

4 | 2024

VBio

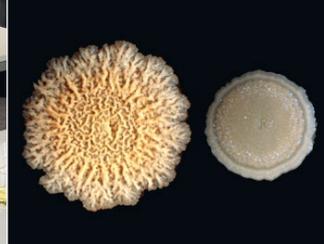
Verband | Biologie, Biowissenschaften
& Biomedizin in Deutschland



ZOOLOGIE
Fortpflanzung
an Land



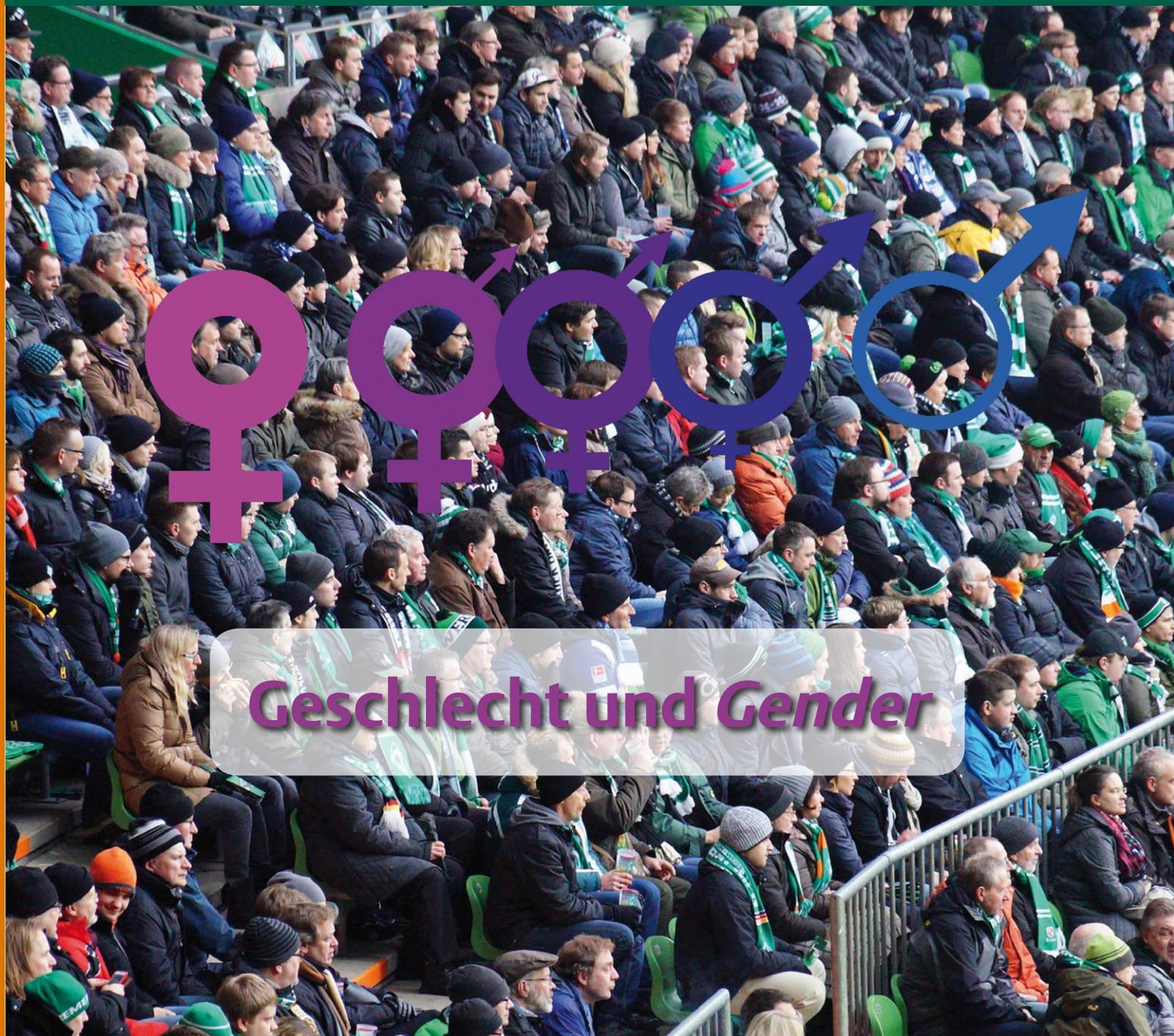
SCHULE
Experimente
im Abitur



MIKROBIOLOGIE
Das Modellsystem
Bacillus subtilis

BIOLOGIE

IN UNSERER ZEIT



Geschlecht und Gender

Biologie und Künstliche Intelligenz als natürliche Partner

Kein Tag vergeht ohne Berichte, Kommentare und Beiträge zu den Chancen und Risiken der Anwendung künstlicher Intelligenz (KI) in allen Lebensbereichen. Inwieweit betrifft dies die Biologie? Die Lebenswissenschaften und diverse Ansätze generativen maschinellen Lernens sind ideale Partner, denn ihre zielgerichtete Kombination eröffnet fundamental neue Einsichten und verspricht eminenten Erkenntnisgewinn. Aber auch im engen und weiten Umfeld der Wissenschaft ändert KI die Praktiken. Diese Entwicklung ermöglicht neue Herangehensweisen beim Planen von Experimenten, Extrahieren von Methoden, Erheben von aggregierten Daten oder beim Publizieren und betrifft die gesamte Wissenschaft und Wissenswelt, aber insbesondere die Biologie.

Unter den Naturwissenschaften vertritt die Biologie eine einzigartige Breite an Komplexitätsebenen – möglicherweise nur übertroffen von der Astronomie. An dem einen Ende der Skala befassen sich die Biochemie und Biophysik nanoskopisch mit einzelnen molekularen Prozessen. Am anderen Ende beschreibt die Ökosystembiologie die großräumigen Wechselbeziehungen innerhalb der Biosphäre. Je nach Betrachtung können zahlreiche Ebenen unterschieden werden, die auf jeder höheren Ebene neue Eigenschaften aufweisen. Das Charakteristikum jeder Ebene sind die unermessliche Vielzahl und Unterschiedlichkeit der zu berücksichtigenden Wechselwirkungen von Molekülen, Zellen, Organen, Organismen, Populationen und Ökosystemen.

Molekulare Wechselwirkungen und KI in der Zellbiologie

Wenn wir eines Tages alle relevanten molekularen Interaktionen in einer Zelle und den subzellulären Kompartimenten vorhersagen und modellieren können, dann hätten wir die Zellbiologie tief durchdrungen, ja möglicherweise verstanden. Betrachten wir eine typische kleine eukaryotische Zelle der Dimension von $10 \times 4 \times 5 \mu\text{m}^3$. Diese Zelle mag 600 Mio. Polypeptidmoleküle, 2 Mio. Nukleinsäuremoleküle (deren Größe von Zigmillionen zu einigen wenigen Nukleotiden reicht), 30 Mrd. Metabolite und Ionen sowie 5 Billionen Wassermoleküle enthalten. Die Zahl der unterschiedlichen Polypeptide nimmt stark zu, wenn alternative Spleißvarianten und posttranslationale Modifikationen berücksichtigt werden. Insoweit werden Analysen möglicher molekularer Interaktionen und kausaler Zusammenhänge bislang meist extrem reduktionistisch angelegt.

Die Durchdringung dieser Wechselwirkungen verlangt nach neuen Ansätzen und wird durch maschinelles Lernen wesentlich profitieren. Mit der Proteinmodellierung durch AlphaFold [1] hat es einen ersten Quantensprung an überzeugenden Strukturvorhersagen für Proteine durch KI gegeben, die nun um die Komponente der wechselseitigen Bindung – beispielsweise eines Wirkstoffes an ein Zielprotein – erweitert wurde [2]. Insoweit überrascht es nicht, dass diese Fortschritte als beeindruckendes Beispiel erfolgreicher KI-Anwendung in der Biologie herangezogen werden. Die Weiterentwicklung solcher KI-Anwendungen in Kombination mit zellulä-



Prof. Dr. Karl-Josef Dietz von der Universität Bielefeld ist seit 2020 Präsident des VBIO.

ren Modellen wird uns Schritt für Schritt zu einem umfassenderen Verständnis der Zellbiologie führen.

Wie weit sind wir wirklich?

Eine Recherche in der Datenbank *Web of Science* mit den Suchbegriffen *Artificial Intelligence* und *Bio** findet mehr als 20.000 Publikationen, von denen sich viele mit medizinischer Diagnostik befassen, aber auch mit Biodiversität, Mikroskopie, Tieren, Verhaltensbiologie oder zellulärer Signalverarbeitung. Allerdings stellen viele der Artikel Meinungsbilder und Prognosen vor und nur ein kleinerer Anteil erfolgreiche KI-Projekte.

Erfolgreiche Anwendungen der KI in der Biologie betreffen vor allem die Objekt- und Mustererkennung und die Verarbeitung von „Big Data“ und sind letztendlich konsequente Weiterentwicklungen der Bioinformatik mit zusätzlichen (automatisierten) Rückkopplungsmechanismen, die zur Weiterentwicklung der Programme führen. Trainierte Objekterkennung in mikroskopischen oder makroskopischen Bildern, Erkennen von Verhaltensregeln anhand von beispielsweise satellitengestütztem Individuen-Tracking im Freiland, Modellierung molekularer oder individueller Prozesse sind Anwendungsfelder, deren Vielfältigkeit beindruckend ist.

Interaktion von Organismen als Feld für KI-Forschung

Ein weiteres Beispiel für zukünftige KI-Anwendungen sind die diversen organismischen Wechselwirkungen in der Natur, sei es in der Rhizosphäre oder der Darmflora. Ein Anteil von 15 Prozent der Weltbiomasse wird den Bakterien zugeschrieben, zwei Prozent den Pilzen, ein Prozent den Protozoen und nur 0,3 Prozent den Tieren [3]. Den Rest stellen die Pflanzen. In einem Gramm Bodenprobe befinden sich vielfach mehr als 50.000 Arten. Die Identifizierung der Spezies und Abschätzungen ihrer Menge gelingen zunehmend besser mit metagenomischen Ansätzen, die die Gesamtheit der Erbinformation in einem Lebensraum erfassen. Nächstes Ziel wird sein, die positiven, negativen und neutralen Wechselbeziehungen zwischen den Organismen zu beschreiben.

Wie im Beispiel der molekularen Wechselwirkungen untersuchen wir derzeit stark vereinfachte Systeme. Ein umfassenderes Verständnis der vielfältigen Interaktionen zwischen den Arten im Boden inklusive der Pflanzenwurzeln werden KI-Ansätze eröffnen. Diese Erkenntnisse werden die Entwicklung von Strategien unterstützen, um etwa die Pflanzengesundheit in der Landwirtschaft zu erhöhen. KI-basierte Ansätze werden uns in die Lage versetzen, die eingangs dargestellten Komplexitätsebenen besser miteinander zu verknüpfen – beispielsweise die molekularen Zellmodelle mit den organismischen Interaktionen.

Prognose zur KI im wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn

Ein Editorial erlaubt es, Meinungen zu formulieren und den Anstoß zur Diskussion zu geben. Abbildung 1 zeigt den Ablauf eines For-

schungsvorhabens von der anfänglichen Bestandsaufnahme bis hin zur Veröffentlichung neuer Erkenntnisse. Die sechs Kästchen rechts neben den Arbeitsschritten zeigen meine Einschätzung zu der Frage, welchen Stellenwert KI-basierte Verfahren kurzfristig (rot) und mittelfristig (grün) einnehmen könnten. Graue Kästchen geben an, dass meines Erachtens KI qualitativ und quantitativ auf absehbare Zeit keine Rolle in der Spitzenforschung spielen wird. Bereits beim Entstehen dieses Editorials diskutierten Kolleg/-innen und ich über die naheliegendste Verteilung der roten, grünen und grauen Kästchen – diskutieren Sie doch bitte mit (→ karl.josef.dietz@uni-bielefeld.de).

Kurz- und mittelfristiger Einsatz von KI-basierten Methoden

Trainierbare KI-basierte Programme zur Bildanalyse und Mustererkennung werden, wie oben ausgeführt, kurzfristig zum allgemein genutzten Mittel der Wahl der Biowissenschaften. Die Bestandsaufnahme des Wissens in der anfänglichen und begleitenden Recherche, die Methodenwahl für die durchzuführenden Experimente, der Vergleich mit verfügbaren (großen) Datensätzen und die Abfassung der Veröffentlichungstexte werden ebenfalls kurzfristig von KI profitieren. Bereits heute extrahieren Datenbanken experimentelle Methoden aus Publikationen und stellen diesen Fundus teils gegen Entgelt zur Verfügung. Die Autor/-innen werden um Prüfung gebeten, was entweder zeigt, dass publizierte Methoden leider häufig unvollständig oder die extrahierten Methodenbeschreibungen fehlerhaft sein können. Pubcompare.ai wirbt mit mehr als 40 Millionen experimentellen Protokollen [4]. Verlage entwickeln Verfahren, um die Nutzung großer Sprachprogramme (*Large Language Models*, LLM wie ChatGPT4) in eingereichten Publikationen nachzuweisen. Die Verlage sind zuversichtlich, dies zu erreichen, wobei sich die Frage stellt, ob verbesserte KI-basierte Programme nicht der Aufdeckung durch die aktuellen Analyseprogrammen entkommen.

In wesentlichen Prozessen der Wissenschaft (Abbildung 1) kann mittelfristig eine zunehmende Bedeutung von KI-Ansätzen prognostiziert werden. Die grünen Kästchen beschreiben diese Perspektive. Es wird in den kommenden 5–10 Jahren spannend werden, die tatsächliche Entwicklung zu beobachten.

Aber wie sieht es mit dem zentralen Element biowissenschaftlicher Forschung, der Hypothesenbildung, aus? Drei der sechs Kästchen habe ich grün eingefärbt. Bereits heute gibt es viele Forschungsprojekte, deren Ausgangshypothesen eher oberflächlich sind. Insofern wird KI dazu beitragen können, solche Hypothesen zu verfeinern. Weniger wahrscheinlich ist dies bei innovativen und originellen Hypothesen.

Regeln für KI-basierte Ansätze

Ein Charakteristikum generativen maschinellen Lernens ist ein breiter Lösungsraum, so dass bei wiederholter Eingabe derselben Daten

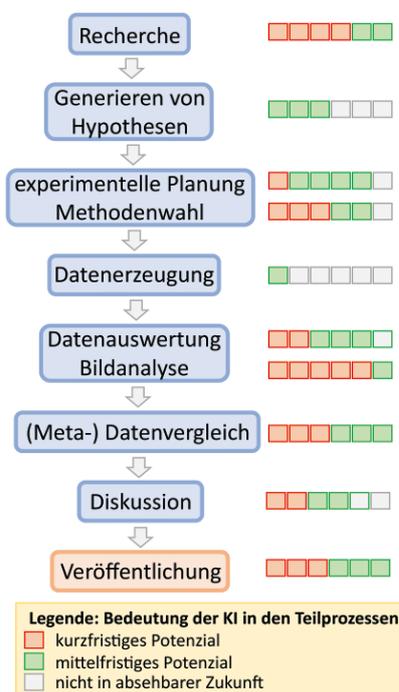


Abb. 1 Mögliche Bedeutung von KI in den einzelnen Schritten des wissenschaftlichen Erkenntnisprozesses

in das Programm unterschiedliche Ergebnisse erzielt werden. Der sorgfältige Umgang mit dieser Variabilität wird neue Regeln guten wissenschaftlichen Arbeitens verlangen. Der Generalsekretär der Vereinten Nationen António Guterres fasste dies beim *AI for Good Global Summit* am 6. Juli 2023 [5] mit drei prinzipiellen Forderungen zusammen: Einhaltung der Menschenrechte, volle Transparenz und Rechenschaftspflicht. Dies gilt für die Anwendungen der KI in der Wissenschaft in gleicher Weise.

Interessant ist, dass KI dazu beitragen könnte, die Wissenschaft zu demokratisieren, da die Entwicklung generativer KI auf verfügbaren Datensätzen aufbauen kann und somit entkoppelt von der ressourcenintensiven Durchführung von Experimenten oder Analysen ist. Hier fügen sich *Open Data*, *Open Science* und KI zu einer vielversprechenden Perspektive zusammen. Dazu sollten möglichst bald die Curricula in der Oberstufe und in den betroffenen Studienfächern angepasst werden, um mit den Chancen, Anwendungen und Risiken von KI vertraut zu machen.

Die Risiken, die mit der Anwendung von KI in der Wissenschaft verbunden sind, sind vielfältig und reichen von ungeprüfter Datenübernahme, fehlender Offenlegung der Algorithmen, Programmstrukturen und Trainingsdaten bis hin zur Enteignung der Forschenden durch fehlende Zitierung und Marginalisierung der Einzelbefunde. Und schließlich kann es zu einer KI-Degeneration kommen, wenn KI-generierte Aussagen von KI-Programmen weiterverwendet werden und dadurch an Sinn und Bezug verlieren. Trotzdem gehören KI-Anwendungen zu dem zu begrüßenden Repertoire der Wissenschaft, denn KI wird bei aller Kritik zu einer Beschleunigung von Entwicklung in vielen Bereichen führen, die Vielfalt und die Differenziertheit neuer Erkenntnisse beträchtlich erhöhen und insbesondere zur Lösung komplexer Probleme erheblich beitragen.

Ihr

Anmerkung nach Drucklegung: Die Aktualität dieser Thematik wurde durch die Vergabe des Physik-Nobelpreises an Geoffrey Hinton und John Hopfield am 8.10.2024 für ihre KI-Grundlagenforschung sowie des Chemie-Nobelpreises an die Proteinforscher David Baker, Demis Hassabis und John Jumper am 9.10.2024 unterstrichen.

Literatur

- [1] J. M. Jumper et al. (2021). Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. *Nature* 596, 583–589.
- [2] J. Abramson et al. (2024). Accurate structure prediction of biomolecular interactions with AlphaFold 3. *Nature* 630, 493–500.
- [3] Y. M. Bar-On et al. (2018). The biomass distribution on Earth. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 115, 6506–6511.
- [4] Pubcompare.ai, <https://www.pubcompare.ai/terms-of-services/>
- [5] A. G. Hessami et al. (2024). Artificial Intelligence for the Benefit of Everyone. *Computer* 57 (9), 68–79, <https://doi.org/10.1109/MC.2024.3411797>



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)
Prof. 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:

Ralf Dahm, Mainz
Harald Engelhardt, Martinsried
Jacob Engelmann, Bielefeld
Monika Hassel, Marburg
Christian Körner, Basel
Ortrun Mittelsten Scheid, Wien
Wolfgang Nellen, Kassel (Chief Editor)
Hannes Petrischak, Wustermark
Felicitas Pfeifer, Darmstadt
Gabriele Pfitzer, Köln
Margarete Radermacher, Odenthal
Michael Riffel, Hirschberg
Udo Schumacher (†), Hamburg
Jennifer Selinski, Kiel
Marco Thines, Frankfurt
Björn von Reumont, 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, Leimen.

© VBIO e.V., München, 2024.

Printed in the Federal Republic of Germany.

ISSN 0045-205 X

BIOLOGIE

4 | 2024 IN UNSERER ZEIT
www.biuz.de



In der aktuellen politischen Diskussion um die Zweigeschlechtlichkeit des Menschen werden oft die beiden Begriffe *Geschlecht* und *Gender* nicht sauber getrennt. Dadurch kommt es zu Missverständnissen und einer Vermischung von biologischen Fakten und gesellschaftlichen und sozialen Konstrukten. Unsere beiden Autoren Wolfgang Goymann und Diethard Tautz möchten diese emotional oft sehr aufgeladene Diskussion versachlichen. Ihre spannenden Beiträge, die die Thematik aus unterschiedlichen Richtungen beleuchten, finden Sie auf den Seiten 334 und 344. Abb.: Pascal Eitner.

MELDUNGEN

306 **Forschung & Entwicklung, Standort, Preise & Auszeichnungen, Ausstellungen**

POLITIK UND GESELLSCHAFT

- 311 **Deutliche Evidenz für das Insektensterben**
312 **Bauer Willis Kraut und Rüben: Was nun in der Landwirtschaft?**
314 **VBIO-Dialogforum „Wissenschaftliche Tierversuche – notwendig oder entbehrlich?“**
316 **Zum 25. Mal Frühjahrsschule der Fachsektion Didaktik der Biologie**
317 **Endlich ein Neustart! BTA in stürmischen Zeiten**
319 **System Wald: Erfolgreiche Online-Veranstaltung**
320 **Verbandsarbeit pur: Bundesdelegiertenversammlung des VBIO**

TREFFPUNKT FORSCHUNG

- 322 **Artenschutz für Mönchsgeier auf Mallorca**
323 **Sensoren für eine eusoziale Lebensweise bei fossilen Ameisen**
325 **Die Regulation der Genaktivität durch microRNA**
327 **Bestäuber im Fokus: Das Hummel-Monitoring in Agrarlandschaften**
329 **Primaten als „Heiler“**
331 **Von Zellbiologie bis CRISPR/Cas – neues Wissen für die Schule**

MAGAZIN

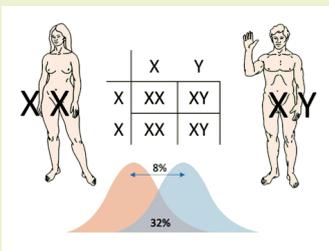
- 388 **Wissensvermittlung als Herzensanliegen: Udo Schumacher (†)**
389 **Bücher und Medien**
392 **Partner des Menschen: Der Pfeilschwanz: Mythos und Produkttester**
394 **Mikroben verstehen: Wie alt werden Mikroben?**
396 **Außerschulische Lernorte: Der Nationalpark Kellerwald-Edersee**
398 **Kolumne: Die „Ja-Sager“-Falle**

IM FOKUS

- 334 Weiblich – männlich – divers: Ist es so einfach?**
Diethard Tautz
- 344 Geschlecht und Gender: Eine biologische Perspektive**
Wolfgang Goymann, Henrik Brumm, Peter M. Kappeler
- 353 Luft taugt nicht für Spermia**
Wolfgang Böhme
- 364 Die Fortpflanzungsbiologie der Froschlurche**
Bruno Viertel
- 372 So subtil, so potent, so omnipräsent**
Thorsten Mascher
- 382 Experimente im Aufschwung**
Mathias Trauschke, Stefan Zantop

SCHWERPUNKT: FORTPFLANZUNGSSTRATEGIEN UND DAS KONZEPT DES BIOLOGISCHEN GESCHLECHTS

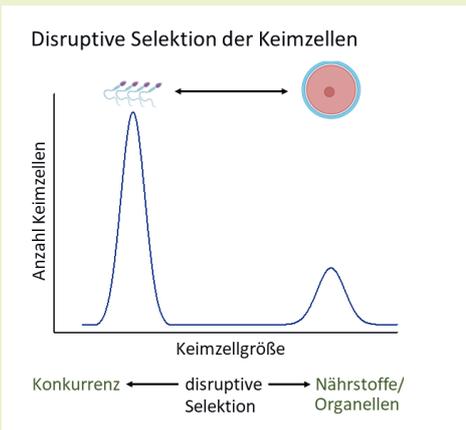
334 Weiblich – männlich – divers: Ist es so einfach?



Die evolutionsbiologische Funktion von sexueller Vermehrung ist die Erzeugung genetisch unterschiedlicher Individuen. Dadurch entsteht ein Spektrum an Phänotypen und Verhaltensweisen der Geschlechter, das man nicht kategorisieren sollte. Stellt man bei der Diskussion die Variabilität in den Mittelpunkt, lassen sich biologische und soziologische Standpunkte in Einklang bringen.

344 Geschlecht und Gender: Eine biologische Perspektive

In den letzten Jahren ist das Thema Zweigeschlechtlichkeit von Tieren zu einem Politikum geworden, was bei vielen Lehrenden zu wachsender Verunsicherung führt. Unser Beitrag möchte durch die Darstellung gesicherter Fakten zu einer Versachlichung der Debatte beitragen.



353 Luft taugt nicht für Spermia



Da sich Luft im Gegensatz zu Wasser nicht als Trägermedium für Spermia eignet, musste der Landgang der Tiere

neue Fortpflanzungsstrategien hervorbringen. So kehren die Amphibien – als Pioniere des Landgangs in der Wirbeltierevolution – für die Reproduktion meist ins Wasser zurück. Erst die Reptilien schafften es, sich auch fortpflanzungstechnisch ganz vom Wasser zu lösen.

364 Die Fortpflanzungsbiologie der Froschlurche



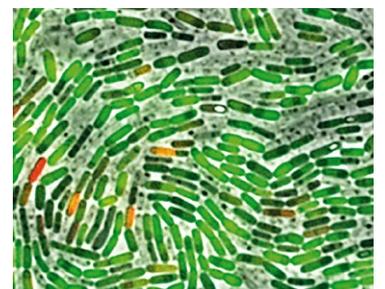
Ursprünglich entwickelten sich die Froschlurche in stehenden Gewässern. Dies birgt jedoch die Gefahr der Austrocknung und Prädation. Einige Arten haben deshalb unter dem Druck der Vermeidung von Verlusten ihrer Nachkommen verblüffend diverse fortpflanzungsbiologische Anpassungen entwickelt, die unser Artikel vorstellt.



382 Experimente im Aufschwung

Der Biologieunterricht soll neben fachspezifischen Inhalten auch naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen vermitteln. Die Ergänzung der schriftlichen Abiturprüfungen um experimentelle Aufgaben trägt in Niedersachsen dazu bei, dass im Unterricht wieder stärker auf den Erwerb von Erkenntnisgewinnungskompetenzen geachtet wird.

372 So subtil, so potent, so omnipräsent



Die Mikrobe des Jahres 2023 vereint spannende biologische Eigenschaften wie Arbeitsteilung und Vielzelligkeit mit einem hohen Nutzen für den Menschen – ob zur Herstellung traditioneller fermentierter Lebensmittel, als Probiotikum für Mensch und Tier oder aber zur großtechnischen Herstellung von Vitaminen oder Waschmittelenzymen.

Microcebus berthae ist der kleinste Primat der Erde. Er ist durch menschliche Einflüsse stark gefährdet und könnte bereits ausgestorben sein. Foto: Nick Garbutt.



FORSCHUNG & ENTWICKLUNG

Welche Kriterien müssen erfüllt sein, damit eine neue Art als solche anerkannt werden kann? Um diese zentrale Frage zu beantworten, fügte ein Konsortium aus 36 europäischen, nordamerikanischen und madagassischen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern Forschungsdaten zusammen, die sie in den vergangenen fünf Jahrzehnten zu Mausmakis der Gattung *Microcebus* erhoben hatten. Die Forschenden nutzten für ihre Datensammlung die Forschungsergebnisse von mehr als 20 Institutionen – unter anderem des Instituts für Zoologie der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover (TiHo). Sie kombinierten genomische und morphologische Daten mit Erkenntnissen zur akustischen Kommunikation, der Fortpflanzungsaktivität und des geografischen Vorkommens von Mausmakis, um ein neues Methodenspektrum zu erhalten, mit dem sie Artgrenzen gerade auch für äußerlich unscheinbare, sogenannte kryptische Arten, systematisch bewerten können.

Mausmakis sind nachtaktiv und kommen nur auf Madagaskar vor. Die Insel ist für ihre reiche biologische Vielfalt und die zahlreichen Tier- und Pflanzenarten bekannt, die nur dort vorkommen (Endemismus). Aufgrund der biologischen Besonderheit ist Madagaskar ein geeignetes Modell, um zu erforschen, wie neue Arten entstehen. Einige Mausmaki-Arten wurden aufgrund geringer DNA-Unterschiede zwischen wenigen beprobten Tieren einer Population als neue Spezies eingeordnet. Wann die Unterschiede zwischen Populationen ausreichen, um sie als unterschiedliche Arten einzuordnen, ist in der Wissenschaft nicht eindeutig definiert. „Anhand unserer jetzigen Analysen und des neu entwickelten Systems **haben wir gemeinsam die ursprüngliche Klassifikation revidiert** und schlagen vor, die Zahl der Maus-

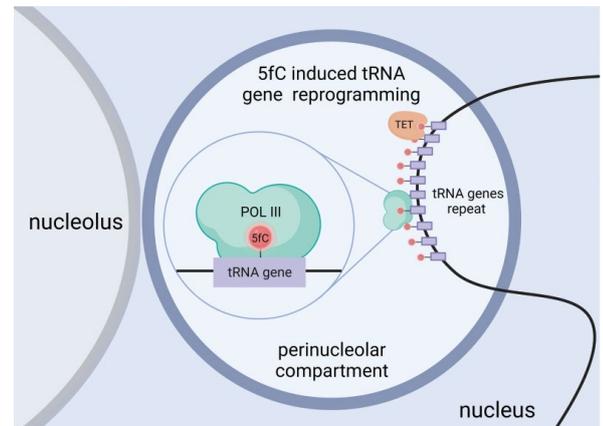
maki-Arten von 25 auf 19 zu reduzieren“, sagt Professorin Dr. Ute Radespiel von der TiHo.

www.tibo-hannover.de

Die Embryonalentwicklung hängt von Tausenden von Genen ab, die exakt zur richtigen Zeit und am richtigen Ort aktiviert werden. Kontrolliert wird dies durch sogenannte epigenetische Modifikationen. Dabei handelt es sich um funktionelle Gruppen an der DNA, die Gene an- und ausschalten können. Die Wissenschaft ist während Jahrzehnten davon ausgegangen, dass Wirbeltiere nur einen Typ epigenetischer Modifikationen an der DNA besitzen, der im Zusammenhang mit der Stilllegung von Genen steht und als Cytosin-Methylierung bezeichnet wird. Vor zehn Jahren wurden dann drei weitere Modifikationen in Wirbeltier-DNA entdeckt. Weil sie aber nur in sehr kleinen Mengen auftreten, waren sich Forschende unsicher, ob es sich um funktionale epigenetische Markierungen handelt. Ein Team um Prof. Dr. Christof Niehrs und Erstautorin Eleftheria Parasyraki vom Institut für Molekulare Biologie (IMB) in Mainz haben nun zum ersten Mal gezeigt, dass eine dieser Modifikationen, nämlich 5-Formylcytosin (5fC), **an der Aktivierung von Genen im frühen Entwicklungsstadium beteiligt ist**. Diese Entdeckung beweist, dass Wirbeltiere mehr als einen Typ epigenetischer DNA-Markierung besitzen. Die Entdeckung wirft aber auch viele Fragen darüber auf, wie 5fC genau wirkt und welche Rolle es über die frühe Genomaktivierung in einer Zygote hinaus spielt – etwa in Krebszellen, die sehr große Mengen an 5fC enthalten können.

www.uni-mainz.de

Ob wir Veranlagungen für bestimmte Krankheiten haben, hängt im hohen Maße von den unzähligen Varianten in unserem Erbgut ab. Doch insbesondere bei Erbgutvarianten, die in der Bevölkerung nur selten auftreten, ist der Einfluss auf die Ausprä-



Mit 5-Formylcytosin ist nun neben Methylcytosin eine neue epigenetische Modifikation bei Wirbeltieren hinzugekommen. Sie aktiviert die Genexpression. Abb. IMB.

gung bestimmter krankhafter Merkmale bislang nur schwer zu ermitteln. Um die Effekte seltener Varianten besser vorherzusagen, entwickelten Forschungsteams um Oliver Stegle und Brian Clarke am Deutschen Krebsforschungszentrum (DKFZ) und *European Molecular Biology Laboratory* (EMBL) in Heidelberg sowie um Julien Gagneur von der Technischen Universität München (TUM) das auf maschinellem Lernen basierende Risikobewertungs-Tool „DeepRVAT“ (*rare variant association testing*). Dieses setzt erstmals künstliche Intelligenz (KI) in genomischen Assoziationsstudien zur Entschlüsselung seltener Erbgutvarianten ein. Das Modell wurde zunächst an den Sequenzdaten (Exom-Sequenzen) von 161.000 Personen aus der *UK Biobank* trainiert. Zusätzlich speisten die Forscher Information zu genetisch beeinflussten biologischen Merkmalen der einzelnen Personen sowie zu den an den Merkmalen beteiligten Genen ein. Die zum Training verwendeten Sequenzen umfassten rund 13 Millionen Varianten. Anschließend validierten die Forscher „DeepRVAT“ an Genomdaten aus der *UK Biobank*. Für 34 getestete Merkmale wie etwa krankheitsrelevante Blutwerte fand das Testsystem 352 Assoziationen zu beteiligten Genen und **übertraf damit alle vorhandenen Modelle bei weitem**. Die mit „DeepRVAT“ erzielten

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



Das Risikobewertungs-Tool „DeepRVAT“ setzt auf den Einsatz von künstlicher Intelligenz in genomischen Assoziationsstudien zur Entschlüsselung seltener Erbgutvarianten. Abb.: DKFZ.

Ergebnisse erwiesen sich außerdem als sehr robust und besser in unabhängigen Daten replizierbar als die Resultate alternativer Ansätze. Eine wichtige weitere Einsatzmöglichkeit von „DeepRVAT“ ist die Abschätzung der genetischen Veranlagung für bestimmte Krankheiten.

„DeepRVAT“ soll in Zukunft in die Infrastruktur des Deutschen Human-genom-Phänom-Archivs (GHGA) integriert werden, um Anwendungen in der Diagnostik und Grundlagenforschung zu erleichtern.

www.dkfz.de

Männliche Fruchtfliegen ignorieren einer internationalen Studie zufolge Gefahren wie Fressfeinde, wenn sie mit Balz und Paarung beschäftigt sind. Dazu trägt der umgangssprach-

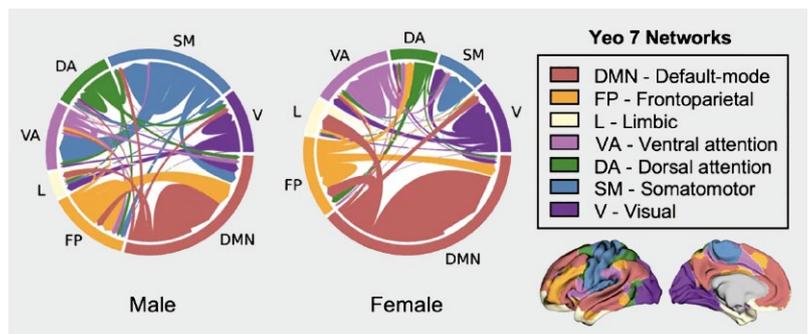


Die Taufliede *Drosophila melanogaster* bei der Paarung. Abb.: TheAlphaWolf über Wikimedia Commons.

lich als „Glückshormon“ bekannte Botenstoff Dopamin entscheidend bei. Das Forschungsteam unter der Leitung von Dr. Carolina Rezaval (Universität Birmingham) war daran interessiert, wie das Gehirn Entscheidungen trifft und dabei Chancen und Risiken gegeneinander abwägt. Dr. Laurie Cazalé-Debat, Erstautorin der Studie und Senior-Postdoc in Dr. Rezavals Team, fand in Experimenten heraus, dass die Simulation eines Fressfeindes in den frühen Phasen der Balz bestimmte visuelle Neuronen im Gehirn aktiviert, die die Fliegen dazu veranlassen, die Balz zu stoppen und zu fliehen. Doch im fortgeschrittenen Stadium der Balz, wenn die Paarung nahe ist, ignorieren die Fruchtfliegen-Männchen die simulierte Bedrohung. Zusammen mit Dr. Lisa Scheunemann von der Freien Universität Berlin, die ebenfalls als Erstautorin an der Studie beteiligt war, nutzten die Wissenschaftlerinnen In-vivo-2-Photonen-Mikroskopie, um neuronale Aktivitäten im Gehirn der Fliegen zu identifizieren. Dabei zeigte sich, dass mit fortschreitender Balz **ein Anstieg des Dopamins die sensorischen Signale für Gefahren unterdrückt** und die Reaktion der Fliege auf Bedrohungen verringert. Diese Entdeckung könnte dem Forschungsteam zufolge auf gattungsübergreifende Entscheidungsmechanismen bei Tieren und möglicherweise auch beim Menschen hindeuten, wobei Dopamin einen sensorischen Filter bildet, der es erlaubt, sich auf die drängendsten Ziele zu fokussieren.

An der Forschungsarbeit beteiligten sich auch die Teams von Prof. Dr. David Oswald vom Institut für Neurophysiologie der Charité – Universitätsmedizin Berlin und Dr. Andrew Lin von der Universität von Sheffield. www.fu-berlin.de

■ Dass Männer im Durchschnitt größere Gehirne haben als Frauen, ist in den Neurowissenschaften weithin bekannt. Wie sich das Gehirn zwischen Geschlechtern jedoch funktionell unterscheidet, ist weniger gut verstanden. Ausgehend von der Prämisse, dass die Gehirnstruktur die Funktion unterstützt, untersuchten Bianca Serio und Sofie Valk vom Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften (MPI CBS) in Leipzig und dem Forschungszentrum Jülich, ob Geschlechtsunterschiede in der funktionellen Organisation des Gehirns auf Unterschiede in der Gehirngröße, der Mikrostruktur und den Abstand der funktionellen Verbindungen entlang der kortikalen Oberfläche zurückzuführen sind. Ihre Ergebnisse legen nahe, dass die Geschlechtsunterschiede in der funktionellen Organisation des Gehirns eher kleine Unterschiede in den Netzwerken und den Verbindungen dazwischen widerspiegeln. In einer zweiten Studie konnte Svenja Küchenhoff aus dem Team von Sofie Valk zeigen, inwieweit Sexualhormone Einfluss auf die Struktur des Gehirns nehmen. Die Forscherinnen haben für ihre Analyse Datensätze des *Human Connectome Project* genutzt, welches öffentlich zugäng-



Bianca Serio hat die Geschlechtsunterschiede in den Verbindungen innerhalb und zwischen funktionellen Netzwerken des Gehirns untersucht. Abb.: MPI CBS.

lich die Gehirndaten von 1000 Studienteilnehmer/-innen enthält. Die Forscherinnen betonen, dass auch das biologische Geschlecht nicht binär ist: **Die Interaktion aus Chromosomen, Hormonen und Geschlechtsorganen ergibt ein Geschlechtskontinuum.** Aus ihrer Sicht ist mehr Forschung erforderlich, um die Ursache von beobachtbaren Geschlechtsunterschieden im Gehirn sowie seine Bedeutung für Unterschiede in der Gesundheit und in der Kognition zu untersuchen.
www.cbs.mpg.de

Die Endosymbiose ist ein faszinierendes biologisches Phänomen, bei dem ein Organismus in einem anderen Organismus lebt. Allerdings ist nach wie vor schlecht verstanden, wie sie sich überhaupt bildet. Um den Anfang dieser speziellen Beziehung von zwei Organismen zu studieren, hat ein Team von Forschenden um Julia Vorholt, Professorin für Mikrobiologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich, eine solche Lebensgemeinschaft im Labor initiiert. Dafür injizierte Gabriel Giger, Doktorand in Vorholts Labor, *E. coli*-Bakterien und Bakterien der Gattung *Mycetohabitas* in Zellen des Pilzes *Rhizopus microsporus*. Letztere sind natürlicherweise Endosymbionten eines anderen *Rhizopus*-Pilzes. Der für das Experiment verwendete Stamm geht allerdings in der Natur keine Endosymbiose ein. Nach der Injektion der *E. coli*-Bakterien wuchsen sowohl der Pilz als auch die Bakterien weiter, letztere schließlich so schnell, dass der Pilz eine Immunreaktion gegen die Bakterien auslöste und die Bakterien inkapselte. So verhinderte er, dass die Bakterien an die nächste Pilzgeneration weitergeben wurden. Anders bei den injizierten *Mycetohabitas*-Bakterien: Während der Pilz Sporen bildete, schafften es einzelne der Bakterien, in diese zu gelangen **und so in die nächste Generation übertragen zu werden.** „Dass die Bakterien tatsächlich über die Sporen an die nächste Pilzgeneration weitervererbt



Mit einer äußerst feinen Spitze werden Bakterien in einen Pilz injiziert. Die Bakterien wandern in das sporenbildende Gewebe (gelb) und werden an die nächste Generation vererbt.
Bild: Sean Kilian.

werden, war ein Durchbruch unserer Forschung“, sagt Giger. Anfangs keimten die Sporen mit Bakterien langsamer, doch nach mehreren Pilzgenerationen wurden mehr lebensfähige Sporen mit Bakterien produziert. Genetische Analysen zeigten, dass sich der Pilz während dieses Experiments verändert und an seinen Untermieter angepasst hat. Die Forschenden fanden zudem heraus, dass der Gast zusammen mit seinem Wirt biologisch aktive Moleküle produzierte, die den Wirt bei der Beschaffung von Nährstoffen und bei der Abwehr von Fressfeinden wie Fadenwürmern oder Amöben unterstützen könnten. „Aus dem anfänglichen Nachteil kann so ein Vorteil werden“, betont Vorholt.
<https://etbz.ch>

STANDORT

Die Technische Universität München (TUM) und der Landkreis Miesbach

richten das Schülerforschungszentrum Oberland ein. Mit Kursen für Schulklassen will das Zentrum Kinder und Jugendliche für die Wissenschaft begeistern. Bei Forschungsparcours und *Summer Schools* können Interessierte dann tief in Forschung eintauchen. Mehr noch: Für eigene Projekte können Schülerinnen und Schüler regelmäßig das Zentrum besuchen, Gleichgesinnte treffen und Kontakte zu Forschungseinrichtungen und Unternehmen knüpfen. Die Lehrkräfte der Region profitieren von Fortbildungen, beispielsweise zu forschendem Lernen und digitalen Methoden. Das Zentrum wird mit besonderer Ausstattung Möglichkeiten bieten, die über den Schulunterricht hinausgehen. Ein besonderes Augenmerk wird auf der Verknüpfung von Naturwissenschaften und digitalen Technologien liegen, die für Wissenschaft und Industrie immer wichtiger wird, beispielsweise bei Methoden maschinellen Lernens für Fragen der Biotechnologie.



TUM-Präsident Prof. Thomas F. Hofmann (vorn links) und Landrat Olaf von Löwis unterzeichnen den Kooperationsvertrag mit Landtagspräsidentin Ilse Aigner (3. v. l.), TUM-Kanzler Albert Berger (2. v. l.), Prof. Claudia Nerdel (3. v. r.) und Vertretern der Region. Foto: TUM.

PREISE & AUSZEICHNUNGEN

Für ihre bahnbrechenden Forschungen, die das Verständnis des Gehirns revolutioniert haben, wurde Prof. Dr. Erin Schuman der mit einer Million Euro dotierte Körber-Preis für die Europäische Wissenschaft verliehen. Die 1963 geborene Erin Schuman ist seit 2009 Direktorin am Max-Planck-Institut für Hirnforschung in Frankfurt am Main. Seit 2015 ist sie zudem Professorin an der Frankfurter Goethe-Universität und seit 2021 Gastprofessorin an der Radboud Universität in den Niederlanden. Aufgewachsen im kalifornischen San Gabriel, absolvierte sie ein Psychologiestudium an der *University of Southern California*, bevor sie an der *Princeton University* in Neurowissenschaften promovierte. Zwischen 1993 und 2010 war sie Professorin am *California Institute*

of Technology. Sie ist Mitglied der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina, der amerikanischen *National Academy of Science* und der Britischen *Royal Society*. Neben ihrer Forschung engagiert sich Schuman für eine Erhöhung des Frauenanteils in der Wissenschaft und für die Förderung der Bildungschancen von Jugendlichen. Außerdem hat sie sich gemeinsam mit ihren Kolleginnen und Kollegen intensiv dafür eingesetzt, die Geschichte ihres Instituts während des Nationalsozialismus aufzuarbeiten. Der mit einer Million Euro dotierte Körber-Preis für die Europäische Wissenschaft zählt zu den weltweit höchstdotierten Forschungspreisen.

<https://koerber-stiftung.de/>



Prof. Dr. Erin Schumann erhielt den Körber-Preis für die Europäische Wissenschaft. Foto: Marcus Gloger/ Körber-Stiftung.

Unterstützt von der Stiftung Schülerforschungszentrum Oberland und dem Kultusministerium wird das Zentrum, das im „Alten Krankenhaus“ von Miesbach eingerichtet wird, eng mit den Schulen der Region kooperieren. Die wissenschaftliche Leitung liegt bei der TUM. Nach diesem Modell arbeiten die TUM und der Landkreis Berchtesgadener Land bereits seit 2013 zusammen. Im dortigen Schülerforschungszentrum haben seitdem Tausende Kinder und Jugendliche geforscht.
www.tum.de

AUSSTELLUNGEN

Schwimmen, Laufen, Klettern, Springen oder Fliegen – Tiere bewegen sich auf vielfältige Weise. Es ist beeindruckend, was für Konstruktionen sich die Natur dafür hat einfallen lassen. Eine zentrale Funktion hat dabei das Skelett, das je nach Lebensweise ganz unterschiedlich gebaut ist und doch auf einen gemeinsamen Grundbauplan zurückgeht. Die Vielfalt von Skelettformen – von der Spitzmaus bis zum Nilpferd und vom Papageifisch bis

zur Eule – kann anhand hochklassiger Skelettpräparate bis Ende April 2025 in der **Sonderausstellung „Skelette – Choreografen der Bewegung“ im Museum Mensch und Natur** in München bestaunt werden. Die Ausstellung wird in zwei Ausstellungssälen auf über 400 m² Fläche präsentiert und umfasst neben zahlreichen Objekten aus den Beständen der Staatlichen Naturwissenschaftlichen Sammlungen Bayerns Leihgaben von mehr als 20 Institutionen im In- und Ausland. Ein großer Teil der Ausstellung ist den Knochen gewidmet. Unter anderem kann man sein eigenes Skelett erkunden, erfahren, was Knochen über das Leben eines Menschen erzählen und wie man sie trainieren und stärken kann. Darüber hinaus wird gezeigt, wie der Aufbau von Knochen als Vorbild in der Technik dient und wo Knochen als Rohstoff zum Einsatz kommt. Röntgenfilmaufnahmen der Universität Jena geben einen Eindruck davon, wie dynamisch die scheinbar so starren Skelettkonstruktionen agieren. Audiotexte in Deutsch und Englisch sowie Gebärdensprache-Videos begleiten die gezeigten Objekte.

<https://mmn-muenchen.snsb.de/>



Skelett eines Faultiers. Foto: Museum Mensch und Natur.

POLITIK UND GESELLSCHAFT

Deutliche Evidenz für das Insektensterben

In Teil 3 seiner Serie stellt „Bauer Willi“ (Willi Kremer-Schillings) einen Einfluss moderner Landwirtschaft auf das Insektensterben in Frage. Dabei gibt es hierfür eine breite wissenschaftliche Basis, die wir als Biodiversitätsforschende in den Kontext setzen wollen. Damit wollen wir zur Versachlichung einer Debatte beitragen, die zu wichtig ist, als mit Anekdoten und einseitig vorgebrachten Ergebnissen verzerrt zu werden.

Biologie in unserer Zeit hat eine vierteilige, provokative Kolumne zum Thema Landwirtschaft (siehe den vierten und letzten Teil auf S. 312) von Willi Kremer-Schillings publiziert – ein unter dem Namen „Bauer Willi“ bekannter Internet-blogger (www.bauerwilli.com). Als Biodiversitätsforschende sind wir überzeugt, dass ein kontroverser aber vorurteilsfreier Diskurs auf Augenhöhe zwischen Wissenschaft, Landwirtschaft und Gesellschaft sehr wichtig ist. Nicht zuletzt kann hierdurch das gegenseitige Verständnis verbessert und Wertschätzung gefördert werden. Aber: Die teilweise auf falschen Behauptungen beruhende Kolumne trägt nicht zur Versachlichung der Debatte bei, und damit auch nicht zu höherer gesellschaftlicher Akzeptanz und Wertschätzung der Landwirtschaft. Durch die Zitierung wissenschaftlicher Literatur erwecken die Beiträge von „Bauer Willi“ den Eindruck, dass die Argumentation wissenschaftlich basiert ist. Tatsächlich jedoch wird ein großer Teil der Literatur ignoriert und es werden nur sehr selektiv Studien ausgewählt, die eine bestimmte Aussage unterstützen sollen; dabei werden die Inhalte aber oft falsch wiedergegeben.

In „Teil 3: Mehr Kuhfladen in die Landschaft – oder: Was es mit dem Insektensterben auf sich hat“ [1] sät „Bauer Willi“ entgegen einer Vielzahl von wissenschaftlichen Untersuchungen seinen generellen Zweifel an der Biodiversitätskrise und dem Einfluss von moderner

Landwirtschaft auf das Insektensterben. Die bekannte Studie Krefelder Entomologen wird völlig zu Unrecht diskreditiert, als wäre sie nur an einem einzigen ungeeigneten Standort durchgeführt worden. Ein kurzer Blick in diese Studie [2] zeigt 63 verschiedene Untersuchungsflächen, und auch die statistische Auswertung entspricht guten wissenschaftlichen Standards. Richtig ist, dass in der Krefeld-Studie nur wenige Standorte mehrfach beprobt wurden. Dies ist jedoch, wenn korrekt interpretiert und analysiert, aus wissenschaftlicher Sicht unproblematisch und wird in der Datenanalyse berücksichtigt. Die entscheidende Frage ist, warum es zu einem Rückgang kommt. Eine prinzipielle Ablehnung des Ergebnisses ist wissenschaftlich falsch.

Die anderen von „Bauer Willi“ zitierten Beispiele aus England und Österreich, in welchen keine Rückgänge von Insekten gefunden wurden und die somit als Beweis für die Abwesenheit des Insektensterbens herangezogen werden, sind keinesfalls repräsentativ. In Südeuropa gibt es neben der von „Bauer Willi“ vorgebrachten Studie [3] auch sehr deutliche Befunde zu Rückgängen einer Vielzahl von Insektengruppen in Getreidefeldern über 42 Jahre, während gleichzeitig der Einsatz von Pestiziden deutlich zugenommen hat [4]. Auch aus Deutschland gibt es inzwischen viele Studien, die den Rückgang der Insektenabundanz und -diversität klar belegen. Beispielsweise konnte für 150 zwi-

schischen 2008 und 2017 jährlich mehrfach beprobte Wiesen und Weiden verteilt über die Regionen Hainich-Dün (Thüringen), Schorfheide-Chorin (Brandenburg) und Schwäbische Alb (Baden-Württemberg) gezeigt werden, dass die untersuchten Heuschrecken, Käfer, Spinnen, Wanzen und Zikaden über einen Zeitraum von nur zehn Jahren erheblich abgenommen haben [5]. Dabei war der Rückgang umso stärker, je mehr ackerbaulich genutzte Fläche in der Umgebung der Wiesen und Weiden lag. Neben dieser Studie, die im Rahmen der Biodiversitätsexploratorien (www.biodiversity-exploratories.de) durchgeführt wurde, gibt es viele weitere, die einen Rückgang der Individuenzahl, Artenzahl und Biomasse von Insekten in verschiedenen Gebieten Deutschlands belegen (z. B. [6–8]), es gibt noch viele mehr). Neben Zeitreihen können hier auch räumliche Daten etwa entlang von Landnutzungsgradienten – Stichwort *space-for-time substitution* [9] – wichtige Erkenntnisse liefern. Natürlich sind etliche Fragen noch nicht abschließend geklärt, gerade die nach den wichtigsten Mechanismen, aber die Aussage, dass Insekten nicht zurückgehen, ist haltlos.

Der Zusammenhang mit landwirtschaftlicher Nutzung ist oft eindeutig und auch nicht überraschend, denn über 50 Prozent der Landfläche der Bundesrepublik wird landwirtschaftlich genutzt. Andere Faktoren wie Lichtverschmutzung und Urbanisierung tragen ebenso zum Rückgang bei wie das Wetter [4, 10]. Diese wissenschaftlichen Fakten und Zusammenhänge sind keine Kritik an der Landwirtschaft, sondern zeigen Möglichkeiten auf, Ursachen zu identifizieren und Rückgänge zu stoppen. „Bauer Willi“ benennt hier zu Recht eine reduzierte Mahd als eine entscheidende Stellgröße, da viele Insekten maschinelle Mäher nicht überleben. Und auch die Beweidung kann positive Wirkung zeigen wie die dargestellten Kuhfladen, die von einer Viel-



ABB. 1 Kuhfladen sind eine beliebte Nahrungsquelle für verschiedene Insektenarten. Foto: Willi Kremer-Schillings.

zahl von Insekten genutzt werden (Abbildung 1). Dieser positive Effekt wird aber in der Praxis meist durch für Insekten hochtoxische veterinärmedizinische Medikamente wie das Antiparasitikum Ivermectin konterkariert.

Es ist wissenschaftlicher Konsens – und nicht überraschend, dass in vielen Fällen die Biodiversität durch landwirtschaftliche Nutzung zurückgeht – was ja durchaus auch eine beabsichtigte Wirkung von intensiver Landwirtschaft ist (siehe Teil 1 des Blogs, „Warum ich keine Biodiversität mag“ [11]). Die interessante Frage ist hier, wie Landwirt-

schaft betrieben werden kann, die gleichzeitig auch die biologische Vielfalt erhält. Dies erfordert weitere Forschungsanstrengungen, politische Anreize, aber auch die Bereitschaft von Landwirten, ihre Bewirtschaftung anzupassen. Die Veränderung der Biodiversität und der lokale oder regionale Verlust von Arten ist nachweislich relevant für die Funktion und Stabilität von Ökosystemen und auch für unseren Wohlstand. Das Thema ist zu ernst, als es mit Anekdoten, Polemik und einseitig vorgebrachten wissenschaftlichen Studien zu verunsichern. Verantwortlich sind nicht nur Landwirte, sondern auch Konsumenten und die Politik – Lösungen zu finden ist eine Aufgabe für die ganze Gesellschaft.

Literatur

- [1] W. Kremer-Schillings (2024). Teil 3: Mehr Kuhfladen in die Landschaft – oder: Was es mit dem Insektensterben auf sich hat. *Biol. Unserer Zeit* 54, 218–219.
- [2] C. A. Hallmann et al. (2017). More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLoS ONE* 12, e0185809.
- [3] C. R. Shortall et al. (2009). Long-term changes in the abundance of flying insects. *Insect Conserv. Divers.* 2, 251–250.
- [4] J. A. Ewald et al. (2015). Influences of extreme weather, climate and pesticide use on invertebrates in cereal fields over 42 years. *Glob. Change Biol.* 21, 3931–3950.
- [5] S. Seibold et al. (2019). Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers. *Nature* 574, 671–674.
- [6] S. Schuch et al. (2012). Long-term decline in the abundance of leafhoppers and planthoppers (Auchenorrhyncha) in Central European protected dry grasslands. *Biol. Conserv.* 149, 75–83.
- [7] J. C. Habel et al. (2016). Butterfly community shifts over two centuries. *Conserv. Biol.* 30, 754–762.
- [8] C. J. Skarbek et al. (2021). Trends in monthly abundance and species richness of carabids over 33 years at the Kaiserstuhl, southwest Germany. *Basic Appl. Ecol.* 50, 107–118.
- [9] N. Blüthgen et al. (2022). Unravelling insect declines: can space replace time? *Biol. Lett.* 18, 20210666.
- [10] J. Müller et al. (2024). Weather explains the decline and rise of insect biomass over 34 years. *Nature* 628, 349–354.
- [11] W. Kremer-Schillings (2024). Teil 1: Warum ich keine Biodiversität mag. *Biol. Unserer Zeit* 54, 16–17.

*Michael Staab, Darmstadt
Wolfgang W. Weisser, Freising
Nico Blüthgen, Darmstadt*

BAUER WILLIS KRAUT UND RÜBEN

Teil 4: Was nun in der Landwirtschaft?

Landwirtschaft ist „angewandte Biologie“. Bauern sind Experten, die die Ergebnisse von Forschung, von Tier- und Pflanzenzucht, Bodenbiologie und Chemie umsetzen. Sie müssen auch etwas von Meteorologie verstehen, ökonomisch denken und sollen sich gleichzeitig auch um Tierwohl, Klima- und Artenschutz kümmern. Der Arbeitsplatz ist sehr teuer, nicht nur wegen des komplexen Maschinenparks, ohne den Landwirtschaft nicht mehr denkbar ist. Was Landwirte für unsere tägliche Versorgung mit Lebensmitteln tun und warum sie oft anders denken als ein großer Teil unserer urbanen Gesellschaft, beschreibt „Bauer Willi“ (Willi Kremer-Schillings) in einer vierteiligen Mini-Serie.

Sie haben nun drei Artikel von mir gelesen und es gibt noch so viele Themen, die zur Landwirtschaft anzusprechen wären. In meinem Buch „Satt und unzufrieden – Bauer

Willi und das Dilemma der Essensmacher“ bin ich detailliert darauf eingegangen. In diesem letzten Artikel für die *BiuZ* möchte ich eine Überlegung teilen, in welche Rich-

DER AUTOR



Willi Kremer-Schillings ist Landwirt und war zuletzt als Leiter der landwirtschaftlichen Abteilung in der Zuckerfabrik Elsdorf und jülich tätig.

Seit seinem Eintritt in den Ruhestand betätigt er sich als Autor und betreibt den Internet-Blog bauerwilli.com. Darin thematisiert er die aus seiner Sicht schwierige Situation der Landwirte in Deutschland sowie fehlende gesellschaftliche Akzeptanz und Wertschätzung für ihre Arbeit.

tung sich Land- und Ernährungswirtschaft in den nächsten Jahren und Jahrzehnten entwickeln könnten. Ich sehe grob vier Richtungen:

1. Massenprodukte: Diese werden zu niedrigen Preisen in großen, sehr großen landwirtschaftlichen Einheiten erzeugt. Das können auch Zusammenschlüsse von Betrieben sein, die als Maschinen- oder Betriebsgemeinschaften rechtlich eigenständig gemeinsame Ressourcen nutzen. Wenn ich von großen Einheiten rede, so sind das im Minimum 1.000 ha. Wenn man nach Osteuropa blickt, so sind dort Einzelpersonen im Besitz von 100.000 ha und mehr. Mit diesen Größenordnungen mitzuhaltend wird sehr schwer, denn Umwelt-, Lohn- und Sozialkosten sind in Osteuropa ein Bruchteil dessen, was in Westeuropa aufgewendet werden muss. Schätzungen gehen davon aus, dass sich die Zahl der wirtschaftenden Einheiten in Deutschland bis 2040 mehr als halbiert. Persönlich gehe ich davon aus, dass dies bereits in 2030 der Fall sein wird.
2. Zwangs-Bio: Durch die Strategie *Farm to Fork* und den *Green Deal* könnte es dazu kommen, dass 50–80 Prozent der Pflanzenschutzmittel bis 2030 verboten werden. Der Düngereinsatz wird schon heute stark reglementiert und in Deutschland sollen bis 2030 mindestens 30 Prozent der Fläche nach Bio-Richtlinien bewirtschaftet werden. Wer all diese Bio-Produkte kaufen soll? Ich weiß es nicht und auch die Aussagen aus dem Landwirtschaftsministerium sind sehr schwammig. Man will öffentliche Kantinen und Mensen dazu bringen, mehr Bio zu kaufen.

Aber mit welchem zusätzlichen Geld? Wenn *Farm to Fork* in seiner heutigen Form realisiert wird, werden Kulturen wie Raps, Zuckerrüben und Kartoffeln wahrscheinlich aus Europa verschwinden. Das ist nicht nur meine persönliche Einschätzung, sondern auch die Bewertung wissenschaftlicher Institute (<https://t1p.de/sx2cc>).

3. Kreative Nische: Einzelpersonen oder auch kleine Unternehmen, die einen Spezialmarkt für sich entdeckt haben und dort erfolgreich sind. Beispiele: Weideschweine, Kräuteranbau, Insekten. Die Marktvolumina sind begrenzt, aber können finanziell für einige wenige durchaus sehr lukrativ sein. Aber Achtung: Man hört nur von den erfolgreichen Start-Ups. Von denen, die in die Insolvenz gegangen sind, berichtet niemand. Verlierer sind nicht attraktiv.
4. Neue Lebensmittel: Ich meine damit Laborfleisch, Labormilch, Insekten, pflanzenbasierter Fleischersatz und andere Ersatzprodukte für heutige Lebensmittel. Die Produktion von Hafer- oder Sojadribs geschieht in dafür eigens erbauten Fabriken, die dort stehen, wo die günstigsten Bedingungen herrschen. Die Kosten des Rohstoffes und die Transportwege spielen dabei eine vernachlässigbare Rolle. Es ist schwer zu prognostizieren, ob sich Ersatzprodukte tatsächlich durchsetzen. Ein Haferdrink macht im Vergleich zu Kuhmilch nicht so lange satt. Laborfleisch könnte echtes Fleisch ersetzen, wenn die Konditionen für seine Herstellung bekannt und gesellschaftlich akzeptiert wären. Gerade um den Herstellungsprozess und die Kosten gibt es noch viele Geheimnisse. Was sind die



ABB. 1 Erdbeeren im Winter? Alle wollen regionale und saisonale Bio-Lebensmittel. Die Verkaufszahlen zeigen aber, dass bei Umfragen meist anders geantwortet wird, als in der Wirklichkeit eingekauft wird.

Foto: www.pixabay.com.

Rohstoffe? Kommt der Prozess ohne Antibiotika aus? Wie hoch ist der Energieeinsatz? Bisher habe ich dazu noch keine belastbaren Daten gefunden.

Vielleicht wird es aber auch ganz anders und meine Mitbürger wollen von mir statt Lebensmitteln zukünftig mehr Natur- und Artenschutz. Vielleicht kann ich einen Teil des Einkommens daraus gewinnen, dass ich Hamster züchte oder seltene Blumen oder Vögel. Ob es den Menschen etwas wert ist? Oder ob sie sich das nur wünschen, wenn sie danach gefragt werden, es aber nicht bezahlen wollen? Das ist nämlich mein größtes Problem: dass die Menschen anders handeln als sie sagen. Im März habe ich ein Feature des WDR gehört, wo Verbraucher vor dem Supermarkt gefragt wurden, ob sie jetzt – im März – Erdbeeren kaufen würden (Abbildung 1). „Natürlich nicht, das ist ja nicht gut für die Umwelt und das Klima“, sagten nahezu alle Befragten. Abends waren alle Erdbeeren verkauft.

*Willi Kremer-Schillings,
Rommerskirchen*

AUS DEM VBIO

VBIO-Dialogforum „Wissenschaftliche Tierversuche – notwendig oder entbehrlich?“

Tierversuche werden in der Grundlagenforschung unter anderem dazu angewandt, um die Wirkungen von Substanzen auf Stoffwechsel, Kreislauf oder Immunsystem von Wirbeltieren zu untersuchen. Was leisten in diesem Zusammenhang Ersatzmethoden und welche ethischen Fragen gibt es zu bedenken? Am 26. Juni 2024 präsentierten der Herz- und Kreislaufphysiologe Prof. Dr. Thomas Korff (Heidelberg) und die Philosophin Prof. Dr. Ursula Wolf (Mannheim) im Rahmen des VBIO-Dialogforums ihre Standpunkte und diskutierten unter der Moderation von Prof. Dr. Gero Hilken (Zoologie, Duisburg-Essen). Etwa 160 Teilnehmende verfolgten die Online-Veranstaltung und stellten interessiert ihre Fragen.

Die Sicht des Wissenschaftlers

Thomas Korff beschrieb in seinem Impulsvortrag die Bedeutung von wissenschaftlichen Tierversuchen in der biowissenschaftlichen und biomedizinischen Forschung. Die meisten Tierversuche werden in der Grundlagenforschung durchgeführt, doch auch bei der Entwicklung von Medikamenten oder bei der Risikoabschätzung zur Sicherheit der Be-

völkerung sind sie von Bedeutung. Am häufigsten werden Mäuse verwendet (75% der Versuchstiere); sie liegen damit zahlenmäßig weit vor Fischen (10,3%), Ratten (7,7%) und Kaninchen (2,5%). Andere Tierarten tragen nur unter zwei Prozent zur Zahl der Tierversuche bei. Etwa zwei Drittel der Tiere sind bei den Versuchen nur einer geringfügigen Belastung ausgesetzt.

Korff beschrieb die Aufnahme ethischer Grundsätze ins deutsche Tierschutzgesetz (TierSchG). In § 1 heißt es „Niemand darf einem Tier ohne vernünftigen Grund Schmerzen, Leiden oder Schäden zufügen“. Er legte dar, dass Tierversuche rechtlich erlaubt und ethisch begründbar sind, wenn sie das menschliche Wohlergehen verbessern. Dazu gehören auch das Vorbeugen, Erkennen oder Behandeln von Krankheiten. Eine schrittweise Abschaffung von Tierversuchen in der Biomedizin hätte deshalb schwerwiegende Folgen.

Vor der Durchführung von Tierversuchen ist ein Antrag an die dafür zuständige Behörde erforderlich, in dem wissenschaftlich begründet dargelegt werden muss, dass der Versuchszweck durch Ersatzmethoden oder andere Verfahren nicht erreicht werden kann. Bei Bewilligung der Versuche kontrollieren Überwachungsbehörde (das zuständige Regierungspräsidium) und Tierschutzbeauftragte die Einhaltung der gesetzlichen Normen. Nach dem „3R-Prinzip“ (*Replace, Reduce, Refine*) soll die Anzahl der Tiere auf ein Minimum begrenzt und die Belastung der einzelnen Tiere minimiert werden. Zwar können durch die Verwendung von Zellkulturen oder Organoiden einzelne Tierversuche ersetzt werden, doch haben die Ergebnisse nicht die gleiche Aussagekraft wie die am Tier ermittelten. Für Forschende besteht daher das Dilemma „Leid versus Fortschritt“.

Korff führte auch aus, dass in den einzelnen Bundesländern die Vorschriften zu Tierversuchen Unterschiede aufweisen. Zudem bestehen in der internationalen Forschungslandschaft unterschiedliche Gesetzeslagen. Im internationalen Wettbewerb führt dies für Forschende in Deutschland zuweilen zu Nachteilen und erforderliche Tierexperimente werden dann ins Ausland verlagert.



Verband | Biologie, Biowissenschaften
& Biomedizin in Deutschland

DIALOGFORUM



WISSENSCHAFTLICHE TIERVERSUCHE – NOTWENDIG ODER ENTBEHRLICH?

Wozu wissenschaftliche Tierversuche?
Was leisten Alternativmethoden – was nicht?
Welche ethischen Fragen stellen sich dabei?

Prof. Dr. Thomas Korff

Institut für Physiologie und Pathophysiologie, Universität Heidelberg

Prof. Dr. Dr. h.c. Ursula Wolf

Philosophische Fakultät der Universität Mannheim

Prof. Dr. Gero Hilken, Moderation

Universität Duisburg-Essen



Mehr Informationen des VBIO
zu wissenschaftlichen Tierversuchen
<https://t1p.de/Infos-Tierversuche>

ABB. 1 Das VBIO-Dialogforum „Wissenschaftliche Tierversuche – notwendig oder entbehrlich?“ brachte Biowissenschaften und Tierethik ins Gespräch.

Die Sicht der Tierethikerin

Ursula Wolf erläuterte, dass das Staatsziel „Tierschutz“ den Schutz des einzelnen Tieres verlangt. Laut EU-Vertrag von 1997 ist „den Erfordernissen ihres Wohlbefindens in vollem Umfang Rechnung zu tragen“. Tiere leiden nicht nur unter Schmerzen, sondern auch wenn sie Angst und Stress haben oder keine sozialen Beziehungen eingehen können. Das geltende deutsche TierSchG formuliert in § 1, „aus der Verantwortung des Menschen für das Tier als Mitgeschöpf dessen Leben und Wohlbefinden zu schützen“. Die Auslegung des Satzes „Niemand darf einem Tier ohne vernünftigen Grund Schmerzen zufügen“ ist für sie strittig, weil der „vernünftige Grund“ nicht klar definiert ist. Ein vernünftiger Grund wäre ein grundsätzlich berechtigter menschlicher Zweck, wie beispielsweise die Nutzung von Tieren als Nahrungsquelle. Im Fall von Tierversuchen versucht der Gesetzgeber, die Spannung zwischen Moral und vernünftigen Eigeninteressen durch die Einführung von „Unerlässlichkeit“ (§ 7 Abs. 2) und „ethischer Vertretbarkeit“ (§ 7 Abs. 3) zu präzisieren. Diese Forderungen können aber auch in der Tiernutzung erhoben werden.

Wolf führte aus, dass im Einzelfall eine Abwägung zwischen dem Wohl des Versuchstieres und dem menschlichen Zweck erforderlich ist; das Tier sollte dabei nicht von vorneherein eine schwächere moralische Stellung haben. Wenn Tiere um ihrer selbst willen zählen, haben sie einen Anspruch oder ein moralisches Recht auf Rücksicht. Ein Recht ist allerdings nur dort abwägbar, wo Grundrechte kollidieren oder wenn auf Seiten des Tieres ein Interesse z. B. an der Entwicklung einer Tierarznei besteht. Bei Tierversuchen besteht

daher ein moralischer Konflikt. Für Befürworter von Tierversuchen sind Versuche mit medizinischem Nutzen legitimiert, wenn die Linderung oder Behebung des menschlichen Leidens die Belastung der Versuchstiere überwiegt.

Frau Wolf erläuterte, dass das TierSchG die Tötung von Tieren zu Nahrungszwecken erlaubt, obwohl die Tötung eines Wirbeltieres ohne vernünftigen Grund strafbar ist. Im Fall eines Tierversuchs ist dagegen der „vernünftige Grund“ für die Tötung eines Tieres nur gegeben, wenn der Versuchszweck nicht anders erreicht werden kann. Bei Nutztieren für menschliche Ernährung ist die Tötung aber erlaubt, obwohl das Ziel „Ernährung“ auch vegetarisch erreicht werden kann. Für Wolf macht es daher wenig Sinn, das Töten von Tieren pauschal zu erlauben.

Falls bei der strikteren Handhabung im Bereich von wissenschaftlichen Tierversuchen ein Verbot der Tierquälerei dahinterstecke, wäre ein Betäuben und Töten der Tiere unbedenklich. Auch sie wies darauf hin, dass auf der internationalen Ebene Unterschiede in der Gesetzgebung bestehen. Im deutschen TierSchG werden beispielsweise „Leben und Wohlbefinden“ der Tiere geschützt, während in der Schweiz „die Würde und das Wohlergehen“ des Tieres geschützt sind.

Tierversuche hält sie nur dort für gerechtfertigt, wo das Wohl des betroffenen Tieres kaum beeinträchtigt ist, d. h. wenn dabei kein oder nur minimales Leiden der Tiere verursacht wird. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass Versuchstiere zwar besser als Tiere in der Massentierhaltung leben, aber nur wenig Abwechslung und kaum soziale Kontakte haben. Schließlich fordert sie, die Bedingungen für Versuchstiere so erträglich wie möglich zu gestalten, und ihre Zahl

durch das 3R-Prinzip auf ein Minimum zu reduzieren.

Aus der Diskussion

In der Diskussion wurden viele der angesprochenen Punkte weiter vertieft und die Inkonsistenzen auch des menschlichen Verhaltens Tieren gegenüber noch einmal thematisiert. Warum werden z. B. Ratten und Mäuse in Häusern oder Gärten als Ungeziefer problemlos getötet, während das bei Labormäusen als problematisch gesehen wird? Die Zuhörenden waren auch von der sachlichen Darstellung des Konflikts hinsichtlich des vernünftigen Grundes für Tierversuche in der Gegenüberstellung zum Nutzvieh angetan. Das Für und Wider von Tierversuchen ist komplex und Lösungen für ethische Fragen sind nicht einfach zu finden. Deshalb ist es so wichtig, alle betroffenen Ebenen im Blick zu haben und Tierethik und Tierrecht in die Betrachtung von Tierversuchen einzubeziehen.

Geschätzt wurden auch der lebendige und intensive Meinungsaustausch der beiden Experten unter der Moderation von Gero Hilken, wobei besonders die Offenheit der beiden Vortragenden und das hohe Niveau der Diskussion sehr gelobt wurden. Insgesamt brachte der Disput neue Erkenntnisse und Denkanstöße in eine Dilemmasituation, die nicht so einfach auflösbar ist.

Generell ist das Format „Dialogforum“ für die Diskussion eines kontroversen Themas sehr gut geeignet. Ein solches Format lässt den notwendigen Perspektivwechsel gelingen und unterstützt die eigene Meinungsfindung. Dementsprechend ist der Wunsch nach weiteren Dialogforen sehr groß.

*Felicitas Pfeifer,
TU Darmstadt und VBIO*

TAGUNG

Zum 25. Mal Frühjahrsschule der Fachsektion Didaktik der Biologie

Vom 4. bis 7. März 2024 fand die diesjährige Frühjahrsschule der Fachsektion Didaktik der Biologie (FDdB) auf dem Campus der Leuphana Universität in Lüneburg statt (Abbildung 1). Dabei handelte es sich sogar um ein Jubiläum: Zum 25. Mal wurde die Tagung, die mittlerweile als feste Größe in der „Biologiedidaktik-Welt“ gilt, ausgetragen. Vor allem Doktorierenden bietet sie hervorragende Möglichkeiten zum Einstieg in die Teilhabe am wissenschaftlichen Diskurs.

Die Frühjahrsschule der Fachsektion Didaktik der Biologie (FDdB) wurde 1998 von Prof. Dr. Helmut Vogt (†) begründet und von Prof. Dr. Dirk Krüger, Prof. Dr. Annette Upmeier zu Belzen, Prof. Dr. Philipp Schmie-mann und Prof. Dr. Andrea Möller weitergeführt. In diesem März wurde sie zum 25. Mal durchgeführt – unter der wissenschaftlichen Leitung (Abbildung 2) von Prof. Dr. Sandra Nitz (Universität Kaiserslau-

tern-Landau), Prof. Dr. Jörg Zabel (Universität Leipzig) und Prof. Dr. Arne Dittmer (Universität Regensburg) – sowie dem Nachwuchssprecherteam, aktuell bestehend aus Colin Peperkorn (Universität Bielefeld), Cornelia Averdunk (Universität Leipzig) und Maren Junker (Universität Halle). Der Keynote-Vortrag zum Thema *Gender Equality* des Motivationspsychologen Dr. Timur Sevincer bildete den Auftakt der

Tagung. Im Zentrum der Tagungs-woche standen vor allem die Beiträge der Doktorierenden. Mit 51 Postern und elf Vorträgen waren dabei sogar fast alle Teilnehmenden mit einem eigenen Beitrag vertreten (Abbildung 3). Von Teilnehmenden wird die Frühjahrsschule als besonders geeigneter Lernraum wahrgenommen, in dem man sich beispielsweise gut auf größere – auch internationale – Tagungen vorbereiten kann.

Aber auch ohne Beitrag ist eine Teilnahme lohnenswert: Personen, die eine Promotion in der Biologiedidaktik in Erwägung ziehen, darunter häufig studentische Abschlusskandidat/-innen, bekommen einen Einblick in aktuelle biologiedidaktische Forschung, erhalten erste Kontaktmöglichkeiten zu der Community über ihren Hochschulstandort hinaus und nehmen neben Ideen für ihr eigenes Forschungsprojekt vor allem Motivation mit.



ABB. 1 Teilnehmer/-innen der Frühjahrsschule 2024. Foto: Maren Junker.



ABB. 2 Begrüßung durch die wissenschaftliche Leitung (v.l.n.r.: Prof. Dr. Arne Dittmer, Prof. Dr. Sandra Nitz, Prof. Dr. Jörg Zabel). Foto: Cornelia Averdunk.



ABB. 3 Postersession (v.l.n.r.: Laura Härter, Prof. Dr. Sandra Nitz, Justus Schöller). Foto: Laura Hartleb.

Neben den dargebotenen Beiträgen der Teilnehmenden luden auch in diesem Jahr vielfältige Workshops und Exkursionen zur Vertiefung und Weiterbildung sowie zum Austausch ein. Hierbei konnten unterschiedliche Bedarfe der Teilnehmenden berücksichtigt werden. So waren beispielsweise für Personen, die am Anfang ihrer wissenschaftlichen Karriere stehen, forschungsmethodische Grundlagenworkshops hilfreich, während Personen, die aktuell Artikel oder Teile ihrer monographischen oder kumulativen Dissertationsschrift verfassen, Argumentationslinien in den Fokus ihrer Beschäftigung setzen konnten. Die wissenschaftliche Leitung hob in diesem Jahr insbesondere die von

ihr wahrgenommene Zunahme der Qualität und Tiefe der wissenschaftlichen Diskussionen hervor.

Nicht zuletzt sei auch der Erkenntnisweg der Biologiedidaktik als speziell für die Doktorierenden eingerichtete Publikationsmöglichkeit zu erwähnen (<https://t1p.de/txoge>), durch welche unterstützt wird, dass auf der Basis der Tagungsbeiträge Artikel veröffentlicht werden können.

Die Evaluation, die am Ende einer jeden Frühjahrsschule erfolgt, unterstützt die stete Weiterentwicklung. Den Zeitraum vom 4. bis 7. März 2025 können sich alle Interessierten bereits jetzt im Kalender vormerken: Als nächster Austragungsort freuen sich die Vertreter/

-innen der Biologiedidaktik der Humboldt-Universität zu Berlin bereits auf alle Teilnehmenden und ihre vielfältigen Beiträge. Dort kann man gespannt sein, wie sich die einzelnen Forschungsprojekte entwickelt haben und wer neu in der Community begrüßt werden darf.

Wer bis dahin nicht warten möchte, ist herzlich zum offenen Angebot der digitalen Vernetzungstreffen eingeladen. Aktuelle Informationen erreichen Doktorierende und Interessierte über den Verteiler (<https://t1p.de/zg3a8>).

*Maren Junker, Colin Peperkorn
und Cornelia Averdunk
aktuelles Nachwuchssprecherteam*

AUSBILDUNG

Endlich ein Neustart! BTA in stürmischen Zeiten

Erstmals nach der Corona-Pandemie gab es wieder ein Treffen des Arbeitskreises Biologisch-Technische Ausbildung (AK-BTA) des Verbandes Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBIO). Am 26. und 27. September 2024 kamen 49 Lehrkräfte aus 21 BTA-Schulen in Olsberg zur diesjährigen Fachdidaktiktagung des Arbeitskreises zusammen. Inhaltlich stand sie unter dem Motto „Ökologie und Umweltmonitoring“; im Fokus waren aber auch die aktuellen, strukturellen Probleme der BTA-Schulen.

Mehr als dreißig Jahre lang gab es regelmäßige Treffen des Arbeitskreises Biologisch-Technische Ausbildung (AK-BTA, www.ak-bta.de) im VBIO, bis es in Folge der Corona-Pandemie zu einer fast fünfjährigen Unterbrechung kam. Die Interaktion der BTA-Schulen in Deutschland schien vorübergehend völlig zum Stillstand zu kommen. So war es eine besondere Freude, dass der AK-BTA sich am 26. und 27. September 2024 am Berufskolleg Olsberg im Hochsauerlandkreis zu einem Neustart treffen konnte – zur 36. bundesweiten BTA-Fachdidaktiktagung. Es kamen Vertreterinnen und Vertreter von rund 60 Prozent

aller BTA-Schulen aus ganz Deutschland: von Hamburg bis Überlingen am Bodensee, von Hilden bis Jena – für den Neuanfang ein gutes Signal. So zeigte sich bei der Fortbildungstagung auch das rege Interesse zum Austausch und der Wille, gemeinsam zu neuer Stärke zusammenzufinden.

Inhaltlicher Schwerpunkt: Ökotoxikologie

Für das Treffen in Olsberg wurde das Motto „Ökologie und Umweltmonitoring“ als inhaltlicher Aufhänger gewählt: Das Themenfeld der Ökologie und hier insbesondere das der Ökotoxikologie wurde

durch wissenschaftliche Vorträge der Landesanstalt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) abgedeckt. Hier erhielten die Teilnehmenden z. B. einen Überblick über verschiedene neue Anwendungstechniken, die die Limnologie modernisiert haben. Im Vortrag zur „Ermittlung des ökologischen Zustands an Fließgewässern – heute und neue Impulse durch genetische Verfahren“ wurde erläutert, wie mittels schneller Gensequenzierungstechniken wie dem Metabarcoding unter Verwendung von eDNA- (e = *environmental*)-Proben die An- oder Abwesenheit von Organismengruppen in Gewässern festgestellt und so die herkömmlichen Untersuchungen wie z. B. die visuelle Identifizierung von Zoo- und Phytoplankton ergänzt werden können. Im Vortrag „Abwasserüberwachung mit effektbasierten Methoden“ ging es um den Einsatz von Fischeiern als Ersatz für bisher gesetzlich verpflichtende Tierversuche mit Fischen. Hierbei werden Veränderungen in den Entwicklungsstadien von Fischembryonen eingesetzt, um Umweltgifte in Gewässerproben nachzuweisen.

ABB. 1 Fachdidaktiktagung des AK-BTA im VBIO am Berufskolleg Olsberg. Foto: C. Roller.



Ein Höhepunkt der Tagung war der Besuch des Fraunhofer-Instituts für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie (IME) in Schmallenberg, das sich mit neuen Forschungsbereichen der Ökologie befasst. Gruppenweise wurden hier analytische Labore und die Umweltprobenbank besichtigt, wo in ungezählten mit Stickstoff gekühlten Gefriercontainern Umweltproben aus ganz Deutschland aufbewahrt werden. Die ältesten Proben gehen zurück bis in die 1980er Jahre. Gelagert werden Proben zu je 10 g homogenisiertem Material, die zu Forschungszwecken oder als Kontrollmaterial archiviert werden. In den angeschlossenen Laboren betreibt das Fraunhofer-Institut eigene und Auftragsforschung im Themenfeld der Ökotoxikologie. Schwerpunkt sind zurzeit endokrinologische und Langzeitwirkungen von Chemikalien auf aquatische Ökosysteme mit molekularbiologischen Methoden, insbesondere um künftig auch gesetzlich vorgeschriebene Tierversuche ersetzen zu können.

Fachkräftemangel wird zunehmend spürbar

Am Ende der Tagung wurden zahlreiche Fragen zur zukünftigen Ent-

wicklung und gesellschaftlichen Wahrnehmung von Auszubildenden in technischen Assistenzberufen der Biologie diskutiert. Ein in der Industrie oft angezeigter Fachkräftemangel an z. B. BTAs war im Fraunhofer-Institut nach eigenem Bekunden bisher noch nicht zu spüren, da es sich um einen in der Region sehr gefragten Arbeitgeber handelt. Jedoch wird die Abnahme an qualifiziertem Personal auch dort kritisch betrachtet.

Die Industrie beklagt mittlerweile auf breiter Front, dass zu wenig gut ausgebildete Fachkräfte zur Verfügung stehen. Gleichwohl ist die Wahrnehmung vieler in Olsberg vertretenen BTA-Schulen, dass sie mit strukturellen Problemen der Ausbildung und insbesondere der Akquise von Auszubildenden von der Industrie und Politik alleingelassen werden. Durch die komplette staatliche Kostenübernahme bei den benachbarten Ausbildungsgängen im Gesundheitswesen wie Medizinisch-technische Laborassistenten (MTLA) oder Pflege, hat die schulische Ausbildung in naturwissenschaftlichen Fächern wie die BTA-Ausbildung an Attraktivität verloren. Für nicht wenige Jugendliche sind duale Angebote der Industrie aufgrund der recht hohen Ausbildungsvergütung erste Wahl, so dass eine starke Konkurrenz zur schulischen BTA-Ausbildung besteht. Da der Bedarf an gut ausgebildeten technischem Laborpersonal größer ist, ergänzen sich normalerweise beide Systeme, da viele Betriebe keine eigene Ausbildung anbieten können.

ABB. 2 Informationsmaterial zur BTA-Ausbildung. Foto: C. Roller.



BTA-Schulen mit strukturellen Problemen allein gelassen

Im Deutschen Qualifikationsrahmen [1] ist den BTAs nur die Stufe 4 zugeordnet, während den für praktische Tätigkeiten im Labor weniger geeigneten Bachelor-Absolvent/-innen die Stufe 6 zuerkannt wird. Dies fördert nicht die Attraktivität der BTA-Ausbildung, die in vielen Teilen nachweislich Hochschulniveau erreicht.

Mittlerweile spitzt sich die Situation derart zu, dass erste Schulen wegen des Mangels an Ausbildungswilligen schließen müssen. Das bedeutet: Bedarf und Mangel an gut ausgebildeten Fachkräften werden womöglich erst dann ausreichend wahrgenommen, wenn die letzte Schule bereits geschlossen hat. Die Politik hat bislang weder von der wirtschaftlichen noch von der schulischen Seite hilfreiche Beiträge geleistet. Hingegen werden die Regularien an den Ausbildungsstätten immer prekärer.

Zusätzlich müssen die BTA-Schulen einschlägige Landesregelungen insbesondere zu Mindestschülerzahlen beachten. Wird die Mindestschülerzahl mehrfach unterschritten, ist von den zuständigen Behörden ein besonders strenger Maßstab anzulegen (siehe z. B. [2]). Sprich, hier droht dann die unumkehrbare Schließung von Ausbildungsgängen bzw. gerade bei den privat geführten Schulen steht die Existenz sogar gänzlich auf dem Spiel. In der Versorgung mit Lehrkräften gilt dabei zusätzlich ein Vorrang für die duale und quasiduale Ausbildung. Hier braucht es einen offenen Dialog mit allen Stakeholdern, welche Rolle die schulische Ausbildung (BTA) langfristig haben soll.

Appell an die Politik

Der AK-BTA wird daher zeitnah auf der Grundlage konkreter Zahlen und Fakten die strukturellen Probleme der BTA-Schulen an die Politik herantragen. De facto ist der Bedarf an gut ausgebildeten Absolvent/-innen der BTA-Schulen hoch und die Industrie ist nicht müde zu betonen, wie schwierig der Fachkräftemangel zu

beheben sei. Auf der anderen Seite entscheiden sich immer mehr BTA aufgrund fehlender Aufstiegsmöglichkeiten für ein (berufsbegleitendes) Studium. Davon können wiederum die Hochschulen profitieren. Dabei ist die Zusammenarbeit nicht nur eine Einbahnstraße. BTA-Schulen können Studiengangsabbrecher/-innen die Chance bieten, die eigen-

nen beruflichen Träume doch noch in den *Life Sciences* zu verwirklichen.

Der AK BTA ist daher bestrebt, mit allen Entscheidungsträgern in einen Dialog zu treten, um die Zukunft der schulischen Ausbildung von BTA als wichtigen Baustein im deutschen Bildungswesen zu erhalten.

AUS DEM VBIO

System Wald: Erfolgreiche Online-Veranstaltung

Unter dem Titel „Boden, Bäume, Klima – das System Wald“ hatten der VBIO und der Dachverband der Geowissenschaften (DVGeo e. V.) im September Wissenschaftler/-innen aus Bio- und Geowissenschaften eingeladen, einen Einblick in ihre (Forschungs-)Arbeit und das System Wald zu geben. Mehr als 1200 Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe II und ihre Lehrkräfte waren dieser Einladung gefolgt und erlebten eine überaus spannende Online-Veranstaltung, bei der auch die Beantwortung ihrer Fragen nicht zu kurz kam.

Wälder sind wichtig und erfüllen vielfältige Funktionen: Sie sind Lebensraum für Pflanzen, Tiere, Mikroorganismen, Pilze etc. Sie liefern Produkte – allem voran natürlich Holz, das (nicht nur) als Bau- und Werkstoff eingesetzt wird. Wälder werden aber auch als Erholungsorte genutzt. Klar ist, dass bei derart unterschiedlichen Funktionen Zielkonflikte nicht ausbleiben können.

Und dann wären da noch die Ökosystemdienstleistungen von Wäldern, die nicht unterschätzt werden dürfen: Wälder verhindern den Bodenabtrag durch Wasser und Wind. Sie gleichen Temperaturschwankungen aus, erhöhen die Luftfeuchtigkeit und steigern die Taubildung. Sie filtern (Fein-)Staub und Gase aus der Luft und beeinflussen so das Mikroklima am Standort. Wälder spielen darüber hinaus eine bedeutsame Rolle im Wasser- und Kohlenstoffkreislauf – und damit auf globaler Ebene auch für das Klima.

Nicht überraschend also, dass das „System Wald“ in seinen unter-

schiedlichen Dimensionen (zeitlich, räumlich) und Funktionszusammenhängen auch im Unterricht einen prominenten Platz einnimmt.

Vielfältige Wechselbeziehungen

Der Standort Wald ist das Resultat der Wechselbeziehungen von Boden, Klima, Relief (die ihrerseits verschiedensten Einflussfaktoren unterliegen) sowie seiner Entstehungsgeschichte und sollte in seiner Komplexität nicht unterschätzt werden. Dies machte auch Dr. Martin Salamon vom Geologischen Dienst Nordrhein-Westfalen deutlich. Er spannte in seinem Vortrag „Wald und Boden: Ein Blick in die Erdgeschichte und die Zukunft“ zeitlich einen weiten Bogen von den Anfängen der Bodenentstehung vor 3,7 Mrd. Jahren bis zu den heutigen Böden. Die Kenntnis der konkreten Bodenbeschaffenheit ist einer der Faktoren, um standortgeeignete Baumarten zu identifizieren und im Sinne eines Waldbaukonzeptes anzubauen.

Literatur

- [1] Deutscher Qualifikationsrahmen, Stufe 4, <https://t1p.de/ldf41>
- [2] Verwaltungsvorschrift des Kultusministeriums zur Unterrichtsorganisation und Eigenständigkeit der Schulen im Schuljahr 2024/2025 (Organisationserlass), <https://t1p.de/jy8445>

*Stephan Ganter,
Rheinische Akademie Köln und
Carsten Roller, VBIO*

Wald und Klima

Der zweite wesentliche Faktor ist das Klima, das Prof. Dr. Alexander Knohl von der Georg-August-Universität Göttingen unter die Lupe nahm. In seinem Vortrag „Wald und Atmosphäre – eine Beziehung im Stress“ stellte er die drastischen Auswirkungen von Trockenjahren auf Mittelgebirgswälder dar. Diese betreffen das Absterben von Bäumen und die damit verbundene Veränderung der Waldstruktur, aber auch die Wechselwirkungen mit der Atmosphäre. Denn: Lokale Trockenheit führt über Rückkoppelungseffekte zu noch mehr Trockenheit. Messwerte belegen eindrücklich, dass der Wald in Trockenjahren deutlich weniger CO₂ aufnimmt als im langjährigen Mittel.

Was tun?

Spannende Vorträge, die ebenso spannende Fragen provozierten. Da ging es zum einen um Fragen zur Zukunft des Waldes und zum Waldschutz wie etwa: „Welche Maßnahmen müssten am besten ergriffen werden, um den Wald zu retten?“, „Sollen die Wälder eher künstlich wieder bepflanzt werden oder sollen sie sich lieber von alleine wieder erholen?“ Oder: „Wie sieht der Wald der Zukunft in Deutschland aus?“ – Fragen, auf die die Referenten geduldig Antworten gaben.

Andere Fragen fokussierten stark auf den Klimawandel und mögliche Gegenmaßnahmen: „Wäre es sinnvoll, künstliche Wolken gegen die Dürre im Sommer zu erzeugen?“ „Kann man selber dazu beitragen,

ABB. 1 Das Thema „Wald“ und die Wechselbeziehungen zum lokalen und globalen Klima standen im Mittelpunkt der Online-Veranstaltung.

„dass die Fotosynthese in Wäldern wieder erhöht wird?“ Aber auch: „Wie realistisch ist die Umsetzung von negativen Emissionen?“ Auch

wenn diese Fragen keineswegs leicht zu beantworten sind, so waren sich die Referenten doch einig, dass die Priorität darin liegen sollte,

die Freisetzung von CO₂ nach Möglichkeit zu vermeiden – und nicht bei einer nachträglichen Entfernung des CO₂.

Insgesamt nahmen etwa 1.200 Schüler/-innen aus ganz Deutschland – aber auch von deutschen Auslandsschulen – an der Veranstaltung teil und brachten ihre Fragen in die von Sven Bradler souverän moderierte Diskussion ein. Erste Rückmeldungen von Lehrkräften zeigen, dass das bewährte Konzept der Online-Veranstaltung für Schüler/-innen auch in diesem Jahr aufgegangen ist.

Kerstin Elbing, VBIO

AUS DEM VBIO

Verbandsarbeit pur: Bundesdelegiertenversammlung des VBIO

Die Bundesdelegiertenversammlung (BDV) ist das höchste Organ des VBIO. In diesem Jahr trafen sich die Delegierten aus Fachgesellschaften und Landesverbänden am 11. Oktober 2024 online. Im Mittelpunkt standen Tätigkeits- und Finanzberichte, die Entlastung des Präsidiums sowie die Finanzplanung für das Jahr 2025.

Prof. Karl-Josef Dietz, Präsident des VBIO, unterstrich in seinem Bericht die Vielfalt der Biologie, die sich auch in der Vielfalt der VBIO-Aktivitäten niederschlägt. Er betont, dass im Berichtszeitraum zu jedem der in der Satzung des VBIO genannten Zielen Aktivitäten zu verzeichnen waren. Hier nur eine kleine Auswahl der Aktionen:

- Unter dem Stichwort „Förderung des Informations- und Meinungsaustausches bzw. der Fortbildung“ bietet der VBIO die Online-Reihe „Faszination Biologie“ und das VBIO-Dialog-Forum an. Auch das viermal im Jahr erscheinende Verbandsjournal „Biologie in unserer Zeit“ (BiuZ) dient diesem Ziel.
- Zur „Förderung von Forschung und Lehre“ hat sich der VBIO unter anderem zum Thema „Wis-

senschaftliche Tierversuche“ engagiert.

- Die Beteiligung an Anhörungen wie z. B. die zur Weiterentwicklung der Bildungsstandards für den Mittleren Schulabschluss (hier: Biologie) trägt dem Satzungsziel „Förderung der Biologie-Bildung“ Rechnung.
- Verschiedene Angebote unterstützen die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses – so etwa die Online-Seminare zur Berufsfeld-Orientierung, die Neuauflage der Publikation „Perspektiven“ oder die Initiative „YoungVBIO“.
- Der VBIO hat ein Positionspapier zur biowissenschaftlichen Wissenschaftskommunikation vorgelegt, das dazu beitragen soll, das Verständnis der Biowissenschaft-

ten und ihrer Anwendungen in der Öffentlichkeit zu fördern.

- Gemeinsam mit den mathematisch naturwissenschaftlichen Gesellschaften wurde ein Parlamentarischer Abend zum Thema „Nachhaltige Entwicklung“ veranstaltet – dies als ein Beispiel für Beratung und Zusammenarbeit mit Gesetzgebungsorganen.
- Zudem kooperiert der VBIO mit verschiedenen dem Gemeinwohl verpflichteten Organisationen wie etwa der *International Union of Biological Sciences* (IUBS).

Aktivitäten mit Fachgesellschaften

Die Sprecherin der Fachgesellschaften im VBIO, Prof. Dr. Felicitas Pfeifer, stellte die Arbeit mit den Fachgesellschaften im VBIO vor. Neben der Fachsektion „Didaktik der Biologie“ sind nach dem kürzlich erfolgten Beitritt der Gesellschaft für Ökologie derzeit 25 Fachgesellschaften Mitglied im VBIO. Letztere treffen sich in regelmäßigen Abständen online, um sich mit dem VBIO und untereinander auszutauschen. Dieser Austausch wird sehr geschätzt. Eine kürzlich durchgeführte Umfrage ergab, dass sich die meisten Fachgesellschaften gut informiert fühlen, die Informationskanäle des VBIO

nutzen und Informationen innerhalb der jeweils eigenen Gesellschaft weitergeben. Das Portfolio der vom VBIO aufgegriffenen Themen wird als weitgehend ausgewogen wahrgenommen. Das Thema „Wissenschaftliche Tierversuche“ wurde bei den Fachgesellschaftstreffen durchaus kontrovers aufgegriffen.

Aktivitäten der Landesverbände

Die Sprecherin der Landesverbände im VBIO, LRSD' a. D. Marga Radermacher, berichtete über ausgewählte Aktivitäten der VBIO-Landesverbände. Ein zentrales Thema für alle Landesverbände ist das Thema Schulpolitik. Daneben werden für die Mitglieder Exkursionen, Online-Vorträge und Präsenzveranstaltungen angeboten. Diese richten sich an unterschiedliche Zielgruppen von Schüler/-innen (z. B. Schulbesuche, Berufsfindungstage) und Lehrkräften (Fortbildungen) über Studierende (Sponsoring studentischer Gruppen) bis hin zur breiten Öffentlichkeit.

Landesverbände vergeben traditionell den Karl-von-Frisch-Preis für herausragende Leistungen im Fach Biologie an Abiturient/-innen. Kriterien und Ablauf wurden überarbeitet, so dass 2024 erstmals bundesweit ein einheitliches Auswahlverfahren angewendet werden konnte.

Die finanzielle Lage

Der VBIO konnte im Geschäftsjahr 2023 ein gutes Ergebnis erzielen, was auch auf die Erhöhung des Mitgliedsbeitrages für individuelle Mitglieder zurückzuführen ist. Dennoch sind die finanziellen Möglichkeiten des VBIO weiterhin begrenzt. Inflationsbedingt ist mit Kostensteigerungen auf der Ausgabenseite zu rechnen, wie der Schatzmeister, Prof. Dr. Christian Lindermayr, deutlich machte. Auf Empfehlung der Kassenprüfer entlasteten die Delegierten das Präsidium für das Jahr 2023.



ABB. 1 Die Bundesdelegiertenversammlung des VBIO fand auch 2024 wieder online statt. Abb. unter Verwendung einer Vorlage von Alexandra Koch über Pixabay.

Ausblick

Die Fülle der zu bearbeitenden Themen ist nach wie vor groß und die Gewinnung neuer Mitglieder weiterhin zentral. Wie bereits angekündigt, finden die Neuwahlen des VBIO-Präsidenten sowie der übrigen Präsidiumsmitglieder bei einer Präsenz-BDV im Mai 2025 statt. Zu diesem Zeitpunkt soll auch die Neuberufung des Beirates erfolgen.

Kerstin Elbing, VBIO

Auch als Weihnachtsgeschenk geeignet



Berufsfelder Biologie – hier gibt es den Überblick

Der VBIO hat 87 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
- 11. überarbeitete Auflage, DIN A5, 312 Seiten, ISBN 978-3-9810923-3-2
- 16,80 Euro (inkl. Versand), 15,00 Euro (VBIO-Mitglieder)
- Direktbestellung über info@vbio.de



Weitere Infos:

www.vbio.de/perspektiven

**PERSPEKTIVEN
BERUFSFELD BIOLOGIE**



ÖKOLOGIE

Artenschutz für Mönchsgeier auf Mallorca

Fast drei Meter Flügelspannweite, ein Gigant unter den Greifvögeln und dazu ein treuer Partner in monogamer Beziehung und zärtlicher Vater in der Brutpflege: Dies sind alles gute Gründe den Mönchsgeier (Abbildung 1) zu schützen und seine Art zu erhalten.



ABB. 1 Porträt eines Mönchsgeiers. Zeichnung: Cornelia Clauss.

Im Westen und Norden Mallorcas erstreckt sich über eine Länge von 90 km der Gebirgszug der Serra de Tramuntana, dessen höchster Gipfel, der Puig Major, fast 1500 m hoch ist. Im Jahre 2011 erklärte die UNESCO dieses wild zerklüftete spektakulär schöne Gebiet zum Weltkulturerbe, um die zahlreichen Naturschätze vor der rapiden Zunah-

me des Bergtourismus zu schützen. Zu den besonders schützenswerten Naturschätzen dieses Gebirges gehört die weltweit einzige Inselformation des Mönchsgeiers (*Aegypius monachus*). Diese imposante Geierart erreicht eine Körperlänge von bis zu 1,10 m bei einer Flügelspannweite von fast 3 m. Die Aasfresser bauen ihre Horste in unzugänglichen Steilhängen der Serra Tramuntana und kreisen im Gleitflug in großer Höhe, um Tierkadaver zu entdecken und zu beseitigen. Damit erfüllen sie eine wichtige Rolle im Ökosystem Mallorcas. Mönchsgeier reagieren empfindlich auf Störungen ihres Brutplatzes und verlassen dann oft ihren Horst und die Aufzucht ganz. Auch durch das Auslegen von Giftködern wurde die Geierpopulation dermaßen dezimiert, dass 1980 nur noch 19 Exemplare – darunter nur ein einziges Brutpaar – vorhanden waren.

Seither kümmern sich auf der Baleareninsel Mallorca zwei Stiftun-

gen um den Schutz und den Erhalt der Inselformation dieser Geierart. Ihnen gelang es durch Aufzucht von kranken Tieren und Auswilderung, den Bestand der Mönchsgeier auf etwa 200 Exemplare – darunter 34 Brutpaare – zu stabilisieren.

Die Stiftungen haben ihren Sitz in der Finca Son Pons nahe dem Städtchen Campanet, etwa auf halber Strecke zwischen den größeren Städten Palma im Süden und Alcudia im Norden. Die Mönchsgeierstiftung *Black Vulture Conservation Foundation* (BVCF) [1] und ihre spanische Schwesterorganisation *Fundación Vida Silvestre Mediterranea* (FVSM) [2] arbeiten gemeinsam an Lösungen zum Schutz und Erhalt der bedrohten Geierart. Um die Beobachtung von Geiern aus der Nähe zu ermöglichen, bieten sie auf der Finca ein einmaliges Programm an, von dem sich die beiden Autoren im Mai 2024 persönlich überzeugen konnten.

Besuch im Geierobservatorium

Besucher werden von einem Mitglied der Stiftung durch die Anlage geführt, das Erklärungen gibt und Fragen beantwortet. Zunächst wird ein ca. zehnmütiger Film über die Arbeit der Stiftung und den Lebensraum der Mönchsgeier gezeigt. Danach geht es in eine Abteilung mit einem Skelett und einem Ei eines Mönchsgeiers sowie Schautafeln zur Anatomie und Lebensweise der Aasfresser. In einem weiteren Raum befindet sich eine Videoanlage, auf der eine Live-Übertragung aus einem Brutplatz in einem Baum zu sehen ist. Gut zu erkennen war ein brütender Mönchsgeier mit einem Jungvogel (Abbildung 2). Anschließend folgt eine Führung zu einem Außengehege. Hier ist ein Geierobservatorium installiert, das aus einem großen Beobachtungsraum mit Sitzbänken und davor verdeckten Luken mit Blick nach außen besteht. Jeder Beobachtungsplatz ist mit Ferngläsern ausgerüstet und es steht auch ein hochauflösendes Spektiv zur Verfügung. Der Ausblick in ein gro-



ABB. 2 Live-Übertragung von einem Brutplatz eines Mönchsgeiers in der Serra Tramuntana: adulter Vogel mit Jungtier. Foto: Wolfgang Clauss.

Des Freilandgehege zeigte drei Geierarten mit mehreren Individuen, die allesamt flugunfähig waren und in der Anlage versorgt und beobachtet werden. Schautafeln geben zu jeder Geierart Informationen über ihren Lebensraum und allgemeine Daten. Der Mönchsgeier, von denen zwei Exemplare auf der Anlage waren, erreicht ein Gewicht bis zu 11,5 kg (Abbildung 3). Sein Lebensraum befindet sich in bewaldeten Gebirgslandschaften im zentralen Europa über Vorderasien bis nach Korea. Seine Brutzeit ist von Februar bis April, wobei er eine monogame Dauerehe führt mit einem Ei und einer Brut im Jahr. Die Brutdauer beträgt etwa 55 Tage und die Küken werden nach ca. 120 Tagen flügge. Der Bestand beträgt weltweit ca. 10.000 Vögel, wobei etwa ein Viertel davon in Europa nistet. Mönchsgeier sind in Deutschland selten anzutreffen; ihr Bestand ist potenziell gefährdet. In Mallorca gibt es die einzige Inselformation. Die weiteren Geierarten im Gehege waren Gänsegeier (*Gypus fulvus*), Bartgeier (*Gypaetus barbatus*) und Schmutzgeier (*Neophron percnopterus*), wobei die letzten beiden genannten Arten ebenfalls potenziell

bzw. sehr stark gefährdet sind. Alle Geierarten konnten vom Beobachtungshaus des Geheges aus der Nähe sehr gut beobachtet werden, da sie zu diesem Zweck mit Kadavern von Schafen in den Vordergrund gelockt wurden.

Abschließend sei für Vogelliebhaber noch das einmalige Vogelschutzgebiet „Albufera“ erwähnt, das ebenfalls im Norden Mallorcas zwischen den Städten Alcudia und Can Picafort liegt und bei kostenlosem Zugang täglich geöffnet hat. Etwa 1 km hinter dem Eingang liegt das Besucherzentrum mit kostenlosem Informationsmaterial und einer Ausleihe von Ferngläsern. In diesem ca. 1600 Hektar großen Feuchtgebiet verlaufen vier gut beschilderte Tourenwege mit Beobachtungshütten. Mehr als 300 Vogelarten konnten hier bisher beobachtet werden, darunter einige seltene Brutvogelarten. Dieses Naturschutzgebiet bietet für viele europäische Vögel ein wichtiges Überwinterungsgebiet und einen Zwischenstopp für Zugvögel.

Literatur

[1] B. V. C. F. - Black Vulture Conservation Foundation, Calle Josep Coll, 55 A,

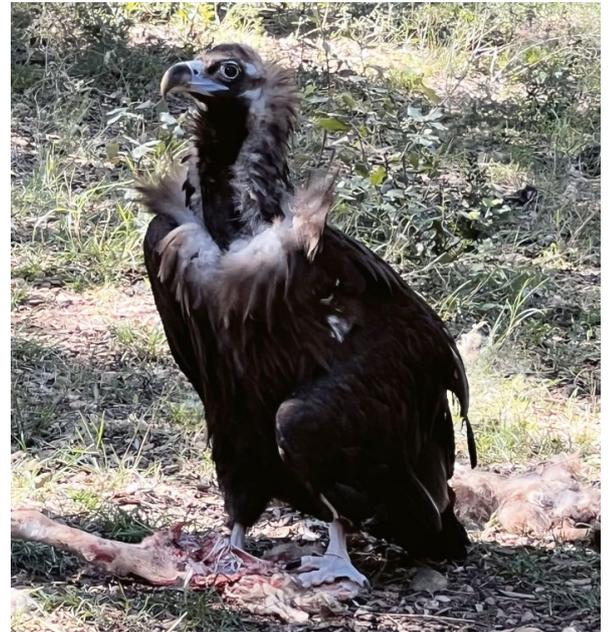


ABB. 3 Adulter Mönchsgeier bei der Fütterung im Außengehege der Finca Son Pons auf Mallorca. Foto: Cornelia Clauss.

07360 Lloseta, Tel. (971) 885040,
E-mail: bvc@jet.es, <http://bvcf.eu/>

[2] F.V.S.M. - Fundación Vida Silvestre Mediterránea, Finca Son Pons s/n Campanet – Mallorca, España, E-mail: info@procustodia.org, <http://www.fvsm.eu>

Wolfgang und Cornelia Clauss,
Gießen

PALÄONTOLOGIE

Sensoren für eine eusoziale Lebensweise bei fossilen Ameisen

Von Fossilien auf das Verhalten der Tiere zu schließen ist naturgemäß schwierig. Gemeinsam eingebettete Exemplare können daher wichtige Hinweise geben. Insbesondere sozial lebende Arten müssen aber auch miteinander kommunizieren können. Sinnesorgane wie etwa Chemosensoren auf den Fühlern von Insekten können somit wichtige Hinweise auf eine eusoziale Lebensweise liefern.

Eusoziale – also in „Staaten“ lebende Insekten – haben alleine aufgrund ihrer großen Individuenzahl eine enorme ökologische Bedeutung. Schätzungen gehen davon aus, dass es auf der Erde 20 Quadrillionen ($20 \cdot 10^{15}$) Ameisen gibt. Die Ameisen

können es daher bezüglich ihrer Biomasse durchaus mit den Menschen aufnehmen. Die ersten Stammgruppenvertreter der Ameisen haben sich kurz nach dem Beginn der Kreidezeit vor 145 Mio. Jahren entwickelt. Erste fossil doku-

mentierte Ameisen werden auf ein Alter von etwa 100 Mio. Jahren datiert. Doch wie lässt sich ermitteln, ob diese frühen Ameisen bereits eusozial lebten?

Hinweise auf eine solche Lebensweise liefern z. B. flügellose weibliche Tiere, vor allem wenn diese – eingebettet in Bernstein – gemeinsam auftreten und dabei miteinander interagieren, bzw. sich um die Brut kümmern. Verschiedene Beispiele hierfür liegen für die fossile Gattung *Geronotoformica* vor. Auch der Besitz von für Ameisen typischen Metapleuraldrüsen kann ein Hinweis auf eine eusoziale Lebensweise sein. Das Sekret dieser Drüsen wirkt antimikrobiell, was im dichten Gedränge eines Ameisenbaus, in dem Infektionen



ABB. 1 Bernsteineinschluss der fossilen Ameise *Gerontiformica gracilis*. Der Größenmaßstab entspricht 0,2 mm. Abb. aus [1].

leicht übertragen werden, von Vorteil sein kann. Ryo Tanaguchi et al. haben jetzt einen weiteren Weg gewählt, um Hinweise auf eine eusoziale Lebensweise bei fossilen Ameisen zu finden [1].

Wer sozial lebt, muss zwangsläufig mit seinen Artgenossen kommunizieren. Dies geschieht bei Ameisen zu einem erheblichen Teil durch Pheromone. Da es sich bei diesen Pheromonen um sehr flüchtige Substanzen handelt, sind sie nach etlichen Millionen Jahren in Bernstein nicht mehr nachweisbar. Was sich aber nachweisen lässt, sind die Sinnesorgane, mit denen Ameisen die Pheromone wahrnehmen. Jede ihrer Antennen enthält zahlreiche Mikrometer große Sensillen aus innervierten Kutikulahaaren, die sich morphologisch unterscheiden lassen. Von einer stabilen Chitinschicht umgeben, bleiben diese Sensillen auch bei Fossilien erhalten. Problematisch ist aber ihre geringe Größe, die jenseits der Auflösungsgrenze üblicherweise verwendeter Bildgebungsverfahren liegt. Durch hochauflösende Bilder, die mit Hilfe eines Laser-Scanning-Mikroskops aus verschiedenen Blickwinkeln gewonnen wurden, konnten jetzt allerdings die Antennensensillen der fossilen Art *Gerontiformica gracilis* (Abbildung 1) sichtbar gemacht werden.

Verschiedene Typen von Sensillen

Die Fühler dieser Stammgruppenart sind genau wie bei modernen weib-

lichen Ameisen aufgebaut. Sie bestehen aus dem langen Fühlerschaft (Scapus), dem Wendeglied (Pedicellus) – das so heißt, weil ab diesem Glied der Fühler in eine etwas andere Richtung weist (der „Knick“ im Ameisenfühler) – und zehn Flagellengliedern (den Flagellomeren). Diese Tiere sind also Weibchen; bei Männchen wären es elf Flagellomere. Insgesamt konnten vier Sensillentypen identifiziert werden: daumenförmige Zapfen (Sensilla basoconia), winzige, zur Fühlerbasis gerichtete Haare (Sensilla trichodea), die manchmal säbelförmig gekrümmt sind (Sensilla trichodea curvata) und borstenförmige Sensillen mit dickeren Wänden (Sensilla chaetica), die nicht von den Trichoid-II-Sensillen unterschieden werden konnten. Drei weitere, grubenförmige Sensillentypen, die bei modernen Ameisen vorkommen (Sensilla ampullacea, coenoconica und coelocapitula), wurden nicht entdeckt.

Die Sensilla trichodea curvata treten ausschließlich bei Ameisen auf, bei denen sie Alarmpheromone detektieren, die dann ein Flucht- oder Angriffsverhalten auslösen. Wahrscheinlich haben sie sich aus den Sensilla placodea entwickelt, die bei anderen Hautflüglern auftreten und aus einer flachen Platte bestehen. Durch ihre verlängerte Gestalt bei Ameisen wurde ihre Oberfläche vergrößert, so dass sie Moleküle besser detektieren können. Ihr Auftreten bei *Gerontiformica gracilis* zeigt, dass diese fossilen Ameisen sich wahrscheinlich bereits über Alarmpheromone verständigten und so koordiniert auf Gefahren reagieren konnten.

Die Sensilla basiconia sind Kontakt-Chemorezeptoren, die bei eusozialen Hautflüglern (neben Ameisen auch Wespen oder Honigbienen), dazu eingesetzt werden, um Nestgenossinnen von fremden Tieren zu unterscheiden. Dies geschieht durch Wahrnehmung der Kolonie-spezifischen Hydrokarbonsäuren in der Kutikula. Um diese Funktion optimal erfüllen zu können, sind die

Sensilla basiconia bei eusozialen Hautflüglern vor allem auf dem dorsalen Bereich der Antennen und an deren Innenseite konzentriert. Eben-diese Anordnung wurde auch bei *Gerontiformica gracilis* gefunden, was auf die Fähigkeit hindeutet, Nestgenossinnen erkennen zu können.

Der Weg zur ökologischen Dominanz

Ameisen sind dank ihrer eusozialen Lebensweise heute weltweit verbreitet und häufig. Davon kann sich jeder ein Bild machen, der sich im Sommer in der Natur auf die Suche nach Insekten macht: Die Wahrscheinlichkeit, auf dem Boden oder auf Blättern zumindest auf einzelne Ameisen zu treffen, ist hoch. In der Kreidezeit waren Ameisen aber noch wesentlich seltener. Nur etwa ein Prozent aller Bernsteineinschlüsse ist eine Ameise. Dies ändert sich erst in der Erdneuzeit: Im späten Paläozän bzw. im frühen Eozän, also vor rund 55 Mio. Jahren, erreichen die Ameisen unter den Bernsteineinschlüssen bereits zehn Prozent und im Neogen – also in der Zeit vor 34 Mio. Jahren bis heute – steigt ihr Anteil dann sogar auf 20 Prozent an. Eusozial waren die Ameisen aber wahrscheinlich bereits in der Kreidezeit, wie die hier vorgestellte Untersuchung zu ihren Antennensensillen nochmals bestätigt. Warum waren die Ameisen damals also noch so selten? Ein Grund hierfür könnte in der geringen Koloniegroße der kreidezeitlichen Ameisen liegen. Auch heute noch bilden viele ursprüngliche Ameisengruppen eher kleine Kolonien. Erst als einige Ameisengruppen dann die Fähigkeit zur Bildung großer Kolonien erworben hatten, konnten die Ameisen in ihren Lebensräumen zur ökologischen Dominanz aufsteigen.

Literatur

- [1] R. Tanaguchi et al. (2024). *Sci. Adv.* 10, ead3623.

Johannes Sander,
Halver

NOBELPREIS FÜR PHYSIOLOGIE ODER MEDIZIN 2024

Die Regulation der Genaktivität durch microRNA

Im Rahmen ihrer Studien zur Larvalentwicklung von *Caenorhabditis elegans* entdeckten Victor Ambros und Gary Ruvkun erstmals das Prinzip der posttranskriptionalen Regulation von Genaktivitäten durch microRNA. Sieben Jahre später zeigten Ruvkun und Mitarbeiter anhand der microRNA let-7, dass dieser Mechanismus bei Metazoen bis hin zum Menschen weit verbreitet und nicht nur für die Individualentwicklung, sondern auch für die Physiologie adulter Organismen bedeutsam ist.

Eine Kernfrage der Entwicklungsbiologie betrifft die zeitlich und zellspezifisch regulierte Expression von Genen. Bis 1993 konnte man in diesem Zusammenhang lediglich die Regulation auf der Ebene der Transkription von Genen. Welche Gene zu welchem Zeitpunkt abgelesen werden, bestimmt dabei die Interaktion der genomischen DNA mit speziellen Proteinen, den Transkriptionsfaktoren.

Victor Ambros (*1953, Hanover, USA) und Gary Ruvkun (*1952, Berkeley, USA) stellten als erste fest, dass Genaktivität auch auf der Ebene der Translation reguliert wird. Das vermittelt die Bindung nicht-kodierender microRNA an komplementäre Sequenzen der messengerRNA. Als postranskriptionale Genregulation hat dieses Prinzip mittlerweile Einzug in die Lehrbücher der Molekularbiologie gehalten.



Victor Ambros
(© Ill. Niklas Elmehed, Nobel Prize Outreach)



Gary Ruvkun
(© Ill. Niklas Elmehed, Nobel Prize Outreach)

Die beiden Laureaten kooperierten seit ihrer gemeinsamen Postdoktorandenzeit in den 1980er Jahren,

als sie bei H. R. Horvitz am *Massachusetts Institute of Technology* (Cambridge, USA) Mutanten des Fadenwurms *C. elegans* mit anormaler Individualentwicklung untersuchten. Dieser Nematode war wenige Jahre zuvor dank seiner kurzen Generationszeit, transparenter Gestalt und Empfänglichkeit für genetische Manipulationen zum Modellorganismus der Entwicklungsbiologie avanciert.

Einer der damals bekannten Mutanten, *lin-4*, fehlen manche Organe völlig und im Körper der adulten Würmer häufen sich ungewöhnlich viele Eier an. Bereits diese Abnormalitäten nährten den Verdacht, dass *lin-4* während der Individualentwicklung von *C. elegans* eine Schlüssel-funktion bei der Genregulation einnimmt. Eine weitere Mutante, *lin-14*, verharrt im Larvenstadium und bleibt klein (Abbildung 1). Der Charakterisierung solcher Mutanten widmeten beide Laureaten ihre weitere wissenschaftliche Laufbahn.

Nicht-kodierende RNA ...

Die für einen abnormen Phänotyp verantwortlichen Gene zu identifizieren, war damals eine große Herausforderung – besonders bei kurzen offenen Leserastern wie dem von *lin-4*. Victor Ambros und Mitarbeitern an der Harvard-Universität (Cambridge, USA) gelang die Klonierung dieses Gens, indem sie DNA-Fragmente aus dem Genom von *C. elegans* auf ihre Fähigkeit testeten, den Phänotyp der *lin-4*-Mutante zu korrigieren. Da Verän-

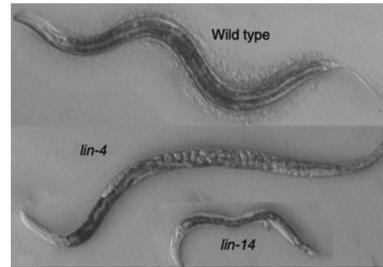


ABB. 1 Durch Mutationen veränderter Phänotyp von *Caenorhabditis elegans*. Aufgrund von Störungen der Individualentwicklung fehlen bei der *lin-4*-Mutante bestimmte Organe und der Körper ist mit Eiern angefüllt. Die *lin-14*-Mutante bleibt klein. Abb. aus [4].

derungen des Leserasters innerhalb der *lin-4* enthaltenden Genomregion die Funktion des Gens nicht beeinträchtigten, mutmaßten sie, dass das *lin-4*-Gen kein Protein kodiert. Den Beweis dafür lieferten Northern-Blot-Analysen und RNase-Schutz-Experimente, die dem *lin-4*-Gen zwei kurze Transkripte von 61 bzw. 22 Nukleotiden zuwiesen.

... als Schlüsselement der Genregulation

Gary Ruvkun hatte sich an der *University of California at Berkeley* (USA) der Charakterisierung des *lin-14*-Genprodukts, eines Proteins im Zellkern mit starker Expression während des ersten Larvenstadiums von *C. elegans*, verschrieben. Dabei fielen Deletionen innerhalb des nicht translatierten 3'-Endes (3'-UTR, UTR = untranslatierte Region) der messengerRNA auf, die zu einer über das erste Larvenstadium hinaus verlängerten Bildung des Lin-14-Proteins führten. Und auch *lin-4*-Mutanten bilden Lin-14 länger als der Wildtyp.

Beim Austausch ihrer Forschungsergebnisse stellten Ambros und Ruvkun teilweise komplementäre Abschnitte innerhalb der unabhängig voneinander gewonnenen Gensequenzen fest. Darauf aufbauende Experimente untermauerten das damals völlig neue Konzept der posttranskriptionalen Regulation der

Genaktivität durch Basenpaarung einer nicht-kodierenden RNA mit der 3'-UTR einer messengerRNA (Abbildung 2).

Bei einigen der zahlreichen *lin-14*-Mutanten fanden sich Veränderungen in der 3'-UTR des Gens, die bewirkten, dass die vier- bis siebenfache Menge des *Lin-14*-Proteins gebildet wurde, obwohl die Menge der messengerRNA gegenüber dem Wildtyp unverändert blieb. Demnach wirkt *lin-4* als negativer Regulator der Genaktivität von *lin-14*, der nicht nur die Zeitspanne der Bildung des *Lin-14*-Proteins während der Larvalentwicklung begrenzt, sondern auch die Proteinmenge.

Ein weiteres wichtiges Indiz in der Beweiskette war die Kopplung der 3'-UTR von *lin-14* an ein Reportergen, dessen Expression infolgedessen ebenfalls durch die *lin-4*-RNA reguliert wurde [1]. Dabei kann die Bindung der *lin-4*-RNA an die Ziel-RNA durch eine einzige Punktmutation innerhalb des zur 3'-UTR komplementären Sequenzabschnitts verhindert werden. Infolgedessen büßt die *lin-4*-RNA ihre regulatorische Funktion ein [2]. Zusammengefasst gelten diese Indizien als schlüssige Beweise für die Genregulation auf Ebene der messengerRNA.

Ein während der Evolution konservierter Mechanismus

Solange die posttranskriptionale Genregulation lediglich bei Fadenwürmern gezeigt war – Sequenzhomologe zu *lin-4* fanden sich ausschließlich bei anderen Spezies der Gattung *Caenorhabditis* –, wurde das neue Konzept von der Fachwelt wenig beachtet. Das änderte sich schlagartig mit der Entdeckung einer weiteren nicht-kodierenden RNA, *let-7*, durch Forscher um Gary Ruvkun [3]. Diese 21 Nukleotide kurze, nicht-kodierende RNA spielt beim Übergang zum Adultstadium der Fadenwürmer eine Rolle und weist komplementäre Sequenzen zu

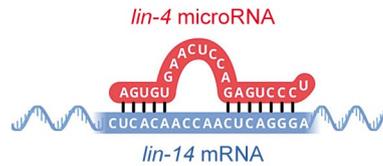


ABB. 2 Bindung der nicht-kodierenden microRNA *lin-4* an komplementäre Sequenzen in der 3'-untranslatierten Region der *lin-14*-messengerRNA. Abb. aus [4].

mehreren zeitlich regulierten Genen auf, darunter *lin-14*. Auch der Funktionsverlust von *let-7* führt bei Fadenwürmern zu Entwicklungsstörungen.

Anders als bei *lin-4* fanden sich Sequenzhomologe zu *let-7* bei zahlreichen Metazoa, von der Taufliege *Drosophila* bis hin zum Menschen. Entsprechendes gilt für eines der Zielgene von *let-7*, nämlich *lin-41*. Damit nicht genug: Auch die 3'-UTR der *lin-41*-Orthologen von Taufliege und Zebrafisch weist zu *let-7* komplementäre Sequenzen auf.

Damit war der Grundstein gelegt für eine umfassende Prüfung der entwicklungsbiologischen Bedeutung der posttranskriptionalen Regulation von Genaktivitäten. Dieser Mechanismus erwies sich auch bei Insekten und Crustaceen als relevant während der Embryonalentwicklung, und bei Wirbeltieren wird die Expression von *let-7* während der Embryonalentwicklung zeitabhängig gesteuert.

Inzwischen haben zahlreiche weitere Labors dazu beigetragen, eine Vielzahl nicht-kodierender RNAs mit entsprechender regulatorischer Funktion bei unterschiedlichsten Organismen nachzuweisen. Eine Datenbank (miRBase) für diese so genannten microRNAs listet mittlerweile an die 50.000 Sequenzen aus 271 Spezies.

Die anhand verschiedener Organismen charakterisierten molekularen Mechanismen weisen auf ein während der Evolution bewährtes

Prinzip: microRNAs werden aus längeren Primär-Transkripten gebildet. Diese pri-microRNAs sind durch eine Haarnadelstruktur gekennzeichnet und werden noch im Zellkern durch die so genannte Drosha-Endonuklease zu pre-microRNAs mit 60–70 Nukleotiden verkürzt. Nach Translokation in das Cytoplasma spaltet die Endonuklease DICER die Haarnadel zu einer RNA-Duplex mit zwei getrennten Strängen. Nur einer von diesen ist wirksam und bindet an den Protein-Komplex RISC (*RNA-induced silencing complex*), um mit der Ziel-RNA zu interagieren und entweder deren Translation zu hemmen oder ihren Abbau zu fördern.

Im Hinblick auf die Prozessierung und Assoziation mit RISC zeigen die microRNAs Gemeinsamkeiten mit anderen doppelsträngigen RNAs, darunter siRNAs. Letztere sind für die Abwehr von Viren, Retrotransposons oder anderen mobilen Nukleinsäuren wichtig, unterscheiden sich also in ihrer Funktion von den microRNAs.

Die funktionelle Bedeutung der microRNAs, die hier nur kurz gestreift werden konnte, manifestiert sich anhand seltener Erbkrankheiten des Menschen: Mutationen in der microRNA-184 führen zu Entwicklungsstörungen am Auge und angeborener Linsentrübung (EDICT-Syndrom), Mutationen in der miRNA-96 zu progressivem Hörverlust und Mutationen in der microRNA-140-4p zu einer angeborenen Skelett-Erkrankung [3].

Literatur

- [1] B. Wightman, I. Ha, G. Ruvkun (1993). *Cell* 75, 855–862.
- [2] R. C. Lee, R. L. Feinbaum, V. Ambros (1993). *Cell* 75, 843–854.
- [3] A. E. Pasquinelli et al. (2000). *Nature* 408, 86–89.
- [4] R. Sandberg (2024). Scientific background for the discovery of microRNA and its role in post-transcriptional gene regulation. www.nobelprize.org

Annette Hille-Rehfeld, Stuttgart

BESTÄUBERMONITORING

Bestäuber im Fokus: Das Hummel-Monitoring in Agrarlandschaften

Forschende am Thünen-Institut für Biodiversität entwickeln ein bundesweites Monitoring von Hummeln in Agrarlandschaften. Gemeinsam mit zahlreichen Ehrenamtlichen werden dafür regelmäßig in ganz Deutschland Hummeln entlang festgelegter Wegstrecken gezählt. Das Monitoring soll dazu beitragen, die Bestandentwicklungen dieser wichtigen Bestäubergruppe besser zu verstehen.



ABB. 1 Sichtfang einer Hummel während einer Transekt-Begehung.
Foto: L. Lakemann.

Wie geht es den Hummeln in der deutschen Agrarlandschaft? Welche Arten kommen hier vor und wie verändern sich ihre Bestände und Verbreitungsgebiete? Forschende des Thünen-Instituts für Biodiversität möchten Antworten auf diese und weitere Fragen erhalten und haben dafür ein Monitoring-Programm zur Erfassung von Hummeln in Agrarlandschaften entwickelt. Damit möglichst viele Daten zusammenkommen, arbeiten die Forschenden mit Ehrenamtlichen in ganz Deutschland zusammen. Und das kommt gut an: In den letzten Jahren erfreute sich das Projekt einer stetig wachsenden Beteiligung. Doch warum werden Hummeln überhaupt gezählt?

Hummeln gehören zu den wichtigsten Bestäubern vieler Wild- und

Nutzpflanzen. Sie tragen dabei nicht nur zum Erhalt der Biodiversität, sondern auch zur Ernährungssicherheit des Menschen bei. Einige Gemüsesorten wie Tomaten und Kürbisse oder auch Ackerbohnen und Gründünger wie Klee und Lupinen werden überwiegend oder gar ausschließlich von Hummeln bestäubt. Viele Obstsorten wiederum profitieren von der Hummelbestäubung, so dass sich ihre Ertragsqualität und -quantität steigern lassen. Hummeln sind demnach von ganz besonderer ökologischer und ökonomischer Bedeutung.

Die Bestandszahlen von Hummeln gehen jedoch seit Jahren weltweit zurück und auch die Verbreitungsgebiete mancher Hummelarten verschieben sich. Zu den Haupt-

gründen dafür zählen zum Beispiel klimatische Veränderungen. Die meisten Hummelarten sind an gemäßigte Temperaturen angepasst, so dass steigende Durchschnittstemperaturen und zunehmende Temperaturextreme Bedrohungen für sie darstellen. Außerdem spielt der Verlust geeigneter Habitats für den Rückgang der Hummeln eine wesentliche Rolle. Durch intensive Landnutzung, beispielsweise durch städtische Versiegelung oder in der landwirtschaftlichen Produktion, finden Hummeln weder genügend geeignete Nistplätze noch Nahrungsressourcen. In Deutschland nimmt dabei die Bewirtschaftung der Agrarlandschaft eine Schlüsselrolle ein, macht sie doch immerhin knapp 50 Prozent der Landesfläche aus.

Insgesamt gibt es 41 Hummelarten in Deutschland. Nur etwa die Hälfte davon gilt als ungefährdet. Die restlichen Arten sind entweder unterschiedlich stark vom Aussterben bedroht oder es können aufgrund fehlender Daten keine Aussagen zur Bestandssituation getroffen werden. Trotz der zentralen Bedeutung als Bestäuber mangelt es für Hummeln an einer umfassenden Datenbasis, um Bestandstrends besser verstehen und Fördermaßnahmen auf ihre Eignung hin evaluieren zu können.

Das Monitoring

Um einen Beitrag zum Schließen dieser Datenlücke zu leisten, wurde das Hummel-Monitoring in Agrarlandschaften entwickelt. Es ist Teil des Wildbienen-Monitorings am Thünen-Institut und wird im Rahmen des Verbundprojektes zum Monitoring der biologischen Vielfalt in Agrarlandschaften (MonViA) vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft gefördert. Seit 2021 wird das Hummel-Monitoring testweise umgesetzt und stetig weiterentwickelt.

Dafür ist zunächst ein deutschlandweites Netz an Untersuchungsflächen festgelegt worden. Dieses

stellt eine Teilmenge des europäischen Rasters zur Erfassung der Landnutzung und Landbedeckung (LUCAS) dar. Da der Fokus auf der Situation in Agrarlandschaften liegt, hat jede Untersuchungsfläche einen Mindestanteil von 30 Prozent landwirtschaftlicher Nutzung.

Die Erfassung der Hummeln auf den Untersuchungsflächen erfolgt durch zahlreiche Ehrenamtliche. Diese gehen dafür einmal im Monat von März bis Oktober festgelegte Strecken ab, sogenannte Transekte (Abbildung 1). Jedes Transekt hat dabei eine Länge von 500 Metern und verläuft überwiegend entlang von Feldwegen. Während der Begehung werden vor allem für Hummeln attraktive Ressourcen, also insbesondere Blütenpflanzen, aufgesucht. Wird eine Hummel entdeckt,

wird diese mit einem Kescher gefangen und in einen transparenten Beobachtungswürfel überführt (Abbildung 2). In diesem wird sie dann fotografiert und gegebenenfalls kann gleich die Art bzw. Artengruppe bestimmt werden, bevor sie wieder freigelassen wird. Alle Belegfotos werden im Nachgang zusätzlich durch Hummel-Expert/-innen validiert.

In den letzten Jahren fanden auf diese Weise bereits mehr als 500 Begehungen statt, bei denen mehr als 10.000 Belegfotos von über 2000 Hummeln angefertigt wurden. Die fotografierten Hummeln zählten zumeist zu den häufigen Arten wie Ackerhummel (*Bombus pascuorum*), Steinhummel (*B. lapidarius*) und Erdhummel-Gruppe (*B. lucorum* agg., Abbildung 3). Aber auch

selteneren Arten wie die Bunthummel (*B. sylvarum*) und Grashummel (*B. ruderarius*) konnten nachgewiesen werden.

Zusätzlich zu den Hummeln werden auch die Pflanzen dokumentiert, auf denen die Hummeln gefangen wurden. Hierbei handelt es sich zumeist um Ruderalpflanzen, die insbesondere in intensiv bewirtschafteten Landschaften für Hummeln eine wichtige Nektar- und Pollenquelle darstellen. Dazu zählen beispielsweise die zu den Lippenblütlern (Lamiaceae) zählenden Taubnesseln und die zu den Hülsenfrüchtlern (Fabaceae) gehörenden Kleearten. Aus diesen Interaktionsdaten lassen sich dann Informationen zur Ressourcennutzung der Hummeln in der Agrarlandschaft ableiten.



ABB. 2 Eine Hummel wird in einem Beobachtungswürfel bestimmt und fotografiert. Foto: L. Lakemann.



ABB. 3 Eine Erdhummel (*Bombus lucorum* agg.) in einem Beobachtungswürfel. Sehr gut zu erkennen sind die großen Pollenhörschen. Foto: T. Heynoldt.

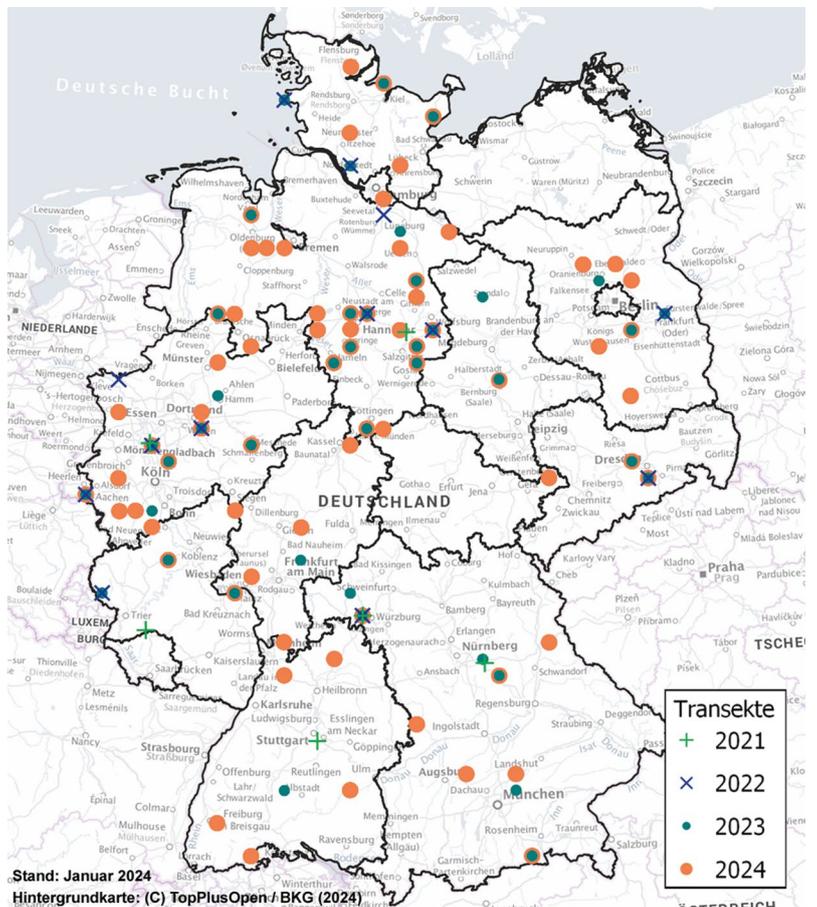


ABB. 4 Verteilt über weite Teile Deutschlands werden Hummeln von zahlreichen Ehrenamtlichen erfasst. Die Anzahl der dadurch untersuchten Transekte konnte seit dem Beginn im Jahr 2021 stetig gesteigert werden.

Langfristige Entwicklung

Damit langfristige Bestandstrends von Hummeln erkannt werden können, soll das Monitoring sukzessive auf einer Vielzahl von Untersuchungsflächen umgesetzt werden. Der tötungsfreie Ansatz ermöglicht dabei einen niedrighwelligen Einstieg für Ehrenamtliche. Engagieren können sich daher alle, die sich für Hummeln interessieren, mehr über sie lernen oder sich einfach an der Datenerhebung für die Forschung beteiligen möchten. Ob aus den Bereichen Naturschutz oder Landwirtschaft, aus Forschung oder Handwerk, ob Student/-in oder Rentner/-in – die Vielfalt der bislang beteiligten Ehrenamtlichen ist groß.

Ein weiteres Ziel des Programms ist die Förderung der Artenkenntnis. Begleitend zum Monitoring wurden Angebote wie Webinare, Videotutorials und Bestimmungshilfen rund um die spannende Artengruppe der Hummeln entwickelt. Außerdem werden die Ergebnisse der Expertenvalidierung an die Ehrenamtlichen individuell zurückgemeldet. Auf diese Weise können diese ihre Bestimmungsergebnisse abgleichen und ihre persönlichen Fähigkeiten weiterentwickeln.

In den letzten Jahren stieg die Anzahl der teilnehmenden Personen stetig an (Abbildung 4). In der aktuellen Saison 2024 sind bereits mehr als 80 Ehrenamtliche in ganz

Deutschland unterwegs: als Einzelperson, in Paaren oder in größeren Gruppen. Alle zusammen sammeln auf diese Weise wertvolle Daten, die einen großen Beitrag zur Erforschung und zum Schutz der Hummeln leisten. Und ganz nebenbei kann so ein „Hummel-spaziergang“ auch noch richtig Spaß machen. Weitere Informationen zum Hummel-Monitoring in Agrarlandschaften und wie man sich beteiligen kann, finden sich auf der Projektseite wildbienen.thuenen.de/hummel-monitoring.

Frank Sommerlandt, Sophie Ogan, Leonie Lakemann, Demetra Rakosy, Thünen-Institut

WUNDHEILUNG

Primaten als „Heiler“

Eine gezielte Wundbehandlung könnte schon bei unseren letzten gemeinsamen Vorfahren von Mensch, Orang-Utan, Schimpansen und Co. üblich gewesen sein. Darauf weisen jüngste Ergebnisse von Forschungen in den Urwäldern Afrikas hin. Selbstmedikation durch Verzehr bestimmter Pflanzenteile ist bei Tieren weit verbreitet, kommt aber eher selten vor.

Es ist bekannt, dass Menschenaffen bestimmte Pflanzen zur Behandlung von Parasiteninfektionen zu sich nehmen und Pflanzenmaterial auf ihre Haut reiben, um Muskelschmerzen zu lindern. Auch wurde kürzlich in Gabun beobachtet, wie eine Schimpansengruppe Insekten auf Wunden auftrug. Eine aktive Wundbehandlung mit einer biologisch aktiven Substanz wurde bislang bei Tieren allerdings noch nicht dokumentiert. Umso interessanter ist vor diesem Hintergrund eine Mitteilung von Kognitions- und Evolutionsbiologen des Max-Planck-Instituts für Verhaltensbiologie in Konstanz über Hinweise auf eine Wundbehandlung mit einer Heilpflanze bei einem wilden männlichen Sumatra-Orang-Utan und die gezielte Nutzung von Heilpflanzen durch Schimpansen bei der Behand-

lung von Krankheiten und Verletzungen [1].

„Seit 1994 beobachten wir wilde Sumatra-Orang-Utans am Forschungsstandort Suq Balimbing, einem geschützten Regenwaldgebiet, das hauptsächlich aus Torfsumpfwald besteht und die Heimat von ca. 150 vom Aussterben bedrohten Sumatra-Orang-Utans ist“, so die Erstautorin der Studie, Isabelle Laumer. „Bei der täglichen Beobachtung der in der Gegend lebenden Orang-Utans fiel uns auf, dass der männliche Orang-Utan Rakus eine Gesichtswunde erlitten hatte, höchstwahrscheinlich während eines Kampfes mit einem benachbarten männlichen Artgenossen.“

Drei Tage nach der Verletzung riss Rakus selektiv Blätter einer Liane mit dem gebräuchlichen Namen Akar Kuning (*Fibraurea tinctoria*)

ab, kaute darauf herum und trug den resultierenden Saft dann mehrere Minuten lang immer wieder auf die Gesichtswunde auf (Abbildung 1). Schließlich bedeckte er die Wunde vollständig mit den zerkaute Blättern. „Diese und verwandte Lianenarten kommen in tropischen Wäldern Südostasiens vor, sind für ihre schmerzstillende und fiebersenkende Wirkung bekannt und werden in der traditionellen Medizin zur Behandlung verschiedener Krankheiten wie Malaria eingesetzt“, sagt Isabelle Laumer.

Dass Schimpansen gezielt Pflanzen mit medizinischen Eigenschaften verzehren könnten, um zu heilen, zeigen jüngste Beobachtungen an Schimpansen (*Pan troglodytes*) im Regenwald von Bodongo (Uganda). Das Forscherteam um Dr. Fabien Schultz (Hochschule Neubrandenburg) und Dr. Elodie Freymann (*School of Anthropology & Museum Ethnography* der Universität Oxford) kombinierte Verhaltensbeobachtungen an wild lebenden Schimpansen mit pharmakologischen Tests der potenziell medizinischen Pflanzen, die erstere in ungewöhnlichen Situationen konsumieren. Die Forscher beobachteten das Verhalten und die Gesundheit von

Weitere Hinweise darauf, wie sich Tiere im „Gesundheitssystem“ betätigen - etwa wie Ameisen die „Triage“ meistern, welches Potenzial im Bienengift steckt, wie Bärtierchen im Eis überleben und welche „magische“ Kraft Licht entfalten kann - finden sich im neuen Buch unseres Autors Wilhelm Irsch.



256 Seiten, 24,00 €
ISBN 978-3-98726-123-7.
Auch als E-Book erhältlich.
<https://www.oekom.de/buch/meister-der-anpassung-9783987261237>



ABB. 1 Gesichtswunde des erwachsenen männlichen Orang-Utans Rakus (Foto aufgenommen zwei Tage vor dem Auftragen des Pflanzenbreis auf die Wunde). Foto: Armas / Suaq Project.

51 Schimpansen aus zwei Gemeinschaften und sammelten danach 17 Proben von 13 Baum- und Kräutartern aus dem Regenwald, von denen sie annahmen, dass die Schimpansen sie zur Selbstmedikation verwenden könnten. Dazu gehörten Pflanzen, die zuvor von kranken oder verletzten Schimpansen eingenommen oder aufgetragen wurden, die aber nicht zu ihrer normalen Ernährung gehörten.

Die Pflanzenproben wurden dann an der Hochschule Neubrandenburg auf ihre entzündungshemmenden und antibiotischen Eigenschaften u. a. auch gegen klinische Isolate antibiotikaresistenter Bakterienstämme getestet. Insgesamt wurden 53 Extrakte *in vitro* auf eine pharmakologische Wirkung untersucht.

Das Ergebnis: 88 Prozent der Pflanzenextrakte hemmten das Bakterienwachstum, während 33 Prozent entzündungshemmende Eigenschaften aufwiesen. Das tote Holz eines Baumes aus der Familie der Hundsgiftgewächse (*Alstonia boonei*)

zeigte die stärkste antibakterielle Wirkung und hatte auch entzündungshemmende Eigenschaften – ein Hinweis, dass die Schimpansen es zur Behandlung von Wunden nutzen könnten. Interessanterweise wird *A. boonei* auch in einigen ländlichen ostafrikanischen Dörfern als Heilpflanze zur Behandlung einer Vielzahl von krankhaften Zuständen verwendet, darunter bakterielle Infektionen, Magen-Darm-Probleme, Schlangenbisse und Asthma.

Die Rinde und das Harz des ostafrikanischen Mahagonibaums (*Kbaya anthotheca*) und die Blätter eines Farns (*Christella parasitica*) zeigten starke entzündungshemmende Effekte. Das Forscherteam beobachtete, wie ein männlicher Schimpanse mit einer verletzten Hand die Blätter des Farns suchte und aß, was möglicherweise zur Linderung von Schmerzen und Schwellungen beitrug. Sie beobachteten auch, dass ein Individuum mit einer parasitären Infektion die Rinde des Katzendornbaums (*Scutia myrtina*) fraß, was bei den Schimpansen dieser Gruppe

noch nie beobachtet worden war. Die Laboruntersuchungen ergaben, dass diese Rinde sowohl entzündungshemmende als auch antimikrobielle Eigenschaften hat.

Die Forschenden werten die Ergebnisse als „überzeugenden Beweis dafür, dass Schimpansen bestimmte Pflanzen aufgrund ihrer medizinischen Wirkung aufsuchen.“ Sie knüpfen daran die Erwartung, dass die im Bodongo-Regenwald wachsenden Heilpflanzen die Wirkstofffindung und die Entwicklung wertvoller neuer Medikamente unterstützen könnten.

Die Folgerungen des Forscherteams: Schimpansen können gezielt Pflanzen mit medizinischen Eigenschaften verzehren, um ihre Beschwerden zu behandeln. Wildlebende Schimpansen fressen viele verschiedene Pflanzen, darunter auch solche, die zwar nährstoffarm sind, aber die Symptome von Krankheiten behandeln oder lindern können. Bisher war es schwierig festzustellen, ob Schimpansen sich selbst behandeln, indem sie absichtlich nach Pflanzen mit Eigenschaften suchen, die ihnen bei ihren spezifischen Beschwerden helfen, oder ob sie Pflanzen, die zufällig medizinisch wirken, passiv konsumieren. Die Studie ist die bisher gründlichste Analyse, die sowohl verhaltensbiologische als auch pharmakologische Belege für den medizinischen Nutzen des Verzehrs von Rinde und Totholz für wildlebende Schimpansen kombiniert [2].

Literatur:

- [1] I. B. Laumer et al. (2024). *Sci Rep*14, 8932, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58988-7>
- [2] E. Freymann et al. (2024) *PLoS ONE* 19(6), e0305219, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0305219>

Wilhelm Irsch,
Rebblingen-Siersburg

JUBILÄUM

Von Zellbiologie bis CRISPR/Cas – neues Wissen für die Schule

Im Gläsernen Labor auf dem Forschungscampus Berlin-Buch können Schüler/-innen und Lehrkräfte tief in die Naturwissenschaften eintauchen. In diesem Jahr feiert die Einrichtung ihr 25-jähriges Bestehen.

Der weiße Kittel ist mehr als Schutzkleidung. Er ist ein Symbol. Das hat Claudia Jacob, die das Gläserne Labor auf dem Forschungscampus Berlin-Buch leitet, schon oft beobachtet. Jährlich besuchen etwa 14.000 Schüler/-innen und Lehrkräfte das Schülerlabor im grünen Norden von Berlin. „Sie schlüpfen in eine andere Rolle, wenn sie den Kittel anziehen“, erzählt Claudia Jacob. „Als würde in diesem Augenblick der Forschergeist in ihnen erwachen.“

Ende der 1990er Jahre kam der Gründungsdirektor des Max Delbrück Centers, Professor Detlev Ganten, auf die Idee, ein Informationszentrum zum Thema Gen- und Biotechnologie für Bürger/-innen einzurichten. Besucher/-innen sollten dort Wissenschaftler/-innen bei der Arbeit im Labor über die Schulter schauen können. Doch Dr. Ulrich Scheller, damals Teamleiter Öffentlichkeitsarbeit bei der Campus Berlin-Buch GmbH (CBB), heute einer ihrer Geschäftsführer, war klar, dass Zusehen allein nicht reicht. „Um Menschen für die Forschung zu begeistern, müssen sie selbst Hand an Pipette und Reagenzglas legen können“, ist der Biochemiker überzeugt. Also wurde das Konzept noch einmal umgeschrieben. Im April 1999 öffnete das Gläserne Labor nach dreijährigem Umbau seine Pforten in der denkmalgeschützten Remise auf dem Forschungscampus als Schülerlabor.

Mehr als 20 Kurse

Mit vier Versuchen zur Molekulargenetik ging es damals an den Start. Heute, 25 Jahre später, gibt es insgesamt sechs Labore. Damit gehört das

Gläserne Labor zu den größten Einrichtungen seiner Art in Deutschland. Die CBB betreibt das Schülerlabor gemeinsam mit dem Max Delbrück Center und dem Leibniz-Forschungsinstitut für Molekulare Pharmakologie (FMP); zahlreiche Sponsoren und Partner, darunter das am Campus ansässige Strahlen- und Medizintechnikunternehmen Eckert & Ziegler, unterstützen sie dabei. Zusammen bieten sie mehr als 20 Experimentierkurse zur Molekular-, Zell- und Neurobiologie, Chemie, Radioaktivität sowie Ökologie an. „Wir gehören zu den wenigen Schülerlaboren in Deutschland, in denen Jugendliche sogar Experimente mit der Genschere CRISPR/Cas9 durchführen können“, sagt Ulrike Mittmann, wissenschaftliche Leiterin des Labors für Molekularbiologie. Weil in der Molekularbiologie unter anderem mit Zellen oder Krankheits-erregern gearbeitet wird oder Organismen gentechnisch verändert werden, gelten strenge Sicherheitsvorschriften. Schulen können diese nicht gewährleisten – aber das Gläserne Labor. So führt es junge Leute an aktuelle Forschungsthemen heran.

Für alle etwas dabei

Auch jüngere Kinder im Grundschul- und Kindergartenalter kommen im Forschergarten des Gläsernen Labors auf ihre Kosten. Daneben gibt es Arbeitsgemeinschaften für Schüler/-innen, Forscherferien, Vorlesungen und Laborkurse zur Studienvorbereitung. Lehrkräfte lernen in Fortbildungen neu konzipierte Kurse des Gläsernen Labors kennen. Das Max Delbrück Center bietet ihnen darüber hinaus im Format „Labor trifft Lehrer:in“ Einblicke



ABB. 1 Beladen eines Agarosegels. Alle Fotos: Peter Himsel/CCB.

in aktuelle Forschungsthemen und -methoden wie die Einzelzellanalyse oder Künstliche Intelligenz in der Biomedizin. Gemeinsam mit dem Max Delbrück Center, dem FMP und dem *Experimental and Clinical Research Center* richtet das Gläserne Labor den Regionalwettbewerb „Jugend forscht“ Berlin-Brandenburg aus – zuletzt im Februar dieses Jahres. Insgesamt 95 Schüler/-innen präsentierten ihre Projekte im Max Delbrück Communications Center und erhielten im Rahmenprogramm Einblicke in die Forschungseinrichtungen und das Schülerlabor des Campus.

„Wichtigstes Anliegen des Gläsernen Labors ist die Nachwuchsförderung“, sagt Ulrich Scheller. „Einerseits vermitteln wir Grundkenntnisse für alle, andererseits fördern wir besonders leistungsstarke Schüler/-innen, auch um sie auf eine Karriere in den Naturwissenschaften beziehungsweise der Life-Science-Branche vorzubereiten.“ Denn Nachwuchs ist überall knapp – auch in den Forschungslaboren. Deshalb sei es wichtig, junge Menschen auf eine Ausbildung oder ein Studium in diesem Bereich neugierig zu machen, sagt Scheller. Seine Co-Geschäftsführerin Dr. Christina Quensel fügt hinzu: „Wir wollen den Jugendlichen vermitteln, dass Forschende sich nicht mit abstrakten Fragestellungen befassen, die außer ihnen niemand versteht, sondern dass ihre Arbeit die gesamte Gesellschaft betrifft.“ Deshalb stehen ne-



ABB. 2 Aufbau der Ussing-Kammer für die Membranpotenzialmessung.

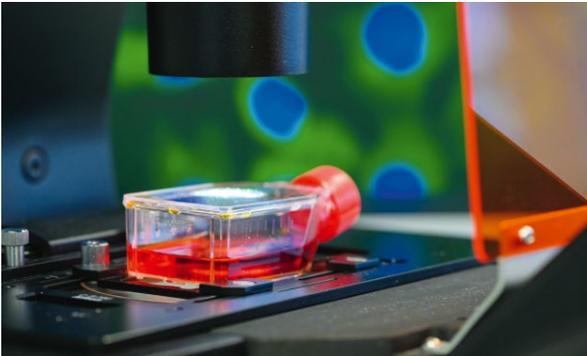


ABB. 3 Zellkultur unter dem Invers-Mikroskop.

ben dem Schulstoff auch ethische Fragen auf der Agenda, etwa die Frage, wofür Tierversuche notwendig sind, warum bei Stammzelltherapien besondere Vorsicht geboten ist oder was der genetische Fingerabdruck über einen Menschen verrät. Der persönliche Kontakt von Forschenden und Schüler/-innen ist für beide Seiten anregend. „Es ist wichtig, ab und zu aus dem Elfenbeinturm der Grundlagenforschung herauszukommen und die eigene Arbeit leicht verständlich zu erklären“, sagt Quensel. „Nicht wenige Wissenschaftler/-innen haben sich nach einer solchen Erfahrung für den Quereinstieg in den Lehrerberuf entschieden.“

Wie im Fußball

Für die Entwicklung der Kursinhalte arbeitet das Team des Gläsernen Labors eng mit Lehrkräften aus vier Berliner Partnerschulen zusammen. Sie unterstützen die Laborkräfte dabei, Themen der Spitzenforschung so aufzubereiten, dass sie zum Rahmen-

lehrplan passen. „Es bedeutet für Lehrer/-innen einiges an Aufwand, sich mit einer Schulklasse auf den Weg zu uns zu machen“, erzählt Ulrich Scheller. „Sie müssen die Eltern informieren, Geld einsammeln und mit der S-Bahn nach Buch kommen. Das heißt: Wir müssen ihnen auch etwas bieten, das sie gut für ihren Unterricht nutzen können.“

Wer einmal gesehen hat, wie Claudia Jacob Schüler/-innen begrüßt, die zu einem Neurobiologie-Kurs kommen, hat keinen Zweifel daran, dass das gelingt. Sie stattet die Jugendlichen mit speziellen Brillen aus und lässt sie im Foyer des Max Delbrück Communications Centers Ball spielen. Schnell breitet sich Gelächter aus. Die Brillen ändern den Sehwinkel, das Werfen und Fangen funktioniert überhaupt nicht – so fühlt es sich an, wenn unser Gehirn und das Nervensystem in die Irre geführt werden. „Ein solcher Auftakt weckt die Neugier auf das Thema“, sagt Claudia Jacob. Am eigenen Leib erfahren, was kurz danach in verschiedenen Experimenten ausprobiert wird, erleichtert das Begreifen ungemein. Biologie ist dann nicht länger ein Unterrichtsfach, sondern die Wissenschaft, die uns lehrt, wie ein Organismus funktioniert. „Das ist wie beim Fußball“, bringt es Ulrike Mittmann auf den Punkt. „Wer alle Regeln auswendig aufsagen kann und theoretisch weiß, dass das Runde ins Eckige muss, wird noch lange kein Weltmeister. Weltmeister kann nur werden, wer selbst über den Rasen sprintet.“

Praktische Arbeit wird im Gläsernen Labor deshalb großgeschrieben. Wieviel Koffein steckt in Cola, wie werden Duftöle aus Pflanzen gewonnen, wie lange braucht ein Nervenimpuls vom Gehirn bis zum großen Zeh – all dies und noch viel mehr finden die Schüler/-innen unter Anleitung von Claudia Jacob oder ihrer Kolleg/-innen heraus. Am Ende präsentieren sie ihre Ergebnisse vor der Klasse. Die Kursinhalte sind nicht in

Stein gemeißelt, ständig kommt Neues hinzu. Dr. Bärbel Görhardt, die das Chemielabor wissenschaftlich leitet, tüfelt derzeit an zwei neuen Kursen: einem über Farbstoffe in Algen und wie man sie gewinnen kann, und einem über Enzyme, die wie Katalysatoren verschiedene chemische Reaktionen im Körper auslösen oder beschleunigen.

Digitalisierung im Labor

„Künftig möchten wir das Angebot des Gläsernen Labors noch stärker mit der aktuellen Forschung auf dem Campus verzahnen“, sagt Professorin Maike Sander, Wissenschaftliche Vorständin und Vorstandsvorsitzende des Max Delbrück Centers. Unter anderem sollen die Schüler/-innen an innovative Technologien wie Einzelzellsequenzierung oder neue bildgebende Verfahren herangeführt werden. Außerdem werden Forschende einen festen Platz in den Kursen bekommen – wenn auch nicht immer persönlich vor Ort, so doch in Form kurzer Videos. Darin erklären sie ihre eigenen Experimente, die den Experimenten im Gläsernen Labor gar nicht so unähnlich sind. „So sehen die Jugendlichen, dass ihre Experimente nah dran sind an der echten Forschung“, sagt Maike Sander. Zudem kommen neue Medien stärker zum Einsatz: Beispielsweise können die Schüler/-innen mithilfe von Virtual-Reality-Brillen in ein menschliches Herz hineinblicken. „Wenn sie mit eigenen Augen ein fehlgefaltetes Protein sehen und welche Kettenreaktion daran hängt, können sie viel besser nachvollziehen, wie sich das auf die Funktion des Herzens auswirkt“, erläutert Sander. Als Teil seines Graduiertenprogramms hat das Max Delbrück Center einen Kommunikationskurs gestartet, in dem die Doktorand/-innen Erklärungsvideos und Animationen für das Gläserne Labor produzieren. Darüber hinaus möchte das Max Delbrück Center digitale Arbeitshefte und Lehrmaterialien für die Schule bereitstellen.

Aktuelle wissenschaftliche und technologische Entwicklungen stärker aufgreifen möchte auch das FMP. „Ein spannendes Feld ist die künstliche Intelligenz, wo wir Projekte entwickeln möchten, die es den Schüler/-innen ermöglichen, Grundlagen der KI zu verstehen, und wo wir Anwendungsbereiche in unseren Forschungsgebieten sehen“, erläutert Professorin Dorothea Fiedler, Direktorin am FMP. Und die Laborleiterinnen des Gläsernen Labors wünschen sich eine stärkere Digitalisierung ihrer Arbeit: So könnten die Schüler/-innen Arbeitsanweisungen über Tablets erhalten und ihre Ergebnisse in der Cloud abspeichern sowie darüber versenden. Auch für die Mikroskopie böten die neuen Medien großartige Möglichkeiten, sagt Ulrike Mittmann: „Die eigenen Blutkörperchen nicht nur durchs Okular betrachten, sondern groß auf einem Screen – und die Aufnahme am Ende als Screensaver auf dem Smartphone mit nach Hause nehmen – das wäre doch großartig!“

Sinnvoller geht nicht

Allen Beteiligten geht es darum, Leidenschaft für die Forschung zu entfachen. So auch Paola Eckert-Palvarini, Mitglied im Aufsichtsrat der Eckert & Ziegler AG. Sie hat neben dem Forschungsgarten auch das Radioaktivitätslabor initiiert. „Radioaktivität hat in Deutschland einen schlechten Ruf“, sagt die Strahlenphysikerin, „aus Unwissenheit.“ Die möchte sie aus der Welt schaffen. Neben Experimenten vermittelt sie praktisches Wissen. Natürliche Strahlung sei überall: „Es gibt kosmische Strahlung aus dem Weltall, radioaktive Elemente und Steine im Boden geben Strahlung ab, auch bestimmte Nahrungsmittel und sogar wir Menschen selbst.“ Von dieser natürlichen Hintergrundstrahlung gehe keine Gesundheitsgefahr aus. Anders sehe das aus bei Strahlung, die beispielsweise in Industrie und Medizin erzeugt und genutzt wird, etwa beim Messen der Dicke von Papier oder in der Therapie gegen Krebs. Davor müsse man jedoch keine Angst haben, erklärt die

Wissenschaftlerin: „Denn wir können Radioaktivität messen, wir können sie sinnvoll nutzen und uns vor ihr schützen.“

Darüber hinaus will Eckert-Palvarini vermitteln, wie der Forschungsbetrieb funktioniert und was alles dazu gehört, damit Forschungsergebnisse nicht in der Schublade verschwinden. Die Wissenschaftlerin ist auch Unternehmerin. „Forschen bedeutet nicht nur, im Labor zu stehen und den eigenen Traum zu verfolgen“, sagt sie. „Es geht auch darum, Erkenntnisse und Erfindungen für die Menschen nutzbar zu machen.“ Dazu gehören Patente und Lizenzen ebenso wie Unternehmensgründungen. Die Schüler/-innen fragen ihr dazu manchmal Löcher in den Bauch. „Von allen Dingen, die ich tue, erfüllen mich die Schülerkurse am meisten“, sagt Eckert-Palvarini. „Ich gehe danach mit dem Gefühl nach Hause, wirklich etwas Sinnvolles geleistet zu haben.“

Zukunftseuphorie in Buch

Nach 25 Jahren ist das Gläserne Labor nun auf dem Weg, über die Grenzen des Forschungscampus hinauszuwachsen. Im neuen Bildungs- und Integrationszentrum, das auf der Freifläche Groscurthstraße 21-33 in der Ortsmitte von Berlin-Buch entstehen soll, wird es drei Labore betreiben – „technisch nicht ganz so hochgerüstet wie die Labore auf dem Campus, sondern eher familientauglich ausgestattet, so dass Kinder spielerisch an naturwissenschaftliche Themen herangeführt werden können“, erklärt Ulrich Scheller. Das Gläserne Labor rückt damit ins Zentrum von Buch und übernimmt eine weitere gesamtgesellschaftliche Aufgabe am Zukunftsort: Menschen jeden Alters nahezubringen, wie Wissenschaft funktioniert. Ihnen vor Augen führen, dass es zum normalen wissenschaftlichen Diskurs gehört, wenn Forschende unterschiedliche Ansichten vertreten. „In der Forschung führen nun einmal viele unterschiedliche Wege



ABB. 4 Schüler/-innen untersuchen Mutationen als Ursache einer Erbkrankheit (Kinderdemenz).



ABB. 5 Schülerexperiment „Leuchtende Bakterien“ im Kurs „Klonierung“.

zum Ziel“, sagt Christina Quensel. „Dabei kann es passieren, dass neues Wissen alles auf den Kopf stellt, was wir bis dahin zu wissen glaubten. Diese Zukunftseuphorie wollen wir an die Menschen weitergeben.“

So sieht es auch Dorothea Fiedler: „Wir wollen nicht nur Wissen vermitteln, sondern auch Neugier wecken und die Fähigkeit fördern, wissenschaftliche Methoden anzuwenden und zu hinterfragen.“ Das ist auch Claudia Jacob wichtig – „gerade heute, da so viele Wissenschaftsskeptiker auf den Plan treten und ihre alternativen Wahrheiten verbreiten.“ Selbst einmal in einen Kittel und damit in die Rolle von Forschenden zu schlüpfen, kann dabei helfen, sich ein fundiertes Urteil zu bilden.

Jana Erhardt-Joswig/CBB

Der Artikel wurde zuerst im Standortjournal des Campus Berlin-Buch „buchinside“ in der Ausgabe 1/24 veröffentlicht. Wir danken dafür, dass wir den Artikel in BiuZ abdrucken durften!

Das Gläserne Labor Berlin stellten wir in BiuZ 2/21 als außerschulischen Lernort vor.

Eine kategoriale Geschlechtszuordnung wird der Variabilität der Individuen nicht gerecht

Weiblich – männlich – divers: Ist es so einfach?

DIETHARD TAUTZ

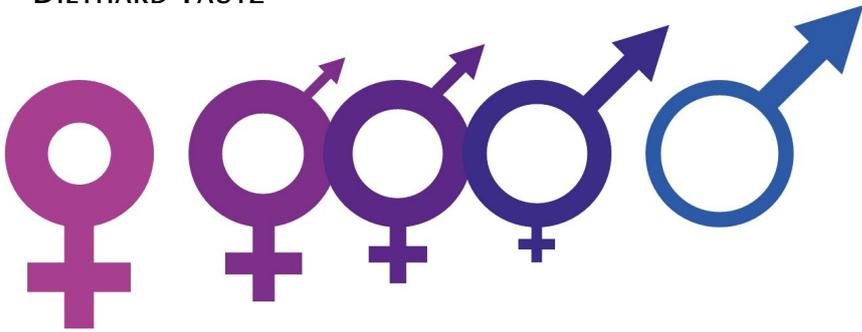


Abb.: P. Eitner.

Die evolutionsbiologische Funktion von sexueller Vermehrung ist die Erzeugung genetisch unterschiedlicher Individuen. Dadurch entsteht ein Spektrum an Phänotypen und Verhaltensweisen der Geschlechter, das man nicht kategorisieren sollte. Die Diskussion um Geschlechtsidentitäten sollte die Variabilität in den Mittelpunkt stellen, nicht die Binärität. Dann lassen sich biologische und soziologische Standpunkte auch in Einklang bringen.

Sexuelle Vermehrung ist im Tier- und Pflanzenreich weit verbreitet. Max Delbrück erhob 1949 diese Beobachtung aus Sicht eines Physikers zu einer der Grundfesten der Biologie: „In der Geschichte der Biologie sind Entdeckungen von großer Allgemeingültigkeit zu finden, wie die des Vorkommens der sexuellen Fortpflanzung in allen lebenden Formen und der zellulären Struktur der Organismen“ [1]. Zweifellos dachte er dabei an eine binäre Sexualität mit männlichen und weiblichen Individuen. In einer biologischen Definition kann man diese beiden Geschlechter über ihren binären Gametenstatus bestimmen (s. auch den Artikel „Geschlecht und Gender: Eine biologische Perspektive“ in dieser Biuz-Ausgabe). Die Ausprägung des Geschlechts kann allerdings sehr variabel sein, so dass sie mit rein binären Kategorien nicht zu

beschreiben ist. Diese Einsicht hat sich nur langsam durchgesetzt, aber jetzt trägt ihr auch der Gesetzgeber Rechnung.

Zum 1. November dieses Jahres (2024) ist das Selbstbestimmungsgesetz [2] in Kraft getreten. Es ermöglicht jeder Person, den Geschlechtseintrag und den Vornamen im Personenstandsregister zu ändern, ohne dafür ein kompliziertes Verfahren durchlaufen zu müssen. Schon seit einigen Jahren erlaubt das Personenstandsregister nicht nur die Kategorien „weiblich“ und „männlich“ einzutragen, sondern als dritte Option auch „divers“. Das Bundesverfassungsgericht hatte 2017 dazu entschieden, dass das allgemeine Persönlichkeitsrecht auch die geschlechtliche Identität derjenigen schützt, die sich weder dem männlichen noch dem weiblichen Geschlecht zuordnen lassen [3].

Einerseits klingt das nach einer progressiven Entwicklung – insbesondere im Vergleich zu früheren Gesetzen, die sich mit Geschlechtsidentitäten befasst haben. Andererseits betont der Gesetzgeber aber damit einmal mehr, dass es eine grundsätzliche Klassifizierbarkeit der Geschlechter gibt – jetzt jedoch mit dem Zugeständnis, dass sich nicht alle Personen unter weiblich oder männlich einordnen lassen.

Aber wird das dem phänotypischen Spektrum der Individuen wirklich gerecht? Und was will man mit der Klassifizierung eigentlich erreichen? Was bedeutet es denn, männlich oder weiblich oder divers zu sein und warum kann man das einfach wechseln? In der aufgeladenen Diskussion um die Kategorien und die Fluidität der Geschlechter sollte man sich nicht einfach auf biologische Definitionen einer grundsätzlichen Zwei-Geschlechtlichkeit zurückziehen und Gender-Diversität als anthropozentrisch interpretieren [4]. Wenn man die Frage aus evolutionsbiologischer und genetischer Sicht betrachtet, wird man feststellen, dass ein Ausgangspunkt, in dem die Variabilität der Individuen im Mittelpunkt steht, einen viel besseren Ansatz zum Verständnis der Geschlechter liefert.

Das Rätsel sexueller Reproduktion

Die Evolutionsbiologie rätselt seit Jahrzehnten, welche populationsgenetischen Mechanismen notwendig sind, um sexueller Reproduktion gegenüber asexueller Repro-

THEORIEN ZUR LÖSUNG DES "TWO-FOLD COST OF SEX"-PROBLEMS

1. Fisher-Muller-Hypothese

Die Hypothese besagt, dass die sexuelle Fortpflanzung eine schnellere Evolution ermöglicht, indem sie vorteilhafte Mutationen von verschiedenen Individuen zusammenführt. In ungeschlechtlichen Populationen müssen vorteilhafte Mutationen nacheinander in derselben Abstammungslinie auftreten, was viel länger dauert. Bei der sexuellen Fortpflanzung können durch Rekombination mehrere vorteilhafte Mutationen in den Nachkommen kombiniert werden, was die allgemeine Anpassungsfähigkeit der Population erhöht. Allerdings ist das nur ein langfristiger Vorteil, der kurzfristige Evolution nicht ausreichend erklären kann.

2. „Muller's ratchet“-Hypothese

Die Hypothese fokussiert darauf, dass die sexuelle Fortpflanzung die Anhäufung von schädlichen Mutationen verhindern kann. In ungeschlechtlichen Populationen können sich Mutationen, die die Fitness verringern, über Generationen hinweg anhäufen, ohne dass es eine Möglichkeit gibt, sie zu eliminieren. Darauf bezieht sich der Begriff „ratchet“ (Ratsche). Jede einzelne Mutation wird als ein Klick in einer Seil-Ratsche gesehen, der nicht mehr zurückgestellt werden kann. Die mit der sexuellen Fortpflanzung einhergehende Rekombination der Chromosomen kann aber eine derartige „Rückstellung“ bewirken. Auch diese Hypothese erklärt also nur die langfristigen Konsequenzen.

3. Red-Queen-Hypothese

Die Hypothese besagt, dass die sexuelle Fortpflanzung vorteilhaft ist, weil sie im evolutionären Konflikt zwischen Parasiten und Wirten die Möglichkeit zur raschen Anpassung erhöht. Da Parasiten und Krankheitserreger auf Grund kurzer Generationszeiten schnell evolvieren können, sorgt die sexuelle Fortpflanzung

der Wirte für eine genetische Vielfalt, um schnell die nötigen Resistenzen zu entwickeln. Der Konflikt endet letztlich nie, da auch die Parasiten weiter evolvieren. Der Begriff „Red-Queen-Hypothese“ lehnt sich an die Figur der Roten Königin in dem Buch „Alice hinter den Spiegeln“ von Lewis Carroll an. Dort erklärt die Rote Königin Alice: „Hierzulande musst Du so schnell rennen, wie Du kannst, wenn Du am gleichen Fleck bleiben willst.“

4. Tangled-Bank-Hypothese

Im Mittelpunkt dieser Hypothese steht die Vorstellung, dass die sexuelle Fortpflanzung eine genetische Vielfalt schafft, die dazu beiträgt, den Wettbewerb zwischen den Nachkommen zu verringern. In Umgebungen mit begrenzten Ressourcen können Geschwister, die sich genetisch unterscheiden, unterschiedliche Nischen oder Ressourcen nutzen, wodurch sich die Überlebenschancen insgesamt erhöhen. Die Bezeichnung tangled bank bezieht sich auf ein Zitat von Darwin in seinem Buch Origin of Species, in dem er die Komplexität eines Ökosystems beschreibt (im Originalzitat benutzt Darwin den synonymen Ausdruck entangled bank).

5. Bet-Hedging-Hypothese

Diese Hypothese besagt, dass die sexuelle Fortpflanzung eine Strategie für Organismen darstellt, die in unvorhersehbaren Umgebungen leben. Durch die Erzeugung genetisch unterschiedlicher Nachkommen erhöht die sexuelle Fortpflanzung die Wahrscheinlichkeit, dass zumindest einige von ihnen unter den sich ändernden Bedingungen überleben. Der Begriff hedging stammt ursprünglich aus der Finanzwelt und beschreibt die Strategie einer Absicherung der Investitionen gegen Risiken.

duktion einen Fitnessvorteil zu verschaffen. Dass für die sexuelle Reproduktion zwei Individuen zusammenkommen müssen, bringt nämlich wesentliche Probleme mit sich. Die Suche nach einem passenden Partner kostet Zeit und Energie, die dann nicht für die Produktion der Nachkommen zur Verfügung steht. Aber noch problematischer ist, dass nur ein Partner Nachkommen produziert und der andere nur die Spermien liefert. Schon allein auf Grund dieses Effekts sollten Spezies, die auf sexuelle Reproduktion verzichten, einen zweifachen Fitnessvorteil haben – weil sie doppelt so viele Nachkommen produzieren können. Dieses Problem wird im Englischen als *two-fold cost of sex* bezeichnet. Seit es von Maynard Smith 1978 in seinem Buch „*The Evolution of Sex*“ [5] thematisiert wurde, sind viele Evolutionsbiologinnen und Evolutionsbiologen inspiriert worden, dafür Erklärungen zu finden. Dementsprechend gibt es viele Theorien dazu (Kasten „Theorien zur Lösung des *“two-fold cost of sex”*-Problems“). Derzeit scheint ein pluralistischer Ansatz am vielversprechendsten, also nicht nur einen einzelnen Faktor zur Erklärung heranzuziehen, sondern ein Zusammenwirken mehrerer Faktoren anzunehmen [6].

Alle diese Theorien haben aber eine gemeinsame Basis: Sie gehen von einer Variabilität zwischen den Individuen aus, auf deren Basis Evolutionsprozesse erst wirken können. Aber diese Variabilität muss erst einmal generiert werden. Sexuelle Reproduktion ist dafür der effizienteste Prozess, da sie in jeder neuen Generation mit einer Rekombination

IN KÜRZE

- Sexuelle Reproduktion ist ein Mechanismus zur **Generierung genetischer Variabilität** als Voraussetzung für evolutionäre Anpassungen.
- Der Phänotyp und das Verhalten der Geschlechter wird durch **polygene Mechanismen** generiert, die durch überlappende Verteilungen und Interaktion mit der Umwelt gekennzeichnet sind.
- Gender-Eigenschaften und sexuelle Fluidität sind Teil und **Ausdruck der genetischen und umweltbedingten Variabilität**.
- Eine Kategorisierung von Geschlechtern **wird der Variabilität der Individuen nicht gerecht**.

der genetischen Varianten der Eltern verbunden ist. Egal welcher Faktor das „two-fold cost of sex“-Problem am besten zu erklären mag, so liegt der Schlüssel letztlich in der Variabilität zwischen den Individuen. Die fundamentale Funktion sexueller Vermehrung ist also nicht die reine Erzeugung von Nachkommen (dies wäre durch asexuelle Vermehrung viel effizienter möglich), sondern durch Rekombination Variabilität zwischen den Nachkommen zu generieren. Aber das klingt schon sehr nach Zirkelschluss, wenn man sagt, dass sexuelle Reproduktion nötig ist, um das evolutionäre Problem sexueller Reproduktion zu lösen. Also muss es einen anderen Ausgangspunkt für die Entstehung sexueller Reproduktion geben.

Der Ursprung sexueller Vermehrung

Die Rekombination von genetischem Material war schon vom Anbeginn des Lebens ein entscheidender Faktor der Evolution. Ohne Rekombination, also bei strikt asexueller Zellteilung und Vermehrung, sammeln sich nämlich nachteilige Mutationen in den klonalen Linien an. Da der Mutationsprozess zufällig ist, können diese nicht einfach durch Rück-Mutationen wieder aufgehoben werden. Es ist eben sehr unwahrscheinlich, dass das gleiche Nukleotid im Erbmaterial durch eine erneute Mutation wieder seinen Ausgangszustand einnimmt. Die zunehmende Ansammlung von schädlichen Mutationen würde also zum Aussterben der Linien führen. Dieser Effekt wird heute als „Muller's ratchet“ bezeichnet (vgl. Kasten „Theorien zur Lösung des „two-fold cost of sex“-Problems“). Dem Effekt kann nur begegnet werden, wenn zwischen den Linien genetisches Material ausgetauscht wird, das an den betreffenden Stellen im Genom noch keine Mutation trägt. Die Populationen der Linien müssen also eine Möglichkeit finden, sich gegenseitig durch Austausch des Genmaterials zu korrigieren – sonst geht die Evolution gar nicht weiter.

Möglicherweise funktionierte die notwendige Korrektur ursprünglich einfach über die Aufnahme von Erbmaterial aus der Umwelt. Dass insbesondere DNA in der Umwelt auch lange nach dem Tod von Organismen überdauert, ist heute gut bekannt. Und ebenso wissen wir, dass diese DNA von Bakterien aufgenommen und über allgemeine Reparaturmechanismen in das Genom eingebaut werden kann. So kann man bei Bakterien auch ausgefeilte Mechanismen zum genetischen Austausch finden, die aber ohne ein Gametenstadium funktionieren. Nur bei Eukaryonten hat sich eine echte sexuelle Reproduktion mit Reduktions- teilung und Gametenstadien entwickelt.

Tatsächlich ist sexuelle Reproduktion außerordentlich kompliziert. Gameten müssen aus einer abgeleiteten Zellteilung entstehen, da sie nur einen halben Chromosomensatz haben dürfen. Diese als Meiose bezeichnete Form der Zellteilung muss zudem einen Paarungsmechanismus der Chromosomen beinhalten, bei dem es mit Hilfe von Proteinkomplexen zur Rekombination zwischen den elterlichen Chromosomen kommt [7]. Und aus diesen Produkten müssen dann spezialisierte Zellen entstehen, die wie-

der zu einer diploiden Zelle verschmelzen können. Entscheidend ist dabei, dass sie nicht mit sich selbst verschmelzen dürfen, da es ja dann zu keiner Vermischung des Erbmaterials kommen würde. An all diesen Schritten ist eine Vielzahl von Genfunktionen beteiligt, die aufeinander abgestimmt und evolutionär optimiert worden sein müssen. Wie dies im Einzelnen abgelaufen ist, werden wir heute kaum rekonstruieren können. Aber es kann keinen Zweifel geben, dass diese Mechanismen erst am Ende einer langen evolutionären Entwicklung gestanden haben, nicht an deren Anfang. Die damit verbundene erhöhte Effizienz in der Generierung von Variabilität hat dann aber wesentlich zur weiteren Evolution der Mehrzeller beigetragen, so dass dieser Mechanismus der sexuellen Fortpflanzung heute als so dominant erscheint.

Der Unterschied in den Gameten

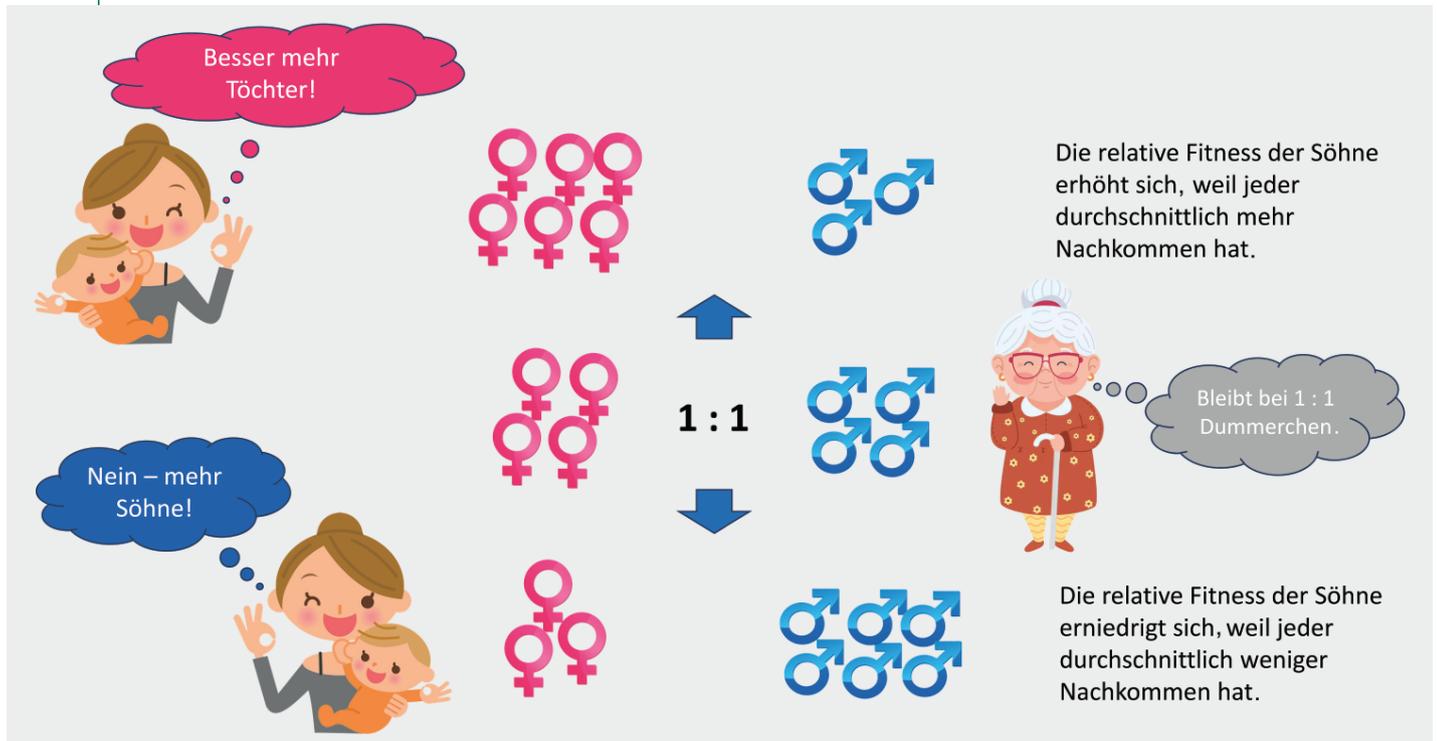
Warum gibt es unterschiedliche Gametentypen, die biologisch als männlich und weiblich bezeichnet werden können? Bei vielen Einzellern (z. B. bei der Alge *Chlamydomonas*, bei Hefepilzen, Paramecien oder Ciliaten) und einigen mehrzelligen Braunalgen (z. B. *Ectocarpus*) unterscheiden sich die Gameten nicht morphologisch – man nennt sie dann isogam. Allerdings kann man sie nach Paarungstypen unterscheiden (z. B. „plus“ und „minus“).

Aber warum haben sich dann in vielen anderen Spezies unterschiedliche Gametentypen entwickelt? Ein entscheidender Faktor liegt wahrscheinlich in der Evolution der eukaryontischen Zelle selbst begründet. Eukaryonten haben bakterielle Zellen als Organellen (u. a. Mitochondrien und Chloroplasten) in die Zelle mit aufgenommen. Diese Organellen haben ihr eigenes evolvierendes Genom. Damit entsteht ein Konfliktpotenzial innerhalb der eukaryontischen Zelle – die Organellen könnten andere evolutionäre „Interessen“¹ haben als das Kerngenom. Die evolutionäre Lösung dazu war die Einschränkung der Rekombinationsmöglichkeiten der Organellen durch uniparentale Vererbung. Wenn nur eines der beiden Gameten die Organellen weitergibt, fällt für die Organellen der Vorteil von Rekombination zwischen den Linien weg. Damit unterliegen sie zwar dem „Muller's ratchet“-Problem, aber da sie immer in mehrfachen Kopien innerhalb der eukaryontischen Zellen vorliegen, können sie dieses Problem durch DNA-Austausch innerhalb der Zelllinien umgehen.

Dieser Urkonflikt innerhalb der eukaryontischen Zellen ist wahrscheinlich der Ausgangspunkt für die zunehmende Spezialisierung der beiden Gametentypen, ausgehend von isogamen Vorläufern [8]. Die als weiblich

¹ Natürlich haben Organellen kein Bewusstsein und sie können daher auch keine aktiven Interessen haben. Gemeint ist, dass sie unter bestimmten Bedingungen einen anderen Selektionsvorteil haben können als ihre Wirtszellen, so dass die evolutionären Optimierungen konträr verlaufen könnten. Hier (und an anderen Stellen im Text) wird aber im Sinne der Lesbarkeit eine vereinfachte Formulierung verwendet, die in dieser Form unter Evolutionsbiologen regelmäßig genutzt wird.

ABB. 1 | EVOLUTIONÄRER KONFLIKT IM ZUSAMMENHANG MIT SEXUELLER VERMEHRUNG



Die Abbildung sollte von oben nach unten und dann von links nach rechts betrachtet werden. Weitere Erläuterungen im Text. Pictogramme: open source von <https://freepngimg.com> und <https://de.freepik.com/>

bezeichneten Gameten (Eier) geben die Organellen (bei Tieren die Mitochondrien) an die Nachkommen weiter und verhindern gleichzeitig das Eindringen von Mitochondrien, die von den männlichen Gameten (Spermien) mitgebracht werden. Um das zu erreichen, sind komplizierte Gensysteme notwendig, die ebenfalls erst evolvieren mussten. Das System ist auch nicht perfekt – gelegentlich kommt es immer noch zum Eindringen von Mitochondrien über die Spermien, die dann die mütterlichen Mitochondrien verdrängen können, was insbesondere bei den isogamen Algen öfter vorkommt [9].

Die scheinbar klare evolutionäre Rollenverteilung in weiblich und männlich, die durch die Gameten bedingt zu sein scheint, ist damit letztlich ein Überbleibsel der Entstehungsgeschichte eukaryontischer Zellen. Bei der Ausformung der beiden unterschiedlichen Gametentypen in anisogamen Systemen können dann auch zusätzlich noch disruptive Selektionsprozesse eine Rolle gespielt haben [8]. Aus der ursprünglichen Notwendigkeit, Rekombination zwischen evolutionären Linien sicherzustellen, ist ein sehr komplexes System mit zwei Geschlechtern entstanden.

Der Konflikt der Geschlechter

Die Existenz von zwei Geschlechtern ist evolutionär gesehen kein optimaler Zustand. Damit wurde zwar die Generierung von genetischer Variabilität optimiert, aber es

entstanden auch viele neue evolutionäre Konflikte, die bis heute kontinuierlich weitere Evolutionsschritte nach sich ziehen. Dies führt dazu, dass es rund um die Sexualität eine sehr große evolutionäre Fluidität gibt, in der für verschiedene Spezies immer wieder neue Lösungen gefunden werden. Insbesondere ist es nicht möglich, „natürliche“ evolutionäre Rollenverteilungen von Geschlechtern zu definieren, da das einzig Natürliche daran ist, dass sie sich evolutionär ständig verändern.

Einer der offensichtlichsten evolutionären Konflikte ist die normalerweise hälftige Verteilung der Geschlechter in den Populationen der meisten Spezies, inklusive dem Menschen. Wenn es schon nötig ist, zwei Geschlechter zu haben, wäre es doch eigentlich sinnvoll, dass das weibliche Geschlecht, das die Nachkommen produziert, häufiger sein sollte als das männliche Geschlecht, das nur die Spermien beisteuert (Abbildung 1). Männchen nehmen ja letztlich den Weibchen nur die ökologischen Ressourcen weg, die sie brauchen, um die Nachkommen aufzuziehen. Tatsächlich gibt es in vielen Spezies Dominanzhierarchien, in denen Männchen versuchen, im direkten Kampf mit anderen Männchen den Zugang zu Weibchen zu monopolisieren, d. h. viele der Männchen in der Population haben gar keine Nachkommen. Aber das führt dazu, dass erfolgreiche Männchen einen besonderen Fitnessvorteil haben. Für Weibchen „lohnt“ es sich daher, mehr Söhne zu produzieren, da unter ihnen auch einer sein kann, der

diesen hohen Fitnessvorteil hat. Das würde aber zu einem Überschuss an Männchen führen und der potenzielle Fitnessvorteil würde zunehmend verschwinden, da die Konkurrenz immer größer wird. Das gleiche Argument gilt im Übrigen auch, wenn es keine Dominanzhierarchie gibt, also z. B. bei Spezies mit Paarbindungen. Sobald es zu einer Verschiebung des Geschlechterverhältnisses kommt, verändert sich die relative Fitness des häufigeren Geschlechts und das System geht wieder zu einem 1:1-Verhältnis zurück [10].

Die „dauerhafte“ Lösung eines solchen evolutionären Konflikts (in diesem Fall die kontinuierliche Hin- und Herbewegung des Geschlechterverhältnisses unter den Nachkommen) liegt also nicht in einer einzelnen endgültigen Lösung, sondern in einem kontinuierlichen Prozess, der immer wieder ablaufen muss. Solche evolutionären Konflikte spielen sich auf vielen Ebenen ab, insbesondere zwischen den Geschlechtern (Kasten „Evolutionäre Konflikte der sexuellen Reproduktion“), aber auch z. B. in der Ko-Evolution von Wirten und Parasiten. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass eine kontinuierliche Evolution der zu Grunde liegenden genetischen Mechanismen notwendig ist, um im Bereich des Optimalzustands zu bleiben (s. „Red-Queen“-Hypothese in Kasten „Theorien zur Lösung des *“two-fold cost of sex”*-Problems“). Und genau dafür muss die genetische Variabilität zwischen den Individuen immer wieder neu gesichert werden.

Der phänotypische Unterschied

Sehen wir uns doch mal die phänotypischen Unterschiede zwischen den Geschlechtern und innerhalb der Geschlechter an – bleiben wir dabei beim Menschen, denn das können wir am besten intuitiv beurteilen. Wenn man jemand auf der Straße trifft, kann man meistens eine Einteilung in Frau oder Mann machen. Aber ebenso kann man meistens auch entscheiden, ob man die Person kennt oder nicht. Denn abgesehen von eineiigen Zwillingen sind keine zwei Individuen gleich. Das ist ja gerade die Funktion sexueller Rekombination: Es sollen Phänotyp-Verteilungen entstehen, nicht identische Individuen – also auch nicht Individuen, die nur in zwei Klassen eingeteilt werden können. Unser Gehirn macht also eine eigentlich schizophrene Entscheidung: Es klassifiziert binär auf Grund einer Kategorisierung, erkennt aber auch gleichzeitig, dass der Phänotyp der Individuen sehr variabel ist.

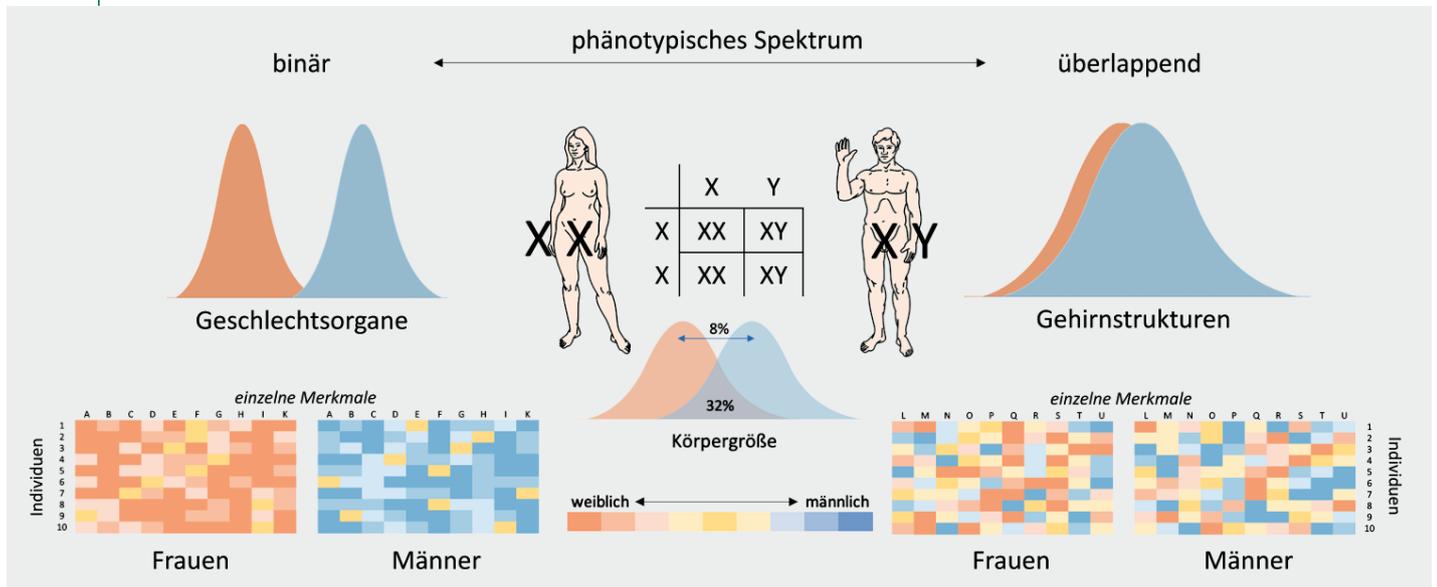
Der Begriff Phänotyp kann sehr viel umfassen. Dazu gehört die Morphologie, in Bezug auf die Geschlechter die Ausbildung der primären und sekundären Geschlechtsmerkmale, aber auch alle anderen Aspekte der äußeren Erscheinung eines Individuums. Dazu zählen die Physiologie, also die körperliche Leistungsfähigkeit, der Hormonhaushalt, die Nahrungsverwertung sowie das Immunsystem und schließlich das Verhalten – für die Geschlechter vor allem das Sexualverhalten, aber auch alle anderen soziobiologisch relevanten Aspekte des Verhaltens, wie etwa das Verhalten, das auf erlernten kulturellen Prägungen basiert.

Der Phänotyp von Individuen entsteht aus einer Kaskade genetisch gesteuerter entwicklungsbiologischer Prozesse. Bei Säugetieren, inklusive des Menschen, führt die Normalentwicklung nach der Fusion der Gameten zu einem weiblichen Phänotyp. Erst in dem Stadium, in dem sich im Embryo die Gonaden ausbilden (beim Menschen in der 6. bis 7. Schwangerschaftswoche) wird ein Gen auf dem männlichen Geschlechtschromosom (Y-Chromosom) aktiv, um auf einen männlichen Phänotyp umzuschalten. Dies ist bei den meisten Säugetieren das sogenannte SRY-Gen (*sex region on the Y*). Wenn dieses Gen einen Defekt hat, dann entwickelt sich der Körper weiblich, auch bei Individuen mit einem Y-Chromosom. SRY kodiert für einen Transkriptionsfaktor der SOX-Klasse. Dieser bindet an die DNA und löst damit eine Kaskade von regulatorischen Prozessen aus, die zur Entwicklung von Hoden und über deren Hormonproduktion zum männlichen Phänotyp führen. SRY kann daher als binärer Schalter angesehen werden. Seine Aktivität ist mit dem Y-Chromosom verbunden und wird daher nach den Mendelschen Regeln vererbt (Abbildung 2). Genau genommen ist diese Umschaltung die einzige echt binäre Lebensphase der Individuen. Man könnte „männlich“ und „weiblich“ daher auch unabhängig von den Gameten als SRY⁺ und SRY⁻ definieren (allerding gibt es bei anderen Spezies auch andere solche Schaltergene). Alle weiteren genetischen Prozesse, die zur Ausformung des Phänotyps führen, sind nicht mehr binär, sondern unterliegen den Regeln der polygenen Vererbung.

Polygene Vererbung unterscheidet sich in wichtigen Aspekten von Mendelscher Vererbung. Statt kategorischer Phänotypen entstehen dabei phänotypische Verteilungen (Abbildung 2). Wenn ein Phänotyp unter Selektion steht, verschieben sich die Mittelwerte der Verteilungen. Da die Geschlechter ja divergierenden Selektionsdrücken unterliegen, bedeutet dies, dass sie sich in den Mittelwerten von zwei Verteilungen unterscheiden, einer männlichen und einer weiblichen. Am einfachsten kann man das an der Körpergröße erkennen. Beim Menschen sind Männer im Durchschnitt acht Prozent größer als Frauen, aber die beiden Verteilungen überlappen sich zu 32 Prozent. Statistisch besagen solche Überlappungen, dass das Geschlecht einen Teil der Daten erklärt, aber eben nicht den Unterschied der Geschlechter an sich ausmacht [11].

Je nach Breite des Überlappungsbereichs kann man für ein gegebenes Individuum aus der Betrachtung eines einzelnen phänotypischen Merkmals nicht ohne weiteres erschließen, ob es sich um eine Frau oder einen Mann handelt. Am ehesten geht dies natürlich an Hand der primären Geschlechtsorgane. Da wird man für die meisten Individuen von der äußeren Erscheinung auf den Gamentyp schließen können. Allerdings sind auch auf dieser Ebene Variationen und Überlappungen gut bekannt. So unterscheidet schon der chinesische Arzt Li Shizhen (1518–1593) in der seinerzeit weltweit umfangreichsten Enzyklopädie zur Natur- und Heilkunde *Ben cao gang mu*

ABB. 2 | ÜBERLAPPENDE VERTEILUNG UND MOSAIKSTRUKTUR DER GESCHLECHTSPHÄNOTYPEN



Im Zentrum der Abbildung steht die chromosomale Geschlechtsbestimmung auf der Basis der X- und Y-Chromosomen, die nach den Mendelschen Regeln vererbt werden und zu binären Genotypen führen (XX und XY). Alle weiteren phänotypischen Charaktere werden aber durch polygene Vererbungsprozesse bestimmt. Diese sind durch Varianz zwischen den Individuen mit überlappenden Verteilungen gekennzeichnet. Als binär können diese gesehen werden, wenn sie nur in einem kleinen Bereich überlappen, so wie es für die Geschlechtsorgane der Fall ist (links). Auf der anderen Seite stehen die Gehirnstrukturen (nicht die Größe des Gehirns), bei denen die Überlappung fast vollständig ist (rechts). Dazwischen können alle möglichen Übergangsformen mit unterschiedlicher Überlappung liegen [11] – hier als Beispiel die Körpergröße. Im unteren Bereich der Abbildung ist die Mosaikstruktur der Individuen dargestellt. Hier werden symbolisch von links nach rechts zehn Merkmale dargestellt, die bei beiden Geschlechtern vorkommen, aber eher weiblich oder eher männlich ausfallen können (durch das Farbcode-Spektrum symbolisiert). Von oben nach unten sind zehn Individuen mit ihren kombinatorischen Mustern an Merkmalen dargestellt. Im binären Fall (links) wird allein durch den Farbcode eine Trennung sehr deutlich. Aber auch hier können selbst die geschlechtsgleichen Individuen aus einem Mosaik verschiedener Varianten bestehen. Im überlappenden Fall (rechts) ist die Mosaikzusammensetzung so komplex, dass für das einzelne Individuum die systematischen Unterschiede fast vollständig wegfallen.

von 1593 nicht nur Männer und Frauen, sondern je fünf weitere Typen, insbesondere unter den zusätzlichen männlichen Typen auch einen Typen, bei dem der Körper sowohl männlich als auch weiblich ist [12].

Bei den sekundären Geschlechtsmerkmalen – wie etwa der Ausprägung der Brust oder dem Umfang von Taille und Becken – wird die systematische Unterscheidbarkeit von Männern und Frauen schon weniger deutlich. Und bei der Ausprägung des Phänotyps des Gehirns gibt es fast keine Unterschiede mehr (Abbildung 2).

Die Mosaikstruktur der Geschlechter

Um die Geschlechtsunterschiede im Gehirn – und damit implizit im Verhalten – gibt es besonders viele Kontroversen. Das Gehirn von Frauen ist durchschnittlich acht Prozent kleiner als das der Männer. Aus diesem Umstand hat man zu Viktorianischen Zeiten geschlossen, dass Männer den Frauen von Natur aus überlegen sind. Auch ein ansonsten so kritischer Denker wie Darwin hat sich diesem Urteil angeschlossen. In dem Buch „Die Abstammung des Menschen und Selektion in Bezug auf Sex“ [13] schreibt er: „Der Hauptunterschied in den intellektuellen Kräften der beiden Geschlechter zeigt sich darin, dass der Mann in allem, was er sich vornimmt, eine höhere Stellung ein-

nimmt als die Frau, wenn es darum geht, tiefes Denken, Vernunft oder Vorstellungskraft anzuwenden, oder auch nur seine Sinne und seine Hand zu nutzen.“ Auch Darwin war also nicht frei von den Einflüssen seiner Zeit, obwohl er mit etwas Recherche ohne weiteres auch damals bereits zu einer anderen Ansicht hätte kommen können.

Da die durchschnittliche Körpergröße von Frauen acht Prozent unter der von Männern liegt, ist es eigentlich trivial, dass auch die durchschnittliche Gehirngröße acht Prozent niedriger ist. Relevant ist nur die Relation von Gehirngröße und Körpergröße – und da gibt es keine Unterschiede. Nachdem das klar war, hat man lange versucht, strukturelle Unterschiede in den Gehirnen zwischen Männern und Frauen zu finden. Es wurden dann auch immer wieder einzelne Regionen identifiziert, die kleine Durchschnittsunterschiede zu zeigen scheinen. Aber erst spät hat man sich die Frage gestellt, ob es denn einen systematischen binären Unterschied gibt. Dieser würde existieren, wenn die verschiedenen Regionen, die die Durchschnittsunterschiede zeigen, in ihrem Unterschied jeweils die weibliche Variante bei Frauen und die männliche Variante bei Männern aufweisen würden. Genau dies ist aber nicht der Fall. Stattdessen sind die männlichen und weiblichen Gehirne aus einem Mosaik aus männlichen

und weiblichen Varianten aufgebaut (Abbildung 2) [14]. Es scheint, dass jede Person eine andere Kombination der Varianten hat. Die gemittelten phänotypischen Verteilungen überlappen sich daher im Gehirn besonders stark (Abbildung 2).

Trotzdem kann es bei einigen Männern ein leichtes Übergewicht männlicher Varianten und bei einigen Frauen ein leichtes Übergewicht von weiblichen Varianten geben. Je nach statistischem Ansatz kann man daher mit einer gewissen Sicherheit aus den Gehirnstrukturen erschließen, ob es sich um eine Frau oder einen Mann handelt. Aber für einzelne Individuen ist die individuelle Kombination von Varianten viel wichtiger als eine allgemeine Geschlechtseinteilung [14].

EVOLUTIONÄRE KONFLIKTE DER SEXUELLEN REPRODUKTION

Die sexuelle Reproduktion führt zu einer Reihe evolutionärer Konflikte, die das Ergebnis unterschiedlicher Interessen von Individuen, Geschlechtern oder Genen sein können. Zu den wichtigsten evolutionären Konflikten gehören:

1. Sexueller Konflikt:

Männchen und Weibchen können unterschiedliche Strategien zur Maximierung ihrer Fortpflanzungserfolge entwickeln. Männchen können Strategien entwickeln, um ihre Chancen auf Paarung zu erhöhen, während Weibchen Strategien entwickeln, um die Kontrolle über die Partnerwahl zu behalten. Dies führt zu einem „Wettrüsten“ zwischen den Geschlechtern, wobei jedes Geschlecht versucht, die Kontrolle über den Fortpflanzungserfolg zu maximieren.

2. Ressourcenkonflikt zwischen den Geschlechtern:

In vielen Arten investieren Weibchen mehr in die Nachkommen (z. B. durch Schwangerschaft, Eiablage oder Brutpflege), während Männchen oft in die Erzeugung möglichst vieler Nachkommen investieren. Dies kann zu Konflikten führen, bei denen Männchen versuchen, Weibchen zur Paarung zu zwingen oder Weibchen versuchen, die Zahl der Nachkommen zu kontrollieren, um ihre eigenen Ressourcen optimal zu nutzen.

3. Konflikt innerhalb der Geschlechter:

Auch innerhalb eines Geschlechts kann es zu Konflikten kommen. Zum Beispiel können Männchen einer Art in Konkurrenz stehen, um Zugang zu Weibchen zu erhalten, was zur Evolution von Strukturen führen kann, die dazu dienen, diesen Kampf zu gewinnen (z. B. Geweihe bei Hirschen). Weibchen können ebenfalls in Konkurrenz stehen, insbesondere wenn die Ressourcen für die Aufzucht von Nachkommen knapp sind.

4. Genetischer Konflikt:

Bei der sexuellen Reproduktion kommt es zur Mischung von Genen beider Elternteile. Dies kann zu Konflikten zwischen verschiedenen Genvarianten innerhalb desselben Organismus führen, insbesondere wenn die Varianten von Mutter und Vater unterschiedliche „Interessen“ haben. Ein Beispiel ist der Konflikt zwischen mitochondrien- und kernkodierten Genen. Ein weiteres Beispiel ist das imprinting von Genen, wobei durch epigenetische Modifikation in den Gameten festgelegt wird, ob nur die mütterliche oder nur die väterliche Variante des betreffenden Gens in den Nachkommen exprimiert wird. Imprinting wird oft auch als Lösung des Ressourcenkonflikts (s. o.) interpretiert, da z. B. bei Säugetieren die Ausbildung der Plazenta durch solche Genysteme kontrolliert wird.

Der genetische Unterschied

Auf Grund der evolutionären Konflikte um die sexuelle Reproduktion gehören die genetischen Mechanismen der Geschlechtsbestimmung und die Ausformung des Geschlechtsphänotyps zu den besonders schnell evolvierenden genetischen Systemen. Das Chromosom, das nur in einem Geschlecht vorkommt (beim Menschen das Y-Chromosom), unterliegt dem „Muller's ratchet“-Effekt und verliert daher mit der Zeit die Gene, die auf ihm kodiert sind. Die meisten Gene, die für die Ausbildung der Geschlechtsunterschiede relevant sind, sind daher nicht auf den Geschlechtschromosomen, sondern auf den Autosomen zu finden. Sie werden in weiblichen und männlichen Individuen unterschiedlich exprimiert, um ihre spezifischen Funktionen bei der Ausbildung des Geschlechtsphänotyps zu erfüllen. Man spricht dabei von *sex-biased expression* (*SB*-Gene) und je nach Organ können einige hundert bis einige tausend Gene so eine differentielle Expression zeigen. Nur sehr wenige Gene sind ausschließlich in einem Geschlecht aktiv, die meisten unterscheiden sich nur in der relativen Expression. Sie sind nicht nur in Geschlechtsorganen aktiv, sondern in praktisch allen Organen und Geweben des Körpers. Diese unterschiedlichen Expressionen lassen sich mittels genomweiten Transkriptionsanalysen heute sehr gut messen und evolutionär vergleichen.

In einer vergleichenden Studie zwischen verschiedenen Säugetieren zeigte sich, dass die geschlechtsspezifische Expression in den verschiedenen Organen und Spezies unterschiedlich ausgeprägt ist. Jedes Organ und jeder Zelltyp haben ihr eigenes Muster von *SB*-Genen [15]. Das Mosaik-Prinzip, das in der Gehirnmorphologie gefunden wurde, zeigt sich also auch für alle Organe auf der Ebene der Genexpression.

Interessanterweise evolviert die geschlechtsspezifische Expression schnell über die Arten hinweg. Selbst zwischen nah verwandten Mausarten zeigen nur weniger als fünf Prozent der *SB*-Gene in den verschiedenen Organen eine konservierte *SB*-Expression [16]. Ein solches schnell evolvierendes Muster mit tausenden von beteiligten Genen ist nur mit einem polygenen Vererbungsmodell vereinbar, bei dem die Rolle einzelner Gene bei der Ausprägung eines Phänotyps leicht durch andere Gene ersetzt werden kann.

Wenn man sich die individuelle Variabilität der Expression der *SB*-Gene ansieht, dann kann man auch hier oft überlappende Verteilungen sehen [16] – ähnlich wie im Phänotyp. Die einfache Annahme einer männlich-weiblichen Binärität ist also auch auf der Ebene der Genexpression nicht gegeben. Insbesondere kann man nicht von drei Kategorien – männlich, weiblich, divers – sprechen.

Die Rolle der Umwelt

Polygene Vererbungsmechanismen beinhalten immer eine genetische und eine „Umwelt“-Komponente. Letztere be-

schreibt formal nur den Anteil an der Variation zwischen Individuen, der nicht auf genetische Faktoren zurückgeführt werden kann. Was diese „Umwelt“-Komponente genau ist, kann man in der Regel nicht sagen. Es können die allgemeinen Umweltbedingungen wie etwa Temperatur und Ernährung sein, es können aber auch epigenetische Effekte sein (z. B. Methylierung an DNA, Histonen oder RNA, alternatives *splicing* oder microRNA-Konzentrationen), aber auch ein erlernter oder kultureller Einfluss – insbesondere bei Verhaltensweisen. Die genetische Komponente polygener Vererbung wird als „Heritabilität“ bezeichnet. Die Messung der Heritabilität hängt von den experimentellen Bedingungen ab. Wenn die Umweltbedingungen möglichst konstant gehalten werden, dann ergeben sich hohe Heritabilitätswerte für die meisten phänotypischen Charaktere. Wenn die Umwelt sehr variabel ist, dann reduziert sich der Anteil der Heritabilität. Beim Menschen wird die Umwelt in der Regel sehr variabel sein; die Ausprägung der phänotypischen Varianz wird dadurch größer, die relative Rolle der genetischen Varianz wird kleiner. Das gilt natürlich auch für die Varianz zwischen den Geschlechtsphänotypen und dem sexuellen Verhalten. Ein starker kultureller Einfluss auf diese Teile des Phänotyps ist daher erwartbar, aber es wird immer auch gleichzeitig eine genetische Komponente geben, die in unterschiedlichen Individuen unterschiedlich stark ausgeprägt sein kann.

In Bezug auf Verhaltensunterschiede beim Menschen kann man auch wieder auf das Buch von Li Shizhen (s. o.) zurückkommen. Dort werden drei Verhaltensgruppen mit von der Norm abweichendem Verhalten unterschieden. Diejenigen, die sich wie Männer verhalten sollen, aber wie Frauen handeln. Diejenigen, die sich wie Frauen verhalten sollen, sich aber wie Männer verhalten. Und diejenigen, die in der einen Monatshälfte Yin/Weibchen und in der anderen Monatshälfte Yang/Männchen sind. Fluidität im Geschlechtsverhalten gab es beim Menschen also schon immer.

Die Falle der Kategorien

Wenn man die genetische und die Umwelt-bedingte Variabilität betrachtet, dann wird eine einfache binäre Kategorisierung in männlich und weiblich der phänotypischen Realität der Individuen nicht gerecht. Dies ist Sexualforschern und Psychologen schon lange bekannt, weshalb als Hilfskonstrukt die Bezeichnung *Gender* für die gefühlte und/oder soziale Geschlechtsidentität eingeführt wurde, die der biologischen Geschlechtsbestimmung gegenübergestellt wird. Allerdings gibt es dabei eine Tendenz, die biologische Geschlechtsbestimmung separat von Gendereigenschaften zu betrachten. Das eine gilt als binär und biologisch, das andere als rein kulturell entwickelt. Aber auch das ist letztlich eine ungeeignete Kategorisierung.

Die metaphorische Feststellung „Frauen sind von der Venus, Männer vom Mars“ hat eine biologische Basis in

dem evolutionsbiologischen Konflikt zwischen männlichen und weiblichen Interessen. Sexuelle Konflikte sind allgegenwärtig und umfassen Prozesse von der Partnerwahl bis hin zu elterlichen Investitionen in den Nachwuchs (Kasten „Evolutionäre Konflikte der sexuellen Reproduktion“). Sexuelle Konflikte sorgen potenziell dafür, dass jedes Geschlecht versucht, sein bevorzugtes Optimum für ein bestimmtes „Konfliktmerkmal“ zu erreichen [17].

Es gibt also zweifellos „typische“ Männer und Frauen und „typisches“ weibliches und männliches Verhalten, das auf diesen Konflikt zwischen den Geschlechtern zurückzuführen ist und das letztlich auch genetisch verankert ist. Aber es ist eben kein kategorisch binäres Verhalten, das man grundsätzlich einem Individuum zuordnen kann. Das, was als „typisch“ bezeichnet wird, sind Mittelwerte oder eher sogar Extremwerte zweier sich überlappender Verteilungen. Die Individuen selbst sind Mosaik der Eigenschaften, die in jeder Generation neu rekombinieren. Der evolutionäre Konflikt zwischen den Geschlechtern hat ja keine endgültige Lösung, sondern stellt sich immer wieder neu [17]. Insbesondere im Überlappungsbereich der Eigenschaften muss es auch eine Fluidität zwischen den „typischen“ Eigenschaften geben, um die kontinuierliche Evolution zur Lösung des andauernden Konflikts zu ermöglichen. Genderfluidität ist daher nicht nur eine natürliche Erscheinung, sondern sogar eine unausweichliche Konsequenz der sexuellen Reproduktion.

Die Entwicklung der biologischen, genetischen und kulturellen Geschlechtsidentität muss als Gesamtprozess betrachtet werden, der nicht in Kategorien – also auch nicht in erweiterte Geschlechtskategorien – gesteckt werden sollte. Jedes Individuum muss für sich gesehen werden und jedes Individuum sollte daher auch seine Rolle im kontinuierlichen Spektrum der Verteilungen selbst finden dürfen. Kein Individuum sollte sich gedrängt fühlen, sich der sozialen Norm einer Kategorie angleichen zu müssen. Individuen sollten nicht auf ihre Gameten reduziert werden, die evolutionsbiologische und entwicklungsbiologische Realität ist viel komplexer. Insbesondere sollten genderfluide Individuen nicht als Ausnahme von einer Regel betrachtet werden, sondern als selbstverständlicher Teil der evolutionär notwendigen Variabilität innerhalb von Populationen.

Dies gilt im Übrigen nicht nur für den Menschen. Es geht hier um allgemeine biologische Prinzipien. Individuen sind von Natur aus genetisch variabel, aber auch geprägt von der Umwelt, in der sie aufgewachsen sind. Wenn man sie aus experimentell operationalen Kriterien kategorisieren möchte, so wie es in der Verhaltensforschung üblich ist, dann wäre es wichtig, auch die Überlappungsbereiche für die betrachteten morphologischen Charaktere oder die Verhaltensweisen anzugeben und bei der Auswertung zu berücksichtigen. Das ist keine anthropozentrische Sichtweise, sondern die Schlussfolgerung aus den Überlegungen zur Evolution sexueller Systeme.

Ein alternatives Narrativ

Im Biologieunterricht beginnt die Erklärung der Sexualität in der Regel mit der Beschreibung von zwei Geschlechtern, die sich über ihre Gameten definieren. Binärität erscheint daher als biologischer Grundzustand, in dem eine Kategorie „divers“ nur als Ausnahme gesehen wird.

Aber man könnte den Unterricht auch über die biologische Rolle von Sexualität aufbauen, also über die evolutionsbiologische Notwendigkeit Variabilität zu generieren. Dann würde der Unterricht zur Entstehung der Sexualität mit der Erklärung beginnen, dass Variabilität der Kern des Lebens ist. Diese Interpretation der Sexualität wurde bereits von August Weismann vorgeschlagen. In seinem 1886 erschienenen Buch „Die Bedeutung der sexuellen Fortpflanzung für die Selektionstheorie“ [18] schreibt er: *„In dieser Vermischung sehe ich die Ursache der erblichen individuellen Charaktere und in der Herstellung dieser Charaktere die Aufgabe der [sexuellen] Fortpflanzung.“* (S. 29) und *„Überhaupt wüsste ich der sexuellen Fortpflanzung keine andere Bedeutung beizumessen, als die, das Material an erblichen individuellen Charakteren zu schaffen, mit welchen die Selektion arbeiten kann.“* (S. 43)

Dies sind Kernaussagen, auf die man einen Unterricht aufbauen könnte. Existenz von zwei Geschlechtern erklärt sich dann als biologischer Mechanismus, um diese Variabilität zu sichern. Die primäre Rolle von Männern und Frauen ist es also, Nachkommen zu haben, die anders sind als sie selbst und sich auch untereinander unterscheiden. „Divers“ ist dann keine Ausnahme mehr, sondern Teil des natürlichen Spektrums der Variabilität. Als Biologen sollten wir uns das Darwin-Zitat von oben vor Augen halten. Man kann vollkommen im vorherrschenden Denken gefangen sein, selbst wenn es möglich ist, die Alternativen zu erkennen.

Was sagt das neue Gesetz?

Vor diesem Hintergrund ist der Fortschritt, der mit der neuen Gesetzgebung zur sexuellen Selbstbestimmung erzielt werden soll, eigentlich ein Rückschritt. Statt die behördliche Registrierung von Geschlechtskategorien ganz abzuschaffen, führt man eine weitere Kategorie verbunden mit einer Wahlfreiheit ein. Eigentlich ist das dann aber eine Wahlpflicht, da sich letztlich jedes Individuum zu einem Zeitpunkt fragen muss, welcher Kategorie es zugehört. Man wird gedrängt, sich auf eine Seite zu stellen, selbst wenn man sich gar nicht so sicher ist, wo genau man in dem kontinuierlichen Spektrum steht. Dass es die Kategorie „divers“ gibt, hilft dabei wenig oder ist sogar kontraproduktiv. Denn jede Art von Kategorisierung wird auch wieder zu neuer Diskriminierung führen – und die Gefahr ist bei drei Kategorien sogar höher als bei zwei.

Das Verfassungsgericht hatte mit seinem Urteil von 2017 dem Gesetzgeber eigentlich freigestellt, die Registrierung von Geschlechtskategorien ganz abzuschaffen (Absatz 65 in [3]). Denn bei einer verfassungsrechtlich

gesicherten Gleichstellung der Geschlechter muss der Staat gar nicht mehr wissen, welchem Geschlecht sich jemand zugehörig fühlt.

Das würde selbstverständlich aber nicht zur Abschaffung der Geschlechter führen. Denn um einen Geschlechtspartner zu finden, schaut sowieso niemand vorher im Personenstandsregister nach. Auch die Sorge, dass man mit so einem Schritt Gleichstellungsbemühungen untergraben würde, kann ich nicht sehen. Im Gegenteil: Was passiert denn jetzt, wenn Männer sich als Frauen registrieren lassen, um sich auf für Frauen gedachte Gleichstellungsprogramme bewerben zu können? Man würde dann natürlich den allgemeinen Phänotyp als Zulassungskriterium anwenden, nicht den Eintrag im Personenstandsregister. Aber das wird dann wieder zu neuen rechtlichen Problemen führen.

Der Gesetzgeber hat bei der Neufassung des Gesetzes die Chance verpasst, ein Zeichen zu setzen, dass das binäre Klassifizieren von Geschlechtern der Realität der Individuen nicht gerecht wird. Aber in unserem tief verwurzelten kategorisierenden Denken hat dazu offenbar der Mut gefehlt. Wann werden wir anfangen, statt in Kategorien in kontinuierlichen Verteilungen und ihren Überlappungen zu denken?

Zusammenfassung

Die Evolution der zweigeschlechtlichen Fortpflanzung war und ist ein Motor der Evolution, da sie die für Anpassungen nötige Variabilität zwischen den Individuen generiert. Gegenüber asexueller Fortpflanzung hat sie aber den Nachteil, dass sie rechnerisch nur halb so viele Nachkommen produziert. Zudem führt sie zu evolutionären Konflikten zwischen den Geschlechtern. Diese Nachteile können nur durch den Vorteil der Erzeugung besonders hoher Variabilität aufgewogen werden. Individuen, die aus der sexuellen Reproduktion entstehen, zeigen daher überlappende morphologische Merkmale und Verhaltensweisen, die zudem von der Umwelt mitgeprägt werden. Auch eine Fluidität zwischen den Geschlechtern ist eine natürliche Konsequenz dieser Variabilität. Dieses Kontinuum der Unterschiede wird durch eine Kategorisierung in „männlich – weiblich – divers“ nicht reflektiert.

Summary

Female – male – diverse: Is it that simple?

The evolution of bisexual reproduction was and is the driving force behind evolution, as it generates the variability between individuals that is necessary for adaptation. Compared to asexual reproduction, however, it has the disadvantage that it only produces half as many offspring. It also leads to evolutionary conflicts between the sexes. These disadvantages can only be outweighed by the advantage of producing particularly high variability. Therefore, individuals arising from sexual reproduction show overlapping morphological characteristics and behaviour patterns, which are also influenced by the environment. Fluidity be-

tween the sexes is also a natural consequence of this variability. This continuum of differences is not reflected by a categorization into “male – female – diverse”.

Schlagworte:

Selbstbestimmungsgesetz, Evolution sexueller Reproduktion, evolutionärer Konflikt, *two-fold cost of sex*, *Muller's ratchet*, Fluidität der Geschlechter, Gender, Mosaikstruktur der Geschlechtsphänotypen, Gameten, Isogamie, Anisogamie, Variabilität, Heritabilität, polygene Vererbung

Literatur

- [1] M. Delbrück (1949). A physicist looks at biology. *Resonance* 4, 89–102.
- [2] BMFSFJ. (2024). Gesetz über die Selbstbestimmung in Bezug auf den Geschlechtseintrag und zur Änderung weiterer Vorschriften. Bundesgesetzblatt I, <https://www.recht.bund.de/bgb1/1/2024-206/VO>.
- [3] BverfG (2017). Beschluss des ersten Senats vom 10. Oktober 2017. BvR 2019/16, 1–69, https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Entscheidungen/DE/2017/10/rs20171010_1bvr201916.html.
- [4] W. Goymann et al. (2023). Biological sex is binary, even though there is a rainbow of sex roles denying biological sex is anthropocentric and promotes species chauvinism. *Bioessays* 45, 10.1002/bies.202200173.
- [5] J. Maynard Smith (1978). *The evolution of sex*. Cambridge University Press.
- [6] M. Neiman et al. (2017). Why sex? A pluralist approach revisited. *Trends in Ecology & Evolution* 32, 589–600. 10.1016/j.tree.2017.05.004.
- [7] E. Damm, L. Odenthal-Hesse (2023). Orchestrating recombination initiation in mice and men. 151, 27–42.
- [8] J. Lehtonen et al. (2016). What do isogamous organisms teach us about sex and the two sexes? *Philosophical transactions of the Royal Society B – Biological Sciences* 371, 10.1098/rstb.2015.0532.
- [9] S. Breton, D. Stewart (2015). Atypical mitochondrial inheritance patterns in eukaryotes. *Genome* 58, 423–31, 10.1139/gen-2015-0090.
- [10] H. Kokko, M. Jennions (2008). Parental investment, sexual selection and sex ratios. *Journal of Evolutionary Biology* 21, 919–48, 10.1111/j.1420-9101.2008.01540.x.
- [11] D. L. Maney (2016). Perils and pitfalls of reporting sex differences. *Philosophical Transactions of the Royal Society B – Biological Sciences* 371, 10.1098/rstb.2015.0119.
- [12] P. U. Unschuld (2024). *A catalog of benevolent items. Li shizhen's compendium of classical chinese knowledge*. Oakland, California, University of California Press, 194–197.
- [13] C. Darwin (1871). *Descent of man, and selection in relation to sex*. John Murray, London.
- [14] D. Joel et al. (2020). The complex relationships between sex and the brain. *Neuroscientist* 26, 156–69, 10.1177/1073858419867298.
- [15] L. Rodríguez-Montes et al. (2023). Sex-biased gene expression across mammalian organ development and evolution. *Science* 382, 10.1126/science.adf1046.
- [16] C. Xie et al. (2024). Fast evolutionary turnover and overlapping variances of sex-biased gene expression patterns defy a simple binary classification of sexes. *eLife* 13, RP99602.
- [17] T. Chapman (2006). Evolutionary conflicts of interest between males and females. *Current Biology* 16, R744–R54, 10.1016/j.cub.2006.08.020.
- [18] A. Weismann (1886). *Die Bedeutung der sexuellen Fortpflanzung für die Selektionstheorie*. Jena, Verlag Gustav Fischer.

Verfasst von:



© Ignus Dreyer, SCPS (Stellenbosch Centre for Photographic Services)

Nach seinem Biologiestudium an den Universitäten Frankfurt und Tübingen verfasste Diethard Tautz eine Doktorarbeit über simple DNA-Sequenzen in Eukaryonten am European Molecular Biology Laboratory (EMBL) in Heidelberg. Anschließend verbrachte er Postdoktoranden-Zeiten an der University of Cambridge, UK und am Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie in Tübingen. Dort spezialisierte er sich auf Mechanismen der molekularen Evolution und der Evolution entwicklungsbiologischer Prozesse. Nach Professuren an der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München und der Universität Köln wurde er 2007 zum Direktor am Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie in Plön berufen. Seit 2023 ist er dort Emeritus Professor und derzeit Fellow am Stellenbosch Institute for Advanced Studies – STIAS.

Korrespondenz

Prof. Dr. Diethard Tautz
Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie
August-Thienemann-Straße 2
24306 Plön
E-Mail: tautz@evolbio.mpg.de

NEUE HANDREICHUNG FÜR LEHRKRÄFTE: „MIKROBIOLOGIE IN DER SCHULE“

In Zusammenarbeit mit dem Jenaer Exzellenzcluster Balance of the Microverse hat das Team der Arbeitsgruppe Biologiedidaktik der Universität Jena unter der Leitung von Prof. Uwe Hoßfeld eine neue Sammlung ausgewählter Unterrichtsmaterialien zum Thema „Mikrobiologie in der Schule“ erstellt. Die daraus entstandene Handreichung steht ab sofort im Rahmen der Microverse-Bildungsaktivitäten zum Download bereit. Sie richtet sich an Biologielehrkräfte der Klassen 7 bis 12 und bietet kompakte, praxisorientierte Informationen zu Mikroorganismen, Kulturmedien sowie Vorschläge für Unterrichtsexperimente.

Ziel dieses praktischen Leitfadens ist es, Lehrkräften gezielte Unterstützung bei der Vermittlung mikrobiologischer Inhalte zu bieten, die in den Standardlehr- und Bildungsplänen oft nur am Rande behandelt werden. Ein besonderes Merkmal dieses Projekts ist die enge Zusammenarbeit zwischen dem Exzellenzcluster und dem Team der Biologiedidaktik. Sie schließt die Lücke zwischen Spitzenforschung und Lehre und macht komplexe wissenschaftliche Themen für den Unterricht zugänglich. Das Projekt zeigt zudem das Engagement, eine aktive Rolle in der Bildung einzunehmen und neue Ansätze für die Vermittlung naturwissenschaftlicher Fächer zu entwickeln. Die Handreichung steht zum kostenlosen Download bereit unter <https://t1p.de/rof2g>.



Zweigeschlechtlichkeit zu leugnen ist anthropozentrisch und fördert „Artenchauvinismus“

Geschlecht und Gender: Eine biologische Perspektive

WOLFGANG GOYMANN | HENRIK BRUMM | PETER M. KAPPELER



Ein Paar des Weißbrauenkuckucks (*Centropus superciliosus*) mit überlappenden phänotypischen Geschlechtsmerkmalen.

Was ist Geschlecht? Wie viele Geschlechter gibt es? Und welche gesellschaftliche Bedeutung hat das alles? Antworten auf diese Fragen sind oft ideologisch überlagert, medial aufgeheizt und schlichtweg falsch. Sogar führende wissenschaftliche Zeitschriften wie Nature und Science verfangen sich oft in einem Strudel anthropozentrischer Halbwahrheiten – Zeit einen sachlichen und biologisch fundierten Blick auf das Thema zu werfen.

N

och vor wenigen Jahren war das Thema Zweigeschlechtlichkeit von Tieren im Biologieunterricht und in Universitätsgrundkursen vollkommen unverfänglich. Mittlerweile ist die Angelegenheit jedoch ein Politikum, und eine sachliche Debatte über das Geschlecht wird zunehmend schwieriger. Sowohl das linke als auch das rechte politische Spektrum der Gesellschaft haben das Thema für sich entdeckt und benutzen es für ihre jeweiligen Interessen. An der Humboldt Universität in Berlin (HU) wurde 2022 ein öffentlicher Vortrag von Marie-Luise Vollbrecht, Doktorandin der Biologie an der HU, mit dem Titel „*Geschlecht ist nicht (Ge)schlecht – Sex, Gender und warum es in der Biologie zwei Geschlechter gibt*“ aufgrund von Protesten radikaler Studierender zunächst untersagt. Die Absage des Vortrags nährte Befürchtungen um die Freiheit der Wissenschaft, und so ließ die Universitätsleitung den Vortrag zu einem späteren Zeitpunkt in geschütztem Rahmen nachholen. Dennoch distanzierte sich die HU öffentlich von ihrer Doktorandin, was in einen Rechtsstreit mündete, den die HU im Dezember 2023 verlor. Das Thema der Zweigeschlechtlichkeit sollte auf einer Anthropologietagung, die 2023 in Toronto stattfand, behandelt werden; insbesondere sollte der Frage nachgegangen werden, ob das binäre Geschlecht für die heutige Anthropologie noch relevant ist. Nach Protesten sagten die Veranstalter das Symposium „aus Gründen der Sicherheit und zur Wahrung der Wissenschaftlichkeit“ ab. Carole Hooven, eine für ihre Lehre mehrfach ausgezeichnete Dozentin der Harvard Universität, äußerte sich öffentlich zur Zweigeschlechtlichkeit. Daraufhin wurde sie von Mitgliedern des Diversitäts-, Inklusions- und Gleichstellungsbüros ihrer Universität und extremistischen Studierenden gemobbt. Mangels Unterstützung durch die Universitätsleitung kündigte sie daraufhin ihre Stellung.

Für uns als Biologen erscheint der aktuelle Diskurs über die Zweigeschlechtlichkeit so, als ob beispielsweise in der Astronomie plötzlich wieder darüber gestritten würde, ob sich die Erde um die Sonne dreht oder umgekehrt. Und bei Lehrenden an Schulen und Universitäten führen diese Entwicklungen zu wachsender Verunsicherung. Sie können den aktuellen wissenschaftlichen Stand nicht mehr einschätzen und fühlen sich außerstande, das

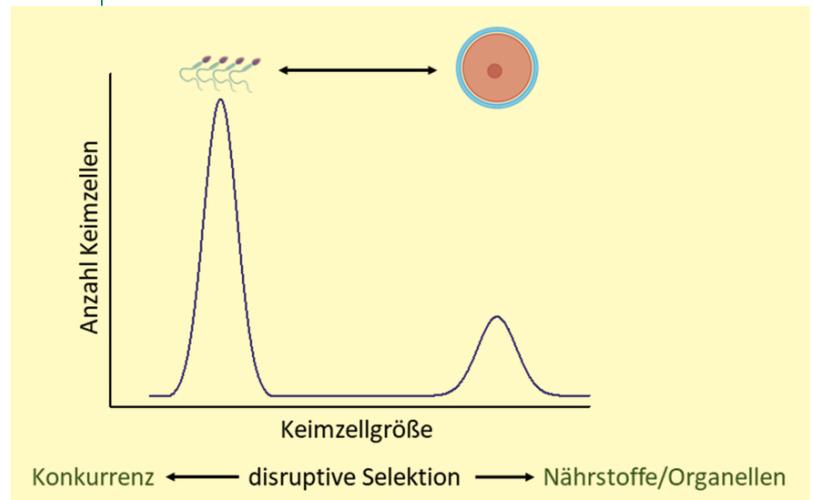
Thema ‚Zweigeschlechtlichkeit‘ im Unterricht angemessen zu behandeln. In diesem Beitrag wollen wir daher einige relevante Grundlagen und Fakten in Erinnerung rufen, um damit zu einer Versachlichung der Debatte beizutragen.

Das biologische Geschlecht als binäre Variable

Das biologische Geschlecht ist bei allen Organismen mit sexueller Fortpflanzung und unterschiedlich großen Gameten *per definitionem* binär. Das gilt auch für höhere Pflanzen. Da die Fortpflanzung von Pflanzen jedoch recht komplex ist [2], beschränken wir uns hier vor allem auf Tiere. Tiere, die sich sexuell fortpflanzen, erzeugen also genau zwei Arten von Keimzellen, die sich durch ihre unterschiedliche Größe auszeichnen: Große Keimzellen werden als Eizellen (Oozyten) bezeichnet und werden definitionsgemäß von Weibchen produziert. Kleine Keimzellen werden Spermien genannt, sind meist beweglich und werden definitionsgemäß von Männchen produziert [3–6]. Je eine große und eine kleine Geschlechtszelle verschmelzen zur Zygote, aus der sich dann ein neuer Organismus entwickelt. Der markante Größenunterschied von Eizellen und Spermien wird als Anisogamie bezeichnet (von *anisos* = Ungleichheit und *gamos* = Heirat). Die Eizelle steuert zur Bildung der Zygote Kern-DNA, das zelluläre Umfeld und alle Organellen bei; das Spermium meist nur die Kern-DNA. Die sexuelle Fortpflanzung in Kombination mit Anisogamie ist ein grundlegendes Prinzip in der Biologie (Abbildung 1).

Ihren evolutionären Ursprung hat die sexuelle Fortpflanzung in der Verschmelzung gleich großer Geschlechtszellen, auch Isogamie genannt. Nach heutigem Verständnis ist der Größendimorphismus zwischen Eizelle und Spermium (Anisogamie) auf den Wettbewerb der Keimzellen um die wechselseitige Befruchtung zurückzuführen, infolgedessen es zu disruptiver Selektion kam [4, 7–9]. Disruptive Selektion fördert kleine und große Keimzellen und benachteiligt Keimzellen mittlerer Größe. Bei gleichem Ressourceneinsatz können Organismen nämlich entweder wenige große Keimzellen oder zahlreiche kleine Geschlechtszellen produzieren (Abbildung 1). Die zahlreichen kleinen Keimzellen (Spermien) konkurrieren dabei um die Verschmelzung mit den wenigen großen Keimzellen (Eizellen). Keimzellen mittlerer Größe wären sowohl gegenüber kleinen als auch gegenüber großen Keimzellen im Nachteil: Den kleinen Spermien wären sie an Zahl und Geschwindigkeit unterlegen und den großen Eizellen in Bezug auf ihre geringere Menge an Nährstoffen. Dadurch findet eine sogenannte disruptive Selektion auf sehr kleine und sehr große Gameten statt; aufgrund der beschriebenen Benachteiligung haben mittelgroße Gameten keine Chance selektiert zu werden (Abbildung 1). Grundlage dieses Prinzips könnte ein Konflikt zwischen den Geschlechtern sein, bei denen die Spermien als Quasi-Parasiten agieren, die den Nährstoffreich-

ABB. 1 | DISRUPTIVE SELEKTION DER KEIMZELLEN



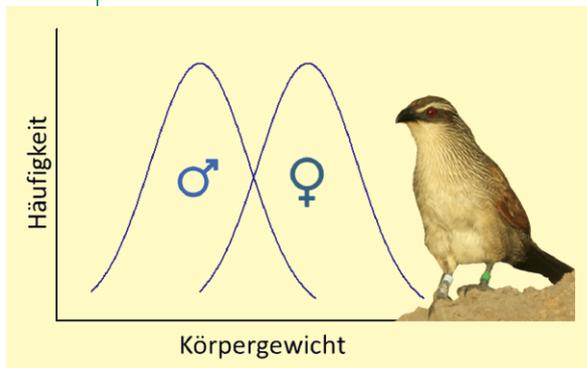
Spermien (oben links) sind viel kleiner als Eizellen (oben rechts) und durch ihr Flagellum beweglich. Sie tragen nur genetisches Material zur Zygotenbildung bei, während die Eizelle zusätzlich alle Zellorganellen, das Zellplasma und die Zellmatrix beisteuert. Eine menschliche Eizelle hat ein ca. 10-millionenfach größeres Volumen als ein Spermium. Bei Fruchtfliegen und einigen anderen Organismen gibt es „Riesenspermien“, die mitunter ein sehr langes Flagellum haben, ihr Volumen ist aber dennoch viel kleiner als das der zugehörigen Eizellen. Spermien werden in großer Zahl produziert und konkurrieren um die Vereinigung mit den Eizellen, die – bei gleichem Ressourceneinsatz – in weitaus geringerer Zahl produziert werden. Keimzellen mittlerer Größe hätten einen großen evolutionären Nachteil und könnten weder mit den kleinen Spermien noch mit den großen Eizellen konkurrieren. Diese disruptive Selektion führt daher zu einer absoluten Größentrennung der Keimzellen ohne jegliche Überlappung. Dies ist die Grundlage der binären Definition des biologischen Geschlechts.

tum der Eier ausnutzen. Die Männchen sind somit von den Nährstoffen der Weibchen abhängig und pflanzen sich sozusagen auf deren Kosten fort, wie man es sonst aus der Beziehung von Parasiten zu ihren Wirten kennt [4]. Eine alternative Hypothese geht hingegen von Synergien aus: Sowohl Eizellen als auch Spermien haben einen Vorteil von ihrem Größenunterschied, weil disruptive Selektion

IN KÜRZE

- Das biologische Geschlecht ist binär. Individuen produzieren entweder **kleine, mobile Spermien oder große Eizellen**. Es gibt getrenntgeschlechtliche Organismen und solche, bei denen ein Individuum beide Keimzelltypen bilden kann.
- Das biologische Geschlecht **wird oft mit funktionalen Kriterien der Geschlechtsbestimmung** (z. B. Geschlechtschromosomen, primäre und sekundäre Geschlechtsmerkmale), mit sexueller Differenzierung oder unterschiedlichen Geschlechterrollen **verwechselt**. Im Gegensatz zum binären biologischen Geschlecht sind diese Merkmale jedoch nicht binär, sondern bilden ein Spektrum.
- Politische Ideologien – egal welcher Couleur – begehen einen **naturalistischen Fehlschluss**, wenn sie das biologische Geschlecht benutzen, um daraus **gesellschaftliche Normen herzuleiten**.
- Biologisches Geschlecht und Gender können voneinander abweichen. **Gender gibt es nur beim Menschen**.

ABB. 2 | ÜBERLAPPENDE GESCHLECHTSMERKMALE



Im Gegensatz zum binären Charakter der Gameten können viele andere Merkmale der Geschlechter überlappen. Zum Beispiel sind die Weibchen des Weißbrauenkuckucks (*Centropus superciliosus*) typischerweise größer als die Männchen, aber es gibt einen Überlappungsbereich, d. h. einige Männchen sind größer als einige Weibchen, und einige Weibchen sind kleiner als manche Männchen.

die Kontaktraten von Eizellen und Spermien erhöht und daraus ein Vorteil für beide Keimzelltypen entsteht [10]. Beide Hypothesen setzen unterschiedliche Gründe für die Evolution von Anisogamie voraus, aber in beiden Fällen kommt es zu disruptiver Selektion mit dem Ergebnis zweier Keimzelltypen (Abbildung 1). Damit verbunden ist die Entstehung der beiden biologischen Geschlechter. Im Laufe der Evolution hat sich die Zweigeschlechtlichkeit mehrfach unabhängig voneinander entwickelt, was den starken Evolutionsdruck, der hinter dieser disruptiven Selektion steht, nochmal verdeutlicht. Im Gegensatz zur klar binären Ausbildung der Geschlechtszellen kommt es bei vielen anderen phänotypischen Merkmalen der Geschlechter allerdings zu Überlappungen, die nicht binär, sondern fließend sind (Abbildung 2)

Geschlechter sind eine evolutionäre Strategie zur Erzeugung von Nachkommen

Die evolutionär abgeleitete Definition der beiden Geschlechter beruht nicht auf einer wesenhaften Männlichkeit oder Weiblichkeit von Individuen, sondern bezieht sich lediglich auf zwei evolutionär selektierte Strategien zur Erzeugung von Nachkommen. Dabei erfordert die geschlechtliche Fortpflanzung nicht zwingend die Existenz getrennter männlicher und weiblicher Individuen. Bei vielen Tierarten werden Eizellen und Spermien von ein und demselben Individuum produziert – und zwar entweder gleichzeitig oder nacheinander im Laufe des Lebens. Viele Korallen, Würmer, Tintenfische, Schnecken sowie fast alle Blütenpflanzen sind Simultanzwitter, d. h. ein Individuum produziert gleichzeitig weibliche und männliche Keimzellen. Somit sind weibliche und männliche Funktionen im selben Individuum vereint. Viele Fischarten hingegen sind sequenzielle Zwitter, d. h. sie wechseln im Laufe ihres Lebens ihr biologisches Geschlecht. Zum

Beispiel beginnen die zwischen Anemonen lebenden Clownfische (bekannt geworden durch Walt Disneys Nemo) ihre Fortpflanzungskarriere als Männchen. Die Verwandlung zum Weibchen ist sozial geregelt: Nur das größte Individuum einer Gruppe verwandelt sich in ein Weibchen und legt Eier. Putzerlippfische hingegen beginnen ihre sexuelle Laufbahn als Weibchen; erst später im Leben verwandeln sich die größten Individuen in Männchen [11].

Betrachtet man den gesamten Stammbaum des Lebens, dann gibt es deutlich mehr und weitaus vielfältigere Sexual- und Fortpflanzungsstrategien als die uns Menschen aus eigener Erfahrung vertrauten [12]. Bei Einzellern entstehen die Nachkommen beispielsweise durch die Teilung der Elternzelle, die damit letztendlich ihre individuelle Existenz aufgibt. Diese Form der ungeschlechtlichen Fortpflanzung findet sich bei allen Prokaryonten, d. h. Archaeen und Bakterien, aber auch bei einigen einzelligen Eukaryonten wie Amöben und Hefen. Bei Mehrzellern unterscheidet man zwei Formen der ungeschlechtlichen Fortpflanzung: Bei der sogenannten agametischen Fortpflanzung entstehen die Nachkommen aus Körperzellen des Elters – entweder durch Fragmentierung des gesamten Elterindividuum (wie z. B. bei Korallen und Schwämmen) oder durch Knospung am Elterkörper (wie z. B. bei Quallen). Eine zweite Form der ungeschlechtlichen Fortpflanzung ist die Parthenogenese. Dabei entwickeln sich die Nachkommen aus unbefruchteten Eiern. Parthenogenetische Arten bestehen somit nur aus weiblichen Individuen und kommen z. B. bei Rädertieren und Bärtierchen, aber auch bei einigen Schlangen und Eidechsen vor. Bei manchen Arten wechseln sich sexuelle und parthenogenetische Fortpflanzung ab, indem auf eine Runde sexueller Fortpflanzung mehrere Runden ungeschlechtlicher Vermehrung folgen (z. B. bei Blattläusen). Der Wechsel zwischen sexueller und nicht-sexueller Fortpflanzung ist recht häufig, ausschließliche Parthenogenese hingegen ist eher selten und kommt bei weniger als 0,1 Prozent aller Tierarten [13] und bei etwa 1 Prozent aller Blütenpflanzen vor [14].

Geschlecht und Gender beim Menschen

In Bezug auf seine Fortpflanzungsbiologie ist der Mensch ein typisches Säugetier. Was den Menschen von anderen Tieren unterscheidet, ist der zusätzliche Besitz eines sozialen Geschlechts, auch *Gender* genannt. Ursprünglich bezog sich der Begriff *Gender* im Englischen vor allem auf das grammatikalische Geschlecht eines Wortes [15, 16]. Bei Untersuchungen zum Hermaphroditismus bei Menschen stießen John Money und seine Kollegen in den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts bei manchen Menschen auf Unstimmigkeiten zwischen zugewiesenem Geschlecht und Merkmalen wie der äußeren und inneren Genitalmorphologie, Geschlechtshormonen, sekundären Geschlechtsmerkmalen, Geschlechtschromosomen oder den Keimdrüsen [17]. Daraufhin führten die Autoren den Begriff *gender role* als zusätzliches Kriterium ein, um die

eigene Geschlechtswahrnehmung der Patientinnen und Patienten besser einschätzen zu können. Der Begriff *Gender* beschreibt seither, wie Menschen sich selbst geschlechtlich wahrnehmen, und zwar unabhängig davon, ob ihre eigene Einschätzung mit dem gesellschaftlich zugewiesenen oder ihrem biologischen Geschlecht übereinstimmt. Wenn beide übereinstimmen, spricht man auch von *cis-Gender*; wenn nicht, von *trans-Gender*. Im Unterschied zu anderen Tieren können Menschen andere Menschen nach ihrem *Gender* fragen. Für Tiere gibt es in der Verhaltensbiologie – bisher zumindest – keine Methode, Individuen nach ihrem *Gender* zu befragen. Da die Selbsteinschätzung von *Gender* zudem Selbsterkenntnis und ein hohes Abstraktionsvermögen voraussetzt, ist unklar ob und wenn ja, welche Tierarten überhaupt eine Vorstellung von *Gender* haben können [16]. *Gender* ist zum gegenwärtigen Wissensstand daher ein spezifisch menschliches Phänomen und sollte deshalb auch nur in Bezug auf den Menschen und nicht bei anderen Tieren verwendet werden.

Im Gegensatz zu *Gender* ist die biologische Zweigeschlechtlichkeit ein zentrales Konzept der Biologie. Zweigeschlechtlichkeit zu leugnen oder zu missachten, wie das manche Philosoph/-innen, Biomediziner/-innen oder einflussreiche Wissenschaftszeitschriften tun, ist eine viel zu kurz gegriffene Perspektive, die nur den Menschen im Blick hat und Millionen anderer Arten ausblendet. Eine solch anthropozentrische Haltung ist äußerst problematisch, weil sie beim Versuch, nichtmenschlichen Tieren menschliche Identitätskonzepte aufzuzwingen, einen „Artenchauvinismus“ befördert. Offene, gesellschaftliche Diskussionen über Genderdiversität sind begrüßenswert, aber die inhärent menschliche soziokulturelle Definition dessen, was weiblich, männlich oder divers ist, kann nicht einfach auf Millionen anderer Arten übertragen werden. In der Biologie sollten wir versuchen, von unserer verengten menschlichen Sichtweise Abstand zu nehmen, um die gesamte Vielfalt des Lebens im Blick zu behalten. Dies mag hin und wieder dazu führen, gesellschaftliche Konzepte und Konventionen in Frage zu stellen. Irreführende anthropozentrische Vorstellungen unterstützen beispielsweise die Idee, dass sich Zweigeschlechtlichkeit zwingend auf unterschiedliche Individuen bezieht, oder dass das biologische Geschlecht eines Individuums konstant sein müsse. Das Leben ist weitaus vielfältiger, besonders wenn wir Nesseltiere, Plattwürmer, Moostierchen oder viele Pflanzen betrachten, die sich zusätzlich durch Knospung, Spaltung und Fragmentierung vermehren. Diese Art von Fortpflanzung relativiert nicht nur die begrenzte anthropozentrische Sichtweise der (sexuellen) Fortpflanzung, sondern auch unsere Vorstellung vom Wesen und der Konstanz eines „Individuums“.

Naturalistische Fehlschlüsse

Im Unterschied zur englischen Sprache, wo eine Unterscheidung zwischen *sex* und *gender* einfach ist, verfügt das Deutsche ursprünglich nur über einen Begriff für das

Geschlecht. Da die Unterschiede zwischen biologischem Geschlecht und *Gender* immer noch wenig bekannt sind, werden beide Begriffe daher oft vermengt. Dies führt zur Verbreitung falscher Vorstellungen in Gesellschaft und Wissenschaft. Auch in der Biomedizin scheint das Wissen um die biologischen Grundlagen der Zweigeschlechtlichkeit teilweise verloren zu gehen, wie z. B. ein Beitrag im Tagesspiegel nahelegt (<https://www.tagesspiegel.de/wissen/es-gibt-mehr-als-zwei-geschlechter-5211841.html>). Andere Wissenschaftler/-innen kennen diese Grundlagen sehr wohl, verdrängen oder verschleiern diese aber, vermutlich weil sie annehmen, dass Zweigeschlechtlichkeit und Akzeptanz genderdiverser Menschen im Widerspruch stünden. Dieser Haltung liegt jedoch ein naturalistischer Fehlschluss zu Grunde, das sogenannte *Argumentum ad naturam*. Er beruht auf der fälschlichen Annahme, dass das was „natürlich“ ist, auch „gut“ sei. Man kann jedoch nicht vom „Sein“ auf das „Sollen“ schließen. Der naturalistische Fehlschluss wird häufig begangen, wenn ein moralisches Urteil auf Grundlage natürlicher Eigenschaften gefällt wird. Moralische Aussagen lassen sich jedoch nicht aufgrund natürlicher Eigenschaften treffen; „natürlich sein“ ist für ethische Bewertungen nicht relevant. Kurzum: Das Vorhandensein zweier biologischer Geschlechter ist für die Normenbildung offener moderner Gesellschaften unerheblich.

Wissenschaft bedeutet Wahrheitssuche. Dennoch sind Wissenschaftler/-innen auch nur Kinder ihrer Zeit. Gesellschaftliche Normen, Konventionen und Tabus können daher den vermeintlich objektiven Blick trüben. Deswegen ist es durchaus hilfreich, vermeintlich wissenschaftlich gesicherte Sachverhalte stets auf ihre Aktualität zu überprüfen. Ein gutes Beispiel aus der Evolutionsbiologie ist ein feministischer Blickwinkel, der notwendig war, um bis dato als gesichert geltende Erkenntnisse zu Geschlechtsunterschieden im Verhalten als patriarchalisch zu erkennen. Um diesen androzentrischen Blickwinkel zu korrigieren, brauchte es feministische Wissenschaftler/-innen; meist waren dies Frauen. Kritiker des feministischen Ansatzes bemängelten zunächst die ‚feministische Brille‘ und behaupteten, die neuen Erkenntnisse seien ‚ideologisch‘ gefärbt. Die Kritiker waren sich dabei ihrer eigenen ‚androzentrischen Brille‘ gar nicht bewusst. Letztendlich ermöglichte die feministische Perspektive einen neuen und viel umfassenderen Blick auf das Verhalten der Tiere. Malin Ah-King hat diese wissenschaftsphilosophisch sehr interessante Entwicklung kürzlich in einem lesenswerten Buch zusammengefasst [18]. Als Beispiele seien die Untersuchungen von Sarah Blaffer Hrdy oder Meredith Small genannt. Diese beiden Primatologinnen zeigten, dass Weibchen sehr aktiv Partnerwahl betreiben und unterschiedlichste Paarungsstrategien verfolgen – Erkenntnisse, die der damaligen Vorstellung von sexuell passiven und unterwürfigen Weibchen widersprachen [19, 20]. Mittlerweile sind die Erkenntnisse dieser ehemals revolutionären Primatologinnen wissenschaftliches Allgemeingut.

Kann nun gleichermaßen der Blickwinkel nicht-binärer, genderdiverser Menschen helfen, neue Perspektiven aufzuzeigen und zu einer objektiveren – weniger durch Normen der Mehrheitskultur geprägten – Weltsicht beitragen? Ist ein nicht-binärer Blick auf die Zweigeschlechtlichkeit notwendig für eine umfassendere Sichtweise? Wir denken, in diesem Fall wäre eine solche Sichtweise für die Biologie als Ganzes eher einengend, weil sie lediglich auf Besonderheiten des menschlichen Wesens fokussiert ist. Um die Bedürfnisse und Rechte queerer Menschen zu begründen und zu befürworten, muss die biologische Zweigeschlechtlichkeit nicht in Frage gestellt werden. Vielmehr ist es notwendig, das biologische Geschlecht und *Gender* von Menschen getrennt voneinander zu betrachten [16, 21]. Um dies zu tun, ist es hilfreich, verbreitete Missverständnisse zur Zweigeschlechtlichkeit aufzuklären.

Missverständnisse zur Zweigeschlechtlichkeit

Die Ansicht, das biologische Geschlecht sei begründet auf Chromosomen, Genen, Hormonen, Vulven und Penissen oder sekundären Geschlechtsmerkmalen, ist ein weit verbreiteter Irrtum (z. B. [22–26]). Manche halten das biologische Geschlecht sogar für ein rein soziales Konstrukt [27]. Diese Vorstellungen spiegeln in hohem Maße eine anthropozentrische Sichtweise wider. In Wirklichkeit ist keines der obengenannten Merkmale geeignet, *per se* Weiblichkeit und Männlichkeit zu definieren. All diese

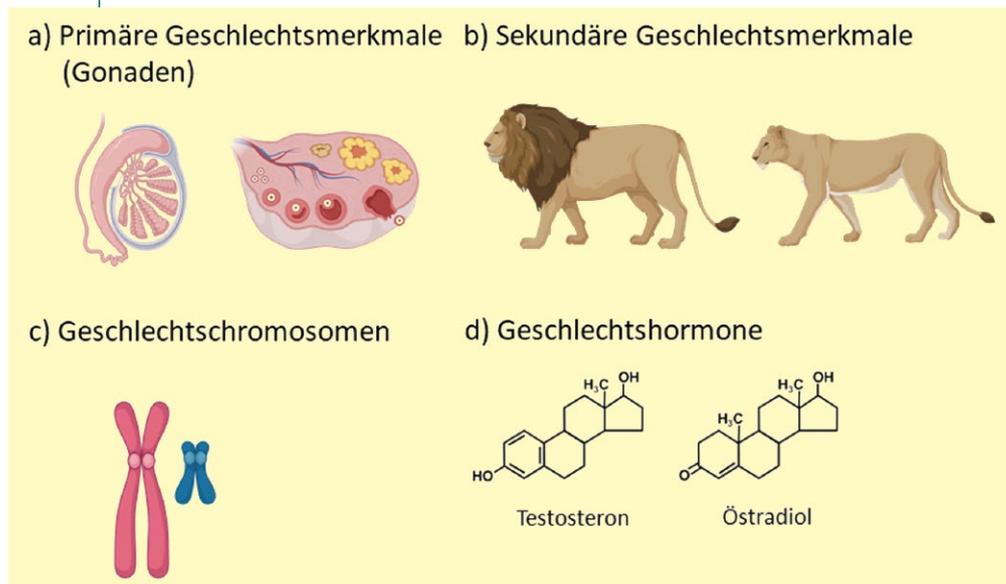
Merkmale können zwar mit dem Keimzellengeschlecht in Verbindung stehen, dies ist aber weder zwingend notwendig noch gilt es für alle Arten.

Ein Grund für diese Fehleinschätzung liegt auch in der Herangehensweise der Biomedizin mit ihrem Fokus auf den Menschen. In der Medizin werden Geschlechtschromosomen oder geschlechtstypische Phänotypen des Menschen (und anderen Säugetieren) oft mit dem biologischen Geschlecht gleichgesetzt (Abbildung 3). Kritiker der Zweigeschlechtlichkeit greifen diese Definition auf und argumentieren, dass es fließende Übergänge zwischen der phänotypischen Ausprägung der Geschlechter gibt (nachzulesen in [28]). Geschlechtschromosomen oder geschlechtsassoziierte Phänotypen können aber das biologische Geschlecht nicht allgemein definieren, denn es gibt viele Arten, die gar keine Geschlechtschromosomen haben. Bei Säugetieren, Vögeln oder Schmetterlingen sind Geschlechtschromosomen Grundlage für die Geschlechtsdifferenzierung; bei vielen anderen Arten sind es jedoch Umweltfaktoren, wie z. B. die Umgebungstemperatur oder soziale Interaktionen, die das Geschlecht bestimmen oder dessen Wechsel einleiten (nachzulesen in [29, 30]). Ein weiterer Trugschluss betrifft die Homozygotie. Bei Säugetieren sind homozygote Geschlechtschromosomen (XX) ein gutes funktionales Merkmal für Weibchen: Ein Säugetier mit homozygoten Geschlechtschromosomen produziert mit großer Wahrscheinlichkeit Eizellen. Bei Vögeln hingegen sind homozygote Geschlechtschromosomen (ZZ) ein funktionales Geschlechtsmerkmal für Männchen.

Homozygotie als solche ist somit keine geeignete Definition für „weiblich“ oder „männlich“. Geschlechtschromosomen oder Geschlechtsmerkmale eignen sich daher nicht zur allgemeinen Definition von Geschlechtern. Für bestimmte Arten erlauben diese Merkmale zwar, das Geschlecht mit großer Zuverlässigkeit vorherzusagen; für eine allgemeingültige Definition taugen sie jedoch nicht [31]. Gleiches gilt für Hormonkonzentrationen oder phänotypische Merkmale wie Körpergröße, Gefiederfärbung oder Fellzeichnung, die fließende Übergänge zwischen den Geschlechtern haben können (Abbildung 2).

Eine weitere Ursache von Missverständnissen zum biologischen Geschlecht ist die Verwechslung von Geschlecht mit sexueller Differenzierung. Letztere beschreibt die Entwicklungsprozesse, die zur Ausprägung des biologischen Geschlechts und der Geschlechtsmerkmale führen (Abbildung 4). Die Entwicklung von der Zygote bis zum fertigen Organismus

ABB. 3 | FUNKTIONALE GESCHLECHTSMERKMALE



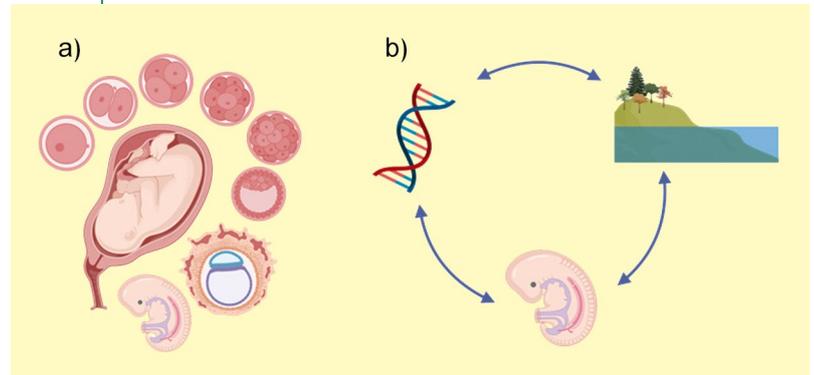
a) Hoden und Eierstöcke sind primäre Geschlechtsmerkmale, b) der Größenunterschied und die Mähne sind phänotypische sekundäre Geschlechtsmerkmale bei Löwen, c) bei Säugetieren unterscheiden sich die Geschlechter durch ihren Geschlechtschromosomensatz und d) Testosteron und Östradiol sind Geschlechtshormone von Wirbeltieren, wobei Weibchen meist höhere Östradiolkonzentrationen als Männchen aufweisen, während es bei Testosteron meist umgekehrt ist.
Abb. mit BioRender erstellt.

mus ist komplex. Beim Menschen steht am Anfang die geschlechtsspezifische Expression von Genen auf den Geschlechtschromosomen, die zur Ausprägung der Keimdrüsen führen. Die Hormone, die von den Keimdrüsen ausgeschüttet werden, beeinflussen wiederum die Ausprägung der primären und sekundären Geschlechtsmerkmale. Dieser Prozess wird durch komplexe Wechselwirkungen zwischen Genen, Zellen, und Rückkopplungsmechanismen innerhalb des sich entwickelnden Organismus und seiner Umwelt moduliert.

Im Verlauf der geschlechtlichen Differenzierung beim Menschen sind Ungenauigkeiten möglich, so dass mit einer Häufigkeit von ca. 2–3 Prozent Individuen entstehen, die phänotypische Merkmale beider Geschlechter aufweisen [32]. Neben diesen Personen, die sich nicht eindeutig einem der beiden Geschlechter zuordnen lassen (Intersexuelle), gibt es auch Menschen, die zwar morphologisch eindeutig männlich oder weiblich sind, die diese Zuweisung aber nicht so empfinden (*trans-Gender*). Für diese Menschen ist der *Gender*-Begriff sehr hilfreich, um das subjektiv wahrgenommene Geschlecht zu benennen (was übrigens in den allermeisten Fällen zu einer kategoriellen Selbstzuordnung zu „weiblich“ oder „männlich“ führt). Diese Form der sexuellen Differenzierung, die manchmal zu uneindeutigen Geschlechtsmerkmalen führt, stellt jedoch das biologische Geschlecht nicht grundsätzlich in Frage. Auch bei den meisten Intersexuellen entstehen kleine oder große Keimzellen. Nur Menschen mit dem Ullrich-Turner-Syndrom, welche nur ein X-Chromosom besitzen, können mit ihren verkümmerten Eierstöcken keine Eizellen produzieren.

Ein prominentes Beispiel für die Fehldeutung der geschlechtlichen Entwicklung ist ein in *Nature* veröffentlichter Beitrag [22], der die chromosomalen und genregulatorischen Prozesse zusammenfasst, die zu einer uneindeutigen sexuellen Differenzierung bei Menschen und anderen Säugetieren führen. Im Untertitel dieses Artikels heißt es sinngemäß: „Die Vorstellung von zwei Geschlechtern ist zu einfach. Biologen geben heute davon aus, dass es ein breiteres Spektrum gibt“. In diesem Artikel wird das biologische Geschlecht mit sexueller Differenzierung und sexueller Entwicklung verwechselt. Darüber hinaus gibt dieser Artikel vor, für die Biologie im Allgemeinen zu sprechen, argumentiert aber aus einer rein anthropozentrischen Sichtweise. Zweifellos hat die biomedizinische Forschung gezeigt, dass die sexuelle Differenzierung beim Menschen kompliziert und vielfältig ist. Diese Komplexität kann zwar zu intersexuellen Phänotypen mit sich überschneidenden Merkmalen zwischen den Geschlechtern führen (z. B. Sexualhormonspiegel, Körpergröße, psychologische Merkmale), und das macht es schwierig, solche Merkmale als eindeutige funktionale Kriterien für eine zuverlässige Vorhersage des biologischen Geschlechts zu verwenden. Dies bedeutet jedoch nicht, dass es ein breiteres Spektrum an biologischen Geschlechtern gibt. Im Gegenteil: Trotz intensiver Forschung wurde bisher kein

ABB. 4 | SEXUELLE DIFFERENZIERUNG



Während der frühen Ontogenese (hier dargestellt durch einen menschlichen Embryo) beginnt die sexuelle Differenzierung. Dies ist ein komplexer Prozess, bei dem Gene, der Organismus und seine Umwelt in Wechselwirkung stehen, was zu vielfältigen Modifikationen in der Entwicklung führen kann. Abb. mit BioRender erstellt.

drittes biologisches Geschlecht beschrieben. Es gibt auch keine fünf verschiedenen biologischen Geschlechter, wie von Fausto-Sterling postuliert [33], und männliches und weibliches Geschlecht sind auch keine „kontextabhängigen Kategorien mit flexiblen Assoziationen zu mehreren Variablen“ (sinngemäß übersetzt nach [26]). Das biologische Geschlecht kennzeichnet Fortpflanzungsstrategien, die auf zwei Typen unterschiedlich großer Keimzellen beruhen, die sich zur Zygote vereinen [3–6]. Joan Roughgarden, eine Biologin, die sich als Transgender-Person identifiziert, drückt es (sinngemäß übersetzt) sehr trefflich aus: „[...] ‚männlich‘ bedeutet, kleine Gameten zu erzeugen, und ‚weiblich‘ bedeutet, große Gameten zu erzeugen. Punkt!“ [34]. Da die biologische Theorie die disruptive Selektion der Keimzellgröße als zwangsläufige Folge der Evolution beschreibt und die Empirie bisher keine Ausnahme kennt, gehen Wickler und Seibt [35] sogar so weit, die Zweigeschlechtlichkeit als Naturgesetz zu bezeichnen.

Ein dritter Grund für das weit verbreitete Missverständnis zum biologischen Geschlecht ist die Vorstellung, dass es sich beim Geschlecht um einen Zustand handelt, während es in Wirklichkeit ein lebensgeschichtliches Stadium oder ein Prozess ist [31]. Ein Säugetierjunges mit heterozygoten Geschlechtschromosomen (XY) ist nicht fortpflanzungsfähig, da es noch keine Keimzellen produziert. Streng genommen hat dieses Jungtier also noch kein biologisches Geschlecht. Wir können aber mit großer Wahrscheinlichkeit vorhersagen, dass sich ein Säugetierjunges mit XY-Chromosomensatz und entsprechenden primären und sekundären Geschlechtsmerkmalen auf einem Entwicklungspfad befindet, der zu einem fortpflanzungsfähigen (spermienproduzierenden) Männchen führt. Daher ist es durchaus gerechtfertigt, dieses Jungtier als Männchen zu bezeichnen. Das Konzept des biologischen Geschlechts eignet sich aber nicht dafür, jedem Organismus zu jedem Zeitpunkt seines Lebens ein biolo-



ABB. 5 Beispiele für Geschlechterrollen aus unserer eigenen Forschung. a) Beim Grillkuckuck (*Centropus grillii*) sind die Geschlechterrollen „vertauscht“. Die großen Weibchen verteidigen singend große Reviere und werben um Männchen. Bis zu fünf Männchen bekommen je ein Gelege, das sie jeweils alleine ausbrüten. Auch die Fütterung der Jungvögel wird ausschließlich von Vätern übernommen. b) Bei vielen Lemuren, z. B. beim Katta (*Lemur catta*), unterscheiden sich Männchen und Weibchen zwar nicht in der Körpergröße, aber Weibchen dominieren die Männchen ihrer Gruppe und besitzen zudem eine vergrößerte („maskulinisierte“) Klitoris. c) Tüpfelhyänen (*Crocuta crocuta*) leben in komplexen matrilinearen Gesellschaften. Außerdem besitzen weibliche Tüpfelhyänen einen sogenannten Pseudopenis, der eine wichtige Rolle in der sozialen Kommunikation spielt. Ein erigierter Penis oder Pseudopenis dient als Zeichen der Unterordnung. An den äußeren Geschlechtsmerkmalen sind die Geschlechter der Tüpfelhyäne nur von Experten unterscheidbar.

gisches Geschlecht zuzuweisen [31]. Stattdessen werden funktionale Kriterien wie Chromosomen, Gene oder primäre Geschlechtsmerkmale verwendet, um das biologische Geschlecht zu beschreiben. In der Regel funktioniert das ganz gut, aber eben nicht immer. Diese Tatsache spiegelt eine biologische Realität wider, denn das biologische Geschlecht gleicht eher einem Prozess als einem Zustand.

Ein vierter häufiger Irrtum ist die Verwechslung von biologischem Geschlecht und Geschlechterrollen. Als Geschlechterrollen bezeichnet man systematische Verhaltensunterschiede zwischen Weibchen und Männchen, die im Zusammenhang mit der Fortpflanzung stehen. Das beinhaltet Verhaltensweisen wie den Wettstreit um Partner, die Partnerwahl und auch die Brutpflege [36]. Das biologische Geschlecht ist binär, aber die Geschlechterrollen können sich innerhalb einer Art und zwischen den Arten unterscheiden und sehr flexibel sein (Abbildung 5). Bei der Schwimmgrundel (*Gobiusculus flavescens*), einem europäischen Meeresfisch, ändern sich die Geschlechterrollen innerhalb einer Brutsaison. Zu Beginn konkurrieren die Männchen heftig miteinander und umwerben die wählerischen Weibchen. Im Laufe der Brutsaison verändert sich das jedoch. Viele Männchen sterben beim Wettstreit um die Weibchen und die erfolgreichen Männchen sind schließlich mit der Brutpflege beschäftigt. Dadurch verschiebt sich das Geschlechterverhältnis der noch fortpflanzungsbereiten Tiere im Laufe der Saison zugunsten der Weibchen, die nun beginnen, um die wenigen noch paarungsbereiten Männchen zu konkurrieren, die dann wiederum wählerisch werden [37]. Dieses Beispiel zeigt, dass Wettbewerb und Balz nicht *per definitionem* männliche Geschlechtsrollen sind. Ebenso können nicht nur Weibchen wählerisch sein. Es zeigt auch, dass Brutpflege nicht *per definitionem* eine weibliche Eigenschaft ist. Bei Säugetieren ist Brutfürsorge eine typische weibliche Geschlechterrolle, aber bei Fischen pflegen Männchen – so wie bei der Schwimmgrundel – viel häufiger die Brut [38].

Typischerweise wirkt sexuelle Selektion stärker auf Männchen [39–41]. Aber Konkurrenz, Dominanz und Balzverhalten sind auch bei Weibchen weitaus verbreiteter als bis noch vor kurzer Zeit angenommen [36, 39, 42]. Die Geschlechterrollen vieler Tiere sind zudem sehr viel plastischer als es die klassische Evolutionstheorie angenommen hat. Weibchen und Männchen vieler Tierarten können ihre Geschlechterrollen flexibel an sich ändernde Umwelt- und Sozialbedingungen anpassen. Wenn also etwas kontextabhängig ist und viele mögliche Dimensionen einnehmen kann, dann sind es Geschlechterrollen, nicht aber das biologische Geschlecht.

Schlussfolgerung

Zweigeschlechtlichkeit zu leugnen untergräbt den wissenschaftlichen Fortschritt und das Vertrauen in die Wissenschaft. Die biologische Definition der Geschlechter kann nicht die Grundlage für die Definition der sozialen Ge-

schlechter von Menschen sein. Bei unserer Spezies gibt es zwei Geschlechter, die aber einen Regenbogen an individuellen *Gendern* aufweisen, die sich ihrerseits auch im Laufe des sozialen Lebens ändern können. Der Philosoph Paul Griffiths hat diese Perspektive in einem sehr lesenswerten Aufsatz detailliert dargelegt [21]. Ebenso kann das anthropozentrische Konstrukt des sozialen Geschlechts oder *Genders* nicht auf andere Tierarten angewandt werden [16]. Das ist die rote Linie, die den Menschen mit seiner einzigartigen Kombination aus biologischem Geschlecht und *Gender* von anderen Tieren und Pflanzen trennt, die – nach gegenwärtigem Wissensstand – lediglich zwei biologische Geschlechter und kein *Gender* haben. Die Zweigeschlechtlichkeit ist eine Naturuniversalie der sexuellen Fortpflanzung und deshalb von zentraler Bedeutung für die Biologie und die Entwicklung der Vielfalt des Lebens. Diese Grundlage ist auch wichtig für alle, die an einem tieferen Verständnis der Natur des Geschlechts beim Menschen interessiert sind. Zweigeschlechtlichkeit zu leugnen, aus welchen edlen Motiven auch immer, widerspricht der gesicherten wissenschaftlichen Evidenz und kann im schlimmsten Fall dazu führen, dass die Gesellschaft das Vertrauen in die Wissenschaft verliert.

Zusammenfassung

Der gesellschaftliche Fortschritt schafft ein zunehmend offeneres Umfeld für Menschen, die sich weder als Frau noch als Mann verstehen. Im Rahmen dieser gesellschaftlichen Entwicklung wird aber auch die biologische Zweigeschlechtlichkeit zunehmend in Frage gestellt. Diese Sichtweise widerspricht grundlegenden biologischen Erkenntnissen. Obwohl wir gesellschaftliche Bemühungen zur Schaffung eines respektvollen Umfelds für genderdiverse Menschen vollumfänglich unterstützen, bedeutet dies nicht, dass dafür gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse geleugnet werden müssen. Wir zeigen hier die häufigsten Missverständnisse auf, die zur Leugnung des biologischen Geschlechts führen, das letztendlich eine Grundlage für die Vielfalt des Lebens ist. Der Mensch mit seiner einzigartigen Kombination aus biologischem Geschlecht und sozialem Gender unterscheidet sich in dieser Hinsicht von Tieren und Pflanzen. Die Leugnung der Zweigeschlechtlichkeit, aus welcher noblen Beweggründen auch immer, widerspricht der wissenschaftlichen Evidenz und steht in einer Reihe mit der Behauptung, die Sonne drehe sich um die Erde.

Summary

Sex and gender: A biological perspective

Progress in society is creating an increasingly open environment for people who consider themselves as neither female nor male. However, as part of this development, biological bisexuality is increasingly queried. This view contradicts fundamental biological facts. While we fully endorse social efforts to create a more inclusive environment for gender-diverse people, this does not mean that in return reliable scientific findings have to be denied. Here we highlight the

most common misconceptions that lead to the denial of biological sex, which is – all things considered – a basis for the diversity of life. Humans with their unique combination of biological sex and gender are different from non-human animals and plants in this respect. Denying the concept of biological sex ultimately undermines scientific evidence and is on par with the claim that the sun revolves around the earth.

Schlagworte

Zweigeschlechtlichkeit, Gameten, Eizelle, Spermium, Isogamie, Anisogamie, sexuelle Fortpflanzung, asexuelle Fortpflanzung, agametische Fortpflanzung, Parthenogenese, disruptive Selektion, Geschlechtschromosomen

Danksagung

Wir bedanken uns für drei anonyme Gutachten, die geholfen haben das Manuskript zu verbessern. Außerdem möchten wir uns bei den Teilnehmern der Tagung der Deutschen Zoologischen Gesellschaft (DZG) in Kassel 2023 für die reghafte Beteiligung an der Diskussion bedanken und bei Prof. Gabriele Uhl, Präsidentin der DZG, und Prof. Jutta Schneider (Uni Hamburg) für die Anregung, einen Artikel für „Biologie in unserer Zeit“ (BiuZ) zum Thema zu verfassen.

Literatur

- [1] W. Goymann et al. (2023). Biological sex is binary, even though there is a rainbow of sex roles. *BioEssays* 45, 2200173.
- [2] Q. Cronk (2022). Some sexual consequences of being a plant. *Phil. Trans. Royal Soc. B* 377, 20210213.
- [3] H. Kalmus (1932). Über den Erhaltungswert der phänotypischen (morphologischen) Anisogamie und die Entstehung der ersten Geschlechtsunterschiede. *Biolog. Zentralbl.* 52, 716–726.
- [4] G. A. Parker et al. (1972). The origin and evolution of gamete dimorphism and the male-female phenomenon. *J. Theor. Biol.* 36, 529–553.
- [5] J. Maynard Smith (1978). *The evolution of sex*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [6] S. C. Stearns (1987). Why sex evolved and the differences it makes, in: *The evolution of sex and its consequences* (Hrsg.: S. C. Stearns), Birkhäuser, Basel, 15–31.
- [7] C. M. Lessells et al. (2009). The evolutionary origin and maintenance of sperm: selection for a small motile gamete mating type. In: *Sperm biology: an evolutionary perspective* (Hrsg.: T. R. Birkhead, D. J. Hosken, S. Pitnick), Academic Press, New York, 43–67.
- [8] M. D. Jennions, H. Kokko (2010). Sexual selection, in: *Evolutionary behavioral ecology* (Hrsg.: D. F. Westneat, C. W. Fox), Oxford University Press: Oxford, New York, 343–364.
- [9] J. Lehtonen et al. (2016). What do isogamous organisms teach us about sex and the two sexes? *Phil. Trans. Royal Soc. B* 371, 20150532.
- [10] J. Roughgarden, P. Iyer (2011). Contact, not conflict, causes the evolution of anisogamy. In: *The evolution of anisogamy: A fundamental phenomenon underlying sexual selection* (Hrsg.: P. A. Cox, T. Togashi), Cambridge University Press, Cambridge, 96–110.
- [11] D. Y. Shapiro (1994). Sex changes in fishes. In: *The differences between the sexes* (Hrsg.: R. V. Short, E. Balaban), Cambridge University Press, Cambridge, 105–130.
- [12] M. Schilthuizen (2014). *Nature's nether regions. What the sex lives of bugs, birds, and beasts tell us about evolution, biodiversity, and ourselves*. Viking, New York.
- [13] R. Vrijenhoek et al. (1989). A list of known unisexual vertebrates. In: *Evolution and ecology of unisexual vertebrates* (Hrsg.: R. Dawley, J. P. Bogart), New York State Museum, Albany NY.

Dieser Artikel basiert in Teilen auf einem von uns kürzlich publizierten englischsprachigen Beitrag in der Zeitschrift *Bioessays* [1].

- [14] J. Whitton et al. (2008). The dynamic nature of apomixis in the angiosperms. *Int. J. Plant Sci.* 169, 169–182.
- [15] D. Haig (2004). The inexorable rise of gender and the decline of sex: Social change in academic titles, 1945–2001. *Arch. Sexual Behav.* 33, 87–96.
- [16] W. Goymann, H. Brumm (2018). Let's talk about sex – not gender. *BioEssays* 40, 1800030.
- [17] J. Money et al. (1955). An examination of some basic sexual concepts: the evidence of human hermaphroditism. *Bull. Johns Hopkins Hosp.* 97, 301–19.
- [18] M. Ah-King (2022). The female turn. How evolutionary science shifted perceptions about females. Springer Nature, Singapore.
- [19] M. F. Small (1996). *Female choices: Sexual behavior of female primates*. Cornell University Press, Ithaka.
- [20] S. Blaffer-Hrdy (1999). *Mother nature: A history of mothers, infants, and natural selection*. Pantheon Books, New York.
- [21] P. Griffiths (2020). Sex is real. *Aeon Magazine*, <https://aeon.co/essays/the-existence-of-biological-sex-is-no-constraint-on-human-diversity>.
- [22] C. Ainsworth (2015). Sexes redefined. *Nature* 518, 288–291.
- [23] R. Gorelick et al. (2013). Fundamental differences between females and males? In: *Challenging popular myths of sex, gender and biology* (Hrsg. M. Ah-King), Springer, Cham, 9–22.
- [24] M. Gross (2016). Transitions to new concepts of gender. *Curr. Biol.* 26, R141–R143.
- [25] B. J. King (2022). Gender, biology, and behavior. *Science* 376, 142–142.
- [26] M. E. Miyagi et al. (2021). Transgender rights rely on inclusive language. *Science* 374, 1568–1569.
- [27] J. Butler (1999). *Gender trouble. Feminism and the subversion of identity*, 2nd ed., Routledge, New York and London.
- [28] M. Mikkola (2017). Feminist perspectives on sex and gender. In: *The Stanford encyclopedia of philosophy* (Hrsg.: E. N. Zalta), Stanford University: Stanford.
- [29] D. Bachtrog (2014). Sex determination: why so many ways of doing it? *PLoS Biol* 12, e1001899.
- [30] J. J. Bull (1980). Sex determining mechanisms: An evolutionary perspective, in: *The evolution of sex and its consequences* (Hrsg.: S. C. Stearns), Birkhäuser, Basel, 93–115.
- [31] P. E. Griffiths (2021). What are biological sexes? University of Sydney, 1–28. Preprint: <https://philsci-archive.pitt.edu/id/eprint/19906>.
- [32] M. Blackless et al. (2000). How sexually dimorphic are we? Review and synthesis. *Am. J. Human Biol.* 12, 151–166.
- [33] A. Fausto-Sterling (1993). The five sexes. *The Sciences* 33, 20–24.
- [34] J. Roughgarden (2013) *Evolution's rainbow. Diversity, gender, and asexuality in nature and people*. University of California Press, Berkeley.
- [35] W. Wickler, U. Seibt (1998). *Männlich - Weiblich: Ein Naturgesetz und seine Folgen*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- [36] P. M. Kappeler et al. (2023). Sex roles and sex ratios in animals. *Biol. Rev.* 98, 462–480.
- [37] E. Forsgren et al. (2004). Unusually dynamic sex roles in a fish. *Nature* 429, 551–554.
- [38] J. D. Reynolds et al. (2002). Evolutionary transitions in parental care and live bearing in vertebrates. *Phil. Trans. Royal Soc. B* 357, 269–281.
- [39] M. Andersson (1994). *Sexual selection*. Monographs in Behavior and Ecology. Princeton University Press, Princeton.
- [40] T. Janicke et al. (2016). Darwinian sex roles confirmed across the animal kingdom. *Science Advances* 2, 1500983.
- [41] L. Winkler et al. (2019). Stronger net selection on males across animals. *eLife* 10, e68316.
- [42] R. M. Hare, L. W. Simmons (2019). Sexual selection and its evolutionary consequences in female animals. *Biol. Rev.* 94, 929–956.

Verfasst von:



Wolfgang Goymann studierte Biologie an der Freien Universität Berlin und an der LMU in München, wo er in Verhaltensbiologie promoviert hat. Nach einem Postdoc-Aufenthalt an der University of Washington in Seattle, hat er sich in München habilitiert. Er leitet seit 2004 eine Arbeitsgruppe am Max-Planck-Institut für biologische Intelligenz (vormals Max-Planck-Institut für Ornithologie) und ist Professor für Verhaltensbiologie an der Ludwig-Maximilians-Universität München. In seiner Forschung beschäftigt er sich mit Fragen zur Ökologie und Evolution von Paarungssystemen, der Wechselwirkung zwischen Hormonen und Verhalten sowie zum Arten- und Naturschutz.



Henrik Brumm studierte Biologie und Sozialpsychologie an der Freien Universität Berlin und wurde dort zum Doktor der Naturwissenschaften promoviert. Postdoc-Aufenthalt an der Universität St Andrews in Schottland und Fellow am Wissenschaftskolleg zu Berlin. Seit 2007 Forschungsgruppenleiter am Max-Planck-Institut für biologische Intelligenz (vormals Max-Planck-Institut für Ornithologie). Seine Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen Kommunikation und Stadtökologie.



Peter Kappeler ist ein Göttinger Verhaltensbiologe und Anthropologe. Er hat in Tübingen Biologie und an der Duke University (USA) 1992 in Zoologie promoviert. Nach der Habilitation in Tübingen übernahm er eine Professur für Verhaltensökologie in Leipzig, bevor er 2004 auf den Lehrstuhl für Soziobiologie & Anthropologie in Göttingen wechselte. Seine Forschung beschäftigt sich mit Fragen der sozialen Evolution, die er an madagassischen Primaten, aber auch an Raubtieren, Vögeln und Reptilien untersucht.

Korrespondenz:

Prof. Dr. Wolfgang Goymann
Max-Planck-Institut für biologische Intelligenz
Eberhard-Gwinner-Str. 6a
82319 Seewiesen
E-Mail: wgoymann@bi.mpg.de

Fortpflanzung zu Wasser und zu Lande: Amphibien und Reptilien im Vergleich zu Insekten

Luft taugt nicht für Sperma

WOLFGANG BÖHME



ABB. 1 Spermaübertragung an Land: a) beim Rüsselkäfer *Cleistolophus cf. similis*, b) bei der Landschildkröte *Testudo graeca ibera*.
Fotos: M. Schmitt und W. Böhme.

Unter den landlebenden Tieren sind vor allem zwei Gruppen dominant, die stammesgeschichtlich schon seit der kambrischen Ediacara-Periode bei der Gabelung der ► *Bilateria* in ► *Proto- und Deuterostomier* – also vor 540 bis 635 Millionen Jahren – voneinander getrennt sind [1]: die Insekten und die Landwirbeltiere oder Tetrapoden. Beide Gruppen hatten mit dem Verlassen des Wassers und der Eroberung des Landes außer der Umstellung ihrer Atmung von im Wasser gelöstem Sauerstoff auf Luftsauerstoff und der Kräftigung der Extremitäten zur Lokomotion außerhalb des Wassers auch das Problem der Fortpflanzung außerhalb des Wassers zu lösen. Dazu war für die Männchen die Entwicklung eines ► *intromittierendes* Organs erforderlich, da im Gegensatz zum Wasser die Luft sich nicht als Trägermedium für Sperma eignet (Abbildung 1). Die Amphibien – als die Pioniere des Landgangs in der Wirbeltierevolution – kehrten deshalb für die Reproduktion meist wieder ins Wasser zurück und hielten an einem wasserlebenden Larvenstadium fest. Diese Larven ergeben frappante Parallelen zwischen Insekten und Amphibien, wovon der erste Abschnitt des vorliegenden Aufsatzes handelt.

Erst die Reptilien schafften es, sich auch fortpflanzungstechnisch ganz vom Wasser zu lösen. Ihre keratinisierte Haut – durch das chitinisierte Exoskelett der Insekten parallelisiert – schützte vor Austrocknung, und die an Land gelegten Eier waren durch eine pergamentartige oder stark verkalkte Schale ebenfalls geschützt. Die intromittierenden Organe der Männchen zeigen eine hohe morphologische, aber innerartlich konstante Diversität, die wie bei den Insekten auch taxonomische, mitunter auch phylogenetische Relevanz hat. Der bei Insekten häufige Ausweg, partiell oder ganz auf Männchen zu verzichten, ist bei Reptilien erst viel später entdeckt worden.



ABB. 2 Insekten und ihre Jugendstadien: a) und b) Warzenbeiser (*Decticus verrucivorus*), Larve (Nymphe) und fertiges Insekt; c) und d) Schwalbenschwanz (*Papilio machaon*), Larve (Raupe) und fertiger Falter (Imago). Fotos: W. Böhme (a–c), D. Stüning (d).

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 362 erklärt.

Viele wirbellose Tiere besitzen ein Larvenstadium, das sich sowohl morphologisch als auch ökologisch extrem von dem jeweiligen Adultstadium unterscheiden kann. Larvenstadien haben zwei wichtige Funktionen im Lebenszyklus einer Art bzw. Gruppe: Entweder sie dienen der Ausbreitung der meist wenig beweglichen bis hin zu sogar sessilen Adulti. Oder sie stellen ein reines Fress-

und Wachstumsstadium bei einem oft kurzlebigen, dann meist nur auf die Reproduktion ausgerichteten Adultstadium dar, das dann – vor allem bei geflügelten Formen – auch das Ausbreitungsstadium ist. Zunächst gilt es zu klären, wie eine Larve definiert werden kann. Eine Larve ist ein Jugendstadium, das nicht nur einige Merkmale seiner Adulti noch nicht hat – das gilt für die allermeisten noch nicht geschlechtsreifen Jugendstadien –, sondern das eigene Sondermerkmale besitzt, die dem Adultus fehlen, aber nischenrelevante Anpassungen überhaupt erst ermöglichen.

Es sind vor allem die Larvenstadien mariner Organismen wie Schwämme, Anthozoen, Mollusken (Veliger), Crustaceen (Nauplia, Zoea), Echinodermen und/oder Tunicaten (mit Chordaschwanz), die eine pelagische Lebensweise führen und für ihre oft kaum beweglichen oder gar sessilen Adultstadien das Ausbreitungsstadium darstellen. Bei den pterygoten Insekten dagegen stellen die Adulti dank ihrer Flugfähigkeit das Ausbreitungs-, ihre hoch diversen Larven dagegen das Wachstumsstadium dar. Ihre vielfältigen, meist terrestrischen, oft aber auch limnischen Larvenstadien, teils mit beeindruckenden Sondermerkmalen ausgestattet, sind zweifellos eine evolutive Neuerfindung, da ihre Stammgruppen wie etwa die Myriapoden derartige Jugendstadien nicht kennen, also quasi ▶ ametabol sind [1].

Die pterygoten (geflügelten) Insekten werden klassischerweise in ▶ hemimetabole und ▶ holometabole Gruppen aufgeteilt. Bei den Hemimetabolen ähneln die Larven

IN KÜRZE

- Seit Bestehen der Zweigeschlechtigkeit, die die genetische Variabilität und damit die Anpassungsfähigkeit von Organismen erhöht, bedarf es eigener Strategien, das **Zusammentreffen der weiblichen und männlichen Gameten** zu gewährleisten.
- Für aquatisch lebende Tiere ist das kein Problem, da die beiderseitigen Gameten nur **zeitlich koordiniert ins Wasser** abgegeben werden müssen. Dies nutzen die meisten Amphibien (vor allem Froschlurche), sofern sie nicht sekundär zum Wasserleben zurückgekehrt sind, wie etwa die Molche.
- Die allermeisten Amphibien haben eigene aquatische Larvenstadien, die sich in einer Metamorphose zum landlebenden erwachsenen Tier umwandeln. Dabei weisen die Larven erstaunliche **Parallelen zu den verschiedenen Larventypen der Insekten** auf.
- Wasserunabhängige, permanent landlebende Wirbeltiere, aber auch die Insekten, benötigen im männlichen Geschlecht ein „Transmitter“-Organ, mit dem **Sperma direkt in den weiblichen Körper verbracht** werden kann.
- Diese Organe sind bei Schuppenkriechtieren (Echsen und Schlangen) außerordentlich divers gestaltet. Ihre Struktur unterliegt **phylogenetischer, aber auch ökologischer und sexueller Selektion** und liefert der Forschung einerseits wertvolle Hinweise auf Verwandtschaftsbeziehungen, andererseits aber auch entsprechende Anpassungen und Paarungssysteme.

oft stark den jeweiligen Adulti, sind aber ungeflügelt und fressen sich, wenn sie schon äußere Flügelanlagen zeigen, als Nymphen von Häutung zu Häutung bis zur letzten, der sogenannten Imaginalhäutung durch, wonach sie ein oft kurzes Leben als erwachsene, vor allem der Reproduktion verpflichtete Insekten verbringen. Hierher gehören zum Beispiel die Heuschreckenartigen (Spring- und Fangschrecken, Ohrwürmer und Schaben, Abbildungen 2a und b) und die Schnabelkerfe (Rhynchota: Wanzen und Zikaden). Einen Sonderfall bilden die Libellen, die mit ihren limnischen, umgestalteten und per Fangmaske jagenden räuberischen Larven dann an einem Halm das Wasser verlassen und sich als Imago aus der Larvenhülle befreien.

Die Holometabolen dagegen haben Larvenstadien, die nicht die geringste Ähnlichkeit mit ihren Elternformen haben, die meist – von Ausnahmen abgesehen – grundsätzlich andere Nahrungsressourcen nutzen und oft, da ihre Eltern das Ausbreitungsstadium darstellen, auch eingeschränkte Lokomotionsfähigkeiten haben. Hierher gehören die Larven der Hymenopteren (Hautflügler), von denen viele auf Fütterung durch die Adulti angewiesen sind: die der Dipteren (Maden), der Schmetterlinge (Raupen, Abbildung 2c) und der (polyphagen) Käfer (Engerlinge). Ihnen ist gemeinsam, dass die Morphologie der Larven, wenn sie nach mehreren Häutungen die Klimax ihrer Fress- und Wachstumsphase erreicht haben,

in einem Ruhestadium, der sogenannten Puppenruhe, in die dramatisch verschiedene Morphologie des adulten Insekts umgebaut wird (Abbildung 2d).

Diese außerordentlich teure Investition scheint sich evolutiv auszuzahlen, wenn man Evolutionserfolg an den Artenzahlen einer Gruppe misst. Denn hemimetabole Gruppen wie etwa Heuschrecken bringen es bei uns in Mitteleuropa auf ca. 80 Arten, die in den Entwicklungsstadien ökologisch ja viel stärker getrennten Libellen trotzdem auf nicht viel mehr, und selbst die Wanzen mit ihren etwa zehnmal so vielen einheimischen Arten bleiben noch weit hinter den holometablen Gruppen wie Schmetterlingen (ca. 3.000), Hautflüglern (ca. 11.500), Fliegenartigen (ca. 8.000) oder Käfern (ca. 8.000), zurück. Schlüssel zu diesem Erfolg scheint die ökologische (örtliche oder auch zeitliche) Niscentrennung der Larval- und Adultstadien zu sein, die mit jeweils verschiedenen Nahrungsökologien keine innerartliche Ressourcenkonkurrenz haben.

Ein Larvenvergleich Amphibien – Insekten

Versucht man nun, diese Verhältnisse auf diejenige Wirbeltiergruppe mit der größten Larvendiversität zu übertragen – also auf die Amphibien – so sieht man zum einen bei den Urodelen (Froschlurche), dass ihre Larven morphologische Miniaturausgaben der adulten Tiere sind. Dennoch sind sie durch die Sondermerkmale der äußeren



ABB. 3 Amphibien und ihre Jugendstadien: a) und b) Feuersalamander (*Salamandra salamandra terrestris*), Larve mit Außenkiemen und adultes Tier; c) und d) Grasfrosch (*Rana temporaria*), Larve (Kaulquappe) mit Raspelmaul sowie Spiraldarm und erwachsener Frosch. Fotos: B. Trapp (a, c), W. Böhme (b, d).



ABB. 4 Metamorphosierender Laubfrosch (*Hyla arborea*), noch mit zu resorbierendem Larvenschwanz (a). b) Am kleinen Maul sind noch die Hornzähnen des Kaulquappenstadiums erkennbar. Fotos: B. Trapp.

Kiemenbüschel (Abbildung 3a) oder – bei manchen Molchen – durch die RUSCONISCHEN HÄKCHEN mit eigenen Larvalmerkmalen ausgestattet, leben aber ebenfalls räuberisch im Wasser und sind nahrungsökologisch, abgesehen von der anderen Größenklasse, nicht von ihren Eltern getrennt. Sie nähern sich wie die Nymphen hemimetaboler Insekten graduell dem Aussehen der Adulti, reduzieren schließlich die Außenkiemen und verlassen dann – im Normalfall – als Lungenatmer ihren aquatischen Lebensraum (Abbildung 3b).

Betrachten wir dagegen die Larven der Anuren (Froschlurche), so begegnet uns eine völlig verschiedene, subaquatisch adaptierte Morphologie: ein komplett anderer Bauplan, mit einem gliedmaßenlosen, kugeligen Körper mit langem Ruderschwanz, einem spiralig aufgerollten magenlosen Vegetarierdarm und einem Hornschnabel im Raspelmaul, das üblicherweise auf die Aufnahme pflanzlicher Kost spezialisiert ist (Abbildung 3c). Hier sehen wir also eine komplette nahrungsökologische Trennung von den fast immer terrestrisch und räuberisch-karnivor lebenden Elterntieren (Abbildung 3d). Und auch hier findet die Metamorphose nicht graduell mit sukzessiver Annäherung

an die Adultgestalt statt, sondern die dramatischen Umgestaltungen des gesamten Bauplans finden in einem zeitlich begrenzten Ruhestadium statt, in dem einige Zeit keine Nahrung aufgenommen werden kann. Dies wird kompensiert durch die Resorption des Ruderschwanzes, während gleichzeitig oder auch bereits davor die Extremitätenanlagen ausdifferenzieren (Abbildung 4a), der Hornschnabel zum Algenraspeln abgestoßen und das kleine Raspelmaul in das breite Froschmaul mit neu zu bildender Zunge umgebaut wird. Gleichzeitig wird der lange für Herbivoren typische Spiraldarm drastisch zu einem Fleischfresserdarm verkürzt [2]. Während dieser morphologischen Umbauphase kann das Tier keine Nahrung aufnehmen, befindet sich also ebenfalls in einem echten Ruhestadium (Abbildung 4b). Allerdings bleibt die metamorphosierende Froschlarve auch während dieser Ruhe- oder Umbauphase beweglich und kann sich – im Gegensatz zu den allermeisten Puppen der holometabolen Insekten – durch Flucht ihren Prädatoren entziehen. Doch auch dieser Unterschied ist relativ, gibt es doch gerade bei aquatischen Holometabolenpuppen ebenfalls Mobilität, am auffälligsten bei den Stechmücken, aber auch bei anderen aquatischen Insekten. Auffällig sind hier z. B. die mit großen Mandibeln ausgestatteten Puppen der Schlammfliegen (Megaloptera) und Köcherfliegen (Trichoptera), die zum Schlupf selbstständig zur Wasseroberfläche kriechen oder schwimmen [3].

Zählt sich also auch bei den Amphibien die viel größere Investition der Metamorphose bei den Anuren gegenüber der sparsameren der Urodelen evolutiv in den jeweiligen Artenzahlen aus? Die Antwort ist eindeutig: Während es weltweit über 800 Urodelenarten gibt, stehen dem derzeit ca. 7.700 Anurenarten gegenüber, was also eine klare Analogie zu den Verhältnissen bei hemi- und holometabolen Insekten darstellt. Warum also sollte man dann nicht auch diese beiden Entwicklungsstrategien wie bei den Insekten durch eine analoge – zwar ähnliche, aber doch etwas verschiedene – Begrifflichkeit kennzeichnen? Den hemimetabolen Insekten entsprechen dann die hemimetamorphen Amphibien, den holometabolen Insekten entsprechen die holometamorphen Amphibien. Doch die Konvergenz der Metamorphosestrategien bei den so verschiedenen und schon seit der Trennung der Bilateria in Proto- und Deuterostomie separat evolvierten Gruppen geht noch weiter, betrachtet man verschiedene Sonderfälle der jeweiligen Evolutionsstrategien.

Äußere versus innere Befruchtung

Zunächst besteht jedoch ein genereller Unterschied zwischen den Amphibien und den hydrophilen Insekten. Denn während bei den Imagines der letzteren eine innere Befruchtung fast immer (Ausnahme z. B. Wasserkäfer wie der Gelbrand, *Dytiscus*) außerhalb des Wassers erfolgt, gibt es bei den Amphibien beide Möglichkeiten. Evolutiv älter ist sicher die äußere Befruchtung, wie sie von den ursprünglichen Urodelenfamilien und den allermeisten

Anuren (Abbildung 5) praktiziert wird. Das setzt allerdings subaquatische Paarungen voraus, da – wie bereits oben erwähnt – die Luft kein geeignetes Trägermedium für Spermatransport ist. Dennoch gibt es bei abgeleiteteren Urodelenfamilien wie etwa den Salamandriden auch subaquatische innere Befruchtung, die allerdings über ein hoch komplexes ▶ ethoökologisches Spermatophoren-Übergabesystem verläuft und z. B. auch für die ▶ westpaläarktischen Wassermolche (Gattungen *Triturus*, *Lissotriton*, *Mesotriton*, *Ommatotriton*) typisch ist. Da werden aus der drüsig geschwollenen Kloake des Männchens mit nach vorn umgelegtem Schwanz dem Weibchen Sexualhormone zugefächelt, die dieses veranlassen, dem sich rückwärts bewegendem Männchen zu folgen und – zielgenau chemisch dirigiert – die von diesem schließlich auf dem Bodengrund abgesetzte Spermatophore mit der Kloake aufzunehmen und so eine innere Befruchtung zu realisieren.

Warum, fragt man sich, betreiben die Molche diesen energetisch hohen Aufwand, obwohl es doch wie bei ihren anuren Verwandten unter Wasser auch eine äußere Befruchtung täte, bei der es nur darauf ankäme, die Abgabe der Gameten beider Geschlechter zeitlich zu koordinieren? Die Antwort findet sich bei ihren überwiegend oder ganz terrestrisch lebenden Verwandten, den Landsalamandern der Gattungen *Salamandra*, *Lyciasalamandra* und *Mertensiella*, deren Loslösung vom Wasser sich auch auf Paarungen an Land erstreckt. Hier läßt sich das Männchen das Weibchen in einer Art „Schwitzkasten“ durch Umklammern von dessen Vorderbeinen auf den Rücken und trägt es nur durch Vorwärtsschieben mit den Hinterbeinen so lange herum, bis dieses Paarungsbereitschaft signalisiert. Dann setzt das Männchen seine Spermatophore auf dem Waldboden ab (Abbildung 6) und biegt seinen Hinterkörper so zur Seite, dass das Weibchen mit seiner Kloake genau auf der Spermatophore landet und diese mit den Kloakenlippen aufnehmen kann. Möglicherweise ist dieses hoch abgeleitete Verhalten so irreversibel genetisch verankert, dass es auch bei zur Paarung ins Wasser zurückgekehrten Molchen im submersen Zustand als erblicher Ballast beibehalten werden musste.

Die Froschlurche sind hier konservativer. Sie begeben sich fast alle zur Paarungszeit ins Wasser, wo die Kopulation dann stets durch äußere Befruchtung durch ein das Weibchen monopolisierendes Männchen erfolgt, bei gleichzeitiger Laichabgabe des Weibchens. Das Thema Spermienkonkurrenz spielt hier eine wichtige Rolle. Die zahlenmäßig weit überwiegenden Männchen im Laichgewässer konkurrieren heftig um die wenigen Weibchen, von denen einige durch mehrere sie umklammernde Männchen sogar ertränkt werden können (Abbildung 7). Bei mehreren Arten sind die Männchen auch territorial und vertreiben Rivalen aus der Nähe ihrer Geschlechtspartnerinnen. Bei ihnen sind die Männchen – im Gegensatz zu den meisten anderen Fröschen – auch deutlich großwüchsiger als die Weibchen, und einige verfügen sogar durch



ABB. 5 Unterwasserpaarung der Wechselkröte (*Bufo viridis*), mit äußerer Befruchtung der Eier. Foto: M. Vences.

krallenartig zugespitzte Endphalangen oder messerscharfe ▶ Pollexdornen über gefährliche Waffen für diese Zweikämpfe.

Nur wenige Arten sind permanent aquatil wie die Wabenkröten und Krallenfrösche (Pipidae) oder einzelne Spezialisten wie z. B. der Titicaca-Riesenfrosch (*Telmatobius culeus*). Extra-aquatische Paarungen und Eiablagen gibt es dagegen bei schaumnestbauenden Arten (z. B. *Polyopedates*, *Rhacophorus* in Asien, *Chiromantis* in Afrika), die aber nur direkt über Wasserflächen reproduzieren, aber auch bei Direktentwicklern ohne freies Larvenstadium (z. B. *Pristimantis* c. s. und *Rhinoderma* in Südamerika, *Arthroleptis*, *Ptychocheilus* und *Breviceps* in Afrika, *Rheobatrachus* in Australien). Die letztgenannten Direktentwickler können auch in sehr feuchtem terrestrischem Substrat erfolgreichen Spermatransfer zum Laich gewährleisten. Als einziger Anure besitzt der in kalten, reißenden Gebirgsbächen Nordamerikas sich paarende und laichende Schwanzfrosch (*Ascaphus truei*) ein intromittierendes Organ (einen umgewandelten ausgestülpten Enddarmabschnitt) und befruchtet intromittierend intern, um das Weggespültwerden seines Spermas im reißenden Fließwasser zu verhindern. Und die männlichen Individuen der dritten Gruppe der Lissamphibia, die Blindwühlen (Gymnophionen), haben wie letzterer ebenfalls ein intromittierendes Organ, das durch eine Ausstülpung der Kloakenwand gebildete Phallosome [2].



ABB. 6 Landpaarung des Feuersalamanders (*Salamandra atra*). Das zuunterst liegende Männchen beim Absetzen einer gallertigen Spermatophore. Foto M. Dehling.

ABB. 7 Spermienkonkurrenz: Mehrere Erdkrötenmännchen (*Bufo bufo*) versuchen, ein Weibchen zur Paarung zu umklammern und zu monopolisieren. Foto W. Böhme.



Einige Amphibien geben also den Lebensraum Wasser für ihren Nachwuchs – und damit die so erfolgreiche Niscentrennung hinsichtlich der Nahrungsressourcen – sekundär wieder auf – vermutlich aus Gründen der Prädatorenvermeidung für ihre Jugendstadien. Dafür nehmen sie auch komplexere Paarungsbiologien mit interner Befruchtung in Kauf, verzichten aber vor allem auf den Vorteil getrennter Nahrungsnischen von Larven und Adulten (Wasser- vs. Landlebensraum). Bei Insekten scheint dies häufig umgekehrt zu sein: Sie sind primär terrestrisch und haben wohl alle innere Befruchtung, sind daher auch bei der Paarung meist außerhalb des Wassers (Ausnahme Schwimmkäfer, s. o.). Die bei ihnen auftretenden sekundär aquatischen Larvenstadien werden als jeweilige (konvergente) ▶ Apomorphien gewertet [1]. Den Lebendgebäern bzw. den Direktentwicklern der Amphibien entsprechen die larviparen oder besonders die (bei einigen Dipteren) pupiparen Insekten [3, 4]. Bei diesen setzen die Weibchen statt Eiern bereits fertige Larven oder Puppen ab.

Strategien der Brutpflege

Die bei Hymenopteren häufigen und hochentwickelten Brutpflegestrategien gibt es bei ▶ K-Strategen mehrfach konvergent, auch unter den Fröschen wie den Pfeilgiftfröschen (Dendrobatiden), wo Weibchen die meist einzeln in wassergefüllten ▶ Phytotelmen abgesetzten Larven bei regelmäßigen Besuchen mit unbefruchteten „Nähreiern“ füttern. Bei den Wabenkröten (*Pipa*) besitzt die Rückenhaut „Plazentafunktion“, indem sie anschwillt und Brutkammern ausbildet, in denen sich die Larven bis zur Metamorphose entwickeln. Ein ähnliches Phänomen mit hochspezialisierter maternaler Hauternährung gibt es bei jungen Gymnophionen (*Boulengerula taitanus*) [5], wobei ja auch die Milchdrüsen der Säugetiere letztlich Deri-

vate dermalen Drüsen sind. Getoppt wird dies noch von einer anderen Blindwühle (*Siphonops*), deren Junge ein von den Eileiterzellen der Mutter produziertes milchartiges Sekret aufnehmen [6] – eine brandaktuelle Entdeckung!

Auch eine vermeintlich nur den Amphibien zukommende Besonderheit der Fortpflanzungsbiologie – nämlich das von mehreren Schwanzlurchen (obligat z. B. beim Grottenolm, Axolotl und anderen, fakultativ auch bei einigen einheimischen Molchen) bekannte, als Neotenie bezeichnete Erlangen der Geschlechtsreife im larvalen Zustand – gibt es, wenngleich selten, auch bei Insekten. Berühmtestes Beispiel ist der Käfer *Micromalthus debilis*, einzige Art seiner Familie, dessen Larven sich per Neotenie, sogar eingeschlechtlich (also parthenogenetisch) fortpflanzen können [4]. Parthenogenese gibt es jedoch bei Amphibien weder im larvalen noch im adulten Zustand, aber die sogenannte ▶ Gynogenese ist bei einigen nordamerikanischen Urodelen bekannt. Bei ihr ist – im Unterschied zur Parthenogenese – die Anwesenheit von Spermia erforderlich, ohne dass es aber zu einer Verschmelzung der Zellkerne kommt. Echte Parthenogenese, also eingeschlechtliche Fortpflanzung, ist lange von zahlreichen Insekten, seit einigen Jahrzehnten aber erst von einigen Reptilien bekannt (s. u.).

Reptilien als erste weitgehend vom Wasserleben unabhängige Landwirbeltiere

Obwohl Amphibien und Reptilien innerhalb der Tetrapoden stammesgeschichtlich nichts miteinander zu tun haben, wurden beide Gruppen über Jahrhunderte in einer wissenschaftlichen Teildisziplin, der Herpetologie (= Kriechtierkunde, von gr. *hérpein* = kriechen) zusammengefasst. Tatsächlich stehen Reptilien aber den Vögeln näher, mit denen sie die Gruppe der Sauropsiden bilden, die sich durch beschaltete, an Land abgelegte Eier auszeichnen. In diesen entwickeln sich die Föten in einer flüssigkeitsgefüllten Fruchtblase, dem neu entwickelten ▶ Amnion; sie haben sich also eine Art „mobiles Aquarium“ im Ei bewahrt und in den terrestrischen Lebensraum mitgenommen. Letzteres gilt auch für die zahlreichen lebendgebärenden Reptilien und selbstverständlich auch für die Säugetiere. Bei diesen gibt es sogar einige sehr ursprüngliche Vertreter, die noch beschaltete Eier ablegen, die geschlüpften Jungen dann aber schon mit einem milchartigen Sekret versorgen, nämlich die Kloakentiere (Monotremata) der australischen Faunenregion.

Unabdingbar an Land: ein intromittierendes Organ

Doch damit sich die Reptilien komplett vom Lebensraum Wasser lösen konnten, musste zunächst auch eine auf dem Land stattfindende Paarung realisiert werden. Hierzu bedurfte es eines besonderen intromittierenden Organes, um das Spermia in den weiblichen Körper zu bringen und dort die Befruchtung der Eier zu ermöglichen, da, wie

oben gesagt, die Luft kein geeignetes Trägermedium für Sperma ist. Was den Insektenmännchen ihr Aedeagus (Phallus, Penis [7]) ist (Abbildung 1a), ist für männliche Schildkröten (Abbildung 1b) und Krokodile der unpaare Penis, wie ihn – ursprungs- und lagegleich – auch die ursprünglichen Vögel (Straußen- und Entenvögel) und die Säugetiere besitzen. Doch bei einigen Gruppen ging diese Neuerung sekundär wieder verloren, nämlich bei den zu den Lepidosauriern gehörenden Brückenechsen oder Tutaras (Gattung *Sphenodon*) und bei den modernen Vögeln. Sie alle müssen sich mit einem sekundenschnellen Aufeinanderpressen ihrer jeweiligen Kloaken behelfen. Aber die Vertreter der Schwestergroupe der Brückenechsen innerhalb der Lepidosaurier, die Schuppenkriechtiere (Squamata), haben dann eine Neubildung hervorgebracht, die allerdings paarig ist. Diese paarigen Organe werden – im Sinne zweier Hälften – Hemipenes (Singular Hemipenis) genannt. Allerdings werden diese Organe jeweils einzeln eingesetzt: Nähert sich das Männchen dem Weibchen von dessen rechten Seite, krümmt es sich nach links und benutzt den linken Hemipenis (Abbildung 8), kommt es von links, benutzt es das rechte Organ.

Wie bei den allermeisten Insekten auch zeichnen sich die Begattungsorgane männlicher Squamaten durch eine hohe strukturelle zwischenartliche Vielfalt aus [2, 8, 9]. Es finden sich sowohl interne als auch externe Sonderstrukturen in bzw. auf den Organen, die übrigens – wie auch bei den unpaaren echten Penes der Schildkröten, Krokodile und ursprünglichen Vögel – das Sperma über eine auf dem Organ liegende Samenrinne, den *Sulcus spermaticus*, transportieren. Korrelationen in der Ausgestaltung bestehen zum einen zwischen dem Bauplan des Tieres selbst und seiner Genitalstruktur: So haben zum Beispiel beinlose Squamaten, wie einige Schleichen und sämtliche



ABB. 8 Durch Flankenbiss und Hinterbein am Weibchen verankert: Paarung zweier Kykladeneidechsen (*Podarcis erhardii*). Foto: B. Trapp.

Schlangen, die sich bei der Kopula nur mit einem Nackenbiss, nicht aber mit den Extremitäten zusätzlich am Weibchen befestigen können, stärker bestachelte Hemipenes, mit denen sie sich im Weibchen verankern (Abbildungen 9a und b).

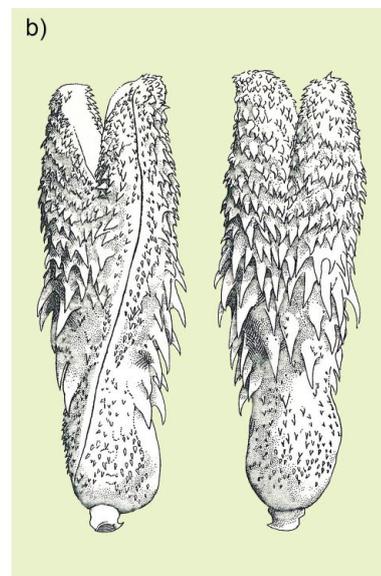


ABB. 9 Paarung bei der Schlingnatter (*Coronella austriaca*). a) Das Männchen ist nur durch seinen Hemipenis im Weibchen verankert, b) Sulcal- und Asulcalansicht des bedornten Hemipenis. Foto: W. Böhme, Grafik aus [15].

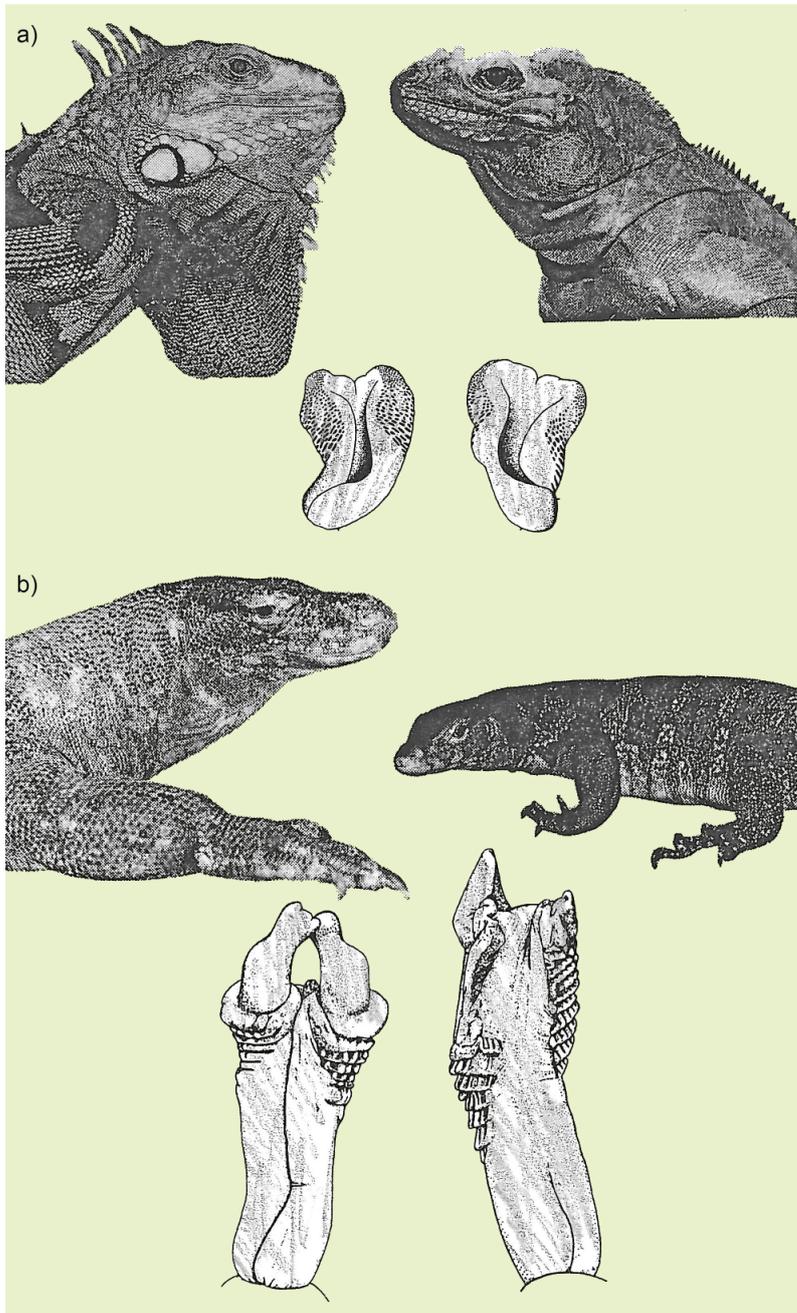


ABB. 10 Einfluss epigamischer Strukturen auf die Genitalmorphologie aufgrund sexueller Selektion seitens der Weibchen: a) Grüner Leguan (*Iguana iguana*) und Nashornleguan (*Cyclura cornuta*), Männchen mit Kopfformen und einheitlicher Genitalstruktur; b) Komodowaran (*Varanus komodoensis*), und Bindenwaran (*Varanus salvator*), Männchen ohne epigamische Strukturen, dafür mit krass verschiedenen Genitalien. Grafik aus [9].

Form und morphologische Ausgestaltung des Hemipenis einiger Schlangen können allerdings auch mit dem Verhalten und dem Fortpflanzungserfolg korreliert sein. So besitzen die zu den Boas zählenden Hundskopfschlinger (*Corallus caninus*) einfache, unbedornete bzw. unbestachelte, zipflige Hemipenes, deren mangelnde Verankerungsfähigkeit in der weiblichen Kloake durch eine feste

Umwicklung des Hinterkörpers des Weibchens dieser Würgeschlangen durch den des Männchens kompensiert wird. Dabei zeigte sich, dass es zu serialen Kopulationen kam, wobei stets die Körperseite gewechselt, also abwechselnd der linken oder der rechten Hemipenis benutzt wurde. Die Funktion dieses Verhaltens wurde deutlich, als man das Männchen nach der ersten Kopula an einer weiteren hinderte. Ergebnis: Das Weibchen setzte danach nur die Hälfte der arttypischen Zahl an Jungtieren ab. Offenbar konnte bei einer Paarung der unpaarige, zipflige Hemipenis nur eine der beiden Ovidukt-Öffnungen in der Kloake des Weibchens erreichen und mit Sperma versorgen, so dass für die zweite eine weitere Kopula von der anderen Körperseite mit dem anderen Hemipenis nötig war. Bei der verwandten Gartenboa (*Epicrates cenchria*) hingegen ist der Hemipenis der Männchen wie bei *Coronella* (Abbildung 9b) tief gegabelt, was auch für die Samenrinne gilt. Hier reicht offenbar eine einzige Kopula aus, um beide Ovidukt-Öffnungen in der Kloake des Weibchens mit Sperma zu versorgen und so den optimalen Fortpflanzungserfolg zu erzielen [9].

Bei Echsen sind die Hemipenes von folgendem ethoökologischen Umstand beeinflusst: Verfügen die betreffenden männlichen Echsenarten, z. B. Leguane oder Chamäleons, über epigamische Sondermerkmale wie Kopfhörner, Nacken- und Rückenrücken, Kehlsäcke etc., sind ihre Hemipenes zwischen den Arten oft wenig differenziert (Abbildung 10a). Ähneln sich die Arten aber äußerlich, unterscheiden sich ihre Genitalstrukturen oft dramatisch voneinander (Abbildung 10b) – ein offenbar durch sexuelle Selektion seitens der Weibchen verursachter Effekt [10]. Dieser Zusammenhang wurde auch experimentell belegt: Entfernte man z. B. einem Chamäleonmännchen die geschlechtstypischen epigamischen Merkmale wie Kopfanhänge, zeigten die Weibchen kein Interesse mehr und waren paarungsunwillig. Eine Insektenparallele: Haben z. B. die Männchen verschiedener Heuschreckenarten ein differenziertes Laut- bzw. Zirp-Repertoire, ähneln sich ihre Genitalstrukturen sehr. Sind sie dagegen wenig stimmfreudig oder gar stumm, besitzen sie stark divergierende Genitalstrukturen [9]. Der Einfluss auf den Paarungserfolg ist derselbe wie bei dem Wirbeltierbeispiel.

Die Anlage des unpaaren Penis der Schildkröten, Ratiten (Laufvögel), Entenvögel und Säugetiere gibt es bekanntlich bei Weibchen ebenfalls, wo sie zur Klitoris differenziert ist. Dass aber auch die paarigen Hemipenes der Squamaten ursprungs- und lagegleiche Entsprechungen bei den Weibchen haben [11, 12], die wir dementsprechend als Hemiclitores bezeichnet haben, ist noch nicht so lange bekannt [13]. Sie sind miniaturisierte Ebenbilder der Hemipenes (Abbildungen 11a und b) und können von ganz winzig bis fast so groß wie die männlichen Organe sein und alle Strukturelemente der männlichen Organe in verkleinerter Form zeigen (Samenrinne, Stützelemente, äußere Bedornungen etc). Diese allerdings bei den Männchen stets deutlicher ausgeprägten Strukturen

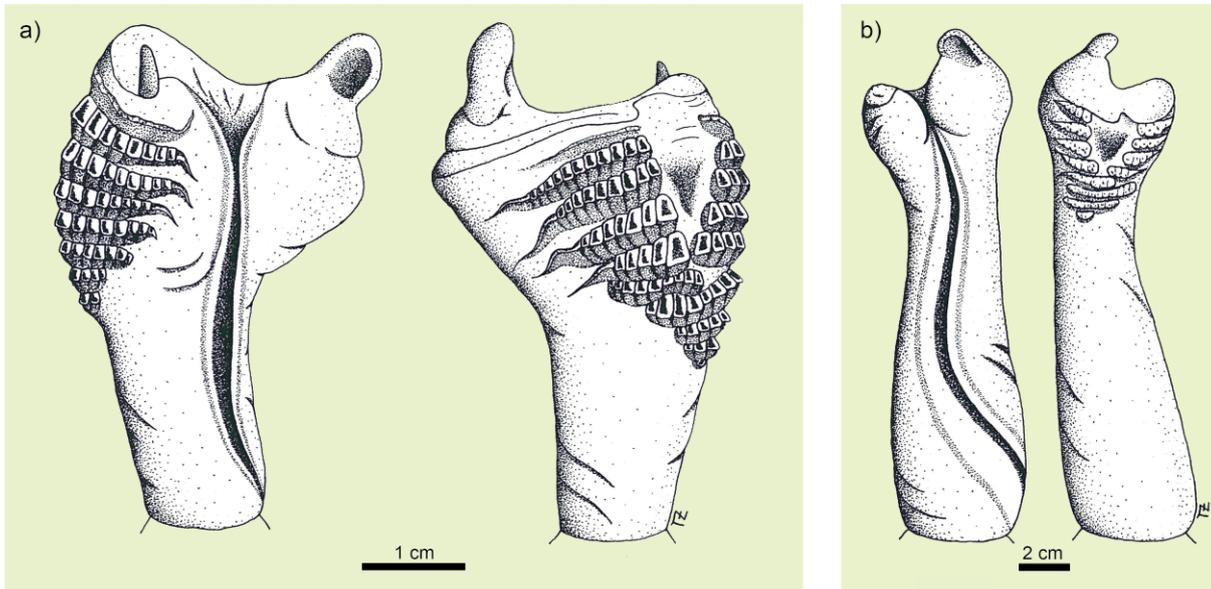


ABB. 11 Sulcal- und Asulcalansicht des a) Hemipenis und b) der Hemiclititoris des Philippinenwarans (*Varanus olivaceus*). Grafik aus [9].

sind – wie bei den Insektengenitalien auch – meist artspezifisch und können außer taxonomischen auch zuverlässige phylogenetische Informationen liefern [14]. Ein gewichtiger Unterschied besteht jedoch darin, dass die männlichen und weiblichen äußeren Genitalien der Reptilien (und der übrigen Amnioten) jeweils ursprungs- und lagegleiche Strukturen sind, während eine solche Homologisierung männlicher und weiblicher äußerer Genitalien

bei Insekten durch eine viel höhere Komplexität – u. a. auch durch die Lage auf verschiedenen Körpersegmenten [11, 12] – nicht möglich erscheint.

Eierleger versus Lebendgebärer

Unter den Reptilien sind die Schildkröten und die Krokodile obligat Eier legend. Die Eischale besteht aus einer kräftigen Kalkschicht und ist damit dem Vogelei vergleichbar. Bei den Schuppenkriechtieren (Squamaten) – den Echsen und Schlangen also – ist die Eischale dagegen in den allermeisten Fällen häutig, pergamentartig. Diese Eigenschaft des Squamaten-Eies liefert auch den Erklärungsschlüssel, warum es keine lebendgebärenden Schildkröten, Krokodile und Vögel gibt. Das für letztere angeführte Argument, die Föten wären für die fliegenden Arten zu schwer, zieht nicht, da die Fledertiere zeigen, dass es auch anders geht und das Gewicht der Embryonen für sie kein Problem darstellt. Es sind die Geckoartigen (Gekkota), die hier beim Verständnis weiterhelfen: Diese legen – eine Ausnahme bei den Squamaten – meist Eier mit einer festen Kalkschale, während so gut wie alle anderen Echsen und auch Schlangen pergamentschalige Eier legen, die während der Inkubation durch Wasseraufnahme sogar wachsen. Und bei den allermeisten dieser Gruppen mit pergamentartigen Eiern gibt es lebendgebärende Arten, wobei Lebendgebären hier ▶ Ovoviviparie heißt, der Keim also durch Dotter (lecitotroph) ernährt wird. Und selbst eine durch den mütterlichen Organismus (matrotroph) erfolgende Ernährung, also echte ▶ Viviparie, gibt es durch plazentaähnliche Bildungen zwischen Fötus und ▶ Allantois bei einigen Arten, z. B. bei Skinken und Giftnattern. Bei den Geckoartigen jedoch gibt es nur in der Familie Diplodactylidae ovovivipare Arten, und nur diese Gruppe legt keine kalk-, sondern pergamentschalige Eier.



ABB. 12 Hohe Populationsdichte im Freiland bei der männchenlosen parthenogenetischen Felseidechse *Darevskia armeniaca*. Foto W. Bischoff.

GLOSSAR

Allantois embryonaler Harnsack, aus einer Ausstülpung des Enddarms gebildete Membran im amniotischen Ei der Reptilien, Vögel und Säugetiere.

ametabol: ohne Verwandlung während der Entwicklung, d. h. Jungtiere gleichen beim Schlupf bereits den Elterntieren, haben also eine larvenlose, direkte Entwicklung.

Amnion: zusätzliche Embryonalhülle (Fruchtblase), die die Eizeitigung vom Wasser unabhängig macht.

Apomorphie: eine abgeleitete, d. h. nicht ursprüngliche Merkmalsausprägung.

Bilateria: entlang der Längsachse symmetrisch gebaute Tiere.

epigamisch: ein Merkmal, das im Kontext der Paarungsbiologie steht, z. B. der Partnererkennung.

ethoökologisch: Anpassung, die sowohl durch das Verhalten als auch die Umwelt bestimmt wird.

Gynogese: eingeschlechtliche Fortpflanzung, bei der aber im Gegensatz zur Parthenogenese (Jungfernzeugung) Spermium anwesend sein muss, ohne dass es zu einer Kernverschmelzung kommt.

hemimetabol: mit unvollständiger Verwandlung, d. h. Larvalentwicklung ohne ein Puppenstadium.

holometabol: mit vollständiger Verwandlung, d. h. Larvalentwicklung mit einem Puppenstadium.

intromittierendes Organ: für erfolgreiche Paarungen an Land erforderliche Struktur (bei Reptilien Penis oder Hemipenis, bei Insekten Aedeagus), mit der ein Männchen seine Gameten (Spermium) in den weiblichen Organismus hineintransportiert.

K-Strategie: an der Aufnahme-Kapazität des Lebensraumes orientierte Fortpflanzungsstrategie mit geringerer Ei- oder Jungenzahl bei längerer Brutpflege.

Ovoviviparie: Absetzen lebender Jungtiere, die vorher nur durch Dotter ernährt wurden, also das Zurückhalten von Eiern bis zur Schlupfreife im mütterlichen Organismus.

Phytotelmen: trichterförmige Blattachseln tropischer Pflanzen, in denen sich Regenwasser sammelt, das von Fröschen zur Kaulquappenaufzucht genutzt werden kann.

Pollexdorn: stark verhornter, spitzer und messerscharfer Fortsatz des Daumenballens mancher Froschmännchen in den Tropen, die sich damit bei Revierkämpfen schwere Verletzungen zufügen können.

polyphag: von verschiedenartiger Nahrung lebend, vs. monophag.

Proto- und Deuterostomier: Urmünder vs. Neumünder, je nachdem, ob der Urmund der Gastrula Mundöffnung bleibt und eine Afteröffnung dazu gebildet wird (Protostomier) oder umgekehrt (Deuterostomier).

Ratiten: Sammelbegriff für die stammesgeschichtlich ursprünglichen, flugunfähigen Laufvögel (Strauße, Nandus, Kasuare, Emus und Kiwis).

Viviparie: Gebären lebender Jungtiere, die über den mütterlichen Organismus durch Stoffwechselfaustausch über ein Verbindungsorgan (Plazenta) ernährt wurden.

westpaläarktisch: den Westteil der paläarktischen tiergeographischen Region (Europa, Nordafrika und Westasien) bewohnend.

Es scheint, als könne eine Schalendrüse, die die feste, verkalkte Eischale vor der Ablage des Eis produziert und damit Viviparie unmöglich macht, wenn einmal ausgebildet, evolutiv nicht wieder abgeschafft werden.

Keine Männchen – kein Spermium vonnöten, aber

Was bei vielen Insektengruppen häufig vorkommt, ist bei Wirbeltieren am Beispiel von Reptilien erst um 1960 entdeckt worden: Fortpflanzung geht auch ohne Männchen, so dass das Problem einer Spermaübertragung auf dem Trockenen obsolet wird. Der russische Zoologe und Herpetologe Ilja S. Darewskij entdeckte an den Felseidechsen des Kaukasusgebietes – heute ihm zu Ehren als Gattung *Darevskia* klassifiziert – dass es dort mehrere männchenlose Populationen gibt, die als „Agamospezies“ behandelt und benannt wurden. Der Wegfall von Partnersuche und -findung führt zu erhöhter Fortpflanzungsrate und Individuendichte (Abbildung 12). Allerdings sind die Individuen kaum an sich verändernde Umweltparameter anpassungsfähig, da sie durch die klonale Vererbung keine nennenswerte genetische Variabilität aufweisen. Sie sind also erdgeschichtlich eher ephemere evolutive Sackgassen. Einen Generationswechsel zwischen sich asexuell und sexuell fortpflanzenden Generationen gibt es im Gegensatz zu den Insekten bei ihnen nicht.

Zusammenfassung

Da geschlechtliche Fortpflanzung außerhalb des Wassers einen direkten Spermatransfer vom Männchen in das Weibchen erfordert, verbleiben die meisten Amphibien – die ersten Pioniere des Landgangs unter den Wirbeltieren – zur Reproduktion mit äußerer Befruchtung im Wasser oder kehren dorthin zurück, um ihren Laich submers abzusetzen. Erst die Reptilien machten sich auch reproduktiv vom Wasser unabhängig und entwickelten Organe zu innerer Befruchtung. Auch die landlebenden Arthropoden haben eine Vielzahl primärer und sekundärer geschlechtsspezifischer Strukturen zum Spermatransfer an Land entwickelt. Die bei der hier dominierenden Gruppe der Insekten vorhandenen Larvenstadien weisen hinsichtlich ihrer ökologischen Funktion erstaunliche Parallelen zu den Larven der Amphibien auf. Die reproduktiven Anpassungen der Reptilien zur völligen Unabhängigkeit vom aquatischen Lebensraum haben zur Entwicklung intromittierender Organe zum Spermatransfer geführt, deren variable, teils bizarre Strukturen von phylogenetischen, aber auch ethoökologischen Faktoren beeinflusst sind.

Summary

Air is unsuitable for sperm transfer

Sexual reproduction in the absence of water requires direct sperm transfer from the male into the female. Most amphibians – the first vertebrate pioneers of conquering terrestrial habitats – remain for reproduction with external fertilization in the water or return to it to deposit their

spawn submerged in water. With regard to reproduction, reptiles were the first group that became independent from water and they developed organs for internal fertilization. Terrestrial arthropods have also developed a variety of primary and secondary sex-specific structures for the transfer of sperm on land. The dominating group, the insects, are characterized by their larval stages, which in respect to their ecological function, show striking parallels to the larval stages of the amphibians. The reproductive adaptations of the reptiles to become completely independent from an aquatic habitat have led to the development of intermittent organs for the transfer of sperm, whose variable, partly bizarre structures are influenced by phylogenetic, but also etho-ecological factors.

Schlagworte

Amphibien, Reptilien, Insekten, Larven, Metamorphose, holometabol, hemimetabol, spezifisch ausgeformte Kopulationsorgane, Eierlegen, Lebendgebären, Viviparie

Danksagung

Ich danke den Professoren Dr. Stefan Lötters, Universität Trier, und Dr. Michael Schmitt, Universität Greifswald, für kritische Hinweise zu einer vorigen Manuskriptversion. Letzterer sowie auch Wolfgang Bischoff, Magdeburg, PD Dr. Maximilian Dehling, Koblenz, Dr. Dieter Stüning, Bonn, Benny Trapp, Wuppertal, und Prof. Dr. Miguel Vences, Braunschweig, steuerten Fotos bei.

Literatur

- [1] W. Westheide, G. Rieger (2013). Spezielle Zoologie. Teil 1: Einzel- und wirbellose Tiere. Berlin, Heidelberg (Springer Spektrum), 3. Auflage, 859 S.
- [2] W. Westheide, G. Rieger (2015). Spezielle Zoologie, Teil 2: Wirbel- oder Schädeltiere. Berlin, Heidelberg (Springer Spektrum), 3. Auflage, 711 S.
- [3] M. Schmitt (2022). Insekten-Wunderwelt – Einstieg in die Entomologie. Berlin (Springer), 348 S.
- [4] K. Dettner, W. Peters (1999). Lehrbuch der Entomologie. Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm (Gustav Fischer), 921 S.
- [5] A. Kupfer et al. (2006). Parental investment by skin feeding in a caecilian amphibian. *Nature*, Letters 440, 926–929.
- [6] P. L. Mallho-Fontana et al. (2024). Milk provisioning in oviparous caecilian amphibians. *Science* 383, 1092–1095.
- [7] J. Meisenheimer (2011). Geschlecht und Geschlechter im Tierreiche 1. Die Natürlichen Beziehungen. Jena (Gustav Fischer), 896 S.
- [8] W. Böhme (1988). Zur Genitalmorphologie der Sauria: funktionelle und stammesgeschichtliche Aspekte, Bonn. Zool. Monogr. 27, 1–176.
- [9] T. Ziegler, W. Böhme (1997). Genitalstrukturen und Paarungsverhalten bei squamaten Reptilien, speziell der Platynota, mit Bemerkungen zur Systematik, *Mertensiella* 8, 1–210.
- [10] W. G. Eberhard (1985). *Sexual Selection and Animal Genitalia*. Cambridge/Massachusetts and London (Harvard University Press), xii + 244 pp.
- [11] A. Remane (1971). Die Grundlagen des Natürlichen Systems, der Vergleichenden Anatomie und der Phylogenetik, Königsstein/Taunus (Otto Koeltz), Nachdruck, 364 S.
- [12] V. Storch, U. Welsch (1997). *Systematische Zoologie*. Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm (Gustav Fischer), 804 S.
- [13] W. Böhme (1995). Hemilitoris discovered: a fully differentiated erectile structure in female monitor lizards (*Varanus* spp.) (Reptilia: Varanidae), *J. zool. Syst. evol. Res.* 33, 129–132.
- [14] W. Böhme, T. Ziegler (2008). A review of iguanian and anguimorph lizard genitalia (Squamata: Chamaeleonidae, Varanoidea, Shinisauridae, Xenosauridae, Anguinae) and their phylogenetic significance, *J. zool. Syst. Evol. Res.* 47, 189–202.
- [15] W. R. Branch, D. Wade (1976). Hemipenial morphology of British snakes, *Brit. J. Herpetol.* 5, 548–553.

Verfasst von:



Wolfgang Böhme, Jahrgang 1944, Studium der Zoologie, Botanik und Paläontologie an der Universität Kiel mit anschließender Promotion 1971, seitdem Kurator für Herpetologie am Zoologischen Forschungsmuseum Alexander Koenig in Bonn, ab 1992 dessen Stellvertretender Direktor. Ab 1988 Dozent für Zoologie an der Universität Bonn, Ernennung zum apl. Professor 1996. Seit 2010 als Ruheständler ehrenamtlich am Museum Koenig tätig.

Korrespondenz:

Prof. Dr. Wolfgang Böhme
Leibniz-Institut zur Analyse des
Biodiversitätswandels (LIB)
Museum Koenig
Adenauerallee 127
53113 Bonn
E-Mail: w.boehme@leibniz-lib.de

SYMPOSIUM: „BEREDTES SCHWEIGEN. NS-EUGENIKVERBRECHEN UND IHRE FOLGEN“

Noch heute zeigen sich die Spuren jahrzehntelangen Leugnens und Verdrängens der nationalsozialistischen Eugenikverbrechen. Nur wenige wissen, was damals in den Krankenhäusern, Gesundheitsämtern, Heilanstalten, Kinder- und Fürsorgeheimen geschah. Ein Projekt, das in der Bildungsagenda NS-Unrecht von der Stiftung Erinnerung, Verantwortung und Zukunft (EVZ) und dem Bundesministerium der Finanzen (BMF) gefördert wird, macht vergessene Orte sowie Lebenswege Betroffener sichtbar und verdeutlicht die Dimension der Verbrechen. Ziel ist es, die eigenen Denkweisen über und den Umgang mit Kranken, sozial Randständigen und Menschen mit Behinderung zu reflektieren.

Auf der Tagung „Beredtes Schweigen. NS-Eugenikverbrechen und ihre Folgen“, die am 30. November 2024 am Institut für Zoologie und Evolutionsforschung der Universität Jena stattfindet, werden die folgenden Themen behandelt: Umgang mit Menschen mit Behinderung in der NS-Zeit und heute, Bildungsarbeit an außerschulischen Lernorten zu NS-Eugenikverbrechen, Biografiearbeit und künstlerische Angebote zu NS-Eugenikverbrechen. Die Veranstaltung dient dabei dem Austausch und der Vernetzung, um u. a. die Perspektiven von Künstler/-innen, Lehrenden, Überlebenden der NS-„Euthanasie“ bzw. Angehörigen der Opfer, Historiker/-innen und Politiker/-innen zusammenzubringen. Programm, Anmeldung und weitere Informationen finden sich unter www.beredtes-schweigen.de/symposium-beredtes-schweigen.



Überraschend diverse Anpassungsstrategien

Die Fortpflanzungsbiologie der Froschlurche

BRUNO VIERTEL



Ein Pärchen des Kolbenfingerlaubfrosches (*Boana faber*) in einem gegrabenem Bassin in Brasilien. Foto: Mauro Teixeira.

Ursprünglich entwickeln sich die ▶ Lissamphibia, zu denen die Anura (Froschlurche), Urodela (Schwanzlurche) und Blindwühlen (*Gymnophiona*) gehören, in stehenden Gewässern. Dies birgt jedoch die Gefahr der Austrocknung und ▶ Prädation. Einige Arten haben deshalb unter dem Druck der Vermeidung von Verlusten ihrer Nachkommen verblüffend diverse fortpflanzungsbiologische Anpassungen entwickelt. Dazu gehört bei den Anuren die Eiablage auf der feuchten Erde oder in Erdhöhlen. Die Eiablage in ▶ Phytotelmen (auch Phytotelmata) oder der Transport der Nachkommenschaft vom Boden dorthin ist mit auffälligen Verhaltensmustern verbunden. Die Ernährung der Larven ist auf vielfältige Weise gelöst und häufig Teil eines Brutpflegeverhaltens. Die Entwicklung der Eier am Körper, in der Mundhöhle oder im Magen-Darm-Trakt ist eine Sonderlösung. Im Gegensatz zu den Urodela und besonders zu den *Gymnophiona* ist die Entwicklung der Eier im Eileiter bei den Anuren die seltene Ausnahme.

Die Froschlurche (Anura, auch Salientia, 50 Familien mit 7690 Arten nach [1]) sind ▶ Tetrapoda und gehören phylogenetisch zu den rezenten Lissamphibia [2, 3]. Diese werden als Schwestergruppe aller anderen rezenten Tetrapoda, den ▶ Amniota, verstanden [4, 3]. Als Vorfahren der Lissamphibia gelten die Dissorophoidea, eine Gruppe der ausgestorbenen Temnospondyli (Karbon bis Trias, vor 355 bis 201 Millionen Jahren), die äußerlich den heutigen Salamander(larven) ähnlich waren [5]. Eine ausgezeichnete Abhandlung zur phylogenetischen Herkunft der Lissamphibia wird in [6] gefunden. Die Diskussion zur Herkunft der Lissamphibia ist jedoch bei weitem nicht abgeschlossen. Die Literatur listet 15 gemeinsame Merkmale (Synapomorphien) der Lissamphibia auf [3]. Diese beziehen sich auf morphologische und physiologische Zusammenhänge. Das Alleinstellungsmerkmal aller ▶ Amphibia innerhalb der Tetrapoda ist die ursprünglich freilebende aquatische Larve mit ▶ exotropher Nahrungsaufnahme (55 % aller Lissamphibienarten nach [7]), die während der ▶ Metamorphose in ein Jungtier umgewandelt wird. Diese Merkmale werden als ▶ ancestral angesehen und sind der evolutive Ausgangspunkt aller abgeleiteten Fortpflanzungsstrategien. Die Ausbildung von Larven zwischen der Embryonalentwicklung und dem Adultstadium wird als *biphasic life* oder *complex life cycle* im Gegensatz zu dem *single life cycle* ohne Larve bei den Amniota bezeichnet [8]. Die Larven der Anura werden auch Kaulquappen genannt. Für das gesamte Tierreich werden Larven als Entwicklungsstadien definiert, die Organe besitzen, die transitorisch sind und während der weiteren Entwicklung und Metamorphose um- oder abgebaut werden.

Die Ausbildung von Larven hat verschiedene Vorteile: Da Larven Fress- und Wachstumsstadien sind, die ihre Biomasse durch Nahrungsaufnahme außerhalb des Mutterleibes vergrößern, kann die Größe der Eier klein gehalten werden, was eine große Eizahl ermöglicht. Außerdem leben Larven meist unter anderen Umweltbedingungen als die Adulti, wodurch Konkurrenz vermieden wird [9]. Diese Punkte werden als ursächlich für das regelhafte Auftreten von Larven im Tierreich angesehen. Es gibt Gründe anzunehmen, dass die Larven der Amphibia ein gemeinsames Merkmal aus der frühen Tetrapoden-Stammlinie sind [4]. Die fortpflanzungsbiologische Bindung an Wasser oder zumindest an ein feuchtes Milieu ist daher ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal gegenüber

den Amniota und hat die Evolution der Amphibia beeinflusst.

Die Nachteile einer wassergebundenen Fortpflanzung sind die Abhängigkeit von der Verfügbarkeit von Laichgewässern, die Gefahr ihrer Austrocknung während der Entwicklung und die Prädation sowie die mögliche Nahrungsknappheit. Evolutive Änderungen, die diese Nachteile überwinden, sind nach der Darstellung in [8] beim *complex life cycle* eingeschränkt. Die Larve bleibt immer erhalten, wenn auch in bestimmten Fällen die Organe der Nahrungsaufnahme, Verdauung oder Fortbewegung nicht voll ausgebildet werden [10]. Jedoch – und das ist wesentlich – ist die ► Hypothalamus-Hypophysen-Schilddrüsen-Achse immer vorhanden, da ohne sie die essenzielle Metamorphose nicht möglich ist. Die Metamorphose definiert die Larve! Deshalb wird hier im Gegensatz zu anderen Autoren nicht von *direct development* und *missing larva*, sondern von einer kryptischen Larve gesprochen. Nach [11] bilden ca. 1400 Anurenarten kryptische Larven aus.

Evolutive Änderungen der anzestraln Fortpflanzungsbiologie

Bei nahezu allen Anuren fehlt die innere Befruchtung und daher die Entwicklung im Muttertier (Ovoviviparie, Viviparie, Modes 38 und 39 (Fortpflanzungsstrategien, siehe unten), siehe auch Kasten „Reproduktionsbiologische Definitionen“). Es gibt nur wenige Ausnahmen mit innerer Befruchtung bei afrikanischen Bufonidae (Familie der Kröten): Viviparie, also Metamorphose der Larven im Eileiter findet sich bei *Nimbaphrynoides occidentalis*, *Nectophrynoides tornieri* und *Nectophrynoides viviparus*. Als Sonderwege gibt es die innere Befruchtung und freilebende Larven bei *Altiphrynoides osgoodi* und *Limnionectes larvaepartus* oder die innere Befruchtung und Eiablage kurz nach der Befruchtung bei *Altiphrynoides malcolmi*. Es ist bekannt, dass bei *Nimbaphrynoides occidentalis* die Entwicklung weiterer Eizellen durch ► Progesteron verhindert wird. In [12] ist der so gesteuerte und an die Trockenheit gebundene Reproduktionszyklus dieser Art beschrieben. Der Wintereinbruch in der holarktischen Region begrenzt die Länge der Larvalperiode. Da den holarktischen Anuren die innere Befruchtung fehlt, können sie nicht wie die Salamandridae (Echte Salamander, Ordnung der Schwanzlurche, z. B. *Salamandra atra*, Alpensalamander) auf Viviparie setzen, um diese klimabedingte Einschränkung zu umgehen. Dies hat mit großer Wahrscheinlichkeit die globale Verbreitung der Anuren – und auch ihre Höhenverbreitung – beeinflusst.

Nachfolgend sind die weltweit verbreiteten Reproduktionsstrategien der Anuren (Modes nach [9]) mit einzelnen Beispielen in Klammern zusammengefasst. Die Auflistung spiegelt nicht für alle Fälle stammesgeschichtliche oder evolutionsbiologische Zusammenhänge wider. Wie bereits angesprochen werden Gewässeraustrocknung und Prädation als ► Selektionsfaktoren für die Entstehung der Reproduktionsstrategien angenommen. Ihre Vielfalt ist

auffällig. Jedoch ermöglichen Literaturdaten kaum eine vertiefende Kausalanalyse.

Aquatische Eier

Mode 1: Eier und exotrophe Larven in ► lenticischen Gewässern (*Lithobates*, *Rana*, Abbildung 1a)

Mode 2: Eier und exotrophe Larven in ► lotischen Gewässern (*Atelopus*)

Mode 3: Eier und frühe Larven in subaquatischen Kammern, ältere exotrophe Larven in lotischen Gewässern (*Crossodactylus*)

Mode 4: Eier und frühe Larven in natürlichen oder gegrabenen Bassins; Wegspülen der exotrophen Larven in lenticische oder lotische Gewässer (*Boana*, Abbildung 1b)

Mode 5: Eier und frühe Larven in unterirdischen, gegrabenen Nestern; Wegspülen der exotrophen Larven in lenticische oder lotische Gewässer (*Aplastodiscus leucopygius*)

Mode 6: Eier und exotrophe Larven im Wasser von Baumhöhlen und ► Epiphyten (*Phyllodytes*)

Mode 7: Eier und ► endotrophe Larven in wassergefüllten Vertiefungen (*Eupsophus roseus*)

Mode 8: Eier und endotrophe Larven in Baumhöhlen und Epiphyten (*Dendrobrynisus*)

Mode 9: Eiablage in lotischen Gewässern, orale Aufnahme der Eier durch die Mutter (*Rheobatrachus*, Magenbrüterfrösche), Entwicklung im Magen; gelten inzwischen als ausgestorben [13, 18]

Aquatische Eier in einem von Blasen gebildeten Nest

Mode 10: Nester mit exotrophen Larven auf einem lotischen Gewässer schwimmend (*Chiasmocleis leucosticta*)

IN KÜRZE

- Ursprünglich entwickeln sich die Amphibia in **Gewässern**.
- Unter dem **Druck der Vermeidung von Verlusten** ihrer Nachkommen durch Gewässereintrocknung und die aquatische Räuberfauna entstehen verblüffende **fortpflanzungsbiologische Anpassungen**.
- Dazu zählen bei den Anura Ablage- und Absatzplätze der **Eier und Larven außerhalb von Gewässern**, in Phytotelmen, Epiphyten, Baumhöhlen, auf der Erde oder in Erdhöhlen oder der Transport der Nachkommenschaft verbunden mit auffälligen Verhaltensmustern dorthin.
- In diesen **Kleinstbiotopen** wird das Überleben der Nachkommenschaft durch Zufütterung mit Nährtieren, Bewachen und Verteidigung gegen Eindringlinge gesichert (**Brutpflege**).
- Es treten **kryptische Larven** mit reduzierter Morphologie und Anatomie auf.
- Die **Entwicklung im Eileiter** (Viviparie) ist bei den Anura die Ausnahme, da die innere Befruchtung sehr selten ist.
- Bei den Urodela und den Gymnophiona kommt die Entwicklung der Larven im Eileiter häufiger bzw. regelhaft vor, da eine **innere Befruchtung in diesen Fällen möglich** ist.

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 370 erklärt.

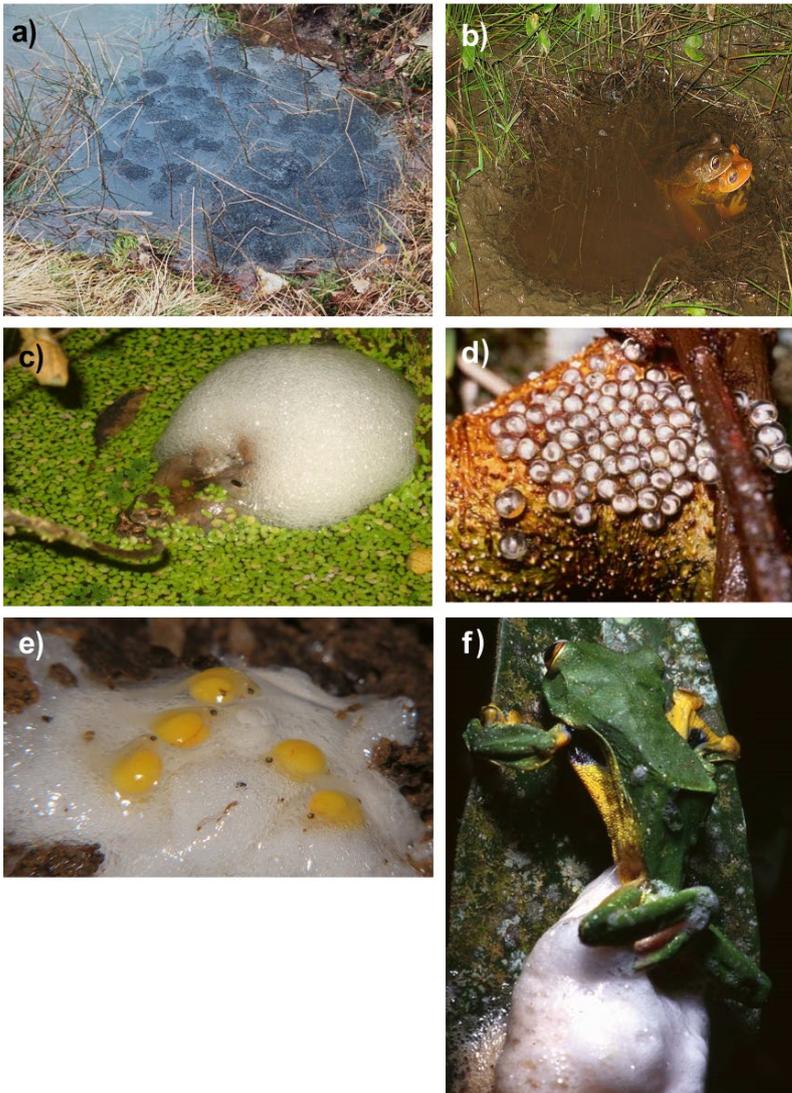


ABB. 1 Typische Eiablageplätze der Anura. a) Laichballen von *Rana temporaria* (Grasfrosch, Ranidae) in einem lentischen Gewässer im Hunsrück (Mode 1). b) *Boana faber* (Kolbenfingerlaubfrosch oder Schmied, Hylidae) in einem gegrabenen Bassin in Brasilien; die Larven beenden dort ihre Entwicklung (Mode 4). c) Schaumnester von *Physalaemus cuqui* (Lidblasenfrosche, Leptodactylidae) auf einem lentischen Gewässer in Argentinien schwimmend (Mode 11). d) Entwicklung von *Cycloramphus dubius* (Knopffrosch, Cycloramphidae) in Brasilien auf einem Felsen in der Gischt eines Wasserfalls (Mode 19). e) Schaumnester von *Adenomera marmorata* (Marmorierter Tropischer Ochsenfrosch, Leptodactylidae) in einem unterirdischen, gegrabenen Nest in Brasilien; die endotropen Larven verbleiben dort (Mode 32). f) Arborikoles Schaumnester von *Rhacophorus kio* (Flugfrosch, Rhacophoridae) in Südostasien; die Larven fallen in lentische oder lotische Gewässer (Mode 33). Abb. b–f) aus Amphibia Web, Druckgenehmigung erteilt: b) MauroTeixeira jr., c) Marco Katzenberger, d) Marcio Martins, e) Mauro Teixeira jr., f) Nikolai Orlov.

Aquatische Eier in Schaumnestern

Mode 11: Schaumnester auf einem lentischen Gewässer schwimmend, die exotropen Larven in lentischen Gewässern (*Physalaemus*, Abbildung 1c)

Mode 12: Schaumnester auf einem lentischen Gewässer schwimmend, die exotropen Larven in leicht bewegten Gewässern (*Limnodynastes interioris*)

Mode 13: Schaumnester flottierend im Wasser gegrabener Bassins, exotrophe Larven lentisch (*Leptodactylus podicipinus*)

Mode 14: Schaumnester flottierend im Wasser von Blattachsen terrestrischer Bromelien, exotrophe Larven lentisch (*Physalaemus spiniger*)

Aquatische Eier in den Rücken der aquatischen Weibchen eingebettet (Brutpflege)

Mode 15: Aus den Eiern schlüpfen exotrophe Larven (*Pipa carvalhoi*)

Mode 16: Aus den Eiern schlüpfen fertige Jungtiere (*Pipa pipa*, Abbildung 2c)

Terrestrische Eier auf dem Boden, auf Felsen oder eingegraben

Mode 17: Eier und frühe Larven in gegrabenen Nestern, nach Überflutung Larven in lentischen oder lotischen Gewässern (*Pseudophryne*)

Mode 18: Eier auf dem Boden oder auf Felsen über dem Wasser, die exotropen Larven bewegen sich zum Wasser (*Phrynomedusa appendiculata*)

Mode 19: Eier auf feuchten Felsen, in Felsspalten oder auf Wurzeln über dem Wasser, die exotropen Larven im Wasserfilm feuchter Felsen (Gischt) oder in der Übergangszone Wasser-Land (einige *Cycloramphus*, Abbildung 1d)

Mode 20: Die exotropen Larven werden von den Eltern zum Gewässer getragen, Brutpflege (*Allobates*)

Mode 21: Aus den Eiern schlüpfen endotrophe Larven, die sich in Nestern weiterentwickeln (*Cycloramphus parvulus*)

Mode 22: Aus den Eiern schlüpfen endotrophe Larven, die ihre Entwicklung auf dem Rücken oder in Bruttaschen der Adulti beenden, Brutpflege (*Rhinoderma darwini*)

Mode 23: Kryptische Larven (siehe oben)

► Arborikole Eier

Abbildung 3 zeigt verschiedene Brutplätze von pflanzenbrütenden Anuren.

Mode 24: Eier entwickeln sich zu exotropen Larven, die in lentische Gewässer fallen (*Phyllomedusa*)

Mode 25: Eier entwickeln sich zu exotropen Larven, die in lotische Gewässer fallen (*Hyalinobatrachium*)

Mode 26: Eier entwickeln sich zu exotropen Larven, die sich in wassergefüllten Spalten von Bäumen aufhalten (*Nyctimantis rugiceps*)

Mode 27: Die Eier entwickeln sich (über kryptische Larven) zu Fröschen (*Ischnocnema nasuta*)

Eier in Schaumnestern (terrestrisch oder arborikol)

Mode 28: Schaumnester auf dem Waldboden, die exotropen Larven werden durch Überflutung in lentische Gewässer gespült (Formen der *Physalaemus signifier*-Gruppe)

Mode 29: Schaumnester mit Eiern und frühen Larven in offenen Bassins, die exotrophen Larven werden durch Überflutung in lentiche oder lotische Gewässer gespült (einige *Leptodactylus*)

Mode 30: Schaumnester mit Eiern und frühen Larven in unterirdischen, gegrabenen Nestern, die exotrophen Larven werden durch Überflutung in lentiche Gewässer gespült (*Leptodactylus fuscus*)

Mode 31: Schaumnester mit Eiern und frühen Larven in unterirdischen, gegrabenen Nestern, die exotrophen Larven werden durch Überflutung in lotische Gewässer gespült (*Leptodactylus cunicularius*)

Mode 32: Schaumnester in unterirdischen, gegrabenen Nestern, die endotrophen Larven verbleiben dort (einige *Adenomera*, Abbildung 1e)

Mode 33: Arborikole Schaumnester, die Larven fallen in lentiche oder lotische Gewässer (*Rhacophorus*, Abbildung 1f)

Eier von den Elterntieren getragen (Brutpflege)

Mode 34: Eier an den Hinterbeinen des Männchens (*Alytes*, Abbildung 2a), die exotrophen Larven werden in lentiche Gewässern abgesetzt (*Stefania satelles*, Abbildung 2b)

Mode 35: Eier in dorsalen Taschen des Weibchens (einige *Gastrotheca*, Abbildung 2d), die exotrophen Larven werden in lentiche Gewässern abgesetzt

Mode 36: Eier auf dem Rücken oder in dorsalen Taschen des Weibchens, die endotrophen Larven entwickeln sich in den wassertragenden Blattachseln von Bromelien oder Bambus (*Flectonotus*)

Mode 37: Eier auf dem Rücken oder in dorsalen Taschen des Weibchens, Entwicklung kryptischer Larven (*Hemiphractus*)

Die Eier verbleiben im Eileiter (Ovidukt)

Mode 38: Ovoviviparie, Ernährung der Larven durch den eigenen Dotter (*Eleutherodactylus jasperi*)

Mode 39: Viviparie, Ernährung der Larven durch Eileitersekrete (*Nimbaphrynoides occidentalis*, *Nectophrynoides tornieri*, *Nectophrynoides viviparus*, Abbildung 2f)

Die Reproduktionsstrategien jenseits der ancestralen aquatischen Fortpflanzung – insbesondere die kryptischen Larven und die Brutpflege – werden als evolutive Neuanpassungen angesehen (siehe [5]). Da die Eier der Anuren vergleichsweise dotterarm sind, stellt sich die Frage nach der Ernährung der Larven unter den Bedingungen besonderer Reproduktionsstrategien. Ursprünglich ist die ► omnivore Ernährungsweise mit Hilfe eines Filterapparates [5]. Die Abwandlung der Reproduktionsstrategie kann alle Organe der Nahrungsaufnahme betreffen. Darüber hinaus können der Bewegungsapparat und der gesamte Habitus verändert sein.

Von den arborikolen Larven, die in Phytotelmen tropischer Regionen gefunden werden (Abbildung 3), sind drei verschiedene Ernährungsweisen bekannt:

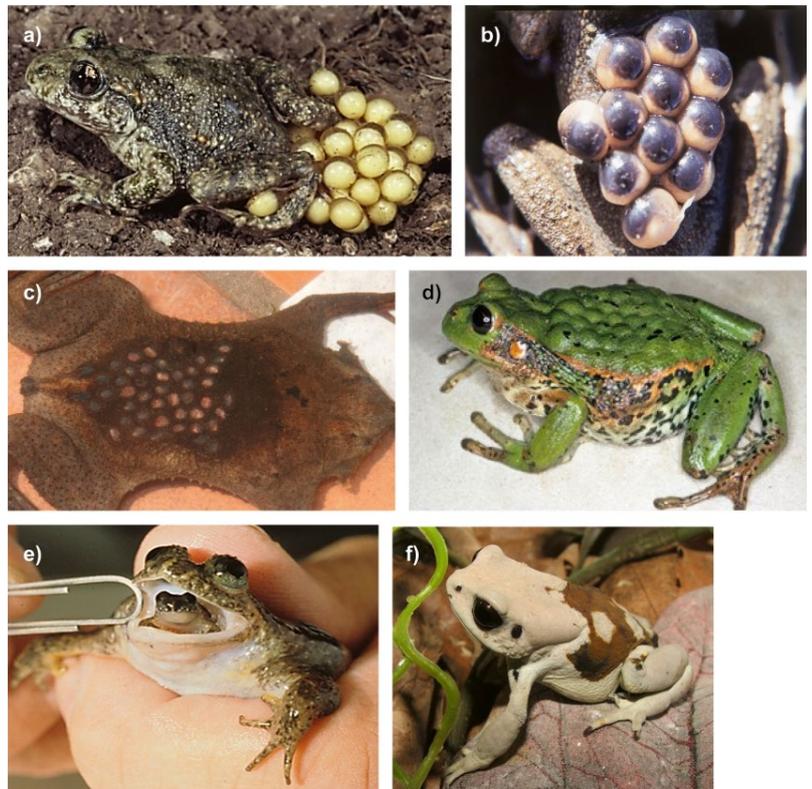


ABB. 2 Tragen der Nachkommen. a) Männchen von *Alytes obstetricans* (Nördliche Geburtshelferkröte, Alytidae) mit Eizellen an den Hinterbeinen, in Südwest- und Westeuropa und in westlichen Teilen Mitteleuropas (Mode 34). b) *Stefania satelles* (Tepui-Baumfrosch, Hemiphractidae) in Venezuela mit kryptischen Larven auf dem Rücken des Weibchens (vergleichbar Mode 34). c) Weibchen von *Pipa pipa* (Große Wabenkröte, Pipidae) am Amazonas mit in die Haut eingesenkten Entwicklungsstadien (Mode 16). d) Weibchen von *Gastrotheca riobambae* (Anden-Beutelfrosch oder Riobamba-Beutelfrosch, Hemiphractidae) mit Entwicklungsstadien im Beutel. e) Weibchen von *Rheobatrachus silus* (Magenbrüterfrosch, Myobatrachidae) ursprünglich im Osten Australiens, mit oraler Aufnahme der Eier und Entwicklung im Magen bis zur Metamorphose, hier mit Jungtier; gilt als ausgestorben (Mode 9). f) Viviparie bei *Nectophrynoides viviparus* in Tansania (Robuste Waldkröte oder Morogoro-Baumkröte, Bufonidae) mit Larven im Eileiter (Mode 39). Abb. a–f) aus Amphibia Web, Druckgenehmigung erteilt: a) Andreas und Christel Nöllert, b) Stefan Gorzula, c) Peter Janzen, d) KU (The University of Kansas) Herpetology, Division Digital Archive, e) Ella Tyler, f) Benjamin Tapley.

(1) Oophagie, d. h. die Eltern versorgen die Larven mit unbefruchteten Nähreiern (z. B. *Kurixalus eiffingeri*, Eiffingers Asiatischer Baumfrosch, Rhacophoridae [Familie der Ruderfrösche]; *Oophaga pumilio*, Erdbeerfröschen, Dendrobatidae [Familie der Baumsteigerfrösche]). Oophagie ist typisch für die Dendrobatidae, Hylidae (Familie der Laubfrösche) und Rhacophoridae.

(2) Larven, denen die knappe Nahrung in den Phytotelmen genügt (z. B. *Guibemantis bicalcaratus* und *Guibemantis punctatus*, Mantellidae [Familie der Madagaskarfrösche]). Die Nahrung kann dann aus Algen, Plankton, Insektenlarven, befruchteten Eiern, Embryonen oder Larven der eigenen Art (Kannibalismus) oder anderer Anurenarten bestehen. Es sind häufig omnivore oder

► karnivore Larven mit für die räuberische Lebensweise umgestalteten Organen der Nahrungsaufnahme (z. B. *Osteopilus*, *Tripurion spinosus*, *Isthmobryla zeteki* [alle Hylidae]; *Hoplobryne* [Microhylidae, Familie der Engmaulfrösche]).

(3) Endotrophie, d. h. keine Nahrungsaufnahme und Ernährung nur durch den eigenen, wenn auch geringen Dottervorrat (z. B. *Fritziana fissilis*, *Fritziana goeldii*, *Fritziana obausi*, *Flectonotus pygmaeus* und der kryptische *Flectonotus fitzgeraldi* [Hemiphractidae, eine ► neotropische Anurenfamilie, die früher zu den Laubfröschen gestellt wurde], aus [13–15]).

Auch die bodenbrütenden Anuren sind nur aus tropischen und subtropischen Regionen bekannt. Es wird davon ausgegangen, dass die terrestrische Fortpflanzung 48-mal unabhängig voneinander aus der aquatischen Fortpflanzung entstanden ist [7]. Voraussetzung hierfür ist ausreichende Feuchtigkeit. In Einzelfällen ist diese jedoch nicht immer erforderlich. So legt *Phrynobatrachus tokba* (Phrynobatrachidae, Afrika) Eier in einer gelatineartigen Masse, die die Austrocknung verhindert, im Falllaub ab. Die kleinen endotrophen Larven verbleiben dort bis zur Metamorphose. Die Eiablage von *Phrynobatrachus alticola* ist vergleichbar. Die Larven sind endotroph, verbleiben im Nest und sind kryptisch. *Phyloria sphagnicola* (Limnodynastidae, Australien) legt die vergleichsweise dotterreichen Eier in Schaumnestern in wassergefüllten Hohlräumen, Spalten, Erdlöchern und in Felsspalten am Boden ab. Dort beenden die bewegungslosen endotrophen Larven ihre Entwicklung. Von der madagassischen Gattung *Gephyromantis* (Mantellidae) sind Larven ohne Nahrungsaufnahme und mit fakultativer Nahrungsaufnahme mit reduziertem Mundfeld bekannt. Als semiterrestrisch werden Larven bezeichnet, die in der Sprühzone von lotischen Gewässern auf Felsen sitzen und dort den Aufwuchs abweiden (Abbildung 1d). Diese Larven evolvierten unabhängig voneinander in acht Familien (Bufonidae: *Sclerophrys perreti*, Cycloramphidae [endemisch in Süd-

ostbrasilien]: *Cycloramphus lithomimeticus*, *Cycloramphus lutzorum*, *Cycloramphus rhyakonastes*, *Cycloramphus valae*, *Thoropa miliaris*, Leptodactylidae [Pfeiffrosche, nur neuweltliche Verbreitung]: *Leptodactylus rugosus*, *Leptodactylus lithonaethes*, Petropedetidae [nur in Afrika südlich der Sahara]: *Petropedetes palmipes*, *Petropedetes perreti*, *Arthrolepidae*, Ptychadenidae [nur in Afrika südlich der Sahara]: *Ptychadena broadleyi*, *Ptychadena mutinondoensis*, Pyxicephalidae [nur in Afrika südlich der Sahara]: *Nothobryne*, Ranixalidae [endemisch in Indien]: *Indirana*). Die Männchen von *Nannophrys ceylonensis* (Dicroglossidae, tropisches Asien und Afrika) bewachen die Eier in verschiedenen Nestern. Die jungen Larven weiden auf feuchten Felsen zunächst Mikroorganismen und Detritus ab. Sie gehen später zur Karnivorie einschließlich Kannibalismus über [16].

Das Auftreten kryptischer Larven [10] kann als Anpassung an den geringen Dottervorrat verstanden werden (z. B. *Phrynobatrachus congicus*). Die Reduktion der Organe der Nahrungsaufnahme sowie das Verbleiben vieler Arten in der Gallerthülle schließen die exotrophe Ernährung aus. In [7] wird davon ausgegangen, dass sich aus der aquatischen und der terrestrischen Fortpflanzung in 8 bzw. 11 Fällen kryptische Larven entwickelt haben. Die phylogenetische Entwicklung kryptischer Larven erfolgte bei Arten mit aquatischer Fortpflanzung schneller als bei solchen mit terrestrischer Fortpflanzung. Die terrestrische Fortpflanzung entwickelte sich fünfmal wieder zur aquatischen Fortpflanzung zurück. Jedoch wurden nie aus kryptischen Larven wieder voll entwickelte Larven. Es wird davon ausgegangen, dass diese Rückkehr entwicklungs-genetisch versperrt ist.

Brutpflege bei Anura

Brutpflege beinhaltet das Bewachen und Tragen der Eier, Embryonen oder Larven bis hin zur Fütterung der Larven. Schätzungen gehen davon aus, dass sechs Prozent der Anuren unterschiedliche Formen der Brutpflege durchführen (im Vergleich dazu: 5 % der Gymnophionen und 18 % der Urodelen, [17]). Beteiligt sein können Weibchen und Männchen. Die Vielfalt der Brutpflegestrategien einschließlich der dazu gehörenden morphologischen Anpassungen steht im Gegensatz zu der oben erwähnten Einschränkung weitgehender evolutiver Veränderungen des morphologischen ► Bauplans. Es ist jedoch anzunehmen, dass sich in bestimmten Fällen morphologische Strukturen und Verhalten parallel entwickelten wie zum Beispiel bei *Pipa* die Rückenwaben in der Haut und das Einbringen der Eier in diese (Modes 15 und 16, Abbildung 2c).

Im folgenden Abschnitt werden aus der Fülle der Brutpflegestrategien einige prägnante Beispiele für sehr weitgehende Anpassungen genannt, die über das reine Tragen der Nachkommenschaft wie zum Beispiel bei der einheimischen Geburtshelferkröte (*Alytes obstetricans*) hinausgehen (Mode 34, Abbildung 2a). Außergewöhnlich ist die orale Aufnahme von Entwicklungsstadien: Die Männchen

REPRODUKTIONS BIOLOGISCHE DEFINITIONEN (AUS [13])

Ovoviviparie: Die Zygoten verbleiben im Eileiter, Ernährung durch eigenen Eidotter.

Viviparie: Die Zygoten verbleiben im Eileiter, Ernährung durch Nährstoffe außerhalb des Eies (Matrotrophie).

Paraviviparie: Brutpflege, die gesamte Entwicklung bis zur Metamorphose erfolgt auf dem Rücken oder in Bruttaschen, Ernährung durch eigenen Eidotter, graduell veränderte Entwicklung.

Exoviviparie: Brutpflege, terrestrische Eier, Ernährung durch eigenen Eidotter, nach dem Schlüpfen Larven auf oder im männlichen Elterntier.

Nidicolie: terrestrische Eier, Ernährung durch eigenen Eidotter, Schlüpfen freilebender Larven ohne Nahrungsaufnahme.

von *Rhinoderma rufum* (dem Nördlichen Darwin-Nasenfrosch) tragen Embryonen in der Mundhöhle zum Gewässer und die Männchen von *Rhinoderma darwini* (dem Darwin-Nasenfrosch) behalten Eier und endotrophe Larven mit direkter Entwicklung bis zur Metamorphose in Brutbeuteln im Kehlsack. Weibchen des australischen Magenbrüterfrosches *Rheobatrachus silus* (beide Arten der Gattung gelten inzwischen als ausgestorben, vermutlich durch den vom Menschen eingeschleppten Amphibien-Chytridpilz *Batrachochytrium dendrobatidis* [18]) nahmen ihre Eier zur weiteren Entwicklung in den Magen auf (Mode 9, Abbildung 2e) ([13, 19]). Die Verdauung bei dieser einzigartigen, nun extinkten Fortpflanzungsstrategie wurde wahrscheinlich durch die Abgabe von Prostaglandin E2 durch die Larven unterdrückt.

In den räumlich begrenzten Phytotelmen sind die elterliche Unterscheidung der Larven der eigenen Art von fremden Arten, die Interaktionen der Larven wie Bettelverhalten und die Identifikation der Larven über chemische Stoffe durch die fütternden Elterntiere außergewöhnliche reproduktionsbiologische Anpassungen. Dazu kommen Polygamie, Polygynie (zwei oder mehr Weibchen teilen sich ein Männchen), monoparentale Brutpflege, gemeinsame Brutpflege der Elterntiere und die Pflege nicht genetisch verwandter Larven innerhalb der unterschiedlichen Brutpflegestrategien. Möglicherweise hat die Brutpflege bei den Anuren eine Ersatzfunktion für die weitgehend fehlende Viviparie (siehe unten bei „Urodela und Gymnophiona“). Es muss jedoch erwähnt werden, dass die arborikole und die terrestrische Entwicklung nicht bei allen Arten automatisch mit einem hohen Maß an Brutpflege verbunden ist. Bei endotrophen Arten mit vergleichsweise dotterreichen Eiern ist die Brutpflege entsprechend weniger ausgeprägt [14, 15].

Nachstehend folgen einige ausgesuchte Ergebnisse aus experimentellen Arbeiten zur Brutpflege: Die neotropische Art *Ranitomeya variabilis* (Dendrobatidae) deponiert ihre Larven in Phytotelmen unter Vermeidung von Larven der gleichen Art, da diese kannibalistisch sind. Der Geruch von *Ameerega trivittata* (Dendrobatidae) wird bei der Eiablage von *Ranitomeya variabilis* gemieden, jedoch nicht beim Absetzen der Larven. *Hyloxalus azureiventris* (Dendrobatidae) transportiert ihre omnivoren Larven zu den gleichen Kleinstgewässern. Dies lässt vermuten, dass *Ranitomeya variabilis* die Gerüche der nicht räuberischen *Hyloxalus azureiventris* kennt. Untersuchungen dieser inter- oder intraspezifischen chemischen Kommunikation zeigten, dass bei *Ranitomeya variabilis* C_8H_7NO und $C_9H_{18}N_2O$ und bei *Hyloxalus azureiventris* $C_{13}H_{25}NO_2$ und $C_9H_{18}N_2O$ beteiligt sind [20]. Die Fütterung der Larven mit Nähreiern (siehe oben unter Ernährungsweisen arborikoler Larven (1) Oophagie) ist häufig mit einem spezifischen Verhalten verbunden. Larven von *Kurixalus eiffingeri* (Eiffingers Asiatischer Baumfrosch, Rhacophoridae, Abbildung 3e) zeigen ein Bettelverhalten, das durch den Elterngeruch stimuliert wird [21]. Die



ABB. 3 Pflanzen als Brutplätze. a) Die große Bromelie (*Glomeropitcairnia erectiflora*) unterhalb des Gipfels von El Tucuche, Trinidad. b) Vergrößerte Aufnahme von wassergefüllten Blattachseln bei *Glomeropitcairnia erectiflora*. c) Larve von *Phytotriades auratus* (El-Tucuche-Goldlaubdrosch oder Trinidad-Herzungenfrosch, Hylidae) in den Blattachseln von *Glomeropitcairnia erectiflora*. d) Wassergefüllte Baumhöhle im Chitou Forest, Nantou County, Taiwan. e) Wassergefüllter Bambusstumpf mit Adulti und Eiern von *Kurixalus eiffingeri* (Eiffingers Asiatischer Baumfrosch, Rhacophoridae) im Chitou Forest, Nantou County, Taiwan. Fotos: R. Lehtinen.

Weibchen von *Oophaga pumilio* (Erdbeerfröschen, Dendrobatidae) tragen die Larven aus einem terrestrischen Nest in die Blattachseln von Bromelien. Eine Kombination von visuellen, taktilen und chemischen Reizen löst ein Bettelverhalten der Larven aus [22]. Die Männchen reagieren auf andere Männchen mit Kampf, Fressen fremder Eier und Transport der eigenen Larven. Es überrascht nicht, dass die Ablage von Nähreiern das Überleben der Larven, die Größe bei der Metamorphose und das Überleben nach der Metamorphose beeinflussen. Jedoch geht dies auf Kosten der geringeren Eizahl. Bei mehr als drei Larven sinkt die Überlebensrate aufgrund des Nahrungsmangels. Dies unterstreicht die Abhängigkeit von den Nähreiern. Ältere Larven werden bevorzugt gefüttert. Die Larven werden aktiv, wenn sie visuellen Reizen oder visuellen und chemischen Reizen von Männchen oder Weibchen der gleichen Art ausgesetzt sind. Bettelverhalten wird jedoch nur bei der Kombination mit taktilen Reizen gesehen. Die Anwesenheit von Räubern löst keine Reaktion aus.

Eine andere Strategie der Brutpflege ist das Tragen der Eier und Entwicklungsstadien auf dem Rücken terrestrischer Eltern (Modes 35 bis 37). Dies betrifft einige Hemiphractidae: *Hemiphractus scutatus*, *Cryptobatrachus fubrmannia* und *Stefania evansi* tragen die Larven bis zur Metamorphose. Bei *Gastrotheca* (Beutelfrösche, Hemiphractidae) entwickeln sich die Eier in Rückentaschen. Die kryptischen Larven metamorphosieren dort (*Gastrotheca christiani*, *Gastrotheca cornuta*, *Gastrotheca orophylax*, *Gastrotheca ovifera*, *Gastrotheca testudinea*,

Gastrotheca walker). Bei *Gastrotheca riobambae* und *Gastrotheca gracilis* werden die jungen Larven in Gewässer abgesetzt [23]. Bei *Gastrotheca excubitor* sind die Rückentaschen verschlossen. Sie tragen dotterreiche Eier und später kryptische Larven. Die Taschen sind stark durchblutet. Ein Transfer von Fettsäuren und Aminosäuren zur Ernährung der Embryonen wurde nachgewiesen [24]. *Leiopelma archeyi* und *Leiopelma hamiltoni* (Leiopelmatidae, endemisch für Neuseeland) legen ihre Eier auf feuchtem Untergrund ab. Jedoch beenden die kryptischen und endotrophen Larven ihre Entwicklung in Rückentaschen der Männchen (Mode 22). Bei anderen *Leiopelma*-Arten entwickeln sich die kryptischen Larven terrestrisch.

Die Weibchen von *Fritziana fissilis*, *Fritziana goeldii*, *Fritziana obausi* und *Flectonotus pygmaeus* (Hemiphractidae) tragen die relativ dotterreichen Eier auf dem Rücken oder in Rückentaschen. Die endotrophen Larven werden in späten Stadien an Bromelien oder Bambus abgesetzt (Mode 36).

Die Fortpflanzungsbiologie der Urodela und der Gymnophiona

In Gegensatz zu den Anura ist bei diesen Ordnungen die weiter verbreitete innere Befruchtung wesentlich: Diese ermöglicht einigen wenigen Arten der Urodela und vielen Arten der Gymnophiona die vivipare Entwicklung mit unterschiedlich abgewandelten Larven im Eileiter. Dazu kommt die hormonelle Koordination des Zustandes des Eileiters mit dem Zeitpunkt des Eisprungs und damit der Befruchtung [18]. Das daran beteiligte Progesteron ist von den plazentalen Säugetieren bekannt. Es kann vermutet werden, dass ein gemeinsames ancestrales Merkmal der Tetrapoda vorliegt.

Zusammenfassung

Ursprünglich pflanzten sich die Amphibia in Gewässern fort. Um der Austrocknung und der Prädation zu entgehen, entwickelten sie verblüffende Anpassungen. Die Neuanpassungen der Anura sind die Nutzung von Phytotelmata, Epiphyten, Baumhöhlen oder terrestrische Alternativen. Einige Arten entwickeln kryptische Larven (früher „direkt entwickelnde Larven“ genannt), endotrophe Ernährung durch relativ dotterreiche Eier, Brutpflege (Transport der Eier und Larven, Bewachung der Nachkommenschaft und Zufütterung durch Nähreier) – bei wenigen Arten die Entwicklung in der Mundhöhle oder im Magen und die sehr seltene Entwicklung im Eileiter. Im Gegensatz dazu kommt bei den Urodela und besonders bei den Gymnophiona die Entwicklung im Eileiter häufiger bzw. regelhaft vor.

Summary

The biology of reproduction in amphibia

Originally, amphibia reproduced in waters. They evolved astonishing adaptations to escape from desiccation and predation. The new adaptations of Anurans include small water-bearing phytotelmata, epiphytes, tree hollows or terrestrial alternative biotopes. Several species develop cryptic larvae (in the past called “directly developing larvae”), endotrophic feeding on comparatively yolk-rich eggs, parental care (transport of eggs and larvae, guarding the offspring and extra feeding with nourishing eggs) – in only a few species, the development inside the oral cavity or the stomach and very seldom the development within the oviduct. Contrary to this, oviductal gestation occurs in Urodela more frequently and in Gymnophiona regularly.

Schlagworte

Lissamphibia, Froschlurche, Fortpflanzungsbiologie, Anpassungen

GLOSSAR

Amniota: Reptilien, Vögel und Säuger mit den stammesgeschichtlich neuen embryonalen Organen Amnion, Chorion und Allantois.

Amphibia: ist ein breiter taxonomischer Begriff, der alle stammesgeschichtlich frühen Tetrapoda bis hin zu den rezenten Lissamphibia und deren Stammgruppe (Stammlinie) beinhaltet.

anzestrale Merkmale: stammesgeschichtlich ursprüngliche Merkmale.

arborikol: auf oder in Bäumen oder anderen Pflanzen lebend.

Bauplan: Grundform der Anordnung der Teile und Organe; allgemeiner grundlegender struktureller Plan eines Nachkommen einer Stammart.

endotrophe Larven: Larven ohne Nahrungsaufnahme von außen, zehren vom Eidottervorrat.

Epiphyten: Pflanzen, die auf anderen Pflanzen wachsen.

exotrophe Larven: Larven mit Nahrungsaufnahme von außen.

Hypothalamus-Hypophysen-Schilddrüsen-Achse: Neuroendokrine Funktionseinheit, die die Aktivität der Schilddrüse während der Metamorphose reguliert. Der **Hypothalamus** ist ein Teil des Zwischenhirns mit endokriner (Hormon produzierender) Funktion. Die **Hypophyse** ist eine ventrale Ausstülpung des Zwischenhirns (Adenohypophyse) ebenfalls mit endokriner Funktion.

karnivor: fleischfressend.

lentiche Gewässer: stehende Gewässer.

Lissamphibia: innerhalb der Amphibia die Gymnophiona und die Batrachia (Urodela und Anura)

lotische Gewässer: Fließgewässer.

Metamorphose: Umwandlung morphologischer, anatomischer, physiologischer und verhaltensbiologischer Eigenschaften einer Larve in einen fertig ausgebildeten, fortpflanzungsfähigen Organismus; bei Amphibien gesteuert durch hormonelle Regelkreise; daran beteiligt sind das Prohormon Thyroxin T₄, das in das aktive Hormon Trijodthyronin T₃ umgebaut wird; Einfluss von Umweltfaktoren durch Kortikosteroide aus der Nebennierenrinde.

neotropisch: Zentral- und Südamerika, Inseln in der Karibik.

omnivor: alles fressend.

Phytotelme/Phytotelmata: durch Pflanzen geformtes Kleinstgewässer.

Prädation: ein Räuber tötet und frisst andere tierische Organismen.

Progesteron: ein Steroidhormon, das im Follikelpithel des Ovars nach dem Eisprung in den Corpora lutea synthetisiert wird; Schwangerschaftshormon beim Menschen gesteuert durch die Hypophyse.

Selektionsfaktoren: Umweltfaktoren, die einen Einfluss auf das Überleben einer Art und deren weitere Evolution haben.

Tetrapoda: vierfüßige landlebende Wirbeltiere (Amphibia, Lissamphibia, Amniota).

Literatur

[1] D. R. Frost (2024). Amphibian Species of the World: an Online Reference. Version 6.2. Electronic Database accessible at <https://amphibiansoftheworld>, abgerufen am 06. März 2024.

[2] V. Storch, U. Welsch (2003). Systematische Zoologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

[3] G. Mickoleit (2004). Phylogenetische Systematik der Wirbeltiere. Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München.

[4] J. A. Clack (2002). Gaining ground, the origin and evolution of tetrapods. Indiana University Press, Bloomington und Indianapolis.

[5] B. Viertel (2019). Eine evolutive Neuanpassung bei den Fröschen – Der Filterapparat der Kaulquappen. *Biologie in unserer Zeit* 49 (4), 254–260.

[6] M. Veith, E. C. Barrot (2024). Chapter 4. The Evolution of the Lissamphibia – a Molecular Phylogenetic Perspective. In: Anuran Larvae (Hrsg. B. Viertel). Edition Chimaira, Frankfurt am Main (in Press).

[7] I. Gómez-Mestre, R. A. Pyron, J. J. Wiens (2012). Phylogenetic analyses reveal unexpected patterns in the evolution of reproductive modes in frogs. *Evolution* 66, 3687–3700.

[8] N. A. Moran (1994). Adaptation and constraint in the complex life cycles of animals. *Annual Review of Ecology and Systematics* 25, 573–600.

[9] M. L. Crump (2015). Anuran reproductive modes: evolving perspectives. *Journal of Herpetology* 49, 1–16.

[10] R. P. Elinson (2001). Direct development: an alternative way to make a frog. *Genesis* 29, 91–95.

[11] J. Chanson et al. (2008). The State of the World’s Amphibians. In: Threatened amphibians of the World. In cooperation with IUCN, Conservation International and Nature (Hrsg. S. N. Stuart et al.), 34–52. Lynx Ediciones, Barcelona.

[12] F. Xavier (1977). An exceptional reproductive strategy in anura: *Nectophrynoides occidentalis* Angel (Bufonidae), an example of adaptation to terrestrial life by viviparity. In: Major patterns in vertebrate evolution (Hrsg. M. K. Hecht et al.), 545–552. Plenum, New York.

[13] R. Altig, R. W. McDiarmid (1999). Tadpoles, the Biology of Anuran Larvae. The University of Chicago Press, Chicago und London.

[14] R. M. Lehtinen et al. (2004). Phytotelm breeding anurans: past, present and future research. In: Ecology and Evolution of Phytotelm-Breeding Anurans (Hrsg. R. M. Lehtinen). Miscellaneous Publications of the University of Michigan Museum of Zoology 193, 1–9.

[15] R. N. Lehtinen (2022). Phytotelma-breeding frogs of the world, version 1.11., abgerufen am 06. Juni 2022. – Electronic database accessible at <https://sites.google.com/site/phytotelmbreeding-frogsworld/>

[16] D. D. Wickramasinghe et al. (2007). Ontogenetic changes in diet and intestinal morphology in semi-terrestrial tadpoles of *Nannophrys ceylonensis* (Dicroglossidae). *Copeia* 2007, 1012–1018.

[17] S. Schweiger et al. (2017). Direct development in African squeaker frogs (Anura: Arthrolepidae: Arthrolepis) reveals a mosaic of derived and plesiomorphic characters. *Organisms Diversity & Evolution* 17, 693–707.

[18] R. W. R. Retallick et al. (2004). Endemic infection of the amphibian chytrid fungus in a frog community postdecline. *PLoS Biology* 2, 1965–1971.

[19] M. H. Wake (1993). Evolution of oviductal gestation in amphibians. *The Journal of Experimental Zoology* 266, 394–413.

[20] L. M. Schulte et al. (2015). Decoding and discrimination of chemical cues and signals: avoidance of predation and competition during parental care behavior in sympatric poison frogs. *PLoS One* 10, e0129929.

[21] Y. C. Kam, H. W. Yang (2002). Female offspring communication in a Taiwanese tree frog, *Chirixalus eiffingeri* (Anura: Rhacophoridae). *Animal Behaviour* 64, 881–886.

[22] J. L. Stynoski, V. R. Noble (2012). To beg or to freeze: multimodal sensory integration directs behavior in a tadpole. *Behavioural Ecology and Sociobiology* 66, 191–199.

[23] AmphibiaWeb (2022). Information on amphibian biology and conservation. [web application]. Berkeley, California: AmphibiaWeb. <https://amphibiaweb.org>, abgerufen am 30. August 2023.

[24] R. W. Warne, A. Catenazzi (2016). Pouch brooding marsupial frogs transfer nutrients to developing embryos. *Biology Letters* 12, 1–4, 20160673. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0673>

Verfasst von:



Bruno Viertel, geb. 1949, studierte Zoologie, Botanik, Paläontologie und Geographie in Mainz. Staatsexamen 1975, Promotion 1978, Habilitation 1993. Ab 1977 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Zoologie, Mainz. Arbeiten und Publikationen zur Ökologie, Ökophysiologie, Morphogenese und Toxikologie der Anurenlarven. Von 1991 bis 2010 Leiter der Reproduktionstoxikologie bei der Boehringer Ingelheim Pharma GmbH & Co. KG. Arbeiten zur Reproduktionstoxizität von Arzneimittelkandidaten zur Arzneimittelzulassung und Publikationen zu diesem Themenkreis. Privatdozent an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz und seit 2014 an der Universität Trier.

Korrespondenz:

PD Dr. habil. Bruno Viertel
 Universität Trier
 Fachbereich VI, Raum- und Umweltwissenschaften
 Biogeographie
 Universitätsring 15
 D-54286 Trier
 E-Mail: viertel@uni-trier.de

NEUE BUCHSERIE: STUDIEN ZUR DIDAKTIK UND METHODIK DES BIOLOGIEUNTERRICHTS

In der Reihe werden Arbeiten (Monografien und Sammelwerke) publiziert, die sich in aktueller sowie historischer Perspektive mit didaktischen und methodischen Ansätzen zum Lehren und Lernen von Biologie in der Schule oder dem Studium in der Hochschule befassen. Sie profitiert von der inhaltlichen Vielfalt sowie den fachspezifischen, fächerübergreifenden und -verbindenden Perspektiven und ermöglicht dem wissenschaftlichen Nachwuchs, genauso wie etablierten Forscherinnen und Forschern, ihre wissenschaftlichen Ergebnisse zur Diskussion zu stellen. Unter Beachtung der Bezugsdisziplinen und auch der Bildungsforschung bieten die Beiträge Anregungen für den bildungspolitischen Diskurs. Die Schriftenreihe leistet so, im Zusammenhang mit der Qualifizierung von wissenschaftlichem Nachwuchs und mit Blick auf die Theorie-Praxis-Verzahnung zwischen Wissenschaft und Schule, einen Beitrag zur Weiterentwicklung des Biologieunterrichts. Als Herausgeber fungieren Uwe Hoßfeld und Karl Porges. ISSN: 3059-2127 (elektronisch) bzw. 3059-2119 (Druck)



Bacillus subtilis ist Mikrobe des Jahres 2023

So subtil, so potent, so omnipräsent

THORSTEN MASCHER

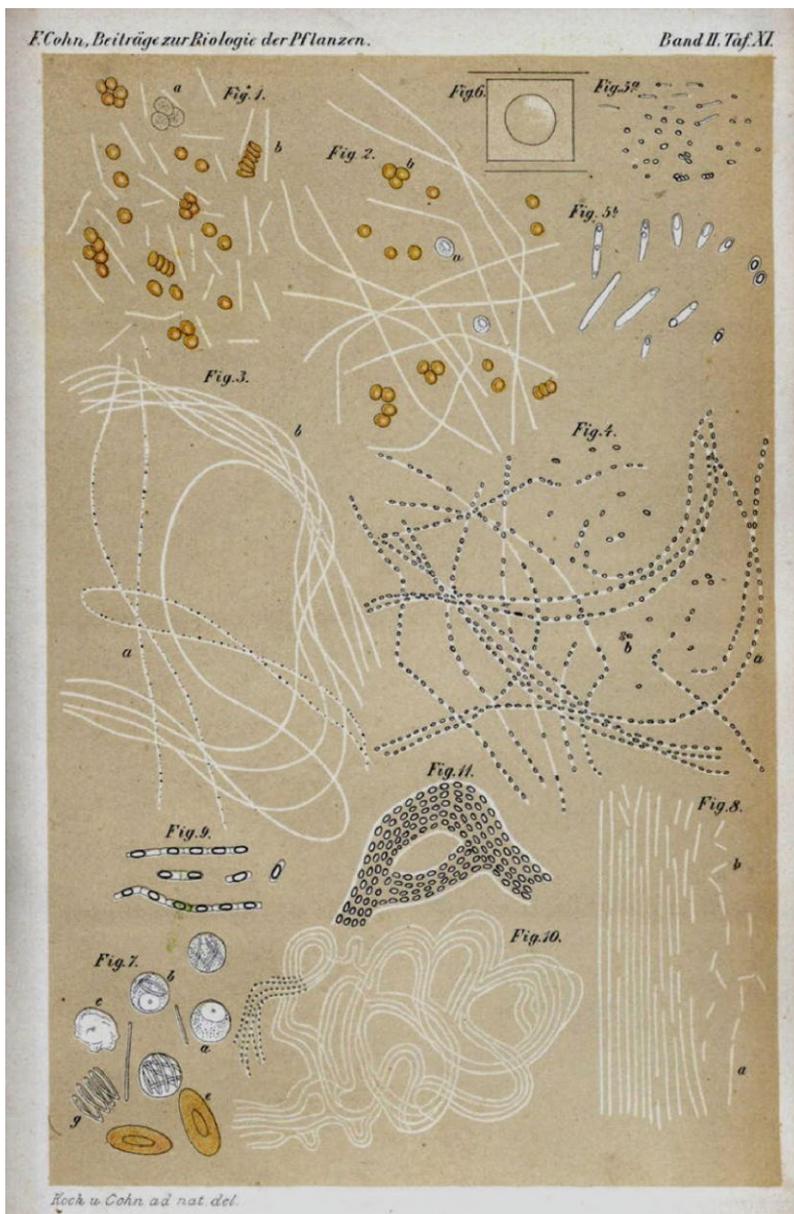


ABB. 1 Originalabbildung zur Erstbeschreibung von *Bacillus subtilis* durch Ferdinand Cohn. Digitale Reproduktion online bereitgestellt durch die Farlow Botanical Library, Harvard University, (<https://archive.org/details/beitragzurbiolo07cohnngoog>).

Mit der Mikrobe des Jahres 2023 fiel die Wahl auf eines der am besten untersuchten Modellbakterien der Mikrobiologie. Zu Recht: *Bacillus subtilis* ist ein wahrer Alleskönner und vereint spannende biologische Eigenschaften mit einem hohen Nutzen für den Menschen. Seine Fähigkeit, hochresistente Dauerstadien (Endosporen) auszubilden, stellt nicht nur den vermutlich bestverstandenen biologischen Differenzierungsvorgang dar, sondern erfordert auch große Anstrengung in der Haltbarmachung von Lebensmitteln. Der Entwicklungszyklus, der zur Sporenbildung führt, ist hochkomplex und von Arbeitsteilung und Vielzelligkeit geprägt, was *B. subtilis* in neuerer Zeit zu einem der Vorreiter für die Untersuchung der bakteriellen Multizellularität macht. Gleichzeitig wird das Bakterium aber auch in vielfältiger Weise vom Menschen genutzt. Ob zur Herstellung traditioneller fermentierter Lebensmittel, als Probiotikum für Mensch und Tier oder aber zur großtechnischen Herstellung von Vitaminen oder Waschmittelenzymen: *B. subtilis* ist wirklich omnipräsent. Was wiederum auch an den Endosporen liegt, die an jedem Ort der Erde zu finden sind und selbst nach Jahrmillionen der absoluten Ruhe noch die Fähigkeit besitzen, innerhalb weniger Stunden wieder zu einer lebenden Zelle auszukeimen.

Zum zehnten Mal kürt die Vereinigung für Allgemeine und Angewandte Mikrobiologie (VAAM) nun schon die Mikrobe des Jahres. Manche der seitdem vorgestellten Bakterien waren spektakulär, ihre Lebensäußerungen schon mit bloßem Auge offensichtlich – wie etwa filamentöse Cyanobakterien der Gattung *Nostoc*, die in der Erdgeschichte die pflanzliche Photosynthese „erfunden“ haben und in Tümpeln große, gallertartige Teichpflaumen bilden (MdJ 2014) oder die pilzartig wachsenden Streptomyceten, immer noch die wichtigsten Antibiotikaproduzenten auf Erden (MdJ 2016). Andere ausgezeichnete Bakterien wiederum legen wahrlich bemerkenswerte Verhaltensweisen an den Tag. Sie weisen z. B. ein ausgeprägtes Sozialleben auf und jagen in bakteriellen „Wolfsrudeln“ (*Myxococcus xanthus*, MdJ 2020) oder sind in der Lage, sich entlang von Erdmagnetfeldlinien zu bewegen (*Magnetospirillum gryphiswaldense*, MdJ 2019). Demgegenüber sind manche der geehrten Mikroben zunächst einmal deutlich unscheinbarer. Ihre große Relevanz, die eine Auszeichnung rechtfertigt, ist erst auf den zweiten Blick ersichtlich. Das gilt zum Beispiel für das „subtile Stäbchen“, *Bacillus subtilis*, die Mikrobe des Jahres 2023 [1].

Vor annähernd 200 Jahren, im Jahre 1835, wurde dieses Bakterium erstmals von einem der Urväter der Bakteriologie, Christian Gottfried Ehrenberg, der es aus einem frisch angesetzten Heuaufguss isoliert hatte, als *Vibrio subtilis* beschrieben. Der Name geht vermutlich auf die Beweglichkeit („Vibrationen“) der dünnen Stäbchen zurück. Der Mikrobiologe und Botaniker Ferdinand Julius Cohn änderte 1877 schließlich den Namen in den heute noch gängigen ab: *Bacillus subtilis* [2].

B. subtilis ist ein weltweit verbreiteter Bodenbewohner. Der Boden ist ein äußerst anspruchsvoller mikrobieller Lebensraum. Nährstoffe sind meist limitierend und ihre Verfügbarkeit unberechenbar: Auf kurze Phasen des Überflusses – wenn der sprichwörtliche Apfel auf den Boden fällt – folgen lange Hungerphasen. Auch können sich die äußeren Rahmenbedingungen selbst innerhalb eines Tagesverlaufes drastisch ändern. In den oberflächennahen Schichten des Bodens können beispielsweise an einem Sommermorgen 15 °C, am Nachmittag aber unter Sonneneinstrahlung bis zu 50 °C herrschen. Dabei mag der Boden komplett austrocknen. Kommt dann am Nachmittag ein Sommergewitter, wird der Boden schlagartig geflutet. Dadurch werden Nährstoffe ausgespült, die Temperatur kann in wenigen Minuten um 30 °C fallen und die Sauerstoffverfügbarkeit in kürzester Zeit dramatisch sinken. Zusätzlich herrscht hoher Konkurrenzdruck. Wer hier, wo die einzige Konstante die Veränderung ist, bestehen will, muss ein Anpassungs- und Überlebenskünstler sein. Das trifft sicherlich auf unsere Mikrobe des Jahres 2023 zu, die in diesem komplexen Lebensraum besonders eng mit Pflanzen assoziiert lebt – sowohl auf Wurzel- als auch auf Blattoberflächen – und sich mit ihrem Stoffwechsel perfekt auf ihre pflanzlichen Partner eingestellt hat [3].

Ferdinand Cohn beschrieb 1877 auch erstmals die Besonderheit, für die *B. subtilis* heute noch in allen mikrobiologischen Textbüchern prominente Erwähnung findet: seine Fähigkeit, unter Hungerbedingungen innerhalb seiner Zelle kleine, hochresistente Dauerstadien, die Endosporen, zu bilden [2]. Die entsprechenden Handzeichnungen in dieser Arbeit (Abbildung 1) teilten damals ihren Platz mit Illustrationen von Robert Koch zur epochalen Erstbeschreibung eines nahen, wenn auch weitaus gefährlicheren Verwandten von *B. subtilis*, des Milzbranderreger *Bacillus anthracis*. Letzterer erlangte vor zwölf Jahren traurige Berühmtheit im Zusammenhang mit versuchten Attentaten auf mehrere US-amerikanische Senatoren im Nachhall der terroristischen Anschläge vom 11. September 2001. Auch hier spielten Endosporen, die Briefen beigelegt waren, eine entscheidende Rolle.

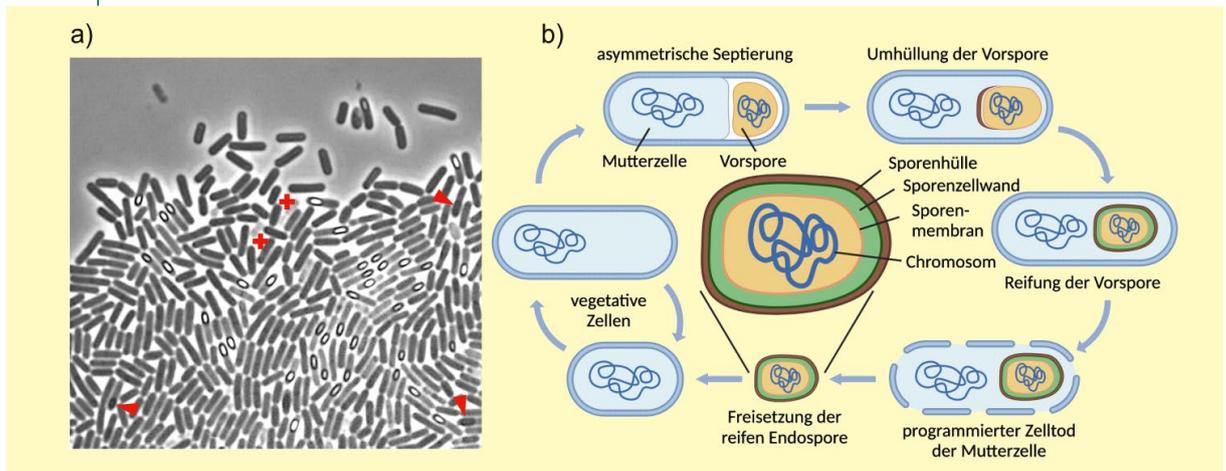
Endosporen bewahren das Leben „für immer“

Endosporen sind ein wahres Meisterwerk der Überlebensfähigkeit und stellen die vermutlich robustesten Dauerstadien dar, die die Evolution jemals hervorgebracht hat (Abbildung 2a). Sie sind resistent gegenüber den allermeisten Chemikalien, allen Antibiotika, jedweder natürlicher Strahlung und werden selbst in kochendem Wasser nicht abgetötet. Diese bemerkenswerte Widerstandsfähigkeit verdanken sie einer ganzen Reihe von Eigenschaften, die die Zelle ihnen im Zuge eines komplexen Differenzierungsprogrammes verleiht [4]. So sorgt eine vielschichtige, komplex strukturierte Eiweißhülle für einen Schutz vor äußeren Einflüssen, während das Innere der Endospore keinerlei biologische Aktivität zeigt und quasi einem biochemischen Tresor gleicht, dessen einzige Funktion es ist, die Erbinformation der Bakterien unter allen Umständen zu bewahren. Einmal gebildet, vermögen reife Endo-

IN KÜRZE

- *Bacillus subtilis*, die Mikrobe des Jahres 2023, ist ein **weitverbreitetes Bodenbakterium**, das sich sowohl durch seine faszinierende Physiologie als auch durch seine Anwendungsrelevanz auszeichnet.
- Die **Bildung von Endosporen** ist das vermutlich herausragendste Merkmal dieses Mikroorganismus. Hierbei handelt es sich um hochresistente Überdauerungsstadien, die selbst Jahrtausende keimfähig bleiben können.
- Die Endosporenbildung ist eingebettet in ein **komplexes Überlebensprogramm**, das der Mobilisierung von Nahrungsquellen in veränderlichen und oftmals nährstofflimitierenden Habitaten dient.
- *B. subtilis* ist auch ein **wichtiger Modellorganismus zur Untersuchung der bakteriellen Multizellularität**, die im Zusammenhang mit der Differenzierung auf Populationsebene steht. Diese beinhaltet in Biofilmen z. B. Phänomene wie die phänotypische Heterogenität, die bakterielle Gewebebildung sowie den programmierten Zelltod.
- *B. subtilis* ist ein **biotechnologisch hochrelevanter Organismus**, der großtechnisch z. B. zur Herstellung von Enzymen und Vitaminen genutzt wird. Darüber hinaus findet er aber auch Anwendungen in der traditionellen Fermentation von Sojabohnen, als Futtermittel-Probiotikum in der Tiermast sowie zur Selbstheilung von Betonrissen.

ABB. 2 | LEBENSZYKLUS UND SPORULATION BEI *BACILLUS SUBTILIS*



a) Phasenkontrastmikroskopische Aufnahme von *B. subtilis*-Zellen (dunkle Stäbchen), gegen die sich die weiß leuchtenden, lichtbrechenden Sporen klar abzeichnen. Einige sporulierende Zellen sind mit einem roten Pfeil gekennzeichnet, lysierte Zellen (leere Zellhüllen, sog. Geisterzellen) sind mit einem roten Kreuz markiert. b) Sporulationszyklus bei *B. subtilis*. Der Sporenaufbau ist in der Mitte im Detail dargestellt. Diese Abbildung wurde mithilfe von biorender.com erstellt.

sporen widrigen äußeren Umständen nahezu beliebig lange zu trotzen. Gleichzeitig tragen diese Ruhestadien die Fähigkeit in sich, auf ihre Umwelt zu reagieren und unter geeigneten Bedingungen in wenigen Stunden wieder zu keimen und eine neue vegetative Zelle hervorzubringen. Die Überlebensfähigkeit von Endosporen ist dabei wirklich bemerkenswert und dient in der mikrobiologischen Forschung der natürlichen Konservierung und Aufbewahrung von *B. subtilis*. So ist es überhaupt kein Problem, erhaltene Sporenpräparationen des Erstbeschreibers aus dem 19. Jahrhundert selbst heute noch über Nacht wiederzubeleben. Damit ist das Mindesthaltbarkeitsdatum von Endosporen aber keineswegs erreicht. Tatsächlich haben wissenschaftliche Arbeiten gezeigt, dass Endosporen selbst nach vielen Millionen (!) Jahren keimfähig bleiben. So konnten Endosporen, die im Darm einer vor rund 25–40 Millionen Jahren in Bernstein eingeschlossenen, längst ausgestorbenen Biene gefunden wurden, zur Keimung gebracht werden [5]. Noch unglaublicher ist die Isolation und Auskeimung von *Bacillus*-Sporen, die in primären Salzkristallen vor 250 Millionen Jahren eingeschlossen wurden [6]. Endosporen sind demnach ruhende Dauerstadien, die quasi „für immer“ die Fähigkeit in sich tragen, wieder auszukeimen und „neues“ mikrobielles Leben hervorzubringen.

Was für das Überleben von Bacilli ein großer Selektionsvorteil ist, stellt uns Menschen immer wieder vor große Herausforderungen. Während *B. subtilis* und seine nächsten Verwandten harmlose Bodenbewohner darstellen, die uns – wie wir noch sehen werden – von großem Nutzen sind, gibt es unter den rund 250 Arten der Gattung *Bacillus* auch hochgradig gefährliche Krankheitserreger und Toxinproduzenten wie z. B. den bereits erwähnten Milzbranderreger *B. anthracis*. Aber auch die nahe verwandten, anaeroben Vertreter der Gattung *Clostridium*

sind in der Lebensmittelindustrie als Verderbniskeime gefürchtet, da sie – z. B. nach Auskeimung in nicht ausreichend durcherhitzten Konserven – zu schwerwiegenden Lebensmittelvergiftungen führen können. Zum Schutz des Menschen vor Endosporenbildnern müssen deshalb sowohl in der Lebensmittelindustrie als auch in Medizin und Forschung große Anstrengungen unternommen werden, um diese robusten Dauerstadien zu inaktivieren. Es bedarf hierfür Verfahren wie dem Pasteurisieren oder Autoklavieren. Bei ersterem werden z. B. viele Lebensmittel bei eher milden Temperaturen von ca. 65 °C erhitzt, um zunächst alle lebenden Zellen abzutöten. Danach lässt man die Lebensmittel für einen Tag stehen, wodurch die Endosporen aufgrund der geeigneten Bedingungen auskeimen, um sie dann durch erneutes Erhitzen abzutöten, bevor sie wieder Endosporen ausbilden können. Autoklavieren macht sich den auf 121 °C erhöhten Siedepunkt des Wassers bei einem Bar Überdruck zunutze, um Endosporen direkt abzutöten. Nach diesem Prinzip funktionieren z. B. auch Schnellkochtopfe.

Die Endosporenbildung von *B. subtilis* ist Teil eines komplexen Überlebensprogrammes

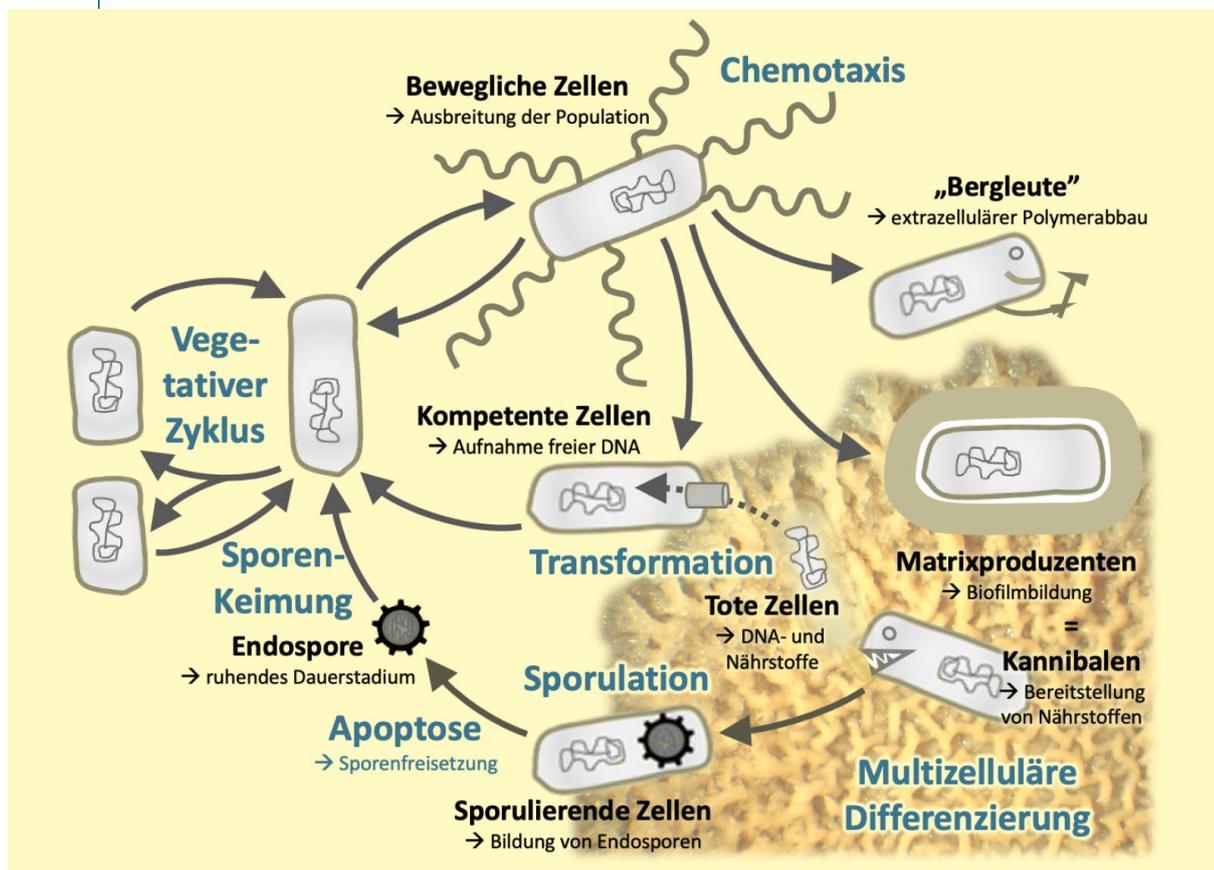
Das Meiste, was wir heute über die Eigenschaften und Bildung von Endosporen wissen, basiert auf jahrzehntelangen, detaillierten Untersuchungen von *B. subtilis*, trifft aber – mit wenigen individuellen Abweichungen – auch auf die meisten anderen oben erwähnten Organismen zu. In allen Fällen ist die Endosporenbildung eine Überlebensstrategie, die erst nach längeren Hungerphasen initiiert wird. Der der Sporulation zugrundeliegende Entscheidungsfindungsprozess wird dabei von einer komplexen biochemischen Schaltzentrale koordiniert [7]. Dieses System ist in der Lage, die Gesamtsituationsituation anhand der Verarbeitung und Integration einer ganzen Reihe von

Schlüsselreizen „abzuwägen“ und so die richtige Überlebensstrategie zu finden (Abbildung 3). Zunächst versucht *B. subtilis* sich durch Ausbildung eines auf Flagellen beruhenden Bewegungsapparates mittels gerichteter Bewegung (Chemotaxis) neue nährstoffreichere Lebensräume zu erschließen oder durch Ausschleusung von Polymerabbauenden Enzymen komplexere Nährstoffe wie z. B. Stärke, Proteine oder selbst DNA extrazellulär aufzuschließen, um die so entstandenen transportfähigen Bruchstücke in die Zelle aufzunehmen und zu verstoffwechseln (siehe unten). Erst wenn all diese Strategien nicht ausreichen, um das Überleben der Zelle sicherzustellen, initiiert *B. subtilis* die Differenzierungskaskade, die letztlich zur Bildung von Endosporen führt (Abbildung 2b). Dabei ist deren Bildung alles andere als erwünscht. Der eigentliche Differenzierungsprozess der Sporenbildung ist – einmal aktiviert – unumkehrbar und kostet sehr viel Energie und Zeit. Und ist die Spore – unter Opferung der sie bildenden Mutterzelle – erst einmal freigesetzt, dauert es selbst unter günstigsten Umständen lange, bevor sie auskeimen und so eine neue Zelle bilden kann. In dieser Zeit – ein bis zwei Tage im besten Falle – vermag der Organismus sich nicht zu vermehren. Eine sporulierende Zelle wäre also bei sich plötzlich verbessernden Umweltbedingungen nicht in der

Lage, adäquat durch Zellteilung und Vermehrung darauf zu reagieren und würde von den darum liegenden Zellen rasch überwachsen. Es ist also für *B. subtilis* überlebenswichtig, sich „reiflich zu überlegen“, ob die Sporenbildung wirklich ausgelöst werden soll! Wie sehr dieser Organismus versucht, die Sporenbildung zu vermeiden, zeigt sich z. B. daran, dass *B. subtilis* lieber einen Teil der eigenen Population mittels selbst produzierter Peptidtoxine opfert, als die Sporulation zu initiieren. Bei diesem als Kannibalismus bezeichneten Prozess nutzen die toxinproduzierenden „Kannibalen“ also die Nährstoffe der geopferteten Zellen für das eigene Überleben – um somit die Sporulation hinauszuzögern oder gar zu verhindern [8]. Sporulation ist also wirklich die allerletzte Überlebensstrategie, wenn nichts anderes mehr geht: „Last Exit Brooklyn!“.

Ursprünglich wurde die Endosporenbildung an Einzelzellen untersucht [9, 10]. Sie lässt sich im Labor in entsprechenden Hungermedien in den allermeisten Zellen einer Population auslösen. Ist die Entscheidung zu sporulieren erst einmal gefallen, ändert sich die Morphologie der Zelle dramatisch (Abbildung 2b). Anstelle der mittigen Zellteilung, wie man sie bei Bakterien normalerweise antrifft, erfolgt zu Beginn des Sporulationszyklus

ABB. 3 | DIFFERENZIERUNG UND MULTIZELLULARITÄT BEI *B. SUBTILIS*



Die einzelnen Zelltypen sind grau dargestellt und mit schwarzer Schrift benannt. Die physiologischen Prozesse, an denen sie beteiligt sind, sind mit blauer Schrift hervorgehoben.

eine asymmetrische Septierung, die zur Bildung einer größeren Mutterzelle sowie einer deutlich kleineren Vorspore führt. In einem an die Phagozytose erinnernden Prozess umfließt die Mutterzelle die Vorspore, wodurch letztere von zwei Membranen umschlossen in den Körper der Mutterzelle eingeschlossen wird. Nun beginnt die eigentliche Sporenreifung, in deren Zuge von der Mutterzelle in den Raum zwischen den beiden Membranen Schicht um Schicht die komplexe Proteinhülle auf die Vorspore aufgelagert wird. Gleichzeitig wird das Innere der Vorspore komplett umstrukturiert. Der Wassergehalt wird drastisch reduziert und das Sporenninnere durch einen Komplex von Calciumionen und Dipicolinsäure sowie DNA-bindenden Proteinen aufgefüllt, die zusammen die DNA in einem parakristallinen Käfig einschließen und so langfristig schützen. Ist die Spore fertig gereift, initiiert die Mutterzelle ihren programmierten Zelltod durch Lyse und entlässt die Endospore in das umgebende Medium (Abbildung 2b). Die freigesetzte Spore kann nun lange Zeiträume selbst unter widrigen Umständen ruhend überdauern, um beim Auftreten geeigneter Bedingungen in wenigen Stunden wieder zu einer vegetativen Zelle auszukeimen.

Die Endosporenbildung ist eingebettet in das multizelluläre Leben von *B. subtilis*

B. subtilis ist nicht nur für die Untersuchung der Sporenbildung bedeutsam. In den letzten Jahren wurde er auch zu dem Modellorganismus des Studiums der „phänotypischen Heterogenität“ bakterieller Populationen. Und auch hier nimmt die Endosporenbildung wieder einen Platz in der ersten Reihe ein.

Einer der großen Vorteile der Arbeit mit Bakterien ist die Möglichkeit, „klonale“ (oder isogene) Populationen herzustellen. Jede der vielen Millionen Zellen in einer Bakterienkolonie oder einer Flüssigkultur in einem Reagenzglas besitzt – bei konsequenter Einhaltung der klassischen mikrobiologischen Arbeitstechniken – die *exakt* gleiche Erbinformation, wenn nicht gerade ein starker Selektionsdruck die Ausbreitung spontaner Mutationen begünstigt. Mit dem Aufkommen hochauflösender fluoreszenzmikroskopischer Methoden und der direkten Kultivierung bakterieller Kleinstpopulationen (sogenannter Mikrokolonien) unter dem Mikroskop wurde es möglich, die Ausprägung verschiedener Überlebensstrategien unter Zuhilfenahme von fluoreszenzmarkierten Reporterstämmen von *B. subtilis* direkt während des Wachstums auf Einzelzellebene zu untersuchen (Abbildung 4c). Dabei zeigte sich, dass in einer genotypisch identischen Population zeitgleich mehrere unterschiedliche Überlebensstrategien phänotypisch ausgeprägt werden können [11]. Gerade in sich schnell verändernden Lebensräumen ermöglicht diese auf Ebene der Genexpression kontrollierte Diversifizierung einer Population „auf Nummer sicher zu gehen“ (engl. *bet hedging*). Der Ansatz ist mit der Anlagestrategie von Aktienfonds vergleichbar, bei denen das Ri-

siko plötzlicher Verluste einzelner Wertpapiere bei breiter Streuung über verschiedene Aktien durch gleichzeitige Gewinne anderer Anlagen minimiert werden kann. Bei der phänotypischen Heterogenität handelt es sich also um eine biologische Risikominimierungsstrategie, da die Gesamtpopulation auf mehrere verschiedene Überlebensszenarien gleichzeitig vorbereitet ist. Ein Teil mag dabei das Nachsehen haben, da er „auf das falsche Pferd gesetzt hat“, während ein anderer aber bestens auf die jeweilige Situation vorbereitet ist.

Neben der Risikominimierung ist eine zweite evolutionäre Triebfeder der Entstehung phänotypischer Heterogenität die Bereitstellung nützlicher Eigenschaften für die gesamte Population durch lediglich eine kleine Subpopulation. Diese Strategie hat den unschätzbaren Vorteil, dass hierdurch nur ein Teil der Zellen die für die Bereitstellung der Eigenschaft benötigte Energie aufwenden muss, während die Gesamtpopulation davon profitieren kann (Arbeitsteilung, engl. *division of labour*).

Im Falle der Differenzierung von *B. subtilis* sind beide Strategien gleich mehrfach verwirklicht [12]. Gerade bei den beiden fundamentalen, sich gegenseitig ausschließenden Überlebensstrategien ist hierbei das Prinzip der Risikominimierung klar verwirklicht: Sowohl die genetische Kompetenz, die zur DNA-Aufnahme befähigt, als auch die Endosporenbildung sind sehr energieaufwendige Überlebensstrategien, die nur unter bestimmten Umständen wirklich sinnvoll sind. Ohne frei vorliegende DNA im umgebenen Medium ist die genetische Kompetenz nutzlos. Und sollten sich während der Sporenbildung die Umgebungsbedingungen deutlich verbessern, haben alle sporulierenden Zellen, die in diesem Moment nicht mehr auf die sich verbessernden Bedingungen reagieren können, das Nachsehen und werden von anderen Gruppen der eigenen Art überwachsen. Bei Anwesenheit von DNA oder sich stetig verschlechternden Bedingungen haben wiederum die kompetenten bzw. sporulierenden Zellen einen klaren Überlebensvorteil, während andere Zellen potenziell sterben müssen. Entsprechend wird jede der beiden Strategien nur von einer gewissen Subpopulation verfolgt.

Neben diesen Strategien der Risikominimierung gibt es bei *B. subtilis* aber auch Subpopulationen, die eine für die Gesamtpopulation nützliche Funktion bereitstellen, um so den Energieaufwand für die Allgemeinheit zu minimieren. So werden z. B. Stärke- oder Eiweiß-abbauende Enzyme lediglich von einer kleinen Gruppe der Population produziert und nach außen geschleust, wo sie diese großen, unverdaulichen Polymere in kleine transportierbare Nahrungsbruchstücke zerlegen. Diese stehen dann allen Zellen zur Verfügung und helfen somit der gesamten Population.

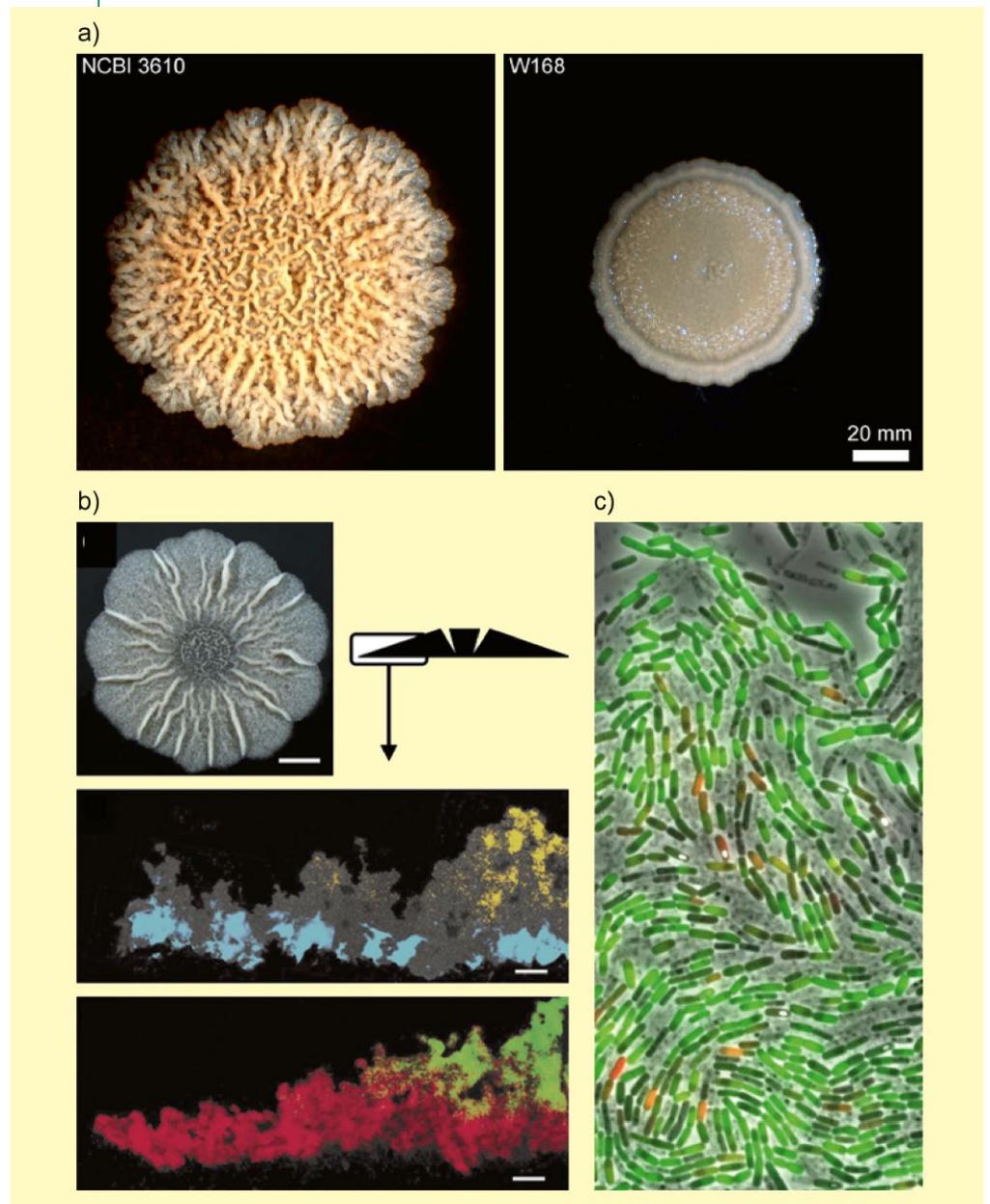
Die phänotypische Diversifizierung ist ein Prozess, der für die einzelne Zelle durchaus ernsthafte, zum Teil tödliche Konsequenzen haben kann, während er für die Gesamtpopulation von unschätzbarem Vorteil für das Überleben unter sich ständig verändernden Umweltbedingun-

gen ist. Aus evolutionärer Sicht handelt es sich also um eine auf Ebene der Gesamtpopulation selektierende Strategie. Diese Erkenntnis hat – gerade auch bei *B. subtilis* – die bakterielle Vielzelligkeit in den Fokus der Forschung gerückt. Denn eigentlich sind diese multizellulären Eigenschaften von *B. subtilis* eine Wiederentdeckung, zeigen doch bereits die Zeichnungen von Ferdinand Cohn (Abbildung 1) sich zusammenlagernde, koordinierende Zellen – lange bevor man die mechanistischen Ursachen molekularbiologisch untersuchen konnte. Tatsächlich musste man aber Anfang des 21. Jahrhunderts quasi zum Ursprungsisolat aus der Mitte des 19. Jahrhunderts zurückkehren, um einen direkten Vorfahren des heutigen *B. subtilis*-Typstammes in Händen zu halten, der diese multizellulären Eigenschaften noch ausprägt. Die klassische mikrobiologische Praxis führt nämlich mit den Jahren und Jahrzehnten des sukzessiven Propagierens der Bakterienkulturen unter den immergleichen optimierten – aber eben auch artifizellen – Laborbedingungen zu einer Domestizierung der Bakterien. Komplexere „Verhaltensweisen“ gehen durch den mangelnden Selektionsdruck letztlich verloren. Schneller wachsende spontane Mutanten beginnen sich zunehmend durchzusetzen, so dass die meisten „Referenzstämme“ im Labor ihre multizellulären Eigenschaften eingebüßt haben, wie man sehr leicht am Erscheinungsbild der Kolonien von *B. subtilis* auf Agarplatten sehen kann (Abbildung 4a).

Seit seiner Wiederentdeckung haben Untersuchungen des nichtdomestizierten *B. subtilis*-Stammes eine enge Verzahnung der verschiedenen Überlebens- und Differenzierungsstrategien mit dessen multizellulären Eigenschaften aufgezeigt [13]. Auch konnte in diesem Zusammenhang eine Reihe von Eigenschaften neu beschrieben werden, die der domestizierte Laborstamm gänzlich verloren hatte. Für die Ausbreitung der Population – und damit die deutlich größeren Kolonien – spielt sowohl die Produktion eines oberflächenaktiven Gleitmittels, des Surfactins, eine wichtige Rolle als auch die Fähigkeit von *B. subtilis*, sich auf dieser reibungswiderstandsfähigen Ober-

fläche mittels Schwärmen von koordinierten Zellverbänden weiter nach außen zu bewegen. Im Innern wird die Kolonie – wie jeder andere bakterielle Biofilm auch – durch eine Matrix zusammengehalten, die von den Zellen selbst gebildet wird. Diese besteht u. a. aus Zuckerpolymeren (Exopolysacchariden) und Strukturproteinen, die

ABB. 4 | DOMESTIZIERUNG UND PHÄNOTYPISCHE HETEROGENITÄT BEI *B. SUBTILIS*



a) Makroskopische Koloniemorphologie des nichtdomestizierten Wildtypisolats NCIB3610 sowie des von ihm direkt abgeleiteten Labortypstammes W168, der die Fähigkeit zur komplexen multizellulären Differenzierung verloren hat. b) Senkrechte Schnittpräparate durch Kolonien fluoreszenzmarkierter Reporterstämme von *B. subtilis*, in denen jeweils einer der in Abb. 3 genannten Zelltypen farblich hervorgehoben ist. Klar erkennt man die Strukturierung der Kolonien. Blau = bewegliche Zellen, gelborange und grün = sporulierende Zellen, rot = Matrix-produzierende Zellen. c) Mikrokolonien von dual fluoreszenzmarkierten *B. subtilis*-Stämmen. Zellen, die Kannibalismus-toxine produzieren, leuchten grün, während die toxingestressten Zellen rotorange erscheinen. Auffällig ist die große Zahl von toten „Geisterzellen“ die als graue „Schatten“ erkennbar sind. Abb. 4b wurde entnommen aus [14].

amyloidartige Fasern bilden. Dieses stabile, gelartige Konglomerat bettet nicht nur die Zellen ein und bietet Schutz vor schädlichen Umwelteinflüssen, sondern ermöglicht auch die komplexe Strukturierung der Kolonie. In dieser werden die einzelnen Überlebensstrategien klar räumlich-zeitlich strukturiert ausgebildet (Abbildung 4b). So werden die Endosporen präferentiell in kleinen, zungenförmigen und als Fruchtkörper bezeichneten Strukturen an der Oberfläche der Kolonien gebildet; bewegliche Zellen finden sich vor allem am Rand der Kolonie, während die extrazelluläre Matrix von tieferliegenden Zellen produziert wird [14]. Kolonien stellen somit hochstrukturierte, multizelluläre bakterielle Metropolen dar, in denen Zellen einer bestimmten Funktion räumlich-zeitlich koordinierte klare Bereiche zugewiesen sind. In diesen Regionen können sie ihre Aufgabe dann zum bestmöglichen Nutzen der Gemeinschaft erfüllen. Für das Verständnis dieser komplexen Zusammenhänge hat sich *B. subtilis* als ideales Modellsystem erwiesen.¹

Der biotechnologische Nutzen von Überlebensstrategien

Die komplexe Koordination der diversen Überlebensstrategien von *B. subtilis* ist aber nicht nur für das physiologische Verständnis dieses Modellbakteriums wichtig, es leiten sich davon auch konkrete biotechnologische Anwendungen ab, die erklären, warum *B. subtilis* eines der wichtigsten mikrobiellen „Arbeitspferde“ der biotechnologischen Industrie geworden ist (Abbildung 5).

Die Fähigkeit von *B. subtilis*, unter Hungerbedingungen extrazelluläre DNA aufnehmen zu können, hat neben der Erschließung alternativer Nährstoffquellen im natürlichen Lebensraum auch noch eine ganz andere, evolutionär weit relevantere Bedeutung. Bevor die verinnerlichte DNA-Stränge nämlich verdaut werden, prüft *B. subtilis* zunächst, ob er mit der darauf enthaltenen Erbinformation etwas anfangen kann. Dies kann z. B. der Gewinnung neuer genetischer Eigenschaften – wie z. B. Antibiotikaresistenzen – dienen oder aber der Reparatur von Schäden auf dem eigenen Chromosom. Diese als Transformation bezeichnete Aufnahme freier DNA aus der Umwelt ist einer der drei fundamentalen Mechanismen des horizontalen Gentransfers, also der Verbreitung genetischer Informationen zwischen Zellen – unzweifelhaft eine der wesentlichen Triebfedern der Evolution².

Die natürliche Transformierbarkeit von *B. subtilis* – also dessen Fähigkeit, fremde DNA mit hoher Effizienz aufzunehmen und auch in das eigene Erbgut einzubauen – erklärt aber auch dessen exzellente genetische Zugäng-

lichkeit und ist ein zentraler Grund, warum *B. subtilis* zu einem der am besten verstandenen Modellorganismen geworden ist [15]. Die genetische Werkzeugkiste, aus der sich Wissenschaftler und Biotechnologen bedienen können, ist gut etabliert und umfangreich. Sie ermöglicht selbst umfangreiche genetischen Veränderungen, z. B. für angewandte Zwecke (*metabolic engineering*), mit hoher Effizienz. Jahrzehnte der intensiven Nutzung und Erforschung haben zudem auch zu einem umfassenden Verständnis sowohl des Genoms als auch der Physiologie dieses Organismus geführt, die man sich in der Biotechnologie zunutze macht [3].

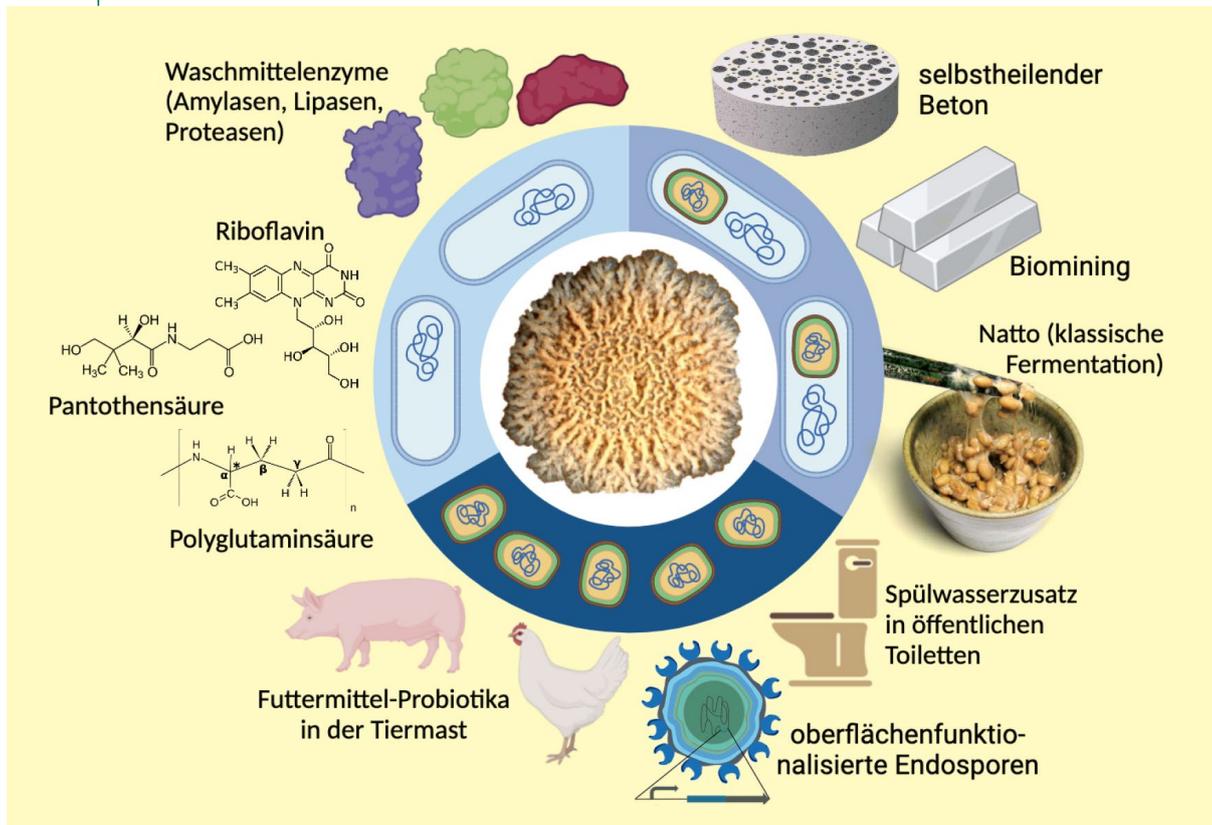
Eine der für die Anwendung herausragende, physiologisch hervorragend verstandene Eigenschaft, derer man sich biotechnologisch intensiv bedient, leitet sich von einer zweiten natürlich entstandenen Überlebensstrategie ab. Im natürlichen Lebensraum, dem Boden, sind leicht verstoffwechselbare Kohlenstoffquellen wie z. B. Glukose selten frei zugänglich. Stattdessen überwiegen komplexere Zuckerpolymerer wie Stärke (Amylose), Cellulose oder Glykogen. Diese großen Zuckermoleküle können allerdings nicht direkt von der Zelle aufgenommen werden. Stattdessen müssen sie (wie bereits oben erwähnt) zunächst außerhalb der Zelle in kleine, transportierbare Bruchstücke zerlegt werden. Dafür braucht es auf die jeweiligen Polymere spezialisierte Enzyme, die von der Zelle zunächst ausgeschleust werden müssen. Der zugehörige Prozess der Sekretion degradativer Enzyme ist eine wichtige Überlebensstrategie zur Mobilisierung nutzbarer Nährstoffressourcen aus der Umwelt. Voraussetzung hierfür ist ein hocheffizienter Sekretionsapparat, der die Proteine funktionsfähig nach außen transportiert. Hierfür haben sich im Zuge der Evolution eine Reihe universeller Wege herausgebildet, die Proteine grundsätzlich unabhängig von deren exakter Natur exportieren können. Und genau diese Wege macht man sich seit vielen Jahre zunutze, um verschiedenste Enzyme im großtechnischen Maßstab herzustellen [16]. Der Vorteil, sich hierfür des Sekretionsapparates zu bedienen, liegt auf der Hand: Proteine, die von ihrem Produzenten direkt in die Kulturbrühe abgegeben werden, lassen sich viel leichter gewinnen und aufreinigen. Auf diese Weise werden mithilfe von *B. subtilis* oder dem nahe verwandten Organismus, *B. licheniformis*, die in allen modernen Waschpulvern enthaltenen Waschmittelenzyme – Amylasen, Proteasen oder Lipasen – gewonnen. Zusammen mit der Anwendung polymer-spaltender (hydrolytischer) Enzyme in der Textil- und Nahrungsmittelindustrie belief sich der Gesamtmarktwert der so gewonnenen Enzyme im Jahr 2021 auf immerhin sechs Milliarden US-Dollar!

B. subtilis, das mikrobiologische „Schweizer Messer“ der Biotechnologie

Die biotechnologische Anwendung von *B. subtilis* erschöpft sich keineswegs in der (Aus)Nutzung der natürlicherweise vorhandenen Überlebensstrategien. Die her-

¹ Zum Konzept der bakteriellen Multizellularität, das gerade erst beginnt in der Mikrobiologie Einzug zu halten, wird es in einer der nächsten Ausgaben der *Biuz* einen gesonderten Artikel geben.

² Die beiden anderen Mechanismen horizontalen Gentransfers sind die Virenvermittelte Transduktion sowie die auf direktem Zell-Zell-Kontakt beruhende Konjugation. *B. subtilis* bedient sich hierbei aller dreier Mechanismen – sicherlich ein Grund für den großen Erfolg dieser Spezies.

ABB. 5 | ANWENDUNGSFELDER VON *B. SUBTILIS*


Bei der biotechnologischen Fermentation zur Gewinnung von Vitaminen oder sekretierten Waschmittelenzymen bedient man sich ausschließlich der Zellen in sog. Hochzelldichtefermentation (hellblauer Sektor). Präparierte Endosporen werden als Futtermittel- oder Spülwasserzusatz verwendet bzw. können gentechnologisch funktionalisiert werden (dunkelblauer Sektor). Für die Verwendung von *B. subtilis* zur Natto-Herstellung, beim Biomining sowie in selbstheilendem Beton spielt der gesamte Lebenszyklus eine Rolle (mittelblauer Sektor). Die Abbildung wurde mithilfe von biorender.com erzeugt, unter Verwendung von Abbildungen von wikipedia.com (Natto-Foto) und civilplants.com (Betonssymbol).

vorrangige genetische Zugänglichkeit, die Möglichkeit, *B. subtilis* auch im großtechnischen Maßstab auf kostengünstigen Substraten zu sehr hohen Zelldichten kultivieren zu können, sowie nicht zuletzt seine anerkannte Unbedenklichkeit – *B. subtilis* besitzt den für die Anwendung so wichtigen, sogenannten GRAS-Status (aus dem Englischen für *generally recognized as safe*) – machen diesen Mikroorganismus zu einem idealen Produktionswirt für eine ganze Reihe von Substanzen [17] (Abbildung 5).

Allem voran ist hier sicherlich die nachhaltige, biotechnologische Herstellung von Vitamin B₂ (Riboflavin) zu nennen, die die chemische Herstellung längst verdrängt hat und mit einem Produktionsvolumen von fast 13.000 Tonnen (2021) und einem Marktwert von 400 Millionen US-Dollar vor allem als Futtermittel- und Nahrungsmittelzusatzstoff eingesetzt wird. Die gleiche Anwendung findet das ebenfalls mithilfe von *B. subtilis* hergestellte Vitamin B₅ (Pantothensäure). Eine andere organische Verbindung, γ -Polyglutaminsäure, wird als Verdicker, Befeuchter oder Gefrierschutzmittel in der Nahrungsmittel- und Kosmetikindustrie eingesetzt.

Genau diese Substanz entsteht auch in großer Menge bei der Herstellung von Nattō, einem traditionellen japanischen Nahrungsmittel, das aus gekochten oder getrockneten Sojabohnen mithilfe von *B. subtilis ssp. natto* hergestellt wird. Während der Fermentation wird ein großer Teil des in der Sojabohne enthaltenen Proteins in γ -Polyglutaminsäure umgesetzt, wodurch zähe Schleimfäden um die Bohnen entstehen (Abbildung 5). Aber nicht nur der Anblick, sondern auch der strenge Ammoniakgeruch lassen den Verzehr dieses nachweislich gesundheitsförderlichen Nahrungsmittels zu einer echten Herausforderung für westliche Gaumen werden. Traditionell erfolgt die Herstellung von Nattō hierbei durch Einwickeln der weichen Sojabohnen in Reisstroh, wodurch darauf befindliche Endosporen von *B. subtilis* auskeimen und auf den Sojabohnen eine ideale Lebensgrundlage finden. Man sieht: Immer wieder landet man letztlich bei den Endosporen, die wirklich omnipräsent sind.

Deren Langlebigkeit und ungeheure Resistenz machen *B. subtilis* auch in einem ganz anderen Anwendungsbereich attraktiv, nämlich als sogenanntes „Probiotikum“. Laut WHO sind dies „lebende Mikroorganismen, die, wenn sie

in ausreichender Menge verabreicht werden, einen gesundheitlichen Nutzen für den Wirt erzielen“. Die bekanntesten Vertreter der probiotischen Bakterien findet man bei den Milchsäurebakterien, hier vor allem bei verschiedenen Arten von *Lactobacillus* (der Mikrobe des Jahres 2018), die z. B. in probiotischen Joghurts Anwendung finden. *B. subtilis* findet sich hingegen vor allem in Tierfutter als Probiotikum wieder, da dessen Endosporen sowohl die bei der Futterherstellung übliche Hitzebehandlung, als auch den extrem niedrigen pH-Wert der Magenpassage sowie der Gallenflüssigkeit im Dünndarm überleben. Im Darm hemmen auskeimende Zellen von *B. subtilis* dann mögliche Krankheitserreger, stärken die Darmbarriere und das Immunsystem. Spätestens seit dem kompletten, EU-weiten Verbot von Antibiotika zur Leistungsförderung in der Schweine- und Geflügelmast, spielt *B. subtilis* als Futtermittel-Probiotikum eine wichtige Rolle – mit einem geschätzten Marktwert von 2,7 Milliarden US-Dollar in 2021 [17].

Die ungeheure Vielseitigkeit der Anwendung von *B. subtilis* zeigt sich auch in den potenziellen zukünftigen Anwendungsfeldern, die sich gerade in der Erforschung befinden. So lassen sich manche Stämme von *B. subtilis* zur mikrobiellen „Selbstheilung“ von Beton einsetzen. Beton setzt sich aus Zement, Bindemitteln, Wasser und Gesteinskörnern zusammen. Gerade die Zementherstellung durch Brennen von Kalkstein trägt signifikant zur globalen Treibhausgasemission bei, weshalb eine möglichst lange Haltbarkeit von Betonkonstruktionen sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht wünschenswert ist. Bei der Alterung von Beton entstehen kleine Risse, durch die Wasser und Salzionen eindringen, wodurch wiederum die Stahlbewehrung korrodieren kann. Das Ziel der mikrobiellen Betonheilung ist das Schließen dieser feinen Risse, bevor es zu schwerwiegenden Schädigungen der Struktur kommen kann. Hierbei binden die negativ geladenen bakteriellen Zellwände auskeimender Sporen von *B. subtilis* in Betonrissen zunächst in Lösung vorhandene, positiv geladene Ca^{2+} -Ionen, die dann mit Carbonationen zur Bildung von unlöslichem kohlenstoffsaurem Kalk (Calciumcarbonat) führen, der z. B. kleine Risse im Beton zu schließen und somit dem natürlichen Alterungsprozess des Betons entgegenzuwirken vermag. Des Weiteren wird *B. subtilis* auch als mikrobielles Biostimulanz zur Stärkung des Pflanzenwachstums oder zum Binden und Extrahieren von Metallen aus armen Erzen (sog. *biomining*) eingesetzt. Endosporen wiederum werden dem Spülwasser in öffentlichen Toiletten beigesetzt, um durch Auskeimung und ihr schnelles Wachstum die Ausbreitung zumeist langsamer wachsender, krankheitserregender Keime zu unterdrücken. Und nicht zuletzt können die Endosporen selbst funktionalisiert werden, indem man z. B. enzymatische Aktivitäten an deren Proteinhülle koppelt [18]. Dergestalt modifizierte Sporen könnten als nachhaltig produzierte, biologische Partikel z. B. in Durchflussfiltern zur Abwasserreinigung eingesetzt werden, in denen die auf ihrer Oberfläche immobilisierten Enzyme

dann z. B. Hormon- oder Pharamzetika-Rückstände im Abwasser abbauen könnten.

So sind am Ende wieder die Endosporen das wirklich markanteste Merkmal der Mikrobe des Jahres 2023. Sie bescheren diesem Bakterium eine nahezu unzerstörbare Überdauerungsform, die sicherlich einen großen Anteil sowohl am Erfolg als auch an der weltweiten Verbreitung hat. Mit ihrer geringen Größe (die eiförmigen Gebilde sind nur zwischen 0,5-1 μm groß) werden sie leicht durch Wind und Wasser an jeden Ort der Welt transportiert. Und können dort so lange ausharren, bis die Umweltbedingungen ein Auskeimen und somit Wachstum ermöglichen – notfalls viele Millionen Jahre lang.

Zusammenfassung

Bacillus subtilis, die Mikrobe des Jahres 2023, ist ein stäbchenförmiges Bakterium, dessen markanteste Eigenschaft die Bildung äußerst robuster Dauerstadien, der Endosporen, ist. Diese widerstehen großer Hitze wie auch Austrocknung oder Strahlung und können viele Millionen Jahre keimfähig bleiben. Die Bildung der Endosporen ist eingebettet in ein komplexes Differenzierungsprogramm, das viele verschiedene Überlebensstrategien mit der multizellulären Lebensweise im Biofilm verbindet. Diese Vielfaltigkeit des mikrobiellen Lebens macht *B. subtilis* einzigartig. Aus ihr speisen sich aber auch wichtige biotechnologische Anwendungen wie z. B. die Produktion von Waschmittelenzymen oder der Zusatz von Endosporen als Probiotika in Tierfutter. Darüber hinaus wird *B. subtilis* auch zur Produktion von Vitaminen oder zur Selbstheilung von Beton eingesetzt. So vielfältig wie die natürlichen Lebensäußerungen dieser Mikrobe sind, so breit ist *B. subtilis* auch als universell einsetzbares „Arbeitstier“ der Biotechnologie zum Nutzen des Menschen aufgestellt. Aus all diesen Gründen ist dieses Bakterium zu Recht zur Mikrobe des Jahres 2023 gekürt worden.

Summary

So subtle, so potent, so omnipresent

Bacillus subtilis, Microbe of the Year 2023, is a rod-shaped bacterium the most striking characteristic of which is the formation of extremely robust survival stages, the endospores. They withstand extreme heat as well as dehydration and radiation and can remain viable for many millions of years. The formation of endospores is embedded in a complex differentiation program that combines many different survival strategies with the multicellular mode of life in biofilms. This diversity of microbial life makes *B. subtilis* unique. It also provides important biotechnological applications, such as the production of detergent enzymes or the addition of endospores as probiotics in animal feed. In addition, *B. subtilis* is also used for the production of vitamins or for the self-healing of concrete. *B. subtilis* is as diverse in its natural microbial life style expressions as is its universal applicability as a „workhorse“ of biotechnology for the benefit of mankind. For all of these reasons, this bacterium has rightly been selected Microbe of the Year 2023.

Schlagworte

Biotechnologie, Differenzierung, Mikrobiologie, Multizellularität, phänotypische Heterogenität, Sporulation

Literatur

- [1] J. Stülke et al. (2023). *Bacillus subtilis*, a swiss army knife in science and biotechnology. *Journal of Bacteriology* 205, e0010223.
- [2] F. Cohn (1877). Untersuchungen über Bakterien IV. Beiträge zur Biologie der Bacillen. *Beiträge zur Biologie der Pflanzen* 7, 249–276.
- [3] E. Bremer et al. (2023). A model industrial workhorse: *Bacillus subtilis* strain 168 and its genome after a quarter of a century. *Microbial Biotechnology* 16, 1203–1231.
- [4] P. Setlow, G. Christie (2023). New thoughts on an old topic: secrets of bacterial spore resistance slowly being revealed. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 87, e0008022.
- [5] R. J. Cano, M. K. Borucki (1995). Revival and identification of bacterial spores in 25- to 40-million-year-old Dominican amber. *Science* 268, 1060–1064.
- [6] R. H. Vreeland et al. (2000). Isolation of a 250 million-year-old halotolerant bacterium from a primary salt crystal. *Nature* 407, 897–900.
- [7] D. López, R. Kolter (2010). Extracellular signals that define distinct and coexisting cell fates in *Bacillus subtilis*. *FEMS Microbiological Reviews* 34, 134–149.
- [8] D. Wolf et al. (2017). Kannibalismus und Brudermord: Warum Bakterien Artgenossen töten. *BIOspektrum* 23, 260–263.
- [9] P. T. McKenney et al. (2013). The *Bacillus subtilis* endospore: assembly and functions of the multilayered coat. *Nature Reviews Microbiology* 11, 33–44.
- [10] K. Khanna et al. (2020). Shaping an endospore: architectural transformations during *Bacillus subtilis* sporulation. *Annual Reviews of Microbiology* 74, 361–386.
- [11] D. Dubnau, R. Losick. (2006). Bistability in bacteria. *Molecular Microbiology* 61, 564–572.
- [12] D. López et al. (2009). Generation of multiple cell types in *Bacillus subtilis*. *FEMS Microbiological Reviews* 33, 152–163.
- [13] S. Arnaouteli et al. (2021). *Bacillus subtilis* biofilm formation and social interactions. *Nature Reviews Microbiology* 19, 600–614.
- [14] H. Vlamakis et al. (2008). Control of cell fate by the formation of an architecturally complex bacterial community. *Genes and Development* 22, 945–953.
- [15] D. Dubnau, M. Blokesch (2019). Mechanisms of DNA uptake by naturally competent bacteria. *Annual Reviews of Genetics* 53, 217–237.
- [16] J. M. van Dijk, M. Hecker (2013). *Bacillus subtilis*: from soil bacterium to super-secreting cell factory. *Microbial Cell Factory* 12, 3.
- [17] A. Gruppen, S. Pelzer (2023). *Bacillus subtilis* – ein Multitalent der industriellen Biotechnologie. *BIOspektrum* 29, 14.
- [18] X. Zhang et al. (2020). Applications of *Bacillus subtilis* spores in biotechnology and advanced materials. *Applied and Environmental Microbiology* 86, e01096-20.

Verfasst von:



Thorsten Mascher, 1992–1997 Biologie-Studium an der Universität Kaiserslautern, dort 2001 Promotion. 2002-2003 Postdoc-Aufenthalt an der Cornell University, Ithaca, USA. 2004–2007 Nachwuchsgruppenleiter an der Georg-August-Universität Göttingen, 2008-2009 unabhängiger Forschungsgruppenleiter am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). 2009–2015 Professor für Synthetische Mikrobiologie an der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München, seit 2015 Professor für Allgemeine Mikrobiologie an der Technischen Universität Dresden.

Korrespondenz:

Prof. Dr. Thorsten Mascher
Technische Universität Dresden
Fakultät Biologie
Allgemeine Mikrobiologie
Zellescher Weg 20b
D-01217 Dresden
E-Mail: thorsten.mascher@tu-dresden.de

- **Du magst die „Biologie in unserer Zeit“ (BiuZ)?**
- **Du hast Spaß an biowissenschaftlichen Themen?**
- **Du bist kommunikativ und organisierst gerne?**

Bewirb Dich als studentisches Mitglied im Editorial Board der BiuZ!

Was kommt auf Dich zu?

- ➔ Du nimmst pro Jahr an zwei Treffen des BiuZ-Kuratoriums teil (davon eine Präsenzsitzung).
- ➔ Du beteiligst dich an der Themenfindung und bringst eigene Ideen ein.
- ➔ Zusammen mit anderen Studierenden koordinierst Du die studentischen Beiträge für die Ausgabe 3 – die besondere BiuZ zum Start des Wintersemesters.

Deine Bewerbung

...schickst Du bitte **bis zum 1. Februar 2025** an den Chief Editor der BiuZ, Prof. Dr. Wolfgang Nellen (w.nellen@biowisskomm.de). Deine Bewerbung sollte einen kurzen Lebenslauf und ein Motivationsschreiben enthalten. Überzeuge uns, warum wir Dich auswählen sollten. Vielleicht hast Du ja schon erste Ideen für die Weiterentwicklung der BiuZ?



Wie fachpraktische Abiturprüfungsaufgaben den Biologieunterricht verändern

Experimente im Aufschwung

MATHIAS TRAUSCHKE | STEFAN ZANTOP

Der Biologieunterricht spielt eine wesentliche Rolle bei der Förderung naturwissenschaftlicher Grundkenntnisse. Er soll ein rationales, auf Erkenntnissen und Methoden der Naturwissenschaften beruhendes Verständnis der Welt vermitteln. Dazu müssen sowohl fachspezifische Inhalte als auch die



Im Jahr 2006 wurden in Niedersachsen zentrale Abiturprüfungen eingeführt. Im Fach Biologie gab es seitdem ausschließlich materialgestützte, theoretisch ausgerichtete Prüfungsaufgaben. Das hat nach und nach dazu geführt, dass im Biologieunterricht der gymnasialen Oberstufe das fachpraktische Arbeiten zurückging und folglich Kompetenzen aus dem Bereich der Erkenntnisgewinnung nur untergeordnet Berücksichtigung fanden. Zwar wurden und werden Erkenntnisgewinnungskompetenzen durchweg im niedersächsischen Kerncurriculum aufgeführt, die landesweiten Erfahrungen zeigen aber, dass viele Lehr-

Denk- und Arbeitsweisen der Biologie im Unterricht und in Prüfungen berücksichtigt werden. Besondere Bedeutung kommt dabei dem naturwissenschaftlichen Erkenntnisweg zu, der das Entwerfen naturwissenschaftlicher Fragestellungen, das Erlernen der Hypothesenbildung, die Planung, Durchführung und Auswertung von Experimenten, die Fehleranalyse und das Modellieren umfasst. Diese Aspekte gerieten seit der Einführung zentraler Abiturprüfungen in Niedersachsen zunehmend aus dem Blick. Die Ergänzung der schriftlichen Abiturprüfungen um experimentelle Aufgaben trägt in Niedersachsen dazu bei, dass im Unterricht stärker auf den Erwerb von Erkenntnisgewinnungskompetenzen geachtet wird. Damit einhergehend offenbaren sich allerdings auch typische Kompetenzdefizite bei Lernenden beziehungsweise Fortbildungsbedarfe bei Lehrenden.

kräfte sich insbesondere durch Art und Inhalt der Abituraufgaben bei der Unterrichtsgestaltung leiten lassen. Überdies zeigen fachdidaktische Studien, dass im Biologieunterricht der Oberstufe grundsätzlich kaum fachtypische Arbeitstechniken angewendet werden [1], der Einsatz von Experimenten aber sowohl das Interesse [2] als auch den Lernzuwachs von Schülerinnen und Schülern positiv beeinflusst [3].

Im Zuge der zuvor dargestellten Entwicklung lernten niedersächsische Schülerinnen und Schüler wesentliche Aspekte der Kultur der Biologie als Naturwissenschaft nur

bedingt kennen. Das steht konträr zur pädagogisch-didaktischen Forderung, Biologieunterricht solle zur naturwissenschaftlichen Grundbildung (*Scientific Literacy*) beitragen [4] und Lernende dazu befähigen, die Sprache und die Geschichte der Naturwissenschaften zu verstehen, ihre Ergebnisse zu kommunizieren sowie sich mit ihren spezifischen fachgemäßen Denk- und Arbeitsweisen und deren Grenzen auseinanderzusetzen.

Die landesweiten Erfahrungen mit experimentell ausgerichteten Abituraufgaben in den Fächern Physik und Chemie zeigten, dass im Fachunterricht vermehrt fachtypische Arbeitsweisen Einzug hielten. Überdies verweisen Biologielehrkräfte aus den östlichen Bundesländern darauf, dass bei ihnen fachpraktische Prüfungen seit Langem etabliert und demzufolge experimentelle Arbeitsweisen im Unterricht ebenfalls fest verankert sind. So lag es nahe, dass mit der Aufnahme eines experimentellen Prüfungsanteils im Zentralabitur eine Zunahme der Nutzung fachspezifischer Arbeitsweisen im Biologieunterricht einherginge. Das Kultusministerium setzte daher eine Expertenkommission ein, um das Prüfungsformat auch im Fach Biologie entsprechend weiterzuentwickeln.

Fachpraktische Aufgaben im Abitur: Didaktische Umsetzung und erste Erfahrungen

Seit 2022 gibt es in Niedersachsen fachpraktische Aufgaben in der schriftlichen Abiturprüfung [5]. Im Folgenden sollen deren didaktische Konzeption und erste Erfahrungen aus den bisherigen Prüfungsdurchgängen vorgestellt werden.

Für die Gestaltung experimenteller Prüfungsaufgaben war zunächst die Frage zu klären, was unter Experimenten im schulischen Kontext verstanden werden soll. Gropengießer bezeichnet Experimente als Verfahren zum planmäßigen Testen von Hypothesen über Ursachen biologischer Phänomene [6] – eine kompakte Definition, die klar verdeutlicht, dass naturwissenschaftliche Untersuchungen grundsätzlich die Gewinnung neuer Erkenntnisse über biologische Phänomene verfolgen und in der Regel begründeten Vermutungen entspringen. Aus wissenschaftspropädeutischer Perspektive erscheint dies trivial. Gleichwohl findet sich in Unterrichtsmaterialien und auch im Biologieunterricht noch immer eine davon abweichende Vorstellung, nach der Experimentieren vorwiegend im Bearbeiten vorgefertigter, rezeptartiger Experimentieranweisungen besteht (Tabelle 1). Dabei gehen Lehrende – und folglich auch Lernende – davon aus, dass durch Experimente ein vorab bereits feststehender Effekt gezeigt werden soll. Schauble, Klopfer & Raghavan haben diese Sicht auf naturwissenschaftliches Arbeiten begrifflich als „Ingenieursmodus“ bezeichnet, weil in dieser Fachdisziplin häufig experimentiert wird, um ein Produkt zu optimieren, jedoch nicht, um kausale Beziehungen zu klären [7].

Wie in Tabelle 1 dargelegt, werden im Ingenieursmodus wesentliche Aspekte des fachgemäßen Denkens und Arbeitens nicht berücksichtigt. Beispielsweise wird für

Lernende nicht erkenntlich, mit welcher Absicht die einzelnen Ansätze des Experiments durchgeführt werden, da weder das experimentelle Design noch das Variablengefüge im Rahmen der Aufgabenstellung thematisiert werden. Insbesondere wegen ihrer Rückwirkung auf die Gestaltung von Biologieunterricht sollten sich experimentelle Prüfungsaufgaben daher am Naturwissenschaftsmodus orientieren (Tabelle 1). Dies führte zur didaktisch-logistischen Herausforderung, wissenschaftspropädeutische Aspekte in landesweiten Prüfungsaufgaben so abzubilden, dass auch unter Prüfungsbedingungen selbständig entwickelte Untersuchungen durchgeführt und ausgewertet werden können. Für fachpraktische Aufgaben auf erhöhtem Anforderungsniveau stehen dafür 90 Minuten zur Verfügung. Als Muster für die Entwicklung dieser Prüfungsaufgaben dienten die in den östlichen Bundesländern etablierten Aufgabenstellungen und in Erweiterung dazu die Erkenntnisgewinnungskompetenzen, wie sie in den Bildungsstandards im Fach Biologie für die Allgemeine Hochschulreife [8] beziehungsweise im Gemeinsamen Referenzrahmen für Naturwissenschaften des deutschen MNU-Verbands [9] aufgeführt werden. Die bisherigen Prüfungsaufgaben können im niedersächsischen Bildungsportal eingesehen werden. Ausgewählte Informationen zur didaktischen Konzeption der Aufgaben sind in Tabelle 2 dargestellt. Alle Aufgaben orientieren sich an der formalen Struktur der ab 2025 bundesweit geltenden Aufgaben im Zentralabitur Biologie [8]. Hinsichtlich des Anspruchsniveaus und der inhaltlichen Komplexität sind fachpraktische Aufgaben den rein materialgebundenen Aufgaben gleichwertig.

Die Erfahrungen aus den ersten drei Prüfungsdurchgängen zeigen, dass es Schülerinnen und Schülern unter Prüfungsbedingungen möglich ist, kompakte, selbst ge-

IN KÜRZE

- Die Einführung experimenteller Prüfungsaufgaben in Niedersachsen seit 2022 hat dazu geführt, dass **fachgemäße Denk- und Arbeitsweisen** im Biologieunterricht wieder an Bedeutung gewinnen.
- Erste Erfahrungen zeigen, dass Prüflinge in der Lage sind, **selbst geplante Experimente durchzuführen und fachlich kompetent auszuwerten**, jedoch gibt es noch Verbesserungsbedarf im Umgang mit Variablengefügen und der Identifikation von Experimentengrenzen.
- Lehrkräfte stehen vor **logistischen Herausforderungen bei der Dokumentation und Bewertung der fachpraktischen Prüfungsteile**, und es besteht Bedarf an Unterstützung für Lehrkräfte im Vorbereitungsdienst bei komplexen Experimentieranordnungen.
- Insgesamt wird der **Biologieunterricht durch die experimentellen Prüfungsbestandteile aufgewertet**, da die Kultur der Biologie nun vielschichtiger mit fachgemäßen Denk- und Arbeitsweisen abgebildet wird.

TAB 1. VORSTELLUNGEN ÜBER DAS EXPERIMENTIEREN IM BIOLOGIEUNTERRICHT

Modus	Ingenieursmodus	Naturwissenschaftsmodus
Absicht	Experimente dienen dem Erzeugen von gewünschten Phänomenen unter möglichst präziser Nutzung einer vorgegebenen Anleitung.	Experimente dienen dem planmäßigen Testen von Hypothesen über Ursachen.
Praktisches Beispiel	Gegebene Überschrift im Schulbuch: „Substratspezifität von Enzymen“ Befüllen Sie 4 Reagenzgläser (A–D) daumenbreit mit den angegebenen Mischungen: A: 2 mL Stärkelösung B: 2 mL Stärkelösung + 3 Tropfen Amylase-Lösung C: 2 mL Wasser + Filterpapierschnipsel aus Cellulose D: 2 mL Wasser + Filterpapierschnipsel aus Cellulose + 3 Tropfen Amylase-Lösung Warten Sie 2 bis 3 Minuten. Führen Sie dann in jedem Ansatz die Benedict-Probe zum Nachweis reduzierender Zucker durch.	Fragestellung: Können Stärke und Cellulose durch Amylase abgebaut werden? Hypothese: Durch die molekulare Ähnlichkeit passen beide Substratmoleküle in das aktive Zentrum der Amylase, so dass jeweils der Abbau möglich ist. Überprüfung: Planung eines Experiments unter Berücksichtigung des Variablengefüges. Auswertung und Deutung unter Widerlegung der Hypothese (Substratspezifität kann bestätigt werden).
Zugehörige Aufgabenstellung	Nennen Sie die Beobachtungen. Deuten Sie die Beobachtungen.	Stellen Sie eine zur Fragestellung passende Hypothese auf. Planen Sie ein Überprüfungsexperiment und führen Sie es durch. Stellen Sie die Ergebnisse dar. Deuten Sie die Ergebnisse im Hinblick auf Ihre Hypothese. Beurteilen Sie die Aussagekraft der ermittelten Daten.
Didaktische Intention	Experiment mit bestätigendem Charakter	Experiment zum Erlangen neuer Erkenntnisse

plante Experimente aus verschiedenen Inhaltsbereichen durchzuführen und so auszuwerten, dass fachliche Sachverhalte aufgeklärt werden können. Damit widerlegen die ersten Prüfungsdurchgänge die zuvor oft geäußerte Sorge von Lehrkräften, dass man im Fach Biologie grundsätzlich keine Prüfungsexperimente konstruieren könne. Vielmehr zeigte sich bereits im zweiten Prüfungsdurchgang, dass das Prüfungsformat gut angenommen wird. Zwar konnten nach Angabe des Kultusministeriums aufgrund der noch lückenhaften labortechnischen Ausstattung nur 56 Prozent der Schulen im Jahr 2023 fachpraktische Prüfungen anbieten. Allerdings wählten 41 Prozent der Prüflinge die fachpraktische Aufgabenstellung, sofern ihnen die entsprechenden Aufgaben vorgelegt wurden. Die Prüfungsleistungen wurden nicht vom Aufgabenformat beeinflusst: Der Notendurchschnitt der Prüfungen ohne beziehungsweise mit Experiment unterschied sich im untersuchten Prüfungsjahr nahezu nicht.

Für die beteiligten Lehrkräfte ergeben sich jedoch verschiedene Herausforderungen: Die Vorbereitung der Prüfung kann sich je nach Art des Experiments und Größe der Prüfungsgruppe als aufwendig erweisen. Manchmal müssen Experimentieranleitungen durch die Fachgruppen moduliert werden – etwa weil enzymhaltige Präparate

(Backmalz, Sojabohnen o. ä.) zwar leicht und preiswert erhältlich sind, aber mitunter produktionsbedingten Schwankungen unterliegen und daher im Detail individualisierte Experimentieranordnungen einfordern. Auch die Prüfung selbst erfordert eine deutlich aufwendigere Logistik, weil für die Durchführung vermehrt Fachlehrkräfte zur Aufsicht benötigt werden. An kleineren Schulen oder Schulen mit überdurchschnittlich vielen Prüflingen im Fach Biologie kann es zudem zu Problemen aufgrund fehlender Räumlichkeiten kommen. Diese Anforderungen führen einerseits zur mangelnden Akzeptanz bei vielen Biologielehrkräften. Gleichwohl lassen sich diese vorwiegend logistischen Herausforderungen unseren ersten Erfahrungen nach gut meistern. Problematischer ist es hingegen, die labortechnische Ausstattung kurzfristig den veränderten Bedingungen anzupassen. Aufgrund der zu meist geringen finanziellen Mittel monieren viele Fachgruppen, dass sie zwar laufende Kosten tragen können, größere Anschaffungen von Geräten und Chemikalien jedoch nicht mit dem verfügbaren Budget möglich seien. Dieser Sachverhalt wird die Erweiterung der Ausstattung an einigen Schulen verzögern. Gleichwohl ist es zahlreichen Schulen gelungen, die Schulträger unter Verweis auf die anzustrebende Abiturauglichkeit zu größeren In-

vestitionen zu bewegen und so ihre Sammlungen deutlich aufzustocken. Insgesamt ist also davon auszugehen, dass die Einführung der experimentellen Prüfungsanteile perspektivisch zur Optimierung der labortechnischen Ausstattung beitragen wird.

Anspruchsvoller ist hingegen die Frage der sachgerechten Bewertung fachpraktischer Prüfungsleistungen durch die jeweiligen Kurslehrkräfte. Lassen sich Planung und Auswertung kleinerer Prüfungsexperimente wie klassische, rein materialgestützte Aufgaben bewerten, entziehen sich Bildungsstandards wie das Anwenden von fachtypischen Arbeitsweisen beziehungsweise die sachgerechte Nutzung von Geräten unter Beachtung von Sicherheitsbestimmungen [8] in Teilen der Bewertbarkeit, denn: Die getesteten psychomotorischen Kompetenzen sind nur während der praktischen Tätigkeit selbst erfassbar, durch das Fehlen textlicher Äußerungen aber nicht mehr im Nachgang. Bisher hat das niedersächsische Kultusministerium aber die Auffassung vertreten, dass Prüfungsleistungen durch schriftliche und somit dauerhaft bestehende Äußerungen zu erbringen seien.

Es wäre folglich notwendig, das Vorgehen der Prüflinge künftig durch aufsichtführende Fachlehrkräfte kriterienbasiert zu erfassen und so zu dokumentieren, dass die Kurslehrkraft im Nachgang eine differenzierte Bewertung vornehmen kann. Dazu wurde in diesem Jahr in Niedersachsen erstmals der Einsatz eines Beobachtungsbogens pilotiert. Erste Rückmeldungen lassen auf eine grundsätzliche Eignung schließen – einzelne Kurslehrkräfte haben rückgemeldet, dass es möglich ist, anhand von knappen Kommentaren aufsichtführender Lehrkräfte nachträglich eine differenzierte Bewertung vorzunehmen. Gleichwohl wird es von den aufsichtführenden Lehrkräften als herausfordernd angesehen, bei mehreren gleichzeitig arbeitenden Prüflingen passgenaue und kompakte Kommentare zu formulieren.

Aufgrund der Prüfungsrelevanz werden fachgemäße Denk- und Arbeitsweisen wieder verstärkt im Biologieunterricht der gymnasialen Oberstufe berücksichtigt. Das lässt sich unter anderem aus den Fortbildungen der regionalen Netzwerke ableiten, bei denen entsprechende Fortbildungsbedarfe formuliert werden und experimentelle Inhalte folglich in den Mittelpunkt gerückt sind. Im Fokus stehen dabei jedoch eher die Gelingensbedingungen für die praktische Durchführung komplexer Experimente. Weniger im Blickpunkt steht hingegen die didaktische Funktion von Experimenten im Sinne des Naturwissenschaftsmodus (vgl. Tabelle 1). Eine besondere Herausforderung ergibt sich diesbezüglich vor allem für die sich im Referendariat befindlichen Lehrkräfte. Viele der an der Ausbildung beteiligten Lehrkräfte berichten von größeren Lernbedarfen, die Lehrkräfte im Vorbereitungsdienst bei der Anwendung fachtypischer Arbeitsweisen haben. Dieser Effekt sei vor allem dann zu beobachten, wenn neben Biologie kein weiteres naturwissenschaftliches Fach studiert wurde. Dahingehend eingeholte Rückmeldungen angehender Lehrkräfte untermauern, dass es in der universitären Ausbildung im Land Niedersachsen keine durchgehend präzise Passung zwischen den Studieninhalten und den beruflichen Anforderungen gibt und insbesondere wissenschaftspropädeutische Inhalte oft von untergeordneter Bedeutung sind, insbesondere – und diese Aussagen von angehenden Lehrkräften überraschen – im fachwissenschaftlichen Teil des Studiums.

Wissenschaftspropädeutische Entwicklungspotenziale

Wie bereits erwähnt, zeigen die Begutachtungen korrigierter Abiturklausuren, dass die Prüflinge durchweg in der Lage waren, die fachpraktischen Tätigkeiten sachgerecht und auf der Basis von zumeist zweckdienlichen Planungen durchzuführen. Die identifizierten Leistungen deckten das

TAB 2. BANDBREITE FACHTYPISCHER ARBEITSWEISEN UND KOMPETENZEN IN NIEDERSÄCHSISCHEN PRÜFUNGSAUFGABEN MIT FACHPRAKTISCHEN ANTEILEN SEIT 2022

Inhaltsbereich	Fachtypische Arbeitsweise	Angesteuerte Kompetenzen in Prüfungsaufgabe
Stoffwechsel	Nasschemische Bestimmung von Enzymaktivitäten	Planung, Durchführung und Auswertung eines Experiments zur Ermittlung der Enzymaktivität in Abhängigkeit von der Substratkonzentration; Identifizieren von Limitationen
Ökologie	Mikroskopische Untersuchung der Blattstruktur	Zeichnen von Blattstrukturen (Blattunterseite) und Erläutern von Anpasstheiten an abiotische Faktoren
Stoffwechsel	Modellierung von Stoffwechselvorgängen	Modellieren der Redoxreaktionen in der Atmungskette mithilfe des Blue-Bottle-Versuchs; Ableiten eines Redox-Schemas; Beurteilen der Aussagekraft der Modellierung
Evolution	Dünnschichtchromatografie	Prüfen von Stammbaumhypothesen durch Analyse von molekularen Homologien (Blattpigmente in grünen Pflanzen und Grünalgen)
Genetik und Evolution	Kolorimetrische Bestimmung von Stoffwechselreaktionen	Prüfen einer Hypothese über den Zusammenhang der Anzahl von Genen, der damit verbundenen Enzymaktivität sowie der resultierenden Selektionsvorteile

Notenspektrum von sehr gut bis ausreichend ab, mangelhafte Ergebnisse wurden bisher nicht beobachtet. Aus den bisherigen Abiturklausuren lassen sich jedoch auch typische Schwierigkeiten ableiten:

- **Planung von experimentellen Designs:** Vermehrt beschreiben Prüflinge rezeptartig die geplante praktische Handlung, indem sie einzelne Vorgehensschritte darlegen. Das führt zu unnötig langen und somit zeitaufwendigen Textpassagen, denen überdies die notwendigen Begründungen für die Wahl des experimentellen Designs fehlen. Bei der späteren Nutzung dieser Aufgaben im Kursunterricht stellten wir fest, dass das Einfordern einer Planung für Lernende dann erschwert ist, wenn sie das Experimentieren im Ingenieursmodus (Tabelle 1) begreifen und unter einem Experiment folglich eine Aneinanderreihung von Handlungsschritten verstehen.
- **Berücksichtigung des Variablengefüges:** Die in experimentellen Prüfungsteilen entwickelten Planungen zeigen wiederholt typische Schwierigkeiten im Umgang mit dem Variablengefüge. Den Prüflingen fehlt die Kompetenz, die Variablen fachsprachlich zu benennen. Auch werden Kontrollansätze und die zu kontrollierenden Variablen vernachlässigt. Die zu testenden Variablen werden in der Regel korrekt erfasst (ohne sie jedoch als solche zu bezeichnen); Probleme bereiten aber oftmals die zu messenden Variablen. Vor allem dann, wenn indirekte Verfahren zur Untersuchung der zu testenden Variablen genutzt werden (z. B. Farbumschläge von Indikatoren), kann der Zusammenhang zwischen den Variablen nicht immer sicher dargelegt werden.
- **Fehlerdiskussion:** Die Diskussion der Aussagekraft experimentell gewonnener Daten beziehungsweise eine fehleranalytische Betrachtung der Ergebnisse eigener Untersuchungen stellt für die Prüflinge eine Hürde dar. Obwohl diese Aspekte Bestandteil der curricularen Vorgaben sind, finden sich in den Prüfungsleistungen oft nur spärliche Ausführungen. Sie deuten darauf hin, dass diesen Schülerinnen und Schülern konkrete Kriterien für die kritische Analyse experimenteller Untersuchungen unbekannt sind.

Fazit und Ausblick

Die Ergänzung der schriftlichen Biologie-Abiturprüfung in Niedersachsen um experimentelle Aufgaben betont die Bedeutung der Erkenntnisgewinnungskompetenzen. Experimentell ausgerichtete Anteile nehmen im Biologieunterricht der Oberstufe seitdem zu. Lernende beschäftigen sich folglich vielfältiger mit der Kultur der Biologie. Die identifizierten Kompetenzdefizite werden sich nach unserer Ansicht perspektivisch auflösen, weil das mittlerweile neu eingeführte Kerncurriculum für die gymnasiale Oberstufe die fachgemäßen Denk- und Arbeitsweisen verstärkt abbildet und diesen unterrichtlich folglich mehr Bedeutung zukommen sollte. In den kommenden Jahren

werden die Ergebnisse experimentell ausgerichteter Abituraufgaben dennoch im Fokus der Evaluation stehen: Dazu werden die Landesfachberater/-innen und die regionalen Fortbildungsnetzwerke weitere Fortbildungs- und Unterstützungsbedarfe bei den Biologielehrkräften identifizieren, um das Fortbildungsangebot weiterentwickeln zu können. Die ersten Prüfungsdurchgänge legen bereits nahe, dabei einen Schwerpunkt auf die angemessene, pointierte Nutzung von Hypothesen im Biologieunterricht, den adäquaten Umgang mit dem Variablengefüge und vor allem den kritischen Umgang mit experimentellen Untersuchungen zu legen. Letzteres erscheint uns gerade aus medienpädagogischer Perspektive besonders angezeigt: In der medialen Darstellung gesellschaftspolitischer Diskurse dienen empirische Daten bekanntlich immer wieder als Belege für politisch motivierte Vorhaben. Doch dieser Wissenschaftsjournalismus erweist sich oft nur bedingt als *role model* für die seriöse Berichterstattung, wie Florian Aigner in seinem ORF-Podcast erläutert [10]: „Die Wissenschaft mag gesicherte Erkenntnisse liefern wollen, gibt dabei aber immer wieder die Restunsicherheit ihrer Befunde [...] zu bedenken. Massenmedien machen in der Aufbereitung daraus meist Schlaglichter und eindeutige Botschaften.“

Lernende sollten Wissenschaft aber nicht als unfehlbare und stets exakte, von Zweifeln befreite Disziplin kennenlernen. Die Fähigkeit zur kritischen Betrachtung von wissenschaftlichen Erkenntnissen ist aus unserer Sicht nicht nur ein Teil der zu erwerbenden Fachkompetenz, sondern auch ein wesentlicher Aspekt der in der KMK-Strategie zur Bildung in der digitalisierten Welt aufgeführten Kompetenz zur reflektierten Analyse von Äußerungen in digitalen Medien [11]. Sie kann und sollte unter anderem durch eigene Erfahrungen im Umgang mit experimentellen Projekten erworben werden.

Unserer Ansicht nach sollte außerdem erreicht werden, dass nach dem erfolgreichen Absolvieren eines universitären Lehramtsstudiums im Fach Biologie auch unabhängig von der Fächerkombination die notwendige Befähigung zum Planen und Durchführen von fachpraktisch ausgerichteten Lehr-/Lernsituationen erlangt werden, damit junge Lehrkräfte fachpraktische Arbeitsphasen im Unterricht nicht vermeiden. Daher sollten vor allem die fachwissenschaftlichen Studienangebote den Studierenden wissenschaftliche Primärerfahrungen ermöglichen, die dann im fachdidaktischen Studienteil aufbereitet und schließlich im Referendariat entsprechend erprobt werden können.

Aufgrund der geschilderten positiven Erfahrungen hoffen wir, dass sich weitere Bundesländer zur Erweiterung des Prüfungsformats bereit erklären, um so das Fach Biologie attraktiver und stärker an der Wissenschaftspropädeutik ausgerichtet zu gestalten. Ab 2025 wird dies erleichtert möglich sein, da das Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen (IQB) den Ländern im Rahmen der Abiturprüfungen moderne fachpraktische Aufgaben bereitstellen

wird, die angesichts der Bildungsstandards ganz sicher die vielseitigen Erkenntnisgewinnungskompetenzen aufzugreifen verstehen werden.

Zusammenfassung

Um wissenschaftspropädeutische Kompetenzen differenzierter in der Abiturprüfung anzuordnen zu können, sind experimentelle Aufgabenstellungen seit 2022 fester Bestandteil der Abiturklausuren im Fach Biologie. Unsere Beobachtungen zeigen, dass Schüler/-innen unter Prüfungsbedingungen selbst geplante Experimente sicher durchführen und deuten können. Gleichwohl zeichnen sich Entwicklungspotenziale zur Behebung von Defiziten bei der Berücksichtigung des Variablengefüges oder der Fehlerdiskussion ab. Für Lehrkräfte stellen das Identifizieren, Dokumentieren und Bewerten von praktischen Tätigkeiten in einer Prüfung zum einen eine logistische Herausforderung dar. Zum anderen geben vor allem jüngere Lehrkräfte an, im Studium nur unzureichend in die fachtypischen Arbeitsweisen eingeführt worden zu sein. Insgesamt trägt die Erweiterung des Prüfungsformats dazu bei, dass fachgemäßen Denk- und Arbeitsweisen wieder eine größere Bedeutung im Unterricht zukommt.

Summary

Experiments on the upswing – how practical examination tasks improve biology teaching

In order to be able to address scientific propaedeutic skills in a more differentiated way in the Abitur examination, experimental tasks have been a fixed component of the Abitur examinations in biology since 2022. Our observations show that students can confidently carry out and interpret self-planned experiments under examination conditions. Nevertheless, there is potential for development to remedy deficits in the consideration of the structure of variables or the discussion of errors. On the one hand, identifying, documenting and evaluating practical activities in an examination is a logistical challenge for teachers. On the other hand, younger teachers in particular state that they were insufficiently introduced to typical subject-specific working methods during their studies. On the whole, the expansion of the examination format helps to ensure that subject-specific ways of thinking and working will take on greater importance in lessons again.

Schlagworte

Experimente, Abiturprüfung, Erkenntnisgewinnung, fachtypische Denk- und Arbeitsweisen

Literatur

- [1] M. Gerhard, J. Wrede (2016). Mehr Zeit zum Experimentieren – Ein Vorschlag zur Konzeption einer Unterrichtseinheit „Enzymatik“ in der Oberstufe mittels des ICM. *Zeitschrift für Didaktik der Biologie (ZDB) – Biologie Lehren Und Lernen* 20(1), 82–91.
- [2] F. Karakaya et al. (2008). Context-based Biology Motivations of Secondary School Students. *Science Education International* 33(4), 376–382.
- [3] J. Wirth et al. (2008). Das Schülerexperiment im naturwissenschaftlichen Unterricht. Bedingungen der Lernförderlichkeit einer verbreiteten Lehrmethode aus instruktionspsychologischer Sicht. *Zeitschrift für Pädagogik* 54(3), 361–375.
- [4] U. Harms (2018). Kompetenzen im Biologieunterricht. In H. Gropengießer, U. Harms, U. Kattmann (Hrsg.). *Fachdidaktik Biologie*, Aulis Verlag, 11. Auflage, S. 48–50.
- [5] M. Trauschke (2019). Experimente in der schriftlichen Abiturprüfung im Fach Biologie in Niedersachsen. *SVBl Niedersachsen* 71(8), 389–444.
- [6] H. Gropengießer (2018). Experimentieren. In H. Gropengießer, U. Harms, U. Kattmann (Hrsg.). *Fachdidaktik Biologie*, Aulis Verlag, 11. Auflage, 284–292.
- [7] L. Schauble et al. (1991). Students' transition from an engineering model to a science model of experimentation. *Journal of Research in Science Teaching* 28(9), 859–882.
- [8] KMK (2020). *Bildungsstandards im Fach Biologie für die Allgemeine Hochschulreife*. Wolters Kluwer Deutschland GmbH.
- [9] B. Eisner et al. (2019). *Gemeinsamer Referenzrahmen für Naturwissenschaften (GeRRN). Mindeststandards für die auf Naturwissenschaften bezogene Bildung* (3. Auflage). Verlag Klaus Seeberger.
- [10] F. Aigner (2021). Wissenschaft in den Medien – Die Schwerkraft ist kein Bauchgefühl: <https://oe1.orf.at/programm/20210127/625491/Die-Schwerkraft-ist-kein-Bauchgefuehl>, abgerufen am 6.4.2024.
- [11] KMK (2016). *Bildung in der digitalen Welt. Strategie der KMK*. Sekretariat der KMK (Eigendruck).

Verfasst von:



Mathias Trauschke studierte Biologie und Chemie an der Freien Universität Berlin und der Leibniz Universität Hannover. Nach Referendariat und Tätigkeit als Gymnasiallehrer promovierte er in der biologiedidaktischen Forschung. Aktuell ist er Landesfachberater für Biologieunterricht an Gymnasien am Regionalen Landesamt für Schule und Bildung in Braunschweig.



Stefan Zantop studierte Biologie und Chemie an der Leibniz Universität Hannover und arbeitet als Gymnasiallehrer in Hannover. Aktuell ist er Landesfachberater für das Fach Biologie an Gymnasien am Regionalen Landesamt für Schule und Bildung in Hannover und ist Koordinator für das fachbezogene Netzwerk Biologie in Niedersachsen. Zudem ist er am Außerschulischen Lernort Zooschule Hannover tätig.

Korrespondenz

Dr. Mathias Trauschke
Scheffelfeld 17
30657 Hannover
E-Mail: mathias.trauschke@gmx.de

Wissensvermittlung als Herzensanliegen:

Udo Schumacher

(19. Oktober 1956 – 23. Juli 2024)



Foto: UKE.

Mit großer Bestürzung haben wir erfahren, dass am 23.07.2024 unser langjähriges Kuratoriumsmitglied Prof. Dr. Udo Schumacher plötzlich und unerwartet im Alter von 67 Jahren verstorben ist. Der Anatom Udo Schumacher gehörte dem Kuratorium (seit 2021 *Editorial Board*) der *Biologie in unserer Zeit* (BiuZ) seit 2014 an und stellte sich bereits im zweiten Heft dieses Jahres erstmals in einem Editorial vor. In den letzten zehn Jahren hat er seine medizinische

Expertise in die BiuZ eingebracht, viele Artikel mit medizinischem Hintergrund oder medizinischer Relevanz begutachtet, Artikel zu (bio-)medizinischen Themen eingeworben und wertvolle Themenvorschläge gemacht. 2016 hat er Aspekte seiner eigenen Forschung im Hauptartikel „Das Rätsel der Metastasierung“ vorgestellt (BiuZ 6/26, S. 350–356).

Herr Schumacher wurde am 19.10.1956 in Westerland auf Sylt geboren und begann 1975 ein Medizinstudium an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Im Jahr 1978 wechselte er an das Labor des späteren Nobelpreisträgers Peter Doherty am *Wistar Institute of Anatomy and Biology* in Philadelphia (USA). Zurück in Kiel erhielt er 1983 die Approbation als Arzt und habilitierte später im Fach Anatomie an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Von 1990–1997 konnte er als *Head of Human Morphology* an der Universität Southampton (UK) Tumormetastasen-Tier-Modelle und *in-vivo*-Modelle zur *Pseudomonas*-Infektion und deren antiadhäsiver Therapie entwickeln. Zurück in Deutschland wurde Schumacher 1997 Direktor des Instituts für Anatomie und Experimentelle Morphologie des Universitätsklinikums

Seine Liebe zur Anatomie und Histologie war im Kuratorium der BIUZ sehr evident und seine biomedizinische Expertise wurde allseits geschätzt. Er forderte eine Wissenschaftswelt, die mutig und einfallsreich forscht und in der Finanzierung nicht nur dem Mainstream folgt. Für ihn wurden im Universitätssystem junge Wissenschaftler/-innen zu sehr ausgenutzt. Und seine Kritik an Missständen in der Bürokratie konnte geradezu ätzend sein. Dazu zitierte er gerne einen Satz von Axel Brennicke: „Erst wenn das letzte Minütlein eines Forschers verbürokratisiert ist, werdet ihr merken, dass aus Formularen keine Resultate entspringen!“ Seine klare, analytische und kritische Art werden wir sehr vermissen.

Felicitas Pfeifer, Darmstadt (Editorial Board)

Udo Schumacher war als Mitglied des BiuZ-Kuratoriums immer für die Redaktion ansprechbar und übernahm ohne Zögern anfallende Aufgaben rund um Artikel aus seinem Fachbereich. Insbesondere in der nicht nur für die Zeitschrift, sondern auch für mich persönlich schwierigen und unsicheren Zeit des Herausgeberwechsels war er ein wichtiger und verlässlicher Ansprechpartner und Unterstützer. Seine wertschätzende und humorvolle Art wird mir sehr fehlen.

Larissa Tetsch, Maisach (Redaktion)

Aufgeschlossen und weltoffen, kenntnisreich und phantasievoll, sympathisch und kontaktfreudig und immer für die Belange der BIUZ interessiert, so wird mir Udo Schumacher aus vielen gemeinsamen Jahren im Kuratorium und Editorial Board der BIUZ in Erinnerung bleiben. Er gehörte zu den Menschen, die das Leben bereichern.

Erwin Beck (ehemals Kuratorium)

Hamburg-Eppendorf (UKE), wo er bis zu seiner Emeritierung im Jahr 2022 tätig war.

Nach der Emeritierung arbeitete er wissenschaftlich in zwei Start-ups weiter, deren Mitbegründer er war und die seine Ideen zu den großen Themen der Tumormetastasierung und der *Pseudomonas*-Infektion weiter in die Klinik bringen sollten. Um den für seine Forschung wichtigen Bezug zur Klinik und zur Medizin, nicht zu verlieren, nahm Schumacher eine Professur für Anatomie an der *Medical School* in Berlin an. Damit begann für den leidenschaftlichen Forscher und Hochschullehrer noch einmal ein ganz neuer Lebensabschnitt, wovon er mit viel Enthusiasmus bei einem Treffen des *Editorial Boards* der BiuZ berichtete.

Dank seines großen Wissens, das er gerne und großzügig weitergab, war Udo Schumacher bei seinen Mitarbeiter/-innen und Studenten sehr geachtet und beliebt. Im BiuZ-Kuratorium gehörte er nach der Beendigung der Zusammenarbeit mit dem Wiley-Verlag auch zu den Mitgliedern, die sich in besonderem Maße für den Fortbestand der Zeitschrift eingesetzt haben. Er hat sich intensiv an der Suche nach einem Herausgeber beteiligt und dafür Kontakte zu einem Verlag in München geknüpft.

Die BiuZ verliert mit Udo Schumacher viel zu früh ein engagiertes und konstruktiv-kritisches Kuratoriumsmitglied, dem die verständliche Vermittlung von Wissenschaft ein Herzensanliegen war.

Redaktion und Herausgeber der BiuZ

ORNITHOLOGIE

In Westeuropa wieder häufig



Der Weißstorch (*Ciconia ciconia*) zählt zu den ikonischen Brutvögeln Europas, den jedermann kennt, da er un-

verwechselbar ist und oft auf Gebäuden oder in Ortschaften brütet. Weißstörche waren früher sehr weit verbreitete und allgegenwärtige Sommervögel, die den Winter meist in Afrika südlich der Sahara verbringen. In den ersten sechs Jahrzehnten des letzten Jahrhunderts nahmen die Brutbestände in Mittel- und Westeuropa gravierend ab, so dass viele Naturschützer ein Aussterben des Weißstorchs befürchteten. Ursachen für die Rückgänge waren Habitatverluste, Rückgang der Nahrung (Frösche) sowie Verluste auf den Zugwegen und im Winterquartier. Durch gezielte Zucht- und Auswilderungsprogramme gelang es jedoch, die Art zu retten. Seit 30 Jahren sind die Weißstörche in Westeuropa wieder zurück und allgegenwärtig, während ihre Bestände in Osteuropa eher abnehmen. In der Schweiz leben aktuell über 800 Brutpaare, während es um das Jahr 1900 nur 200 Paare gab. Weißstörche haben offenbar auch ihre Nahrungspräferenzen umgestellt, denn heute zählen Regenwürmer, Mäuse und tote Tiere zur Hauptnahrung; der Weißstorch liebt auch Mülldeponien, auf denen er nach Nahrung sucht.

Lorenz Heer ist ausgebildeter Ornithologe und hat in diesem kompetent geschriebenen und hervorragend illustrierten Sachbuch viele wichtige Informationen über den Weißstorch zusammengetragen, die helfen, diese Art besser zu verstehen und schützen zu können. Wir erfahren Genaueres über die Bedeutung des Schnabelklapperns, die Mauser,

die Verbreitung in Europa und Afrika sowie die Bestandsentwicklung in den letzten 120 Jahren. Ein ausführliches Kapitel ist den Habitatansprüchen und dem Nahrungserwerb gewidmet. In den folgenden Kapiteln können wir Störche durch die gesamte Brutzeit begleiten: Wer weiß schon, dass spät geschlüpfte Jungvögel (Nesthäkchen) von ihren Eltern oder größeren Nestgeschwistern bei Nahrungsmangel umgebracht werden? Weißstörche gehören zu den Vogelarten, die schon seit langem mit Vogelwartenringen markiert werden, so dass man das Schicksal vieler Einzelvögel kennt. Durch Satellitentelemetrie und GPS-Sender haben Vogelkundler noch sehr viel mehr über die Mobilität der Weißstörche erfahren – so über das Flugverhalten in der Thermik, Raumnutzung, Habitatwahl und Gefährdung auf den Zugwegen und in Afrika. Gerade für den Laien enthält dieses Storchbuch reichhaltige und spannende Informationen. Es kann allen Vogelliehabern und Naturschützern nur wärmstens empfohlen werden.

Michael Wink, Heidelberg

Der Weißstorch.

Ein Zugvogel im Wandel. Lorenz Heer, Haupt-Verlag, Bern, 2024, 256 S., 48 Euro, ISBN 978-3-258-08354-4.

ALTERNSFORSCHUNG

Lebensuhr zurückdrehen



„Jeder möchte lange leben, aber niemand möchte alt sein“, stellte schon der englische Schriftsteller Jonathan Swift fest. Daran hat sich bis heute nichts geändert – mit dem Unterschied, dass neueste

Forschungsergebnisse uns vielleicht schon bald gesund altern und das Alt-Sein genießen lassen. Ulrich Bahnsen lädt uns in seinem Buch „Das Uhrwerk des Lebens“ ein, mit ihm die vielversprechendsten Entwicklungen der Altersforschung zu erkunden. Bahnsen – selbst promovierter Biologe und Wissenschaftsjournalist – weiß, wovon er spricht und erklärt das Thema gründlich und detailliert. Somit bietet sein Buch einen gut recherchierten und spannenden Überblick über die wichtigsten Entdeckungen der Altersforschung, die uns in Zukunft zusätzliche gesunde Lebensjahre ermöglichen könnten.

Bahnsen erläutert zunächst, warum wir überhaupt altern. Daran sind unter anderem die Telomere schuld, die die Enden unserer Chromosomen schützen und mit dem Alter immer kürzer werden. Auch erschöpft sich mit der Zeit der Vorrat an Stammzellen, wodurch unser Körper weniger effektiv regenerieren kann. Und dann spielen auch „Zombie-Zellen“ eine Rolle. Diese Zellen sind so stark geschädigt, dass sie sich nicht mehr teilen können. Stattdessen senden sie entzündungsfördernde Signale aus, die dem Körper schaden. Wenn Bahnsen diese Konzepte erklärt, lässt er immer wieder persönliche Geschichten der beteiligten Wissenschaftler/-innen einfließen, was die Forschung zugänglicher macht.

Das zentrale Element des Buches bildet die vom deutsch-amerikanischen Altersforscher Steve Horvath entwickelte „epigenetische Uhr“. Diese kann unser biologisches Alter objektiv und präzise bestimmen. Horvath nutzt dabei den Zusammenhang zwischen der Epigenetik und dem Alterungsprozess: Methylgruppen, die an die DNA angebracht und wieder entfernt werden können, steuern, wann bestimmte Gene an- oder abgeschaltet werden. Die Verteilung dieser Gruppen ändert sich auf eine typische Art und Weise, wenn wir altern. Bestimmt man diese Änderungen, so geben sie uns

Aufschluss, wie alt wir biologisch sind.

Die epigenetische Uhr misst aber nicht nur das biologische Alter von Zellen oder Geweben. Sie ermöglicht es auch, verjüngende Effekte von bestimmten Interventionen zu erkennen. Bahnsen stellt einige dieser Ansätze vor. So berichtet er von Molekülen im Blut junger Versuchstiere, die ältere Individuen gesünder machen und verjüngen konnten. Außerdem geht er auf die ersten klinischen Verjüngungsstudien an Menschen ein, die bereits zugelassene Medikamente daraufhin testen, ob mit ihnen das Altern verlangsamt, gestoppt oder sogar umgekehrt werden kann. Hierzu zählen beispielsweise das Diabetesmittel Metformin oder Rapamycin, das nach Transplantationen eingesetzt wird, um das Immunsystem zu unterdrücken und so Abstoßungsreaktionen zu verhindern. Auch erläutert der Autor, wie das Zurückversetzen von alten Zellen in einen Stammzell-ähnlichen Zustand – die „Reprogrammierung“ – in diesem Zusammenhang untersucht wird.

Trotz vielversprechender erster Ergebnisse aus diesen Studien, dürfte es jedoch noch dauern, bis eine Verjüngungstherapie in Pillenform verfügbar wird. „Altern ist in den Augen der Aufsichts- und Zulassungsbehörden keine Krankheit, sondern der natürliche Verlauf des Lebens“, so Bahnsen. Solange sich diese Einstellung nicht ändert, haben klinische Studien, die das Altern an sich und nicht eine der begleitenden altersbedingten Krankheiten untersuchen, hohe Hürden zu überwinden. Das, so Bahnsen, bedeutet letztlich, dass es deutlich schwieriger ist herauszufinden, welche Medikamente den Alterungsprozess positiv beeinflussen können.

Am Ende des Buches regt Bahnsen mit etwas überspitzten Gedankenexperimenten dazu an, sich mit den Konsequenzen einer Verlängerung des Lebens auseinanderzusetzen. Wäre eine Verjüngungskur nur den Reichen vorbehalten? Wäre es

uns moralisch untersagt, eine solche Therapie zu verweigern? Was bedeutet es für unsere Gesellschaft, wenn Menschen hundertfünfzig Jahre alt oder gar unsterblich würden? Und wie könnte sich eine solche Gesellschaft langfristig entwickeln?

Fazit: Das Buch gibt einen aktuellen Einblick in das noch junge Forschungsfeld der *gerosciences*, der Alternwissenschaften. Trotz tiefergehender Erläuterungen schafft es Bahnsen, den Leser nicht zu verlieren. Komplexe Themen veranschaulicht er in ihrer ganzen Breite in einer auch für Laien angemessenen Sprache. Doch auch Leser/-innen, die mit den Themen Epigenetik oder Altern schon vertraut sind, bietet dieses Buch einen kurzweiligen Ausflug in die Bedeutung der epigenetischen Uhr für die Forschung im Bereich gesundes Altern und Verjüngung.

*Vanessa Kellner und Ralf Dahm,
Mainz*

Das Uhrwerk des Lebens.

Wie die Medizin den Code des Alterns entschlüsselt. Ulrich Bahnsen, Quadriga Verlag, Köln, 2023, 240 S., 24 Euro, ISBN 978-3-86995-136-2.

INSEKTEN

Fundgrube für Kurioses



„In den Ökosystemen unseres Planeten spielen die Insekten eine entscheidende Rolle“, heißt es auf dem Klappentext des neuen Buches über diese

„Erfolgsmodelle der Evolution“ von BiuZ-Autor Jürgen Tautz und seinem Kollegen Werner Gnatzy. Insekten sind aber nicht nur wichtig als Bestäuber, als Destruenten, als Nahrung für Vögel und Wirbeltiere – sie

sind auch durch den Klimawandel und Rückgang ihrer Lebensräume stark bedroht. In der Öffentlichkeit werden die Wirbellosen jedoch immer noch oft zuerst als Schädlinge und unerwünschte „Krabbeltiere“ angesehen. Viel zu wenig sei über ihre Vielfalt, ihre Eigenschaften und ihre Ökosystemleistung bekannt, meint das Autorenduo Gnatzy & Tautz und möchte dies durch sein Sachbuch „Insekten – Erfolgsmodelle der Evolution“ ändern. Dabei ergänzen sich die beiden Professoren im Ruhestand sehr gut. Gnatzy ist Spezialist für die funktionelle Morphologie von Insekten, Tautz renommierter Bienenforscher. Beiden Autoren ist es ein besonderes Anliegen, Wissenschaft allgemeinverständlich zu präsentieren, was ihrem Insektenbuch zugute kommt.

Der Ansatz ist etwas ungewöhnlich: In den verschiedenen Kapiteln werden besondere Phänomene, Aspekte oder Eigenschaften der Tiergruppe in den Vordergrund gerückt wie die „Supersinne“ der Insekten, ihre Färbung, Partnersuche, Feindabwehr oder ihre Entwicklung vom Ei zum erwachsenen Insekt. In diesen Kapiteln werden dann in meist recht kurz gehaltenen Unterkapiteln jeweils einzelne Arten in Bezug auf den entsprechenden Aspekt vorgestellt. Durch diese Sammlung von vielen kleinen Geschichten eignet sich das Buch auch zum Durchblättern und Weiterlesen immer dort, wo der Blick und das Interesse gerade hängen bleiben.

Die Texte sind unterhaltsam geschrieben und tragen Zwischenüberschriften, die bewusst neugierig machen. Großformatige Fotos und rasterelektronenmikroskopische Abbildungen lockern den Fließtext zudem auf fast jeder Seite auf. Das Buch schließt mit einem sehr ausführlichen, nach Kapiteln sortierten Verzeichnis weiterführender Literatur.

Obwohl „Insekten – Erfolgsmodelle der Evolution“ aus einem Natur- und Artenschutzgedanken heraus entstanden ist, stehen im

Hauptteil tatsächlich die Insekten mit ihren faszinierenden Eigenschaften im Vordergrund. Erst im letzten Kapitel – dem „Nachruf“ – wird die Bedrohungslage der Insektenwelt thematisiert – und im Vorwort, das aus der Feder des Zoologen, renommierten Naturschützers und Biuz-Autors Josef Reichholf stammt. So kann sich das Insektenbuch ganz darauf konzentrieren, Begeisterung für diese vielseitige und spannende Tiergruppe zu wecken und sicher auch ausgewiesene Biolog/-innen hin und wieder in Erstaunen versetzen. Damit ist diese Fundgruppe an Kuriositäten – um Josef Reichholf sprechen zu lassen: „Wissenschaft vom Feinsten – geeignet für alle!“

Larissa Tetsch, Maisach

Insekten – Erfolgsmodelle der Evolution.

Faszinierend und bedroht, Werner Gnatzy, Jürgen Tautz, Springer-Verlag, Berlin, 2023, 271 S., 27,99 Euro, ISBN 978-3-662-66137-6.

KULTURGESCHICHTE

Pfeffer, Ingwer, Zimt und Co.



Pflanzen produzieren eine große Diversität an organischen Naturstoffen, die traditionell als Sekundärstoffe, zunehmend als Spezialmetabolite bezeichnet werden. Sie dienen der Abwehr von Pflanzenfressern und Mikroorganismen, aber auch als Signalsubstanzen zur Kommunikation zwischen Pflanzen sowie von Pflanzen mit Tieren (z. B. Bestäubern) und Mikroorganismen (z. B. Knöllchenbakterien).

Einige Pflanzen haben einen ausgeprägten Geschmack; sie können bitter, scharf, süß oder aromatisch schmecken. Auch wenn Tiere Pflanzen mit bitteren, scharf oder aromatisch schmeckenden Sekundärstoffen eher meiden, haben wir Menschen in unserer langen Tradition von Versuch und Irrtum herausgefunden, dass man viele dieser Pflanzen als Heilmittel gegen Krankheiten oder Infektionen einsetzen kann; dies ist das Thema der traditionellen Medizin. Eine wichtige Schlüsselinnovation in der Evolution des Menschen bestand in der Erfindung des Feuers und des Kochens. Durch Kochen konnte harte Nahrung aufgeweicht und essbar gemacht werden. Auch die in der Pflanze enthaltenen toxischen Sekundärstoffe konnten durch Hitze inaktiviert oder mit dem Kochwasser entfernt werden. Offenbar waren schon unsere Vorfahren jedoch Feinschmecker. Sie fanden heraus, dass man mit Gewürzen auch fad oder schlecht schmeckendes Essen interessanter machen konnte. Bei den Gewürzen wählten unsere Vorfahren solche Pflanzen, die bitter, aromatisch oder scharf schmeckten, gleichzeitig aber nicht toxisch wirkten. Wird ein Gericht aus Gulasch mit Hautgout mit ordentlich viel Chili versetzt, so schmeckt es vor allem scharf; andere (eher unerwünschte) Geschmacksrichtungen werden übertönt. Einige der Gewürze wirken zudem antimikrobiell und dürften mitgeholfen haben, die mikrobielle Kontamination der Speisen zu reduzieren.

Einige Gewürze, wie Pfeffer, Muskatnuss, Gewürznelken, Kardamom, Kurkuma oder Ingwer galten in Europa als besonders kostbare Gewürze; schon in der Antike wurden sie mit Karawanen oder über das Meer aus Indien, Sri Lanka oder den Molukken ins Mittelmeer transportiert. Um 1500 unternahmen die

Portugiesen Expeditionen nach Südostasien und die Spanier in die Neue Welt, um neue Handelswege für die wertvollen Gewürze zu erkunden. Bekanntlich waren diese Unternehmungen erfolgreich; die Eroberung der neuen Welt liefert den Spaniern nicht nur umfangreiche Goldschätze, sondern viele neue Gewürz- und Nahrungspflanzen, unter ihnen Chili, Vanille, Mais, Kartoffeln und Tabak.

Das vorliegende Sachbuch von Thomas Reinertsen Berg erschien original in norwegischer Sprache und wurde kompetent ins Deutsche übersetzt. Es beschreibt die Kulturgeschichte der wichtigsten Gewürzpflanzen Pfeffer, Muskatnuss, Gewürznelken, Kardamom, Kurkuma, Ingwer und Chili. In vielen Details erfährt der Leser, woher die Gewürze kommen, wie sie wirken, wie sie angebaut und auf welchen Wegen sie in alle Welt gehandelt wurden. Wir erfahren viel über die Bedeutung der Gewürze in der Antike und bei uns in den letzten 2000 Jahren. Es ist auch eine Geschichte des Gewürzhandels, von Krieg und Frieden, des Kolonialismus und der internationalen Handelskartelle. Das Buch ist sachkundig geschrieben und hat für jeden Leser neue spannende Informationen.

Thomas Reinertsen Berg hat mit diesem gut lesbaren und kompetenten Sachbuch eine spannende Kulturgeschichte vorgelegt, die man allen Lesern mit Interesse an Gewürzen, Kochen und Geschichte empfehlen kann.

Michael Wink, Heidelberg

Die Geschichte der Gewürze.

Genuss, Gier und Globalisierung. Thomas Reinertsen Berg, Haupt-Verlag, Bern, 2023, 360 S., 38,00 Euro, ISBN 978-3-258-08357-5.

PARTNER DES MENSCHEN

Der Pfeilschwanz: Mythos und Produkttester

Die urtümlichen Meeresbewohner eignen sich zwar nicht als Haustier, haben aber der Wissenschaft viele Einblicke in die Physiologie des Sehens und des Immunsystems geschenkt. Unabhängig davon faszinieren sie den Menschen aufgrund ihres bizarren Aussehens, das schon fast an Außerirdische erinnert.



ABB. 1 Pfeilschwänze kommen zur Eiablage auch an den Strand.
Foto: Plant Image library.

Der Atlantische Pfeilschwanz (*Limulus polyphemus*, Abbildung 1) begegnet dem Menschen eher selten, lebt er doch meist verborgen im schlammigen Meeresgrund an der nordamerikanischen Küste in bis zu 50 m Wassertiefe. In Aquarien wird er wie die meisten Arthropoden auch eher selten präsentiert, so dass seine Gestalt und seine Lebensweise geheimnisvoll wirken. Der zu den Spinnenverwandten gehörende Pfeilschwanz besitzt einen Vorder- und einen Hinterkörper, dem der schwertförmige Schwanzstachel anhängt. Dieser dient als Widerlager, wenn sich das Tier in den Schlamm (lat. *limus*) am Meeresboden eingrät, wo es Muscheln, Schnecken und Würmer zu finden gilt. Seine Beute ergreift der Pfeilschwanz mit seinen fünf Beinpaaren und den Kieferklauen, die sich unter einem schützenden Rückenpanzer verbergen. Der Hinterleib trägt auf der Unterseite fünf Paar Extremitäten – Blattbeine genannt –, die der Atmung und dem Schwimmen dienen.

Die Tiere können mit Schwanzstachel eine Länge von 85 cm und ein Gewicht von 5 kg erreichen. Sie werden mit etwa 10 Jahren geschlechtsreif. Das Weibchen legt bis zu 200–500 Eier in flache Mulden am Strand ab, die dann vom Männchen befruchtet werden. Danach wird die Sandmulde zugedeckt und von beiden Eltern bewacht, bis die etwa 1 cm großen Larven schlüpfen. Das Wachstum erfolgt in mehreren diskreten Schritten, die wie bei allen Arthropoden mit einer Häutung einhergehen (Abbildung 2). Dabei muss unter der alten Kutikula bereits eine neue angelegt werden: Diese Neuanlage betrifft zwangsweise auch alle Extremitäten, einschließlich der empfindlichen Blattbeine. Kein Wunder also, dass so eine Häutung sehr langsam vonstatten geht (1–2 Stunden bei mittelgroßen Exemplaren). Im Gegensatz zu echten Krebsen reißt der Panzer

aber nicht **hinter** dem Kopfbrustpanzer auf, sondern **an der Spitze** des Vorderkörpers. So schält sich der frisch gehäutete Pfeilschwanz nach vorne aus seinem zu klein gewordenen Panzer heraus, was ihn sehr verletzlich macht. Zu seinen Feinden zählen vor allem Tigerhai, Meeresschildkröten und Seevögel. Natürlich macht dem Pfeilschwanz die Meeresverschmutzung ebenso zu schaffen, wie die Grundschneppe, in denen er als Beifang landen kann. Wahrscheinlich kann *L. polyphemus* ein Alter von weit über 20 Jahren erreichen.

Von Odysseus und anderen Fantastereien

Die Geschichte der Pfeilschwänze lässt sich über 150 Millionen Jahre zurückverfolgen, während der sie sich kaum verändert haben, weshalb sie auch als lebende Fossilien gelten. Namenspathe für die atlantische Art *L. polyphemus* war der Sohn des Meeresherrn Poseidon, der nur ein Auge besaß. Odysseus begegnete diesem Zyklopen auf Sizilien und entkam ihm nur dank einer List – wie so oft war Alkohol im Spiel. Wie Polyphem besitzt auch der Pfeilschwanz ein sogenanntes Medianauge, das aber nur die Tageshelligkeit misst und zusammen mit den Gezeiten die Aktivität der Tiere beeinflusst.



ABB. 2 Bei der Häutung öffnet sich der alte Panzer auf der Vorderseite, so dass der Pfeilschwanz aus dem alten Maul zu klettern scheint. Foto: P. Eitner.

Da den Menschen die Lebensweise der Schwert tragenden Meeresbewohner unklar war, entstand der absurde Glaube, dass sie Schnecken und Muscheln mit ihrem Schwanzstachel durchbohren und zusätzlich die Fischvorkommen in Gefahr bringen könnten. So boten die Behörden im amerikanischen Cape Cod (Massachusetts) in den frühen 1920er Jahren 5 Cent für jeden toten Pfeilschwanz, der abgeliefert wurde, um die einheimischen Fischer zu unterstützen. Die zu tausenden getöteten Tiere wurden danach als Schweinefutter oder als Düngemittel auf den Feldern ausgebracht.

Garant für Produktsicherheit

In der Nähe von Cape Cod befand sich schon damals eine altehrwürdige Meeresbiologische Station, die *Woods Hole Oceanographic Institution*, die sich auch mit der Erforschung der Pfeilschwänze beschäftigte. Das hellblaue Blut der Tiere erwies sich als besonders nützlich

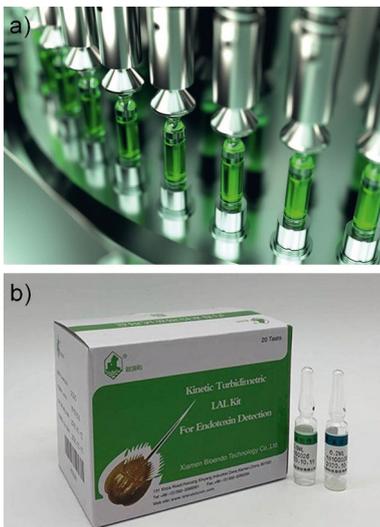


ABB. 3 Der rekombinante Faktor C zeigt Endotoxine über Fluoreszenz an (a) und wird bislang von zwei Unternehmen hergestellt. Das LAL-Testkit (b) dient zum Nachweis von bakteriellen Endotoxinen. Fotos: www.biomerieux.com.

für den Menschen. Es enthält einfache Immunzellen (Amöbozyten), die bei Anwesenheit von Bakterien eine Gerinnungsreaktion zeigen. Verantwortlich dafür ist ein Eiweiß der Amöbozyten namens Faktor C, das an bakterielle Endotoxine (Lipopolysaccharide) bindet und damit zur Verklumpung der Proben führt. Denn auch wenn krankheitserregende Bakterien durch Sterilisation von Medizinprodukten abgetötet werden, können ihre Endotoxine noch eine Gefahr für die menschliche Gesundheit darstellen. Mithilfe des sogenannten *Limulus*-Amöbozyten-Lysat-Tests (kurz LAL-Test, siehe auch *BiuZ* 4/22, S. 330) wurden seit den späten 1970er Jahren standardmäßig pharmazeutische Produkte auf das Vorhandensein von bakteriellen Kontaminationen überprüft – und das weltweit. Diese Art der Testung war schneller, einfacher, günstiger und aussagekräftiger als die bis dahin übliche Injektion der Proben in Versuchskaninchen mit anschließender Fieberkontrolle. Aus diesem Grund wurde der Rohstoff für den LAL-Test sehr wertvoll: Ein Liter *Limulus*-Blut erzielt Preise von bis zu 15.000 Euro. Die Gewinnung des Naturproduktes *Limulus*-Blut hat die Pfeilschwänze an den Rand der Ausrottung gebracht, wird ihnen doch durch unsanfte Punktion des Herzens etwa ein Drittel dieses Körpersaftes entnommen, bevor man sie wieder achtlos ins Meer wirft. Eine Sterblichkeit von 30 Prozent wird dabei in Kauf genommen.

Glücklicherweise kann die Biotechnologie in Zukunft zum Erhalt der Pfeilschwänze beitragen. Längst wurden Testalternativen entwickelt, die nur den rekombinanten Faktor C (rFC) enthalten und durch mikrobielle Expressionssysteme im großen Maßstab hergestellt werden (Abbildung 3). Durch den Wegfall der aufwändigen Isolierung des Proteins aus dem Körpersaft wird der LAL-Test nicht nur präziser und

PFEILSCHWANZ UND KINO

Kino und Fernsehen werden erst dadurch zum Erlebnis, dass die Einzelbilder zu einem kontinuierlichen Bild verschmelzen. Beim TV-Format beinhaltet dies 25 bis 30 Halbbilder pro Sekunde, beim Kino sind es meist 24 Bilder pro Sekunde. Untersucht wurde die sogenannte Flickerfusionsfrequenz in den 1970ern beim Pfeilschwanz. Aufgrund der Trägheit der Sinneszellen im urtümlichen Facettenauge (Abbildung 4) wird die zeitliche Auflösung von Lichtblitzen begrenzt. Folgen die Lichtblitze zu schnell aufeinander, können sie also nicht mehr getrennt wahrgenommen werden. Es entstehen „bewegte“ Bilder!

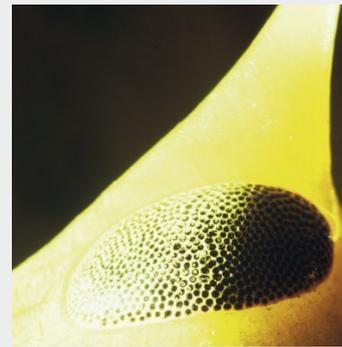


ABB. 4 Im Facettenauge der Pfeilschwänze sind die Ommatidien noch nicht so streng geordnet wie bei Insekten. Foto: P. Eitner.

leichter in der Anwendung, sondern auch sicherer, da keine unnötigen Bestandteile aus dem *Limulus*-Blut in den Endotoxintest mit einfließen.

Auch wenn der Pfeilschwanz vom Menschen lange Zeit missverstanden und ausgebeutet wurde, hat er jetzt möglicherweise die Chance sich davon zu erholen. Und sollten sie wieder vermehrt Tauchern oder Besuchern von Aquarien begegnen, überwiegt vielleicht die Faszination für diese urtümlichen Meeresbewohner.

Pascal Eitner, Maisach,
pascal-eitner@arcor.de

MIKROBEN VERSTEHEN

Wie alt werden Mikroben?

Die Frage klingt wie aus einem Kindermund – und sie ist wie manche vermeintlich einfache Frage doch nicht leicht zu beantworten. Die Schwierigkeit liegt tatsächlich darin, die Lebensdauer von Mikroben zu ermitteln. Eine bekannte Größe ist die Generationszeit, die Spanne zwischen zwei Zellteilungen, in der eine individuelle Zelle existiert. Diese Dauer kann aber je nach Umweltbedingungen erheblich schwanken. Außerdem vermehren sich Mikroben nicht beständig. Jene Zellen einer Population, die sich nicht mehr teilen, sondern letztlich sterben, haben eine eigene Lebenszeit.



ABB. 1 Sich teilendes Stäbchenbakterium aus dem Epilimnion eines Thermalsees.

Eine einfache Überlegung führt zu der Einsicht, dass für Prokaryoten mindestens zwei Altersbegrenzungen gelten. Wenn wir annehmen, dass die Zahl der Mikroorganismen auf der Erde um einen natürlichen – wenn auch kaum vorstellbar großen – Gleichgewichtswert schwankt, dann wird im Mittel eine

der zwei Tochterzellen, die aus einer Teilung hervorgehen (Abbildung 1), sich nicht weiter teilen, sondern früher oder später sterben. Neben der Generationszeit (G) sich vermehrender Mikroben gibt es also eine davon zu unterscheidende Lebenszeit nachkommensloser Individuen. (Die Zellschicksale ähneln den generativen Keimbahn- und vegetativen Körperzellen bei Eukaryoten.) Die individuelle Altersstruktur von Mikroben in natürlichen Habitaten ist jedoch experimentell und analytisch schwer zugänglich. Hier versucht man eher, die Langlebigkeit von Populationen zu erfassen – also wie lange Mikroben in einem abgrenzbaren Biotop existieren (replikative Lebenszeit). Mit der Rate des Stoffumsatzes im Biotop lässt sich dann eine mittlere Wachstumsrate (Kasten „Generations- und Verdopplungszeit“) der Mikroorganismen schätzen und auf ihre natürliche Lebenszeit rückschließen (G_{nat} , Tabelle 1) [1, 2].

Wie alt können Mikroben also werden, bis sie sich teilen?

Generationszeiten in Laborkulturen

Es ist weit verbreitetes Kenntnis, dass sich das Darmbakterium *E. coli* alle 20 Minuten teilt. Dieser Wert gilt für Laborkulturen und charakterisiert die annähernd kürzeste Generationszeit (Kasten „Generations- und Verdopplungszeit“) bei optimiertem Wachstum. Dabei ist *E. coli* nicht das schnelllebigste Bakterium; den Rekord hält *Vibrio natriegens*, ein harmloser Verwandter von *V. cholerae*, mit knapp 10 Minuten (Tabelle 1). Die minimale Generationszeit (G_{min}) kann als arttypische Eigenschaft gelten, aber sie ist keineswegs typisch für das Wachstum in natürlichen Habitaten, die selten optimale Lebensbedingungen bieten. Für einige Enterobakterien (G_{min} 20–40 Minuten) beobachtet man in natürlicher Umgebung eine etwa zwei- bis fünfzigfach längere Dauer [3].

Laborkulturen durchlaufen drei bekannte Entwicklungsphasen: die Start- (*lag*-), die exponentielle Wachstums- (*log*-) und die stationäre Phase, in der keine Zellzunahme mehr erfolgt. Langzeitstudien der Entwicklung ausgewachsener (volumenkonstant gehaltener) Flüssigkulturen mit *E. coli* zeigen zwei weitere Stadien: die Absterbephase, in der die Zellzahl abnimmt, bis sie in eine annähernd konstante Langzeit-Stationärphase übergeht, die über Jahre stabil

TAB 1. BEISPIELE FÜR GENERATIONSZEITEN VON MIKROBEN

Mikroben	G_{min} , kürzeste Generationszeit in Laborkulturen	G_{nat} , natürliche Generationszeit beobachtet oder geschätzt	Referenzen
<i>Vibrio natriegens</i> ¹	≤ 10 Min		[14, 15]
<i>Escherichia coli</i>	20 Min	15 h / ≈ 1 Tag	[3, 16]
<i>Pseudomonas sp.</i>	≈ 1,5 h	50 Tage ²	[4]
<i>Flavobacterium sp.</i>	≈ 5 h	75 Tage ²	[4]
<i>Bacillus subtilis</i>	20 Min	> 1800 Jahre (Sporen)	[17, 18]
<i>B. subtilis</i> ²		≈ 50 Tage ³ / ≈ 1,3 Jahre ⁴	[4, 7]
Sulfatreduzierer in Reinkultur	1 – 30 Tage		[1]
im Meeresboden		1 – 12 Monate	[1]
in tiefen Sedimenten		50 – 300 Jahre	[1]
Archaeen und Bakterien im bis zu 200 m tiefen Sediment		≈ 200 – 4000 Jahre	[10]

¹ vormals *Pseudomonas natriegens*, ² nicht sporulierende Mutanten $\Delta\text{spoIIIE} / \text{sigF}$, ³ Langzeit-Stationärphase, ⁴ extrem energie-limitierte Chemostatkultur

Der Autor hatte selbst eine geschlossene Kultur phototropher Bakterien (*Rhodospira rubra*) 20 Jahre mit noch lebenden Zellen im Bücherregal stehen, bis ein Umzug und Wechsel der Beleuchtung das dynamische Gleichgewicht zum Erliegen brachte.

bleibt. Sie enthält beständig einen geringen Anteil ($\leq 1\%$) lebender Bakterien, die abgestorbene Zellen als Ressource nutzen und einem dynamischen Wechsel unterliegen, wobei vorteilhafte Mutanten Vorgängervarianten innerhalb von 10 Tagen ersetzen können (Tabelle 1). Ein ähnliches Langzeitexperiment mit 21 verschiedenen aeroben Bakterienarten (hier auch pH-reguliert) bestätigt, dass die Mikroben allein durch Recycling abgestorbener Zellmasse deutlich energielimitiert, aber über sehr lange Zeit ohne externe Nährstoffzufuhr existieren können, bis die Populationen aussterben [4]. Die übereinstimmende Strategie der Bakterien ist es, die Sterberate zu reduzieren und ihre Generationszeit auszudehnen, die im Schnitt (und mit Ausnahme von *Bacillus*) um mindestens zwei Größenordnungen länger währt als in gut gefütterten Kultivierungen (Tabelle 1). Die potenzielle Überlebenszeit der Populationen erweist sich als ebenso art-eigen und liegt für die Bakterien des Experiments zwischen einem Jahr und 100 Jahren. Der Wert für *Bacillus* weicht mit $\approx 10^5$ Jahren deutlich ab, was auf die Bildung von Endosporen zurückgeht [4].

Generationszeiten in der Natur

Natürliche Populationen in extrem energielimitierten Ökosystemen, vor allem in den weitgehend isolierten Schichten des Ozeanbodens mit einem erheblichen Teil der globalen Mikrobenmasse, übertreffen die experimentellen Überlebenszeiten bei weitem. Die Mikroben siedeln hier wahrscheinlich seit Anbeginn der Sedimentbildung vor 10^4 Jahren in jüngerer Zeit bis vor 10^8 Jahren in den bis zu 2,5 Kilometer tief erforschten Schichten [1, 5, 6]. Die Zellen vermehren sich hier wesentlich langsamer und erreichen nur geringe Populationsdichten, denn bei minimalem Nährstoffangebot ist fast nur noch ein elementarer Erhaltungsstoffwechsel möglich und selten eine Teilung [7]. Auch im Sediment wird das Material abgestorbe-

ner Zellen recycelt; im Gegensatz zu Experimentalkulturen verläuft der Stoffumsatz jedoch viel langsamer [5]. Messungen des Sulfatumsatzes in Ozeansedimenten von Populationen sulfatreduzierender Mikroben lassen auf mittlere Generationszeiten von 100 Jahren und mehr schließen, während Sulfatreduzierer des aktuellen Meeresbodens Werte von einigen Monaten und in Reinkulturen von einigen Tagen erreichen (Tabelle 1). Mikroben in tiefen natürlichen, kohle- und schieferhaltigen Sedimenten haben ähnlich lange Generationszeiten [8]. Andere Proben überdauern sogar bis zu 1000 und mehr Jahren; wobei es bei geringem Stoffumsatz nicht klar ist, ob sich die Zellen auch alle teilen und deshalb mit noch längeren individuellen Lebenszeiten zu rechnen ist [9, 10]. Solche Untersuchungen liefern eher die Größenordnung von Generationszeiten und seltener exakte Werte – vor allem – wenn es sich um gemischte Populationen verschiedener Zusammensetzungen in den anaeroben Sedimenten des Kontinentalschelfs und der aeroben Schichten unter der oligotrophen Tiefsee handelt [1, 5, 10]. Die Stoffkreisläufe und Einzelzelluntersuchungen bieten aber zunehmend Einblicke in den Stoffwechsel der Archaeen und Bakterien in energielimitierten Habitaten [8, 11]. Die zellulären Mechanismen der erstaunlich hohen Lebenserwartung von (alternden) Mikroben lohnen jedenfalls eine weitere Betrachtung.

Abgesehen von der Langlebigkeit individueller Zellen entwickelten manche Mikroben physiologische Ruhe- und Dauerstadien ohne aktiven Stoffwechsel wie Sporen-enthaltende Cysten bei Myxobakterien, Konidien bei Pilzen und Akineten von Cyanobakterien, die Perioden ungünstiger Lebensbedingungen überstehen können [12]. Besonders resistent und dauerhaft sind bekanntlich die Endosporen der *Bacillaceae*. Durch deren „Dormröschenschlaf“ dehnt sich die Generationszeit der aus den Sporen hervorgehenden Zellen erheblich,

GENERATIONS- UND VERDOPPLUNGSZEIT

Die Generationszeit (G) ist die Zeitspanne (ab $t = 0$), in der eine Population mit ursprünglich N_0 Zellen die zweifache Zellzahl erreicht oder in der sich eine individuelle Mikrobe teilt, wobei $v = 1/G$ die Teilungsrate bezeichnet und $N_t = N_0 \cdot 2^{vt}$ ist.

Die Verdopplungszeit (D) ist die Zeitspanne, in der eine Population ihre ursprüngliche Masse X_0 verdoppelt, wobei $\mu = (\ln 2)/D$ die Wachstumsrate bezeichnet und $X_t = X_0 \cdot e^{\mu t}$ ist.

Die Werte μ und v sind für eine Art und die Bedingungen charakteristisch, wenn alle Zellen der Population gleichermaßen wachsen und sich teilen. In diesem Fall gilt $D = G$ und $\mu = v \cdot \ln 2$.

sofern man die inaktive Auszeit hinzurechnen möchte. Sie kann im bisher bekannten Extremfall bis zu 40 Millionen Jahre überbrücken [13]. Das kurze, opulente Leben von *E. coli* im Labor lässt nicht vermuten, dass den meisten Mikroben in der Natur ein karges, dafür aber langes Dasein beschieden ist.

Harald Engelhardt, Martinsried

Literatur

- [1] T. M. Hoehler, B. B. Jørgensen (2013). Nat. Rev. Microbiol. 11, 83–94, <https://doi.org/10.1038/nrmicro2939>
- [2] R. Z. Moger-Reischer, J. T. Lennon (2019). Nat. Rev. Microbiol. 17, 679–690, <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0253-y>
- [3] B. Gibson et al. (2018). Proc. R. Soc. B. 285, <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.0789>
- [4] W. R. Shoemaker et al. (2021). Proc. Natl. Acad. Sci. USA 118, <https://doi.org/10.1073/pnas.2101691118>
- [5] Y. Morono et al. (2020). Nat. Commun. 11, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17330-1>
- [6] Inagaki et al. (2015). Science 349, 420–424, <https://doi.org/10.1126/science.aaa6882>
- [7] W. Overkamp et al. (2015). Environm. Microbiol. 17, 346–363, <https://doi.org/10.1111/1462-2920.12676>
- [8] E. Trembath-Reichert et al. (2017). Proc. Natl. Acad. Sci. USA 114, E9206–E9215, <https://doi.org/10.1073/pnas.1707525114>
- [9] S. D’Hondt et al. (2002). Science 295, 2067–2070.
- [10] B. A. Lomstein et al. (2012). Nature 484, 101–104, <https://doi.org/10.1038/nature10905>
- [11] W. D. Orsi (2018). Nat. Rev. Microbiol. 16, 671–683, <https://doi.org/10.1038/s41579-018-0046-8>
- [12] J. T. Lennon, S. E. Jones (2011). Nat. Rev. Microbiol. 9, 119–130, <https://doi.org/10.1038/nrmicro2504>
- [13] R. J. Cano, M. K. Boruki (1995). Science 268, 1060–1064.
- [14] R. G. Eagon (1962). J. Bacteriol. 83, 736–737.
- [15] J. Hoff et al. (2020). Environm. Biol. 22, 4394–4408, <https://doi.org/10.1111/1462-2920.15128>
- [16] S. E. Finkel (2006). Nat. Rev. Microbiol. 4, 113–120.
- [17] J. Errington, L. T. van der Aart (2020). Microbiol. 166, 425–427, <https://doi.org/10.1099/mic.0.000922>
- [18] N. Ulrich et al. (2018). PLoS One 13, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208425>

AUSSERSCHULISCHE LERNOORTE

Der Nationalpark Kellerwald-Edersee

Nationalparks sind Schutzgebiete von übergeordneter, nationaler Bedeutung. Der Nationalpark Kellerwald-Edersee liegt in Nordhessen im Landkreis Waldeck-Frankenberg. Gegründet im Jahr 2004 hat er sich in seiner 20-jährigen Geschichte zu einem unzerschnittenen Naturwaldgebiet entwickelt, dessen Kerngebiet 2011 von der UNESCO zum Welterbe erhoben wurde.

Der Nationalpark Kellerwald-Edersee liegt etwa eine Autostunde von Kassel entfernt zwischen Korbach im Norden und Frankenberg im Südwesten. Er umrahmt den 1914 als Stausee errichteten Edersee, der



ABB. 1 Die seltene Pflingstnelke (*Dianthus gratianopolitanus*). Alle Fotos: Ewald Langer.



ABB. 2 Der Buchenstachelbart (*Hericium coralloides*) ist ein Pilz aus der Ordnung der Täublingsartigen.



ABB. 3 Raupe des Buchenstreckfußes (*Calliteara pudibunda*).

touristisch hervorragend erschlossen ist. Mit einer Gesamtfläche von 7688 ha [1] ist er der größte der fünf deutschen Nationalparks des UNESCO-Welterbe-Clusters „Alte Buchenwälder und Buchenurwälder der Karpaten und anderer Regionen Europas“. Die Biotopausstattung des Nationalparks Kellerwald-Edersee ist geprägt durch die Geologie des Rheinischen Schiefergebirges, die vielfältigen Geländeformen mit tief eingeschnittenen Tälern und Höhenlagen bis 626 m sowie klimatischen Extremstandorten. Das Kerngebiet des UNESCO-Welterbes umfasst 1467 ha und zeichnet sich durch sehr alte Rotbuchenbestände (*Fagus sylvatica*) aus [2]. Eine natürliche Waldzusammensetzung mit hohem Totholzanteil bietet seltenen Tierarten wie der Wildkatze (*Felis sylvestrus*), dem Schwarzstorch (*Ciconia nigra*), dem Uhu (*Bubo bubo*) und zahlreichen Specht- und Fleder-

mausarten Lebensraum. Insgesamt wurden im Gebiet des Nationalparks bisher fast 8000 Arten nachgewiesen: 635 Farn- und Blütenpflanzen, 350 Moosarten, 300 Flechten, 1309 Pilzarten und 5986 Tierarten [2–4]. Darunter sind extrem seltene Arten wie die Pflingstnelke (*Dianthus gratianopolitanus*, Abbildung 1), der Veilchenblaue Wurzelhals-schnellkäfer (*Limoniscus violaceus*) oder der Buchenstachelbart (*Hericium coralloides*, Abbildung 2).

Urwaldrelikte und historische Nutzung

In die vor 400 Millionen Jahren gebildeten Gesteine des Rheinischen Schiefergebirges – vor allem silikatreiche Grauwacke und Tonschiefer – hat die Eder in Jahrtausenden einen tiefen Einschnitt gegraben. Die Prallhänge des gewundenen Flusses sind extrem steil und beherbergen einige der letzten Urwaldreste Deutschlands. Der kühle Nordhang der Wooghölle bei Bringhausen wird auf flachgründigem, steinigem Boden von uralten Edellaubhölzern wie Linden- und Ahornarten mit beigemischten Rotbuchen bewachsen. Fast alle Bäume sind sehr alt und bieten durch ihre natürlich entstandenen Baumhöhlen seltenen Fledermausarten wie der Bechsteinfledermaus (*Myotis bechsteini*) Schutz. An den umgestürzten alten Bäumen



ABB. 4 Kahle Hardt mit Knorreichen (*Quercus petraea*).

wachsen seltene Pilzarten wie der Schwarzflockige Dachpilz (*Pluteus umbrosus*) oder der Ohrlöffel-Harpunenschwamm (*Hobenuelia auriscalpium*). Neben den sehr seltenen und schwierig zu beobachtenden Arten kann man beim Wandern im Sommer auch andere spektakulär aussehende Arten finden wie die bunt behaarten Raupen des Buchenstreckfußes (*Calliteara pudibunda*, Abbildung 3).

Die steilen, trockenen und wärmegetönten Südhänge beherbergen an der Kahlen Hardt (Abbildung 4) und der Hünselburg nahe der Halbinsel Scheid extreme Baumgestalten. Die als Knorreichen bekannten Traubeneichen (*Quercus petraea*) wachsen nur wenige Meter hoch und haben durch Witterungseinflüsse über Jahrhunderte ein Bonsaiartiges Aussehen entwickelt. Zu diesen märchenhaften Baumgestalten gesellen sich in diesen steilen Bereichen sogar Rotbuchen, die den klimatischen Extremen trotzen. Sie sind wertvolle genetische Ressourcen, die an die Klimaerwärmung durch natürliche Selektion bereits angepasst sind. Das erste veröffentlichte Rotbuchengenom wurde von einem Individuum eines dieser Sonderstandorte gewonnen [5], um es Forschenden zu ermöglichen, die genetischen Besonderheiten der Anpassungen an extreme Verhältnisse zu analysieren.

Neben den urwaldartigen Bereichen finden sich im Gebiet des Nationalparks Kellerwald-Edersee viele kleinere Fließgewässer mit zahlreichen Quellen, die eine ganz eigene Fauna beherbergen. Dort kommen der seltene Grundfisch Groppe (*Cottus gobio*) oder gar der Alpenstrudelwurm (*Crenobia alpina*) vor. Der Feuersalamander (*Salamandra salamandra*) ist aufgrund seiner auffälligen Färbung in diesen feuchten Lebensräumen leicht zu entdecken (Abbildung 5).

Das Gebiet des Nationalparks wurde bereits im Mittelalter im 9. und 14. Jahrhundert besiedelt und

stark genutzt. Hiervon zeugen zahlreiche Wüstungen, über 1300 Köhlerplatten und viele Ackerterrassen, die längst wieder von altem Wald bestockt sind. Im erzeichen Gestein wurden einige Bergwerke betrieben, aus denen Kupfer, Blei und sogar Gold geschürft wurden. Flurbezeichnungen wie Bleiberg und Ortsnamen wie Altenlotheim zeugen von dieser mittelalterlichen Nutzung. Hochflächen wurden als Sommerweiden betrieben. Die sogenannten Triescher, die im Nationalparkplan [2] als alte Nutzungsformen mit schützenswerter Flora und Fauna gekennzeichnet sind, sollen weiterhin durch extensive Pflege mit Schafbeweidung offengehalten werden. Dort wachsen dealpine Borstgrasrasen mit seltenen Blütenpflanzen wie Arnika (*Arnica montana*) oder Mondraute (*Botrychium lunaria*).

Touristische Erschließung und Lernort

Das Motto des Nationalparks „Natur Natur sein lassen“ lässt sich für Besucherinnen und Besucher durch ein sehr gut geplantes ca. 150 km umfassendes Wegenetz hautnah erfahren. Sehr gut mit dem Fahrrad befahrbare Waldwege, aber auch Pfade mit sportlich anspruchsvoller Wegführung sind vorhanden. Der durch eine blaue Wegemarkierung gekennzeichnete Urwaldsteig führt auf 65 km durch urwaldartige Bereiche rund um den Edersee herum. Das unterschiedliche Höhenprofil des Urwaldsteiges überwindet teilweise über 200 Höhenmeter.

Anlaufpunkte, die gerne von Lehrenden als außerschulische Lernorte genutzt werden, sind das Nationalparkzentrum in Herzhausen und das Informationszentrum KellerwaldUhr in Frankenau. Von dort führen gekennzeichnete Nationalpark-Wanderrouen zu den Highlights des Parks. Das Verzeichnis des Nationalparks Kellerwald-Edersee führte 2023 nicht weniger als 375 Einzelveran-



ABB. 5 Feuersalamander (*Salamandra salamandra*).

staltungen auf. Rangerführungen, Infotage und Vorträge sind neben Schulprojekten und Juniorrangerprojekten das Bildungsangebot für Naturinteressierte. Alle Informationen und Veranstaltungen rund um den Nationalpark finden sich auf: <https://nationalpark-kellerwald-edersee.de>

Literatur

- [1] A. Frede, C. Morkel (2021). Die Erweiterung des Nationalparks Kellerwald-Edersee um die Naturschätze der nördlichen Edersee-Steilhänge. Jahrbuch Naturschutz in Hessen. Band 20/2021.
- [2] Nationalpark Kellerwald-Edersee (2020). Nationalparkplan für den Nationalpark Kellerwald-Edersee. Band 1 und 2. Nationalpark Kellerwald-Edersee Laustraße 8, 34537 Bad Wildungen. Cognition. <https://nationalpark-kellerwald-edersee.de/infomaterial>
- [3] E. Langer, G. Langer (2013). Pilze im Nationalpark Kellerwald-Edersee. AFZ Der Wald 2013(1): 21–23.
- [4] E. Langer et al. (2015). Naturalness of selected European beech forests reflected by fungal inventories: a first checklist of fungi of the UNESCO World Natural Heritage Kellerwald-Edersee National Park in Germany. Mycol. Prog. 14:102, <https://doi.org/10.1007/s11557-015-1127-y>
- [5] B. Mishra et al. (2018). A reference genome of the European beech (*Fagus sylvatica* L.). GigaScience 7, TBD. <https://doi.org/10.1093/gigascience/giy063>

Ewald Langer,
Universität Kassel



MANAGEMENT-FALLSTRICKE, TEIL 22

Die „Ja-Sager“-Falle

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?

Ein Jahr hatte er gebraucht, bis der neue Werkleiter Hengst Heribert endlich sein perfektes Arbeitsteam am Tisch sitzen hatte. Er reckte seinen langen Rücken. „Seid ihr leistungsbereit, ehrgeizig und klug?“, wieherte er fragend. Und prompt kam ein einhelliges „Ja, das sind wir!“ zurück. Zufrieden schaute der temperamentvolle Vollblüter in die Runde und war stolz auf sich selbst, die ewigen Nörgler endlich losgeworden zu sein. Seine Rivalen, unbequeme Weggefährten und die Blockierer seines Tuns hatte er kurzerhand wegbefördert. Nun hinderte ihn niemand mehr daran, schnell und effizient Ergebnisse zu liefern. Höchste Zeit, denn er bekam schon mächtig Druck von oben. Er hatte eine Kartierung des gesamten Geländes versprochen, inklusive der Harmonisierung der Wegmarkierungen im ganzen Gebiet. „Nach der Schneeschmelze bekommen wir Besuch von ganz oben“, erklärte er seinem Team.

„Bis dahin muss unser Projekt mit höchster Priorität vorangetrieben werden.“ Intensiv schaute er in die Augen der Beteiligten. „Und dass hier eines klar ist: Ich will keine Probleme, nur Lösungen!“ Die Aussage bekräftigend, schwang er seinen schwarzen Schweif energisch um sein Hinterteil. Sofort entstand emsiges Gewusel. Eifrig begannen Nora Nager, Elias Eule, Hase Hoppler und Rita Raupe mit den Ausarbeitungen des Wegenetzes. Eine komplette Kartierung der Gemarkung war eine riesige Sache. Dass ausgerechnet sie in solch eine wichtige Position gehoben wurden, verpflichtete sie Hengst Heribert zum absoluten Dank.

Gewissenhaft präsentierten sie ihm einige Wochen darauf den Vorschlag für die neue Kartierung des Gebietes und rollten den großen neuen Plan vor ihm aus. Kritisch beäugte Hengst Heribert die Karte. Noch während Nora Nager die De-

tails präsentierte, störte den Hengst eine blaue Linie, die quer über die Karte lief. „Die kann weg“, wieherte er aufgebracht. „Hoppler, entferne mir dieses störende Ding!“ Und bevor Elias Eule einen fragenden Blick zu Nora Nager werfen konnte, radierte Hase Hoppler pflichtbewusst die störende Linie weg. „So gefällt mir mein Gebiet“, nickte Hengst Heribert. „Kommen wir nun zur Planung des Events.“ Seine Mitarbeiter nickten einverstanden und lauschten sogleich seinen Ausführungen. „Ich gehöre nicht umsonst zur schnellsten Pferderasse der Welt.“ Mit großer Geste schlug er seine Hufe in die Höhe. „Selbstredend werde ich in meinem schnellsten Galopp zur Feier des Tages die gesamte Gemarkung umrunden, bevor wir gemeinsam mit den wichtigsten Gästen den Umtrunk einnehmen.“

Genau so geschah es am Tag der Ergebnispräsentation. Hengst Heribert galoppierte mit glänzendem Fell in atemberaubendem Tempo über die neu abgesteckte Strecke, die sein Territorium umgab. Die geladenen Gäste applaudierten. Heriberts Hufe überschlugen sich förmlich vor Freude über seinen Erfolg. Als er jedoch am markanten Aussichtspunkt ankam, fanden sie plötzlich keinen Halt mehr. Was war das? Verdutzt wieherte er und schlug mit seinem Schweif um sich. Doch es war zu spät. Er stürzte den Abhang hinunter in den reißenden Fluss und wurde vom schäumenden Wasser davongetragen. Nora Nager zuckte erschrocken ihre kleinen Schultern und schaute ungläubig zu Hase Hoppler hinüber. Fast unhörbar wisperte dieser: „Er wollte, dass ich die blaue Linie ausradiere.“

**Und die Moral von der Geschicht':
Verbanne Deine Nörgler nicht.**

*Ihre Andrea Hauk,
andreabauk@gmx.de*

FAKTENBOX

Bereits 1837 beschrieb Hans Christian Andersen in seinem Märchen „Des Kaisers neue Kleider“ die Gefahr der Ja-Sager im eigenen Team: Der Kaiser trug keine Kleider am Leib und keiner hatte den Mut, es ihm zu sagen. Ihre Mitarbeiter sind auch immer Ihrer Meinung? Herzlichen Glückwunsch. Da haben Sie Ihr Team bestens mit Ja-Sagern ausgestattet. Zugegeben, es scheint ein cleverer Schachzug, zunächst Ihre eigenen Vertrauten in wichtige Positionen einzusetzen. So erfahren Sie absolute Loyalität und Unterstützung, außerdem liefern Sie schnelle Erfolge. Und Hand aufs Herz: Es tut gut, Zustimmung zu erfahren. Dumm nur, wenn am Ende Ihre Genialität nur in Ihrem Kopf besteht, Sie aber Ihre Firma, Ihre Abteilung oder Ihre Initiativen mit Volldampf in die falsche Richtung entwickeln, weil keiner versucht, Sie von Irrwegen abzubringen. Starke Führungskräfte umgeben sich daher nicht nur mit Leuten, die ihnen auf die Schulter klopfen, sondern auch mit Rebellen, die ihnen ungestraft den Spiegel vorhalten dürfen.

Mit diesem 22. Teil endet unsere Kolumne über Management-Fallstricke, die uns Andrea Hauk so unterhaltsam als Fabeln nabegebracht hat. Herzlichen Dank an die Autorin!

RÜCKBLICK

- 2/24 Kleine Juwelen im Ölschiefer
- 2/24 Umwelt-DNA aus der Vergangenheit
- 2/24 Die sexuelle Revolution in der Algenforschung
- 2/24 Offene Daten, offene Wissenschaft?
- 2/24 Moderne Pflanzenzüchtung durch Genom-Editierung
- 2/24 Irreguläre Terpene in Bakterien
-
- 3/24 Ein Botschafter gegen Artensterben und für Forschungsbedarf
- 3/24 Über den Ursprung des Lebens
- 3/24 Unerwartete Vielfalt im Reproduktionsverhalten von *Calluna vulgaris*
- 3/24 Ätherische Öle in Lippenblütlern
- 3/24 Ein Co-Pädagoge auf vier Pfoten

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 1/2025 erscheint im Februar 2025

Biologie in unserer Zeit
finden Sie im Internet unter
www.biu.z.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

Tropische Treiberameisen und ihre Gäste

Treiberameisen sind bedeutende Jäger in tropischen Regenwäldern. Während ihrer koordinierten Schwarmraubzüge überwinden sie eine Vielzahl von Beutetieren. Davon profitieren auch viele andere Regenwaldbewohner, die den Schwärmen folgen. Gemeinsam mit den Treiberameisen sind diese „Schmarotzer“ durch die Fragmentierung des Regenwalds heute in ihrer Existenz bedroht.



Foto: D. Kronauer.

Chancen der grünen Bioökonomie

Der Erfolg der Bioökonomie, auf einem von der Klimakatastrophe bedrohten Planeten bis zu 10 Milliarden Menschen zu ernähren, vor Krankheiten zu schützen und mit Wasser und Rohstoffen zu versorgen, hängt maßgeblich von der Effizienz der Photosynthese ab. Die Nutzung von Algen gilt als besonders aussichtsreich. Doch wie realistisch sind die Erwartungen?

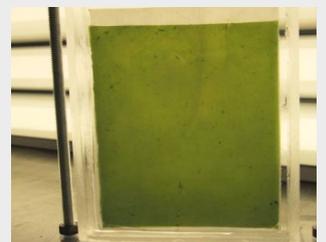


Abb.: C. Wilhelm.

Stadtbäume für die nächste Generation

„Klimabäume“ sind im Gegensatz zu vielen einheimischen Baumarten gut an zu erwartende Klimaverhältnisse und an die Besonderheiten urbaner Standorte angepasst. Sie stehen allerdings im Verdacht, durch ungewollte und übermäßige Ausbreitung einheimische Baumarten zu verdrängen. Unser Autor plädiert für eine differenzierte Betrachtung.



Foto: J. Bouillon.

Konflikt und Kooperation in der Kernfamilie

Viele Tiere wachsen gemeinsam mit Geschwistern auf. Da in einer gemeinsamen Umwelt Ressourcen geteilt werden müssen, entstehen dabei unweigerlich Konflikte. Daneben können Geschwister aber auch von Kooperation profitieren. Die verhaltensökologische Theorie bietet hier Erklärungsansätze.



Foto: Marion L. East und Heribert Hofer.

Faszination Stereofotografie

Die stereoskopische (oder 3D-)Fotografie hat in den vergangenen Jahrzehnten zahlreiche Anwendungsfelder in verschiedenen biologischen Disziplinen gefunden. Dies liegt unter anderem daran, dass bereits durch einfache Aufnahmemethoden Bilder mit sehr guter Tiefenwirkung erzeugt werden können. Unser Beitrag stellt die Methodik anhand von Beispielen vor.

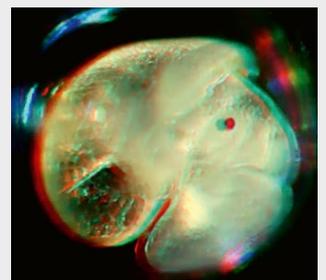


Abb.: R. Sturm.

Wir bitten um Verständnis dafür, dass angekündigte Artikel hin und wieder aus redaktionellen Gründen verschoben werden müssen.



Verband | Biologie, Biowissenschaften
& Biomedizin in Deutschland



GEMEINSAM FÜR DIE BIOWISSENSCHAFTEN

WERDEN SIE MITGLIED IM VBIO UND UNTERSTÜTZEN SIE DAMIT UNSERE ARBEIT!

Der Verband Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin - VBIO e.V. ist das gemeinsame Dach für alle, die in den Biowissenschaften tätig sind: in Hochschule, Schule, Industrie, Verwaltung, Selbstständigkeit oder Forschung. Die Mitglieder des VBIO spiegeln das gesamte Spektrum der Biowissenschaften.

Der VBIO e.V. vertritt die Interessen aller biowissenschaftlichen und biomedizinischen Disziplinen. Dazu gestaltet der VBIO politische Entscheidungsprozesse mit und berät die Politik aktiv in relevanten Anliegen – von der Neuregelung des Gentechnikgesetzes bis hin zum Naturschutz in Zeiten des Klimawandels.

Gemeinsam mit Universitäten, Firmen und anderen Verbänden engagiert sich der VBIO, um neue Berufsfelder zu erschließen und Qualitätsstandards in Studium und Beruf zu sichern.

Der VBIO setzt sich ein, um Forschungsbedingungen für Wissenschaftler/-innen zu verbessern und Programme zur Forschungsförderung mitzugestalten.

Fort- und Weiterbildungen für Lehrkräfte sowie außeruniversitäre Lehrveranstaltungen für Studierende werden vom VBIO und dessen Netzwerk veranstaltet.

IHRE VORTEILE ALS VBIO-MITGLIED

- Erhalt der Biologie in unserer Zeit (BiuZ)
- wöchentlicher VBIO-Newsletter
- Kontakt und Beratung
- Zugang zum VBIO-Netzwerk
- Vergünstigungen bei Partnern

WEITERE INFORMATIONEN

www.vbio.de

Bitte Ihren Mitgliedsantrag an den VBIO:

- per Mail an: info@vbio.de
- per Fax: 089 - 2602 45 74
- per Brief an:
VBIO e.V.
Corneliusstr. 12
80469 München



BEITRITTSERKLÄRUNG

Titel, Vorname, Name	
Straße und Hausnummer	
PLZ und Ort, ggf. Land	
Geburtsdatum	E-Mail-Adresse

JA, ich beantrage hiermit die Mitgliedschaft im VBIO im laufenden Jahr als

- Vollmitglied**
95 Euro/Jahr inkl. Printausgabe BiuZ und BiuZ-online
- Ermäßigtes Mitglied**
35 Euro inkl. Printausgabe BiuZ und BiuZ-online
(gegen Nachweis für Schüler/-innen, Studierende, Promovierende etc.)
- Senioren-Mitglied**
65 Euro/Jahr inkl. Printausgabe BiuZ und BiuZ-online

ZAHLUNGSMODUS

Lastschriftinzug, SEPA-Lastschriftmandat

Bankname
BIC
Name des Kontoinhabers:
IBAN:
DE _____

Hiermit ermächtige ich widerruflich den Verband Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland - VBIO e.V. (Gläubiger-Id.-Nr.: DE43BIO00000011320), den Jahresbeitrag in der jeweils fälligen Höhe zu den festgesetzten Fälligkeiten zu Lasten des oben angegebenen Kontos durch Lastschrift einzuziehen. Der Einzug kann ab sofort erfolgen. Wenn das Konto nicht die erforderliche Deckung aufweist, besteht seitens des Kreditinstituts keine Verpflichtung zur Einlösung der Zahlung. Kosten für Rücklastschriften gehen zu Lasten des Verursachers.

- Überweisung**
(bitte ggf. nach Rechnungsstellung einen Dauerauftrag mit Termin im Januar erteilen)

Einwilligungserklärung

Ich bin damit einverstanden, dass meine Daten für die Mitgliederbetreuung, den Mitgliederservice und der Zweckverwirklichung des VBIO gemäß Satzung und Datenschutzordnung des VBIO (www.vbio.de/datenschutz) unter Beachtung der EU-Datenschutz-Grundverordnung erhoben, verarbeitet und genutzt werden.

Mir ist bewusst, dass die Verarbeitung meiner Daten auf freiwilliger Basis erfolgt und ich mein Einverständnis jederzeit mit Wirkung für die Zukunft widerrufen kann und dass ich jederzeit Auskunft über die personenbezogenen Daten erhalte, sowie die Berichtigung, Löschung oder Sperrung für die Zukunft vornehmen lassen kann. Im Fall des Widerrufs der Einwilligungserklärung werden mit dem Zugang meiner Willenserklärung meine Daten beim VBIO unverzüglich gelöscht, sofern ich keinen Mitgliedsbeitrag mehr schulde oder der VBIO verpflichtet ist, bestimmte finanztechnische Daten für einen gesetzlich vorgeschriebenen Zeitraum zu speichern.

Ich bestätige hiermit, dass ich mit der Einwilligungserklärung einverstanden bin insbesondere auch in Hinsicht auf Kündigungsfristen und Zahlungsmodalitäten sowie die VBIO-Satzung zur Kenntnis genommen habe. Ich bitte Sie, mich als Mitglied in den VBIO aufzunehmen.

Ort, Datum, Unterschrift
