
Um eine ringförmige Struktur auszubilden, muss sich die Schlinge jedoch auch noch schließen. Dazu fusioniert die Fallenhyphe mit der basalen Hyphe über einen Pro-

zess, der als Anastomose bezeichnet wird. Interessanterweise wächst die basale Hyphe bereits auf die Fallenhyphe zu, wenn sie sich nähert. Das deutet auf einen Signalaustausch, eine „Kommunikation“, zwischen den Zellen hin. An den beiden Hyphen alternieren zwei physiologische Stadien zwischen „Empfangen“ und „Senden“. Dies wird durch die Lokalisation des SO-Proteins (Soft) anschaulich, welches abwechselnd an den fusionierenden Hyphen rekrutiert wird [10]. Fehlt das Soft-Protein, bleibt die Fusion aus und die ankommende Hyphe „trifft“ nicht mehr auf die basale Hyphe, so dass eine korkenzieherartige Falle entsteht [2] (Abbildung 3). Die chemische Natur der Signale, die zwischen den Hyphen ausgetauscht werden, ist noch nicht aufgeklärt.

Töten auf Raten

Ist der Wurm erst in der Falle, bleibt dieser darin kleben und verstrickt sich, beim Versuch sich zu befreien, immer weiter in dem Netzwerk. Währenddessen beginnt der Pilz bereits eine Penetrationshyphe auszubilden und mittels Druck, lytischer Enzyme und weiterer sogenannter ► Virulenzfaktoren in den Wurm einzudringen. Auf genetischer Ebene wird das dadurch deutlich, dass die Gene, die für die Virulenzfaktoren kodieren, verstärkt abgelesen werden. Von besonderem Interesse sind kleine Proteine, die keine offensichtliche Enzymaktivität haben, sondern z. B. auf das Abwehrsystem des Wirtes Einfluss nehmen. Solche kleinen Proteine sind bereits bei pflanzenpathogenen Pilzen wie dem Maisbrandpilz *Ustilago maydis* als ► Effektorproteine bekannt [11]. Dadurch ist es dem Pilz möglich, eine längere Zeit in der Maispflanze zu wachsen und diese zu besiedeln. Die Deletion von einzelnen dieser kleinen Proteine führt bei den meisten Pilzen zu kaum wahrnehmbaren Veränderungen der Virulenz, was auf ein Zusammenspiel oder die Bildung von Komplexen mehre-

ABB. 4 | BEDEUTUNG VON VIRULENZFAKTOREN



rer Effektoren hindeutet, welche schlussendlich die Pathogenität des Pilzes ausmacht. Bei NFP wurde erst kürzlich ein erstes kleines sekretiertes Protein als Virulenzfaktor beschrieben [12] (Abbildung 4). *A. flagrans* kann mehr als 200 solcher Proteine bilden. Während der Infektion wird eine Penetrationshyphe ausgebildet, welche die Cuticula und Epidermis des Nematoden durchdringt. Anschließend bildet sich ein sogenannter Infektionsbulbus, von dem aus Ernährungshyphen auswachsen und den Wurm kolonisieren und von innen verdauen. Der Wurm wehrt sich zunächst und versucht sich loszureißen, doch durch noch unbekannte Mechanismen wird der Wurm zunehmend paralysiert und schlussendlich getötet.

Die Analyse der Lokalisation von CyrA mittels fluoreszenter CyrA-GFP-Fusionsproteine zeigte eine Akkumulation des Proteins am Infektionsbulbus. Die Deletion von *cyrA* führte zu einer Verzögerung des Einsetzens der Paralyse, was auf eine Rolle von CyrA während der frühen Infektionsphase hindeutet. Eine mögliche Funktion des Proteins könnte die Beeinflussung der Nervenfunktionen von *C. elegans* sein, was dem Pilz die Kolonisierung erleichtert. Aufgrund des Vorkommens sehr vieler putativer Virulenzproteine im Sekretom von *A. flagrans* ist es möglich, dass in jeder Phase der Infektion andere Virulenzprotein-Cocktails gemischt und dem Wurm verabreicht werden. So werden während der Penetration wohl eher lytische Enzyme wie Cutinasen sekretiert, in der zweiten Phase nach dem Eindringen, während der Bildung des Infektionsbulbus, werden Proteine sekretiert, welche die Immunantwort des Nematoden unterdrücken und dessen Nervensystem attackieren. Während der letzten Phase, wenn die Ernährungshyphen den Nematoden durchwachsen, werden hauptsächlich lytische Enzyme sekretiert, die Proteine, DNA und andere Zellkomponenten angreifen und so den Nematoden

dem Pilz als Nahrungsquelle zugänglich machen (Abbildung 4). Der Einsatz vieler kleiner sekretierter Proteine ist für den Pilz vorteilhaft, weil sich der Nematode der Attacke nur schwer durch Mutation eines Zielmoleküls entziehen kann. Das Prinzip des „Wettrüstens“ in der Evolution wird als ► Red-Queen-Hypothese beschrieben.

Der Nematode wehrt sich

Obwohl die Pilze die Nematoden mit einer Vielzahl von kleinen „Waffen“ angreifen, wehren sich die Nematoden. Sie besitzen allerdings nur ein angeborenes Immunsystem, zu dem z. B. die Cuticula gehört oder antimikrobielle Peptide, die sie zur Abwehr von Bakterien einsetzen. Daneben haben sie verschiedene Vermeidungsreaktionen entwickelt, um Pathogenen zu entgehen. *C. elegans* hat eine Aversion gegenüber pathogenen Bakterien, wohingegen nicht-pathogene Bakterien eine anziehende Wirkung auf den Fadenwurm ausüben. Nematoden verfügen zudem über kein adaptives Immunsystem wie die B-Lymphozyten (Gedächtniszellen) beim Menschen.

Da Bakterien die Hauptnahrungsquelle vieler Nematoden darstellen, befallen pathogene Bakterien oft den gastrointestinalen Trakt der Tiere. Pilze wie *Drechmeria coniospora* dagegen haben spezialisierte Sporen, die an der Epidermis der Nematoden haften bleiben und den Nematoden von außen angreifen (Abbildung 5). Es ist nur unzureichend verstanden, durch welche Rezeptoren die Erkennung der Pathogene erfolgt. Durch Signalkaskaden werden Abwehrmechanismen aktiviert, die zur Bekämpfung der Infektionen dienen [13]. Dazu gehört zum Beispiel die Produktion von reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) und die Expression antimikrobieller Peptide. Vor allem die Expression von putativ antimikrobiellen Peptiden wie *neuropeptide-like proteins* (NLPs) und Caenacine

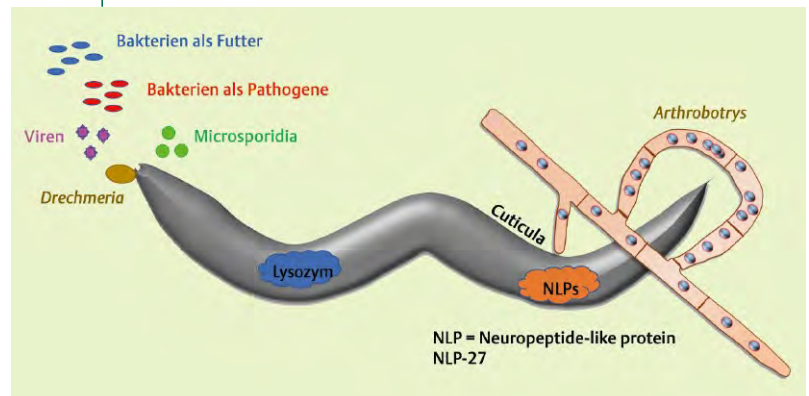
(CNCs) werden von den Nematoden während der Infektion mit Pilzen induziert und spielen wahrscheinlich auch eine wichtige Rolle während der Interaktion mit Nematoden-fangenden Pilzen [14]. Die genaue Funktion dieser interessanten kleinen Proteine, die von *C. elegans* gebildet werden, wird zurzeit erforscht.

Anwendung der NFP in der nachhaltigen, pestizidfreien Landwirtschaft

Pflanzenparasitäre Nematoden befallen häufig Nutzpflanzen wie Getreide, Zuckerrüben oder auch Wein. Durch den Nematodenbefall kommt es zu großen Ernteverlusten und dadurch bedingt zu großen finanziellen Verlusten, was vor allem die Entwicklungsländer stark beeinträchtigt. Eine große Gruppe der pflanzenparasitären Nematoden ist die Gattung *Meloidogyne*. Sie gehören zu den Wurzelgallen-nematoden, welche eine Vielzahl an Nutzpflanzen wie Möhre, Getreide oder die Kartoffel befallen können und damit eine der schädlichsten Gattungen innerhalb dieser Nematodengruppe sind. Alle Nematoden dieser Gruppe besitzen ein Stylet – eine Nadel, welche mit der Speiseröhre, dem Oesophagus, verbunden ist. Mit diesem Werkzeug penetrieren sie die Wurzelzellen, um sich von der Pflanze zu ernähren. Nematoden der Gattung *Meloidogyne* dringen in die Wurzel der Pflanze ein und lösen die Bildung von Gallen in ihnen aus. Dadurch kommt es zu Symptomen wie vermindertem Wachstum, Welken oder Gelbfärbung der Blätter. Ein weiterer Nachteil, den der Befall mit Nematoden nach sich zieht, ist, dass es durch die allgemeine Schwächung der Pflanze zu sekundären Infektionen durch andere Pflanzenpathogene kommen kann [15]. Ein weiterer pflanzenparasitärer Nematode ist *Xiphinema index*. Dieser befällt hauptsächlich Weinreben. Er lebt ektoparasitär und ernährt sich von den Wurzelspitzen der Pflanzen. Den größten Schaden richtet er allerdings indirekt mit der Übertragung des Virus für die Reiskrankheit an. Der Nematode nimmt das Virus beim Saugen an erkrankten Pflanzen auf. Das Virus befindet sich dann auf dem Stylet und wird beim Einstechen in die Wurzel einer neuen Weinrebe auf diese übertragen. Dadurch kommt es bei den Weinreben zu vermindertem Wachstum, Blattverformungen und damit einhergehend zur Verminderung des Ertrages [16].

Aber nicht nur Pflanzen haben mit Nematoden zu kämpfen, sondern auch Tiere. Bei grasenden Schafen gelangen die im Boden lebenden Nematoden durch die Nahrungsaufnahme in den Gastrointestinaltrakt, wo sie als Darmparasiten leben. Einer der bedeutendsten Magen-Darm-Parasiten ist der rote Magenwurm *Haemonchus contortus*. Er ist hochpathogen, nistet sich im Labmagen der Tiere ein und ernährt sich von deren Blut. Infolgedessen kommt es bei den Schafen häufig zu Symptomen wie Abmagerung, Milchrückgang und Durchfall. Dies hat zur Folge, dass die Produktivität und Reproduktion stark beeinträchtigt wird und es zu hohen finanziellen Verlusten in der Viehzucht kommt. Auch die Gefahr der immer wie-

ABB. 5 | VERTEIDIGUNGSSTRATEGIEN VON NEMATODEN



Nematoden wie *C. elegans* kommen in ihrem Habitat mit vielen Pathogenen in Kontakt. Bakterien dienen als Futter, aber einige Bakterien sind auch pathogen, wenn sie vor dem Eintritt in den Darm nicht zerkleinert werden. Microsporidien und zumindest ein Virus sind ebenfalls als Pathogene beschrieben. Zusätzlich ist der Nematode der Attacke von außen wie z. B. durch NFP ausgesetzt. Dabei infiziert *Drechmeria* die Nematoden durch die Körperöffnungen, während *Arthrobotrys* an jeder Stelle von der Falle ausgehend in den Körper eindringen kann. Der Nematode wehrt sich durch eine angeborene Immunität. Dazu gehört die Cuticula, die nicht leicht durchdrungen werden kann, ebenso wie Lysozym, das Bakterien im Darm angreifen kann oder Peptide mit antimikrobieller Aktivität wie z. B. NLPs.

derkehrenden Infektionen ist bei grasenden Tieren sehr hoch, denn die Eier der Nematoden werden zusammen mit dem Kot ausgeschieden, wo die Larven dann schlüpfen und im Boden leben. Andere Tiere auf derselben Weide können dann die geschlüpften Larven der Nematoden durchs Gras wiederaufnehmen und infizieren sich [17].

Durch pflanzenparasitäre Nematoden und Nematoden, die den Gastrointestinaltrakt grasender Nutztier wie Schafe oder Rinder befallen, kommt es zu großen ökonomischen Verlusten bei der Ernte der Pflanzen und Produktgewinnung aus Tieren. Da die Bevölkerung der Erde aber immer weiter ansteigt, wird auch die Landwirtschaft und Viehzucht als Nahrungsgrundlage der Menschen immer wichtiger. Um den Nematodenbefall bei Pflanzen zu kontrollieren, wurden häufig chemische Nematizide verwendet. Diese sind allerdings wegen ihrer schädlichen Wirkung auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt nicht mehr zugelassen. Eine weitere Möglichkeit zur Bekämpfung der Nematoden ist die Anwendung der Fruchtfolge, bei der erst nach einigen Jahren dieselbe Kulturpflanze wieder auf das Feld ausgebracht wird, wenn die pathogenen Nematoden aufgrund der fehlenden Wirtspflanze abgestorben sind. Diese Methode ist im Weinanbau allerdings nicht möglich, da Weinreben viele Jahre im Feld verbleiben müssen, um Trauben zu liefern.

Auch bei Nutztieren wurden chemische Wurmmittel zur Bekämpfung der Nematoden eingesetzt. Durch die Anwendung dieser Wurmmittel kam es allerdings zur Bildung von Resistenzen bei den Nematoden. Da sich die Nematoden schneller an die einsetzbaren Wurmmittel anpassen als neue entwickelt werden können, müssen die

ABB. 6 | ANWENDUNG VON *A. FLAGRANS* IN DER TIERHALTUNG



Die Schafe werden mit Pellets gefüttert, die Chlamydosporen von *A. flagrans* enthalten. Die Sporen keimen im Tierverdauungstrakt nicht aus und werden mit dem Kot ausgeschieden. Wenn das Schaf mit Nematoden befallen ist, scheidet es auch die Eier der Nematoden aus. Aus den Eiern schlüpfen im Kot neue Larven der Nematoden. Wenn die Pilzsporen auskeimen, bilden sie Fallen und fangen die Larven. Dadurch wird die Reinfektion der grasenden Schafe vermindert. Verändert nach [21] und freepik.com.

Landwirte auf andere Methoden zur Eindämmung des Nematodenbefalls zurückgreifen [15, 17].

Eine gute, perspektivenreiche Möglichkeit im Kampf gegen schädliche Nematoden ist die Nutzung der biologischen Schädlingsbekämpfung. Dabei werden Organismen genutzt, die entweder selbst oder durch ihre ausgeschie-

denen Stoffe den Schädlingen schaden. Hierbei zeigen NFP ein großes Potenzial als biologisches und umweltverträgliches Wurmmittel. Hauptsächlich in der Viehzucht werden NFP bereits zur biologischen Schädlingsbekämpfung eingesetzt. Ein solches Produkt ist BioWorma®, hergestellt von International Animal Health Products Pty Ltd in Australien. Gibt man den mit Nematoden befallenen Tieren Chlamydosporen von *A. flagrans* zu fressen, kann dies den Befall mit Nematoden vermindern. Die Sporen überstehen die Passage durch den Magen-Darm-Trakt des Tieres und werden mit dem Kot ausgeschieden. Dort keimen die Sporen aus und der Pilz wächst im Boden heran, wo er dann die Nematoden erkennen und fangen kann. Durch die Verminderung der Nematodenanzahl wird auch die Infektion der Tiere reduziert (Abbildung 6). Auch bei Pflanzen ist eine Anwendung der Nematoden-fangenden Pilze denkbar. So könnten auch hier Sporen im Boden der Felder ausgebracht werden, um dann dort zu keimen und die Nematodenzahl zu verringern [17, 18]. Nematoden-fangende Pilze als biologische Schädlingsbekämpfung sind also eine aussichtsreiche Alternative zu chemischen Antihelminthica und Pestiziden für die Bekämpfung von Nematoden in der Landwirtschaft und Viehzucht.

Zusammenfassung

Nematoden-fangende Pilze kommen ubiquitär vor allem in Böden vor. Sie leben von abgestorbenem, organischem Material, können aber eine räuberische Lebensweise einschlagen, wenn die Nährstoffe knapp werden. Dann bilden sie je nach Spezies unterschiedliche Fallentypen aus. Arthrobotrys flagrans bildet klebrige Fallennetzwerke. Die Fallenebildung wird durch das Zusammenspiel mehrerer Nematoden-eigener Pheromone und pilzlichen Signalstoffen reguliert. Wenn sich ein Nematode in dem Fallennetzwerk verfangen hat, dringt eine Penetrationshyphe durch die Cuticula und die Epidermis in den Wurmkörper ein. Dort verdickt sich die Hyphe zu einem Bulbus und wächst als Ernährungshyphe durch den Nematodenkörper. Durch lytische Enzyme wird der tierische Körper zersetzt und die Nährstoffe vom Pilz aufgenommen. Im späten Stadium der Attacke wachsen Hyphen aus dem Nematoden in die Umgebung aus. Bei der Penetration und vermutlich auch bei der weiteren Besiedlung des Nematoden spielen kleine, sekretierte pilzliche Proteine eine wichtige Rolle als Virulenzfaktoren. Die Nematoden-Pilz-Interaktion ist nicht nur ein faszinierendes Grundlagenforschungsgebiet, sondern die Pilze können auch zur Bekämpfung schädlicher Nematoden eingesetzt werden.

Summary

Predatory fungi with pest control potential

Nematode-trapping fungi are ubiquitous, especially in soil. They live on dead, organic matter, but can adopt a predatory lifestyle when nutrients become scarce. Then they form different types of traps depending on the species. Arthrobotrys flagrans forms sticky trap networks. The formation

GLOSSAR

Effektorproteine: Ähnlich wie Virulenzfaktoren sind Effektoren häufig an organismischen Interaktionen beteiligt. Auch hier spielen kleine, sekretierte Proteine eine wichtige Rolle. Effektoren findet man vor allem in biotrophen oder symbiontischen Interaktionen.

Pheromone: Kleine Moleküle, die als Signale zwischen verschiedenen Organismen verwendet werden.

Pilzhyphe: Fadenförmige Wuchsform der Pilze. Die Pilzhypen sind häufig durch Septen in Kompartimente unterteilt, die mit Zellen bei höheren Organismen vergleichbar sind. Allerdings bleiben die Kompartimente durch Cytoplasmabrücken miteinander verbunden.

Red-Queen-Hypothese: Eine wissenschaftliche Hypothese der Evolutionsbiologie, wonach Arten sich ständig weiterentwickeln müssen, um im Konkurrenzdruck nicht unterzugehen. Im Falle von Räuber-Beute-Beziehungen entwickelt der Räuber neue „Waffen“, woraufhin die Beute Abwehrmechanismen hervorbringt. Diese Vorgänge wiederholen sich immer wieder.

Virulenzfaktoren: Faktoren, die für die Besiedlung eines Wirtes wichtig sind. Das können organische Moleküle wie Toxine, aber auch Proteine sein. Von besonderem Interesse sind derzeit kleine, sekretierte Proteine, die keine enzymatische Aktivität aufweisen.

of traps is regulated by the interaction of several nematode-specific pheromones and fungal signaling molecules. When a nematode becomes entangled in the trap network, a penetrating hypha enters through the cuticle and epidermis into the nematode body. There the hypha thickens into a bulb and grows through the nematode body as a trophic hypha. The animal body is decomposed by lytic enzymes and the nutrients are absorbed by the fungus. In the late stage of the attack, hyphae grow out of the nematode into the environment. Small, secreted fungal proteins play an important role as virulence factors during penetration and presumably also during further colonization of the nematode. Not only is the nematode fungus interaction a fascinating area of basic research, but the fungi can also be used to control harmful nematodes.

Danksagung

Wir bedanken uns bei allen Mitarbeitern der Abteilung für die exzellente Arbeit und die Hilfe bei der Etablierung des experimentellen Systems. Besonderer Dank gilt Nicole und Valentin Wernet, die die Forschungsrichtung mit viel Enthusiasmus und Engagement mit aufgebaut haben. Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) und dem Chinese Scholar Council (CSC) für die finanzielle Unterstützung der Arbeiten.

Schlagworte

Pilze, Nematoden, Räuber, Virulenzfaktoren, Zellkommunikation, Zellfusion, nachhaltige Landwirtschaft, Pilze als Schädlingsbekämpfungsmittel

Literatur

- [1] A. A. Brakhage (2022). *Lebensbedrohliche Pilzinfektionen*. Biol Unserer Zeit 3, 268.
- [2] L. Youssar et al. (2019). *Intercellular communication is required for trap formation in the nematode-trapping fungus Duddingtonia flagrans*. PLoS Genet. 15, e1008029.
- [3] X. Jiang, M. Xiang, X. Liu (2017). *Nematode-trapping fungi*. Microbiol. Spectr. 5, doi: 10.1128/microbiolspec.FUNK-0022-2016.
- [4] J. van den Hoogen et al. (2019). *Soil nematode abundance and functional group composition at a global scale*. Nature 572, 194–198.
- [5] B. Nordbring-Hertz, H.B. Jansson, A. Tunlid (2011). *Nematophagous Fungi*. San Francisco: John Wiley & Sons Ltd.
- [6] J. Srinivasan (2008). *A blend of small molecules regulates both mating and development in Caenorhabditis elegans*. Nature 454, 1115–1118.
- [7] Y. P. Hsueh et al. (2013). *Nematode-trapping fungi eavesdrop on nematode pheromones*. Curr. Biol. 23, 83–86.
- [8] X. Yu et al. (2021). *Fatal attraction of Caenorhabditis elegans to predatory fungi through 6-methyl-salicylic acid*. Nat. Commun. 12, 5462.
- [9] V. Wernet, J. Wäckerle, R. Fischer (2022). *The STRIPAK component SipC is involved in morphology and cell-fate determination in the nematode-trapping fungus Duddingtonia flagrans*. Genetics 220, iyab153.
- [10] H. H. Hammadeh et al. (2022). *A dialog-like cell communication mechanism is conserved in filamentous ascomycete fungi and mediates interspecies interactions*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 119, e2112518119.
- [11] N. Ludwig et al. (2021). *A cell surface-exposed protein complex with an essential virulence function in Ustilago maydis*. Nat. Microbiol. 6, 722–730.

- [12] N. Wernet, V. Wernet, R. Fischer (2021). *The small-secreted cysteine-rich protein CyrA is a virulence factor of Duddingtonia flagrans during the Caenorhabditis elegans attack*. PLoS Pathog. 17, e1010028.
- [13] M. A. Ermolaeva, B. Schumacher (2014). *Insights from the worm: the C. elegans model for innate immunity*. Semin. Immunol. 26, 303–309.
- [14] N. Pujol et al. (2008). *Anti-fungal innate immunity in C. elegans is enhanced by evolutionary diversification of antimicrobial peptides*. PLoS Pathog. 4, e1000105.
- [15] G. Ahmad et al. (2021). *Biological control: a novel strategy for the control of the plant parasitic nematodes*. Antonie Van Leeuwenhoek 114, 885–912.
- [16] J. T. Jones et al. (2013). *Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology*. Mol. Plant Pathol. 14, 946–961.
- [17] K. Healey et al. (2018). *Field evaluation of Duddingtonia flagrans IAH 1297 for the reduction of worm burden in grazing animals: Tracer studies in sheep*. Vet. Parasitol. 253, 48–54.
- [18] M. S. Soliman et al. (2021). *Suppression of root-knot nematode Meloidogyne incognita on tomato plants using the nematode trapping fungus Arthrobotrys oligospora Fresenius*. J. Appl. Microbiol. 131, 2402–2415.
- [19] B. Nordbring-Hertz, H. B. Jansson, A. Tunlid (2006). *Nematophagous fungi*. Encyclop. Life Sci. doi: 10.1038/ngp.els.0004293.
- [20] R. Fischer, N. Requena (2022). *Small secreted proteins as virulence factors in nematode-trapping fungi*. T. Microbiol. 30, 616–617.
- [21] V. Wernet, N. Wernet, R. Fischer (2021). *Räuberische Pilze mit Anwendungspotenzial*. Biospektrum 7, 686–689.

Verfasst von:



Jennifer Emser (2. v. l.), Marius Kriegl (r.) und Anna-Lena Klemke (l.) sind Doktoranden in der AG und beschäftigen sich mit verschiedenen molekularen und zellbiologischen Aspekten der Pilz-Nematoden-Interaktion. Alle drei haben am KIT Biologie studiert und auch ihre Masterarbeit in diesem Forschungsgebiet absolviert.

Reinhard Fischer (2. v. r.) ist seit 2004 Professor für Mikrobiologie am Institut für Angewandte Biowissenschaften des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Er hat an der Philipps-Universität Marburg Biologie studiert. Nach einer Postdoktorandenzeit an der University of Georgia, Athens (USA) ist er nach Marburg als Gruppenleiter an die Universität und das MPI für terrestrische Mikrobiologie zurückgekehrt. Er beschäftigt sich mit verschiedenen Aspekten der molekularen Mykologie und hat Aspekte der Zellbiologie und der phytochromabhängigen Lichtwahrnehmung im Modellpilz Aspergillus nidulans erforscht. Seit 2018 hat er zusätzlich ein neues Forschungsfeld in seiner Abteilung etabliert, in dem er alle Erfahrungen mit dem Modellpilz auf das Projekt der Nematoden-fangenden Pilze anwenden kann.

Korrespondenz

Prof. Dr. Reinhard Fischer
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Institut für Angewandte Biowissenschaften
 Abt. Mikrobiologie
 Fritz-Haber-Weg 4, 76131 Karlsruhe
 Email: reinhard.fischer@kit.edu
 Web: <https://www.iab.kit.edu/microbio/>

Das Unmögliche versuchen

Letzte Chance für die Albatrosse

PETER RYAN



Die Landschaft der Marion-Insel besteht aus einem Mix aus älterer grauer Lava, überlagert von schwarzen Lavaströmen jüngerer Alters und roten Schlackekegeln. Dichtere Vegetation ist auf die Küstenebenen beschränkt.

Weit draußen im offenen Meer zwischen Südafrika und der Antarktis, ununterbrochen umtost von den Stürmen der roaring forties, bieten die düster-schönen ozeanischen Inseln Marion und Prince Edward Heimat für einen unglaublichen Reichtum an Seevögeln und Meeressäugern. In diesem abgelegenen und kargen Lebensraum bedroht ein winziger, eingeführter Räuber die Populationen der Seevögel, insbesondere der Sturmvögel und Albatrosse. Das natürliche Gleichgewicht auf der Insel wiederherzustellen, erfordert massive Artenschutzmaßnahmen.

Die Antarktis ist eine der letzten großen Wildnisse der Erde und dies, obwohl der Großteil des Kontinents eine gefrorene Wüste ist. Im Vergleich dazu sind die Meeresgebiete rund um die Antarktis voller Leben. Die Südhalbkugel besitzt einen viel größeren Meeresanteil als die Nordhalbkugel. Nirgends ist dies augenscheinlicher als zwischen den mittleren und höheren Breitengraden. Zwischen 40° und 60° südlicher Breite sind 98 Prozent der Südhalbkugel von Ozean bedeckt, weshalb die wenigen

Inseln besonders wichtig für Seevögel und Robben sind, die zur Fortpflanzung auf Land angewiesen sind. Da diese warmblütigen Beutegreifer die Raubfische in den kälteren Regionen der Weltmeere an Zahl sogar noch übertreffen, finden sich einige der größten Wildtieransammlungen auf diesen einsamen Landflecken.

Im afrikanischen Sektor des Südpolarmeeres gibt es nur eine Handvoll Inseln. Jene, die der afrikanischen Küste am nächsten liegen, sind die subantarktischen Prince-Edward-Inseln (Abbildung 1), 2.000 km südlich der afrikanischen Südküste. Die Antarktis liegt nochmals 2.300 km südlicher, die nächsten Inseln stellt der Crozet-Archipel 950 km nach Osten. Die Prince-Edward-Gruppe besteht aus zwei Hauptinseln, die 20 km voneinander entfernt sind: die 300 qkm große Marion-Insel und die 65 qkm große Prince-Edward-Insel. Beide sind rezenten vulkanischen Ursprungs. Kleinere Eruptionen werden hin und wieder von der Marion-Insel berichtet.

Die Landbewohner sind wenig artenreich, da sie tausende Kilometer Ozean überwinden mussten. Es gibt nur fünfzehn Blütenpflanzen, von denen einige durch Vögel auf die Inseln verbracht wurden (zum Beispiel das Magellan-Stachelnüsschen, *Acaena magellanica*, aus der Familie der Rosaceae, oder das Zyperngras, *Uncinia compacta*). Im Vergleich dazu gibt es über 200 Arten von Farnen, Moosen, Lebermoosen und Flechten – Pflanzen mit leichten Sporen, die einfach durch den Wind transportiert werden können. *Azorella*-Polster aus der Familie der Dolden-

blütler und Gräser sind die größten Pflanzen der windgepeitschten Küstenebenen. In der polaren Wüste über 400 Höhenmeter gibt es nur wenige Gefäßpflanzen.

Die Vielfalt der Landwirbellosen ist entsprechend übersichtlich mit nur 20 einheimischen Insekten-, zwei Spinnen-, 52 Milben- und 11 Springschwanzarten sowie einer Schneckenart. Interessanterweise sind die meisten Insekten flugunfähig, die beiden Motten-, alle zehn Käfer- und mehrere Fliegenarten eingeschlossen. Diese Arten haben ihre Flugfähigkeit nach Ankunft auf der Insel verloren und sind endemisch, d. h. sie kommen ausschließlich hier vor. Die Raupen der beiden flugunfähigen Motten, die rund fünf Jahre alt werden, spielen eine Schlüsselrolle in der Wiederverwertung von abgestorbenem Pflanzenmaterial. Sie sind in den Nestern der Wanderalbatrosse besonders häufig, wo sie dank des wärmeren Mikroklimas – hervorgerufen durch die Körpertemperatur der Albatrosse – schneller wachsen. Mit dem Schwarzgesicht-Scheidenschnabel (*Chionis minor*, Abbildung 2) existiert unter den Landtieren nur eine einzige Vogelart.

Ein El Dorado der Biodiversität

Im Vergleich zu den Landtieren ist die Anzahl und Vielfalt der Seevögel atemberaubend. Die Inseln beherbergen buchstäblich Millionen Seevögel aus 29 Arten: vier Pinguinarten, fünf Albatrossarten, zwei Riesensturmvogelarten, sieben Sturmvogelarten, zwei Walvogelarten, zwei Lummensturmvogelarten, wenigstens zwei Sturmschwalbenarten, zwei Seeschwalbenarten, die Subantarktiskua (*Stercorarius antarcticus*), die Dominikanermöwe (*Larus dominicanus*) und die Crozetscharbe (*Phalacrocorax melanogenis*, Abbildung 3). Einige weitere Seevogelarten, die nicht auf den Inseln brüten, kommen als Nahrungsgäste vor der Küste vor. Drei Robbenarten, der südliche Seeelefant (*Mirounga leonina*, Abbildung 4) und zwei Pelzrobberarten, pflanzen sich ebenfalls auf den Inseln fort. Die Gewässer um die Inseln herum beherbergen eine Anzahl verschiedener Walarten, unter anderem sind mehrere Gruppen Orcas (*Orcinus orca*) und Zwergblauwale (*Balaenoptera musculus brevicauda*) regelmäßige Besucher.

Obwohl die Inseln schon 1663 entdeckt wurden, kam es erst um 1800 zur ersten Anlandung, als Robbenjäger an Land gingen, um die großen Bestände von Robben und Pinguinen zu plündern. Kleinere Gruppen von Männern wurden für Monate, teilweise sogar Jahre an Land gelassen. Sie lebten von der Insel, während sie Pelzrobberhäute und fässerweise Öl von Robben und Pinguinen sammelten. Als die Robbenjagd 1930 beendet wurde, waren die Bestände stark reduziert. 1950 gab es nur noch wenige subantarktische Seebären (*Arctocephalus tropicalis*) auf der Marion-Insel. Ihre Population hat sich seither auf über 100.000 Individuen erholt, und zusätzlich pflanzen sich rund 6.000 antarktische Seebären (*Arctocephalus gazella*) auf der Insel fort. Im Vergleich dazu nahm der Bestand des südlichen Seeelefanten während des 20. Jahrhunderts

ABB. 1 | LAGE DER PRINCE-EDWARD-INSELN



Die subantarktische Inselgruppe liegt 2.000 km südlich der afrikanischen Südküste. Die beiden Hauptinseln Marion und Prince Edward liegen 20 km voneinander entfernt. Karte: T. Riffel.



ABB. 2 Der Schwarzgesicht-Scheidenschnabel (*Chionis minor*) ist der einzige Landvogel der Insel. Als entfernte Verwandte der Austernfischer sind die einzigen beiden Scheidenschnabelarten der Welt auf die südpolare Inselwelt beschränkt. Sie ernähren sich und ihre Jungen mit Nahrung, die sie von Seevögeln klawen.

IN KÜRZE

- Die Marion-Insel und die hier brütenden 250.000 Seevögel verschiedener Arten sind in massiven Schwierigkeiten. Eingeführte Hausmäuse fressen die Küken mit verheerenden Folgen für die Bestände der Arten.
- Die Ausrottung dieses eingeführten Räubers ist die einzige Chance für die Umkehr dieser Entwicklung und wird vom Mouse-Free Marion Project vorangetrieben.
- Ab einer Summe von rund 60 € (1000 südafrikanische Rand) lassen sich symbolische Anteile an der Insel erwerben. Damit kann jeder das ehrgeizige Mouse-Free Marion Project unterstützen.
- Für finanzielle Zuwendungen aus Deutschland über 300 € erstellt der gemeinnützig anerkannte Caring for Conservation Fund gGmbH (www.c4fund.org) offizielle Spendenbescheinigungen. Die Spenden werden ohne Abzug direkt an das Mouse-Free Marion Project in Südafrika weitergeleitet.



ABB. 3 Die Crozetscharbe brütet auf Klippen der Inseln Prince Edward, Marion und Crozet.



ABB. 4 Ein weiblicher Seeelefant blickt über die Wellen.



ABB. 5 Goldschopfpinguine drängen sich auf der Kildalkey-Bucht aneinander.

durchgehend ab. Die Anzahl der Jungen, die jedes Jahr auf Marion geboren wurden, fiel von mehr als 3.000 in den 1950er Jahren auf kaum 300 in den 1990er Jahren. Während der letzten beiden Jahrzehnte kam es jedoch zu einer Erholung auf bis zu 800 Jungen pro Jahr.

Wenn es um Spektakel geht, sind die Pinguinkolonien kaum zu schlagen. Rund 800.000 Paare brüten auf den beiden Inseln. Königs- (*Aptenodytes patagonicus*) und Goldschopfpinguine (*Eudyptes chrysolophus*, Abbildung 5) brüten in großen, dichten und lauten Kolonien. Beide Arten sind auf Gegenden mit leicht geneigten Stränden angewiesen. Erst einmal im Meer sind die Goldschopfpinguine agiler, und manchmal klettern sie ein paar hundert Meter die Klippen hoch. Da die Pinguine den Boden zertrampeln und mit ihren Ausscheidungen überdüngen, sind die Kolonien beider Arten vegetationsfrei. Felsenpinguine (*Eudyptes chrysocome*) hingegen können an exponierteren, steileren Stellen an Land kommen und sind aus diesem Grund über weite Teile der Küstenlinie verstreut. Alle drei Arten jagen im freien Ozean. Im Vergleich dazu jagt die kleine Population des Eselpinguins (*Pygoscelis papua*) nach Fischen und Krebstieren im Küstenbereich – sie teilen sich diese Nische mit der Crozetscharbe.

Bedrohung durch eingeschleppte Säugetiere

Fast die Hälfte des Weltbestandes des Wanderalbatrosses (*Diomedea exulans*, Abbildung 6) brütet in lockeren Kolonien auf den Küstenebenen der beiden Inseln. Ihre Anzahl hat seit den 1980er Jahren zugenommen und ist derzeit bei rund 1.800 Paaren auf beiden Inseln stabil. Die anderen vier Albatrossarten brüten alle an Klippen oder Steilhängen: rund 11.000 Paare Graukopfalbatrosse (*Thalassarche chrysostoma*), 7.500 Paare Gelbnasenalbatrosse (*Thalassarche carteri*), 2.800 Paare Dunkelalbatrosse (*Pboebetria fusca*, Abbildung 7) und 400 Paare Rußalbatrosse (*Pboebetria palpebrata*). Auch diese Populationen erscheinen dank der Schutzmaßnahmen der Fischflotten stabil, jedoch werden die Küken aller Arten auf der Insel Marion von Mäusen angegriffen (siehe „Ein Negativbeispiel biologischer Bekämpfung“).

Die häufigsten Vögel der Inseln sind die höhlenbrütenden Sturmvogelarten, die selten tagsüber gesehen werden. Sie kommen vor allem nachts an Land, um den Riesensturmvögeln und den Subantarktiskuas zu entgehen, die die Sturmvögel jagen. Die Räuber finden die Erdhöhlen der Sturmvögel durch ihren sehr ausgeprägten Geruchssinn. Die Zahl der Sturmvögel wurde aber vor allem durch die eingeführten Katzen, die von 1948 bis 1991 auf der Marion-



ABB. 6 Die Prince-Edward-Inseln beherbergen 44 Prozent des Weltbestandes des Wanderalbatrosses, der in lockeren Kolonien auf den Küstenebenen der Inseln brütet.



ABB. 7 Rund 2.800 Dunkelalbatrosse brüten auf den Inseln – ein wichtiger Lebensraum für diese bedrohte Art.

Insel lebten, stark reduziert (siehe „Ein Negativbeispiel biologischer Bekämpfung“). So ist die Dichte besetzter Bruthöhlen auf Marion um eine Größenordnung niedriger als auf Prince Edward, wo es keine eingeführten Säugetiere gibt. Die Marion-Insel hat nichtsdestotrotz mehr als 300.000 Sturmvogel-paare, vornehmlich Blausturm-vogel (*Halobaena caerulea*) und kleine Entensturm-vogel (*Pachyptila salvini*). Die Ausrottung der Katzen führte zu einer Erholung der Sturm-vogelzahlen, die jedoch geringer als erwartet ausfiel, weil die Vögel auch von den Mäusen angegriffen werden. Glücklicherweise gibt es inzwischen die Mittel und Möglichkeiten, um die Mäuse auf Marion auszurotten – eine einmalige Maßnahme, die es den Seevogelbeständen der Insel ermöglichen soll, wieder ihre frühere Größe zu erlangen.

Ein Negativbeispiel biologischer Bekämpfung

Nach der Errichtung einer Wetterstation auf der Marion-Insel im Jahr 1948 wurden die von Robbenjägern eingeführten Hausmäuse bald zu ungebeten Gästen. Man brachte deshalb ein paar Katzen auf die Insel, um die Mäuse zu bekämpfen. Leider wurden Katzen und Kater eingeführt und bald kamen die ersten Jungen auf der Insel zur Welt. In den 1970er Jahren töteten ungefähr 2.000 verwilderte Katzen rund 450.000 Seevögel im Jahr, was zur Ausrottung von vier Arten

von Sturmschwalben und Lummensturm-vögeln führte. Die Nahrungsansprüche der Katzen erwiesen sich als breitgefächert, um gezielt als biologische Schädlingsbekämpfer zu fungieren. Aus diesem Grund wurde 1977 ein

DIE GESUNDHEITSWÄCHTER DES OZEANS

Das Monitoring der Bestände von marinen Beutegreifern ist ein wertvoller Indikator für die Gesundheit des umliegenden Südpolarmeer. Über die letzten Jahrzehnte haben die Bestandszahlen der Goldschopf- und der Felsenpinguine um 30 Prozent beziehungsweise 70 Prozent abgenommen. Als wahrscheinliche Ursache gelten lokale ozeanographische Veränderungen um die Inseln. Die Anzahl der subantarktischen Pelzrobben ist ebenfalls in den letzten 15 Jahren stark gesunken ohne einen offensichtlichen Grund. Die Bestandszahlen der Königspinguine (Abbildung 8) blieben bislang weitgehend konstant. Allerdings wird angenommen, dass sie aufgrund der zunehmenden Klimaerwärmung abnehmen werden, da die Königspinguine für ihre Jungen vorwiegend an der antarktischen Polarfront rund 300 Kilometer südlich der Inseln auf Nahrungssuche gehen. Wenn sich diese Front weiter nach Süden verlagert, müssen die Königspinguine zunehmend längere Strecken zurücklegen, um Nahrung für ihre Küken zu finden.



ABB. 8 Die Boggelbucht auf Prince Edward ist der Hauptbrutplatz des Königpinguins.



ABB. 9 Wanderalbatrossküken mit Kopfwunden, die ihnen von Mäusen beigebracht wurden.

Programm zur Ausrottung der Katzen auf der Insel Marion gestartet. Die Ausbringung des Katzenstaupevirus halbierte den Bestand bis 1979. Nachhaltiges Jagen und Fallenstellen in den folgenden zehn Jahren führte im Jahr 1991 zur Ausrottung der Katzen. Dies ermöglichte eine Erholung der höhlenbrütenden Sturmvogelbestände. So kehrten sogar die beiden zuvor auf der Insel ausgestorbenen Lummensturmvogel und die Graurückensturmschwalbe als Brutvögel auf die Insel zurück.

Leider konnten sich die Bestände der erdhöhlenbrütenden Sturmvogel jedoch weniger stark erholen als erwartet, da ihre Eier und Jungen auch von Hausmäusen gefressen werden. Die Nager greifen die Seevögel an, wenn andere Nahrung knapp wird. Seit die Katzen ausgerottet wurden, kam es durch das zunehmend wärmere und trockenere Klima jeden Sommer zu immer höheren Bestandsspitzen der Mäuse, was wiederum zu einem Rückgang der Wirbellosen als Mäusenahrung führte. Das Ergebnis waren enorme Mengen an ausgehungerten Mäusen im Frühwinter. Die ersten Angriffe von Mäusen erfolgten 2003 auf Wanderalbatrossküken und 2009 auf Dunkelalbatrosse. Ein dramatischer Anstieg der Angriffe auf Albatrossküken wurde 2015 beobachtet – im trockensten Jahr, das je auf der Insel gemessen wurde. Seit diesem Jahr werden jedes Jahr viele Albatrossküken angegriffen (Abbildung 9), wodurch die Dringlichkeit zunimmt, Mäuse auf der Insel auszurotten.

Das *Mouse-Free Marion Project* sammelt Spenden für einen großen Ausrottungsversuch im Winter 2024. Weitere Informationen finden sich unter www.mousefree-marion.org. Deutsche Spendenbescheinigungen stellt der Caring for Conservation Fund gGmbH www.c4cfund.org aus und leitet Spenden direkt nach Südafrika weiter.

Zusammenfassung

Die zu Südafrika gehörende Marion-Insel ist Teil des Prince-Edward-Archipels und liegt in der subantarktischen Zone

zwischen Südafrika und der Antarktis. Die Marion-Insel beherbergt eine Vielzahl an brütenden Seevögeln, inklusive mehrerer Albatros-, Sturmvogel- und Pinguinarten – darunter etwa 33.500 Brutpaare von fünf Albatrosarten, wobei 1.600 Brutpaare auf den bedrohten Wanderalbatros entfallen. Bereits 1948 wurden große Teile der Seevogelbrutkolonien, insbesondere jene der Sturmvogel, durch eingeführte Katzen stark beeinträchtigt. Nach dem Ausrotten der verwilderten Katzen in den 1990er Jahren entwickelten sich eingeführte Hausmäuse zu einem weiteren Problem. Diese fressen bis heute auf dem Nest sitzende Jung-Albatrosse und -Sturmvoegel und entwickeln sich zu einer großen Gefahr vieler Brutkolonien auf der Insel.

Summary

Against the odds – saving Marion Island's sea birds

The South African Marion Island is part of the Prince Edward Archipelago and located in the sub-Antarctic Zone between South Africa and Antarctica. Marion Island is home to a diverse number of breeding seabirds including several species of albatross, petrels, and penguins – amongst them, about 33,500 breeding pairs of five albatross species of which 1,600 pairs consist of Wandering Albatrosses. As early as 1948, a large proportion of the breeding colonies, especially petrels, were severely affected by introduced cats. After the eradication of the feral cats in the 1990s, introduced house mice became another problem. To this day, the mice feed on albatross and petrel chicks and are becoming a serious threat to a large proportion of the present breeding colonies.

Schlagworte

Seevogelschutz, Marion-Insel, *Mouse-Free Marion Project*, Wanderalbatros, invasive Arten, Inselökosysteme

Verfasst von:



Prof. Dr. Peter Ryan, Jahrgang 1962, hat an der Universität von Kapstadt in Zoologie promoviert und ist Professor am dortigen Percy FitzPatrick Institute of African Ornithology. Der vorliegende Artikel erschien in der Januar-März-Ausgabe 2022 des Magazins BIRDLIFE. Er wurde aus dem Englischen übersetzt von Dr. Michael Riffel, einem Mitglied des Editorial Boards der BiUZ.

Korrespondenz

Prof. Dr. Peter Ryan
Percy FitzPatrick Institute of African Ornithology
University of Capetown
Private Bag X3
Rondebosch 7701,
Cape Town
Südafrika
E-Mail: peter.ryan@uct.ac.za

Einen Vortrag von Prof. Peter Ryan zur Mäuseplage auf der Marion-Insel finden Sie unter <https://www.youtube.com/watch?v=DARwd0cnV4c>.

Mit Hilfe der körpereigenen Abwehr gegen Krebs Kampf der Zellen

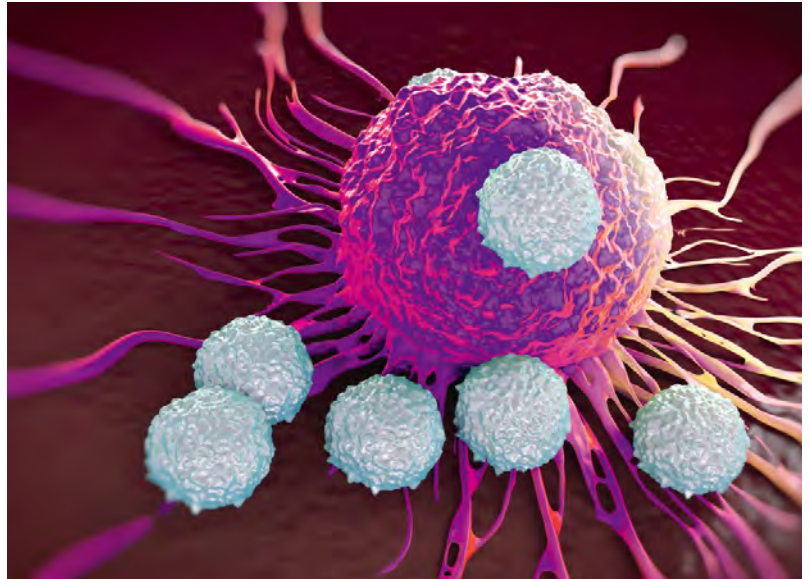
PHILIPP IVANYI

Kann unser Immunsystem gegen Krebs vorgehen? Diese Frage stellen sich Wissenschaftler und Ärzte schon lange. Das Problem: Krebszellen nutzen verschiedenste Mechanismen, um einer Erfassung und Bekämpfung durch die körpereigene Abwehr zu entgehen. Dennoch ist es in den vergangenen Jahren gelungen, medikamentöse Therapieansätze zu entwickeln, die unser Immunsystem so unterstützen, dass es Krebszellen erfolgreich bekämpfen kann. Doch wie genau funktionieren diese immunonkologischen Ansätze, die sich mittlerweile zu einem neuen Standard in der Krebstherapie entwickelt haben?

Jährlich erkranken fast eine halbe Million Menschen in Deutschland neu an Krebs. Mit etwa 230.000 Todesfällen pro Jahr stellt Krebs dabei die zweithäufigste Todesursache dar [1]. Doch damit nicht genug: Eine Krebserkrankung ist mit großen körperlichen und psychischen Belastungen für die Patienten und deren Angehörige verbunden. Schmerzen, schwere Nebenwirkungen der Therapie, Einschränkungen im Alltag und Todesangst begleiten viele Krebspatienten durch den Alltag. Dabei entsteht Krebs durch körpereigene Zellen. Durch die Anhäufung multipler genetischer Veränderungen (Mutationen) werden aus normalen Zellen Tumorzellen, die sich unkontrolliert vermehren und dabei in gesundes Gewebe eindringen und dieses zerstören [2]. Außerdem umgehen Krebszellen die Mechanismen des Körpers, die normalerweise dafür sorgen, dass entartete Zellen absterben und keinen Schaden im Körper anrichten. Zu diesen Vorgängen gehört auch unsere Immunabwehr.

Unser Immunsystem: (K)eine Waffe gegen Krebs?

In erster Linie besteht die Aufgabe unseres Immunsystems darin, den Körper vor Krankheitserregern – also körperfremden Zellen – zu schützen. Darüber hinaus erkennt das Immunsystem jedoch auch beschädigte körpereigene Zellen, sofern diese über Merkmale verfügen, die auf eine



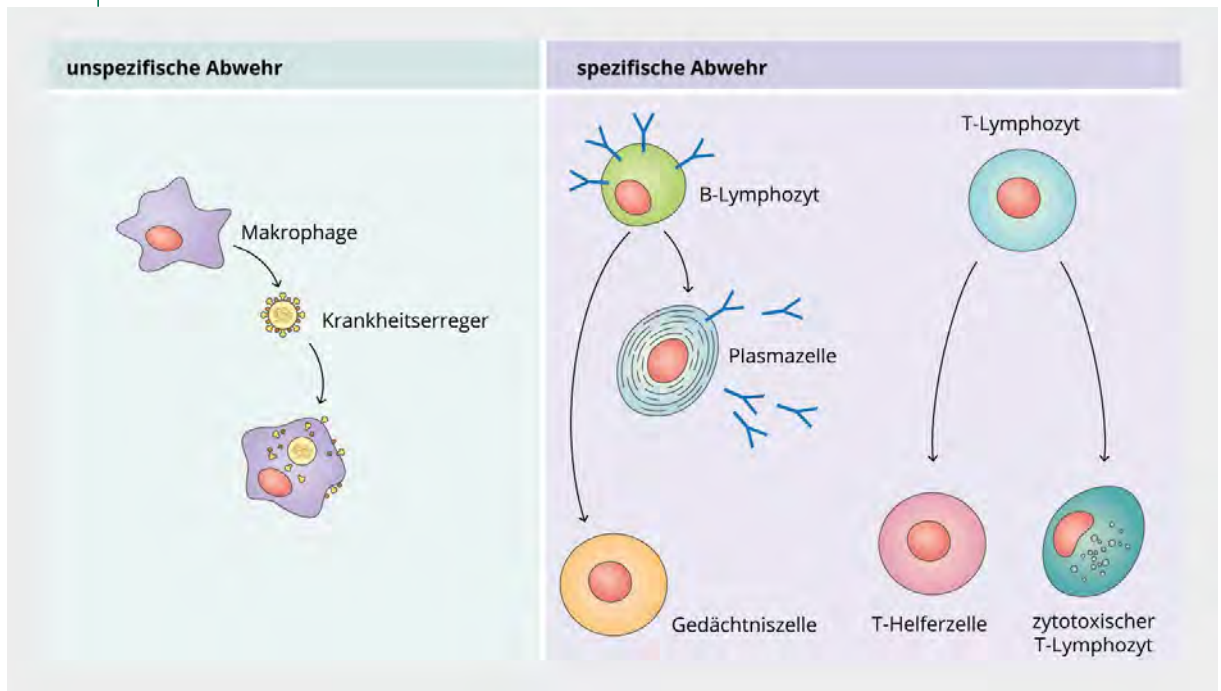
Eine Krebszelle wird von zytotoxischen T-Zellen angegriffen. Bild: iStock-486570034.

gestörte Zellfunktion hinweisen. Dabei kann zwischen zwei Arten der zellulären Immunantwort unterschieden werden: unspezifische und spezifische Immunantwort (siehe Abbildung 1) [3].

Die unspezifische Immunantwort bildet einen ersten Abwehrmechanismus gegen in den Körper eingedrungene pathogene Mikroorganismen wie Bakterien oder Viren und Fremdzellen. Die wichtigsten Immunzellen hierbei sind ► Makrophagen und deren Vorläuferzellen, die Monozyten, welche frei im Kreislaufsystem beweglich sind und Bakterien, Viren und Tumorzellen durch Phagozytose aufnehmen können. Bei der Phagozytose werden die aufzunehmenden Strukturen durch die Zellmembran der Makrophagen umschlossen. Durch anschließende Verschmelzung dieses Phagosoms mit enzymbeladenen Zellorganellen, den Lysosomen, entsteht ein Phagolysosom, in dem potenzielle Krankheitserreger durch die lysosomalen Enzyme abgebaut werden. Auch nicht-phagozytische Zellen, die natürlichen Killerzellen, führen einen Abbau ihrer Zielzellen herbei. Sie sind außerdem auch an der spezifischen Immunantwort beteiligt [3]. Dabei handelt es sich um eine erworbene Immunreaktion, die gegen Oberflächenproteine (► Antigene) gerichtet ist. Neben den ► dendritischen Zellen sind in erster Linie T- und B-Lymphozyten die zentralen Akteure der spezifischen Immunantwort [3].

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 50 erklärt.

ABB. 1 | UNSPEZIFISCHE UND SPEZIFISCHE IMMUNABWEHR



Makrophagen machen Krankheitserreger unschädlich, indem sie sie phagozytieren und abbauen. B-Lymphozyten differenzieren nach Antigenkontakt in Antikörper-produzierende Plasmazellen und Gedächtniszellen, aus denen bei erneutem Kontakt mit dem entsprechenden Antigen neue Plasmazellen entstehen können. Zytotoxische T-Zellen bekämpfen infizierte und entartete Körperzellen, während T-Helferzellen regulatorische Funktionen wahrnehmen.

► B-Lymphozyten sind für das immunologische Gedächtnis zuständig: Ein Teil der B-Lymphozyten entwickelt sich zu langlebigen Gedächtniszellen. Neben B-Gedächtniszellen können allerdings auch ► T-Lymphozyten Gedächtniszellen ausbilden. Der andere Teil der B-Lymphozyten bildet Plasmazellen, die spezifische Antikörper synthetisieren und freisetzen. Antikörper sind gegen eine Teilstruktur eines Antigens (Epitop) gerichtet und lösen durch ihre Bindung daran eine Reaktion des Immunsystems aus [3].

Eine aktivere Rolle bei der Bekämpfung von Krankheitserregern oder veränderten körpereigenen Zellen kommt den T-Zellen zu: Zytotoxische T-Lymphozyten können direkt gegen die zu beseitigenden Zellen vorgehen.

Hierzu müssen die T-Lymphozyten jedoch zuerst über zwei verschiedene Signale aktiviert werden. Das erste Signal ist die Antigenerkennung, bei der der T-Zell-Rezeptor (TCR) ein Antigen bindet, das von einer antigenpräsentierenden Zelle (APC) gemeinsam mit dem Haupthistokompatibilitätskomplex (Major Histocompatibility Complex, MHC) präsentiert wird. Ein zweites Signal ist die Kostimulation über die Bindung eines weiteren Oberflächenproteins der APC (B7) an den CD28-Rezeptor der T-Zelle [4, 5]. Aktive zytotoxische T-Zellen schütten bestimmte Proteine aus, die zum Zerfall (Lyse) der Zielzellen führen. Alternativ können zytotoxische T-Zellen durch ihre Bindung an bestimmte Rezeptoren der zu beseitigenden Zelle deren programmierten Zelltod (Apoptose) herbeiführen. Eine weitere Klasse von T-Zellen, die sogenannten T-Helferzellen, spielen eine wichtige Rolle bei der Regulierung von B-Lymphozyten und Makrophagen [5].

Wie erkennt unser Immunsystem veränderte Zellen wie etwa Tumorzellen, wenn diese doch aus körpereigenen Proteinen entstehen? Die Zellen des Immunsystems – allen voran die zytotoxischen T-Lymphozyten – sind zur Identifizierung veränderter Zellen darauf angewiesen, dass letztere sich durch ein hinsichtlich der Antigenausstattung modifiziertes Oberflächenprofil von gesunden körpereigenen Zellen unterscheiden. Krebszellen können dadurch identifiziert werden, dass sie sogenannte Tumorantigene auf ihrer Zelloberfläche präsentieren. Werden diese von den T-Lymphozyten erkannt, vermehrt sich die Population

IN KÜRZE

- Immunonkologische Therapien **helfen unserer körpereigenen Abwehr**, gegen Krebszellen aktiv zu werden, und gehören für viele Krebsarten bereits zum Behandlungsstandard.
- **Immun-Checkpoint-Inhibitoren** stellen eine wichtige Substanzklasse der immunonkologischen Therapeutika dar und setzen in ihrer Wirkweise an den Mechanismen der Regulation von T-Zellen an.
- Weitere immunonkologische Therapieansätze sind **genetisch modifizierte T-Zellen** (CAR-T-Zellen), Zytokine, Impfungen gegen krebsauslösende Viren oder onkolytische Viren.
- Die Immunonkologie entwickelt sich **ständig weiter**: Neue Targets für die bestehenden Therapien werden entwickelt oder Wirkstoffe zur **Erzielung synergistischer Effekte** kombiniert.

der T-Zellen, die auf dieses Antigen spezialisiert sind, und die T-Zellen können die Tumorzellen zerstören. Um einer Erkennung und Bekämpfung durch das Immunsystem zu entgehen, nutzen Tumorzellen oftmals bestimmte ► „Escape-Mechanismen“ [6]. So reduzieren sie beispielsweise die Antigene auf der Zelloberfläche, um unbemerkt zu bleiben. Auch die aktive Blockade der T-Zell-Aktivität ist möglich: Durch die Abgabe bestimmter Botenstoffe inaktivieren Krebszellen die T-Lymphozyten und entgehen so einer Eliminierung. Des Weiteren nutzen Tumorzellen auch die strengen Regulationsmechanismen, denen T-Zellen unterliegen. Diese Immunregulation verhindert eine Autoimmunreaktion, bei der sich die Aktivität der T-Zellen irrtümlich gegen unveränderte körpereigene Zellen richtet. Eine wichtige Rolle spielen hierbei die sogenannten ► Immun-Checkpoint-Moleküle, die die Aktivierung der T-Lymphozyten unterbinden. Tumorzellen können diesen immunsuppressiven Effekt für sich nutzen, indem sie Moleküle auf ihrer Oberfläche präsentieren, die die Immun-Checkpoints auf den T-Zellen ansprechen. So blockieren sie die von den T-Lymphozyten ausgehende Immunreaktion [6].

T-Zell-gerichtete Immunmodulation als therapeutischer Ansatz

Genau diese von den Tumorzellen ausgeübte Hemmwirkung auf die T-Zellen kann man auch therapeutisch nutzen: Immunonkologische Medikamente greifen nicht direkt die Krebszellen an, sondern sind stattdessen auf die T-Zellen ausgerichtet und blockieren die Signalwege, die die T-Zell-Aktivität hemmen. Das Ergebnis sind reaktivierte T-Lymphozyten, die eine Immunreaktion gegen Krebszellen und somit eine Antitumorwirkung entfalten [7].

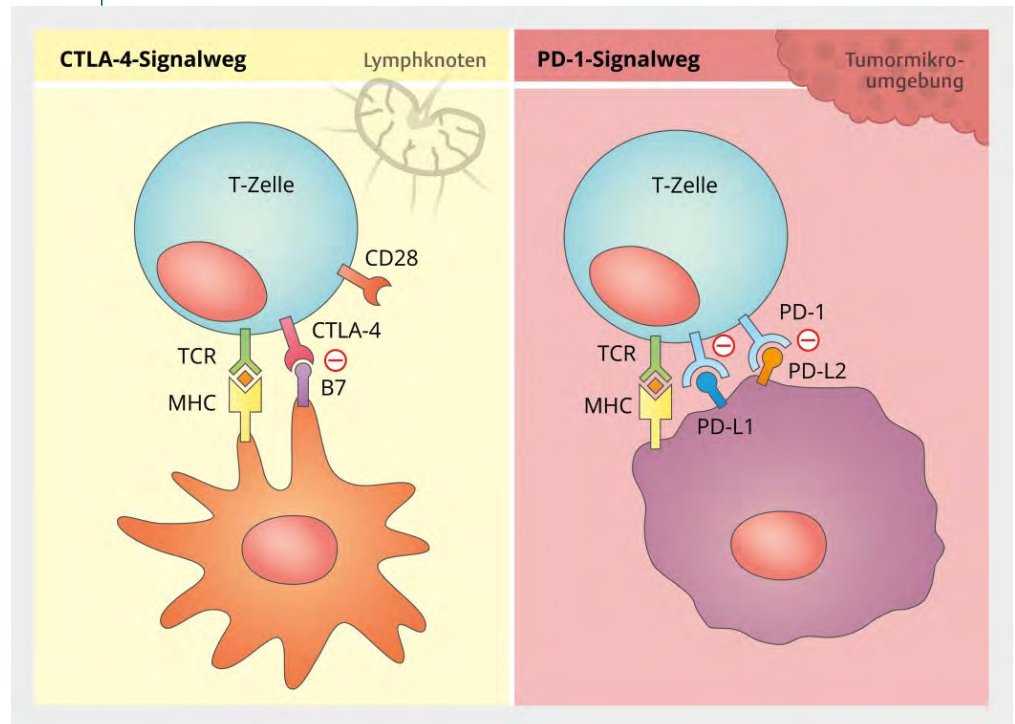
Für die Entdeckung der Immun-Checkpoints, die die Grundlage für die Entwicklung immunonkologischer Medikamente lieferte, wurde im Jahr 2018 der Nobelpreis für Physiologie und Medizin an die beiden Forscher James Allison und Tasuku Honjo vergeben. Während der US-Amerikaner Allison das Immun-Checkpoint-Molekül CTLA-4 (Cytotoxic T-Lymphocyte-Associated Protein 4) erstmalig beschrieb, entdeckte der Japaner Honjo das Protein PD-1 (Programmed Death-1). Beide Oberflächenmoleküle haben sich mittlerweile als wichtige molekulare Ansatzpunkte für die Immunonkologie erwiesen und zur Entwicklung entsprechender Krebsmedikamente ge-

führt, die von den zugehörigen Signalwegen und deren Einfluss auf die T-Zell-Aktivität Gebrauch machen. Im Folgenden gehen wir daher näher auf die Funktion von CTLA-1 und PD-1 ein (Abbildung 2).

Der CTLA-4-Signalweg spielt bereits früh in der Aktivierung der T-Zellen eine Rolle. Diese befinden sich zu diesem Zeitpunkt noch in den Lymphknoten. Wie zuvor beschrieben ist es zur vollständigen Aktivierung der T-Lymphozyten notwendig, dass diese neben der Antigenerkennung auch eine Kostimulation durch die Bindung des Oberflächenproteins B7 am Rezeptor CD28 erfahren. Diesem Vorgang wirkt das Molekül CTLA-4 entgegen, denn es macht den B7-Molekülen Konkurrenz und bindet mit einer viel höheren Affinität an CD28. Somit hemmt CTLA-4 die Aktivität der T-Zellen [8]. Doch was bedeutet das für eine Krebstherapie? Therapeutisch kann man sich diesen Signalweg zunutze machen, indem man CTLA-4 blockiert und dadurch dessen Inaktivierungswirkung auf die T-Zellen hemmt. Hierfür kommen Antikörper gegen CTLA-4 zum Einsatz. Diese binden das Molekül, welches dann nicht mehr mit B7 um die CD28-Rezeptoren konkurrieren kann. In der Folge geht die inhibitorische Wirkung von CTLA-4 verloren und die Immunantwort bleibt erhalten [7].

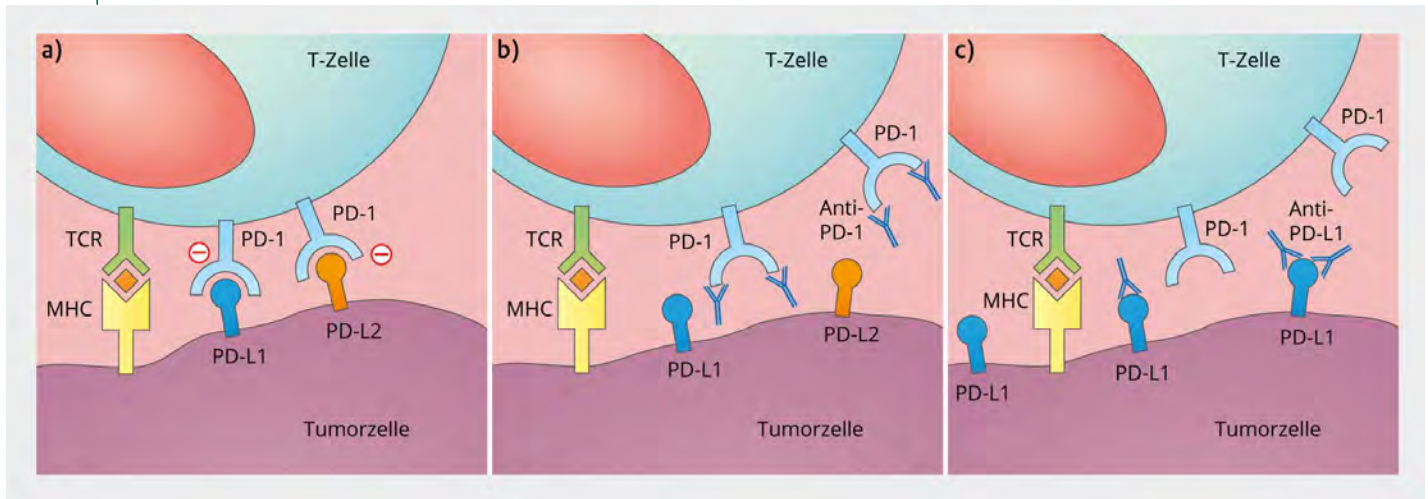
Das Molekül PD-1 ist erst zu einem späteren Zeitpunkt der Immunantwort von Bedeutung und kommt dort zum Tragen, wo bereits aktive T-Zellen auf Tumorzellen treffen:

ABB. 2 | IMMUN-CHECKPOINT-MOLEKÜLE



Die Immun-Checkpoint-Moleküle CTLA-4 und PD-1 befinden sich auf der Oberfläche von T-Zellen und spielen eine Rolle zu verschiedenen Zeitpunkten der T-Zellreifung: CTLA-4, wenn die T-Zelle im Lymphknoten auf eine antigenpräsentierende Zelle trifft, und PD-1, wenn die bereits aktivierte T-Zelle in der Tumormikroumgebung auf eine Krebszelle trifft. Details siehe Text.

ABB. 3 | WIRKWEISE VON ANTIKÖRPERN ALS IMMUN-CHECKPOINT-INHIBITOREN



a) Aktiver PD-1-Signalweg hemmt Aktivierung der T-Zellen. b) Antikörper gegen PD-1 (Anti-PD-1) inhibieren den PD-1-Signalweg. c) Inhibierung des PD-1-Signalwegs über Anti-PD-L1.

in der Mikroumgebung des Tumors. Die Oberfläche der T-Lymphozyten trägt das Protein PD-1, einen Rezeptor, der für die Inhibierung der T-Zell-Aktivität verantwortlich ist. Um seine hemmende Wirkung zu entfalten, muss PD-1 an seinen Liganden PD-L1 oder PD-L2 (Programmed Death Ligand 1 oder 2) binden. Dabei ist PD-L1 der wichtigste Ligand für PD-1; PD-L2 ist derzeit weniger gut erforscht. PD-L1 findet sich auf der Oberfläche vieler Zellen, jedoch in besonders großem Maße auf vielen Tumorzellen. Diese nutzen so den PD-1-Signalweg, um einer Immunreaktion zu entgehen: Nach Bindung des Liganden PD-L1 an den Rezeptor PD-1 wird eine Signalkaskade innerhalb der T-Zellen in Gang gesetzt, die dazu führt, dass die Aktivität der T-Lymphozyten reduziert wird [8].

Die Zellen vieler Krebsarten weisen erhöhte PD-L1-Level auf und sind daher besonders für eine am PD-1-Signalweg ansetzende immunonkologische Therapie geeignet. Dabei bietet die Signalkaskade zwei verschiedene Angriffspunkte (Abbildung 3): Zum einen können Antikörper zum Einsatz kommen, die direkt gegen den PD-1-Rezeptor gerichtet sind. Diese Anti-PD-1-Antikörper werden eingesetzt, um beispielsweise Melanome, Plattenepithelkarzinome, Hodgkin-Lymphome oder Urothelkarzinome zu behandeln [9]. Eine vergleichbare Wirkung auf die Signalkaskade lässt sich jedoch auch erzielen, wenn der Antikörper den PD-1-Liganden PD-L1 als Zielstruktur hat (Anti-PD-L1). Dieser Ansatz hat sich ebenfalls für die Behandlung diverser Krebsarten als wirksam erwiesen. Dazu gehören Lungen- und Nierenkrebs, aber auch seltene Krebsarten wie etwa das Merkelzellkarzinom, eine seltene Form von Hautkrebs [9].

Die beschriebenen Antikörper gegen CTLA-4, PD-1 und PD-L1 sind anschauliche Beispiele dafür, wie durch gezielte Modulation der immunregulatorischen Signalwege eine Antitumorwirkung durch unser körpereigenes

Immunsystem stimuliert werden kann. Doch hier endet die Entwicklung der immunonkologischen Therapieansätze noch lange nicht.

Aktuelle Entwicklungen in der Zelltherapie: Gentechnisch veränderte T-Zellen

Besondere öffentliche Aufmerksamkeit erregte in den vergangenen Jahren ein neuartiges Konzept mit teilweise äußerst spektakulären Therapieerfolgen: Die Therapie mit künstlich veränderten (chimären) Antigenrezeptor-T-Zellen (► CAR-T-Zellen) – besser bekannt als CAR-T-Zell-Therapie. Diese Behandlungsmethode basiert auf einer Therapie mit T-Zellen des Patienten. Allerdings werden diese genetisch verändert, um Krebszellen zielgerichtet erkennen zu können. Wie genau funktioniert das?

In einem ersten Schritt wird dem Krebspatienten Blut entnommen, aus dem die T-Lymphozyten herausgefiltert werden (Leukapherese) (Abbildung 4). Letztere werden dann eingefroren und für den Prozess der genetischen Veränderung an ein Herstellerlabor gesendet. Dort wird das Erbgut der T-Zellen um ein spezielles Gen erweitert. Der Einbau in das Genom der T-Zellen erfolgt dabei meist mit Hilfe eines viralen Vektors (genetisch modifizierter Viruspartikel). Dieses neu integrierte Gen führt dazu, dass die T-Lymphozyten mit einem Rezeptor (chimärer Antigenrezeptor) für ein Tumorantigen ausgestattet werden. Dieses Tumorantigen wird von Krebszellen auf der Zelloberfläche exprimiert, und die CAR-T-Zellen sind nun durch ihren chimären Antigenrezeptor in der Lage, das Tumorantigen zu erkennen. Im Labor des Pharmaunternehmens werden die CAR-T-Zellen dann zunächst vermehrt. Erst wenn eine ausreichende Zellzahl erreicht wurde, werden sie an das behandelnde Klinikum übersendet. Der Patient wird speziell darauf vorbereitet, seine CAR-T-Zellen zu erhalten. Dazu wird eine Chemotherapie durchgeführt, bei

der so viele native T-Zellen wie möglich zerstört werden. Dies ist notwendig, damit die CAR-T-Zellen vom Körper des Patienten aufgenommen werden und sich dort als Zellpopulation etablieren können. Mittels einer Infusion werden dem Patienten nun die CAR-T-Zellen verabreicht. Im Körper des Krebspatienten entfalten sie anschließend ihre immunologische Wirkung und greifen die Krebszellen an. Im Idealfall führt dies zu einer Heilung des Patienten, die darüber hinaus einen nachhaltigen Effekt hat: Die CAR-T-Zellen verbleiben dauerhaft im Körper, vermehren sich und können so langfristig gegen Krebszellen aktiv werden [10].

Eine Wundertherapie also? Leider nein, denn auch die CAR-T-Zelltherapie ist mit einigen Nachteilen behaftet. So kommt es bei dieser Behandlungsmethode zu teilweise schweren Nebenwirkungen [11]. Auch der Produktionsaufwand ist hoch, entsprechend sind mit der Behandlung enorme Kosten verbunden. Nicht immer gelingt die Herstellung der CAR-T-Zellen und nicht in jedem Fall spricht der Patient auf die Behandlung an. Hinzu kommt, dass die CAR-T-Zell-Therapie in ihren Anwendungsgebieten bislang auf bestimmte Krebsarten beschränkt ist. Insbesondere wird sie bei akuter lymphoblastischer Leukämie (ALL) und B-Zell-Lymphomen eingesetzt.

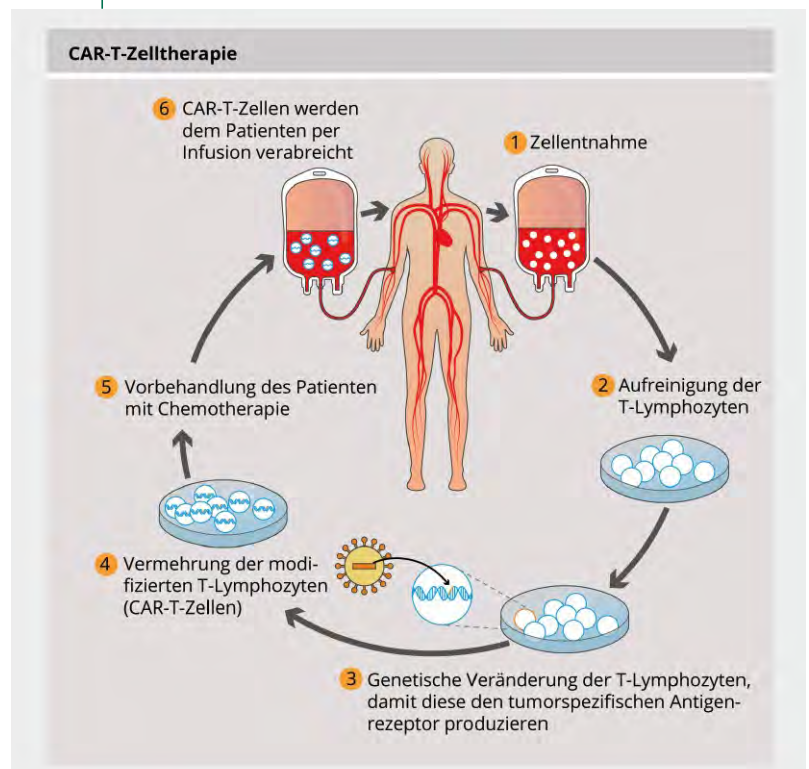
Weitere immunonkologische Therapieoptionen

Neben den bereits vorgestellten Ansätzen gibt es noch viele weitere Behandlungswege im Kampf gegen Krebs, die ebenfalls eine immunologische Wirkweise aufweisen. Eine altbewährte Methode ist es, das Immunsystem durch den Einsatz von Botenstoffen zu aktivieren. Diese ► Zytokine wie Interferone oder Interleukine beeinflussen die Aktivität, Reifung und Vermehrung der Immunzellen. Ihr Einsatz führt zu einer allgemeinen Stimulation der Immunaktivität.

Gerade wenn es um Krebs geht, steht die Prävention im Fokus des Krankheitsgeschehens. Daher wird bereits seit geraumer Zeit an Krebsimpfstoffen geforscht. Leider sind die Forschungserfolge in diesem Bereich bislang eher überschaubar und Krebsimpfstoffe gehören gegenwärtig nicht zur Therapielandschaft. Jedoch ist es gelungen, Impfstoffe gegen krebsauslösende Viren wie etwa das Humane Papilloma-Virus (HPV) zu entwickeln und erfolgreich zu etablieren [12].

Ein weiterer Ansatz der Immunonkologie greift nicht direkt am körpereigenen Immunsystem an, sondern macht sich stattdessen Krankheitserreger zunutze: Die ► onkolytische Virotherapie verwendet Viren, die gezielt Tumorzellen infizieren und abtöten können (onkotrope Viren). Indirekt soll dieser Vorgang zusätzlich das Immunsystem aktivieren, da dieses entsprechend infizierte Zellen erkennt. Bislang handelt es sich bei dieser Therapieform noch um einen eher experimentellen Ansatz; nur ein derartiges Medikament ist bislang zugelassen [13].

ABB. 4 | ABLAUF EINER CAR-T-ZELLTHERAPIE



Weiterentwicklung der immunonkologischen Krebstherapie

Die Immunonkologie ist unverändert ein Bereich aktiver Forschung und somit werden neue Ansatzpunkte und Therapieoptionen in schnellem Tempo entwickelt. Hierbei liegt ein besonderer Schwerpunkt auf der Weiterentwicklung bereits etablierter Wirkmechanismen wie der Immun-Checkpoint-Inhibition. Hierzu wurden bereits weitere immunologische Zielstrukturen identifiziert, für die neue Medikamente entwickelt werden.

Eine weitere Option in diesem Bereich ist die Verwendung bispezifischer Antikörper, welche gegen zwei Antigene gerichtet sind. Diese binden dann sowohl an ein Antigen der T-Zelle als auch an ein Tumorantigen und können somit T-Zellen zu den Krebszellen rekrutieren. Dies ermöglicht eine noch gezieltere Immuntherapie. Bispezifische Antikörper können auch eingesetzt werden, um zeitgleich zwei relevante Signalwege zu modulieren und so eine stärkere Antitumorwirkung zu erreichen [14].

Auch bestehen verschiedene Möglichkeiten, die vorhandenen Therapiekonzepte zu kombinieren. Durch die Kombination mehrerer Immun-Checkpoint-Inhibitoren können synergistische Effekte erzielt werden. Ein Beispiel hierfür ist der kombinierte Einsatz von Anti-CTLA-4 und Anti-PD-1. Ebenfalls möglich wäre eine Kombination der immunonkologischen Therapie mit anderen Therapieoptionen wie etwa der Behandlung mit Tyrosinkinase-Hemmern.

GLOSSAR

Antigen: Struktur, die die Produktion von Antikörpern auslöst und an die Antikörper und bestimmte Rezeptoren von Lymphozyten binden.

B-Lymphozyten (B-Zellen): Weiße Blutzellen, die sich zu Plasmazellen entwickeln können. Plasmazellen sind in der Lage, Antikörper zu produzieren. B-Lymphozyten können sich außerdem zu Gedächtniszellen spezialisieren und bilden so einen Teil des immunologischen Gedächtnisses.

CAR-T-Zellen: Genetisch veränderte T-Lymphozyten, die mit einem chimären Antigenrezeptor (CAR) ausgestattet sind, der ihnen die Erkennung von Tumorzellen erlaubt.

Dendritische Zellen: Zellen des Immunsystems mit der Hauptfunktion der Antigenerkennung und Antigenpräsentation. Können dadurch eine Immunantwort induzieren.

Escape-Mechanismen: Strategien, die Tumorzellen anwenden, um einer Erkennung durch das Immunsystem zu entgehen. Dazu gehört die Expression von Krebs-untypischen Oberflächenproteinen und die Aussendung von Signalen, die eine Immunantwort hemmen.

Immun-Checkpoint-Moleküle: Rezeptoren auf der Oberfläche von Zellen des Immunsystems (T-Lymphozyten), die die Immunreaktion regulieren, indem sie die Aktivierung von T-Zellen hemmen oder fördern.

Makrophagen: Auch „Riesenfresszellen“ genannt. Zellen des Immunsystems, die eindringende Mikroorganismen beseitigen, indem sie diese aufnehmen und zersetzen.

Onkolytische Viren: Auch onkotrope Viren genannt. Diese Erreger sind speziell auf Krebszellen ausgerichtet, können diese infizieren und zu deren Absterben führen.

T-Lymphozyten (T-Zellen): Weiße Blutzellen, die der zellulären Immunantwort dienen. Die Reifung dieser Zellen erfolgt im Thymus. Zu den T-Lymphozyten gehören zytotoxische T-Lymphozyten und T-Helferzellen.

Zytokine: Proteine, die als Botenstoffe des Immunsystems agieren. Sie regulieren beispielsweise die Abwehrreaktion der Immunzellen und deren Reifung.

Jedoch spielen immunonkologische Ansätze nicht ausschließlich bei der erstmaligen Bekämpfung von Krebszellen eine Rolle. Sie können auch dazu angewandt werden, nach einer erfolgreichen Chemotherapie die Aufrechterhaltung dieses Therapieerfolges zu sichern. Die Wirksamkeit einer solchen Erhaltungstherapie wurde bereits erfolgreich belegt; ein Antikörper gegen PD-L1 ist inzwischen beim Urothelkarzinom für die Erhaltungstherapie nach Chemotherapie zugelassen. Immunonkologische Therapien, ob als Einzeltherapie oder in Kombination mit anderen Therapien, können dazu beitragen, langfristige Therapieerfolge für Krebspatienten zu sichern.

Zusammenfassung

Immunonkologische Therapien helfen, die körpereigene Immunantwort gezielt auf Tumorzellen auszurichten und Krebserkrankungen zu behandeln. Eine besondere Rolle kommt den zytotoxischen T-Lymphozyten zu, die strengen Regulationsmechanismen unterliegen. Diese Regulation durch Immun-Checkpoints nutzen immunonkologische Wirkstoffe und aktivieren auf diesem Weg die T-Lymphozyten für den Angriff auf Krebszellen. Ein weiterer immunonkologischer Ansatz ist die Zelltherapie, die patienteneigene T-Lymphozyten genetisch modifiziert und so ein gezieltes Erkennen von Krebszellen und deren Bekämpfung ermöglicht. Darüber hinaus bietet die Immunonkologie weitere Möglichkeiten, wie etwa eine allgemeine Immunstimulation über Zytokine, Impfstoffe gegen Krebs oder onkolytische Viren. Die Immunonkologie ist Gegenstand intensiver Forschungsarbeit und klinischer Entwicklung. Neue Wirkstoffe sowie Kombinationsansätze helfen dabei, die Versorgung von Krebspatienten weiter zu verbessern.

Summary

Battle of the cells: With the help of the body's immune defense against cancer

Immuno-oncological therapies help to direct the body's immune response specifically towards tumour cells. Cytotoxic T lymphocytes which play a crucial role for such therapies are subject to strict regulatory mechanisms. This regulation by immune checkpoints is used by immuno-oncological drugs in order to activate T lymphocytes and allow them to attack cancer cells. Another immuno-oncological approach is cell therapy, where the patient's T lymphocytes are genetically modified to specifically recognize and fight tumour cells. In addition, immuno-oncology offers other options, such as general immune stimulation via cytokines, vaccines against cancer or oncolytic viruses. Immuno-oncology is the subject of intense research and clinical development. New drugs and combination approaches help to further improve the treatment of cancer patients.

Schlagworte

Immunonkologie, Krebstherapie, Immun-Checkpoint-Inhibition, CAR-T-Zell-Therapie

Literatur

- [1] Robert Koch-Institut. Krebs in Deutschland für 2015/2016. 12. Ausgabe, korrigierte Fassung vom 17.08.2020, https://www.krebsdaten.de/Krebs/DE/Content/Publikationen/Krebs_in_Deutschland/kid_2019/krebs_in_deutschland_2019.pdf;jsessionid=7CE160A96A0EDC8D9F69FCB493162308.2_cid372?__blob=publicationFile. [Zuletzt geprüft am: 02.02.2021].
- [2] Deutsches Krebsforschungszentrum. Krebsentstehung, <https://www.krebsinformationsdienst.de/tumorarten/grundlagen/krebsentstehung.php>. [Zuletzt geprüft am: 11.02.2021].

- [3] Deutsche Gesellschaft für Immunologie e. V. Immunologie für Jedermann: Unser Immunsystem, <https://das-immunsystem.de/fuer-jedermann/unser-immunsystem/>. [Zuletzt geprüft am: 03.02.2021].
- [4] A. Bernard et al. (2002). The Two-Signal Model Of T-Cell Activation After 30 Years, *Transplantation* 73, S31.
- [5] J. S. Marshall et al. (2018). An introduction to immunology and immunopathology, *Allergy, Asthma & Clinical Immunology* 14, 49.
- [6] G. L. Beatty, W. L. Gladney (2015). Immune Escape Mechanisms as a Guide for Cancer Immunotherapy, *Clinical Cancer Research* 21, 687.
- [7] I. Mellman et al. (2011). Cancer immunotherapy comes of age, *Nature*, 2011, 480, 480.
- [8] E. I. Buchbinder, A. Desai (2016). CTLA-4 and PD-1 Pathways: Similarities, Differences, and Implications of Their Inhibition, *American journal of clinical oncology* 39, 98.
- [9] J. Schardt (2020). Der Einsatz von Immuncheckpoint-Inhibitoren im onkologischen Alltag, *Zeitschrift für Rheumatologie* 79, 809.
- [10] S. Feins et al. (2019). An introduction to chimeric antigen receptor (CAR) T-cell immunotherapy for human cancer, *American journal of hematology* 94, S3.
- [11] J. N. Brudno, J. N. Kochenderfer (2019). Recent advances in CAR T-cell toxicity: Mechanisms, manifestations and management, *Blood reviews* 34, 45.
- [12] T. Enokida et al. (2021). Vaccines for immunoprevention of cancer. *J Clin Invest* 131, e146956.
- [13] M. Mondal et al. (2020). Recent advances of oncolytic virus in cancer therapy. *Hum Vaccin Immunother* 16, 2389.
- [12] A. Trabolsi et al. (2019). T Cell-Activating Bispecific Antibodies in Cancer Therapy, *Journal of immunology* 203 (Baltimore, Md.: 1950), 585.

Verfasst von:

PD Dr. Philipp Ivanyi hat seine medizinische Ausbildung an der Medizinischen Hochschule Hannover, dem Universitätsspital Zürich (Schweiz), dem Dana-Faber Cancer Institute und der Harvard Medical School, Boston, MA (USA) erhalten und dort 2003 mit dem Dr. med. abgeschlossen. Von 2004 bis zur Gegenwart ist er an der Medizinischen Hochschule Hannover in der Forschung tätig. Er ist Facharzt für Innere Medizin, Hämatologie, interistische Onkologie und Palliativmedizin. Derzeit bekleidet er die Position des Leitenden Oberarztes Onkologie, der Onkologische Ambulanz und Onkologischen Tagesklinik an der Medizinischen Hochschule Hannover. Zusätzlich ist er Sprecher der Immune Cooperative Oncology Group, Comprehensive Cancer Center, Claudia von Schelling Center (CCC-H) sowie der Interdisciplinary Working Group Kidney Cancer, German Cancer Society (IAGN-DKG). Ivanyi forscht an Nieren-Urogenitaltumoren, Kopf-Hals-Tumoren, Weichteilsarkomen, zielgerichteten molekularen und immunonkologischen Therapien und hat auf diesem Gebiet mehr als 80 Publikationen und mehr als 50 klinische Studien (Phase I-IV) begleitet oder auf den Weg gebracht.

Korrespondenz

PD. Dr. Philipp Ivanyi

Email: Ivanyi.philipp@mh-hannover.de

Anzeige



Verband | Biologie, Biowissenschaften
& Biomedizin in Deutschland

Berufsfelder Biologie – hier gibt es den Überblick

Der VBIO hat achtzig spannende Porträts von Biowissenschaftlerinnen und Biowissenschaftlern im Beruf zusammengestellt. Berufsfeldübersichten, Kontaktadressen, Tipps und Internet-Links ergänzen die „Perspektiven“.

Perspektiven – Berufsbilder von und für Biologen und Biowissenschaftler

- Herausgegeben vom VBIO
- 10. überarbeitete Auflage, DIN A5, 256 Seiten, ISBN 978-3-9810923-3-2
- 14,00 Euro (inkl. Versand), 12,00 Euro (VBIO-Mitglieder),
- Direktbestellung über info@vbio.de



www.vbio.de

PERSPEKTIVEN BERUFSFELD BIOLOGIE





Moderne Aquaristik – Faszination und Artenschutz „Der See im Glase“

THOMAS LEITZ

Die Aquaristik befindet sich in großen Teilen im Wandel. Während in den letzten Jahrzehnten das Augenmerk fast ausschließlich auf den ästhetischen Wert gelegt wurde, beginnen nun Aquarianer sich als Teilnehmer an Citizen Science-Projekten auch mit dem Artenschutz zu beschäftigen. Sie reisen zu den Herkunftsgebieten ihrer Pfleglinge, erlangen dadurch profundes Wissen über Arten- und Biotop-Merkmale und nutzen diese zur Zucht der Tiere. Viele Erstbeschreibungen gehen inzwischen auf die Tätigkeit von Aquarianern zurück. Diese Arbeiten sind unbedingt notwendig, denn die Zahl bedrohter Tierarten ist so groß, dass ihre Erhaltung nicht allein von akademischen Instituten geleistet werden kann.*

Nachdem der Zoologe, Politiker und Volksschriftsteller Emil Adolf Roßmäßler 1856 in der damals weit verbreiteten Zeitschrift „Die Gartenlaube“ einen kurzen, vielbeachteten

Artikel über den „See im Glase“ veröffentlichte, wurde er gedrängt, eine entsprechende Monographie zu schreiben. Daraufhin erschien sein „Süßwasser-Aquarium“ im Jahre 1857 [1]. Seither gilt Roßmäßler als „Vater der Aquarienkunde“ in Deutschland. Im Kapitel „Was ist und was soll ein Aquarium“ definierte er: „Ein Aquarium ist eine freundliche Zimmerpflanze und zugleich ein ewig lebender Quell belebender Unterhaltung, durch Zusammenbringung von Wasserpflanzen und Wasserthieren in ihrem Leben zusagenden Behältern. Was es also soll, ist damit zugleich ausgedrückt und ist nur noch etwas hinzuzufügen, dass es ein nicht unbedeutend zu nennender Schritt ist auf der Bahn zu eingehender Beachtung der uns umgebenden Natur, ein Mittel, die Aufmerksamkeit auf solche Punkte des Naturlebens zu lenken, die außer von den Naturforschern unbeachtet gelassen zu werden pflegen; ... sondern reich an ungeahnter Schönheit und an Anregung sind“. Roßmäßler fand also ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Wissenschaft und Emotionalität als angemessen, das in seinen Zielen auch heute noch bedeutungsvoll ist. Allerdings kommen in der heutigen Zeit weitere Ziele der wissenschaftlichen Aquaristik hinzu, die weiter unten behandelt werden.

Der erste, vom französischen Soldaten Gerault 1869 aus China nach Europa eingeführte ausländische (Aquarien)fisch war – neben dem Goldfisch – der Paradiesfisch (Makropode – *Macropodus opercularis*; Abbildung 1), der bald darauf von Carbonnier zum ersten Mal zur Fortpflanzung gebracht wurde. Der Makropode kann auch bei Tem-

* Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wurde auf eine gendergerechte Sprache verzichtet. Es sind aber in jedem Fall alle Geschlechter gemeint.

peraturen bis zu 10°C gehalten werden, was seine Verbreitung in Zeiten noch ohne elektrische Aquarienheizung sehr befördert hat. Damit war auch der Zeitpunkt gekommen für weitere Importe ausländischer, später auch tropischer Fische [2].

Verbände und Vereine

Es dauerte nicht lange, bis sich Aquarianer zu Vereinen zusammenfanden, um durch Erfahrungsaustausch das Wissen über ihre Pfleglinge zu vertiefen. Dem folgte die Gründung des VDA (Verband Deutscher Vereine für Aquarien- und Terrarienkunde e. V.; <https://vda-online.de>) im Jahre 1911. Er ist der älteste und größte Verband für Aquarianer und Terrarianer weltweit. Weitere deutschsprachige Dachverbände sind der Schweizerische Dachverband der Aquarien- und Terrarienvereine (SDAT; <https://www.sdat.ch>) sowie der Österreichische Verband für Vivaristik und Ökologie (ÖVVÖ; <https://oevvoe.org>). In den Mitgliedsvereinen und Arbeitskreisen treffen sich engagierte Mitglieder mit profunden aquaristischen Kenntnissen. Oft haben die Vereine Kooperationen mit Kitas und Schulen, um den Kindern und Schülern die „Welt im Glase“ erfahrbar zu machen (z. B. <https://netzwerk-natur.de/aquarienvereine/>). Viele der organisierten Aquarianer reisen gerne zu den Herkunftsgebieten ihrer Fische, um wertvolle Daten über die entsprechenden Biotope und Ökosysteme zu gewinnen, die dann bei der Aquarienhaltung und vor allem der Zucht der Tiere von großem Wert sind.

Artenschutz und Nachhaltigkeit

Seit das große Artensterben begonnen hat, ist der Schutz für bestimmte Tierarten innerhalb (*in situ*) und außerhalb (*ex situ*) ihrer angestammten Lebensräume von besonderer Wichtigkeit. Zunächst hatte man den Zoos das Recht und die Pflicht zu Artenschutzprojekten zugesprochen [3], bis man erkannte, dass dies nicht ausreicht. Heute wird – auch von akademischer Seite – eine gute Zusammenarbeit mit Hobbyaquarianern gefordert [4]. So befindet sich in den Becken engagierter Aquarianer eine Reihe von Arten, die in der Natur bereits ausgestorben sind. Von uninformativer Artenschützerseite aus wird die Aquaristik lediglich als tierverbrauchend angesehen. Die gut gemeinte Forderung nach einem Importverbot wild gefangener Tiere steht im Raum. Aber gerade die Unmöglichkeit, diese Tiere importieren zu können, konterkariert den Artenschutz, denn die weitaus allermeisten Arten sterben nicht wegen des Fanges aus, sondern als Folge der Zerstörung ihrer Lebensräume (Abbildung 2). Als Beispiel können hier Fische aus Madagaskar wie etwa *Ptychochromis insolitus* (Manganahara-Buntbarsch) gelten. Nachdem in der Natur nur noch 18 Exemplare dieser Art gefangen wurden, konnten zunächst der Zoo Toronto und dann auch der Zoo Köln die Tiere nachzuchten. Inzwischen werden die Fische von *Citizen Conservation* betreut und an engagierte Aquarianer abgegeben. Zusätzlich werden auch *in-situ*-Projekte gefördert.



ABB. 1 Männchen des Makropoden (Paradiesfisch, Großflosser: *Macropodus opercularis*), des – neben dem Goldfisch – ersten importierten exotischen Aquarienfisches. Foto: Dieter Untergasser.



ABB. 2 Der Zebrawels (*Hypancistrus zebra* L 46) war durch zu starke Abfischung in Brasilien in seinem Bestand stark bedroht, so dass man ihn im Washingtoner Artenschutzabkommen Anhang 3 gelistet hat (strenger Schutz in Brasilien). Er wurde und wird jedoch illegal aus Brasilien geschmuggelt und über Nachbarländer exportiert. Heute steht der Zebrawels aufgrund eines Staudammprojektes in seiner Heimat vor dem Aus. Er wurde im November 2022 in den Anhang 2 (weltweites Handelsverbot für Wildfänge) hochgestuft. Die Hoffnung liegt nun in südostasiatischen Großzüchtereien [7]. Foto: Eberhard Schmidt (†).

IN KÜRZE

- Die Aquaristik übt nach wie vor auf viele Menschen eine besondere Faszination aus. Moderne Aquaristik kann **aktiver Artenschutz** sein.
- Aquarientiere sind nahezu ausnahmslos nicht durch Entnahme aus der Natur bedroht, sondern durch die **Zerstörung ihrer Lebensräume**.
- Immer mehr Aquarianer **züchten bedrohte aquatische Tierarten** zu deren Erhaltung, auch dann, wenn diese nicht besonders attraktiv sind.
- In den letzten Jahren sind Zuchten heikler Arten, sowohl von Fischen als auch von Korallen und anderer Wirbellosen *ex situ* gelungen, so dass die **Entnahme aus der Natur nicht mehr notwendig** ist.
- **Kooperationen** von akademischen Instituten, Zoos, Tierparks, Museen und Aquarianern müssen noch ausgeweitet werden, um die Fülle bedrohter Tierarten zu erhalten.
- Teile der Aquaristik sind nunmehr zu einer **Bürgerwissenschaft** (Citizen Science) geworden.



ABB. 3 Roter Neon (*Paracheirodon axelrodi*), ein „Piaba“ (s. Text und [5–6]).
Foto: Dieter Untergasser.



ABB. 4 Der Anemonenfisch *Amphiprion percula* lebt symbiontisch mit Anemonen der Species *Entacmaea quadricolor*. Bild oben: Ein Paar der Anemonenfische mit einem Gelege im Vordergrund links. Bild mitte: Ein Elternteil reinigt die Brut. Bild unten: Zwei Embryonen kurz vor dem Schlüpfen. Die Hülle ist während der Embryonalentwicklung mit einem Haftstiel versehen. Viele Anemonenfische aus der großen Gattung lassen sich inzwischen im Aquarium nachzuchten.
Fotos und Zucht: Daniel Knop.



Citizen Conservation (CC) wurde 2018 als gemeinsame Initiative von *Frogs & Friends*, dem Verband der Zoologischen Gärten (VdZ) sowie der Deutschen Gesellschaft für Herpetologie und Terrarienkunde (DGHT) gegründet. Die drei Trägerverbände stellen die Grundfinanzierung und Expertise zur Durchführung einer fünfjährigen Pilotphase zur Verfügung. CC beschäftigt sich mit der Erhaltung bedrohter Arten in Zoos und Privathaltung. Das Credo von CC: „Wildtierhaltung ist nicht in erster Linie Teil des Problems, sondern vor allem Teil der Lösung der Biodiversitätskrise“. Auch aquaristische Verbände haben inzwischen eigene Artenschutzprojekte aufgelegt, z. B. der VDA, der ÖVVÖ und die Deutsche Cichliden Gesellschaft (DCG). Das Ziel ist es, kleine Archon aufzubauen, auf denen jeweils eine oder mehrere bedrohte Arten gepflegt und möglichst nachgezüchtet werden. Dazu bedarf es einer intensiven Vernetzung der Pfleger. VDA und DGHT arbeiten hier weitestgehend zusammen und haben eine eigene Artenschutzinitiative ins Leben gerufen (<https://rette-den-artenschutz.de/>).

Ein Musterbeispiel, wie man die Nachfrage nach wild gefangenen Aquarienfischen und gleichzeitig auch die Bedürfnisse der lokalen Bevölkerung befriedigen kann, ist das Projekt „Piaba“ (der Name der kleinen Aquarienfische aus dem Amazonas, hauptsächlich des roten Neon *Paracheirodon axelrodi*) [5–6] (<http://projectpiaba.org>; Abbildung 3). Die einheimischen Aquarienfischfänger lernen fischschonende und vor allem nachhaltige Fangverfahren, haben ein großes Interesse am Regenwald und verdienen ihren Lebensunterhalt. Ein Importverbot der Fische nach Europa würde sich für die Bevölkerung, besonders für den Regenwald, die dortigen Gewässer und die Tiere und Pflanzen der Region katastrophal auswirken. Einheimische würden wieder gezwungen, ihren kargen Lebensunterhalt mit der Rodung des Waldes zu verdienen [6]. Deshalb muss es darum gehen, immer einen Ausgleich zwischen den Interessen des Exports und jenen des Imports von Aquarienfischen zu finden. Am globalen Handel sind ca. 125 Länder beteiligt. Der Wert der gehandelten Organismen plus all der für die erfolgreiche Aquaristik benötigten Waren beträgt jährlich etwa US \$ 15–30 Milliarden [7]. Angesichts dieser kommerziellen Nutzung steht die Aquaristik bei einigen Organisationen und Einzelpersonen in der Kritik. Zudem wird immer wieder – nicht ganz zu Unrecht – auf die Problematik der invasiven Arten und die Einschleppung von Krankheitskeimen hingewiesen [8]. Umso mehr sind intensive Forschung, ein effektives Monitoring sowie optimaler Wissenstransfer notwendig [9]. Die englische *Ornamental Aquatic Trade Organisation* (OATA) wägt Vorteile und Nachteile der Aquaristik sehr gut ab [10–11].

Besonderheiten der Meerwasseraquaristik

Süß- und Meerwasseraquaristik unterscheiden sich in einer wesentlichen Hinsicht. Annähernd 90 Prozent der im Handel befindlichen Süßwasseraquarienfische sind

nachgezüchtet, während noch 90–95 Prozent der marinen Aquarienfische Wildfänge sind [12]. Über 2500 marine Arten sind im Handel. Davon überlebten allerdings nur 30–40 Prozent aufgrund von gesundheitsschädigendem Umgang mit den Tieren bei illegalen Fangmethoden und teilweise ungenügenden Kenntnissen seitens des Fachpersonals sowie Aquarianern. Um sie jedoch für die Zukunft zu erhalten, müssen die Randbedingungen für die *ex-situ*-Zucht bekannt sein. Das geht ausschließlich mit intensiven Untersuchungen und Aufklärungsarbeit durch akademische Forschungsinstitute zusammen mit Aquakulturfarmen, öffentlichen Aquarien und privaten Haltern [4]. Immerhin hat es in den letzten Jahren – vor allem durch Zucht von geeigneten Futterorganismen [13] – entscheidende Durchbrüche in der Aufzucht mariner Fischarten gegeben (etwa durch Dr. Chatham Callan, <https://scholar.google.com/citations?user=BvC0bGgAAAAJ&hl=en>, und Mark Wittenrich, <https://reefbuilders.com/tag/matt-wittenrich/>) (Abbildung 4 und 5). Nur so – und gerade nicht durch Importverbote oder Positivlisten – wird es möglich sein, einen Teil der nicht durch das Abfischen, sondern durch den Klimawandel, durch Umweltzerstörung und -vergiftung bedrohten Meerwasser- (und natürlich auch Süßwasser-)fische zu erhalten [14]. Damit wird jetzt ein effektives Monitoring für Anzahl und Arten eingeführter oder gezüchteter (mariner) Fische notwendig [8].

Im Meerwasserbereich vom Artensterben betroffen sind auch die Korallen, vor allem riffbildende, mit Kleinalgen symbiontisch lebende (zooxanthellate) Arten, die wesentliche Bestandteile einzigartiger Biotope (Riffgemeinschaften) sind. Hier haben Aquarianer bereits Entscheidendes geleistet [15]. So haben sie die ungeschlechtliche Vermehrung der Korallen durch Fragmentierung (z. B. [16], Abbildung 6) und neuerdings auch die geschlechtliche Vermehrung mit voran getrieben. Von akademischer Seite wurden die Grundlagen der geschlechtlichen Fortpflanzung inklusive der Ansiedlung von Planularlarven der Nesseltiere beigetragen [Zusammenfassung in 17]. Aus den Erkenntnissen von akademischer Seite zusammen mit denen von privaten und öffentlichen Institutionen ergibt sich die Möglichkeit zur Riffrenaturierung [18]. Als ein Beispiel für ein tragfähiges Projekt sei die *Coral Restoration Foundation* (CRF) von Kennedy Nedimyer genannt, die in Key Largo, Florida, gegründet wurde (<https://www.coralrestoration.org/about>) und sich mit dem Wiederaufbau verlorengangener Korallenbiotope im drittgrößten Riffsystem der Erde beschäftigt.

Pflicht zum Sachkundenachweis

Es ist also höchste Pflicht für Aquarianer, möglichst viel Information über die zu pflegenden Fische und anderen Aquarienbewohner zu erlangen. § 2 Tierschutzgesetz (TSchG) Abs. 3 lautet: *Wer ein Tier hält, betreut oder zu betreuen hat, ... muss über die für eine angemessene Ernährung, Pflege und verhaltensgerechte Unterbrin-*



ABB. 5 Orangebinden- oder Kupferbinden-Pinzettfisch (*Chelmon rostratus*). Obwohl die Tiere extreme Nahrungsspezialisten sind (kenntlich am auffälligen, kleinen Maul), ist der Pinzettfisch in letzter Zeit öfter erfolgreich nachgezüchtet worden, so dass er nicht mehr aus seinem Biotop entnommen werden muss. Foto: Eberhard Schmidt (†).

gung des Tieres erforderlichen Kenntnisse und Fähigkeiten verfügen. Eben jene Kenntnisse und Fähigkeiten zu erwerben, ist heute nicht allzu schwierig. Es gibt zunächst die Vereine, die bereitwillig Auskunft geben. Auch beim Kauf der Fische ist der Verkäufer verpflichtet, einen Steckbrief mit den Haltungsbedingungen mitzugeben. Damit die verantwortliche Person in dieser Hinsicht gut ausgebildet ist, muss sie einen Sachkundenachweis lt. § 2 oder § 11 TSchG haben. § 11 TSchG regelt die Voraussetzungen zum Erteilen der Erlaubnis für die Haltung und den Handel mit Wirbeltieren, die von der zuständigen Behörde erteilt werden muss. Der Nachweis kann z. B. bei der zertifizierten Sachkunde GbR von VDA und DGHT (<https://www.sachkunde-vda-dght.de>) oder anderen Organisationen erlangt werden. Zur umfassenden Information gibt es außerdem zahlreiche Internetseiten und Portale wie z. B. <https://my-fish.org>, das vom VDA und dem Zentralverband Zoologischer Fachbetriebe Deutschlands e. V. (ZZF) unterstützt wird, oder auch <https://seriouslyfish.com/>.

Arbeitskreis Fischkrankheiten

Die COVID-19-Pandemie hat für die Aquarianer auch positive Seiten. Einige Organisationen bieten inzwischen Videokonferenzen oder Hybridtreffen über Themen der Aquaristik kostenlos für alle Interessenten an. Hier kann man nach und nach nahezu alle für die Aquaristik erforderlichen Kenntnisse und Fähigkeiten erwerben. Es existieren inzwischen auch einige sehr gute Youtube-Kanäle (z. B. Aquaddicted, Aquawowner) zum Thema, die man uneingeschränkt zur Fortbildung empfehlen kann. Ein besonderes Angebot liefert der Arbeitskreis (AK) Fischkrankheiten im VDA (<https://vda-online.de/informationen/item/109-vda-arbeitskreis-fischkrankheiten-akf/>). Auch bei

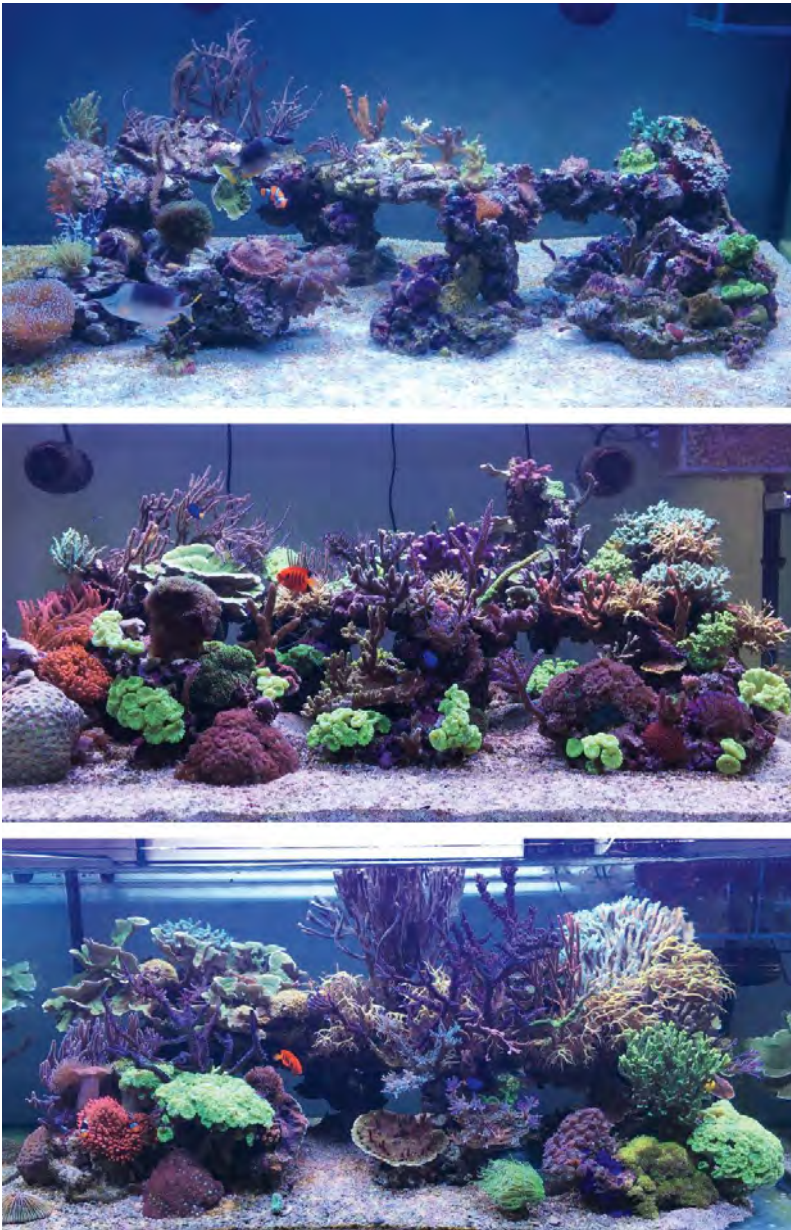


ABB. 6 Sukzession in einem Riffaquarium mit durch Fragmentation erhaltenen Korallenstücken, die alle aus Aquarienpopulationen stammten. Bild oben: wenige Wochen nach der Erstbestückung mit Korallenfragmenten. Bild mitte: drei Jahre später. Bild unten: weitere 16 Monate später. Zucht und Fotos: Daniel Knop.

bester Haltung kann es vorkommen, dass Fische erkranken. Um dem entgegenzuwirken, sind gute Kenntnisse über Krankheitsbilder und entsprechende Medikamentengabe erforderlich. Der AK bietet deshalb neben den 2-monatlichen ZOOM-Vorträgen kostenlose Fischuntersuchung und Hilfestellung bei der Krankheitsbekämpfung an.

Aquaristik als Bürgerwissenschaft

Auf die bis hierher geschilderte Weise hat sich die Aquaristik zu einer Bürgerwissenschaft (*Citizen Science*) mit weitreichenden Beziehungen in die akademischen natur-

wissenschaftlichen Fächer entwickelt, die darauf bedacht ist, ihre Ziele unter besonderer Nachhaltigkeit zu verwirklichen [19]. Dazu bedarf es einer Ausweitung der Netzwerkstrukturen, um neue Erkenntnisse über die Biologie der Aquarientiere möglichst schnell zu verbreiten. Auch die mit dem Vertrieb von Tieren und deren Futter- und Hilfsmitteln beschäftigten Verbände, z. B. ZZF und Industrieverband für Heimtierhaltung (IVH), werden einbezogen. Umfassende Information über den bei Aquarianern und privaten sowie öffentlichen Aquarienanlagen praktizierten Artenschutz ist wichtiger denn je, gibt es doch politische Bemühungen, die Importe exotischer Tiere vollständig zu unterbinden. Dieses Vorgehen überlässt nicht wenige Arten der vollständigen Ausrottung durch Zerstörung ihrer Lebensräume. Aquarianer sollten in einen noch stärkeren Diskurs mit der uninformierten Öffentlichkeit gehen, um als ein, neben anderen, gesellschaftlicher Pfeiler die weitere Entfremdung und Umweltzerstörung zu bekämpfen.

Aquaristik in Kitas und Schulen

Die Pandemie und die allgegenwärtige Präsenz des Internets haben junge Leute zunehmend davon abgehalten, sich mit der Aquaristik zu beschäftigen. In Schulen sind aus Schüler- oder Lehrermangel die Aquarien-AGs geschlossen worden. Das führt zu einer noch weiteren Entfernung von der Natur als bisher. Aquarien können dem entgegenwirken, sind sie doch geeignet, Fische im Gegensatz zu anderen Heimtieren gut und artgerecht zu halten. Deshalb besteht nun die Herausforderung für alle für ihr Hobby enthusiastische Vivaristen unter den Lehrern, ihre Begeisterung im Sinne Roßmäßlers an junge Leute zu vermitteln und auf diesem Weg wieder den Zugang zur Natur zu schaffen, den nicht wenige der heutigen Biologen in ihrer Jugend beschritten haben. Denn die Aquaristik generiert einen Zündfunken und bahnt den Weg für wissenschaftliche und erhaltungsorientierte Beschäftigung mit lebenden Organismen ganz allgemein [20].

Zusammenfassung

Aquarien üben seit jeher eine große Faszination aus. So findet man in manch einem Geschäft oder einer Arztpraxis ein meist eindrucksvolles Becken. Neben dieser ästhetischen Funktion haben Aquarien auch eine immer größere Rolle im Artenschutz. Einige Fischarten haben ihr einziges Rückzugsgebiet in Aquarien gefunden – mit stark steigender Tendenz. Glücklicherweise arbeiten zunehmend akademische Forschungsinstitute zusammen mit Aquakulturfarmen, öffentlichen Aquarien und privaten Haltern, um den Artenschwund zumindest teilweise aufzuhalten. Auf diese Weise hat sich die Aquaristik zu einer Bürgerwissenschaft (Citizen Science) entwickelt mit vielfältigen Beziehungen zu den benachbarten Naturwissenschaften. Der vorliegende Artikel gibt einige Beispiele für Initiativen und engagierte Organisationen.

Summary

Modern aquaristics – fascination and species conservation

Aquaria have always exerted a great fascination. Therefore, one finds impressive fish tanks in many a shop or medical practice. Apart from this aesthetic function, aquaria play a progressively greater role in species conservation. Some fish species have found their last refuge in tanks – definitely with an upward trend. Fortunately, academic research institutes increasingly work together with aquaculture farms, public aquaria and private owners to stop species extinction at least partly. In this way, fishkeeping by private aquarists has evolved into another branch of citizen science with multiple relationships to related sciences. The present article gives some examples of initiatives and active organizations.

Danksagung

Mein Dank gebührt Daniel Knop, Eberhard Schmidt (†) und Dieter Untergasser für die Überlassung der Fotos und Ingrid Liersch für das Korrekturlesen der ersten Version. Vielen Dank auch an Daniel und einen anonymen Gutachter für die wichtigen und wesentlichen Hinweise zur Riffaquaristik.

Schlagworte

Aquaristik, Artenschutz, Verband Deutscher Aquarien- und Terrarienvereine, Arbeitskreis Fischkrankheiten, Sachkundenachweis, Citizen Sciences

Literatur

- [1] E. A. Roßmäßler (1857). Das Süßwasseraquarium. Eine Anleitung zur Herstellung und Pflege desselben. Verlag: Hermann Mendelssohn, Leipzig.
- [2] J. Novák et al. (2020). Modern ornamental aquaculture in Europe: early history of freshwater fish imports. *Rev Aquacult* 12, 2042–2060. DOI: 10.1111/raq.12421
- [3] D. A. Conde (2011) An emerging role of zoos to conserve biodiversity. *Science* 331, 1390–1391. DOI: 10.1126/science.1200674
- [4] A. Maceda-Veiga et al. (2014). The aquarium hobby: can sinners become saints in freshwater fish conservation? *Fish Fisheries* 16, 860–874. DOI: 10.1111/faf.12097
- [5] S. Montgomery et al. (2019). Abenteuer Amazonas: Wie kleine Fische den größten Wald der Welt retten. Verlag Natur & Wissenschaft.
- [6] S. Ladislau et al. (2021). Ichthyological ethnoknowledge of the “piabeiros” from the Amazon region, Brazil | *Ethnobiol Ethnomed* 17, 42. <https://doi.org/10.1186/s13002-021-00468-7>
- [7] H. G. Evers et al. (2019). Where are they all from? – Sources and sustainability in the ornamental freshwater fish trade. *J Fish Biol* 94, 909–916. DOI: 10.1111/jfb.13930.
- [8] L. E. Wood et al. (2022). Biosecurity and the ornamental fish trade: A stakeholder perspective in England. *J. Fish Biol* 100. DOI: 10.1111/jfb.14928
- [9] M. V. Biondo und R. P. Burki (2020). A systematic review of the ornamental fish trade with emphasis on coral reef fishes – An impossible task. *Animals* 10: 2014. DOI: 10.3390/ani10112014
- [10] <https://ornamentalfish.org/what-we-do/represent-the-industry/fishing-for-facts/>

- [11] <https://wcof.ornamentalfish.org/>
- [12] T. A. King (2019) Wild caught ornamental fish: a perspective from the UK ornamental aquatic industry on the sustainability of aquatic organisms and livelihoods. *J Fish Biol* 94, 925–936. DOI: 10.1111/jfb.13900
- [13] Y.-J. Pan et al. (2022). Recent trends in live feeds for marine larviculture: A Mini Review. *Front Mar Sci* 9:864165. DOI: 10.3389/fmars.2022.864165
- [14] S. Pouil et al. (2020). Aquaculture of marine ornamental fish: overview of the production trends and the role of academia in research progress. *Rev Aquacult* 12, 1217–1230. DOI: 10.1111/raq.12381
- [15] S. Muka (2022). Taking hobbyists seriously: The reef tank hobby and knowledge production in serious leisure. *Stud Hist Philos Sci* 93, 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2022.04.002>
- [16] D. Knop und J. Moorhead (2012). Ornamentals. In: J. Lucas & P. Southgate: *Aquaculture – Farming Aquatic Animals and Plants*, pp. 583–605, Wiley-Blackwell.
- [17] W. A. Müller und T. Leitz (2002). Metamorphosis in the Cnidaria. *Can. J. Zool.* 80, 1755–1771. <https://doi.org/10.1139/z02-130>
- [18] L. Boström-Einarsson et al. (2020). Coral restoration – A systematic review of current methods, successes, failures and future directions. *PLoS ONE* 15(1), e0226631. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226631>
- [19] L. A. Harrington et al. (2022). Risks associated with the global demand for novel exotic pets: A new and emerging trade in snakehead fish (*Channa* spp.) from India. *Biol. Conservation* 265. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109377>
- [20] E. A. Marchio (2018). The art of aquarium keeping communicates science and conservation. *Front Commun* 3, 17. DOI: 10.3389/fcomm.2018.00017

Verfasst von:



Prof. Dr. Thomas Leitz wurde 1956 in Wiesbaden geboren. Er beschäftigt sich seit seinem 6. Lebensjahr mit der Aquaristik. Er studierte Biologie in Darmstadt und Mainz und verfasste seine Diplom- und Doktorarbeit über die Hormonphysiologie von Fischen. Nach einer Tätigkeit bei Hoechst AG (Abt. Biochemie) durchlief er die Hochschullaufbahn in Heidelberg bis zu einem Ruf auf die Professur „Entwicklungsbiologie der Tiere“ an der TU Kaiserslautern. In Heidelberg und Kaiserslautern war sein Arbeitsgebiet „Signale und Signaltransduktion bei der Entwicklung von Cnidariern“. Er wurde im Jahr 2020 pensioniert und ist seit 2019 Mitglied im VDA und im AK Fischkrankheiten. Dort ist er bestrebt, wissenschaftliche Sachverhalte für Nicht-Akademiker verständlich zu machen. Er ist Prüfer für die Sachkunde nach § 2 TSchG Süß- und Meerwasseraquaristik sowie Gartenteich.

Korrespondenz

Prof. Dr. Thomas Leitz
Brunnenstr. 71
67661 Kaiserslautern
Email: Leitz@bio.uni-kl.de

Einblick in die Zahnschmelzstruktur von Nagern und Insektenfressern

Auf den Zahn gefühlt

JANA STORSBERG

mit Marcus SCHMITT,
Gero HILKEN, Philip DAMMANN,
Sabine BEGALL, Kateryna LOZA,
Kai R. CASPAR, Matthias EPPLE



Riesen-Graumulle (*Fukomys mechowii*).

Die Zähne der Säugetiere bilden eine wichtige Funktionseinheit für die Nahrungsaufnahme. Die nötige Stabilität dafür gewährt der Zahnschmelz, dessen Struktur nicht nur die Materialeigenschaften bestimmt, sondern auch Aufschluss über Verwandtschaftsbeziehungen geben kann.

Im Laufe der Evolution entwickelten sich in den Kiefern von Säugetieren aus den gleichförmigen (homodonten), meist kegelförmigen Zähnen ihrer Vorfahren, den frühen synapsiden Reptilien, verschiedene (heterodonte) Zahnformen. Bei rezenten Säugetieren findet man typischerweise vier Arten von Zähnen: Schneidezähne (Incisivi), Eckzähne (Canini), Vorbackenzähne (Prämolaren) und Backenzähne (Molaren) [1].

Die zwei wichtigsten strukturellen Komponenten des Zahns sind der Zahnschmelz, der die Zahnkrone bildet, und das innenliegende Dentin, welches vom Schmelz ummantelt wird. Dabei profitieren Zahnschmelz und Dentin

von der jeweiligen Beschaffenheit des anderen. Der harte Zahnschmelz ist robust und schützt das weichere Dentin vor Schäden, wohingegen das elastische Dentin den spröden Schmelz stabilisiert. Im Inneren des Zahnes, umgeben von Dentin, findet sich die Zahnhöhle (Pulpa), die Blutgefäße und Nerven enthält. Durch eine oder mehrere Wurzeln ist der Zahn mithilfe der Wurzelhaut und des Zahnzements im Kieferknochen verankert [2, 3].

Diversität von Zahnschmelzmustern

Zahnschmelz ist die härteste Substanz im Körper der Säugetiere. Er setzt sich aus kristallinen Schmelzprismen zusammen, welche zu 96 Prozent aus anorganischem Material (Hydroxylapatit), drei Prozent aus Wasser und einem Prozent aus organischen Komponenten bestehen [4]. Struktur und Aufbau des Zahnschmelzes sind als optimiertes Hartmaterial evolutionär an die biomechanischen Anforderungen angepasst [2].

Zur Bildung von Zahnschmelz durchlaufen die schmelzbildenden Zellen (Ameloblasten) verschiedene Stadien. Nachdem sich die Zellen im Epithelgewebe des Kiefers ausdifferenziert haben, beginnen sie, die Schmelzmatrixproteine auszusecheiden. Kurz nach Beginn dieses

Prozesses entwickelt sich der sogenannte Tomes-Fortsatz, ein Zellfortsatz, der nur während der Schmelzausscheidung in Ameloblasten zu finden ist. Die Ausbildung des Fortsatzes bestimmt die Struktur des sich bildenden Schmelzes. So entsteht an der distalen Stelle des Tomes-Fortsatzes jene Matrix, die sich später zu Prismen ausdifferenziert, während sich am proximalen Fortsatz die interprismatische Matrix bildet. Ist der Fortsatz nicht ausgebildet, wird nicht-prismatischer Schmelz erzeugt. Wenn der Zahnschmelz seine Enddicke erreicht hat, wird die Ausscheidung beendet, und die Ameloblasten durchlaufen weitere zytologische Veränderungen. Anschließend beginnt die Maturationsphase, bei der die ausgeschiedene Matrix mineralisiert wird [5].

Die Organisation der Schmelzprismen unterscheidet sich zwischen verschiedenen Säugetiergruppen und kann so Aufschluss über die Position einer Art im Stammbaum geben. Dieser Zusammenhang wurde bereits Mitte des 19. Jahrhunderts von dem viktorianischen Zahnarzt John Tomes [6] beschrieben und erfuhr insbesondere in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts nach der breiten Etablierung elektronenmikroskopischer Techniken große Aufmerksamkeit in der zoologischen Forschung [7]. Heutzutage mag diese Technik in Anbetracht genomischer Methoden zur Untersuchung von Verwandtschaftsbeziehungen antiquiert wirken, aber sie bleibt relevant: Schmelzmusteranalysen können nämlich auch problemlos auf fossile Arten angewendet werden [7]. Gerade bei Säugetieren, die insbesondere durch häufig isolierte Zähne fossil dokumentiert sind, können so wertvolle entwicklungs-geschichtliche Einblicke gewonnen werden.

Im Folgenden zeigen wir, wie man die Zahnschmelzstruktur von Säugetieren praktisch studieren kann, und illustrieren die Diversität von Schmelzmustern anhand von ausgewählten Kleinsäugerarten aus den Gruppen der Nagetiere (Rodentia), Hasenartigen (Lagomorpha) und Insektenfresser (Eulipotyphla). Zuvor möchten wir die Zähne dieser drei Gruppen kurz allgemein charakterisieren.

Nagetiere

Nagetiere (Rodentia) sind das artenreichste Taxon der Säugetiere. Ihre Vertreter sind an die unterschiedlichsten Lebensräume und Ernährungsweisen angepasst. So sind Hausmaus (*Mus musculus*) und Waldmaus (*Apodemus sylvaticus*) als Allesfresser in ihrem Nahrungsspektrum sehr breit aufgestellt und fressen Samen, Früchte und Nüsse genauso wie Pilze, Wurzeln und Knospen oder Wirbellose (z. B. Regenwürmer, Insekten und Spinnen). Andere Arten hingegen zeigen mehr oder weniger starke Spezialisierungen auf einzelne Nahrungsquellen, so etwa der in Chile beheimatete Coruro (*Spalacopus cyanus*), ein grabender Nager. Der Großteil seiner natürlichen Nahrung besteht aus Knollen von Yamswurzeln (*Dioscorea* sp.) sowie Pflanzenteilen der Liliengewächs-Gattung *Leucocoryne*. Außerdem findet die Nahrungsaufnahme nahezu ausschließlich unterirdisch statt [8, 9].

Das Gebiss von Nagetieren ist durch die dauerwachsenden Nagezähne (Incisivi, abgekürzt I) in Ober- und Unterkiefer charakterisiert. Diese Zähne bilden nur an der Vorderseite (labial) Zahnschmelz aus, welcher regelmäßig durch die Kaubewegung und den damit verbundenen Kontakt der Inzisiven von Ober- und Unterkiefer abgeschliffen wird und so eine immer scharfe Scherkante bietet. Hinter den Schneidezähnen folgt eine ausgeprägte Lücke (Diastema), die dadurch entsteht, dass sowohl weitere Schneidezähne sowie die Eckzähne (Canini, C) vollständig reduziert sind. Die Molaren (M) sind neben den Inzisiven die einzigen Zähne, die in jedem Nagetiergebiss ausgeprägt sind. Die Zahnformeln reichen daher von I 1/1, C 0/0, P 2/1, M 3/3 = 22 bis I 1/1, C 0/0, P 0/0, M1/1

DARSTELLUNG VON ZAHNFORMELN

Zahnformeln zeigen eine Übersicht der bei einem Säugetier vorkommenden Zähne. Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, diese darzustellen. Meist wird nur eine Kieferhälfte abgebildet, da der Kiefer vertikal spiegelsymmetrisch ist. Die Zähne des Oberkiefers befinden sich über dem Bruchstrich, die des Unterkiefers unter dem Bruchstrich. Die Reihenfolge der Zähne ist dabei immer Incisivi, Canini, Prämolaren, Molaren. Am Ende der Formel findet sich die Gesamtzahl der Zähne beider Hälften eines Kiefers. Auch eine Auflistung der einzelnen Zähne eines Zahntyps ist möglich. Dabei wird die Abkürzung des Zahns mit der entsprechenden Nummerierung genannt. Bei der Darstellung der Zahnformel in einer Zeile wird diese Reihenfolge beibehalten, und die Zähne werden mit einem Buchstaben abgekürzt. Hier steht die Zahl vor dem Strich für die Anzahl der Zähne dieses Zahntyps im Oberkiefer, die Zahl dahinter für den Unterkiefer. Ist ein Zahntyp vollständig reduziert (fehlt), so wird das durch einen Strich oder eine Null gezeigt.

$\frac{I \cdot C \cdot P \cdot M}{I \cdot C \cdot P \cdot M} = \text{Gesamtzahl}$	I = Incisivi (Schneidezähne)
$\frac{I1I2 \ C1 \ P1P2 \ M1M2M3}{I1I2 \ C1 \ P1P2 \ M1M2M3} = \text{Gesamtzahl}$	C = Canini (Eckzähne)
$I1/1, C1/1, P2/2, M3/3 = \text{Gesamtzahl}$	P = Prämolaren (Vorbackenzähne)
	M = Molaren (Backenzähne)

Nagetiergebiss:

$$\frac{1 \cdot 0 \cdot 2 \cdot 3}{1 \cdot 0 \cdot 1 \cdot 3} = 22 \qquad \frac{I1-P1P2 \ M1M2M3}{I1-P1-M1M2M3} = 22 \qquad I1/1, C0/0, P2/1, M3/3 = 22$$

Diese Beispiele eines typischen Nagetiergebisses zeigen, dass jeweils ein Schneidezahn, keine Eckzähne, zwei Prämolaren sowie drei Molaren in einer Oberkieferhälfte angelegt sind. Im Unterkiefer findet man einen Schneidezahn, keine Eckzähne, einen Prämolaren und drei Molaren. Das gesamte Gebiss besteht demnach aus 22 Zähnen.

IN KÜRZE

Zahnschmelz ist das **härteste Material** im Körper von Säugetieren. Zahnschmelzprismen bestehen aus **Hydroxylapatit** und zeigen spezifische Anordnungen, die sogenannten Schmelzmuster. Die Schneidezähne von Nagetieren und Hasenartigen **wachsen ein Leben lang**. Die Zähne der Nagetiere zeigen die **unterschiedlichsten Schmelzmuster**. **Phylogenie, Ernährung und Lebensweise** haben Einfluss auf die Zahnschmelzstruktur.

= 8 [9] (siehe auch Kasten „Darstellung von Zahnformeln“).

Durch die Anpassung an die Nahrung ist die Kiefermuskulatur von Nagern sehr ausgeprägt. Das Vorschieben des Unterkiefers ermöglicht das Nagen mit den Schneidezähnen. Ein Zurückziehen des Unterkiefers lässt die Backenzähne in Kontakt treten, so dass eine kauende Bewegung zur Zerkleinerung der abgebissenen Nahrung möglich wird. Bei vielen unterirdisch lebenden Nagetieren wie dem Coruro oder dem Nacktmull (*Heterocephalus glaber*) dienen die Zähne als Grabinstrumente [9].

Hasenartige

Das Taxon der Hasenartigen (Lagomorpha) ist die Schwesterlinie der Rodentia. Zusammengefasst werden die beiden Gruppen als Glires bezeichnet. Die Lagomorpha umfassen die etwa 70–80 Arten der Pfeifhasen (Ochotonidae), Hasen und Kaninchen (Leporidae). Wie die Rodentia besitzen die Lagomorpha dauerwachsende Schneidezähne und ein ausgeprägtes Diastema.

Die Bezahnung der beiden Gruppen unterscheidet sich jedoch in wichtigen Aspekten: Beispielsweise sind die 2. Inzisiven des Oberkiefers bei den Lagomorphen zu den sogenannten Stifzähnen umgebildet und hinter die Nagezähne, die tiefe Längsrinnen aufweisen, gerückt. So erklärt sich der alte Name Duplicidentata („Doppelzähler“) für die Hasenartigen. Die Zahnformel lautet: I 2/1, C 0/0, P 3/2, M 3-2/3 = 28-26. Die Nahrung der Lagomorpha besteht hauptsächlich aus Gräsern und Kräutern [10].

Insektenfresser

Das Taxon der Insektenfresser (Eulipotyphla) umfasst 5–6 Hauptlinien und lässt sich kaum durch abgeleitete morphologische Merkmale von anderen Säugetieren abgrenzen. Mitglieder dieser Tiergruppe scheinen in vielen Merkmalen sehr ursprünglich zu sein, und ihre Systematik ist bis heute umstritten. Gemeinhin umfassen die Eulipotyphla die Igel und Maulwürfe sowie Spitzmäuse und Schlitzrüssler. Interessanterweise schließen sie mit der auch in Deutschland heimischen Wasserspitzmaus (*Neomys* sp.),

der Kurzschwanz-Spitzmaus (*Blarina* sp.) und dem Schlitzrüssler (*Solenodon* sp.) einige der wenigen giftigen Säugetiere ein (andere sind die zu den Primaten zählenden Pluimploris (*Nycticebus* sp.) und das Schnabeltier (*Ornithorhynchus anatinus*)) [11].

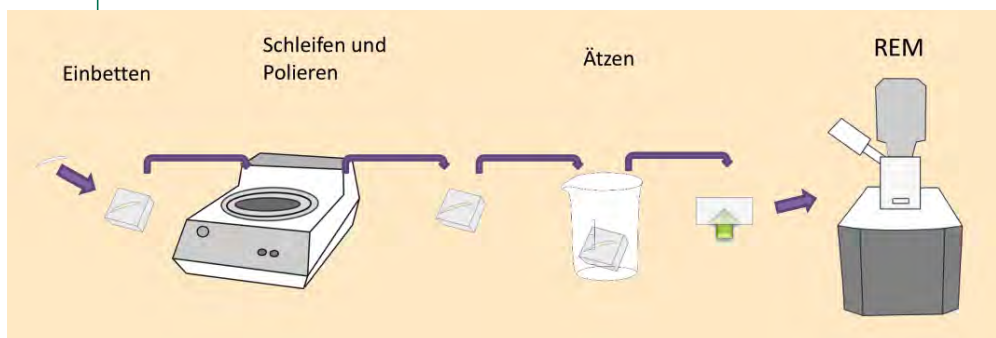
Insektenfresser ernähren sich von Wirbellosen, darunter vor allem Insekten, Regenwürmer, Schnecken und Spinnentiere. Um diese Nahrung zerkleinern zu können, haben sie Molaren mit spitzen Höckern und scharfen Schmelzleisten entwickelt. Die Zahnformel ist bei den verschiedenen Arten variabel, aber mit ihrer hohen Zahnzahl recht nahe an der ursprünglichen Formel der Placentalia (I 3/3, C 1/1, P 4/4, M 3/3 = 44). Sie variieren von I 1/1, Z 2–5/1, P 1/1, M 3/3 = 26–32 bis I 3/3, C 1/1, P 3/3, M 3/3 = 40. Z bezeichnet hierbei sogenannte Zwischenzähne, da eine eindeutige Zuordnung dieser einspitzigen Zähne in die gewohnten Kategorien schwierig ist. Der vordere Gebissbereich kann durch ein Diastema abgegrenzt sein, und die Prämolaren nehmen häufig eine ähnliche Form wie Molaren an (molariform). Außerdem kann das Gebiss Zähne enthalten, die vergrößert sind und denen bei der Nahrungsaufnahme eine besondere Aufgabe zu Teil wird [11].

Präparation von Säugetierzähnen

Um die Schmelzstruktur von Säugetierzähnen untersuchen zu können, müssen diese speziell präpariert werden. Im Folgenden beschreiben wir beispielhaft die von uns angewandte Methode (Abbildung 1). Zunächst wurden die Zähne aus den Kiefern entnommen und in Epoxidharz eingebettet. Dadurch werden die häufig sehr kleinen Zähne vor Beschädigung wie etwa dem Splittern des Zahnschmelzes geschützt. Anschließend wurden sie mittels einer Schleif- und Poliermaschine auf die gewünschte Ebene (in unserem Fall in Längsschnitt-Orientierung) heruntergeschliffen und diese zum Abschluss mit einer Diamantsuspension poliert. Das Einlegen in eine schwache Säure löst den Zahnschmelz etwas an, wodurch die Schmelzprismen optisch besser hervortreten. Um die Probe im Rasterelektronenmikroskop untersuchen zu können, wurde sie auf Probenhaltern montiert und mit Gold-Palladium bedampft. Die Rasterelektronenmikroskopie ist für die Untersuchung solcher Proben besonders geeignet, da mit ihrer Hilfe die Ultrastruktur des Zahnschmelzes ausgesprochen gut sichtbar gemacht werden kann. Ein feinfokussierter Elektronenstrahl rastert dabei die Probenoberfläche ab und ermöglicht aufgrund seiner kleineren Wellenlänge eine weitaus höhere Auflösung als die Lichtmikroskopie.

Zur Untersuchung wurden Schneidezähne folgender Arten herangezogen (Abbildung 2): Von den

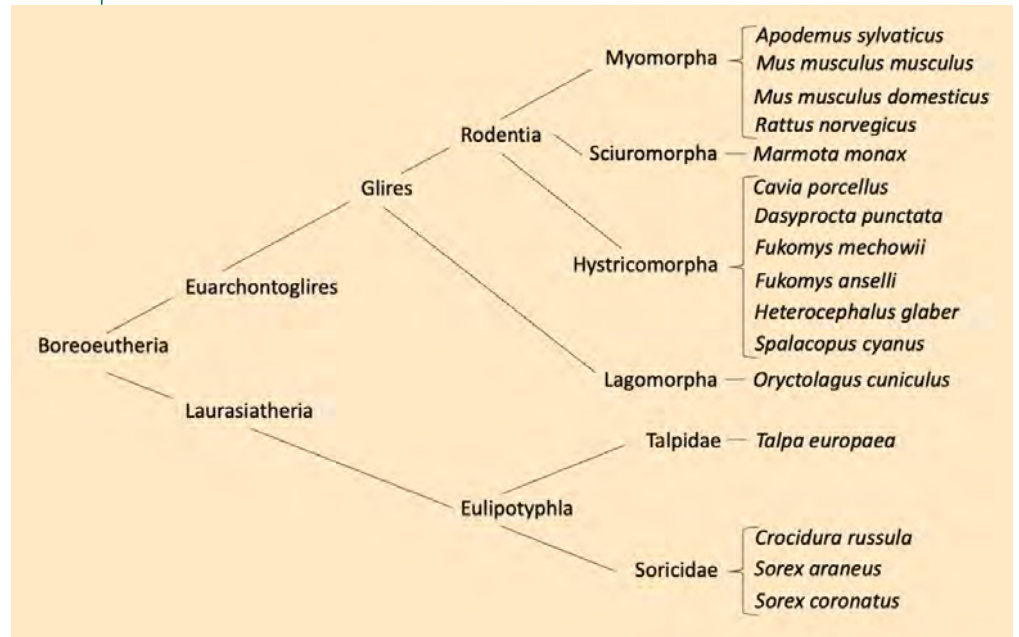
ABB. 1 | PRÄPARATION VON SÄUGETIERZÄHNEN



Die Probenpräparation läuft nach folgendem Schema ab: Zahn einbetten in Epoxidharz, schleifen und polieren, um den Zahn auf der gewünschten Ebene freizulegen, mit schwacher Säure anätzen, montieren auf Probenträger, Untersuchung im Rasterelektronenmikroskop (REM).

Rodentia wurden Waldmaus (*Apodemus sylvaticus*), Östliche und Westliche Hausmaus inkl. Labormausstämmen (*Mus musculus musculus*, *Mus musculus domesticus*, Stämme Balb/c und C57BL/6), ein Laborstamm der Wanderratte (*Rattus norvegicus*, LEW/CrI), Waldmurmeltier (*Marmota monax*), Meerschweinchen (*Cavia porcellus*), Mittelamerikanisches Aguti (*Dasyprocta punctata*), Coruro (*Spalacopus cyanus*), Ansell-Graumull (*Fukomys anelli*), Riesen-Graumull (*Fukomys mechowii*) und Nacktmull (*Heterocephalus glaber*) untersucht. Von den Lagomorpha wurden die Schneidezähne des Wildkaninchens (*Oryctolagus cuniculus*) untersucht. Zum Vergleich wurden Schneidezähne von vier Vertretern der Eulipotyphla herangezogen: Maulwurf (*Talpa europaea*), Hausspitzmaus (*Crocidura russula*), Waldspitzmaus (*Sorex araneus*) und Schabrackenspitzmaus (*Sorex coronatus*). Es werden nachfolgend die Zähne aller untersuchten Arten beschrieben, aber nicht alle abgebildet.

ABB. 2 | VEREINFACHTER STAMMBAUM DER UNTERSUCHTEN ARTEN.



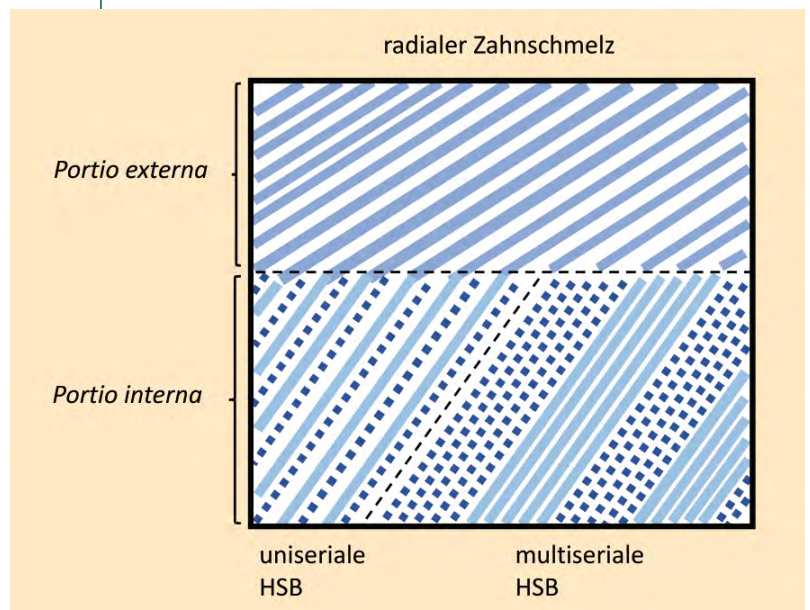
Dargestellt werden aus dem Taxon Glires: Waldmaus (*Apodemus sylvaticus*), Hausmaus (*Mus musculus musculus*, *Mus musculus domesticus*), Ratte (*Rattus norvegicus*, Laborstamm LEW/CrI), Waldmurmeltier (*Marmota monax*), Meerschweinchen (*Cavia porcellus*), Aguti (*Dasyprocta punctata*), Coruro (*Spalacopus cyanus*), Ansell-Graumull (*Fukomys anelli*), Riesen-Graumull (*Fukomys mechowii*), Nacktmull (*Heterocephalus glaber*) und Kaninchen (*Oryctolagus cuniculus*). Zum Außengruppenvergleich wurden Insektenfresser herangezogen: Maulwurf (*Talpa europaea*), Hausspitzmaus (*Crocidura russula*), Waldspitzmaus (*Sorex araneus*) und Schabrackenspitzmaus (*Sorex coronatus*). Nicht untersuchte Subtaxa werden nicht dargestellt.

Schmelzmuster der untersuchten Tierarten

Die verschiedenen Schmelztypen, die in prismatischem Zahnschmelz vorkommen können, werden gemäß von Koenigswald als Schmelzmuster beschrieben [12]. Während der Zahnentwicklung bestimmen die Tomes-Fortsätze die spätere Ausrichtung der Prismen und damit der Hunter-Schreger-Bänder (HSB), die unterschiedliche Prismenorientierungen beschreiben. Dabei variieren die Prismen in unterschiedlich dicken Bändern hinsichtlich ihrer Ausrichtung. Sie kommen in dicken Schichten von ein bis 30 Prismen vor und werden aufgrund ihrer Banddicke und Orientierung der interprismatischen Matrix (IPM) in Untertypen aufgeteilt [12].

Die beobachteten Schmelzstrukturen der untersuchten Nagergruppen fallen genau in die bereits seit langem dokumentierten Muster und legen eher Verwandtschaftsbeziehungen als Ernährungsweisen offen. Bei den Schneidezähnen der Nagetiere werden zwei Schichten von Zahnschmelz unterschieden: Der äußere Teil des Zahnschmelzes, auch *Portio externa* genannt, und der innere Teil, *Portio interna* (Abbildung 3). Dabei ist das häufigste Schmelzmuster, der radiale Zahnschmelz, meist in der *Portio externa* zu finden. Er wird charakterisiert durch Prismen, die parallel verlaufen und radial von der Schmelz-Dentin-Grenze wachsen. In den weiteren Schmelzmustern wechseln die Schmelzprismen ihre Richtung. Uniseriale

ABB. 3 | AUFBAU UND TYPEN VON ZAHNSCHMELZ BEI NAGETIEREN



Zahnschmelz ist in eine äußere Schicht (*Portio externa*) und eine innere Schicht (*Portio interna*) aufgeteilt. Die äußere Schicht besteht in der Regel aus radial angeordneten Schmelzprismen, während die innere Schicht häufig von uniserialen oder multiserialen Hunter-Schreger-Bändern (HSB) gebildet wird. Die unterschiedliche Farbgebung beschreibt dabei die Orientierung der Schmelzprismen. In den weißen Bereichen befindet sich die interprismatische Matrix (IPM).

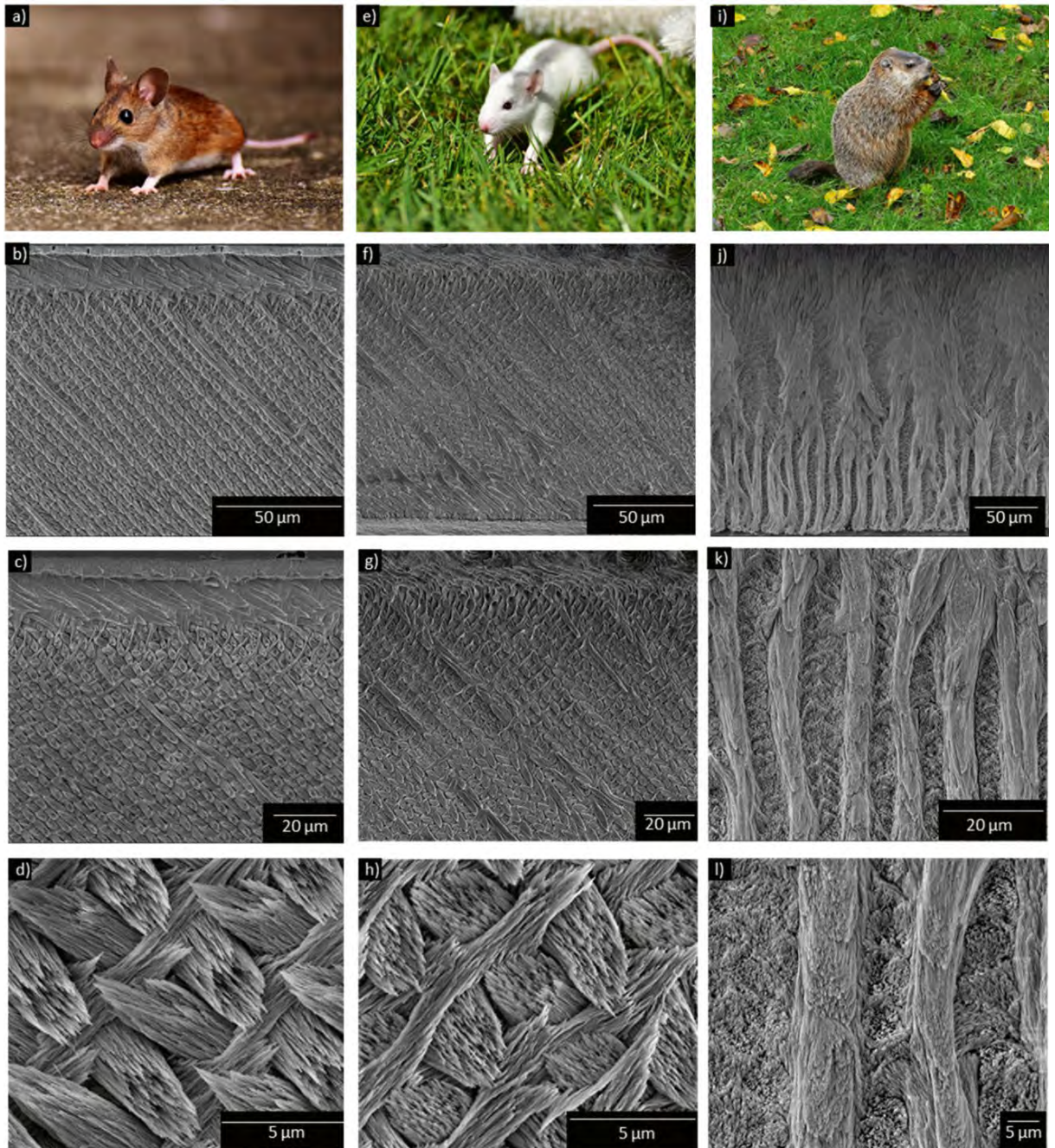


ABB. 4 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme uniserialer Hunter-Schreger-Bänder am Beispiel der Waldmaus (*Apodemus sylvaticus*, a–d), der Ratte (*Rattus norvegicus*, e–h) und des Waldmurmeltiers (*Marmota monax*, i–l). Das Waldmurmeltier stellt eine Ausnahme dar, da die uniserialen HSB so modifiziert sind, dass sie multiserialen HSB ähneln.

HSB bestehen aus Schichten, die ein Prisma dick sind und sich pro Schicht in ihrer Ausrichtung unterscheiden. Die Kristallite der interprismatischen Matrix verlaufen meist in einem Winkel von etwa 90° versetzt zu den Prismen [12]. Dieses Muster ist typisch für die Myomorpha (Mäuseverwandte) und findet sich bei allen untersuchten Schneidezähnen der Mäuse (Abbildung 4 a–c) sowie der Ratte (Abbildung 4 d–f). Auch hinsichtlich ihrer omnivoren Ernährung ähneln sie sich [7, 13].

Der Schneidezahnschmelz der Sciuomorpha (Hörnchenverwandte) ist meist ähnlich aufgebaut wie jener der Myomorpha. Er besteht aus uniserial angeordneten Schmelzprismen mit meist parallel verlaufender interprismatischer Matrix in der *Portio interna* und radialem Schmelz in der *Portio externa*. In der hier untersuchten Gattung *Marmota* (Abbildung 4 g–i) kann es jedoch zu einem modifizierten Muster kommen, bei dem die Prismen so angeordnet sind, dass sie den multiserialen HSB ähneln [7, 13].

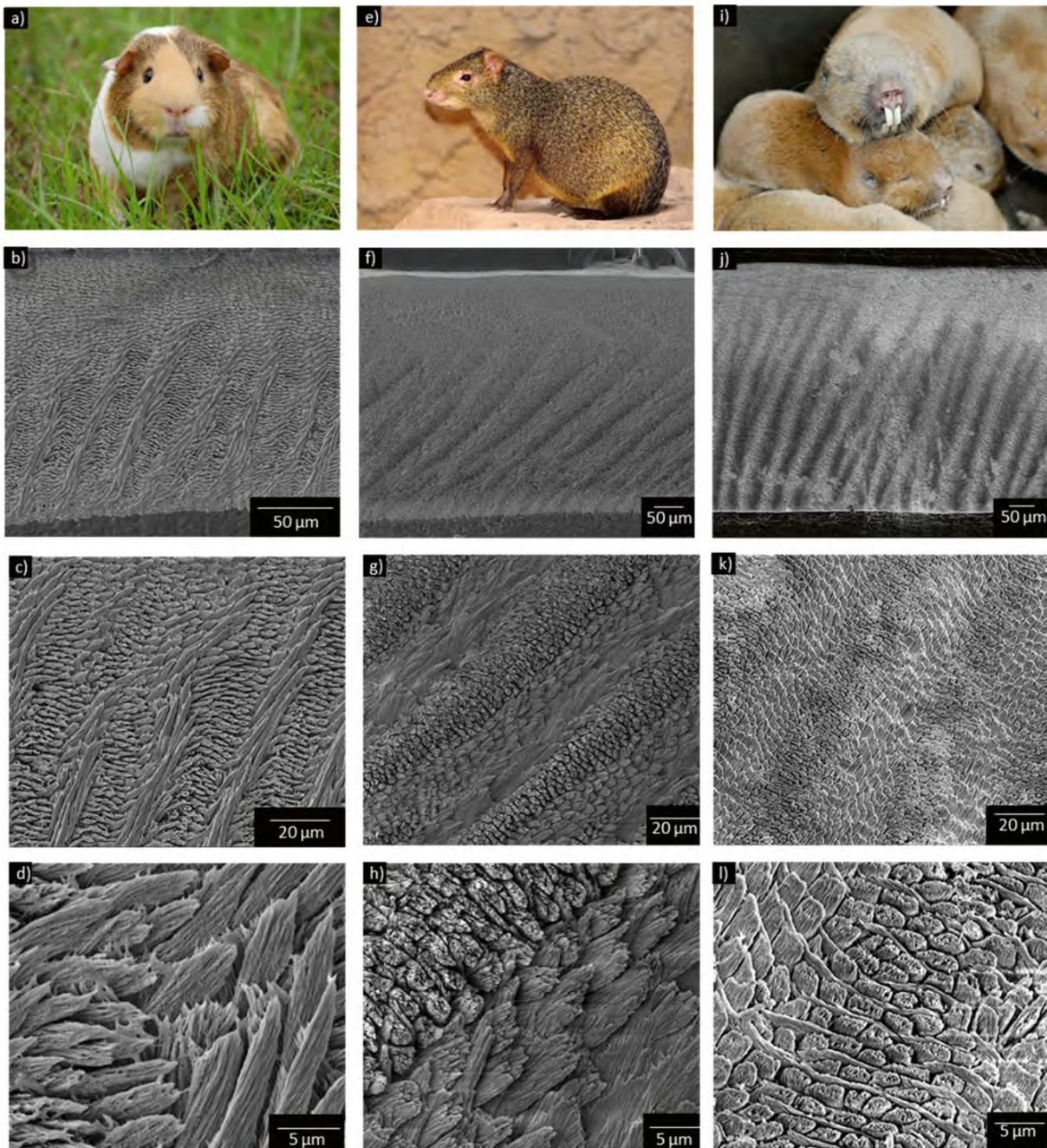


ABB. 5 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme multiserieller Hunter-Schreger-Bänder am Beispiel des Meer-schweinchens (*Cavia porcellus*, a–d), des Agutis (*Dasyprocta punctata*, e–h) und des Riesen-Graumulls (*Fukomys mechowii*, i–l).

Meerschweinchen (Abbildung 5 a–c), Aguti (Abbildung 5 d–f), Coruro, Ansell-Graumull, Riesen-Graumull (Abbildung 5 g–i) und Nacktmull zählen alle zu den Hystricognathi (Stachelschweinverwandte) und zeigen das für dieses Subtaxon der Nagetiere typische Schmelzmuster: Radialer Schmelz in der *Portio externa* und multiseriale HSB in der *Portio interna* [7]. Eine Abweichung ist lediglich in der *Portio externa* bei Vertretern der Bathyergidae, also den Nackt- und Graumullen, zu finden. In der Regel

sind die Prismen bei anderen Nagetieren in diesem Bereich stark geneigt, in dieser Familie aber sind sie horizontal angeordnet [13]. Möglicherweise wird die Ausrichtung durch die stark abweichende Nutzung der Zähne bei den Mullen beeinflusst, die ihre Incisivi auch zum Graben verwenden. Bemerkenswerterweise zeigt der Coruro dieses Muster aber nicht, obwohl auch er ein Zahngräber ist [9]. Obwohl alle hier genannten Arten der Hystricognathi Pflanzenfresser sind, unterscheiden sie sich hinsichtlich

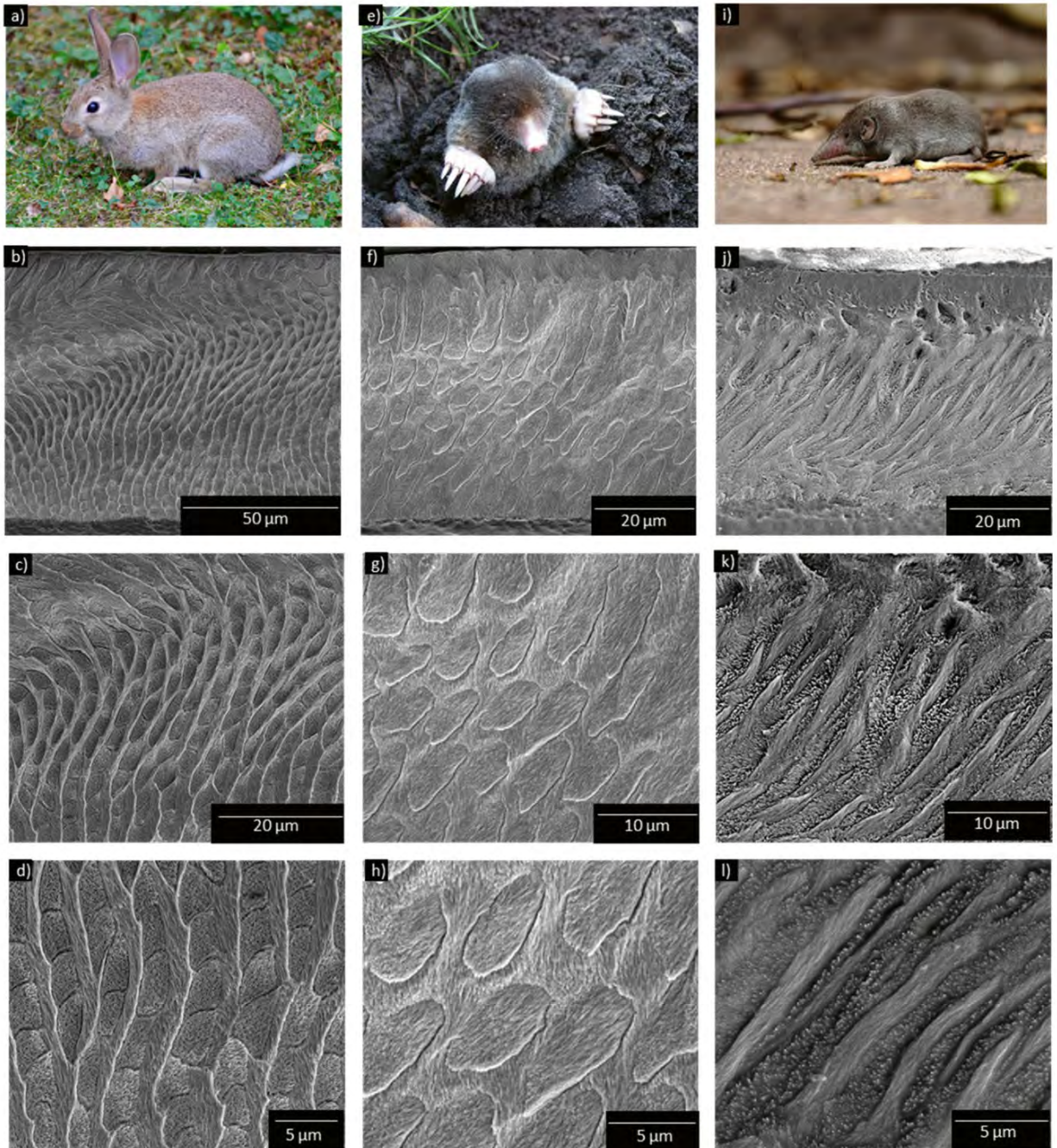


ABB. 6 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einschichtiger Hunter-Schreger-Bänder im Schmelz des Wildkaninchens (*Oryctolagus cuniculus*, a–d), sowie radialer Schmelz des Europäischen Maulwurfs (*Talpa europaea*, e–h) und der Spitzmaus, hier am Beispiel der Schabrackenspitzmaus (*Sorex coronatus*, i–l).

ihrer Nahrungspflanzen bzw. der bevorzugten Pflanzenorgane (Blätter, Stängel, Wurzeln, Knollen etc.). Jedoch wird die Schmelzstruktur eindeutig stärker von der Verwandtschaft als von ökologischen Faktoren bestimmt.

Das Kaninchen (*Oryctolagus cuniculus*, Abbildung 6 a–c) weist wie auch die Nagetiere ständig wachsende Schneidezähne auf. Oberflächlich erscheint die Bezahnung von Kaninchen und Nagern sehr ähnlich zu sein, aber die Ultrastruktur unterscheidet sich fundamen-

tal. Der Zahnschmelz dieser Zähne besteht nur aus einer Zahnschmelzschicht mit durchgehenden HSB [7]. Das illustriert, dass Schmelzmuster Verwandtschaftsbeziehungen gut nachzeichnen können. Die Nagezähne des Kaninchens müssen im Gegensatz zu denen einiger Nagetiere nicht so starken Belastungen standhalten. Sie werden ausschließlich zum Abschneiden und Halten von Pflanzenteilen verwendet oder in seltenen Fällen zum Abnagen von Rinde, aber beispielsweise nie zum Graben [10].

Die Schmelzmuster sind bei Insektivoren einfach, und die Belastbarkeit der Zähne ist – verglichen mit den anderen betrachteten Gruppen – gering. So ist der Zahnschmelz des Maulwurfs (Abbildung 6 d–f) aus radial angeordneten Prismen aufgebaut, zwischen denen leicht versetzt die interprismatische Matrix verläuft [7]. Der Maulwurf lebt, ähnlich wie die Mulle, hauptsächlich unter der Erde. Im Gegensatz zu diesen, ist er jedoch ein Handgräber und nutzt zum Graben ausschließlich seine speziell ausgebildeten Vorderextremitäten. Es finden sich deshalb keine besonderen Anpassungen an eine zahngrabende Lebensweise in den Zähnen des Maulwurfs [11].

Bei den Spitzmäusen zeigen sich ein- und zweischichtige Schmelzmuster, die typisch für die jeweiligen Gattungen sind. Der Zahnschmelz der untersuchten Hausspitzmaus (*Crocidura russula*) zeigt das *Crocidura*-Schmelzmuster, welches einschichtig ist. In Bereichen, in denen der Zahnschmelz dünn ist, findet man den radialen Schmelz, während in Bereichen dickeren Zahnschmelzes zwei Zonen zu erkennen sind. Die innere Zone zeigt dabei den typischen radialen Schmelz, in der äußeren Zone gehen die radial angeordneten Schmelzprismen in die interprismatische Matrix über [14].

Waldspitzmaus (*Sorex araneus*) und Schabrackenspitzmaus (*Sorex coronatus*, Abbildung 6 g–i) zeigen ein gattungstypisches Schmelzmuster aus zwei Schichten. Die äußere Schicht besteht aus prismenlosem, die innere aus lamellarem Schmelz. Lamellarer Schmelz entspricht uniserialen HSB, wobei der Gebrauch des letztgenannten Begriffs bislang den Rodentia vorbehalten wurde [12, 14]. Die relativ einfachen Schmelzmuster der Insektivoren scheinen für Säugetiere ursprünglich zu sein [15].

Wir zeigen hier, dass der Zahnschmelz in Kleinsäugetern vielfältig aufgebaut ist. Er spiegelt zu einem gewissen Grad die Ernährungs- und Lebensweisen wider, wird aber vor allem durch die phylogenetische Verwandtschaft bestimmt. Die Anordnung der Prismen und der interprismatischen Matrix beeinflussen dabei vor allem die Stabilität des Zahnschmelzes. Durch die unterschiedliche Prismenausrichtung wird der Schmelz widerstandsfähiger und einem Aufsplittern vorgebeugt. Trotzdem ist er nicht vor Abrieb geschützt. Wird der Zahnschmelz besonders abrasiver Nahrung ausgesetzt oder anderweitig stark abgenutzt, so wird dem Verschleiß bei verschiedenen Säugetieren mit einem Dauerwachstum der Zähne entgegengewirkt. So wachsen die Nagezähne der Rodentia und Lagomorphen – und bei manchen Arten (z. B. Meerschweinchen, Coruro, Kaninchen) auch die Molaren – zeitlebens nach.

Zusammenfassung

Der Zahnschmelz von Säugetieren ist aus einzelnen Schmelzprismen aufgebaut und bildet die härteste Substanz des Körpers. Die Anordnung dieser Prismen kann sich von Art zu Art unterscheiden. Für die vorliegende Studie wurden die Schneidezähne von 18 Arten der Nagetiere,

Hasenartigen und Insektenfresser ausgewählt. Mittels Rasterelektronenmikroskopie kann der Aufbau des Zahnschmelzes offengelegt werden. Nahe Verwandte wie Maus und Ratte zeigen ein sehr ähnliches Bild. Vergleicht man dagegen den Schmelz entfernt verwandter Taxa wie Meerschweinchen oder Waldmurmeltier, so wird deutlich, dass innerhalb der Nagetiere deutlich abweichende Schmelzmuster zu finden sind. Eine andere Ultrastruktur zeigen die Zähne der Insektenfresser wie Maulwurf oder Spitzmaus. Dies illustriert den Einfluss von Ernährung, Lebensweise und vor allem der Phylogenie der Tiere auf die Struktur des Zahnschmelzes.

Summary

Insight into the tooth enamel structure of rodents and insectivores

Dental enamel consists of enamel prisms and forms the hardest substance in the mammalian body. The arrangement of these prisms can differ from species to species. The incisors of 18 species of rodents, lagomorphs, and insectivores were selected for the present study. Scanning electron microscopy reveals the inner structure of tooth enamel. Close relatives such as mice and rats show a very similar enamel pattern. However, when the enamel of distantly related taxa such as guinea pig and woodchuck is compared, it becomes apparent that distinctly different enamel patterns can be found in rodents. The teeth of insectivores, such as moles or shrews, show a different enamel morphology. These observations illustrate the influence of diet, lifestyle, and in particular the phylogeny of the animals on the structure of the tooth enamel.

Schlagworte:

Zahnschmelz, Schmelzmuster, Nagetiere, Insektenfresser

Literatur

- [1] H. F. Osborn (1888). The evolution of mammalian molars to and from the tritubercular type. *The American Naturalist* 22, 1067–1079.
- [2] S. Hillson (2005). *Teeth*, 2 ed., Cambridge University Press, Cambridge.
- [3] A. Nanci (2013). Chapter 1 – Structure of the Oral Tissues, in: A. Nanci (Ed.), *Ten Cate's Oral Histology (Eighth Edition)*, Mosby, St. Louis (MO), 2013, 1–13.
- [4] M. Epple, J. Enax (2018). Moderne Zahnpflege aus chemischer Sicht, *Chemie in unserer Zeit* 52(4), 218–228.
- [5] L. M. Moss-Salentijn, M. L. Moss, M. Sheng-Tien Yuan (1997). The ontogeny of mammalian enamel, in: W. v. Koenigswald, P. M. Sander (Ed.), *Tooth Enamel Microstructure*, CRC Press, London.
- [6] J. Tomes (1850). XXVIII. On the structure of the dental tissues of the order rodentia, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 140, 529–567.
- [7] W. v. Koenigswald (1997). Brief survey of enamel diversity at the schmelzmuster level in Cenozoic placental mammals, in: W. v. Koenigswald, P. M. Sander (Ed.), *Tooth Enamel Microstructure*, CRC Press, London, 137–161.
- [8] S. Begall, M. H. Gallardo (2006). *Spalacopus cyanus* (Rodentia: Octodontidae): an extremist in tunnel constructing and food storing among subterranean mammals, *Journal of Zoology* 251(1), 53–60.

- [9] R. Hutterer (2015). Rodentia, in: W. Westheide, G. Rieger (Ed.), *Spezielle Zoologie Teil 2: Wirbel- oder Schädeltiere*, Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 551–566.
- [10] R. Angermann (2015). Lagomorpha, in: W. Westheide, G. Rieger (Ed.), *Spezielle Zoologie Teil 2: Wirbel- und Schädeltiere*, Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 544–550.
- [11] G. Storch, R. J. Asher (2015). Laurasiatheria, in: W. Westheide, G. Rieger (Ed.), *Spezielle Zoologie Teil 2: Wirbel- oder Schädeltiere*, Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 567–574.
- [12] W. v. Koenigswald, P. M. Sander (1997). Glossary of terms used for enamel microstructures, in: W. v. Koenigswald, P. M. Sander (Ed.), *Tooth Enamel Microstructure*, CRC Press, London, doi: 10.1201/9781003077930-15.
- [13] T. Martin (1997). Incisor enamel microstructure and systematics in rodents, in: W. v. Koenigswald, P. M. Sander (Ed.), *Tooth Enamel Microstructure*, CRC Press, London, 163–175.
- [14] W. v. Koenigswald, J. W. F. Reumer (2020). The enamel microstructure of fossil and extant shrews (Soricidae and Heterosoricidae, Mammalia) and its taxonomical significance, *Palaeontographica Abteilung A* 316(1–6), 79–163.
- [15] W. v. Koenigswald, J. M. Rensberger, H. U. Pretzschner (1987). Changes in the tooth enamel of early Paleocene mammals allowing increased diet diversity, *Nature* 328, 150–152.

Verfasst von:



Jana Storsberg studierte Biowissenschaften an der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main und Anthropologie an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. Ihre Bachelor- und Masterarbeit absolvierte sie am Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum in Frankfurt in der Abteilung für Paläoanthropologie. Seit 2020 arbeitet sie in der Anorganischen Chemie an der Universität Duisburg-Essen bei Prof. Epple als Doktorandin.

Korrespondenz

*Prof. Dr. Matthias Epple
Anorganische Chemie
Universität Duisburg-Essen
Universitätsstraße 5–7
45117 Essen
E-Mail: matthias.epple@uni-due.de*

Anzeige



Verband | Biologie, Biowissenschaften
& Biomedizin in Deutschland

Gute Gründe, dem VBIO beizutreten:

- Werden Sie Teil des größten Netzwerks von Biowissenschaftlern in Deutschland
- Unterstützen Sie uns, die Interessen der Biowissenschaften zu vertreten.
- Nutzen Sie Vorteile im Beruf
- Bleiben Sie auf dem Laufenden – mit dem VBIO-Newsletter und dem Verbandsjournal „Biologie in unserer Zeit“
- Treten Sie ein für die Zukunft der Biologie



www.vbio.de

GEMEINSAM FÜR DIE BIOWISSENSCHAFTEN

Jetzt beitreten!



Die Struktur von Termitenstaaten

Ein Königreich in vielen Variationen

JOHANNES SANDER

Insektenstaaten gleichen Familien. An der Spitze steht eine Mutter (die Königin) oder ein Elternpaar. Diese Geschlechtstiere leben mit ihren teilweise sterilen Nachkommen, die verschiedene Aufgaben im Staat (Brutpflege, Nestbau, Verteidigung) übernehmen, in einer Großfamilie zusammen. Wie auch bei menschlichen Familien gibt es dabei zahlreiche Variationen. Termiten, als die älteste Gruppe eusozialer Insekten, weisen gegenüber Hautflüglern viele Besonderheiten in der Struktur ihrer Staaten auf. Als nicht in Deutschland heimische Insekten sind uns Termiten zudem weniger vertraut. Dieser Beitrag bietet einen Überblick über die Termiten mit besonderem Schwerpunkt auf der Struktur ihrer Völker.

Staatenbildende (eusoziale) Insekten erfreuen sich oft großer Aufmerksamkeit. Vor allem die Honigbiene ist wegen ihrer ökologischen und ökonomischen Bedeutung als Bestäuber und wegen ihres allseits beliebten Honigs ein großer Sympathieträger. Auch Hummeln werden als Bestäuber eingesetzt und sorgen mit ihrer pummeligen Gestalt ebenfalls für wohlwollende Reaktionen. Ameisen und Wespen werden manchmal als Belästigung, manchmal aber auch – wegen ihrer gleichfalls großen ökologischen Bedeutung – als Bereicherung empfunden. Weniger Berührung haben die meisten Menschen in Deutschland mit Termiten, die – einmal abgesehen von einigen anthropogenen Sonderstandorten – in unserem Land nicht vorkommen, da sie aufgrund ihrer dünnen Kutikula auf wärmere Regionen beschränkt sind. Im Gegensatz zu den Honigbienen, die erstmalig vor 25 Mio. Jahren und damit seit dem Oligozän fossil dokumentiert sind (*Apis benshawii*), sind Ameisen und Termiten bereits seit dem Erdmittelalter bekannt. Wahrscheinlich hat sich die eusoziale Lebensweise der Termiten vor rund 150 Mio. Jahren entwickelt [1]. *Baissatermes lapideus* ist die erste fossil



ABB. 1 Angehörige der Soldaten- und der Arbeiterkaste der „niederen“ Termitenart *Mastotermites darwiniensis*. Foto: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CSIRO_SciencImage_3639_Mastotermites_darwiniensis_Giant_Northern_Termite.jpg

nachgewiesene Termiten. Sie lebte vor etwa 140 Mio. Jahren und stammt damit aus der frühen Kreidezeit [2]. Vor allem Ameisen und Termiten haben somit eine lange Evolutionsgeschichte. Entsprechend groß ist die Vielfalt ihrer Staatenformen.

Struktur von Hymenopterenvölkern

Am vertrautesten ist den meisten Lesern vermutlich die Struktur eines Honigbienenvolkes. Bei der in Deutschland kultivierten Westlichen Honigbiene (*Apis mellifera*) gibt es eine eierlegende Königin, die ein Alter von mehreren Jahren erreichen kann. Im Frühsommer werden zunächst Weiselzellen mit befruchteten Eiern und Drohnzellen mit unbefruchteten Eiern bestückt, aus denen jeweils Jungköniginnen und männliche Bienen (Drohnen) schlüpfen (arrenothoke Parthenogenese). Noch bevor dies geschieht, verlässt die Altkönigin mit einem Teil der Arbeiterinnen den Stock, um ein neues Nest zu gründen. Die zuerst schlüpfende Jungkönigin im alten Nest tötet ihre Geschwisterköniginnen, alternativ kommt es zum Kampf (sofern der Imker dies nicht verhindert). Anschließend

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 74 erklärt.

erfolgt der Hochzeitsflug und die Jungkönigin übernimmt das Volk. Bei der Begattung sterben die Drohnen. Drohnen, die bei der Begattung nicht zum Zuge gekommen und damit überflüssig sind, werden schließlich in der „Drohenschlacht“ vertrieben. Als Konsequenz der Entwicklung von Drohnen aus unbefruchteten Eiern und weiblichen Tieren aus befruchteten Eiern (Haplodiploidie) ergibt sich, dass Arbeiterinnen mit ihren Schwestern enger verwandt sind als mit ihren Nachkommen. Haplodiploidie ist bei Hymenopteren weit verbreitet und wird oft als ein wesentlicher Grund angegeben, weshalb die Eusozialität innerhalb der Hautflügler mehrfach unabhängig entstanden ist. Das Phänomen tritt übrigens auch bei den Fransenflüglern (Thysanoptera) auf, bei denen es ebenfalls eusoziale Formen gibt.

Bei Honigbienen gibt es einen geschlechtsbestimmenden Genlocus (*csd*), von dem zwei verschiedene Allel vorliegen müssen, damit sich die Tiere zu Weibchen ent-

wickeln. Da Drohnen aber nur einen Chromosomensatz geerbt haben, besitzen sie immer nur ein Allel.

Besonderheiten bei Termiten

Im Vergleich zur Honigbiene weisen die Termiten einige Unterschiede auf: Termiten sind nicht haplodiploid, beide Geschlechter tragen gleichermaßen zum Staat bei, es gibt also neben Arbeiterinnen z. B. auch Arbeiter. Aufgrund der fehlenden Haplodiploidie kann eine über das bei Geschwistern normale Maß hinausgehende Verwandtschaft der Nichtgeschlechtstiere also nicht als Erklärung für die Eusozialität herangezogen werden. Es bedarf daher anderer Modelle wie etwa der ► Gruppenselektion. Termiten sind zudem nicht ► holometabol, sondern ► hemimetabol, d. h. es gibt kein Verpuppungsstadium und die Larven sind dementsprechend auch keine hilflosen Maden wie bei den Bienen, sondern können selbst schon ab dem dritten Larvenstadium Arbeiten im Nest verrichten.

Die Geschlechtsbestimmung erfolgt bei Termiten über XY-Geschlechtschromosomen. Bei etwa der Hälfte der Arten treten komplizierte Systeme mit mehreren Geschlechtschromosomen auf, die sich bei der Meiose zu Ketten anordnen und so quasi *en bloc* vererbt werden können (Komplexheterozygotie, u. a. auch beim Schnabeltier beschrieben).

Verwandtschaftliche Verhältnisse

Galten die Termiten früher als eigenständige Insektenordnung (Isoptera), so werden sie heute als ► monophyletische Gruppe innerhalb der Insektenordnung Blattodea (Schaben) angesehen [3]. Ihre nächsten lebenden Verwandten sind Schaben der Gattung *Cryptocercus*, deren Mitglieder subsozial leben, d. h. die Mutter oder das Elternpaar kümmern sich um den Nachwuchs, mit dem sie gemeinsam in feuchtem, vermoderndem Totholz leben, das ihnen gleichzeitig als Nahrungsquelle dient [3]. In der frühen Kreidezeit existierte die Schabenart *Sociala perlucida*, von der aufgrund morphologischer Anpassungen vermutet wird, dass sie eusozial gelebt haben könnte [4]. Umstrittene Hinweise auf eine eusoziale Lebensweise gibt es außerdem bei verschiedenen rezenten Arten der Schabengattung *Melyroidea* [5].

Etwa 70 Prozent aller Termiten gehören zu der Familie Termitidae, die manchmal auch als „höhere“ Termiten bezeichnet werden [1]. Entstanden sind die Termitidae wahrscheinlich während des Paläogens (vor 66–23 Mio. Jahren) in den tropischen Wäldern Afrikas, von wo aus sie sich dann weltweit in den Tropen verbreitet haben [6]. Die ► paraphyletischen „niederer“ Termiten hingegen umfassen zahlreiche Familien mit oftmals nur wenigen oder sogar nur einer Art wie etwa bei den Mastotermitidae (*Mastotermes darwiniensis*, Abbildung 1), die in Stammbäumen aller rezenten Termiten die basalste Position einnehmen. Während die „niederer“ Termiten bei der Verdauung von Lignocellulose (Holz) auf die Hilfe von Flagel-



ABB. 2 Bau der australischen Kompassstermte *Amitermes* spp., die ihr Nest streng nach der Nord-Süd-Achse ausrichtet, um die Mittagssonne auf großer Fläche zu vermeiden. Foto: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flickr_-_brewbooks_-_Magnetic_Termite_mound_habitat.jpg

IN KÜRZE

- Termiten sind die **älteste Gruppe von eusozialen Insekten**; bei ihnen ist die Soldatenkaste älter als die Arbeiterkaste. Manche Arten haben bis heute keine echten Arbeitstiere.
- Anders als bei den überwiegend von Weibchen dominierten Hautflüglerstaaten bestehen Termitennester meist **zu gleichen Teilen aus Männchen und Weibchen**.
- Von dem Grundschemata einer Termitenfamilie (Elterntiere + Nachkommen) gibt es verschiedene Variationen wie etwa die **asexuelle Königinnennachfolge**, bei der die Gründungskönigin rasch durch parthenogenetisch erzeugte Nachfolgerinnen ersetzt wird.

laten (einzelligen Geißeltierchen) angewiesen sind, sind die Termitidae von Flagellaten unabhängig.

Ein neues Volk entsteht

Wie auch bei anderen eusozialen Arten gibt es bei Termiten Geschlechtstiere, die für die Fortpflanzung verantwortlich sind, und Tiere, die auf eigene Nachkommen verzichten. Letztere gehören zur Arbeiter- und Soldatenkaste und weisen meist keine oder nur eine schwache Pigmentierung auf, d. h. sie sind weißlich, gelblich oder allenfalls leicht bräunlich. Für die Gründung neuer Termitenvölker sind die primären Geschlechtstiere verantwortlich. Dabei handelt es sich um vollständig pigmentierte Tiere, deren Augen, Flügel und natürlich auch Reproduktionsorgane voll entwickelt sind, so dass sie auf einen Hochzeitsflug gehen können, der vor allem dazu dient, eine gewisse Distanz zu dem Elternnest herzustellen. Nach dem Hochzeitsflug, der für gewöhnlich einmal pro Jahr stattfindet, werfen die Tiere ihre Flügel ab. In der Regel zeigen dann die Weibchen – manchmal aber auch beide Geschlechter – Lockverhalten, d. h. sie heben ihren Hinterleib an und sondern Pheromone ab, die für Geschlechtspartner attraktiv sind. Hat sich ein Paar gefunden, so sucht es unter Führung des Weibchens einen geeigneten Nistplatz, wobei das Männchen mit seiner Partnerin ständig über die Antennen Kontakt hält (Tandemlauf) [7]: Je nach Art siedeln Termiten in einem Holzstück, bauen Erd- und Kartonnester oder errichten große Termitenbauten (Abbildung 2).

Nach der Paarung in der Gründungskammer legt das Weibchen (die zukünftige Königin) die ersten Eier. Da die ersten Larvenstadien noch Pflege benötigen, stellt die Königin das Eierlegen vorübergehend ein. Ab dem dritten Larvenstadium können die Larven selbst bereits Arbeiten übernehmen, und die Königin nimmt die Eiproduktion wieder auf [8]. Mit der Zeit entsteht so ein Termitenvolk aus einem Königspaar, Arbeitstieren und Angehörigen einer Soldatenkaste. Man spricht bei Kolonien dieses Typs auch von sogenannten „einfachen Familien“ [9]. Durch das Anschwellen der Eierstöcke bei gleichzeitigem Wachstum der Arthrodiarmembranen wird der Hinterleib der Königin bei vielen Termitenarten – vor allem bei Arten, die außerhalb ihres Nestes auf Nahrungssuche gehen und dementsprechend große Völker aus bis zu mehreren Millionen Individuen bilden können – im Laufe der Jahre immer größer (Physogastrie). *Macrotermes*-Königinnen (Termitidae) können so z. B. von ursprünglich 3,5 auf 14 cm Länge anwachsen (Abbildung 3).

Bei den Arbeitstieren der Termiten lassen sich zwei grundlegende Typen unterscheiden: Echte Arbeiterinnen und Arbeiter mit begrenztem Entwicklungspotenzial auf der einen und Pseudergaten auf der anderen Seite. Pseudergaten (gr.: ψευδης: „pseudes, falsch“ und εργατης: „ergates, Arbeiter“) sind in ihrer Entwicklung vorübergehend gehemmte Larvenstadien, die sich bei Bedarf jederzeit zu geflügelten Geschlechtstieren weiterentwickeln

können. Sie ersetzen bei sogenannten *one-piece*-Termiten, einer ökologischen Gruppe innerhalb der „niedereren“ Termiten, die sich von dem Holzstück, in dem sie leben, auch ernähren, die echte Arbeiterkaste.

Es ist denkbar, dass der Besitz von Pseudergaten ein ursprüngliches Merkmal bei Termiten ist, wenngleich *Mastotermes darwiniensis* als basalste Termitenart sowie einige weitere „niedere“ Termiten auch eine echte Arbeiterkaste besitzen. Möglicherweise haben zunächst subsoziale Schaben Hilfe durch die erste Generation ihrer Nachkommen erhalten. Dadurch könnten sie in der Lage gewesen sein, mehr Nachkommen großzuziehen. Später könnte bei den Termiten dann zur Verteidigung des Nestes als erste echte Kaste die in der Regel nicht zur weiteren Entwicklung befähigte Soldatenkaste entstanden sein: Termiten gelten als *soldier-first*-Eusoziale, bei denen die Soldatenkaste älter ist als die Arbeiterkaste [10]. Auch bei Vögeln helfen Jungvögel aus dem Vorjahr den Eltern manchmal bei der Aufzucht ihrer jüngeren Geschwister, bevor sie dann im Folgejahr selber Junge großziehen.

Ernährungsweise von Termiten

Neben Holz verwenden Termiten auch Humus, lebendes und totes Pflanzenmaterial, Pilze, Algen und Flechten als Nahrung. Die Weitergabe von Nahrung zwischen den Kolonienmitgliedern erfolgt durch Mund-zu-Mund-Übertragung (stomodaeale Trophalaxe). Gleichzeitig werden dabei auch Pheromone unter den Tieren ausgetauscht. Neben der stomodaealen Trophalaxe findet auch eine



ABB. 3 Königin von *Nasutitermes exitiosus* zusammen mit Arbeiter/-innen und Nasensoldat/-innen.

Foto: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CSIRO_Sciencemage_2289_A_mature_queen_termite.jpg



ABB. 4 Fruchtkörper von *Termitomyces reticulatus* an einem Termitenbau.

Foto: https://de.wikipedia.org/wiki/Termitomyces#/media/Datei:Termitomyces_reticulatus_37340.jpg

Mund-zu-After-Übertragung (proctodaeale Trophalaxe) statt. Dabei werden Darmsymbionten weitergereicht, die bei den Termiten vor jeder Häutung verloren gehen und daher ersetzt werden müssen. Darüber hinaus dient die proctodaeale Trophalaxe dem Stickstoffrecycling: Pflanzenmaterial ist sehr stickstoffarm. Eine Strategie, diesen Mangel zu kompensieren, könnte darin bestehen, besonders viel zu fressen und dann den überschüssigen Kohlenstoff auszuschcheiden. Zumindest für die bereits erwähnten *one-piece*-Termiten ist dies aber keine Lösung, da sie dann binnen kurzer Zeit ihre eigene Behausung auffressen würden. Termiten nutzen daher als Alternative die Symbiose mit Stickstoff-fixierenden Bakterien in Verbindung mit der Wiederaufnahme von Stickstoff-reichem Darminhalt (Stickstoff-Recycling). Dadurch ergibt sich eine intensive Abhängigkeit der Tiere voneinander, die ein solitäres Leben unmöglich macht [8] (vgl. Gruppenselektion).

Eine besondere Ernährungsstrategie stellen die Pilzgärten der Macrotermitinae (Unterfamilie der Termitidae) dar. Die Pilze gehören zu der Gattung *Termitomyces* (Basidiomycota) und werden auf einem Gemisch aus totem Pflanzenmaterial kultiviert. Eine in den Termitenhügel eingebaute Klimaanlage aus Luftschächten und Isolierschichten sorgt zudem permanent für die optimale Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Die unreifen Fruchtkörper der Pilze dienen den Termiten als Nahrung. Reife Fruchtkörper sind häufig außen an den Termitenbauten zu finden (Abbildung 4). Dies ist ein wesentlicher Unterschied zu den Pilzgärten von Blattschneiderameisen, in denen nur höchst selten reife Fruchtkörper und damit Sporen entstehen. Ein weiterer Unterschied betrifft die Weitergabe des Pilzes bei der Neugründung von Kolonien. Diese

erfolgt bei den Termiten meist horizontal und nur in wenigen Fällen vertikal, d.h. die Geschlechtstiere nehmen auf ihrem Hochzeitsflug keine Pilzsporen mit. Vielmehr müssen die Pilze von den Termiten jeweils durch positive ▶ frequenzabhängige Selektion neu aus der Umwelt erworben werden [11]. Während Ameisen durch die Unterdrückung der Fruchtkörperbildung und die klonale Weitergabe des Pilzes durch junge Königinnen die Kontrolle über ihren Symbionten gewinnen, sind Termiten bezüglich ihrer Partner in einer weniger machtvollen Position: Da die Gründung eines neuen Termitennestes immer durch zwei Geschlechtstiere erfolgt, ist eine klonale Weitergabe nur schwer zu erreichen, zumindest solange beide Geschlechtstiere an der Weitergabe des Pilzes beteiligt sind. Eine solche klonale Weitergabe ist nur in den wenigen Fällen möglich, in denen sich eines der beiden Geschlechter (die Weibchen bei *Microtermes* spp. und die Männchen bei *Macrotermes bellicosus*) auf die Weitergabe spezialisiert hat. In diesen Fällen entstehen dann in der Regel auch keine *Termitomyces*-Fruchtkörper mehr.

Le roi est mort, vive le roi!

Wie auch bei anderen eusozialen Insekten erreichen die Geschlechtstiere der Termiten ein deutlich höheres Alter als Angehörige der Arbeiter- und Soldatenkaste. Irgendwann stirbt aber auch das Königspaar. Das bedeutet für das Volk aber oftmals nicht das Ende, denn mit dem schwindenden Einfluss der Geschlechtstierpheromone (ein Ereignis, das auch eintreten kann, wenn das Volk zu groß wird), können Larven sich bei vielen Termitenarten zu sekundären und/oder durch ▶ Neotenie zu tertiären Geschlechtstieren, sogenannten Neotenen, entwickeln (Abbildung 5). Darunter versteht man Tiere mit voll entwickelten Gonaden, aber reduzierten Augen und reduzierten (sekundäre Geschlechtstiere) oder fehlenden Flügeln (tertiäre G.). Erstere entstehen aus Nymphen, also Larven auf dem Weg zu primären Geschlechtstieren, die bereits über Flügelscheiden verfügen, letzte aus jüngeren Larvenstadien oder echten Arbeitern und Arbeiterinnen ohne Flügelsätze. Sind zum Todeszeitpunkt der alten Königin oder des alten Königs zufällig primäre Geschlechtstiere in der Kolonie vorhanden, so können auch diese als neue Geschlechtstiere einspringen. Termitenvölker, bei denen die ursprünglichen Geschlechtstiere ersetzt wurden, so dass sich das Volk aus Abkömmlingen verschiedener Geschlechtstiere zusammensetzt, werden auch als „erweiterte Familien“ bezeichnet [9].

Der „Mischcharakter“ von Neotenen zwischen ▶ Imagines und Larven zeigt sich auch an ihren Häutungshormonen. Normalerweise steigt bei Insekten vor jeder Häutung der Ecdysonspiegel an. Ist gleichzeitig auch der Spiegel an Juvenilhormon hoch, so kommt es zu einer Larvalhäutung, andernfalls zu einer Imaginalhäutung. Dies trifft bei der „niedereren“ Termitenart *Hodotermopsis sjostedti* auch für die Bildung von primären Geschlechtstie-

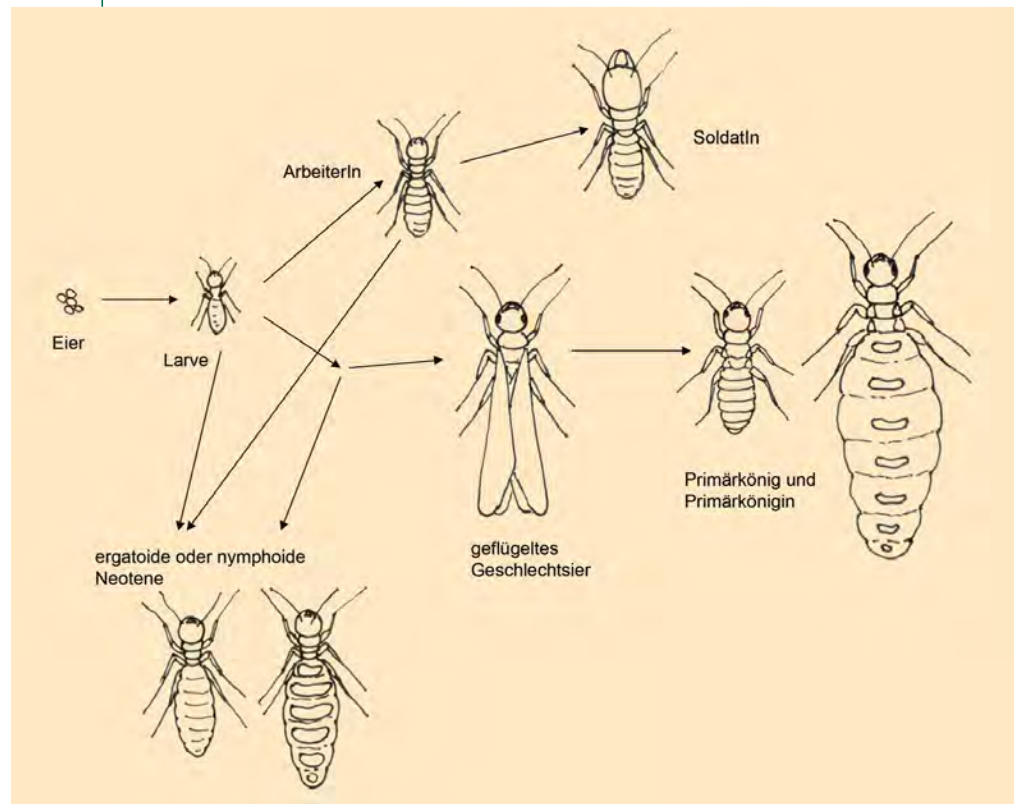
ren zu. Bei Neotenen hingegen ist der Juvenilhormonspiegel auch vor der letzten Häutung hoch. Lediglich in den Gonaden werden Gene (*E93* und *EcR*) exprimiert, die sonst nur bei einer Imaginalhäutung unter dem Einfluss von Ecdyson aktiviert werden [12]. Das EcR-Protein dient als Ecdyson-Rezeptor, über den u. a. die Expression des Transkriptionsfaktors *E93* kontrolliert wird.

Neotene treten bei etwa 60 Prozent der „niederen“ Termitenarten auf (u. a. auch bei *Mastotermes darwiniensis*). Besonders typisch sind sie für Arten, die in Holz leben (*one-piece*-Termiten). Innerhalb der Termitidae besitzen nur 13 Prozent der Arten Neotene. Da Neotene nicht auf einen Hochzeitsflug gehen, sondern sich mit ihren Geschwistern paaren, sind sie weniger fruchtbar, was aber durch eine größere Zahl von Geschlechtstieren ausgeglichen wird [9].

Variationen eines Themas

Bei der Koloniegründung und -entwicklung gibt es zahlreiche Variationen [9]. Gelegentlich finden auch mehr als zwei Geschlechtstiere zusammen, um gemeinsam eine neue Kolonie zu gründen (z. B. bei *Glyptotermes nakajimai*). Dieses auch bei Ameisen beschriebene Prinzip ist als Pleometrose bekannt. Es erlaubt ein rasches Wachsen der Kolonie, die so schneller dem empfindlichen Jugendstadium entkommt. Später kann die Zahl der Geschlechtstiere aber wieder auf ein Paar reduziert werden wie an *Nasutitermes corniger* gezeigt werden konnte. Manchmal wie etwa bei *Macrotermes michaelseni* (Termitidae) verbleiben aber dauerhaft auch mehrere Geschlechtstiere in der Kolonie. *N. corniger*-Kolonien wiederum können außerdem auch später noch neue Geschlechtstiere aufnehmen. Kolonien mit mehr als zwei primären Königspaaren können zudem durch die Fusion zweier Völker entstehen. Bei *Zootermopsis nevadensis* beispielsweise werden oft viele Nester nahe beieinander in demselben Holzstück gegründet, so dass es leicht zu Fusionen kommen kann. Ähnlich wie bei der Kooperation zweier nicht verwandter Individuen muss dies für beide Fusionspartner einen Vorteil bringen: Entweder hat die resultierende größere Kolonie einen Vorteil etwa bei der Nahrungsbeschaffung und der Verteidigung gegen äußere Feinde oder die Kosten, die bei einem angesichts der hohen Kolonien-dichte sonst unvermeidbarem Kampf entstünden, wären

ABB. 5 | ENTWICKLUNG VON GESCHLECHTSTIEREN



Aus Eiern entwickeln sich Larven, aus denen Arbeiter/-innen hervorgehen. Diese können sich zu Soldat/-innen weiterentwickeln. Über Nymphen, also Tieren mit Stummelflügeln, entstehen außerdem geflügelte Geschlechtstiere. Diese gründen ein neues Nest und werden so zu Primärkönigen und Primärköniginnen. Darüber hinaus können sekundäre (nymphoide) und tertiäre (ergatoide) Geschlechtstiere (Neotene) entstehen. Nymphoide Neotene entstehen aus Nymphen und haben daher bereits Flügelansätze. Ergatoide (d. h. arbeiterähnliche) Neotene entstehen aus Larven oder Arbeiter/-innen und sind daher flügellos. Abb. J. Sander.

einfach zu hoch, so dass es sich eher lohnt zusammenzuarbeiten [9].

Bei *Reticulitermes speratus* (Rhinotermitidae; Abbildung 6) und bei einigen weiteren Termitenarten konnte gezeigt werden, dass manchmal auch zwei weibliche oder zwei männliche Geschlechtstiere versuchen, gemeinsam eine Kolonie zu gründen. Bei zwei Weibchen ist dieser Versuch durchaus erfolgversprechend, denn Königinnen können auch auf parthenogenetischem Weg Nachkommen erzeugen. Auch einzelne Weibchen versuchen manchmal eine Kolonie zu gründen, jedoch sind sie dabei meist weniger erfolgreich, da sich Paare gegenseitig putzen und von Parasiten befreien können [9]. Bilden zwei Männchen ein Paar, so ist der Sinn zunächst weniger offensichtlich, denn die Männchen können sich ja nicht parthenogenetisch fortpflanzen. Allerdings können auch Männchen gemeinsam länger überleben als einzeln. Mit ein wenig Glück entsteht in der Nähe ihrer Nestkammer eine neue Termitenkolonie, in die sie eindringen können. Gelingt es einem der Männchen dann noch seine Rivalen zu besiegen, so kann es schließlich die Rolle des Königs übernehmen [13].



ABB. 6 Junge Geschlechtstiere von *Reticulitermes speratus* mit Arbeiter/-innen und Soldat/-innen. Foto: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Reticulitermes_speratus_Colony01.jpg

Asexuelle Königinnennachfolge

Eine weitere Besonderheit ist die asexuelle Königinnennachfolge (*asexuel queen succession*, AQS). Beobachtet wurde dieses Phänomen bei *Reticulitermes speratus*, *R. lucifugus* und *R. virginicus* sowie bei vier Arten der Termitidae [9, 14]. Die Primärkönigin legt bei *Reticulitermes*-Arten, bei denen AQS vorkommt, unbefruchtete, aber durch terminale ► Fusion der Meioseprodukte dennoch diploide Eier, aus denen zahlreiche – teilweise über 600 – Sekundärköniginnen hervorgehen, die nur genetisches Material ihrer Mutter tragen. Verantwortlich für die Entwicklung zu Sekundärköniginnen ist das genetische ► Imprintingmuster, das ja ebenfalls nur von der Mutter stammt. Befruchtete Eier hingegen mit mütterlichem und väterlichem Imprintingmuster entwickeln sich zu Arbeiter/-innen, Soldat/-innen und primären Geschlechtstieren. Durch die terminale Fusion sind die Sekundärköniginnen bezüglich fast aller ihrer Gene homozygot, so dass rezessive Gene mit schädlicher Wirkung schnell verloren gehen. Bei *Cavitermes tuberosus* (Termitidae), einer Termitenart, die als „Einmieter“ (Inquiline) in den Nestern anderer Termiten lebt, erfolgt nach der zweiten meiotischen Teilung noch eine weitere Teilung mit anschließender Fusion, so dass hier sogar vollständige Homozygotie vorliegt. Bei anderen Arten wie *Embiratermes neotenicus* (Termitidae), bei der bis zu 200 Sekundärköniginnen dokumentiert wurden, kann es auch zur zentralen Fusion kommen, so dass die Homozygotisierung unterbleibt [15]. Nach dem frühen Tod der Primärkönigin paart sich der König dann mit den Sekundärköniginnen. Da diese nicht seine Töchter sind, wird Inzucht vermieden. Auf diese Weise ist der König in seiner „Tätigkeit“ besser ausgelastet und die Zahl der produzierten Eier höher.

Bei Hautflüglern können die Königinnen über die Freisetzung von Samen aus ihren Samenspeichertaschen kontrollieren, ob Eier befruchtet werden oder nicht. Termiten nutzen einen anderen Weg: Mit zunehmendem Alter bilden die Primärköniginnen von *R. speratus* immer mehr Eier, denen die Eintrittspforten (Mikropylen) für Spermien fehlen und die deswegen nicht befruchtet werden können [16].

Stirbt der alte König, so übernimmt einer seiner Söhne die Nachfolge. Da die Mutter dieses Sohnes zwangsläufig eine der genetisch weitgehend identischen Sekundärköniginnen ist, kommt es jetzt zu Inzucht. Daraus ergibt sich, dass die Primärkönigin ihre Gene langfristig besser an die nächste Generation weitergeben kann als der Primärkönig. Weiblich zu sein ist somit ein Selektionsvorteil. Entsprechend weisen *Reticulitermes*-Termiten, bei denen es zur asexuellen Königinnennachfolge kommt, einen erhöhten Anteil an weiblichen Tieren (Arbeiterinnen, Soldatinnen, Jungköniginnen) auf, während bei Termitenarten ohne dieses Phänomen das Zahlenverhältnis der Geschlechter ausgeglichen ist [17].

Neben gemischtgeschlechtlichen, sich sexuell fortpflanzenden Kolonien wurden für die Termitenart *Glyptotermes nakajimai* auch rein weibliche Kolonien beschrieben, die sich ausschließlich über Parthenogenese vermehren. Auch in den gemischtgeschlechtlichen Kolonien dieser Art kommt es gelegentlich zur Parthenogenese (sogenannte Tychoparthenogenese) und zur Koloniegründung durch mehrere Weibchen und/oder Männchen. Wahrscheinlich hat dies den Verlust der Männchen begünstigt. Sowohl bei gemischtgeschlechtlichen *Glyptotermes nakajimai*-Völkern, als auch bei *Reticulitermes*-Arten ohne AQS und einigen weiteren Termitenarten ohne AQS werden gelegentlich unbefruchtete Eier gelegt, aus denen – wenn auch seltener – Jungtiere schlüpfen können. Bei *R. okinawanus* haben diese Jungtiere eine vergleichsweise hohe Wahrscheinlichkeit, sich zu sekundären Geschlechtstieren zu entwickeln. In der Gattung *Reticulitermes* liegt also eine ► Präadaptation vor, die die Entstehung der AQS bei einigen Arten begünstigt haben dürfte. Bei *Glyptotermes nakajimai* hat diese Präadaptation zusammen mit der oben beschriebenen Pleometrose – also der Koloniegründung durch mehr als zwei Geschlechtstiere – hingegen zur Entstehung rein parthenogenetischer Linien geführt [9].

Raubzüge zur Gewinnung von „Sklaven“ – und die Rache der Königinnen

Ausgewachsene Kolonien von *Reticulitermes speratus* überfallen manchmal jüngere und damit kleinere Völker derselben Art, um deren Königspaar zu töten und die Eier zu stehlen. Dort entwickeln sich dann aus den Eiern Arbeitstiere, die ihren Entführern zu Diensten sind. *R. speratus*-Kolonien gewinnen so nicht nur zusätzliche Arbeitskräfte, sondern halten sich auch konkurrierende Kolonien vom Leib. Stand der überfallenen Kolonie allerdings ein

Königinnenpaar vor, so haben sich die Angreifer verrechnet, denn bedingt durch das genetische Imprinting der unbefruchteten Eier entwickeln sich aus ihnen mit der Zeit Geschlechtstiere, die dann die Gene ihrer Eltern und nicht die der Angreifer verbreiten. Dies ist – wenn man so will – eine späte „Rache“ der Opfer an den Tätern [18].

(Nicht nur) Verteidigung

Die Verteidigung des Nestes (gegen Ameisen und andere Feinde) obliegt normalerweise einer eigenen Soldatenkaste. Morphologische Anpassungen an diese Aufgabe sind z. B. stark gepanzerte Köpfe mit kräftigen, zum Beißen oder Schnappen geeigneten, sich manchmal überschneidenden Mandibeln oder spitze Speichel- und Frontaldrüsen, die ein ätzendes und klebriges Sekret ausscheiden (sogenannte „Nasensoldaten“ bei den Nasutitermitinae und den Syntermitinae; Abbildung 7). Auch Selbstmordverteidigung (Autothyse) kommt vor, etwa bei *Globitermes sulphureus*, deren Soldaten bei einem Angriff ihre Körper zum Platzen bringen und dabei ein klebriges Sekret freisetzen [19]. Phragmotische Soldat/-innen besitzen speziell geformte Köpfe, mit denen sie die Eingänge ihrer Nester verschließen können (z. B. *Reticulitermes speratus*) [20]. Abhängig von der Größe und vom Alter können verschiedene Funktionen in der Verteidigung übernommen werden (► Polyethismus). So übernehmen z. B. bei *Reticulitermes speratus* ältere und damit für die Kolonie weniger wertvolle Soldat/-innen die gefährlichere Aufgabe am Nesteingang, während die jüngeren vor allem das Königspaar bewachen [21]. In einigen Fällen können sich auch Angehörige der Arbeiterkaste an der Verteidigung beteiligen oder die Soldatenkaste sogar vollständig ersetzen (z. B. bei *Ebogatermes raphaeli*). Dabei kann es ebenfalls zur Autothyse kommen wie etwa bei *Labiotermes labralis*. Die Neigung der Arbeiter/-innen, sich auf diese Weise zu opfern, nimmt mit zunehmendem Alter zu [22].

Wahrscheinlich sind die Soldat/-innen trotz ihrer weitgehenden Differenzierung permanente Jugendstadien. Dafür spricht, dass ihre Prothorakaldrüsen, die für die Bildung von Ecdyson verantwortlich sind, dauerhaft erhalten bleiben. Trotzdem können sie sich in der Regel nicht weiter differenzieren und stellen somit Endstadien der Entwicklung dar. Es gibt aber auch Sonderfälle. So können bei einigen *Zootermopsis*-Arten, *Archotermopsis wrough-toni* und *Stolotermes brunneicornis* sogenannte Soldatenneotene mit funktionstüchtigen Gonaden und gleichzeitig (im Vergleich zu anderen Soldat/-innen schwächer ausgeprägten) Panzerköpfen und Mandibeln entstehen. Bei *Z. nevadensis* lässt sich die Bildung von männlichen Soldatenneotenen, die ohnehin häufiger entstehen als weibliche Soldatenneotene, durch das gleichzeitige Entfernen des Königs und aller Angehörigen der Soldatenkaste in jungen Kolonien induzieren. Der umgekehrte Fall (Entfernen der Königin und der Soldatenkaste) führt aber nicht zur Bildung weiblicher Soldatenneotenen, sondern lediglich zur Bildung normaler weiblicher Neotene. Mög-

licherweise liegt dies daran, dass die Bildung funktionstüchtiger Eierstöcke anspruchsvoller ist [23]. Wahrscheinlich spielen Soldatenneotene eine Rolle beim Konflikt zwischen verschiedenen Termitenkolonien (Angriff auf die Geschlechtstiere) und nicht wie ursprünglich postuliert bei Kämpfen innerhalb einer Kolonie. Dazu passend treten sie vornehmlich in jungen Kolonien auf, in denen die Geschlechtstiere noch nicht so gut geschützt sind [24].



ABB. 7 Nasensoldat/-innen von *Nasutitermes corniger*.

Foto: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Termites_%28Nasutitermes_corniger%29_%288371245976%29.jpg



ABB. 8 Walküre von *Valkyritermes inopinatus*, eingeschlossen in einem Stück Bernstein. Abb. aus [24].

Bei *Hodotermopsis sjostedti* gibt es in seltenen Fällen morphologische Zwischenformen (Interkassen) zwischen der Soldatenkaste und den Geschlechtstieren, die relativ gut entwickelte Gonaden besitzen. Bei den weiblichen Tieren sind allerdings keine reifen Eizellen in den Eierstöcken vorhanden. Bei den männlichen Tieren werden zwar Samenzellen gebildet, in den Samenesikeln konnten aber keine Samenzellen gefunden werden. Wahrscheinlich können sich die Tiere also nicht fortpflanzen. Die Interkassen verhalten sich aggressiv, sind also wahrscheinlich

an der Verteidigung des Nestes beteiligt; ihre sehr geringe Zahl spricht dafür, dass es sich eher um eine Fehlentwicklung handelt, als um eine eigene Kaste mit spezieller Funktion [25].

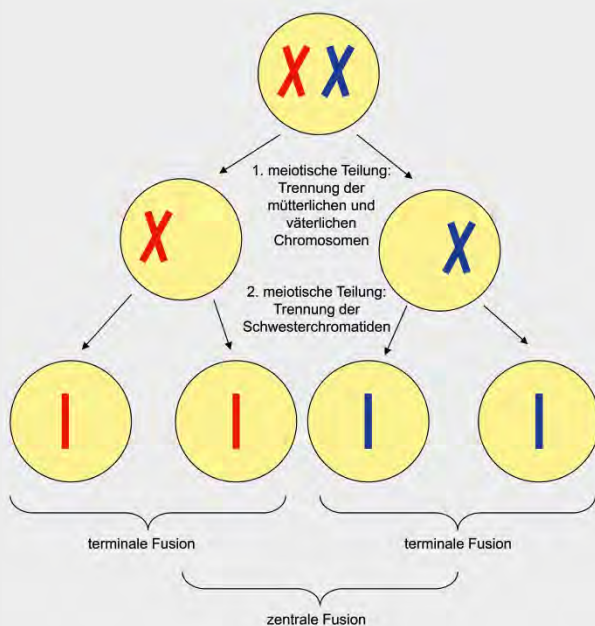
Kürzlich wurden zudem fossile Soldatenneotene – in Form sogenannter Walküren (= Schildjungfern der nordischen Mythologie) – mit voll entwickelten Flügeln und phragmotischen Köpfen entdeckt. *Valkyritermes inopinatus* lebte in der mittleren Kreidezeit vor rund 98 Mio. Jahren [24] (Abbildung 8). Eine weitere fossile, bisher

GLOSSAR

Eusozialität: Als eusozial werden Arten bezeichnet, bei denen mehrere Generationen kooperativ zusammenleben, wobei zumindest einige Individuen zum Vorteil der anderen Mitglieder der Gemeinschaft auf eigene Nachkommenschaft verzichten. Außer bei Bienen, Wespen, Ameisen und Termiten wurde Eusozialität bei einigen Blattläusen, Käfern, Fransenflüglern (Thysanopteren), Schaben, Nackt- und Graumullen, Garnelen und Geweihfarnen (Aufgabenteilung in einer Farnkolonie bezüglich Fortpflanzung und Ressourcenbeschaffung) nachgewiesen oder vermutet.

frequenzabhängige Selektion: Bei frequenzabhängiger Selektion ist der Selektionsdruck abhängig von der Häufigkeit eines Genotyps. Frequenzabhängige Selektion kann positiv sein (häufige Genotypen werden gefördert) oder negativ (seltene Genotypen werden gefördert).

Fusion, zentral oder terminal: Bei einer Parthenogenese unterbleibt entweder die Reduktionsteilung oder das genetische Material muss vor oder nach der Teilung verdoppelt werden. In letzterem Fall fusionieren entweder zwei Zellkerne, die aus der 1. meiotischen Teilung (Reduktionsteilung) hervorgegangen sind (zentrale Fusion), oder Zellkerne die aus der 2. meiotischen Teilung (Äquationsteilung) hervorgegangen sind (terminale Fusion). Wenn man von den Crossovern absieht, sind bei der terminalen Fusion die Nachkommen bezüglich aller Gene homozygot. Bei einer zentralen Fusion sind sie genetisch (fast) identisch mit ihren Müttern.



Gruppenselektion: Verhalten sich Individuen altruistisch, etwa indem sie auf eigene Nachkommen verzichten und dafür ihre Verwandten

unterstützen, so erleiden sie zwar einen persönlichen Nachteil bei der Selektion, fördern aber zugleich die Gruppe in der sie leben. Eine wertvolle Ressource, die es gemeinsam zu verteidigen gilt (etwa ein Nistplatz oder eine Nahrungsquelle), und gegenseitiges Aufeinander-angewiesen-Sein zum Überleben fördern den Erhalt der Gruppe. Gruppen können unter diesen Umständen als eine Art „Superorganismus“ im Selektionsprozess gegeneinander antreten. Gruppen mit Altruisten „gewinnen das Spiel“.

Hemimetabolie: Entwicklungsform von Insekten ohne Puppenstadium. Die Larven ähneln in diesem Fall weitgehend den erwachsenen Tieren (Imagines), besitzen aber noch keine Flügel.

Holometabolie: Entwicklungsform von Insekten, bei denen ein Ruhestadium (die Puppe) die Larven von den erwachsenen Tieren (Imagines) trennt. Während des Puppenstadiums findet eine vollständige Metamorphose statt, die Larven unterscheiden sich im Aussehen also deutlich von den Imagines.

Imagines: Plural von Imago: ausgewachsenes, geschlechtsreifes Insekt.

Imprinting: Männliche und weibliche Keimzellen weisen oft ein unterschiedliches Prägemuster in Form von epigenetischen Modifikationen (DNA-Methylierung + Histon-Modifikationen) auf, das darüber entscheidet, welche Gene in dem sich entwickelnden Nachkommen aktiv sind.

monophyletisch: Eine Gruppe ist dann monophyletisch, wenn alle ihre Arten auf eine einzige Stammart zurückgehen.

Neotenie: Neotenie liegt vor, wenn adulte Tiere nach wie vor jugendliche Eigenschaften aufweisen.

paraphyletisch: Wird aus einer an sich monophyletischen Gruppe eine einzelne monophyletische Untergruppe aussortiert und werden die verbliebenen Gruppen dann zu einer neuen Gruppe zusammengefasst, so liegt eine paraphyletische Gruppe vor.

Polyethismus: Verschiedene Angehörige einer Kaste übernehmen abhängig von ihrem Alter oder ihrem Körperbau unterschiedliche Aufgaben.

Präadaption: („Voranpassung“, Prädisposition). Nicht immer führen neu erworbene Eigenschaften sofort zu einem Vorteil. Unter veränderten Umweltbedingungen können sie sich aber später als vorteilhaft erweisen. Da viele Präadaptionen ursprünglich einem anderen Zweck dienen, wird bisweilen auch von Exadaptionen gesprochen.

Soldatenkaste: Zur Soldatenkaste gehören per definitionem alle Tiere eines Insektenvolkes, bei denen es sich nicht um Geschlechtstiere oder Angehörige der Arbeiterkaste handelt. Dies sind in der Regel Tiere, denen die Aufgabe zukommt, das Nest zu verteidigen. Es gibt aber auch kuriose Ausnahmen: Bei der Ameisenart *Crematogaster smithi* beispielsweise gibt es Soldatinnen, deren Funktion darin besteht, unbefruchtete Eier zu legen, die dann an die Brut verfüttert werden.

nicht benannte Walküre ist rund 115 Mio. Jahre alt. Walküren existierten somit über einen längeren Zeitraum und zwar während einer Periode, als die Biodiversität an Land stark zunahm (Kreidezeitliche Terrestrische Revolution), was möglicherweise zu verstärktem Konkurrenz- und/oder Fraßdruck führte. Da Soldatenneotene vor allem bei fossilen und/oder ursprünglichen Termitenarten auftreten, könnte ihre genaue Rolle wichtige Informationen zur Entstehung der Soldatenkaste bei Termiten liefern.

Im Vergleich zur Honigbiene weisen die Termiten eine wesentlich höhere Vielfalt an Staatsformen auf. Auffallend sind vor allem das Auftreten von „patchwork“-Familien, die verschiedenen Typen von Geschlechtstieren und der Besitz von Soldaten. Vermutlich wurden aber noch längst nicht alle „Familiengeheimnisse“ der Termiten entschlüsselt. Zukünftige Forschungsarbeiten werden zeigen, was es tief im Inneren der Termitenbauten noch zu entdecken gilt!

Zusammenfassung

Termiten sind die älteste bekannte – und darüber hinaus eine ökologisch wichtige – Gruppe von eusozialen Insekten. Im Gegensatz zu den eusozialen Hautflüglern werden ihre Kolonien nicht von weiblichen Tieren (Königinnen, Arbeiterinnen, Soldatinnen) beherrscht, sondern beherbergen für gewöhnlich auch Könige, Arbeiter und Soldaten. Die Soldatenkaste ist vor der Arbeiterkaste entstanden. Bei einigen Arten, den sogenannten one-piece-Termiten, die ihr ganzes Leben in demselben Holzstück verbringen, fehlt bis heute eine echter Arbeiterkaste. Primäre Geschlechtstiere können durch sekundäre Geschlechtstiere ersetzt werden. Darüber hinaus leben einige Arten nicht in einer „klassischen Familie“ (ein Elternpaar und ihre Nachkommen), sondern in „patchwork“-Familien oder ersetzen die Primärkönigin durch einen „Harem“ aus Sekundärköniginnen (asexuelle Königinnennachfolge).

Summary

The family structure of termites

Termites are the oldest known – and beyond that an ecological very important – group of eusocial insects. In contrast to the eusocial Hymenoptera their colonies are not dominated by female individuals (queens, workers and sometimes soldiers) but typically also contain kings as well as male workers and soldiers. The soldier caste has evolved earlier than the one of the workers and until today some species, the so called “one-piece” termites which always stay in the same piece of wood, lack a true worker caste. Primary reproductives sometimes can be replaced by se-

condary reproductives. Moreover, some species do not live in a “classical family” (one pair of parents and their offspring) but in “patchwork families” or replace the primary queen by a kind of “harem” of secondary queens (asexual queen succession).

Schlagworte

Termiten, eusoziale Insekten, Kasten, Neotene, asexuelle Königinnennachfolge, Sklavenhaltung, Evolution

Literatur

- [1] T. Chouvenc et al. (2021). *Cell. Mol. Life Sci.* 78, 2749–2769.
- [2] M. S. Engel et al. (2015). *Stuttgarter Beitr. Naturk., Serie B*, Nr. 371.
- [3] C. A. Nalepa (2015). *Ecological Entomology* 40, 323–335.
- [4] P. Vrsansky (2010). *Acta Geologica Sinica* 84, 793–808.
- [5] J. Hinkelman et al. (2020). *Naturwissenschaften* 107, 39.
- [6] J. S. Woon et al. (2022). *J. Anim Ecol.*, doi.org/10.1111/1365-2656.13673.
- [7] Y. Mitaka und T. Akino (2021). *Front. Ecol. Evol.* 8, 595614.
- [8] C. A. Nalepa (2015). *Ecol. Entomol.* 40, 323–335.
- [9] E. L. Vargo et al. (2019). *Insects* 10, 52.
- [10] L. Tian und X. Zhou (2014). *Int J. Biol. Sci.* 10, 296–308.
- [11] D. K. Aanen et al. (2009). *Science* 326, 1103–1106.
- [12] K. Oguchi et al. (2022). *Dev. Biol.* 485, 70–79.
- [13] N. Mizumoto (2016). *Animal Behaviour* 119, 179–187.
- [14] S. Hellemans et al. (2019). *BMC Evol. Biol.* 19, 131.
- [15] R. Fougereyrollas et al. (2015). *Proc. Biol. Soc.* 282, 20150260.
- [16] T. Yashiro und K. Matsuura (2014). *PNAS* 111, 17212–17217.
- [17] K. Kobayashi et al. (2013). *Nature Comm.* 4, 2038.
- [18] C. Tamaki et al. (2021). *Biol. Lett.* 17, 20210540.
- [19] C. Bordereau et al. (1997). *Insectes Sociaux* 44, 289–297.
- [20] K. Matsuura (2002). *Behav. Ecol. Sociobiol.* 51, 172–179.
- [21] S. Yanagihara et al. (2018). *Biol. Letters* 14, 20180025.
- [22] J. Sobotnik et al. (2012). *Science* 337, 436.
- [23] Y. Masuoka et al. (2021). *Insects* 12, 76.
- [24] C. Jouault et al. (2022). *Front. Ecol. Evol.* 10, 737367.
- [25] S. Koshikawa et al. (2004). *Zoolog. Sci.* 21, 583–588.

Verfasst von:



Dr. Johannes Sander, Jahrgang 1973, studierte Biologie an der Universität Freiburg von 1994–2000. Anschließend erfolgte die Promotion in Mikrobiologie an der Universität Bonn (2005). Seit 2007 Arbeit als freier Wissenschaftsjournalist für verschiedene Zeitschriften, ab 2021 auch als Autor für das RÖMPP-Lexikon. 2020: Veröffentlichung des Buches „Ursprung und Entwicklung des Lebens“ bei Springer Nature.

Korrespondenz:

*Dr. Johannes Sander
Falkenstraße 87
58553 Halver
Email: jtmsander@gmx.de*

Qualität und Nutzen eines Praktikums an außerschulischen Lernorten

Evaluation eines Berufsfeldpraktikums

ALISCA TAUBACH | SILVIA WENNING

ABB. 1 Vermittlungsarbeit an außerschulischen Lernorten.

Foto: S. Töpferwien (Tierpark + Fossilium Bochum).



Die Forderung nach mehr Praxis in der Lehrerbildung führt nicht automatisch zu verbesserten Lernsituationen für Studierende. Genauso wenig wie die Schulpraxis ist auch die Unterrichtspraxis an außerschulischen Lernorten nicht grundsätzlich lernwirksam. Für das biologiedidaktische Konzept des Berufsfeldpraktikums der Universität Duisburg-Essen wurden die angestrebten Ziele und die Kompetenzen der Studierenden über einen Fragebogen evaluiert. Die Einschätzungen der Studierenden und der Lernorte bestätigen, dass das Praktikum für beide Seiten von hoher Qualität und von hohem Nutzen ist. Dabei korreliert die Zufriedenheit der Studierenden mit der Verzahnung von Theorie und Praxis, der theoriebasierten Reflexion von fremden und eigenen Unterrichtsszenarien und dem Mentoring an den Lernorten. Auch wenn das Praktikumskonzept in seiner Ausgestaltung spezifisch für Nordrhein-Westfalen und die Universität Duisburg-Essen ist, kann man aus den Ergebnissen dieses Fallbeispiels Rückschlüsse auf den Nutzen für andere Universitäten und bundeslandspezifische Praktika ziehen.

In Nordrhein-Westfalen sind Praktika Bestandteil der Lehrerbildung. Eines davon, das Berufsfeldpraktikum (BFP), soll an außerschulischen Lernorten absolviert werden. Die Biologiedidaktik der Universität Duisburg-Essen kooperiert mit außerschulischen Lernorten in NRW, die biologische Bildungsangebote anbieten und ein gemeinsames Konzept tragen. Dieses abgestimmte Konzept zwischen Universität und Lernorten ermöglicht eine Unterstützung für die außerschulischen Lernorte durch die Universität und neue Erfahrungen auf Seiten der Studierenden in der Vermittlungsarbeit in vielfältigen Situationen auch für ihren späteren Unterricht durch die Lernorte (Abbildung 1).

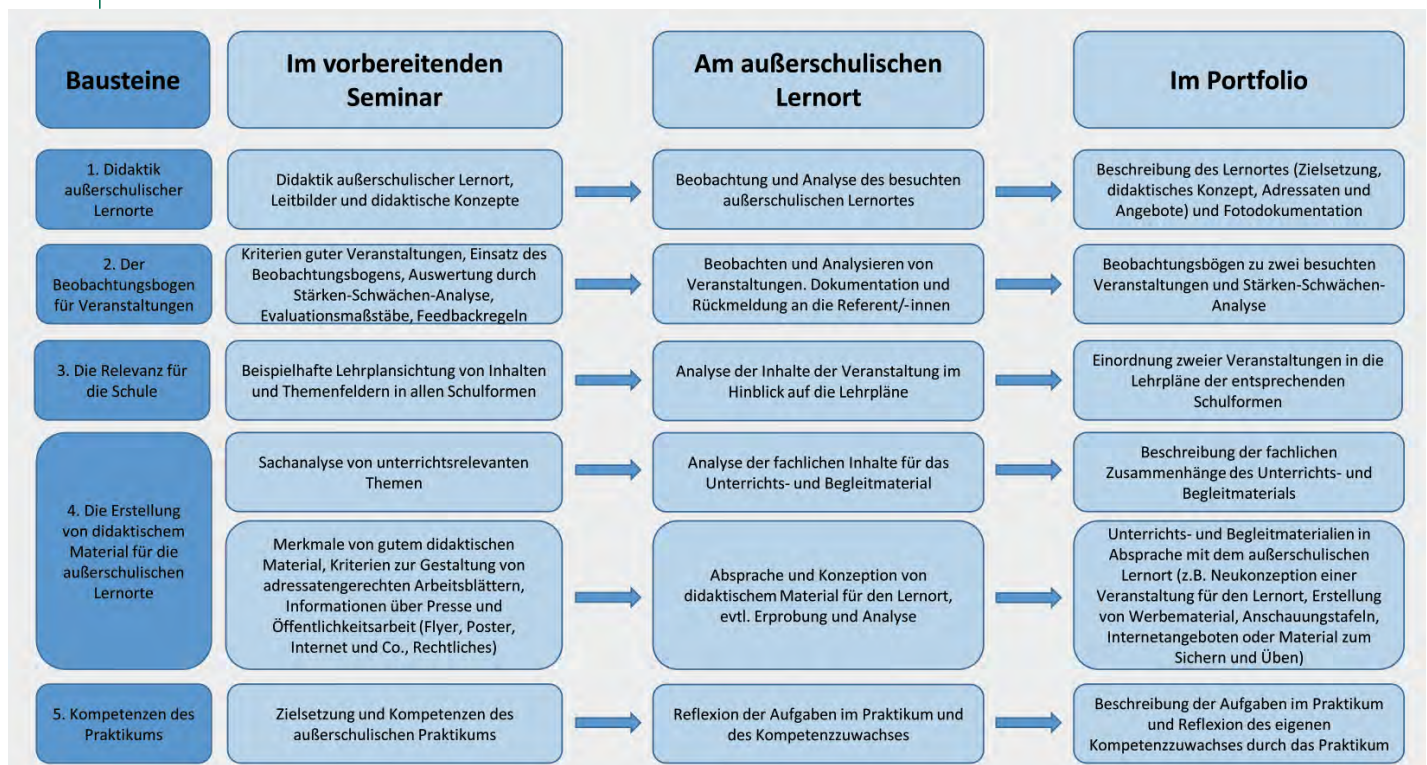
Die Universität bereitet die fünf Bausteine des Konzeptes in einem Seminar vor. Im Praktikum wenden die Studierenden ihr Wissen an, sammeln Erfahrungen und reflektieren und dokumentieren sie mit dem von Universität und Lernorten verabredeten Portfolio. Dieses Konzept wurde bereits in einem ersten Artikel mit dem Hinweis veröffentlicht, dass erste Evaluationsergebnisse einen hohen Nutzwert für alle Beteiligten zeigten [1]. Nun liegen Evaluationsergebnisse von 130 Studierenden und 17 Lernorten vor, die im Folgenden beschrieben werden.

Das Besondere am Konzept des Berufsfeldpraktikums ist eine abgestimmte Zusammenarbeit von Universität und außerschulischen Lernorten. Dies ist insofern wichtig, als die Praktikumsbetreuung ein zentraler Faktor für das Lernen im Praktikum ist, das eine Einbindung in eine abgestimmte universitäre Veranstaltung erfordert [2]. Dabei sollen idealerweise die aus dem Studium gewonnenen fachwissenschaftlichen und fachdidaktischen Kenntnisse als Handlungsperspektiven für das Praktikum dienen. Auf eine weitere Beschreibung des Konzeptes wird hier verzichtet, da es schon veröffentlicht wurde [1]. Zur besseren Verständlichkeit der Evaluationsergebnisse wird aber die Übersicht über das Konzept hier erneut aufgegriffen (Abbildung 2).

Qualitätsanforderungen und Intention von Praktikumskonzepten

An das Personal an den Praktikumsorten wird der Anspruch gestellt, dass es Studierende in ihrem Kompetenz-

ABB. 2 | KONZEPT DES BERUFSFELDPRAKTIKUMS



erwerb und in ihrer Kompetenzerweiterung unterstützen soll. Dabei ist aus kognitiv-konstruktivistischer Perspektive das Gespräch zwischen Mentor/-in und Praktikant/-in als zentraler Ort des Lernens zu sehen [3]. Um den Kompetenzzuwachs der Studierenden zu reflektieren, ist das Gespräch also unbedingt notwendig. Nur so können Stärken gestärkt, aber auch Ängste abgebaut und Lösungsansätze für Schwierigkeiten entwickelt werden.

Das fachspezifische Unterrichtscoaching als Ansatz zur Unterstützung berufspraktischen Lernens wurde in den USA unter dem Namen *Content-Focused Coaching* entwickelt und zunächst nur zur Weiterqualifikation bereits im Schuldienst tätiger Lehrpersonen eingesetzt. Neue Ansätze versuchen diese Idee jedoch auf die Lehrerausbildung zu übertragen. Zentrales Merkmal ist „Der Coach“. Er nimmt nicht nur eine beratende Funktion ein, sondern „beteiligt sich an der Planung, Durchführung und nachträglichen Reflexion des Unterrichts und übernimmt Mitverantwortung für [...] das Lernen der Schüler“ [4]. Erste Ergebnisse zeigen, dass das Lernen im Praktikum dadurch produktiver und intensiver ausfällt.

Der Philosoph Comenius forderte schon im 17. Jahrhundert [5]: „Die Menschen müssen so viel wie möglich ihre Weisheit nicht aus Büchern schöpfen, sondern aus Himmel und Erde, aus Eichen und Buchen, d. h. sie müssen die Dinge selbst kennen und erforschen und nicht nur fremde Beobachtungen und Zeugnisse darüber.“ Mit dem sich wandelnden Verständnis von schulischer Bildung zum kompetenzorientierten Lernen in der Schule wurde auch

in der Lehrerbildung die Frage gestellt, wie Lehrerinnen und Lehrer sinnvoll auf ihr künftiges Arbeitsfeld vorbereitet werden können. Die Standards für die Lehrerbildung [6] legen fest, welche Kompetenzen in Studium und Referendariat einschließlich der Praxisphasen erworben werden sollen. In einer sich wandelnden Hochschuldidaktik sollen

IN KÜRZE

- Im **Lehramtsstudium in NRW** wird ein Praktikum an außerschulischen Lernorten absolviert.
- Die Evaluation zeigt eine hohe Qualität und **einen hohen Nutzen** für Studierende und Lernorte.
- Für das Lernen im Praktikum hat sich die **abgestimmte Zusammenarbeit von Universität und Lernorten** als besonders effektiv herausgestellt.
- Der Erfolg des Praktikums liegt in der **Kommunikation zwischen Betreuenden und Studierenden** über Ziele und Kompetenzerwerb im Praktikum.
- Die Zufriedenheit der Studierenden korreliert mit der **Anwendung des in der Universität erworbenen theoretischen Wissens** in den vielfältigen didaktischen Situationen am Lernort und der Reflexion von fremden und eigenen Lernszenarien.
- Diese Reflexion und die **Ausarbeitung didaktischer Materials** durch die Studierenden sind auch für die Lernorte von großem Nutzen.
- Die Ergebnisse und Instrumente des Fallbeispiels sind für andere Universitäten und bundeslandspezifische Praktika **nützlich und adaptierbar**.

Studierende anwendungsorientiert für ihr Berufsfeld qualifiziert werden. „Der Bologna-Prozess steht für eine Verschiebung der Perspektive von einer auf die Darstellung von Inhalten ausgerichteten Lehre auf die Kompetenzerwinne der Lernenden und die Strategien, mit denen Lernprozesse angeregt und begleitet werden: *Shift from Teaching to Learning* [7].

Terhardt [8] bezeichnet berufliche Kompetenz als ein Bündel von Fähigkeiten, „das jemand benötigt, um anstehende berufliche Aufgaben oder Probleme zielorientiert und verantwortungsvoll zu lösen, die Lösungen zu bewerten und das eigene Repertoire an Handlungsmustern weiterzuentwickeln“. Damit haben Kompetenzen eine Wissens-, eine Motivations- und eine Könnens-Dimension und nur wenn eine berufliche Handlungsweise vor diesem Hintergrund reflektiert wird, kann sie nach Terhart [8] als „kompetent“ bezeichnet werden. Diesem Fokus versuchen die Hochschulen durch verbesserte Betreuung, lernerzentrierte Studienprogramme und vermehrte Praxisphasen Rechnung zu tragen. Um gewünschte Handlungs-routinen zu erwerben, muss das Lernen der Studierenden in praktischen Situationen vollzogen werden (Abbildung 3).

Einen Überblick über die verschiedenen Regelungen zu Praktika kann man bei Bosse [9] nachlesen. Wie lern-

wirksam die divergenten Modelle sind, ist auch vor dem lernbiografischen Hintergrund der Lehramtsstudierenden zu sehen, die aus „13.000 bis 14.000 Schulstunden der eigenen Schulzeit bereits über umfangreiche Erfahrungen an ihrem zukünftigen Berufsfeld“ [9] verfügen. Damit kommt der wissenschaftlichen Aufarbeitung der durch die Schulzeit geprägten Überzeugungen eine große Bedeutung zu. Sie wird unterstützt durch kriteriengeleitete Reflexion von vielfältigen Lernsituationen im Praktikum, die sich sowohl auf fremdes unterrichtliches Handeln als auch auf das eigene Unterrichten beziehen kann [10]. Auch das Verhältnis von Fremd- und Selbsteinschätzung ist im Praktikumsverhältnis für die Unterstützung der Studierenden relevant. Dabei ist interessant, dass die Fremdeinschätzung durch das Personal der Praktikumsorte die schon positive Kompetenzeinschätzung der Studierenden in ihrer Selbsteinschätzung oftmals übertrifft [2].

Der Fragebogen zur Evaluation

Im Jahr 2016 wurden in NRW die Vorgaben im Lehrerausbildungsgesetz (LABG) geändert und ein mindestens vierwöchiges verpflichtendes außerschulisches Berufsfeldpraktikum eingeführt [11]. Das Berufsfeldpraktikum bildet an der Universität Duisburg-Essen zusammen mit einem fachdidaktischen universitären Seminar ein gemeinsames Modul [12]. Die Etablierung eines verpflichtenden Berufsfeldpraktikums erfordert eine Evaluation. Die Frage, welche Qualität und welchen Nutzen das Berufsfeldpraktikum für die Studierenden hat, stellt sich analog für die Lernorte. Daher wurde für die Studierenden und parallel für die Lernorte im Rahmen einer Masterarbeit [13] ein Fragebogen mit sechs Skalen entwickelt, deren Reliabilität im guten bis sehr guten Bereich liegt (Tabelle 1). Für die Lernorte wurden anstelle der Skala „Universitäre Veranstaltung“ die Gründe für die Teilnahme am BFP erhoben. Alle Items der Skala werden in der nachfolgenden Auswertung aufgeführt. Der Fragebogen wurde als Online-Fragebogen eingesetzt und weiterentwickelt und steht im Internet für Interessierte zur Verfügung [14].

Die Skala zum Kompetenzerwerb im Praktikum umfasst 21 Kompetenzen, die im Lehrerausbildungsgesetz (LABG) NRW und vom Zentrum für Lehrerbildung der Universität Duisburg-Essen und der Fakultät für Biologie im Modulhandbuch formuliert sind. Diese Kompetenzen werden in der universitären Veranstaltung vorgestellt und als Abschluss der Arbeit mit dem Portfolio am Ende des Praktikums reflektiert. Aus der Theorie leiten sich folgende Prämissen für die Evaluation ab: Das außerschulische Berufsfeldpraktikum hat eine hohe Qualität und einen hohen Nutzen,

1. wenn es in eine abgestimmte universitäre Veranstaltung eingebunden ist,
2. wenn die Organisation am Praktikumsort im Hinblick auf Ziele, Struktur, Kompetenzentwicklung und Portfolio mit den Anforderungen des Praktikumskonzeptes abgestimmt ist,



ABB. 3 Lernen in praktischen Situationen im Aquazoo Düsseldorf. Foto: Stadt Düsseldorf/Uwe Schaffmeister.

TAB 1. RELIABILITÄT DER SKALEN DES FRAGEBOGENS

Skalen des Fragebogens	Anzahl der Items	Reliabilität (Kronbachs α)
Universitäre Veranstaltung	5	$\alpha = 0,771$
Arbeit mit dem Portfolio	8	$\alpha = 0,827$
Organisation am Praktikumsort	8	$\alpha = 0,656$
Arbeit am Praktikumsort	11	$\alpha = 0,858$
Kompetenzerwerb im Praktikum	21	$\alpha = 0,877$
Zufriedenheit mit dem BFP	9	$\alpha = 0,754$

3. wenn die Studierenden von den Betreuer/-innen am Praktikumsort unterstützt werden, indem diese als Coach agieren (Beratung, Beteiligung an Planung und Durchführung des Projekts, Mitverantwortung für das Ergebnis),
4. wenn die Studierenden genügend Gelegenheit haben aktiv mitzuwirken und die geforderten Ziele und Kompetenzen erreicht werden.

Zur Bewertung der Items zu den 6 Skalen wurde eine vierstufige Likert-Skala mit den Merkmalsausprägungen „Trifft zu (4)“, „Trifft eher zu (3)“, „Trifft eher nicht zu (2)“ und „Trifft nicht zu (1)“ gewählt. Um einen Zusammenhang zwischen den Ergebnissen zur Qualität und der Zufriedenheit der Studierenden mit dem Berufsfeldpraktikum zu ermitteln, wurden Korrelationen nach Spearman berechnet. Zur besseren Lesbarkeit wurden zumeist nur die Items markiert, die hochsignifikant auf dem 1%-Signifikanzniveau mit der Zufriedenheit der Studierenden korrelieren (z. B. Item 1**). Waren Items nur auf dem 5%-Niveau signifikant, wurden sie entsprechend nur mit einem Sternchen markiert.

Ergebnisse der Evaluation

Im Zeitraum 2019 bis 2022 nahmen 130 Studierende und 17 außerschulische Lernorte an der Befragung teil. In der gesamten Befragung gibt es kein negativ bewertetes Item. Alle Werte liegen über dem Mittelwert der Skala bei 2,5 (in Abbildung 4 exemplarisch markiert durch eine rote Linie) und zeigen Zustimmung. Über einem Mittelwert von 3,0 wird die Bewertung als sehr gut und über 3,5 als hervorragend eingestuft. Die allgemeine Zufriedenheit mit dem Praktikum liegt im sehr positiven Bereich und beträgt bei den Studierenden 3,5 und bei den Lernorten sogar 3,67 (Abbildung 4). Damit wird das Berufsfeldpraktikum von beiden Beteiligten sehr gut bewertet.

Fragt man die Lernorte nach den Gründen für die Bereitstellung von Praktikumsplätzen, wird von allen Lernorten die Motivation angegeben, zukünftigen Lehrkräften das Potenzial von außerschulischen Lernorten näherzubringen (Abbildung 5). Das Berufsfeldpraktikum wird ausschließlich von angehenden Lehrkräften besucht. Sie sind für die Lernorte eine attraktive Zielgruppe, die nach positiven Erfahrungen dann zukünftig mit ihren Klassen gerne die Lernorte besuchen. Außerdem haben die Lernorte Interesse an den fachdidaktischen Konzepten, die an der Universität gelehrt werden und die durch die Studierenden auch den Lernorten zugutekommen.

Zu 1: Einbindung des Praktikums in eine universitäre Veranstaltung

Die Besonderheit des Konzeptes der Biologiedidaktik ist eine enge Verzahnung von vorbereitendem Seminar in der Universität und Praktikum an den Lernorten in einem Modul mit abgestimmten Zielen und Inhalten. Diese werden von beiden Partnern kommuniziert. Darüber hinaus berei-

ABB. 4 | ZUFRIEDENHEIT MIT DEM PRAKTIKUM

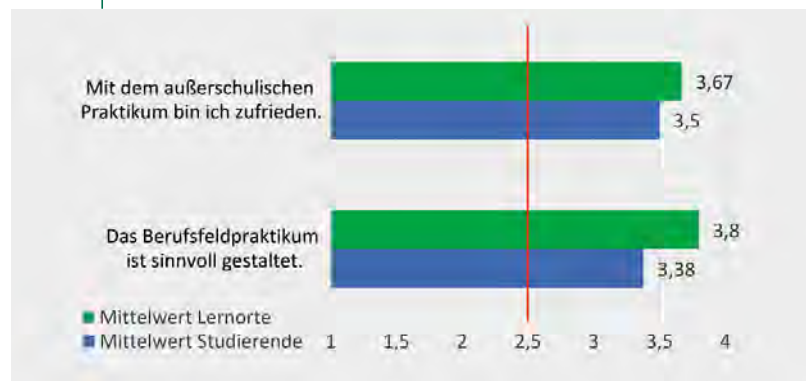


ABB. 5 | GRÜNDE DER LERNORTE FÜR DIE TEILNAHME AM PRAKTIKUM



ABB. 6 | ITEMS ZUR UNIVERSITÄREN BEGLEITVERANSTALTUNG



tet das Seminar mögliche Handlungsfelder und das Portfolio für das Praktikum vor. Die Ergebnisse der Evaluation (Abbildung 6) zeigen, dass die Schaffung von Transparenz hinsichtlich der Ziele, des organisatorischen Ablaufs und des Umgangs mit dem Portfolio im Seminar hervorragend gelingt (Items 1, 2 und 5). Auch werden die Vorbereitung und Verwendbarkeit für das Praktikum als sehr gut eingeschätzt (Items 3 und 4). Die Bewertung dieser beiden Items liegt erwartungsgemäß etwas niedriger, da nicht alle Handlungsfelder speziell für die Lernorte im Seminar geübt werden können, die an den vielfältigen außerschulischen Lernorten genutzt werden. Bei einem Praktikum im

Archäologiemuseum werden zum Beispiel bei der Erstellung von digitalen Führungen zur Beziehung von Mensch und Tier andere fachliche und fachdidaktische Kompetenzen benötigt als bei einer Fließgewässerexkursion einer biologischen Station mit einer Klasse an die Emscher.

Daher wird im Seminar ein breites Spektrum von Kompetenzen wie z. B. die Erstellung didaktischen Materials, die Beobachtung und kriteriengeleitete Reflexion von Lernsituationen, die Lehrplanorientierung sowie Grundlagen der Presse- und Öffentlichkeitsarbeit thematisiert. Damit können die Studierenden aber letztlich nicht erschöpfend auf anspruchsvolle, konkrete Aufgaben an den Lernorten vorbereitet werden, sondern müssen das im

Seminar Gelernte auf die entsprechende Situation anpassen. Interessant ist, dass die Verwendbarkeit der Seminarinhalte (Item 4**) und die Erläuterung der Ziele (Item 1**) hoch signifikant mit der Zufriedenheit mit dem BFP korreliert. Das bedeutet, dass es für die Zufriedenheit und damit letztlich auch für den Lernerfolg wichtig ist, dass die Studierenden die Ziele des Praktikums kennen und die Erfahrung machen, dass die theoretischen Inhalte aus dem Seminar für die Praxis sinnvoll verwendet werden können.

Die Arbeit mit dem Portfolio soll als Anforderung aus dem LABG [11] zur Reflexion von Praktikumselementen dienen. Dies gelingt durch das strukturierte Portfolio in allen Bereichen und wird von den Studierenden zur Reflexion der Kompetenzen und des Praktikums als nützlich eingeschätzt (Abbildung 7). Besonders die Reflexion von Lernsituationen mit dem Beobachtungsbogen (Items 4 und 6) wird als sehr hilfreich für die Analyse von Veranstaltungen eingeschätzt. Durch den Beobachtungsbogen können die komplexen Lernsituationen an den außerschulischen Lernorten mithilfe der zugrunde liegenden Theorie der „10 Merkmale guten Unterrichts“ nach Hilbert Meyer [15] eingeordnet und bewertet werden (Item 5). Außerdem ist das Portfolio hilfreich für die Kommunikation mit den außerschulischen Lernorten (Items 7), wie auch alle 17 Lernorte attestieren. Die Einschätzung, dass das Portfolio hilft, das theoretische Wissen und die Praxiserfahrung zu verknüpfen (Item 3**), ist sehr gut bewertet und korreliert hochsignifikant mit der Zufriedenheit der Studierenden mit dem Praktikum.

ABB. 7 | ARBEIT MIT DEM PORTFOLIO

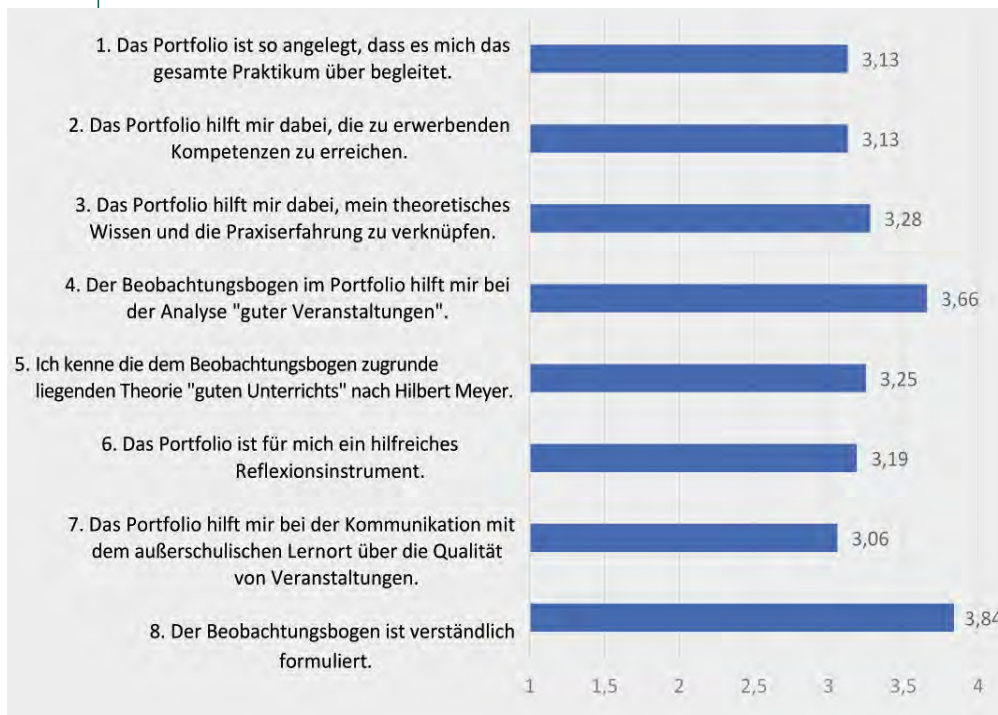


ABB. 8 Gemeinsame Austauschveranstaltung von Studierenden und Betreuenden der Lernorte und der Universität. Foto: Silvia Wenning.

Zu 2: Organisation am Praktikumsort

Die Organisation am Praktikumsort ist vielschichtig und umfasst folgende Bereiche: die Vorstellung des Lernortes und der Betreuenden, die Kontaktaufnahme zwischen den Beteiligten, die Gespräche über Ziele und Strukturen des Praktikums, die Kompetenzentwicklung und das Portfolio. Damit die Lernorte dies leisten können und die Abstimmung mit den universitären Anforderungen gelingt, werden Beiträge der Studierenden aus dem Praktikum auf jährlichen Austauschveranstaltungen von Universität und

ABB. 9 | ITEMS ZUR ORGANISATION AM PRAKTIKUMSORT

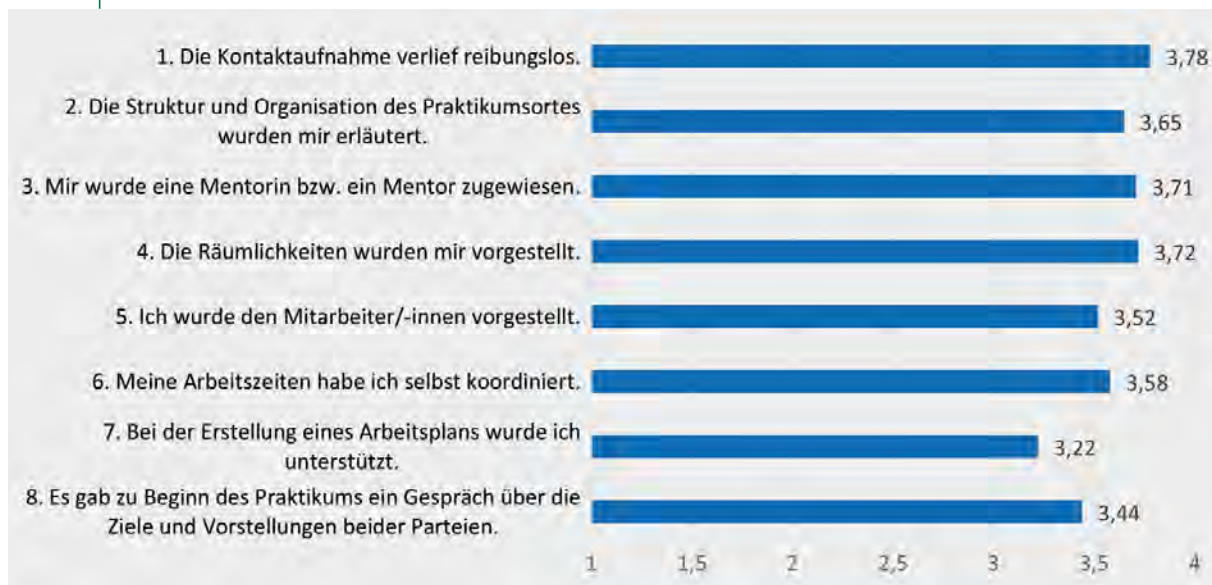
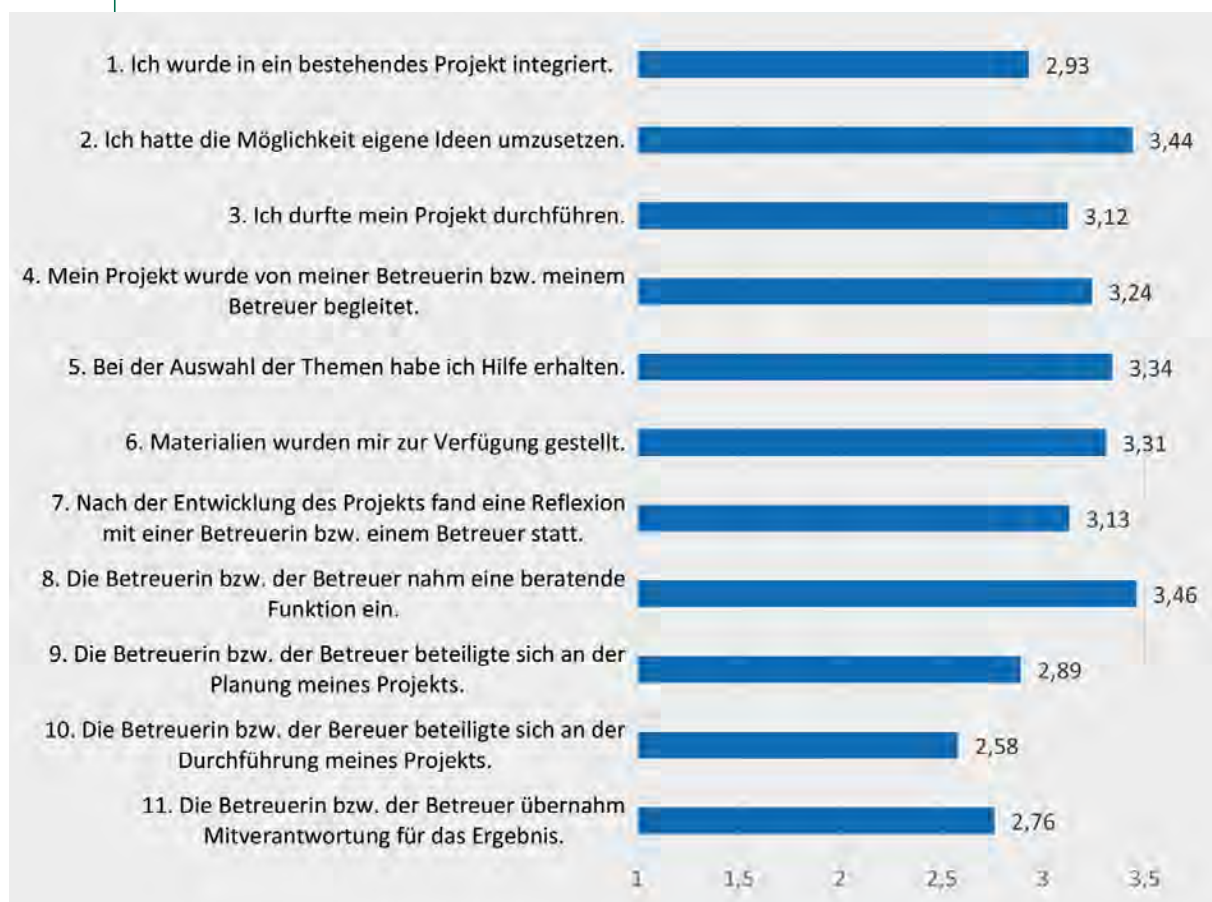


ABB. 10 | ITEMS ZUR ARBEIT AM PRAKTIKUMSORT



kooperierenden Lernorten vorgestellt und mitdiskutiert (Abbildung 8). Dies gilt auch für die Anforderungen an das didaktische Material, das von den Studierenden erstellt wird, und an die Reflexion der Qualität der von den Stu-

dierenden zu beobachtenden Lernsituationen. Durch dieses Vorgehen haben Universität und Lernorte ein gemeinsames Verständnis von Struktur und Anforderungen an das Praktikum.

ABB. 11 | KOMPETENZERWERB IM PRAKTIKUM



Dass dieses Vorgehen zur Qualität des Praktikums beiträgt, sieht man an den sehr guten Bewertungen der Studierenden zu den Items zur Organisation des Praktikums (Abbildung 9, Items 1–6). Es gelingt auch in hohem Maße, ein Gespräch über Ziele und Vorstellungen beider Parteien zu führen (Item 8). Die Unterstützung bei der Erstellung eines Arbeitsplans ist nicht bei allen Studierenden notwendig und wird daher nicht so hoch bewertet (Item 7**). Trotzdem korreliert das Item 7 hochsignifikant mit der Zufriedenheit der Studierenden ebenso wie die Erläuterung von Struktur und Organisation (Item 2**) und die Zuweisung einer betreuenden Person (Item 3**).

Zu 3: Arbeit am Praktikumsort

Bei der Arbeit am Praktikumsort (Abbildung 10) wurde ein Großteil der Studierenden durch Mentor/-innen beraten (Item 8**) und hatte die Möglichkeit eigene Ideen umzusetzen (Item 2**). Beide Items korrelieren hochsignifikant mit der Zufriedenheit im Praktikum. Im Sinne eines Coachings wurden die Projekte der Studierenden begleitet, unterstützt und reflektiert: 78 Prozent der Studierenden durften ihr geplantes Projekt durchführen (Item 3**). Die Begleitung (Item 4**) und die Beteiligung an Planung (Item 9**), Durchführung (Item 10*) und die Übernahme von Mitverantwortung (Item 11*) werden allesamt positiv bewertet. Sowohl die Möglichkeit, das geplante Projekt durchzuführen, als auch die Begleitung und Beteiligung durch die Lernorte korrelieren hochsignifikant mit der Zufriedenheit der Studierenden.

Zu 4: Kompetenzerwerb im Praktikum

Im Berufsfeldpraktikum sollen folgende Kompetenzen ermöglicht werden:

- Erfahrungen in außerschulischen Bildungseinrichtungen zu sammeln sowie berufliche Perspektiven außerhalb des Schuldienstes kennenzulernen,
- Vermittlungsarbeit in außerschulischen Bildungseinrichtungen zu erproben,
- die Praktikumserfahrungen vor dem Hintergrund der universitären Ausbildung zu reflektieren und Entscheidungen für die weitere Studien- und Berufswahl zu treffen.

Die Einschätzung der Studierenden und der Lernorte zu den im Praktikum intendierten Kompetenzen ist bei allen Items positiv, liegt also über einem Mittelwert von 2,5 (Abbildung 11). Der Erwerb der Kompetenzen wird damit durch die Selbstauskunft der Studierenden bestätigt. Interessant ist, wie schon aus der Theorie vermutet, dass die Einschätzungen der Lernorte bei den meisten Items über den Einschätzungen der Studierenden liegen und das schon sehr gute Ergebnis weiter fundieren.

Die Items zu den Erfahrungen mit den außerschulischen Bildungseinrichtungen (Items 4**, 5**, 12**, 14**, 15**) erhielten die meiste Zustimmung der Studierenden und liegen zwischen 3,5 und 4. Es ist im Praktikum hervorragend gelungen, den Wert außerschulischer Lernorte

als System, das zum Lernen beiträgt und Schule bereichern kann, erfahrbar zu machen. Diese Erfahrung ist einerseits die Intention der Lernorte, wie bereits dargelegt wurde, und trägt andererseits hochsignifikant zur Zufriedenheit der Studierenden bei.

Der zweite Schwerpunkt der Kompetenzen ist die Erprobung von Unterricht in außerschulischen Lernsituationen. Nach Einschätzung der Studierenden haben sie genug Gelegenheit gehabt, aktiv mitzuwirken, indem sie ihre Vermittlungsarbeit ansatzweise erproben (Item 2*) und ihre Kommunikationsfähigkeit in Lernsituationen weiterentwickeln konnten (Item 3**). Sie haben Handlungsstrukturen in praktischen Situationen erworben (Item 10*) und naturwissenschaftliche Inhalte unterrichtet (Item 15). Alle vier Items zu diesem Themenfeld haben eine sehr gute bzw. hervorragende Bewertung zwischen 3,08 und 3,55. Hochsignifikant mit der Zufriedenheit der Studierenden mit dem Praktikum korreliert die praktische Weiterentwicklung der persönlichen Kommunikationsfähigkeit. Als Vorbereitung auf die spätere Lehrtätigkeit passt dies zum Anliegen der Studierenden, ihre Vermittlungsarbeit zu lernen bzw. zu verbessern.

Die Praktikumserfahrungen vor der universitären Ausbildung auch im Hinblick auf die Berufswahl zu reflektieren, ist sicher der anspruchsvollste Teil der Kompetenzen. Die Einschätzung der Studierenden zu den Items (6*, 7**, 16*, 20 und 21) liegt immer noch im positiven Bereich, aber deutlich niedriger zwischen 3,19 und 2,87. Die Reflexion des Nutzens fachdidaktischer Inhalte aus der universitären Ausbildung, z. B. von Qualitätsmerkmalen guten Unterrichts nach Hilbert Meyer, theoretischem Wissen über Vermittlungsarbeit oder Kriterien zur Erstellung von altersangemessenem didaktischem Material, ist nicht so einfach und nicht in einem so kurzen Zeitraum in die Praxis zu übertragen. Interessant ist wiederum, dass die Lernorte die Kompetenzen der Studierenden auch hier positiver einschätzen und durchaus sehen, dass das im Studium gewonnene fachliche und fachdidaktische Wissen integriert und Veranstaltungen bereichert werden konnten (Items 20 und 21). Zur Zufriedenheit bei den Studierenden trägt bei, dass das Praktikum umgekehrt nützlich ist, um fachdidaktische Inhalte des Studiums vor dem Hintergrund des Erlebten zu reflektieren (Item 7**).

Fazit der Evaluation

Nach Einschätzung der Studierenden und der Lernorte handelt es sich insgesamt um ein Praktikum mit hoher Qualität und hohem Nutzen. Vergleicht man die Beurteilungen, so zeigt sich, dass sowohl die Studierenden, die Universität als auch die Lernorte den Ansprüchen gerecht werden. Auch wenn das Praktikumskonzept in seiner Ausgestaltung spezifisch für Nordrhein-Westfalen und die Universität Duisburg-Essen ist, kann man Rückschlüsse aus den Ergebnissen dieses Fallbeispiels für andere Universitäten und bundeslandspezifische Praktika ziehen. Die Ergebnisse und Instrumente sind zur Analyse bestehender



ABB. 12 Hospitation in unterschiedlichen Gruppen. Foto: Bernhard Klug (EGLV).

Praktikumskonzepte nützlich und anwendbar. Sie können aber auch für die Gestaltung von Konzepten für Praktikumsphasen in der Lehrerausbildung Anregungen geben und eingesetzt werden.

In vielen Praktika gibt es allgemeine vorbereitende Seminare der Universitäten, aber keinen Austausch mit den Praktikumsorten und den Abläufen und Erfordernissen dort. Die Ergebnisse dieser Evaluation haben gezeigt, dass gerade die Abstimmung zwischen Universität und Lernorten das Lernen im Praktikum besonders effizient unterstützt, wenn alle Seiten um Ziele, Vorstellungen, intendierte Erfahrungen und Kompetenzentwicklungen wissen. Das Anwenden von im Studium erworbenem fachlichen und fachdidaktischen Wissen steht in einem positiven Zusammenhang mit der Zufriedenheit der Studierenden im Praktikum. Bekommen sie konkretes theoretisches Wissen wie z. B. die Qualitätskriterien im Beobachtungsbogen für Lernsituationen an die Hand, so hat dies einen hohen Nutzen für die Reflexion von Lernsituationen. Diese Reflexion und die Ausarbeitung von Veranstaltungen oder didaktischem Material für die Lernorte haben auch einen hohen Nutzen für die Lernorte selbst. Dazu trägt insbesondere die Konzeption des Praktikums mit der Unterstützung und Begleitung der Portfolioarbeit bei.

Im Hinblick auf die Praktikumsbetreuung kann man sagen, dass der Erfolg des Praktikums in der Interaktion der Akteur/-innen liegt und dass vor allem die Kommunikation zwischen Betreuenden und Studierenden zu einer hohen Qualität im Praktikum beiträgt. Ein Gespräch über Ziele und Vorstellungen und eine Zuweisung eines eige-

nen Mentors bzw. einer eigenen Mentorin stehen in einem positiven Zusammenhang mit der allgemeinen Zufriedenheit der Studierenden im Praktikum.

Ein weiteres Qualitätsmerkmal sind die vielfältigen Gelegenheiten der Studierenden aktiv mitzuwirken. Die Studierenden können einen hohen Nutzen aus den Erfahrungen von Lernsituationen mit naturwissenschaftlichen Inhalten in verschiedensten didaktischen Situationen an den außerschulischen Lernorten ziehen. Eine große Rolle spielen auch die altersangemessene Sprache sowie die fachliche und didaktische Reduktion von Inhalten, die erprobt und/oder mit den Lernorten diskutiert werden können. Dabei kommt der Hospitation von unterschiedlichen Gruppen und Lehrenden eine immense Bedeutung zu, da sie helfen, den eigenen lernbiografischen Hintergrund zu reflektieren und neue

Lernszenarien erfahrbar zu machen (Abbildung 12). Der Blick über den Tellerrand bezogen auf unterschiedliche Schulstufen von der Grundschule bis zur Oberstufe und die Heterogenität von Schülerinnen und Schülern bieten wertvolle Erfahrungen.

Das vorgestellte Konzept und die Instrumente sind auf Praktikumsituationen anderer Universitäten und bundeslandspezifischer Praktika übertragbar. Fragebögen, Portfoliovorlagen und Unterrichtsbeobachtungsbögen stehen digital zur Verfügung und können gerne genutzt oder adaptiert werden [14].

Zusammenfassung

Praxisphasen im Studium führen nicht automatisch zu guten Lernerfolgen. Daher wurde das biologiedidaktische Berufsfeldpraktikum an außerschulischen Lernorten der Universität Duisburg-Essen über einen Fragebogen von 130 Studierenden und 17 Lernorten evaluiert. Die Ergebnisse zeigen, dass das Praktikum einen hohen Nutzen für Studierende und Lernorte hat. Dabei korreliert die Zufriedenheit der Studierenden mit der Anwendung des universitär erworbenen Wissens in den vielfältigen didaktischen Situationen der Lernorte und der theoriebasierten Reflexion von fremden und eigenen Lernszenarien. Diese Reflexion und die Ausarbeitung von didaktischem Material von Studierenden sind auch für die Lernorte von großem Nutzen. Dabei liegt der Erfolg des Praktikums in der Interaktion der Akteur/-innen, die durch ein Konzept mit vereinbarten Zielen und Verfahren gelingt. Die abgestimmte Zusammenarbeit von Universität und Lernorten hat sich für das Lernen der Studierenden als besonders effektiv herausgestellt. Die

Ergebnisse und digital zu Verfügung stehenden Instrumente sind für Praktika anderer Institutionen nützlich und übertragbar.

Summary

Evaluation of an internship – quality and benefit of a practical training phase at an out-of-school place of learning

Practical phases during studies do not automatically lead to good learning results. Therefore, on the basis of a questionnaire, the practical training phase at out-of-school places of learning of the University of Duisburg-Essen was evaluated by 130 students and 17 learning sites. The results show that the practical training phase has a high benefit for students and learning locations. Student satisfaction correlates with the application of the knowledge acquired at the university in the diverse didactic situations of the learning sites and the theory-based reflection of external and own learning scenarios. This reflection and the elaboration of didactic upon material by students are also of great value for the out-of-school places of learning. The success of the practical training phase lies in the close interaction between the actors; it is successful as it is based on a concept of agreed objectives and procedures. The coordinated collaboration of university and out-of-school places of learning was proven to be particularly effective for the students' learning. The results and digital tools that were available are useful and transferable to practical training phases of other institutions.

Schlagworte

Berufsfeldpraktikum, außerschulische Lernorte, Evaluation, Praxisphasen, Konzept

Literatur

- [1] M. Gülpen, S. Wenning (2020). Außerschulische Lernorte im Berufsfeldpraktikum. *BiuZ* 5/20, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/biuz.202010718>
- [2] T. Hascher (2012). Lernfeld Praktikum – Evidenzbasierte Entwicklungen in der Lehrer/innenbildung. *Zeitschrift für Bildungsforschung* 2, 109–129.
- [3] M. Gröger et al. (2012). Das Freilandlabor mit Experimentierfeld (FLEX) als außerschulischer Lernstandort. In D. Brovelli et al. (Hrsg.). *Kompetenzentwicklung an Außerschulischen Lernorten*. Tagungsband zur 2. Tagung der PHZ Luzern vom 24.9.2011 (S. 11–31), Zürich/Berlin: LIT.
- [4] A. Kreis, F. C. Staub (2011). Fachspezifisches Unterrichtscoaching im Praktikum. Eine quasi-experimentelle Interventionsstudie. *Zeitschrift Erziehungswissenschaft* 814, 61–83.
- [5] J. A. Comenius (1657). *Große Didaktik*.
- [6] KMK, Standards für die Lehrerbildung, 2004, https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Standards-Lehrerbildung-Bildungswissenschaften.pdf
- [7] Empfehlungen zur Qualitätsverbesserung von Lehre und Studium (Drs. 8639–08), Juli 2008, <https://www.wissenschaftsrat.de/download/archiv/8639–08.html>
- [8] E. Terhart (2007). Standards in der Lehrerbildung – eine Einführung *Unterrichtswissenschaft* 35, 2–14.
- [9] D. Bosse (2012). Zur Situation der Lehrerbildung in Deutschland 2012 in: In: D. Bosse et al. (Hrsg.) *Reform der Lehrerbildung in Deutschland, Österreich und der Schweiz*. Teil 1 Analysen, Perspektiven und Forschung, Prolog Verlag Immenhausen bei Kassel.
- [10] B. Herzig, S. Grafe (2005). Lernen im Praktikum als Entwicklung einer Reflexionskultur. In: A. H. Hilligus, H. D. Rinkens (Hrsg.), *Zentrum für Lehrerbildung – Neue Wege im Bereich der Praxisphasen*, Band 10, S. 149–159, Münster: PLAZ.
- [11] Gesetz über die Ausbildung für Lehrämter an öffentlichen Schulen (Lehrerausbildungsgesetz – LABG) vom 12.05.2009 § 12 Praxis-elemente NRW.
- [12] Modulhandbuch Biologie für das Studienfach Biologie für den Bachelor-Studiengang mit der Lehramtsoption Lehramt an Gymnasium/Gesamtschule an der Universität Duisburg-Essen, 2020, Homepage der Fakultät: <https://www.uni-due.de/biologie/studium/lehramt/bachelor/index.shtml>
- [13] A. Taubach (2019). Evaluation des außerschulischen Berufsfeldpraktikums im Bachelor des Lehramtsstudiums Biologie, Masterarbeit der Universität Duisburg Essen.
- [14] S. Wenning, Fragbögen und Unterlagen zum Berufsfeldpraktikum an außerschulischen Lernorten: <https://direktzunw.de/auesserschulische-lernorte/>
- [15] H. Meyer (2011). *Was ist guter Unterricht?* Cornelsen Verlag Berlin.

Verfasst von:



Alisca Agnes Taubach hat Biologie und Deutsch für das Lehramt an Gymnasien und Gesamtschulen an der Universität Essen studiert. Während des Studiums arbeitete sie, nachdem sie ihr Berufsfeldpraktikum in der Schule Natur im Grugapark der Stadt Essen abgeschlossen hatte, an diesem außerschulischen Lernort weiter als freiberufliche Mitarbeiterin. Im Rahmen ihrer Masterarbeit unterstützte sie die Didaktik der Biologie an der Universität Duisburg-Essen mit der Evaluation des außerschulischen Berufsfeldpraktikums im Bachelor des Lehramtsstudiums Biologie. Seit Abschluss des Studiums und des Referendariats arbeitet sie als Lehrerin am Theodor-Fliegener-Gymnasium in Kaiserswerth.



Silvia Wenning hat Biologie und Physik für das Lehramt an Gymnasien und Gesamtschulen an der Universität Münster studiert. Nach dem Studium war sie parallel zur Erziehungszeit ihrer Kinder drei Jahre in der Arbeitsgruppe der Entwicklungsgenetik bei Prof. W. Janning in Münster tätig. Danach arbeitete sie als Lehrerin, Fachberaterin und in Unterrichtsentwicklungs- und Lehrplangruppen des Landes NRW. Als Moderatorin in der staatlichen Lehrerfortbildung leitete sie zahlreiche Fortbildungen und schulische Fortbildungsgruppen für alle MINT-Fächer im Auftrag der Bezirksregierung und des Schulministeriums. Seit 2008 ist sie wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Arbeitsgruppe von Prof. Sandmann der Didaktik der Biologie an der Universität Duisburg-Essen.

Korrespondenz

Silvia Wenning
Didaktik der Biologie
Universität Duisburg-Essen
Universitätsstr. 5
45141 Essen
E-Mail: silvia.wenning@uni-due.de



Foto: M. Riffel.

ARTENVIELFALT

Eindrucksvolle Biodiversität



Das herausragende Buch von Kai Gedeon und Thorsten Pröhl lässt sich nicht in eine Kategorie fassen. Es ist ein großartiger Bild-

band und ein gut recherchierter Erzählband über die naturgeschichtliche, naturkundliche und vogelkundliche Erforschung Äthiopiens – eines der unbekannteren und doch lohnenden Reiseziele des afrikanischen Kontinents in einem. Für Natur- und Naturgeschichtsbegeisterte wäre ein solches Buch für jedes afrikanische Land wünschenswert!

Kai Gedeon und Thorsten Pröhl beschäftigen sich seit vielen Jahren mit der Tierwelt Äthiopiens – ihre fundierten Detailkenntnisse, gewonnen aus zahllosen Reisen, finden sich in den Texten und den herausragenden Bildern wieder. Gerade letztere müssen hervorgehoben werden. Sie vermitteln dem Leser einen guten Eindruck von den Landschaften, Vogel- und Säugerarten Äthiopiens. Die Vogelwelt ist artenreich, und im Gegensatz zu vielen anderen afrikanischen Ländern sind die Vögel selbst in menschlichen Ansiedlungen nicht scheu und lassen Fotografen nah herankommen. Äthiopien ist aus diesem Grund für Natur- und insbesondere Vogelfotografen ein absolutes Eldorado. Dies stellt Pröhl, der den Großteil der Bilder machte, eindrücklich unter Beweis.

Der erste Teil des Buches beinhaltet eine umfangreiche Beschreibung der sechs Naturräume (Biome) Äthiopiens. Im zweiten Teil werden loh-

nende Naturreiseziele vorgestellt. Die sechs Hauptkapitel behandeln nach biogeographischen Aspekten abgegrenzte Naturräume. Die einzelnen Kapitel sind wiederum in vier Abschnitte gegliedert nach frühen Naturreisenden, Menschen und Landschaft, Biodiversität und Vogelwelt. Im Abschnitt „Frühe Reisende“ wird die historische naturkundliche Erforschung Äthiopiens ausführlich dargestellt.

Forscher aus dem deutschsprachigen Raum spielten eine wichtige Rolle. Einige wie Theodor von Heuglich, Carlo von Erlanger, Friedrich Wilhelm Hemprich, Eduard Rüppell und Theodor Erckel verewigten sich in der wissenschaftlichen Vogelnamenklatur des ostafrikanischen Landes: Erckelfrankolin (*Pternistis erckelii*), Hemprichs Hornbill (*Lophoceros hemprichii*) und Sperbergeier (*Gyps rueppellii*). Der Frankfurter Forscher Eduard Rüppell war der erste Europäer, der Äthiopien bereiste. Er beschrieb 120 Vogelarten neu für die Wissenschaft, unter anderem den Erzraben (*Corvus crassirostris*), dem als Noahs Rabe in der volkstümlichen äthiopischen Geschichte eine wichtige Rolle zukommt, und nach dem das Buch benannt ist.

Im Abschnitt „Mensch und Landschaft“ steht der Einfluss des Menschen auf die äthiopische Natur im Vordergrund. Die Domestizierung von Pflanzenarten wie Teff, Khat und Kaffee wird ausführlich behandelt. Teff (*Eragrostis tef*) spielt als Hauptbestandteil der Nationalspeise Injera eine wichtige Rolle in der Ernährung der Äthiopier. Eine der wichtigsten Kulturpflanzen, der Kaffee (*Coffea arabica*), stammt ebenfalls aus dem Hochland Äthiopiens. Die Kaffeeproduktion stellt den Lebensunterhalt von 15 Millionen Äthiopiern. Der Abschnitt „Biodiversität“ behandelt die zahlreichen Tier- und Pflanzenarten jedes Naturraumes Äthiopiens. Do-

gehört beispielsweise der Großteil des äthiopischen Hochlandes zum *eastern afro-montane biodiversity hotspot*, der sich durch eine besonders hohe Anzahl endemischer Tier- und Pflanzenarten auszeichnet. Die Gruppe der Vögel hat es den Autoren besonders angetan. Ein eigener Abschnitt beschäftigt sich mit dieser attraktiven Tiergruppe. Äthiopien beherbergt 854 Vogelarten, von denen je nach taxonomischer Auffassung 23 bis 28 als endemisch gelten. Auffallend ist bei vielen Arten eine Aufspaltung in lokale Unterarten, von denen sich viele in der Zukunft als eigenständige Arten erweisen dürften, wie die Autoren eindrucksvoll herausarbeiteten. Im zweiten Teil des Buches werden 31 ausgewählte Naturreiseziele in Äthiopien detailliert vorgestellt. Das Land lässt sich leider nur schwer auf eigene Faust bereisen – organisierte Reisen sind ein Muss.

Den Autoren gelingt es, Interesse zu wecken am Besuch des Landes und seiner Naturschätze. Äthiopien ist eines der naturräumlich, ethnisch und biologisch vielfältigsten Länder Afrikas. Die mittlerweile über 100 Mio. Einwohner sind eine enorme Herausforderung für den langfristigen Erhalt der Vielfalt. Der Schutz der biologischen und naturräumlichen Vielfalt des Landes kann gelingen, wenn mehr Naturreisende Äthiopien besuchen und der Ökotourismus eine ähnliche wirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung erlangt wie in den anderen ost- und den südafrikanischen Staaten. Noahs Rabe liefert einen wichtigen Beitrag hierfür.

Michael Riffel, Hirschberg

Noahs Rabe

Kai Gedeon, Thorsten Pröhl
Natur & Text Verlag GmbH, Rangs-
dorf, 2022, 320 S., 55,00 Euro,
ISBN 978-3-942062-55-8

ORNITHOLOGIE

Für Einsteiger und Experten

Der ehemalige Leiter der „Vogelwarte Helgoland“, Franz Bairlein, legt ein 368 Seiten dickes Buch mit 640 Farbabbildungen vor. Das Buch gibt einen umfassenden Überblick über alle Facetten des Vogelzuges mit sehr vielen Beispielen ziehender Vogelarten aus allen Teilen der Welt. Das Buch ist kein Fach-Review für Experten (obwohl diese es manchmal nötig haben, einen Gesamtüberblick zu erhalten). Allerdings ist es geschrieben von einem Experten, und deswegen kann man Vertrauen haben, dass Alles, was in dem Buch steht, richtig ist und dass auch die jeweils treffendsten Beispiele ausgewählt wurden. Das Buch wendet sich bewusst an den interessierten Laien und ist deshalb einfach geschrieben und mit leicht verständlichen Bildern ausgestattet. Im Zeitalter fast unerschöpflicher Internetquellen ist das ein Buch, dessen Kauf sich lohnt, wenn man sich für Vogelkunde und Allgemeinbildung interessiert.

Das erste Kapitel „Methoden der Vogelzugforschung“ gibt einen historischen Rückblick über die Vorstellungen zum Vogelzug in früheren Jahrhunderten und die Anfänge der Vogelberingung. Aristoteles vertrat die Auffassung, dass die Zugvögel einen Winterschlaf in Teichen und Sümpfen halten und deswegen im Herbst verschwinden würden und erst im Frühjahr wieder erscheinen. Dieser Glaube war anerkannte Lehrmeinung über das gesamte Mittelalter hinaus, ohne dass irgendjemand bereit war, die aristotelische Auffassung durch Beobachtungen und Experimente auf ihre Richtigkeit zu überprüfen. Zwar gab ein Storch, der sogenannte „Pfeilstorch“, der 1822 bei Wismar geschossen wurde und von einem Pfeil ostafrikanischer Herkunft längs durch den Hals durchbohrt war, Hinweise auf den Aufenthalt in Afrika, aber erst 1899 kam der

dänische Lehrer Mortensen auf die Idee, Vögel zu beringen und den Ring mit der Adresse des Heimatortes zu versehen. Damit begannen die Rückmeldungen der Ringfunde und gaben Aufschluss über die Zugwege der Vögel. Im weiteren Teil dieses Kapitels wird ein Überblick über die neuen Technologien zur Ermittlung der Vogelzugwege gegeben, von der Satellitentelemetrie über die Erkennung des Überwinterungsgebietes anhand von Isotopen an den Federn bis hin zur Ortung nachts ziehender Vögel mit Radargeräten.

Sehr hilfreich für den Einsteiger in die Vogelzugforschung ist das Übersichtskapitel „Vogelzug in Deutschland“, das auf 61 Seiten eine rasche Orientierung über das Zugverhalten der bekanntesten in Deutschland vorkommenden Arten verschafft. Hier findet man bei ca. 45 Nicht-Singvogelarten und ca. 30 Singvogelarten, die man bei uns antrifft (darunter so bekannte Arten wie Stockente, Amsel, Rotkehlchen oder Haussperling), ob dies nun Standvögel oder Zugvögel sind. Wer weiß schon, ob das bei uns zu Weihnachten singende Rotkehlchen ein Heimisches ist oder ein Zuzügler aus dem Nordosten? Zu jeder dieser Arten gibt es eine Karte mit Zugwegen, Beringungsorten oder Fundorten der beringten Vögel. Leider wird in den meisten dieser Karten nur zwischen den in Deutschland beringten Vögeln und den in Deutschland gefundenen im Ausland beringten Vögeln differenziert. Dabei bleibt offen, ob die in Deutschland beringten Vögel auch in Deutschland erbrütet wurden. Der Leser wüsste aber gern, wo der in Deutschland erbrütete Vogel wiedergefunden wurde.

Das Kapitel „Vogelzug - global“ ist für den interessierten Nicht-Fachmann außerordentlich aufschlussreich. Man erfährt, dass nur 40 Prozent aller Vogelarten wirklich große Wanderungen machen. Die Vielfalt des Vogelzuges ist auf einfache, leicht verständliche Gemeinsamkeiten

konzentriert. Beispielsweise ziehen die meisten Langstreckenzieher West- und Mitteleuropas nach Westafrika, während die meisten Langstreckenzieher Osteuropas nach Ost- und Südafrika ziehen. Man erfährt interessante Extreme, z. B. dass die in Ostdeutschland brütenden Zwergschnäpper in Indien (also nicht in Afrika) überwintern, dass die Pfuhschnepfen aus Alaska 200 Stunden lang ohne Unterbrechung über das Wasser des Pazifiks nach Neuseeland fliegen oder dass die Küstenseeschwalbe den dunklen Nächten fast vollständig ausweicht, indem sie sich im Sommer in der Arktis und im Winter in der Antarktis aufhält und dazu im Jahr bis zu 90.000 km zurücklegt. Wenn nordische Vögel ins südliche Winterquartier ziehen, dann darf man nicht vergessen, dass diese Quartiere ja durch andere Arten besetzt sind, so dass sich die Zugvögel in der Evolution zunächst einmal mit erheblichen Konkurrenzen auseinandersetzen hatten. Dabei ist wichtig, dass eigentlich nur Afrika (südlich der Sahara) viel Platz anbietet. Nordamerikas Vögel überwintern hauptsächlich in Mittelamerika und haben dort nur wenig Platz. Das gleiche gilt für die flächenmäßig geringen „Aufnahmegebiete“ Südasiens für die Zugvögel des riesigen zentral- und nordasiatischen Kontinents.

Viele Fachbegriffe des Vogelzuges werden im Kapitel „Formen des Vogelzuges“ an Beispielen erklärt. Einige Vogelarten ziehen im Frühjahr denselben Weg zurück, den sie im Herbst nach Süden gewandert sind („Pendelzug“), andere Arten wählen für den herbstlichen Wegzug und Frühjahrs-Rückzug verschiedene Wege („Schleifenzug“). Während der Weißstorch eine klare „Zugscheide“ hat, in dem die Tiere aus Westdeutschland über Spanien nach Nordafrika, und die Tiere aus Ostdeutschland und Osteuropa über den Bosphorus und Anatolien nach Ost- und Südafrika fliegen, ziehen Schwarzstörche aus Tschechien aus demselben Brutgebiet sowohl auf



der westlichen Route über Spanien nach Westafrika als auch über die östliche Route über den Bosphorus und Anatolien nach Zentralafrika. Interessant ist das Phänomen der „Teilzieher“, bei denen ein Teil der Individuen ein und derselben Population regelmäßige Zugvögel sind, während der andere Teil dauerhaft sesshaft ist. Leider wird nur auf das selektiv vorteilhafte Ziel dieses Polymorphismus hingewiesen, während das ungeklärte populationsgenetische Problem nicht behandelt wird, wie die gekoppelten Gencluster, die in bestimmten Individuen das Zugvogelverhalten steuern, von den Genclustern, die in den anderen Individuen das Standvogelverhalten steuern, auseinandergehalten werden und vor gegenseitiger Rekombination geschützt sind. Das ist ein Problem, weil die beiden Typen (Zug- oder Standvogel) ja ein und derselben Reproduktionsgemeinschaft angehören.

Im Kapitel „Muster des Vogelzuges“ geht es um jahreszeitliche und tageszeitliche Zugzeiten sowie die Zuggeschwindigkeit und die Zughöhen, wobei Streifengänse in bis zu 9000 m Höhe den Himalaya überfliegen (Kap. 9). In den Kapiteln „Steuerung des Vogelzuges“ und „Räumliche Orientierung“ werden die genetischen und die Umweltfaktoren behandelt, die den Vogelzug auslösen und steuern. Verblüffend sind die Orientierungsleistungen, wobei die Richtungsorientierung von der Zielorientierung unterschieden wird. Viele Zugvögel haben die Zugrichtung und die zeitliche Dauer des Zuges ererbt und finden sich ganz alleine zurecht, jedoch wirken oft auch soziale Kontakte korrigierend auf das angebotene Zugprogramm ein. Es geht um den Sonnen- und Sternkompass und um das Magnetfeld der Erde. Auch erlernte Landkarten nach optischen Landmarken und Gerüchen spielen eine Rolle. Manche Vogelarten erstellen sich eine regelrechte „Geruchslandschaft“.

In den Kapiteln „Energetik des Vogelzuges“ und „Physiologische und morphologische Anpassungen“ wird vor allem die Bedeutung der Fettspeicherung als Energie- und Wasserreserve analysiert; weiterhin die Rolle des Schlafs während der langen Zugstrecken. In weiteren Kapiteln werden die Qualitäten der Rastplätze auf den Zugwegen dargestellt sowie die Bedeutung großer geografischer Barrieren wie Alpen, Mittelmeer und Sahara. Außerdem erfährt der Leser, wie sich Zugvögel in ihren Winterquartieren zurechtfinden und wie sie mit Wind, Wetter und Klimawandel zurechtkommen. Den Abschluss bilden Vogelparasiten und Infektionskrankheiten, und es geht um den Einfluss, den der Vogelfang und die Jagd auf die Bestandsdichten der Vogelarten haben.

Etwas irritierend ist die nicht-übereinstimmende Nummerierung der Kapitel, die im Inhaltsverzeichnis mit 1 = „Vorwort“ und 2 = „Methoden der Vogelzugforschung“, im laufenden Text aber mit 1 = „Methoden der Vogelzugforschung“ beginnt, so dass im Text alle Kapitelnummern um 1 verschoben sind.

Werner Kunz, Düsseldorf

Das große Buch vom Vogelzug.

Eine umfassende Gesamtdarstellung. Franz Bairlein, Aula-Verlag, Wiesbaden, 2022, 368 S., 49,95 Euro, ISBN 978-3-8910-4825-2.

MIKROBIOLOGIE

Eindrucksvolle Biodiversität

Den größten Teil der Lebewesen bilden Mikroorganismen, die überall auf der Erde siedeln; dennoch werden sie häufig nur als Krankheitserreger wahrgenommen. Dabei sind die Leistungen der Mikroben im globalen Kohlenstoff-, Stickstoff- und Schwefelkreislauf fundamental, und bei der Umsetzung von minerali-

schen oder organischen Substanzen sowie der Synthese biotechnologischer Produkte sind sie wichtige Player. Das Büchlein „Winzig, zäh und zahlreich“ stellt die Welt der Bakterien und Archaea anhand von 50 ausgewählten Beispielen vor. Es beschreibt Rekordhalter (die größten, kleinsten, sauersten, alkalischsten, salzigsten, heißesten oder verrücktesten Vertreter) sowie nützliche Helfer oder Krankheitskeime. Außerdem erklärt es die Spannweite mikrobiellen Lebens und berichtet über exotische Ernährungsweisen. Viele der Informationen bringen uns zum Staunen oder sind erheiternd; das Buch ist sehr kurzweilig zu lesen. Jede der fünfzig Mikroben ist zudem mit einer kolorierten Zeichnung illustriert, die ihre jeweiligen Besonderheiten hervorhebt. Das Bild von *Halobacterium salinarum* ist allerdings nicht so passend, denn es stellt den Organismus als kurzes, eiförmiges Etwas dar. Dabei handelt es sich in der Realität um ein etwa 5 µm langes Stäbchen, das im Zellinnern gut sichtbare Gasvesikel zeigt. Aber das sind Feinheiten. Diesen Porträts der Mikroben geht eine allgemeine Einführung voraus, die von der Entdeckung der Bakterien über die Anfänge der Mikrobiologie bis hin zu den bahnbrechenden Untersuchungen von Carl Woese führt, der durch den Vergleich ribosomaler RNA-Sequenzen die Entwicklungsgeschichte der Bakterien revidierte und Archaea als 3. Domäne des Lebens definierte. Seine Ergebnisse schärfen unseren Blick auf den Ursprung des Lebens und befeuerten damals auch die Suche nach neuartigen Mikroben in extremen Habitaten. Zudem begründete Woese die moderne Mikroben-Ökologie, bei der Bakterien und Archaea über (Meta-)Genomanalysen im Habitat identifiziert werden. Viele der hier identifizierten Mikroben (>90%) sind im Labor (noch) nicht kultiviert.

Im Text haben sich leider kleinere Ungenauigkeiten eingeschlichen, die bei einer Neuauflage verbessert werden sollten. Die Begriffe „Archae-



bakterien“ und „Archaea“ werden z. B. nebeneinander verwendet, und es wird nicht erklärt, warum der Begriff „Archaeobakterien“ durch „Archaea“ ersetzt wurde. Manche Aussagen sind zu pauschal – z. B. sind Archaea nicht nur auf extreme Lebensräume spezialisiert, sondern kommen in großer Zahl auch bei mittleren Temperaturen im Boden, Wasser und sogar auf unserer Haut oder im Darm vor. Wieso anaerobe Keime 16 Prozent des Genoms über horizontalen Gentransfer aufgenommen haben sollen, aerobe Keime aber nur 8 Prozent, erschließt sich mir nicht. Die aeroben Haloarchaea haben z. B. > 1000 Gene und damit etwa 1/3 ihres Genoms von Bakterien übernommen; dies transferierte einen anaeroben Methanbildner als Vorläufer zu einem aeroben Archaeon. Auch teilen sich nicht alle Bakterien schon nach 20 min; dies hängt von ihrem Energiestoffwechsel, der Nahrungszufuhr sowie den optimalen physikalischen Bedingungen ab. Einige Mikroben haben sogar selbst unter optimalen Bedingungen Generationszeiten von Tagen oder Monaten. Dennoch ist das Buch sehr informativ, und wer sich über die Vielfalt des mikrobiellen Lebens kurzweilig und schnell informieren will, ist hier sehr gut aufgehoben.

Felicitas Pfeifer,

Technische Universität Darmstadt

Winzig, zäh und zahlreich.

Ein Bakterienatlas. Ludger Weiß, illustriert von Falk Nordmann, Matthes & Seitz, Berlin, 2020, 279 S., 28,00 Euro, ISBN 978-3-95757-842-6.

MIKROBIOLOGIE

Wir sind viele

In den letzten Jahrzehnten ist klar geworden, dass Mikroorganismen nicht nur Krankheitserreger sind, sondern durchaus viele nützliche

Eigenschaften haben. Inzwischen geht die Wissenschaft sogar noch einen gewaltigen Schritt weiter: Mikroben erfüllen in den meisten Lebewesen als Kommensalen oder Symbionten unverzichtbare Aufgaben, ohne die ein Überleben der Wirte auf Dauer nicht möglich wäre. Das geht so weit, dass alle vielzelligen Organismen – einschließlich des Menschen – dauerhaft mit einer spezifischen Mikrobengemeinschaft (= Mikrobiom) assoziiert sind. Daraus ergibt sich ein „Metaorganismus“ aus einem Wirt und seinem unverwechselbaren und unverzichtbaren Mikrobiom, der oft auch als Holobiont bezeichnet wird. Die Metaorganismus-Forschung hat in den letzten Jahren erstaunliche Zusammenhänge aufgedeckt, insbesondere in Bezug auf die Entstehung von nicht-übertragbaren Krankheiten, also solchen, die sich nicht auf einen Infektionserreger zurückführen lassen. Heute weiß man: Übergewicht, Typ-2-Diabetes, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Krebs – überall haben Mikroben ein Wörtchen mitzureden.

Der in Kiel beheimatete DFG-Sonderforschungsbereich „Ursprung und Funktionieren von Metaorganismen“ widmet sich vielen dieser spannenden und komplexen Fragen. Ihr Leiter Thomas C. G. Bosch, Professor für Allgemeine Zoologie an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel und BiuZ-Autor, hat nun einige davon und – soweit möglich auch die Antworten darauf – in einem Sachbuch vorgestellt. Im ersten Teil des Buches schafft Bosch die Grundlagen zum Verständnis der aktuellen Mikrobiomforschung. Dazu beschreibt er wichtige Aufgaben eines Mikrobioms und skizziert, wie im Verlauf der Evolution Metaorganismen entstanden sein könnten. Dabei lernen wir, dass das Zusammenspiel von Wirten und Mikroben die Entwicklung von Eigenschaften geprägt hat, über die wir heute höhere Lebewesen definieren, darunter die Vielzelligkeit, das Immunsystem und sogar das Nervensystem.

Die sich daraus ergebenden Konsequenzen mögen vielleicht nicht für Jeden angenehm scheinen: etwa, dass Mikroben unser Verhalten beeinflussen können. Wichtige Ergebnisse dazu stammen aus Boschs eigenem Labor, in dem die Interaktion des Mikrobioms des Süßwasserpolyphen *Hydra* mit dessen Nervensystem erforscht wird (siehe hierzu „Wenn das Mikrobiom den Nerven trifft“, BiuZ 4/22). Der Einfluss von Mikroben auf die Neurogenese und viele weitere aktuelle Forschungsergebnisse werden im zweiten Teil des Buches präsentiert. Der letzte Teil wagt dann einen Blick in die Zukunft und reißt auch heute zum Teil noch utopisch klingende Fragestellungen an. Dabei ist das abgedeckte Themenspektrum breiter als nur die menschliche Gesundheit, denn auch in anderen Bereichen, beispielsweise in der Landwirtschaft, spielen (pflanzliche) Mikrobiome eine Rolle.

Die Forschung, die uns Bosch präsentiert, ist anspruchsvoll, doch es gelingt ihm durchweg, sie anschaulich und gut verständlich darzustellen. Die Überschriften der kurzen Zwischenkapitel führen den Leser sicher durch das Buch. Ein Kapitel zu den Auswirkungen der Corona-bedingten Kontaktbeschränkungen auf die Entwicklung individueller Mikrobiome und die daraus resultierenden Gesundheitsrisiken zeigt, dass das Buch hochaktuell ist. „Die Unentbehrlichen“ sind eine spannende und informative Lektüre für anspruchsvolle Leser, die verstehen wollen, wie Mikroben unser Leben und unsere Natur als menschliche Holobionten prägen.

Larissa Tetsch, Maisach

Die Unentbehrlichen – Mikroben, des Körpers verborgene Helfer.

Warum sind so viele Menschen krank? Antworten aus der Mikrobiomforschung. Thomas C. G. Bosch, Springer Spektrum, Berlin, 2022, 271 S., 19,99 Euro, ISBN 978-3-662-65082-0.



MIKROBEN VERSTEHEN

Schwimmstile der Mikroben

Aktiv schwimmende Mikroben haben für diesen Zweck im Laufe ihrer Entwicklung verschiedene Flagellenanordnungen erworben. So besitzen manche Arten ein polares Filament, andere bipolare oder verstreut polytriche Anordnungen, mitunter Kombinationen oder auch wechselnde Flagellierungen. Dabei stellen die Varianten der mikrobiellen Organellen nicht einfach nur morphologische Spielarten zur Fortbewegung dar, sondern sind Grundlage für Schwimmstile mit unterschiedlich funktionellen Eigenschaften.

In der Evolution entstanden mikrobielle Bewegungsformen mehrfach. Man kennt Fortbewegung durch Schwimmen, Schwärmen, Kriechen, Gleiten und strukturell und funktionell noch nicht vollständig aufgeklärte Systeme mit besonderen Organellen. Die bekanntesten und derzeit am besten untersuchten Strukturen sind Pili sowie die rotierenden Flagellen der Bakterien und Archaeen [1]. Hier gehen wir einigen Eigenschaften charakteristischer Flagellierungen nach, die Mikroben zum differenzierten Schwimmen in wässrigen Medien nutzen.

Je mehr Flagellen, desto besser?

Die meisten Studien sind wohl am Bewegungssystem von *Escherichia coli* durchgeführt worden. Das Bakterium besitzt eine Anzahl verstreut inserierter Flagellen (Abbildung 1), die bei Fortbewegung synchron gegen den Uhrzeigersinn rotieren (*counter clockwise*), dabei spiralige

Flagellenbündel formen und sich durch das für sie zähflüssige Wasser schrauben [2]. Die Schwimmphasen (*run*) werden – spontan oder bei Chemotaxis induziert [3] – durch Taumelphasen (*tumbling*) unterbrochen, in denen sich die Rotation (eines Teils) der Flagellen umkehrt (*clockwise*), wodurch sich das Flagellenbündel unkontrolliert auffächert und die Zelle zufällig neu ausrichtet.

Polytriche Flagellierung – das heißt mehrere Flagellen sind vorhanden – ist unter Mikroben verbreitet. Auch der Modellorganismus *Bacillus subtilis* (die Mikrobe des Jahres 2023, <https://vaam.de>) weist sie auf; bei ihr wurde die Wirkung der Flagellenzahl am Wildtyp mit 26 ± 6 Flagellen, einer Regulationsmutante (*DswrA*, 9 ± 2) und einem überexprimierenden Stamm (*swrA⁺⁺*, 41 ± 6) studiert [4]. Der Wildtyp ist der geringer flagellierten Mutante überlegen und bewegt sich rascher fort. Ein intuitiv eher nicht erwartetes Ergebnis aber ist, dass der Vielflagellenstamm keineswegs schneller schwimmt als der Wildtyp und auch noch etwas langsamer ist als die Zellen mit neun Filamenten. Es stellt sich heraus, dass *B. subtilis* unabhängig von der Flagellenzahl nicht nur ein, sondern meist drei Flagellenbündel ausbildet. Sie stehen bei dem Stamm *swrA⁺⁺* wegen der zahlreichen Filamente besonders weit vom Zellkörper ab, üben dadurch einen höheren Strömungswiderstand aus und bremsen die Fortbewegung. Der Geschwindigkeitsgewinn durch mehrere Flagellen macht sich beim Wildtyp noch bemerkbar, die Bündel liegen enger am Zellkörper an als bei noch höherer Flagellenzahl. Auch andere stäbchen-

förmige Mikroben, darunter *E. coli*, entwickeln beim Schwimmen mehr als ein Flagellenbündel [5].

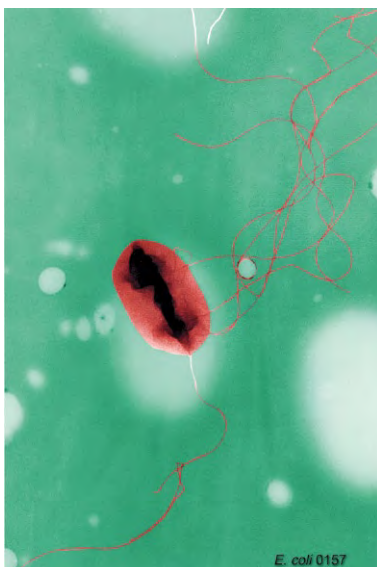
Ein weiterer Zusammenhang findet sich zwischen Flagellenzahl und der Zeit ungestörter Fortbewegung. Je weniger Flagellen *B. subtilis* besitzt, desto länger dauert es, bis die Zellen in den Taumelmodus verfallen und die Schwimmrichtung neu einstellen. Die Erklärung hierfür liegt im zufälligen Konformations- und damit Rotationswechsel der Flagellenmotoren [6]. Je mehr Flagellen beteiligt sind, desto wahrscheinlicher wird es, dass mindestens einer der Motoren umschaltet und die Synchronisation des betroffenen Bündels stört. Die Zelle verliert an Fahrt und stoppt vollständig, wenn nahezu gleichzeitig alle Bündel auseinanderfallen. Eine höhere Flagellenzahl bewirkt beim Taumeln auch einen bedeutenderen Richtungswechsel; der Änderungswinkel fällt größer aus.

Vergleichbar mit dem zufälligen Weg frei diffundierender Partikel in ruhenden Flüssigkeiten sinkt die resultierende Translokationsgeschwindigkeit der Mikroben über längere Strecken in einer gewählten Richtung. Dadurch vermögen die Zellen aber eine begrenzte Fläche kleinteiliger abzusuchen, während Bakterien mit weniger Flagellen länger eine grobe Richtung beibehalten und größere Areale überstreichen. Die Bewegungscharakteristik ist durch chemotaktisches Verhalten mit Anpassung der Run- und Taumelphasen modifizierbar [3] und folgt dabei verschiedenen physiologischen Anforderungen [7]. Der Wildtyp hat offenbar einen evolutionär angepassten Flagellensatz erworben, mit dem noch eine geeignete schnelle Fortbewegung möglich und die Erkundung und Besiedlung von Oberflächen durch Biofilmbildung begünstigt ist [4]. Gibt es andererseits Mikroben, die besonders zur Bewältigung größerer Strecken ausgerüstet sind?

Ein Filament zusätzlich

Man kennt schon länger Bakterien mit einem konstitutiv polaren Flagel-

ABB. 1 Zelle von *Escherichia coli* mit peritrich, also rund um die Zelle, angeordneten Flagellen in der Transmissionselektronenmikroskopie. Durch die Präparation wurde die Zelle leicht verformt. Bild: Centers for Disease Control and Prevention.



lum wie Vertreter der Gattung *Vibrio*, die optional auch peritrich (also rund um die Zelle) verteilte Filamente besitzen können. Letztere nützen, wie bei *B. subtilis*, zum Überstreichen kleinerer Areale und dadurch auch zur leichteren Anheftung auf Oberflächen. Das kollektive Verhalten von Massenansammlungen der Bakterien auf feuchten Substraten wird als Schwärmen bezeichnet. Das polare Organell dient dagegen der großräumigen Fortbewegung [8]. Die beiden Systeme werden in *Vibrio* genetisch getrennt reguliert und energetisch unterschiedlich versorgt. Ein H^+ -Gradient treibt die Motoren der peritrichen Flagellen an, das polare Flagellum wird dagegen durch einen Na^+ -Gradienten befeuert. Der Na^+ -Motor rotiert schneller als die H^+ -Antriebe; das polare Flagellenfilament ist zudem bei manchen Arten mit einer Proteinscheide umhüllt, somit rigider, und schiebt die Mikrobe nicht nur rascher, sondern auch effizienter voran. Mit unterschiedlichen Flagellensystemen ausgestattete Bakterien können so zwischen einem Erkundungs- und Reisemodus umschalten. Ein ähnliches Verhalten findet man unter anderem bei Arten von *Methanocaldococcus*. Diese Archaeen zählen – gemessen an ihrer Körpergröße – zu den schnellsten Organismen, wenn sie sich im freien Medium bewegen und hier rund zehnmal rascher als *E. coli* schwimmen. Geraten ihre zahlreichen Archaeen-spezifischen Flagellen jedoch in die Nähe von Oberflächen, beobachtet man einen langsamen Zickzackmodus [9]. Dies zeigt, dass auch die Interaktion mit Umweltfaktoren (hier Oberflächen) Einfluss auf den Schwimmstil nehmen, was ebenfalls für andere Mikroben zutrifft [10]. Wir hatten schon besondere Bewegungscharakteristika im Zusammenhang mit Strömungseffekten nahe von Oberflächen kennengelernt [2].

Nur polare Flagellen

Mikroben mit einem polaren Filament schwimmen, über einen längeren Zeitraum betrachtet, relativ gerichtet

„geradeaus“. Sie unterbrechen die reinen Run-Phasen zwar ebenfalls wie peritrich begeißelte Bakterien, ändern dabei ihre Ausrichtung aber meist nur wenig abweichend von 0° oder 180° , denn die zufällige Reorientierung durch das Aufdröseln eines Flagellenbündels entfällt hier. Die Brownsche Bewegung der Wassermoleküle bewirkt in der kurzen Zeit bei der typischen Größe von Mikroben keine nennenswerte Neuausrichtung elongierter Zellen [11]. Das phototrophe Bakterium *Rhodobacter sphaeroides* (vormals *Rhodospseudomonas*) hat zur variableren Reorientierung eine besondere Eigenschaft des polaren Flagellums entwickelt. Das Filament ändert seine Konformation bei Rotationsumkehr derart, dass neben der zur normalen Fortbewegung dienenden Spiralform eine rigide superspiralige und eine gestreckte Variante auftritt, die zusammen mit den Übergangsformen bei Rotation zu größeren Richtungsänderungen führen [11].

Rhizobium lupini, ein symbiotisches, N_2 -fixierendes Bakterium, bildet zwei bis drei polare Flagellen und vermag damit ebenfalls überwiegend nur zwischen 0° und 180° zu wechseln. Die Strategie zu mehr abweichenden Richtungsänderungen (vermehrt um 90°) besteht darin, mehr Filamente am Pol anzufügen und das Flagellenbündel zu vergrößern [11]. Magnetotaktische Bakterien wie *Magnetospirillum* besitzen meist Flagellenbündel an beiden Polen, die jeweils und wechselnd als Schub- und Zugsysteme arbeiten [2]. Auch hier ergibt sich im Mittel eine Hin- und Herbewegung ohne große Unregelmäßigkeiten. Diese sind bei diesen Organismen ohnehin kaum erwünscht und möglich, denn die Zellen richten sich durch ihre interne Magnetsomenkette am Erdmagnetfeld aus und streben diesem entlang in das sauerstoffarme Sediment von Gewässern [12].

Man kommt immer mehr weiteren physikalischen, physiologischen und umweltbedingten Effekten der

aktiven Bewegung von Mikroben auf die Spur, wobei der Einfluss von Chemotaxis und anderen Taxien eine kontrollierende oder modifizierende Rolle spielt [7]. Die Bewegungssysteme und – wie hier mit einigen Beispielen keineswegs erschöpfend angesprochen – die Schwimmstile von Mikroben sind erheblich vielgestaltiger, dynamisch komplexer und durch die Umwelt in größerem Maße beeinflusst, als man intuitiv vermutet. Was wir dabei leicht übersehen, ist die Tatsache, dass Mikroben bereits eine mehrere Milliarden Jahre währende Evolution und mannigfache Anpassungen und Spezialisierungen erfahren haben. Ihre vermeintlich einfachen Strukturen und Funktionalitäten haben sich auf verschiedenste ökologische Umgebungen und Wechselwirkungen eingerichtet, und sie spiegeln diese Variabilität wider. Die Bewegungsstrukturen und ihre Leistungen gehören nicht zuletzt dazu, und deren Vielfalt ist bei weitem noch nicht endgültig erforscht.

Literatur

- [1] N. Wadhwa, H. C. Berg (2022). Nat. Rev. Microbiol. 20, 161–173.
- [2] H. Engelhardt (2022). Biologie in unserer Zeit 52, 192–193.
- [3] A. Briegel (2022). Biologie in unserer Zeit 52, 72–79.
- [4] J. Najafi et al. (2018). Sci. Adv. 4, <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aar6425>
- [5] J. Najafi et al. (2019). Soft Matter 15, 10029–10034.
- [6] Y. Sowa, R. M. Berry (2008). Quat. Rev. Biophys. 41, 103–132.
- [7] R. Colin et al. (2021). FEMS Microbiol. Rev. 45, <https://doi.org/10.1093/femsre/fuab038>
- [8] M. Homma et al. (2022). Microbiol. Immunol. 66, 75–95. <https://doi.org/10.1111/1348-0421.12954>
- [9] B. Herzog, R. Wirth (2012). Appl. Env. Microbiol. 78, 1670–1674. <https://doi.org/10.1128/AEM.06723-11>
- [10] S. Kudo et al. (2005). FEMS Microbiol. Lett. 242, 221–225.
- [11] J. G. Mitchell, K. Kogure (2006). FEMS Microbiol. Ecol. 55, 3–16.
- [12] M. Schüler, D. Schüler (2021). Biologie in unserer Zeit 51, 74–81.

Harald Engelhardt, Martinsried

AUSSERSCHULISCHE LERNORTE

Inatura: Natur, Mensch und Technik in Vorarlberg erleben



Die inatura (Abbildung 1) – im Stadtgarten von Dornbirn gelegen – ist ein Museum der besonderen Art. Hier wird nicht nur gesammelt, geforscht und ausgestellt, hier wird Wissen um Natur, Mensch und Technik und deren Vernetzung durch Mitmachen begreifbar. So vielfältig das Themenspektrum inhaltlich ist, so vielseitig sind auch die Aufgaben der mit dem Österreichischen Umweltzeichen ausgezeichneten Einrichtung.



ABB. 1 Die inatura befindet sich in einem historischen Industriegebäude inmitten des Stadtgartens von Dornbirn. Foto: Dietmar Walser.

Die Dauerausstellung (Abbildung 2) bietet kleinen und großen Besucher/-innen eine Mitmach-Reise durch typische Lebensräume wie Wald, Wiese, Gebirge und Gewässer und durch den menschlichen Körper. Dabei stehen das Ausprobieren und forschende Begreifen von Zusammenhängen im Vordergrund.

Durch integrierte Terrarien und Aquarien können die Besucher/-innen sogar lebendige Tiere im Museum beobachten.

Beherbergt ist die Ausstellung der inatura in einem historischen Industriegebäude (Abbildung 1), dessen Geschichte und Architektur eng mit der Ausstellung verknüpft

sind. Diese Verbindung zwischen Natur, Kultur und Technik wird dabei an speziellen Science-Stationen erlebbar gemacht.

Mit einer kostenlosen App wird das eigene Smartphone zum individuellen Audio-Guide während des Besuchs.

Sonderausstellungen und Veranstaltungen

Regelmäßig zeigt die inatura auf der Galerie wechselnde Ausstellungen. Aktuell zu Gast ist die Mitmach-Ausstellung „Tüftelgenies“ des Kindermuseums FRida & freD aus Graz, in der sich alles rund um geniale Erfindungen und ihre Erfinder/-innen dreht (Abbildung 3). Was war Zufall, was Geistesblitz, was jahrelange Tüftelei – hier können Kinder ab 8 Jahren und ihre Familien die spannenden Geschichten entdecken, die hinter wesentlichen und auch skurrilen Erfindungen stecken und erfahren, dass bereits Kinder richtige Erfinder sein können.

Für Zielgruppen aller Altersstufen bietet die inatura ein abwechslungsreiches Programmangebot (Abbildung 4). Ob museumspädagogische oder naturpädagogische Veranstaltungen für Schulklassen aller Schulformen und Kindergarten-Gruppen, ob Führungen für Erwachsene, Vorträge, Exkursionen, Kurse oder Konferenzen, Science-Cafés oder das beliebte Pub-Quiz – auch hier zieht das Themenspektrum Natur, Mensch und Technik rund ums Jahr eine Vielzahl an Besucher/-innen von nah und fern an.

ABB. 2 Impressionen der Dauerausstellung. Fotos: a, c) Dietmar Walser, b) Petra Rainer.





ABB. 3 Mitmach-Ausstellung „Tüftelgenies“. Foto: FRida & freD, Hannes Loske.

Sammlung und Forschung

Als naturwissenschaftliches Dokumentationszentrum der Naturvielfalt Vorarlbergs steht die inatura mit umfangreichen Sammlungsbeständen (Abbildung 5) und Beobachtungsdaten Forschenden, Gutachtern und Sachverständigen offen. Naturkundlich Interessierten ermöglicht sie die aktive Beteiligung an Forschung durch *Citizen-Science*-Projekte.

Die Fachberatung bietet darüber hinaus Expertenrat zur Artbestimmung heimischer Pflanzen, Tiere und Pilze, zum Umgang mit z. B. Giftpflanzen, Gifttieren oder auch Schädlingen und gibt Auskünfte zu Gesteinen, Mineralien und Fossilien und vielem mehr.

Genuss und Kunst

Das Café-Restaurant bietet drinnen und im Sommer auch draußen mit Blick auf das historische Gebäudeensemble und den Stadtgarten Genuss in besonderem Ambiente. Der Kunstraum Dornbirn im historischen Gebäude gegenüber präsentiert und vermittelt zeitgenössische Kunst.

Lust bekommen auf einen Besuch? Alle Infos zu Anreise, Öffnungszeiten, Angebot und mehr finden Sie unter www.inatura.at.

*Ines Linke,
inatura Museumspädagogik*



ABB. 4 Zum Angebot der inatura gehören Exkursionen (a) und Workshops (b). a) inatura-Archiv, b) Ines Linke.



ABB. 5 Die umfangreichen Sammlungsbestände stehen sowohl Forschenden als auch naturkundlich Interessierten offen. Fotos: a) Petra Rainer, b) Sabrina Perle-Alge.

PARTNER DES MENSCHEN

Hanf: Eine alte Kulturpflanze mit dem Versprechen einer grünen Zukunft

Die Geschichte der ersten Hanfernte durch den Menschen reicht bis vor etwa 8500 Jahre zurück, während der aktive Anbau von Hanf etwa 6000 Jahre alt ist. In den letzten Jahrzehnten sind viele vergessene Kulturpflanzen aufgrund ihres bedeutenden Potenzials in neuem Licht erstrahlt und versprechen einen wichtigen Beitrag zur Bewältigung globaler Herausforderungen wie Ernährungssicherheit, Klimawandel, Verlust der biologischen Vielfalt etc. Kaum eine Agrarpflanze hat so viel Begeisterung ausgelöst wie der Industriehanf.



ABB. 1 Männliche Hanfpflanze auf dem Versuchsfeld der Universität Hohenheim. Foto: F. Khajehei, L. Burgel.

Obwohl Hanf (*Cannabis sativa* L., Abbildung 1) für Tausende von Jahren die Nutzpflanze Nummer eins der Menschheit war, verschwand sie aufgrund des in Deutschland und vielen anderen europäischen Ländern über Jahrzehnte herrschenden Anbauverbots Mitte des 20. Jahrhunderts fast vollständig von der Bildfläche. Mittlerweile rücken die legalen Einsatzmöglichkeiten des Hanfs in einer

biobasierten Wirtschaft aufgrund ihres hohen Potenzials in unterschiedlichen Industriezweigen mit bemerkenswerter Begeisterung mehr und mehr in den Fokus. Schließlich kann die lange Geschichte der Menschen mit Hanf als Nahrungsmittel, Medizin, Kleidung und technisches Material nicht vergessen und gelehrt werden.

Grundsätzlich bietet die industrielle Nutzung von Hanf konkrete und nachhaltige Alternativen für wertvolle Lebensmittel (Öle, Proteine, Mehle) und umweltfreundliche Non-Food-Produkte – von Textilien, Papier und Seile über Biokunststoffe bis hin zu Baumaterialien und Kosmetika. Zusätzlich wird Hanf ebenfalls in langer Tradition als Heilmittel gegen z. B. Schmerzen, Depressionen, Epilepsie etc. medizinisch genutzt. Dabei stehen die in den Blüten und Blättern enthaltenen Phytocannabinoide und Terpene, welche für den charakteristischen Geruch der Hanfpflanze verantwortlich sind, im Zentrum. Basierend auf den Aussagen des Hanfverbandes ist es möglich, mehr als 50.000 Produkte aus Hanf herzustellen. Folglich ist Industriehanf ein Paradebeispiel für eine multifunktionale Mehrzweckpflanze. Sein hohes Potenzial für die Verwendung in verschiedenen Branchen (z. B. Textil, Papier, Baustoffe, Bioenergie, Biokunststoffe, Arzneimittel, Pflanzenöl, tierische Produkte, Kosmetika usw.) sowie seine

Vielseitigkeit und die Möglichkeit der 100-prozentigen Wiederverwertung machen ihn nicht nur zu einer geeigneten Kulturpflanze für die zirkuläre Bioökonomie, sondern auch für die Verfolgung der Klimaziele, die von der Regierung im Rahmen des europäischen Green Deals 2019 beschlossen wurden.

Dieser Artikel gibt einen kurzen Überblick über die Vergangenheit von Hanf und seine zukünftigen Anwendungen und Potenziale in Europa und insbesondere in Deutschland.

Kurze Geschichte des Hanfes als Industriepflanze

Die Hanfpflanze (*Cannabis sativa* L.) ist eine einjährige, krautige Pflanze aus der Gattung der Hanfgewächse (Cannabaceae). Aufgrund ihrer Anpassungsfähigkeit wächst sie weitverbreitet vom Äquator bis zum Polarkreis. Obwohl die antiken Dokumente, die sich auf den Anbau von Hanf in Europa beziehen, seit dem 15. Jahrhundert spärlich sind, kam Hanf laut Herodot (484 v. Chr.) zum ersten Mal mit der Migration der Skythen aus Asien im Jahr 1500 v. Chr. nach Europa, wobei die Teutonen eine wichtige Rolle bei der Verbreitung des Hanfanbaus in ganz Europa spielten [1]. Im 15. Jahrhundert wuchs die Bedeutung von *C. sativa* vor allem als Faserpflanze für die Herstellung von Textilien und Seilen. Neben der Verwendung von Hanf als Faserpflanze ist auch seine Verwendung als Heilpflanze sowie als rituelle, berauschende Droge zu berücksichtigen. Angesichts des bemerkenswerten Nährwerts der Hanfsamen (Abbildung 2) wurden sie in Europa als Nebenprodukt der Hanfproduktion zur Faserherstellung betrachtet; die Hinweise auf ihre Verwendung als Nahrungsmittel in der Geschichte sind gering [2]. Im 20. Jahrhundert ging der Anbau von Hanf als Faserpflanze aufgrund der zunehmenden Produktion und Verbreitung von Kunstfasern sowie der steigenden

Arbeitskosten kontinuierlich zurück. Die Cannabis-Prohibition der USA führte ab den 1940er Jahren in vielen Ländern der Welt zu Anbauverboten. Dies brachte den Hanfanbau, unabhängig davon, ob es sich um Faser- oder Drogenhanf handelte, fast zum Erliegen. Darüber hinaus verabschiedeten die Vereinten Nationen (UN) 1961 das Übereinkommen über Suchtstoffe, mit dem ein universelles System zur Beschränkung des Anbaus, der Herstellung, des Vertriebs, des Handels, des Besitzes und der Verwendung von Suchtstoffen auf medizinische und wissenschaftliche Zwecke eingeführt wurde, wobei der Schwerpunkt auf pflanzlichen Stoffen, darunter *C. sativa*, lag.

Mit dem Fortschritt und dem Erwerb ausführlicherer Kenntnisse über die biochemischen und biomolekularen Eigenschaften der Hanfpflanze wurde deutlich, dass der Genfluss eine Unterscheidung zwischen dem Faser- und Drogenhanfanbau ermöglicht. Diese Erkenntnis führte dazu, dass Faser- oder Industriehanf und Drogenhanf getrennt voneinander betrachtet wurden [2]. Folglich wurde der Anbau von Industriehanf in den letzten zwei Jahrzehnten aufgrund seines hohen Potenzials für verschiedene Industriezweige wieder eingeführt (Abbildung 3). Allerdings ist auch heute der Industriehanf aufgrund seiner Geschichte noch mit einem prohibitiven Status konfrontiert, was den Anbau, die Anbaufläche und final auch die Nutzung limitiert. Obwohl der landwirtschaftliche Hanfanbau seit seiner Wiedergeburt Anfang der 1990er Jahre kontinuierlich zunimmt, liegt die Produktion in Europa weit hinter der Nachfrage zurück.

Nutzhanf in verschiedenen Industriebereichen

Speziell die Nutzung der Hanfstängel und -schäben für die Gewinnung von Lignin und die daraus resultierende Neuentwicklung von

Bio-Kunststoffen eröffnet Möglichkeiten für technisch anspruchsvolle Anwendungen, welche bislang kaum Beachtung fand. Diese Kunststoffalternative ist umweltfreundlich, schadstoffarm und biologisch abbaubar. Hanfschäben sind gleichmäßig gebrochene, holzähnliche Teilchen, die als Neben- oder Koppelprodukt bei der Fasererzeugung anfallen und bisher vorwiegend als Tiereinstreu Verwendung finden. Die zusätzliche Gewinnung von Plattformchemikalien aus Reststoffen wie Schäben und Kurzfasern stellt ebenfalls ein mögliches innovatives Verfahren für die Chemieindustrie dar, um Industrie- und Verarbeitungsstandorte kosteneffektiv mit biobasierten Ausgangsprodukten zu versorgen und gleichzeitig eine echte Alternative zu erdölbasierten Ressourcen zu schaffen.

Obwohl die Märkte für Hanffasern und -schäben in Europa zwar etabliert und weitestgehend stabil sind, ist im Moment aufgrund der hohen Konkurrenzsituation mit preisgünstigeren Rohstoffen kaum Marktwachstum zu erwarten [3]. Dies wäre nur durch die Erschließung innovativer neuer Verwertungsrichtungen sowie der Unterstützung seitens der Politik durch eine gezielte Förderung von Materialien aus nachhaltigen Rohstoffquellen zu realisieren. Darüber hinaus muss die Weiterverarbeitung, d. h. das Pressen sowie der Transport des lignocellulosehaltigen Hanfmaterials zu den verfügbaren Aufschlussanlagen gewährleistet werden.

Das in den Hanfstängeln enthaltene Lignin, das als eine Art Klebstoff fungiert, welcher die Cellulosefasern zusammenhält, fand bislang kaum industrielle Verwertung. Ein Grund dafür ist, dass es sich bei Lignin um sehr stabile Moleküle handelt, die schwer aufgespalten werden können. Gleichzeitig ist es jedoch das einzige natürliche Makromolekül, das eine Grundstruktur aus aromatischen Ringen besitzt und sich deshalb als Rohstoffquelle



ABB. 2 Samen, Blätter und Blüten von Nutzhanf. Foto: F. Khajehei.

für sogenannte Bio-Aromate sehr gut anbietet. Letztere sind die Grundlage vieler Produkte wie Lösungsmitteln, Verpackungen oder Medikamente. Dieser natürlich nachwachsende Rohstoff ist als bislang ungenutztes Abfallprodukt im Hanfanbau verfügbar und findet keine Verwertung als Lebensmittel oder im Futtermittelbereich.

Speziell Hanfsamen, das Nebenprodukt aus der Fasernutzung für die Bau- und Werkstoffindustrie, sind reich an Fetten (25–35%, meist ungesättigte Fettsäuren), Proteinen (20–25%), Ballaststoffen (10–15%), Vitaminen und Mineralien [4]. Hanfsamenöl enthält bis zu 80 Prozent mehrfach ungesättigte Fettsäuren, darunter auch die Omega-6-Fettsäure Linolsäure und die Omega-3-Fettsäure alpha-Linolensäure. Das Verhältnis von omega-6 zu omega-3 beträgt in der Regel 2:1 oder 3:1 und ist somit von hoher ernährungsphysiologischer Wertigkeit [4]. Das pflanzliche Protein im Hanf besitzt zudem eine hohe biologische Wertigkeit, die auf zwei Proteintypen zurückgeführt wird. Hanfprotein besteht zu 65 Prozent aus dem Globulin Edestin. Globuline sind in unserem Körper die am dritthäufigsten vorkommende Proteingruppe. Sie sind u. a. wichtig für das Immunsystem, die Blutbil-

derung und den Nährstofftransport zu den Zellen. Darüber hinaus sind 35 Prozent Albumine enthalten, die als hochwertiges pflanzliches Protein sehr gut verdaulich sind und eine antioxidative Wirkung aufweisen. Aufgrund des anerkannten Nährwerts von Hanf haben Lebensmittelhersteller eine breite Palette von Einzelhandelsprodukten aus Hanf entwickelt wie Nüsse, Öl, Proteinmehl, Energieriegel, Müsli, Hanfnussbutter, Nudeln und Eiscreme. In jüngster Zeit liegt der Schwerpunkt auf Hanfprotein, das nicht nur als Nahrungszusatz, sondern auch als funktionelle Zutat in formulierten Lebensmitteln verwendet wird, um die Qualitätseigenschaften des Produkts zu verbessern. Die geringe Allergenität von Hanfprotein im Vergleich zu den meisten anderen pflanzlichen Proteinen erlaubt auch den Ersatz tieri-

scher oder pflanzlicher Proteine in einigen Lebensmitteln. Hanfproteinprodukte lassen sich in fünf Hauptkategorien einteilen: Backwaren, extrudierte Produkte, Getränke, Milchprodukte und Säuglingsnahrung sowie verarbeitete Fleischprodukte. Die Verwendung von Hanfproteinprodukten als Alternative zu den üblicherweise verwendeten Casein-, Molken-, Weizen- und Sojaproteinen ist im Kommen. Der Schlüssel, um Hanfprotein auf dem Markt für Pflanzenproteine wettbewerbsfähig zu halten, liegt darin, seinen Nährwert, seine Funktionalität, seine Sicherheit und seine sensorischen Eigenschaften zu gewährleisten [5].

Darüber hinaus können Abfallprodukte wie Hanfblätter und Dreschrückstände, die bisher nicht in nennenswertem Umfang verwertet wurden, ebenfalls zur Gewinnung nicht psychoaktiver Cannabinoide wie Cannabidiol (CBD, Abbildung 4) und Cannabigerol (CBG) als Hauptbestandteile verwendet werden. CBD wird hauptsächlich für pharmazeutische und medizinische Zwecke verwendet. Als starkes antioxidatives und entzündungshemmendes Mittel kann CBD bei akuten und chronischen Fällen von Neurodegeneration neuroprotektiv wirken und zur Behandlung als Antiepileptikum eingesetzt werden [6].

Insgesamt betrachtet ist Hanf eine heimische Faserpflanze, die pflanzenbaulich geringe Ansprüche stellt [1]. Darüber hinaus eignet sich Nutzhanf hervorragend als Zwischenfrucht und kann dabei helfen, die Agrarbioidiversität zu fördern [7]. Dabei bindet Nutzhanf auf einer Fläche von einem Hektar rund 13,4 Tonnen CO₂ und ist damit ähnlich effektiv wie tropischer Regenwald.

Die Zukunft von Hanf in Deutschland

Aufgrund des in Deutschland und vielen anderen europäischen Ländern über Jahrzehnte herrschenden

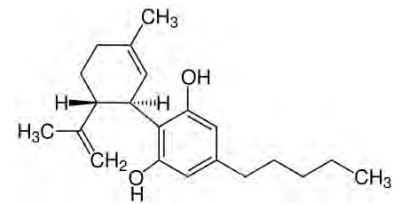


ABB. 4 Strukturformel Cannabidiol (CBD). ABB. gemeinfrei unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Cannabidiol>

Anbauverbots wurde das volle Potenzial der Hanfpflanze kaum genutzt und erforscht. Die Zulassung des landwirtschaftlichen Anbaus von Industriedhanf 1996 in Deutschland rehabilitierte die Hanfpflanze, nachdem sie fast vollständig Mitte des 20. Jahrhunderts von der Bildfläche verschwunden war. Seit 2013 steigt die Anbaufläche in Deutschland kontinuierlich an und erreichte im Jahr 2021 6.444 ha. Im Vergleich zum Vorjahr entspricht dies einem Zuwachs um weitere 172 Betriebe und 1.082 ha. Dies ist unter anderem auf den „Superfood-Trend“ in der Nahrungsmittelindustrie zurückzuführen, bei dem in den letzten Jahren eine gesteigerte Nachfrage nach Produkten aus Hanföl und Hanfsamen auszumachen ist. Weiter spiegelt es das wiedererwachte Interesse am Nutzhanf anbau, gerade unter schwierigen Standortbedingungen, wider. Von Seiten der Landwirte steigt das Interesse nach robusten wirtschaftlichen Alternativkulturen, die auch auf Böden mit geringer Fruchtbarkeit angebaut werden können und ein hohes Potenzial für eine regionale Wertschöpfung durch lokale Verarbeitung bieten. Der Nutzhanf anbau erlebt, nicht zuletzt durch die breitgefächerten Nutzungsmöglichkeiten, eine Renaissance und eröffnet für landwirtschaftliche Betriebe neue Perspektiven.

Experten sagen, dass trotz des vielseitigen Nutzungspotenzials der Hanfanbau die Landwirte vor große Herausforderungen stellt. Gesetzliche Restriktionen, fehlende



ABB. 3 Anbau von Nutzhanf im Versuchsfeld der Universität Hohenheim. Foto: L. Burgel.

Sortenverfügbarkeit und -empfehlungen sowie eine fehlende industrielle Infrastruktur für die Verarbeitung gestalten den regionalen Hanfanbau als schwierig. Die Erschließung neuer innovativer Verwertungsrichtungen durch Mehrfach- und Kaskadennutzung sowie eine gezielte Förderung von Materialien aus nachhaltigen Rohstoffquellen kann den regionalen Hanfanbau in der Agrar- und Industriewirtschaft marktfähiger positionieren.

Im Detail bedeutet dies, dass der Anbau von Nutzhanf als förderungswürdige Alternative im Hinblick auf Biodiversität, Ressourcenschonung und Umweltverträglichkeit im Ackerbau anerkannt, die Züchtung von Nutzhanfsorten in Deutschland vereinfacht und eine Reform des nationalen Betäubungsmittelstrafrechts (BtMG) sowie eine Vereinheitlichung der Regeln auf europäischer Ebene angestrebt werden müssen. Dadurch kann eine Intensivierung der Hanfverwen-

nung speziell in Nutzungskaskaden und eine effiziente Erzeugung und Bereitstellung von regionaler Biomasse unter den Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit, des Arten- und Klimaschutzes erreicht werden, woraus langfristig neue Anforderungen, Bedürfnisse und Märkte im Hanfsektor entstehen. Dabei zielt ein Ausbau des Hanfsektors durch vielfältige Wertschöpfungsketten auf ein langfristiges Wachstum und die Schaffung qualifizierter Arbeitsplätze insbesondere in ländlichen Regionen ab. Dabei ist der Industriehanf nachwachsender Rohstoff und Lebensmittel in einem, und es entsteht durch eine Ausdehnung des regionalen Hanfanbaus kein Teller-Tank-Konflikt.

Literatur

- [1] S. Amaducci et al. (2015). Key cultivation techniques for hemp in Europe and China. *Ind. Crops Prod.*, 68, 2–16, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.06.041>
- [2] R. E. Schultes (1973). Man and marihuana. *Natural History*, 82(7), 59.
- [3] Nova-Institut. 2016. Wachsende Märkte für Hanflebensmittel und Pharmazeutika-Milliarden-Umsätze in Europa möglich. Pressemitteilung vom 25. April 2016, Kontaktperson: M. Carus.
- [4] J. C. Callaway (2004). Hempseed as a nutritional resource: An overview. *Euphytica*, 140, 65–72.
- [5] Q. Wang, Y. L. Xiong (2019). Processing, nutrition, and functionality of hempseed protein: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(4), 936–952.
- [6] O. Devinsky et al. (2014). Cannabidiol: pharmacology and potential therapeutic role in epilepsy and other neuropsychiatric disorders. *Epilepsia*, 55(6), 791–802.
- [7] N. R. Flicker et al. (2020). The bee community of *Cannabis sativa* and corresponding effects of landscape composition environmental entomology, 49(1), 197–202, <https://doi.org/10.1093/ee/nvz141>

*Dr. Lisa Burgel,
Dr. Forough Khajebai und
apl. Prof. Dr. Simone Graeff-
Hönniger, Universität Hohenheim,
AG Anbausysteme und Modellierung*

VORTRAGSREIHE: 250 JAHRE BÄRTIERCHEN

Alles begann mit Johann August Ephraim Goeze, einem evangelischen Pfarrer in Quedlinburg. In seinen Ruhestunden erfrischte er sich mit der mikroskopischen Untersuchung des grenzenlosen Reichtums der Natur, die er im Wasser fand. Dabei entdeckte und beschrieb er erstmals ein kleines Tier, das einem kleinen Bären ähnlich sah. Deshalb gab er diesen Tieren 1773 den Namen „kleiner Wasserbär“.

2023 feiern wir den 250. Jahrestag der Entdeckung dieser faszinierenden Tiere. Passend dazu hat der Stuttgarter Bärtierchenforscher Ralph O. Schill mit Kolleg/-innen eine Bärtierchen-Online-Vortragsreihe ins Leben gerufen. Zwölf führende internationale Wissenschaftler/-innen aus Dänemark, Deutschland, Italien, Japan, Polen, Schweden und den USA werden uns einen Einblick in das spannende Leben der Bärtierchen geben. In jedem Monat des Jubiläumjahres 2023 bewegen wir uns zwischen dem 18. Jahrhundert und der Gegenwart – von der ersten Skizze, die Johann August Ephraim Goeze 1773 zeichnete, bis hin zu den modernsten Forschungsmethoden in der Bärtierchenforschung.

An der Vortragsreihe kann jeder teilnehmen – egal, ob als Schüler/-in, Student/-in oder Wissenschaftler/-n oder einfach nur aus Interesse. Weitere Informationen gibt es unter www.tardigrade-online.org oder info@tardigrade-online.org.



Foto: Ralph O. Schill



MANAGEMENT-FALLSTRICKE, TEIL 15

Der Decoy-Effekt – oder wie Sie ein Schnäppchen erwerben, das gar keines ist.

Fehlentscheidungen sind menschlich. Wir aber lassen in unserer Serie „Management-Fallstricke“ Tiere zu Wort kommen. In Form von Fabeln vermittelt unsere Autorin Andrea Hauk in anschaulicher Weise typische Denkfehler, die auf allen Managementebenen zu Hause sind. Vielleicht sind Sie ja selbst auch schon einmal in die eine oder andere Falle getappt?

Wie jeden Frühling trafen sich der bunte Gockel Gustav und Hoppler Hans, der Präsident der Hasenverbände, um die Preise und Lieferbedingungen für das kommende Osterfest auszuhandeln. Für Hoppler Hans war die Verhandlung nie eine große Sache, denn seit Generationen färbten die Hasen die Eier selbst, da dies einfach billiger war. So bestellte er meist weiße Eier sowie genügend bunte Farbe, und seine Hasen und Häsinnen im Stall erledigten in mühevoller Kleinarbeit den Rest. Gockel Gustav hingegen ärgerte die Sparmentalität der Hasen sehr, denn sie hinderte ihn daran, sein großes Eierbusiness endlich auf ein neues Level zu heben.

Üblicherweise hatte Gockel Gustav zwei Angebote: Angebot 1 – eine Ladung weißer Eier im Korb für 6 Taler und Angebot 2 – die glei-

che Menge bereits fix und fertig gefärbter Eier im Geschenkset für 12 Taler. Hoppler Hans entschied sich bisher jedes Jahr für Angebot 1. Logisch. Es war auch eindeutig das bessere Angebot. Wie Hoppler Hans taten es die meisten anderen Kunden. 70 Prozent aller Kunden kauften die weißen Eier im Korb für 6 Taler, und nur 30 Prozent entschieden sich für das teure Angebot der bereits gefärbten Eier für 12 Taler.

Die Investition seines Färbeautomats mitsamt der gekauften Farbe beurteilte Gockel Gustav bisher als Reinfall. Dieses Jahr sollte aber alles anders werden. Gockel Gustav hatte extra für das jährliche Treffen eine ansprechende Hochglanzbroschüre vorbereitet, die er mit Hoppler Hans durchgehen wollte. Die Überzeugung von Hoppler Hans war für ihn außerordentlich wichtig, denn wenn der Präsident der Hasenverbände ihn nicht nur als reinen Eierlieferanten sah, sondern als wertvollen Partner einer Rundumlösung, liebäugelten sicher die Verhandlungspartner der anderen Hasenverbände auch damit, die fertig bemalten Eier bei ihm zu bestellen.

In diesem Jahr unterbreitete Gockel Gustav daher Hans und allen Hasenverbänden drei anstatt zwei Angebote. Die ersten beiden Angebote waren identisch zu denen, die er immer im Programm hatte. Hinzu fügte er ein weiteres Angebot 3: Eier im Korb plus drei Dekorfarben nach Wahl für 12 Taler. Sorgfältig schrieb er die 3 Angebote auf die große Tafel vor seinem Hühnerstall.

(1) Weiße Eier – 6 Taler
 (2) Gefärbte bunte Eier – 12 Taler
 (3) Weiße Eier & drei Dekorfarben nach Wahl – 12 Taler
 Hoppler Hans überflog die Auflistung. Dann hielt er inne und las sich die drei Angebote nochmals genau durch. Nach einer Weile schüttelte er erstaunt den Kopf und ordnete seine Schnurrhaare. „Die Aufbringung der Farbe machen wir kostenlos“, fügte Gockel Gustav hinzu. „Ja, das sehe ich gerade“, wunderte sich Hase Hans und rechnete heimlich nach. Er konnte drehen und wenden, wie er es wollte. Angebot 2 schien einfach das beste Angebot zu sein. Da er ein schlauer Verhandlungspartner war, war ihm natürlich sofort klar, dass der Hahn mit Angebot 3 mächtig in die eigene Tasche wirtschaften würde. Auf diese Nummer fiel er natürlich nicht hinein. Es lag daher auf der Hand, Angebot 2 anzunehmen. Leise grunzte er in sich hinein. Dass der Hahn aber auch so dumm sein würde. Jetzt bekämen die Hasen gefärbte Eier und mussten nicht einmal einen Handstrich dazu tun. Er klopfte vor Freude mit den Vorderpfoten auf den Boden und besiegelte damit den Vertrag.

Wie Hoppler Hans entschieden sich noch mehrere Kunden. Das zusätzliche Angebot Nummer 3 kauften NULL Prozent aller Kunden. Dafür kauften jedoch 85 Prozent der Kunden Angebot 2, die bereits fertig gefärbten Eier für 12 Taler. Gockel Gustav bekam sein Grinsen nicht mehr aus dem Gesicht, als er nach Abschluss aller Verträge seinen Hühnerstall aufschloss. „Mädels“, sagte er erfreut, „ab heute beginnt eine neue Ära!“. Er lief zum Färbeautomat und schaltete ihn an. Applaudierendes Gegacker und Flügelschlagen begleitete seine Schritte.

Und die Moral von der Geschichte: Ein Schnäppchen nicht immer ein gutes Angebot ist.

Ihre Andrea Hauk,
 andreahauk@gmx.de

FAKTENBOX

Als Manager treffen Sie viele Entscheidungen, auch Kaufentscheidungen. Angenommen, Sie verhandeln gerade mit einem wichtigen Entwicklungspartner. Vielleicht wollen Sie einen Teil Ihres Produktes von ihm entwickeln lassen und brauchen hier ein Angebot. Ihr Unterbewusstsein spielt bei diesen Entscheidungen eine sehr große Rolle. Als guter Entscheider vergleichen Sie natürlich die verschiedenen Optionen, um anschließend das Beste auszuwählen. Sind Sie aber sicher, dass Sie dabei nicht auf den Decoy-Effekt hereingefallen sind? Das englische Wort decoy bedeutet so viel wie „Köder“ oder auch „Lockvogel“. Der Verkäufer fügt hier ein sogenanntes Köderprodukt zu, welches dem eigentlichen Produkt in allen Belangen unterlegen ist, oder viel zu teuer scheint. Natürlich entscheiden Sie sich nicht dafür! Das eigentliche Produkt scheint nun wie ein Schnäppchen. Klar, dass wir uns mit Vorliebe immer für das Schnäppchen entscheiden – auch wenn es nüchtern betrachtet eigentlich gar keines ist.

RÜCKBLICK

- 3/22 Chemische Diversität bei Pflanzen – wozu?
- 3/22 Fleisch(r)evolution
- 3/22 Hornmilben – die unscheinbare Vielfalt aus dem Boden
- 3/22 Lebensbedrohliche Pilzinfektionen
- 3/22 Nichtgenetische Vererbung
- 3/22 Per Vogel, Wind und Seilschaft
-
- 4/22 Luangwa – das Tal des Leoparden
- 4/22 Alles Bastarde
- 4/22 Wenn das Mikrobiom den Nerven trifft
- 4/22 Funktionale Konvergenz des Oxylin-Signalling
- 4/22 Der Bärensee in Siebenbürgen
- 4/22 Invasive Neophyten in Deutschland

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen und dgl. in dieser Zeitschrift berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Namen ohne weiteres von jedermann benutzt werden dürfen. Vielmehr handelt es sich häufig um gesetzlich geschützte eingetragene Warenzeichen, auch wenn sie nicht eigens als solche gekennzeichnet sind. – **Alle Rechte vorbehalten**, insbesondere die der Übersetzung in fremde Sprachen. Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Nur für den persönlichen und sonstigen eigenen Gebrauch sowie für nicht kommerzielle Zwecke dürfen von einzelnen Beiträgen oder Teilen von ihnen einzelne Vervielfältigungsstücke hergestellt werden. Der Inhalt dieses Heftes wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber, Redaktion und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

BiuZ 2/2023 erscheint im Mai 2023

Biologie in unserer Zeit
finden Sie im Internet unter
www.biuZ.de

Hat Ihnen dieses Heft gefallen, aber Sie sind noch kein VBIO-Mitglied?

Die BiuZ gibt es exklusiv für VBIO-Mitglieder.
Einfach beitreten unter www.vbio.de/beitritt
und viermal im Jahr die Lektüre genießen!



IM NÄCHSTEN HEFT

Chloroplasten-„Diebstahl“ bei Meeresnacktschnecken

In der Photosymbiose bilden heterotrophe Organismen mit phototrophen Organismen eine Gemeinschaft. Eine ganz eigene Art der Photosymbiose, die die Grenze zwischen Tieren und Pflanzen verwischen lässt, haben die Meeresnacktschnecken – die *Sacoglossa* – evolviert: die funktionale Kleptoplastie.



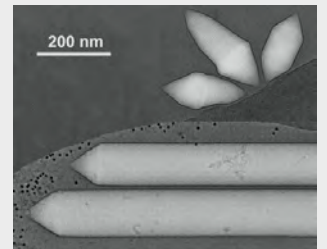
Ökosystemfunktionen im Südpolarmeer

Die Lebewesen am Meeresboden spielen eine wichtige Rolle für die Stoffkreisläufe in den Ozeanen. In der Antarktis sind ihre Aktivitäten nicht nur von der Nahrungsmenge abhängig, die von der Oberfläche zu ihnen ins Dunkel hinabsinkt. Auch die Ausdehnung des Meereises beeinflusst die Zusammensetzung der Gemeinschaften im Sediment und damit ihre Funktionen für das Ökosystem.



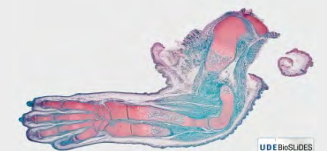
Gasvesikel in der Biomedizin

Gasvesikel werden von einigen Mikroorganismen als Schwebhilfe genutzt. Da sie stabil sind und Ultraschall streuen, werden sie inzwischen als neuartiges Kontrastmittel in der Biomedizin eingesetzt. Dekoriert mit zusätzlichen Peptiden auf der Oberfläche eignen sie sich außerdem zur Herstellung von Vakzinen.



Virtuelle Lichtmikroskopie in der Lehre

Die lichtmikroskopische Untersuchung von Organismen und ihren Gewebetypen gehört zu den Basiselementen der schulischen und universitären Ausbildung in den Lebenswissenschaften. Mit UDE BioSLiDES stellen wir ein System für die realitätsnahe Nachbildung solcher Untersuchungen in Form virtueller digitaler Mikroskopie vor.



Draußenschule in Deutschland

Unter dem Begriff Draußenlernen formiert sich derzeit eine Graswurzelbewegung in Deutschland, die den Horizont der Schule sprichwörtlich erweitern möchte. Dabei reicht das Spektrum der Umsetzung von weitgehend freien Aktivitäten in der Natur bis hin zu bildungsplanorientierten und fachzentrierten Aktivitäten.



ONLINE



KARRIERE-EVENT

FÜR NATURWISSENSCHAFTLER

23. FEBRUAR 2023

15. JUNI 2023

14. SEPTEMBER 2023

07. DEZEMBER 2023



Live-Vorträge ■ Workshops
Karriereberatung ■ Top-Arbeitgeber im Videocall

Kostenfrei anmelden!

www.jobvector.de/karrieremesse

