

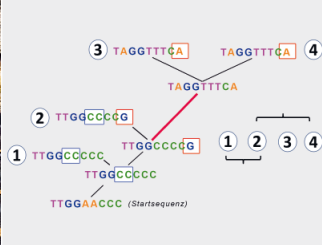
1 | 2024

VBio

Verband | Biologie, Biowissenschaften & Biomedizin in Deutschland



ZOOLOGIE
Kontroverse um
den Bientanz



EVOLUTION
Molekulare
Phylogenetik



ÖKOLOGIE
Pflanzen mit
Bodyguards

BIOLOGIE

IN UNSERER ZEIT



Die Rückkehr der Wölfe

Quo vadis, Wissenschaft? – Chancen der „UN-Dekade der Wissenschaft für Nachhaltigkeit“



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

Liebe Leserinnen und Leser, liebe Mitglieder des VBIO, am 1. Januar 2024 begann die *International Decade of Science for Sustainable Development* (IDSSD) der Vereinten Nationen (UN). Eine Dekade – zehn lange Jahre! Die Proklamation einer UN-Dekade lenkt zuallererst die Aufmerksamkeit auf drängende Probleme der Welt, definiert aber leider keinen Aktionsplan. Es liegt an uns Wissenschaftsinteressierten weltweit, diese zehn Jahre bis zum 31. Dezember 2033 durch globale, nationale und regionale Projekte mit Leben zu füllen. Die Ziele sind breit formuliert und fordern dazu auf, die Synergien zwischen den Wissenschaftsdisziplinen zu nutzen, um Lösungen für die komplexen und vernetzten Herausforderungen der kommenden Jahre zu finden. Diese großen Herausforderungen sind benannt: Biodiversitätserhalt, Ernährungs- und Wohlstandssicherung, Förderung der Nachhaltigkeit und künstliche Intelligenz (KI). Der konkrete Inhalt muss allerdings erst formuliert werden.

Wenige UN-Dekaden widmeten sich der Wissenschaft

Seit 1960 wurden 52 Internationale Dekaden ausgerufen [1]. Nur wenige befassten sich explizit mit wissenschaftlichen Themen – wie z. B. die Dekade der Biodiversität (2011–2020), Wiederherstellung von Ökosystemen (2021–2030) und Wissenschaft der Ozeane (2021–2030). Frühere Dekaden widmeten sich meist politischen, wirtschaftlichen und sozialen Themen wie Abrüstung, Frieden, Armut, Wirtschaftsentwicklung, Bildung und Menschenrechte. Diese

Liste lässt einen Bedeutungsgewinn der Wissenschaft über die vergangenen 73 Jahre erkennen. Hoffentlich ist dies nicht nur der Verzweiflung geschuldet, bei den anderen Langzeitproblemen wie Frieden, Hunger und Klimawandel bei politischen Entscheidungen und bei der gesellschaftlichen Konsensfindung zu versagen.

Internationalität, Vielfalt und Partizipation als Trumpf einer Dekade

Ein Blick auf das soeben beendete *International Year of Basic Sciences for Sustainable Development* (IYBSSD) zeigt die Stärke solcher UN-Perioden – aber auch die Schwächen. Neben den Rahmenereignissen wie der *Closing Ceremony* am CERN in Genf am 15. Dezember 2023 fanden weltweit Veranstaltungen statt, aber vor allem regionale Ereignisse wie „100 years of Physics in Africa“, Entwicklung eines Sternenführers in Malaysia, die Konferenz „Universities and Climate Change: SCO Territory“ (*Shanghai Cooperation Organisation*), die „Frank Warren National Organic Conference“ (FWC) in Südafrika oder das mobile Labor in Äthiopien. Viele Angebote zielten auf das Erreichen interessierter Laien und das Ertüchtigen von Lehrkräften und sind wichtige Maßnahmen; eine UN-Dekade muss neue, weiterführende und langfristige Aktivitäten umsetzen.

Wissenschaftliche Erkenntnis als Orientierung multilateralen Handelns

Eine Motivation für diese Dekade ist die erkennbare Notwendigkeit, der Diplomatie und Debatte der Politiker/-innen bei der Durchsetzung nationaler Interessen eine wissenschaftsbasierte Diskussion und Entscheidungskultur entgegenzustellen. Gerade die Vertragsstaatenkonferenz des UN-Klimarats COP28 in Dubai zeigte erneut die Dominanz der nationalen Interessen und global agierender Konzerne. Der Beitrag der Wissenschaften sollte mehr sein als nur das Bereitstellen von Daten und Technologien. Wissenschaftler/-innen sollten Teil des Entscheidungsprozesses sein.

Die Vorlage an die UN-Generalversammlung zur IDSSD führte aus, dass nur die Synergie zwischen Grundlagenforschung und angewandter Forschung der mathematisch-naturwissenschaftlich-technischen Wissenschaften unter Einbeziehung der Sozial- und Humanwissenschaften den zwingend notwendigen Wandel zur Nachhaltigkeit herbeiführen kann. Dabei seien lokales und traditionelles Wissen einzubeziehen und die kulturellen und nationalen Unterschiede zu berücksichtigen. Diese weichgespülte Rhetorik lässt erahnen, wie die Ausreden ausfallen werden, wenn auf Wissenschaft doch nicht so umfassend und bedingungslos gehört wird. Die Alltagserfahrung zeigt, dass Wissenschaft als Unterstützer zählt, wenn sie die für die gewünschte Entscheidung nutzbaren Argumente liefert. Wissenschaft wird diskreditiert, wenn wissenschaftliche Erkenntnis dem eigenen Standpunkt entgegensteht. Dieselbe genetische Mutation wird als „gut“ betrachtet, wenn sie durch klassische Züchtung entstand, und als verwerflich, wenn Genomeditierung im Spiel war.

DREI PHASEN DER UMSETZUNG DER IDSSD

Die IDSSD soll einen transformativen Einfluss auf die Prozesse der Forschung, Innovation und Entwicklung entfalten. Die Rolle der Wissenschaft in der Gesellschaft und bei politischen Entscheidungen soll neu, positiv und wirkungsstark definiert werden. Die Resolution sieht drei Stufen der Umsetzung vor. Beteiligt sind u. a. UN-Organisationen, die Akteure des beendeten Wissenschaftsjahrs, wissenschaftliche Unionen wie die International Union of Biological Sciences (IUBS) und das International Science Council (ISC):

In der **Aktivierungsphase** sollen das Leitprogramm vervollständigt, die Teilnahmekriterien definiert, das Programm einer breiten Gruppe an Akteuren bekannt gemacht und der oben beschriebene Prozess gestartet werden.

In der **Mobilisierungsphase** sollen die Aktivitätsfelder und die Zahl der engagierten Wissenschaftler/-innen und sonstigen Akteure auf globaler Ebene erweitert werden.

Die **Expansions- und Konsolidierungsphase** soll die neue Rolle der Wissenschaft in der Gesellschaft realisieren und Lösungsansätze präsentieren. Dadurch sollen zusätzliche Ressourcen mobilisiert und der Zugang zu den Erkenntnissen und der Erfolg der Dekade vervielfältigt werden.

Jede dieser Phasen muss konkretisiert werden. Vermutlich liegt in der momentanen Unschärfe die Chance der Dekade.

Offenbar kann die Wissenschaft nur begrenzt auf die Unterstützung durch die Politik und Gesellschaft zählen, wenn es um die objektive Dateninterpretation und Deutungshoheit geht. Lässt sich das ändern?

Die globale, nationale und regionale Balance

Die Wissenschaft muss weltweit verstärkt um das Vertrauen der Gesellschaft und der politischen Entscheider in den wissenschaftlichen Erkenntnisprozess werben. Wissenschaftskommunikation, wissenschaftliche Außenwirkung und Angebote zu *Citizen Science* werden zunehmend als Aufgabe der Wissenschaft im globalen Norden und Süden wahrgenommen. Inwieweit können Akteure aus 200 Ländern voneinander lernen? Für viele Bürger/-innen bleibt Wissenschaft ein eher abstrakter Begriff. Gleiches gilt für ihre Akteure, die Wissenschaftler/-innen, die z. T. als abgehoben betrachtet werden, obgleich häufig mit einem gewissen Respekt. Ziel muss es sein, dass sich die Gesellschaft als Teil der Wissenswelt wahrnimmt und umgekehrt. Der VBIO forderte in einem 2021 veröffentlichten Positionspapier die Stärkung der außerschulischen Angebote unter Beteiligung aller möglichen Akteure [2]. Generell scheint ein Umdenken eingesetzt zu haben, so dass in vielen Ländern *Outreach*-Aktivitäten zu Forschungsprojekten gehören. Wie viel Professionalität ist für den Erfolg solcher Aktivitäten notwendig und wie viel Amateurhaftigkeit ist zweckdienlich? Erfolgreiche Maßnahmen in einzelnen Ländern werden in anderen nicht umsetzbar sein. Hier den Dialog zu fördern und die Bedarfe zu ermitteln, wird ein wichtiges globales Ziel der UN-Dekade sein.

Nationale und europäische Anstrengungen helfen globalen Initiativen, aber vor allem uns selbst

Eine UN-Dekade und der Ruf nach internationaler Kooperation darf nicht davon ablenken, dass es einer großen Anstrengung in Deutschland und Europa bedarf, Forschung und Entwicklung (F&E) konkurrenzfähig zu halten. Die Tabelle 1 zeigt die F&E-Aufwendungen der zwölf Topnationen. Sowohl was die Aufwendungen als auch den exzellenten *Research Output* anbelangt, legt China atemberaubend zu [3]. Wir müssen vermeiden zurückzufallen. Christian Kastrop – Honorarprofessor für Öffentliche Finanzen, Fiskalregeln und Internationale Institutionen der FU Berlin und einer der Urheber der Schuldenbremse – schlägt vor, ein Sondervermögen für Zukunftsausgaben zu schaffen, aus dem Investitionen für die Klimatransformation, aber auch für Forschung und Bildung getätigt werden können [4]. Diese gelten traditionell nicht als Investitionen, obwohl sie wesentlich zur Produktivität der Volkswirtschaft beitragen. Abgesehen von der Finanzausstattung entsteht der Eindruck, dass die Bürokratie und Überregulierung bei uns weiter zunehmen, statt Freiräume für exzellente Forschung zu schaffen. Kurzsichtige Klientelpolitik und rote Linien zu halten, erscheint der Politik gelegentlich attraktiver als weitsichtige Entfesselung der Möglichkeiten. Die Stimme Deutschlands wird bei den aktuellen Herausforderungen im Sinne der UN-Dekade v. a. dann gehört, wenn wir hervorragende F&E und überzeugende Lösungen anbieten.

Ausblick auf das Jahr 2033 – Wo wird die Wissenschaft am Ende der UN-Dekade stehen?

Ich wage folgende Prognose: Die Verbreitung neuer Erkenntnisse innerhalb der wissenschaftlichen Community hat sich durch *Open*

TAB 1. AUFWENDUNGEN FÜR FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG DER ZWÖLF TOPLÄNDER NACH GESAMTAUFWENDUNG


Land	Aufwendungen		US\$/Kopf	Referenz-jahr
	für F&E (Mrd. US\$)	% BIP		
1 USA	660	2.6	1.965	2022
2 China	556	3.1	384	2022
3 Japan	194	3.4	1.540	2022
4 Deutschland	148	3.3	1.760	2022
5 Südkorea	105	5	2.050	2022
6 Frankreich	68	2	1.040	2022
7 Indien	65	0.7	40	2018
8 Vereinigtes Königreich	54	2.2	810	2022
9 Taiwan	46	3.8	1.956	2022
10 Brasilien	44	2.3	210	2022
11 Russland	38	2.2	260	2022
12 Italien	36	1.3	603	2022

BIP: Bruttoinlandsprodukt; F&E: Forschung und Entwicklung. Datenquelle: OECD- und Weltbank-Daten [5].

Access beschleunigt. Die Zahl der Journale und Veröffentlichungen ist allerdings in den letzten Jahren explodiert und die Herausforderung gleichzeitig gewachsen, zuverlässige von zweifelhaften Ergebnissen zu trennen. Bisher führten die Wissenschaftler/-innen selbst die Bewertung der Zuverlässigkeit durch Konsistenz- und Experimentalprüfung herbei. Am Ende der Dekade wird dies durch künstliche Intelligenz erfolgen. Während sich heute die Staaten am *Access and Benefit Sharing* und an Digitalen Sequenzinformationen arbeiten, um marginale Vorteilsausgleiche herbeizuführen, werden dann funktionelle Strukturen, biologische Prozesse und personalisierte Behandlungsverfahren anhand von an großen Datenmengen trainierten Algorithmen vorhergesagt und zielgerichtet umgesetzt. Die politischen Entscheidungsträger können KI-Büros betreiben, um die passende Information aus dem Datenangebot zu extrahieren. Der Autokrat lässt sich in gleicher Weise wissenschaftlich plausibel klingende, aber möglicherweise verfälschte Texte verfassen wie der aufrechte Demokrat mit der Absicht der Wahrheitsfindung. Die generative KI wird die vielversprechendsten Experimente, kompetente Auswertungen und Diskussionen vorschlagen. Welche Funktion übt der Wissenschaftler bzw. die Wissenschaftlerin 2033 in diesem transformativen Prozess aus? Die Herausforderung für die Wissenschaft wird sein, diese Potenziale und Gefahren mit den Zielen der Dekade in Einklang zu bringen wird.

- [1] www.un.org/en/observances/international-decades
- [2] www.vbio.de/fileadmin/user_upload/Schule/pdf/2021_nicht-formale_Bildung_A.pdf
- [3] clarivate.com/news/clarivate-report-reveals-china-challenging-u-s-research-dominance-signaling-future-research-ambitions/
- [4] C. Reiermann (2023). *Der Spiegel* 49, 30–31.
- [5] en.wikipedia.org/wiki/List_of_sovereign_states_by_research_and_development_spending

Ihr





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

Verlag:

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

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

Managing Editor:

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

Editorial Board:

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 GmbH, Leimen.

© VBIO e.V., München, 2024.

Printed in the Federal Republic of Germany.

ISSN 0045-205 X

BIOLOGIE

1 | 2024 IN UNSERER ZEIT
www.biuz.de



Seit 2021 ist die Anwesenheit eines Wolfsrudels in der Döberitzer Heide durch direkte Beobachtung und Aufnahmen von Wildkameras belegt. Es ist das erste Rudel innerhalb des Berliner Autobahnringes. In der umzäunten Kernzone leben die Wölfe völlig ungestört. Ob man das Glück hat, sie zu sehen, entscheiden sie jedoch stets selbst. Am 14. Juli 2023 wurden vier verspielte Wolfswelpen bei einer Kontrollfahrt unvermittelt wohl auf einem ihrer ersten Ausflüge angetroffen. Während sich drei rasch zurückzogen, blieb ein Welpe noch eine Zeitlang auf dem Weg liegen und musterte den Fotografen durchdringend. So entstand dieses einzigartige Porträt. Mehr über den Wolf in Deutschland lesen Sie in unserem Titelthema auf S. 61.

Foto: Hannes Petrischak/Heinz Sielmann Stiftung.

MELDUNGEN

6 Forschung & Entwicklung, Digitale Welt, Preise, Ausstellung

POLITIK UND GESELLSCHAFT

- 11 Die Zukunft der schulischen Bildung im Fokus
- 13 Parlamentarischer Abend *Sustainability*
- 14 Lebensmittel mit oder ohne Gentechnik?
- 15 Bilanz und Ausblick: Bundesdelegiertenkonferenz 2023
- 16 Bauer Willis Kraut und Rüben: Warum ich keine Biodiversität mag
- 18 Was forstliche CO₂-Zertifikate tatsächlich wert sind

TREFFPUNKT FORSCHUNG

- 19 Immunabwehr fremder Nukleinsäuren – Thema mit Variationen
- 22 Insektensterben durch *artificial light at night*
- 23 Nicht nur Gewächshäuser lassen Vögel früher singen
- 25 Eine Zauneidechse als Beute der Gottesanbeterin
- 26 Frankfurt, die Stadt mit den drei großen Gärten
- 29 Flora Incognita – mehr als Pflanzenbestimmung
- 32 Wie wird man eigentlich Biolog/-in? Und was hat das alles mit Kultur, Sprache und Identität zu tun?

MAGAZIN

- 84 Bücher und Medien
- 89 Mikroben verstehen: Wo kommen Mikroben *nicht* vor?
- 92 Partner des Menschen: Rhizobien
- 95 Außerschulische Lernorte: Das XLAB – Göttinger Experimentallabor für junge Leute
- 98 Kolumne: Illusorische Wahrheit

IM FOKUS

- 34** Der Forscher, der auf Bienen flog
Tina Heidborn
- 40** Die „Sprache“ der Bienen
Jürgen Tautz
- 50** 100 Jahre Schwänzeltanz
Randolf Menzel

- 61** Vom Konflikt zur Koexistenz
Reinhard Hehl
- 70** Molekulare Phylogenetik
Wolfgang Wägele, Patrick Kück, Lars Podsiadlowski
- 77** Pflanzen mit Bodyguards
Andrea T. Müller, Axel Mithöfer

SCHWERPUNKT: KARL VON FRISCH UND DER SCHWÄNZELTANZ DER BIENEN

34 Der Forscher, der auf Bienen flog



Karl von Frisch erhielt 1973 den Nobelpreis für seine Entschlüsselung des Schwänzeltanzes der Bienen. Unser wissenschafts-historischer Artikel beleuchtet die bis heute andauernde Kontroverse um den Bienen-tanz und bietet damit das Fundament für die beiden nachfolgenden Fachartikel.

40 Die „Sprache“ der Bienen

Die Kommunikation zwischen Bienen ist weit komplexer als es das einfache Modell zum Schwänzeltanz wiedergibt. Bereits Karl von Frisch hatte entdeckt, dass der Tanz im dunklen Stock nur ein Teil einer Verständigungskette ist, die ihre Fortsetzung in Kommunikationssignalen draußen im Feld findet.



50 100 Jahre Schwänzeltanz

Die Interpretation des Schwänzeltanzes durch Karl von Frisch konnte mit neuen Methoden in den letzten 20 Jahren weitgehend bestätigt werden. Neuste Ergebnisse zeigen nun, dass seine Botschaft für die nachlaufenden Bienen sogar noch bedeutsamer ist als zuvor gedacht.

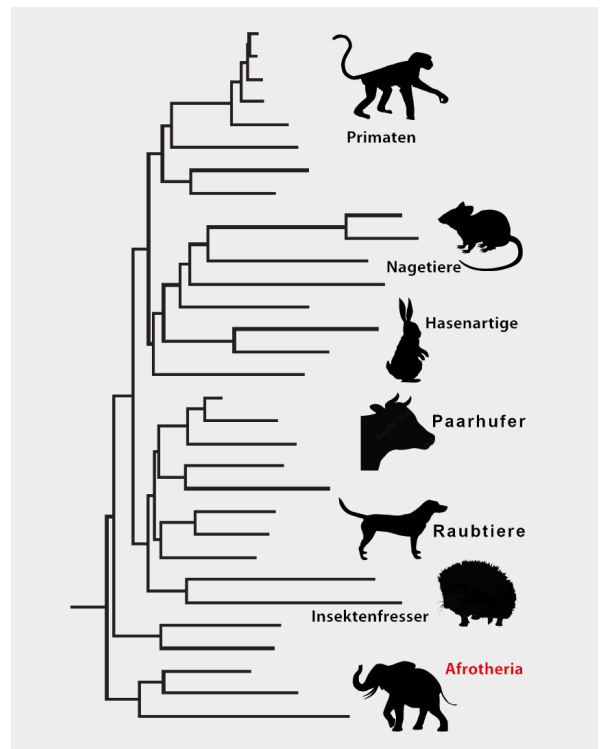


77 Pflanzen mit Bodyguards

Ameisenpflanzen bieten ihren Symbiosepartnern Wohnraum und/oder Nahrung und werden dafür effizient vor Angreifern geschützt. Ob sich die Pflanzen in dieser Symbiose völlig auf den Schutz durch die Ameisen verlassen oder sich noch selbst verteidigen, ist Gegenstand laufender Studien.



70 Molekulare Phylogenetik



Die Erforschung der Stammesgeschichte der Organismen hat mit der Entwicklung der Molekulargenetik große Fortschritte gemacht. Trotz der beeindruckenden Erfolge der molekularen Phylogenetik besteht aber weiterer Forschungsbedarf, um häufige Fehlerquellen aufzudecken.

61 Vom Konflikt zur Koexistenz

Der Wolf ist einer der umstrittensten Beutegreifer. Zwischen den Jahren 2000 und 2022 wurden in Deutschland 161 Wolfsterritorien besetzt und es ist abzusehen, dass weitere hinzukommen. Wie in Zukunft Mensch und Wolf koexistieren können, ist Teil der aktuellen Diskussion.



Seescheiden an einem Riff.
Der Meeresorganismus ist ein
hervorragendes Modell, um
die Entwicklungsprozesse bei
Wirbeltieren zu untersuchen.
Foto: Shutterstock/ISTA.



FORSCHUNG & ENTWICKLUNG

Seescheiden oder Aszidien bewegen sich als Larve frei im Wasser, lassen sich dann aber nieder und heften sich an Felsen oder Korallen an. Dort entwickeln sie ihre charakteristischen Röhren (Siphons). Die Wirbellosen werden häufig als Modellorganismen zur Untersuchung der frühen Embryonalentwicklung von Wirbeltieren verwendet. „Während Aszidien grundlegende Entwicklungs- und morphologische Merkmale von Wirbeltieren aufweisen, haben sie zusätzlich die typische zelluläre und genomische Einfachheit von Wirbellosen“, erklärt Carl-Philipp Heisenberg, Professor am *Institute of Science and Technology Austria* (ISTA). „Speziell die Aszidienlarve ist ein ideales Modell, um die frühe Wirbeltierentwicklung zu analysieren.“ Bei Aszidien bildet die befruchtete Eizelle eine glockenartige Ausstülpung aus, die als Kontraktionspol bekannt ist und für die Reifung des Embryos notwendig ist. Wie genau diese Ausstülpung aber entsteht, war bis jetzt ungeklärt. In Kooperation mit britischen und französischen Forschern hat Heisenbergs Team diese Frage nun gelöst. Dafür wurden Aszidien-Eizellen befruchtet und anschließend mikroskopisch untersucht. „Unsere Untersuchung ergab, dass sich der Aktomyosin-Kortex nach der Befruchtung durch die erhöhte Spannung zusammenzieht und dadurch in strömende Bewegung gerät. Dies führt zu den ersten Formveränderungen der Zelle“, so Silvia Caballero-Mancebo, Erstautorin und ehemalige Doktorandin im Heisenberg Lab. Die Aktomyosin-Ströme stoppten jedoch während der Ausweitung des Kontraktionspols – ein Hinweis, dass weitere Faktoren für die Beule verantwortlich sein könnten. Fündig wurden die Forscher im sogenannten Myoplasma. „Diese spezielle Schicht verhält sich wie ein elastischer Festkörper und verändert so während der Befruchtung ihre Form

zusammen mit der Eizelle“, klärt Caballero-Mancebo auf. Während des stromhaften Flusses des Aktomyosinkortex faltet sich das Myoplasma und bildet aufgrund der Reibungskräfte, die zwischen den beiden Komponenten entstehen, zahlreiche Wölbungen. Wenn die Aktomyosinbewegung aufhört, verschwinden auch die Reibungskräfte. „Dieser Stillstand führt schließlich zu einer Ausdehnung des Kontraktionspols, da sich die zahlreichen Myoplasma-wölbungen in eine gut definierte glockenförmige Beule auflösen“, so Caballero-Mancebo.

Die Studie verdeutlicht die zentrale **Bedeutung von Reibungskraften in der Gestaltung und Formung eines sich entwickelnden Organismus**. Die ISTA-Forscher wollen nun mehr darüber herausfinden, wie das Myoplasma an der Gestaltbildung von Seescheiden beteiligt ist.“ <https://ist.ac.at>

Die südlich der Sahara weit verbreiteten Matabele-Ameisen (*Megaponera analis*) fressen ausschließlich Termiten. Ihre Jagdzüge sind gefährlich, denn die Termitensoldaten verteidigen ihr Volk – und setzen dabei ihre kräftigen Beißzangen ein. Es kommt daher häufig vor, dass die Ameisen auf der Jagd verletzt werden. Wenn sich die Wunden infizieren, droht Lebensgefahr. Doch die afrikanischen Ameisen können nicht-infizierte von infizierten Wunden unterscheiden und behandeln letztere hoch effizient mit selbst produzierten Antibiotika. Das berichtet ein Team um Dr. Erik Frank von der Julius-Maximilians-Universität (JMU) Würzburg und Professor Laurent Keller von der Universität Lausanne im Journal *Nature Communications*. „Chemische Analysen in Kooperation mit JMU-Professor Thomas Schmitt haben ergeben, dass sich als Folge einer Wundinfektion das Kohlenwasserstoffprofil des Ameisenpanzers spezifisch verändert“, so Erik Frank. Genau diese Veränderung können die Ameisen erkennen und



Eine Matabele-Ameise versorgt die Wunde einer Artgenossin, der im Kampf mit Termiten Beine abgebissen wurden. Foto: Erik Frank (Universität Würzburg).

so den Infektionszustand verletzter Kampfgefährtinnen diagnostizieren. Zur Behandlung tragen sie dann antimikrobiell wirksame Verbindungen und Proteine auf die infizierten Wunden auf. Diese Antibiotika entnehmen sie aus der Metapleuraldrüse, die sich seitlich an ihrer Brust befindet. Deren Sekret enthält 112 Komponenten, die Hälfte davon wirkt antimikrobiell oder wundheilend. Und die Therapie ist hoch wirksam: **Die Sterblichkeit infizierter Individuen wird um 90 Prozent verringert**, wie die Forschungsgruppe herausgefunden hat. Die Antibiotika der Matabele-Ameisen sollen nun in Kooperation mit Arbeitsgruppen der Chemie analysiert werden. Womöglich kommen dabei neue Antibiotika ans Licht, die vielleicht auch beim Menschen anwendbar sind. www.uni-wuerzburg.de

Nach wie vor infizieren sich in Deutschland viele Menschen mit dem Coronavirus. Die neuen Auffrischungsimpfstoffe sind speziell an die Omikron-Sublinie XBB.1.5 angepasst. Allerdings fehlte bislang der Wirksamkeitsnachweis für die neuen Booster. Im Rahmen der „COVID-19 Contact (CoCo)“-Studie der Klinik für Rheumatologie und Immunologie der Medizinischen Hochschule Hannover (MHH) wurde nun die Immunreaktion von 53 MHH-Beschäftigten untersucht, die einen Auffrischungsimpfstoff



Wirksamkeit bestätigt: der an die Omikron-Variante XBB.1.5 angepasste Corona-Booster-Impfstoff von Biontech. Abb.: Karin Kaiser/MHH.

erhalten hatten. „Wir haben nicht nur **eine große Menge neutralisierender Antikörper gegen Omikron XBB.1.5** gefunden, sondern auch gegen andere Unter-Varianten“, sagt die Oberärztin Prof. Dr. Alexandra Dopfer-Jablonka, die gemeinsam mit ihrem Klinikkollegen Prof. Dr. Georg Behrens die Immunstudie leitet. Das bedeutet, der Impfstoff ruft die Immunabwehr nicht nur gegen die aktuell dominierende Corona-Variante XBB.1.5 auf den Plan, sondern aktiviert die körpereigene Abwehr auch gegen die sich gerade ausbreitenden Varianten „Pirola“ (BA2.86) und „Eris“ (EG1.5). „Die B-Zellen, die Antikörper gegen Omikron produzieren, wurden signifikant mehr und auch die T-Zellen wurden durch die Impfung gestärkt“, erklärt die Rheumatologin. In der Studie wurde lediglich der Booster von Biontech getestet, doch da die Impfstoffe von Moderna und Novavax ebenfalls auf XBB.1.5 angepasst wurden, erwarten die Forscher bei ihnen die gleiche Wirksamkeit. www.mbb.de

Ein internationales Forscherteam mit Beteiligung des Museums für Naturkunde Berlin hat im Rotliegend zwischen Kaiserslautern und Trier im westlichen Rheinland-Pfalz eine neue Ursaurierart nachgewie-

sen. Der Begriff „Ursaurier“ ist eine populäre Sammelbezeichnung für die Vierfüßer des Erdaltertums. Er schließt Amphibien und Reptilien ein, hat aber keine wissenschaftliche Bedeutung und auch nichts mit den späteren Dinosauriern zu tun. Die neue Art *Stenokranio boldi* lebte vor knapp 300 Millionen Jahren und war mit bis zu anderthalb Metern Länge eines der größten Raubtiere ihrer Zeit. Sie ist ein ausgestorbener Vertreter der Temnospondyli – einer Gruppe von Amphibien, die im Erdaltertum besonders artenreich war. *S. boldi* besaß einen großen, flachen Schädel, der ihm den Gattungsnamen *Stenokranio* („Schmalschädlern“) eingebracht hat. Mit seinen vielen spitzen Zähnen hat er wohl hauptsächlich Fische und andere Ursaurier erbeutet. Die drei Paare von großen, nach hinten gebogenen Reißzähnen im Gaumen dienten wahrscheinlich dazu, glitschige Beute wie Fische festzuhalten. *Stenokranio* lebte als Lauerjäger in und am Rande tropischer Gewässer **und besetzte damit eine ähnliche ökologische Nische wie die späteren Krokodile**. Der Fund dieses Spitzenprädatoren ist ein wichtiger neuer Mosaikstein in unserem Bild von der Diversität und den Wechselbeziehungen längst

ausgestorbener Lebewesen in den Seen und Flüssen im späten Erdaltertum Mitteleuropas.

www.museumfuernaturkunde.berlin



Lebensrekonstruktion von *Stenokranio boldi*. Abb.: Dr. Frederik Spindler, Kipfenberg.

Die Behandlung von bakteriellen Infektionen verläuft effektiver, wenn der Auslöser der Krankheit bekannt ist. Doch die Identifizierung der Keime stößt manchmal an ihre Grenzen – etwa, weil die Bakterienart noch nicht bekannt oder sehr schwer zu kultivieren ist. Ein Team der Universität Basel und des Universitätsspitals Basel um PD Dr. Daniel Goldenberger hat Patientenproben, die solche unbekannt Keime enthalten, seit dem Jahr 2014 systematisch gesammelt und untersucht: Aus Blut- und Gewebeproben wurden insgesamt 61 unbekannte bakterielle Keime analysiert. Dafür sequenzierten die Forschenden das gesamte Erbgut der Bakte-



Wachstum von Bakterienkulturen in Petrischalen: Die zuverlässige Bestimmung von kultivierten Keimen ist in der klinischen Bakteriologie von entscheidender Bedeutung. Foto: Sylvia Suter (Universitätsspital Basel).

DIGITALE WELT

Plastik ist heute allgegenwärtig – in Flüssen und Meeren, in unserer Luft, dem Boden und sogar unseren Körpern. Inmitten dieser rasant wachsenden Krise setzen die Giganten der Kunststoffindustrie ihre Produktion unbeirrt fort. Und das, obwohl ein Recycling von Kunststoffen kaum funktioniert. Der Kinofilm „PLASTIC FANTASTIC“ begleitet unterschiedliche Protagonist/-innen, darunter Vertreter/-innen der Kunststoffindustrie, Wissenschaftler/-innen und Aktivist/-innen, und erkundet mit ihnen bislang unbeachtete Seiten der Kunststoffkrise. Der Umweltschützer Steven Feit enthüllt, dass Kunststoffe Teil einer Wachstumsstrategie der Erdölindustrie im 21. Jahrhundert geworden sind. Eine pensionierte Lehrerin aus Louisiana, Sharon Lavigne, kämpft unermüdlich gegen die Umweltverschmutzung in ihrer Stadt und



Ozeanografin Sarah Jeanne Royer macht greifbar, welche verheerende Probleme Mikroplastik an den Küsten Hawaiis verursacht. In Hamburg treibt den Chemiker und Erfinder Michael Braungart die Vision einer Welt ohne Plastikmüll um. Indes setzen Joshua Baca, Lobbyist des American Chemistry Council, und Ingemar Bühler, Lobbyist bei Plastics Europe, alles daran die Menschen zu überzeugen, dass die Plastikindustrie die Zeichen der Zeit erkannt hat: Neue Recyclingtechnologien würden in Zukunft den großen Unterschied machen. **PLASTIC FANTASTIC gewährt faszinierende Einblicke in das Denken und Handeln der Plastikindustrie** und erkundet mögliche Wege zur Bewältigung dieser Krise. Der Film läuft seit dem 25. Januar 2024 in deutschen Kinos. <https://mindjazz-pictures.de>

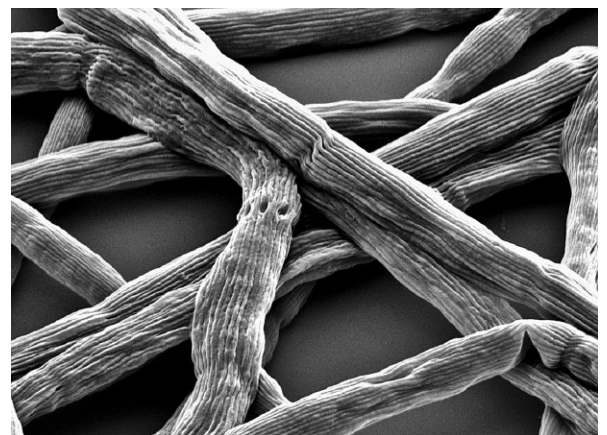
rien mit einer Methode, die erst seit wenigen Jahren zur Verfügung steht. Die ermittelten Genomsequenzen glichen sie dann mithilfe eines Online-Tools mit bereits bekannten Bakterienstämmen ab. Wie sich dabei herausstellte, waren 35 der 61 Bakterien bisher nicht bekannt. Die restlichen 26 Stämme stuften die Forschenden als schwer identifizierbar ein. Eine Evaluation von Patientendaten ergab, dass **von den 35 neuen Stämmen sieben klinisch relevant sind**. Für das Team um Daniel Goldenberger ist das Projekt damit aber noch längst nicht abgeschlossen. Die Forschenden sammeln und sequenzieren weiterhin systematisch unbekannte Keime aus Patientenproben des Universitätsklinikums Basel – mittlerweile sind schon wieder über zwanzig dazugekommen. „Wir bemerken hier eine große Dynamik, es wird aufgrund der technologischen Fortschritte in der Bakteriologie allgemein viel mehr über neu entdeckte Bakterienarten berichtet“, so Goldenberger. Durch diese Entwicklung wird es in Zukunft immer einfacher werden, Infektionen mit

seltenern Erregern richtig zu diagnostizieren und von Anfang an effektiv zu behandeln. www.unibas.ch

PREISE

Die Vereinigung für Allgemeine und Angewandte Mikrobiologie (VAAM) zeichnet jedes Jahr die Mikrobe des Jahres aus, um auf die Vielfalt der mikrobiologischen Welt und die bedeutsame Rolle der Mikroorganismen für Ökologie, Gesundheit, Ernährung und Wirtschaft aufmerksam zu machen. Mit *Candidatus Electronema* wird dieses Jahr erstmals eine Bakterienart gewählt, für deren vollständige Beschreibung die Reinkultur noch fehlt. *Candidatus Electronema* ist der **wichtigste Vertreter der Kabelbakterien, die Strom über mehrere Zentimeter leiten können** und vor zwölf Jahren am Grund von Meeren und Seen entdeckt wurden. In der Natur bilden sie bis zu fünf Zentimeter lange Ketten aus Zehntausenden von Bakterienzellen, die durch stromleitende Proteinfasern in ihrer Zellhülle miteinander verbunden sind. Ihre

Kettenform ermöglicht eine einzigartige Arbeitsteilung: Zellen im tiefen, sauerstofffreien Teil des Sediments oxidieren Sulfid zu Sulfat, indem sie die dabei anfallenden Elektronen über die stromleitenden Fasern zum Sauerstoff an der Sedimentoberfläche fließen lassen. Damit können sie als einzige Organismen das Sulfid in einer Zone verbrauchen, in der es keinen Sauerstoff gibt: ein großer Vorteil gegenüber konkurrierenden Mikroorganismen.



Die Mikrobe des Jahres 2024, das Kabelbakterium *Candidatus Electronema*, 10.000fach vergrößert, bildet „Kabelsalat“. Aufnahme: Pia B. Jensen, Aarhus (CC BY 4.0).

Indem sie durch ihre Stromleiter eine indirekte Verbindung zum Sauerstoff an der Sedimentoberfläche zur Verfügung stellen, können sie den mikrobiellen Schadstoffabbau in sauerstofffreien Zonen erheblich ankurbeln. In Reisfeldern reduzieren sie außerdem die Bildung des Treibhausgases Methan. Eines Tages könnten Kabelbakterien möglicherweise sogar als biologisch abbaubare Stromkabel genutzt werden.

www.vaam.de

Privatdozent Dr. Markus Göker vom Leibniz-Institut DSMZ-Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen GmbH in Braunschweig wurde im vergangenen Dezember in Anerkennung seiner **Verdienste im Bereich Taxonomie von Bakterien mit dem international renommierten Bergey Award** des 1936 gegründeten *Bergey Trust* ausgezeichnet. Der Mikrobiologe studierte an der Eberhard Karls Universität Tübingen, erlangte dort 2003 den akademischen Grad PhD und habilitierte

2008 ebendort. Seitdem ist Privatdozent Göker am Leibniz-Institut DSMZ beschäftigt; seit 2021 leitet er die Gruppe Phylogenomik und Nomenklatur. Außerdem betreut Göker an der DSMZ die *List of Prokaryotic Names with Standing in Nomenclature* (LPSN) und den Typstammsnomserver (TYGS). In den letzten fünf Jahren war er *Web of Science Highly Cited Researcher*. Als Sekretär der *Judicial Commission* des *International Committee on Systematics of Prokaryotes* (ICSP) trägt er zu deren Stellungnahmen zum *International Code of Nomenclature of Prokaryotes* (ICNP) bei und gehört zudem zur Redaktion der renommierten Fachzeitschrift *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*.

www.dsmz.de

AUSSTELLUNG

Seit gut 200 Jahren wissen die Menschen, dass die Erde einst von sonderbaren Wesen bevölkert



Die Darstellung von Dinosauriern hat sich mit der Zeit gewandelt. Foto: Pfalzmuseum für Naturkunde.

wurde, die wir heute als Saurier kennen. Einzig Fossilien wie versteinerte Knochen, Zähne oder Trittsiegel zeugen von ihrer Existenz. Dennoch glauben wir über diese Tiere zu wissen, wie sie aussahen und lebten. Seit den Anfängen hat die Wissenschaft mit Hilfe von Künstlern ihre Erkenntnisse über Saurier in Bildern und Modellen zum Leben erweckt. Zeitgenössische Interpretationen formten und lenkten unsere Vorstellung der Vergangenheit. Sie sind die eigentlichen Erfinder der Urzeit. Neue Funde und Erkenntnisse verändern dieses Bild jedoch immer wieder. Daher sieht die Urzeit heute anders aus als früher. Die Ausstellung **„Saurier – Die Erfindung der Urzeit“**, die bis zum **07. April 2024** im Pfalzmuseum für Naturkunde in Bad Dürkheim zu sehen ist, nimmt ihre Besucher anhand fünf ausgewählter Beispiele – dem Handtier, den Rückensegelechen, dem Iguanodon, den Sauropoden und den großen Theropoden – mit auf eine faszinierende Reise zu den Sauriern und dem Wandel ihrer Darstellung durch die Zeit. Neben Originalfossilien und Abgüssen fossiler Saurier finden sich zeitgenössische Modelle und Zeichnungen sowie zweisprachige Informationstafeln, welche die früheren und aktuellen Vorstellungen lebendig werden lassen.

www.pfalzmuseum.de



Die Präsidentin des Bergey's Trust Prof. Dr. Martha Trujillo (rechts) übergibt den Bergey Award an Priv.-Doz. Dr. Markus Göker vom Leibniz-Institut DSMZ. Foto: BISMis 2023.

SCHULPOLITIK

Die Zukunft der schulischen Bildung im Fokus

Zum Jahresende 2023 hat sich bildungspolitisch einiges getan. So nahm der VBIO im Rahmen von Verbändeanhörungen Stellung [1, 2] zur „Empfehlung der Kultusministerkonferenz zur Stärkung der mathematisch-informatisch-naturwissenschaftlich-technischen (MINT-) Bildung“ und zu den „Weiterentwickelten Bildungsstandards für das Fach Biologie (MSA)“. Für die Sicherstellung von Qualitätsstandards im Biologieunterricht ist es wichtig, dass hier die Stimme der Biologie erhoben wird und die besondere Rolle und Bedeutung des Faches Biologie deutlich gemacht wird. Darüber hinaus wird den VBIO in den nächsten Monaten das Gutachten der Ständigen Wissenschaftlichen Kommission der Kultusministerkonferenz (SWK) „Lehrkräftegewinnung und Lehrkräftebildung für einen hochwertigen Unterricht“ [3] beschäftigen. Denn eine bedarfsgerechte Versorgung des Schulsystems mit qualifizierten Fachlehrkräften ist essentiell für einen guten Unterricht.

Gemeinsame Bildungsstandards und einheitliche Prüfungsordnungen haben seit dem „PISA-Schock“ ab 2000 in der Bildungspolitik an Bedeutung gewonnen. Denn ohne Zielkonsens ist eine koordinierte Steuerung von Bildungsprozessen nicht möglich. Am 18.06.2020 beschloss die KMK „Bildungsstandards für die Allgemeine Hochschulreife im Fach Biologie“ [4]. Sie sind eine Weiterentwicklung der Vorgaben der entsprechenden Einheitlichen Prüfungsanforderungen in der Abiturprüfung (EPA) und traten an ihre Stelle. Insbesondere die kompetenzorientierten Elemente der EPA wurden aufgegriffen und fortgeschrieben.

Weiterentwicklung der Biologie-Bildungsstandards für die Sekundarstufe I

Da die derzeit noch gültigen „Bildungsstandards im Fach Biologie für den Mittleren Schulabschluss“ bereits aus dem Jahr 2003/2004 stammen [5], führte das Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen (IQB) im Auftrag der KMK noch im gleichen Jahr der Verabschiedung der Biologiestandards für die Allgemeine Hochschulreife (2020) eine Bedarfsanalyse [6] durch. Dabei

wurde erkannt, dass bei den Bildungsstandards für die Sekundarstufe I die Anforderungen an Leistungserwartungen aktualisiert und inzwischen veränderte Kontexte des schulischen Kompetenzerwerbs berücksichtigt werden müssen. Auch die Anforderungen des Lernens mit digitalen Medien (KMK-Strategie „Bildung in der digitalen Welt“ [7]) müssen in die Bildungsstandards aufgenommen werden.

Auf der Grundlage der Entwurfsfassung vom 16.10.2023 wurden Verbände gebeten, Rückmeldung zu den „Weiterentwickelten Bildungsstandards für das Fach Biologie (MSA)“ zu geben. Im Rahmen dieses Anhörungsverfahrens haben der VBIO und die Fachsektion Didaktik der Biologie (FDdB) detailliert Stellung genommen und Vorschläge zur Konkretisierung der „verbindlichen fachlich-inhaltlichen Aspekte“ sowie zu den neu definierten Kompetenzbereichen im Fach Biologie gemacht. Darüber hinaus wurde darauf hingewiesen, dass fachlich relevante Fachmethoden ebenfalls aufgeführt werden sollten.

Der VBIO hofft, dass auch die Vorschläge zum konkreten Beitrag des Faches Biologie zur naturwissenschaftlichen Allgemeinbildung

(*Scientific Literacy*) Beachtung finden. Denn der VBIO ist überzeugt, dass dem Fach Biologie in der Auseinandersetzung mit tagesaktuellen und zukunftsrelevanten Herausforderungen u. a. in den Bereichen Gentechnik, Gesundheit, Klimawandel, Biodiversität und Nachhaltigkeit eine Schlüsselrolle zukommt. Nachdrücklich wurde auf die Notwendigkeit präziser und verbindlicher Bildungsstandards in der Sekundarstufe I hingewiesen: Nur deren Einhaltung gewährleistet zentrale biologische Grundkenntnisse bei Schulabgänger/-innen sowie die Anschlussfähigkeit zur Oberstufe.

Der VBIO hob auch hervor, dass die Bedeutung der Biologie wie bei keiner anderen Disziplin weit über die eigenen fachlichen Grenzen hinausgeht. Die Biologie hat sich von einer eher deskriptiven zu einer explorativen Wissenschaft mit einer hohen Dynamik entwickelt. Sie setzt sich auf verschiedenen Systemebenen mit den Gesetzmäßigkeiten des Lebendigen auseinander und nutzt die Synthetische Evolutionstheorie als grundlegende Erklärungstheorie biologischer Phänomene und allgegenwärtiges Wirkprinzip.

Der VBIO und die FDdB haben zwischenzeitlich positives Echo und Zustimmung von weiteren Verbänden erhalten.

Stärkung der MINT-Bildung und die besondere Rolle des Faches Biologie

Auch bei der vorgelegten KMK-„Empfehlung zur Stärkung der mathematisch-informatisch-naturwissenschaftlich-technischen Bildung“ in der Entwurfsfassung vom 07.09.2023 handelt es sich um die Weiterentwicklung einer älteren Fassung – die vom 07.05.2009 [8]. Hier sah die KMK ebenfalls Überarbeitungs- und Anpassungsbedarf. Der VBIO begrüßte in seiner Stellungnahme grundsätzlich diese Weiterentwicklung. Er unterstrich dabei insbesondere den in der Empfehlung zum Ausdruck kommenden hohen Anspruch an die Qualität des

MINT-Unterrichts und machte in seiner Rückmeldung deutlich, dass die Förderung der MINT-Bildung (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik) angesichts der Herausforderungen einer sich wandelnden Welt ein zentrales gesellschaftliches Anliegen sein muss. Deshalb plädierte der VBIO u. a. auch für die Einbindung der 17 *Sustainable Development Goals* (SDGs) in den MINT-Bereich, um den Beitrag der Bildung für gesellschaftliche und globale Herausforderungen besser abzubilden. Insbesondere Biologielehrkräfte können Themen wie Umweltschutz und Nachhaltigkeit besonders gut in den MINT-Unterricht integrieren, um das Bewusstsein für aktuelle globale Herausforderungen zu schärfen und nachhaltige Lösungen zu finden.

In diesem Kontext wird deutlich, dass der Biologieunterricht eine besondere Rolle im Kanon der MINT-Fächer einnimmt. Der VBIO hob hervor, dass der interdisziplinäre Charakter biologischer Fragestellungen es ermöglicht, komplexe MINT-Konzepte auf greifbare und relevante Weise zu vermitteln und das Interesse der Schüler/-innen zu wecken. Dazu bedarf es hoher fachlicher Kompetenzen und kontinuierlicher Fort- und Weiterbildung der Lehrkräfte. Der VBIO forderte daher eine verstärkte Betonung der Fachwissenschaft in der universitären Ausbildung von Lehrkräften, die mit einer ersten fachdidaktischen Ausbildung eng verzahnt sein muss. Denn nur auf der Basis fachwissenschaftlich fundierter Kenntnisse können Lehrkräfte den Erfordernissen eines gelingenden MINT-Unterrichts gerecht werden. Auf dieser Grundlage lassen sich erfolgreich methodisch-didaktische Strategien aufbauen, die lernförderlich sind und einen zielgruppenspezifisch optimalen Unterricht gewährleisten. Nur fachlich sichere Lehrkräfte können Schüler/-innen für MINT-Fächer begeistern und motivieren.

Ferner wies der VBIO darauf hin, dass die rasante Weiterentwicklung

in den MINT-Fächern es erforderlich macht, die solide fachliche Basis in der universitären Ausbildung von Lehrkräften durch gezielte und kontinuierliche Fort- und Weiterbildungsangebote zu ergänzen. So kann die Voraussetzung geschaffen werden, dass Lehrkräfte den Anschluss an den aktuellen Wissensstand dauerhaft halten können, um die notwendige Qualität der fachlichen Kenntnisse ein Berufsleben lang aufrechterhalten zu können. Insbesondere Biologielehrkräfte sind in den letzten Jahren durch aktuelle Entwicklungen in vielen Bereichen (siehe oben) extrem gefordert. Dazu kommen laufend technologische Fortschritte, die die Dynamik neuer Erkenntnisgewinnung in der Biologie erheblich beschleunigen. Deshalb muss ein ausreichendes Angebot an aktuellen Fort- und Weiterbildungsmaßnahmen sichergestellt werden. In diesem Kontext wies der VBIO auf gute Kooperationsmöglichkeiten mit Verbänden hin, die die staatliche Lehrerfortbildung schon heute durch qualitativ hochwertige Fortbildungsveranstaltungen unterstützen, wie es z. B. der VBIO durch die Online-Seminarreihe „Faszination Biologie“ (siehe Beitrag hierzu im *BiuZ*-Heft 2/2023, Seite 114 ff. und www.vbio.de/informationsangebote/faszination-biologie) mit Life-Vorträgen namhafter Wissenschaftler/-innen anbietet.

MINT-Bildung braucht qualifizierte Akteur/-innen. Insbesondere Biologielehrkräfte sind in der schulischen Praxis aufgrund ihrer fachlichen Vielseitigkeit für die MINT-Bildung sehr wertvoll. Der VBIO forderte daher konkrete Maßnahmen zur Bereitstellung von personellen und finanziellen Ressourcen, um die Potenziale der Lebenswissenschaften für die MINT-Bildung zu stärken. Prof. Dr. Kerstin Kremer, Vorsitzende der FDdB im VBIO, erläuterte: „Die naturwissenschaftlichen Fachbereiche brauchen eine solide personelle und finanzielle Ausstattung, um ihren Aufgaben in

der MINT-Lehrkräftebildung nachzukommen. Die Anerkennung und Bedeutung der MINT-Bildung sollten nicht nur auf dem Papier stehen, sondern müssen sich auch in der Realität widerspiegeln.“

Zentrale Rolle der Lehrkräftegewinnung und Lehrkräftebildung

Am 8.12.2023 hat die SWK in einem über 150-seitigen Gutachten [9] die zentrale Frage der Lehrkräftegewinnung und Lehrkräftebildung für einen hochwertigen Unterricht thematisiert. Die 11 zentralen Forderungen der SWK, die die grundsätzliche Zustimmung des VBIO verdienen, wurden in vier Cluster zusammengefasst:

1. Optimierung von Prognosen zum Lehrkräfteeinstellungsangebot und -bedarf: Eine verlässliche Datenerhebung soll Transparenz über Annahmen in Prognosen sicherstellen, um Bedarf und Angebot bedarfsgerecht und vergleichbar modellieren zu können.
2. Gewinnung von Studierenden, Sicherung von Studierenerfolg und phasenübergreifende Optimierung der Ausbildung: Durch gezielte Ansprache von Studienberechtigten für das Lehramtsstudium und eine Verbesserung der Studierbarkeit sowie die Stärkung der sozialen und akademischen Integration in den Hochschulen sollte der Stellenwert der Lehrkräftebildung an Universitäten durch strukturelle Verankerung sowie gezielte Anreize erhöht werden. Außerdem sollten phasenübergreifende, verlässliche Abstimmungsstrukturen und Verfahren des Qualitätsmanagements etabliert sowie der Übergang zwischen erster und zweiter Phase weiterentwickelt werden.
3. Organisation und Gestaltung einer wissenschaftsbasierten Qualifizierung von Lehrkräften: Hier wird ein kohärentes Curriculum über die erste und zweite Phase

sowie die Berufseinstiegsphase angestrebt, das die spezifischen Potenziale der Phasen nutzt und einen kumulativen Kompetenzaufbau ermöglicht. Vorbereitungsdienst und Berufseinstiegsphase müssen dabei weiterentwickelt und die Unterrichtsverpflichtung zugunsten der Qualifizierung minimiert werden. Beim Quereinstieg ins Lehramt fordert die SWK die verbindliche Einführung eines vollwertigen Aufbaustudiengangs.

4. Organisation und Gestaltung einer forschungsbasierten Fort- und Weiterbildung: forschungsbasierte, bedarfsorientierte und qualitätsgesicherte Fortbildungen bedürfen transparenter Modelle für die Finanzierung und die Zuweisung von Fortbildungsbudgets an Schulen. Darüber hinaus müssen Weiterbildungen und Karrierewege auch für Leitungs- und Assistentenfunktionen in Schule und Unterricht ausgebaut werden.

Das SWK-Gutachten betont völlig zu Recht die Bedeutung verlässlicher Prognosen, die notwendige, gezielte Ansprache von potenziellen Lehrkräften, die Optimierung von Studienbedingungen, die Etablierung eines klaren Qualifikationssystems, die Integration von Theorie und Praxis in der Lehrerausbildung sowie die kontinuierliche Kompetenzentwicklung durch

wissenschaftsbasierte Fort- und Weiterbildung. Nicht zuletzt empfiehlt sie eine quantifizierbare Fortbildungsverpflichtung für alle Lehrkräfte.

Die Umsetzung der SWK-Empfehlungen erfordert allerdings eine konsequente Zusammenarbeit aller unterschiedlicher Akteure auf verschiedenen Ebenen – einschließlich der Länder, des Bundes und der wissenschaftlichen Gemeinschaft. Dies ist eine enorme Herausforderung, die in den nächsten Monaten in mehreren öffentlichen Online-SWK-Talks weiter diskutiert werden soll. Die Anmeldung und ein Überblick über den aktuellen Stand der Diskussion ist über den folgenden Link möglich: <https://pretix.eu/swk/swktalk-s3/>

Der VBIO bringt sich hier ebenfalls in die Diskussion ein und wird sich mit Blick auf die besondere Rolle und Bedeutung des Schulfaches Biologie (siehe oben) auch für geeignete, zeitgemäße und zukunftsorientierte Rahmenbedingungen einsetzen. Denn nur so lässt sich sicherstellen, dass ausreichend gut qualifizierte Lehrkräfte ausgebildet werden, die es verstehen, die Schüler/-innen mitzunehmen und biologische Erkenntnisse nachhaltig zu verankern. Dazu bedarf es neben einem verbesserten Lehramtsstudium und einem harmonisierten Vorbereitungsdienst, auch praktikable Quereinstiegsmöglichkeiten und

eine gesicherte Finanzierung qualitätsgeprüfter Fort- und Weiterbildungsmaßnahmen.

Literatur

- [1] www.vbio.de/aktuelles/details/vbio/fachliche-kompetenz-von-lehrenden-und-lernenden-als-schluesel-vbio-setzt-sich-fuer-eine-staerkerung-der-mint-bildung-ein-1
- [2] www.vbio.de/aktuelles/details/vbio-und-fddb-kommentieren-entwurf-zur-neufassung-der-weiterentwickelten-zu-biologie-bildungsstandards-fuer-die-sekundarstufe-i-msa
- [3] Pressemitteilung der KMK zum SWK-Gutachten vom 08.12.2023: www.kmk.org/aktuelles/artikelansicht/qualitaet-der-lehrkraeftebildung-sichern.html
- [4] www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Biologie.pdf
- [5] www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Biologie.pdf
- [6] www.iqb.hu-berlin.de/bista/WeiterentwicklungBiSta/
- [7] www.kmk.org/themen/bildung-in-digitalen-welt/strategie-bildung-in-digitalen-welt.html
- [8] www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2009/2009_05_07-Empf-MINT.pdf
- [9] SWK-Gutachten vom 08.12.2023: www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/KMK/SWK/2023/SWK-2023-Gutachten_Lehrkraeftebildung.pdf

*LRSD' a. D. Marga Radermacher,
Sprecherin der Landesverbände
im VBIO
Dr. Carsten Roller, VBIO*

AUS DEM VBIO

Parlamentarischer Abend Sustainability

Der VBIO und die mathematisch-naturwissenschaftlichen Gesellschaften aus Mathematik, Chemie, Physik und Geowissenschaften informierten Bundestagsabgeordnete über Lösungen aus Mathematik und Naturwissenschaften für eine nachhaltige Entwicklung.

Unter dem Motto „Wissenschaft verbindet“ luden der VBIO und die Deutsche Gesellschaft für Physik, der Dachverband der Geowissen-

schaften, die Deutsche Mathematiker-Vereinigung und die Gesellschaft Deutscher Chemiker am 14. November zu einem gemeinsamen parla-

mentarischen Abend in das Haus der Parlamentarischen Gesellschaft in Berlin ein. Zahlreiche Abgeordnete und Referent/-innen folgten der Einladung. Sie informierten sich über die Herausforderungen einer nachhaltigen Transformation und erhielten Einblicke in aktuelle Forschungsprojekte. Es wurde deutlich, wie Erkenntnisse und Technologien aus Mathematik und Naturwissenschaften dazu beitragen können, unsere Zukunft nachhaltig zu gestalten.

Herausforderung Nachhaltigkeit

Im Fokus des Abends standen vertiefte Gespräche an Thementischen zu den Bereichen „Energie für urbane Räume“, „Gesundheit“, „Wasser“, „Materialien der Zukunft“, „Nachhaltige Kreisläufe“, „Erneuerbare Energien“ sowie „Recycling“ und „Anpassung an den Klimawandel“. Die Abgeordneten nutzten die Gelegenheit, sich aus erster Hand zu informieren und gezielte Fragen zu stellen. Der Einstieg in die Gespräche gestaltete sich einfach, da die Expert/-innen ihre Arbeitsbereiche mithilfe anschaulicher Exponate

vorstellten wie einem Experimentierkoffer zur Durchlässigkeit von Gesteinen oder einem Modell zur Funktionsweise von CRISPR/Cas. Ebenfalls ein Hingucker waren Installationen mit Riesennikroben aus Plüsch.

Interdisziplinarität...

An den einzelnen Thementischen befanden sich Vertreter/-innen verschiedener Disziplinen. Dadurch entwickelten sich rasch spannende interdisziplinäre Dialoge. In einigen Gesprächen wurden auch Handlungsbedarfe für die Politik identifiziert.

... und Leidenschaft

Insgesamt wurde deutlich, dass die Expert/-innen aus Mathematik und Naturwissenschaften leidenschaftlich für ihre Forschungsgebiete engagiert sind. Durch ihre Arbeit präsentierten sie Lösungsoptionen zur Erreichung der *Sustainable Development Goals*, was bei den Teilnehmer/-innen aus den Abgeordnetenbüros auf Interesse stieß. Die Notwendigkeit interdisziplinärer Denk- und Forschungsansätze wurde im Verlauf des Abends deutlich und ebenfalls von den Abgeordneten positiv wahrgenommen. Sie lobten das gemeinsame Auftreten der mathematisch-naturwissenschaftlichen Disziplinen bei diesem Parlamentarischen Abend.

Beiträge aus den Biowissenschaften

Aus den Biowissenschaften beteiligten sich Prof. Dr. Beate Averhoff zum Thema Krankenhauskeim *Acinetobacter baumannii*, Dr. Tobias Brüggemann zu den Möglichkeiten von *Genome Editing* bei Bäumen und Prof. Volker Müller mit seinem Beitrag zur Bioenergieproduktion und Konversion mit Mikroben mit spannenden Exponaten an der Veranstaltung (Abbildung 1).

*Kommunikatorenteam
„Wissenschaft verbindet“*



ABB. 1 Sie vertreten die Biowissenschaften beim parlamentarischen Abend von „Wissenschaft verbindet“: Dr. Tobias Brüggemann, Prof. Beate Averhoff und Prof. Volker Müller (von links)

AUS DEM VBIO

Lebensmittel mit oder ohne Gentechnik?

Die Kennzeichnung von Lebensmitteln als „gentechnikfrei“ ist eine Herausforderung in Zeiten neuer Züchtungstechniken. VBIO und BioWissKomm informieren in einer Publikation über die Neuen Genomischen Techniken.

Die „Neuen Genomischen Techniken“ (NGT) sind durch den Vorschlag der EU-Kommission zur Überarbeitung des Gentechnikrechts wieder in die Schlagzeilen gerückt. Auch der VBIO hat sich dazu positioniert (https://t1p.de/vbio_wgg_eu_kommission_ngt). Er hat dabei

insbesondere begrüßt, dass die Beurteilung von Pflanzen zukünftig verstärkt anhand genetischer Äquivalenz zu konventionell gezüchteten Sorten erfolgen soll. Andere Länder handhaben dies bereits ähnlich und die Pflanzen und Produkte, die mit den Neuen Genomischen Techniken

erzeugt wurden, werden zunehmend Einzug in die Lebensmittelproduktion nehmen. Was bedeutet dies heute und in Zukunft für eine Kennzeichnung von Lebensmitteln als „ohne Gentechnik“? Was genau ist damit gemeint? Was wird erfasst? Nur die „klassischen“ gentechnischen Ansätze oder auch die NGT?

Schon länger haben verschiedene Organisationen Zweifel an der Aussagekraft einer Kennzeichnung von Lebensmitteln als „gentechnikfrei“. Gemeinsam mit dem VBIO hat BioWissKomm, eine Initiative für Wissenschaftskommunikation, das Gespräch mit dem Lebensmittelein-

zelhandel gesucht. Dieser erwirbt das entsprechende Siegel gegen Gebühr von einem Lizenzgeber und zeichnet damit bestimmte Produkte aus, die den gesetzlichen Anforderungen entsprechen (EG-Gentechnik-Durchführungsgesetz vom 22. Juni 2004, <https://www.gesetze-im-internet.de/eggentdurchfg/BjNR124410004.html>). Manche Artikel sind kaum noch ohne ein solches Siegel erhältlich, was nicht gerade zur vielbeschworenen „Wahlfreiheit“ beiträgt.

In den offenen und konstruktiven Gesprächen mit Vertretern des Lebensmitteleinzelhandels wiesen diese auch auf die Position des Bundesverband des Deutschen Lebensmittelhandels hin ([https://www.bvlh.net/informationen/verbandspostionen, Position zum EU-Vorschlag über Neue Genomische Techniken](https://www.bvlh.net/informationen/verbandspostionen,Position_zum_EU-Vorschlag_über_Neue_Genomische_Techniken)). Darin unterstützen die Verbandsmitglieder mit großer Mehrheit den Kommissionsvorschlag, der die

Rechtsvorschriften hinsichtlich Neuer Genomischer Techniken an den wissenschaftlichen und technischen Fortschritt anpasst. Daher sollte – so der Verband – der Umgang mit NGT wissenschaftsbasiert und im Einklang mit dem Vorsorgeprinzip erfolgen, wozu der Vorschlag der EU-Kommission Ansätze liefere. Aus Sicht der Unternehmen bilde die Wahrung der Lebensmittelsicherheit die Grundlage der Aktivitäten der Unternehmen. Deutlich wurde in den Gesprächen auch die Notwendigkeit, dass Vertreter der Wissenschaft umfassendere und verständliche Information sowohl für den Lebensmitteleinzelhandel als auch für die Verbraucher zur Verfügung stellen müssen.

VBIO und BioWissKomm haben diesen Hinweis ernst genommen und in einer informellen Arbeitsgruppe ein Informationspapier erstellt, das die Grundlagen der Neuen Genomischen Techniken beschreibt,



Abb.: Alexa über www.pixabay.com.

häufige Missverständnisse aufklärt und offene Fragen anspricht. Dieses Papier stellen wir jetzt den BiUZ-Lesern und der allgemeinen Öffentlichkeit zur Verfügung (https://t1p.de/NGT_Lebensmittel). Die beteiligten Vertreter der Wissenschaft freuen sich auf die Fortführung des konstruktiven Dialogs mit dem Lebensmitteleinzelhandel – auch über den Kreis der bisher Beteiligten hinaus.

Wolfgang Nellen, BioWissKomm und Editor-in-chief der BiUZ, Kassel

AUS DEM VBIO

Bilanz und Ausblick: Bundesdelegiertenkonferenz 2023

Die Bundesdelegiertenversammlung 2023 des VBIO fand am 27. Oktober 2023 online statt. Im Mittelpunkt standen Berichte über die aktuellen Aktivitäten und die Finanzsituation. Beschlossen wurde auch eine neue Beitragsordnung für das Jahr 2024.

Der Präsident des VBIO, Prof. Dr. Karl-Josef Dietz, unterstrich in seinem Bericht die wesentliche Bedeutung der Biologie in vielen Lebensbereichen. So habe die Biologie unter anderem eine zentrale Position im One-Health-Konzept. Natur, biologische Vielfalt und der Wert der Biosphäre in ihrer Gesamtheit seien nicht zu überschätzen. Wichtige Aufgabe des VBIO sei es, die Biologie und ihren Stellenwert bekannt zu machen und die Bevölkerung für die Biologie zu begeistern. Notwendig sei es auch darauf hinzuwirken, dass Wissenschaft und Forschung

machbar blieben. „Als gesuchter Ansprechpartner und kompetenter Dachverband der Biologie sei der VBIO auf erkennbarem Erfolgskurs, wie unter anderem seine Aktivitäten zum Thema „Zugang und gerechter Vorteilsausgleich“ (ABS = *Access and Benefit Sharing*) sowie zur Besetzung der „Zentralen Kommission für Biologische Sicherheit“ belegten“, so Dietz. Der VBIO engagiere sich auf verschiedenen Wegen – etwa über das Verbandsjournal „Biologie in unserer Zeit“ – in der Wissenschaftskommunikation und bereite dazu auch ein Positionspapier



ABB. Die Bundesdelegiertenversammlung 2023 fand online statt. Bild: Alexandra Koch bei Pixabay (verändert).

vor. Der VBIO sei jung, präsent und dynamisch und biete verschiedene Veranstaltungen, Workshops und Preise für Nachwuchskräfte an.

Fachgesellschaften im VBIO

Die Sprecherin der Fachgesellschaften, Prof. Dr. Felicitas Pfeifer, gab einen Einblick in die Aktivitäten mit den Fachgesellschaften. Diese treffen sich in regelmäßigen Abständen

online, um sich über die aktuellen Aktivitäten auf dem Laufenden zu halten, sich auszutauschen und gemeinsame Aktionen zu besprechen. Dabei entwickeln sich hochinteressante und teils auch kontroverse Diskussionen zu Themen wie etwa der „Rolle von Biolog/-innen in der Biomedizin“ oder zu „Wissenschaftlichen Tierversuchen“. Zum letztgenannten Thema ist auch ein VBIO-Diskussionsforum in Vorbereitung.

Landesverbände im VBIO

Marga Radermacher, Sprecherin der Landesverbände, berichtete aus der Arbeit der Landesverbände, die dem VBIO in ihrer jeweiligen Region ein Gesicht geben. Die Aktivitäten sind dabei so unterschiedlich wie die Landesverbände selbst. Als Beispiele seien hier nur genannt: Information und Beratung von Lehrenden und Studierenden, Online-Stammtische, Exkursionen, Vernetzung mit außerschulischen Bildungsorten (Museen, naturwissenschaftlichen Sammlungen, Schülerlabore), Unterstützung studentischer Gruppen, Biologentage sowie Vorträge und Wettbewerbe. Die Mehrzahl der Landesverbände verleiht darüber hinaus jedes Jahr den Karl-von-Frisch-Preis für

Abiturient/-innen mit exzellenten Leistungen im Fach Biologie.

Begrenzte finanzielle Ressourcen

Unter dem Tagesordnungspunkt „Finanzen“ stellte der Schatzmeister, Prof. Dr. Christian Lindermayr, den Abschluss für das Jahr 2022 vor. Dieser wurde von den Kassenprüfern ordnungsgemäß und ohne Beanstandungen geprüft. Die BDV 2023 folgte daher der Empfehlung der Kassenprüfer und entlastete das Präsidium des VBIO einstimmig für das Jahr 2022.

Der Schatzmeister des VBIO erläuterte in seinem Statement noch einmal die zwingende Notwendigkeit einer Erhöhung der Mitgliedsbeiträge. Die im vergangenen Jahr von der BDV beschlossene stufenweise Erhöhung würdigte er als eine Entscheidung mit Augenmaß in Zeiten steigender Kosten, die die privaten Budgets der VBIO-Mitglieder ohnehin strapazierten. Auf diese Weise konnte die in der Bundesdelegiertenversammlung 2022 ebenfalls diskutierte einstufige Erhöhung vermieden werden.

Die finanzielle Lage des VBIO verdient weiterhin Aufmerksamkeit. Nach wie vor gibt es ein strukturel-

les Defizit. Dieses Defizit konnte durch die erste Stufe der bei der BDV 2022 beschlossenen Beitragsanpassung für das Jahr 2023 ausgeglichen werden. Bereits absehbare Ausgabensteigerungen können in 2024 durch die bereits in 2022 beschlossene zweite Stufe der Anpassung der Mitgliedsbeiträge aufgefangen werden. Die vom Schatzmeister vorgelegte Budgetplanung für das Jahr 2024 wurde ebenso wie die angepasste Beitragsplanung mit großer Mehrheit bestätigt. Die neue Beitragsordnung sieht ab dem 01.01.2024 eine Erhöhung der Mitgliedsbeiträge für die Voll- und Senior-Mitgliedschaft um weitere fünf Euro vor. Die Basis-Mitgliedschaft ist von der Beitragserhöhung nicht betroffen.

Die Bundesdelegiertenversammlung 2023 hat die großen Herausforderungen aufgezeigt, denen sich der VBIO stellt. Aber sie hat ebenfalls die Basis dafür gelegt, dass sich der VBIO auch weiterhin für die biowissenschaftliche Community einsetzen und nach außen als „der“ Ansprechpartner der Biologie wirken kann.

Kerstin Elbing, VBIO

BAUER WILLIS KRAUT UND RÜBEN

Teil 1: Warum ich keine Biodiversität mag

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.

Damit eines gleich klar ist: Ich mag auf meinem Acker keine Biodiversität. Auf meinem Acker soll nur Weizen oder nur Zuckerrüben oder nur Raps stehen und sonst nichts. Wenn

doch etwas Anderes versucht, sich zu etablieren, hole ich die große Spritze raus und weg ist es. Ich bin mit dem Wunsch, auf dem Acker nur eine „Reinkultur“ stehen zu

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.

haben, nicht allein. (Übrigens: eine Monokultur ist etwas anderes. Sie bedeutet, dass die gleiche Kultur mehrere Jahre hintereinander auf dem Acker steht). Mein Freund Manfred ist Bio-Bauer und auch er vernichtet das Unkraut. Er fährt mehrfach mit dem Striegel durchs Getreide, verbraucht dabei mehr Diesel und zerstört die Gelege der bodenbrütenden Vögel wie Feldlerche und Kiebitz. Anders geht es nicht, denn er setzt keine chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmittel (Sie würden vermutlich „Pestizide“ sagen) ein. Die Unkrautbekämpfung ist übrigens nicht neu. Vor etwa 12.000 Jahren begannen Menschen zwischen Euphrat und Tigris damit, Pflanzen zu kultivieren (Agri-Kultur) und dazu alles, was nicht zu der gleichen Kultur gehörte, von Hand zu entfernen. Das war die erste Unkrautbekämpfung, der erste Pflanzenschutz. Warum machte man es damals und warum heute immer noch? Das Unkraut steht mit den Kulturpflanzen in Konkurrenz um Wasser, Licht und Nährstoffe. Wir Landwirte helfen beim *survival of the fittest* etwas nach; Charles Darwin lässt grüßen.

Nun werden Sie sagen, dass Biodiversität aber sehr wichtig ist für das Überleben der Menschheit. Ich möchte Sie gerne fragen, was Sie persönlich unter Biodiversität konkret verstehen. Ich bin mir sicher, dass die Antworten sehr unterschiedlich ausfallen werden, je nachdem, in welchem Bereich Sie Ihren Beruf ausüben. Wahrscheinlich käme so etwas heraus wie: „möglichst viele Arten und davon möglichst viel, also eine intakte Natur, so wie früher.“ Beim Begriff „so wie früher“ müssen wir uns jetzt nur noch darauf einigen, wie weit zurück wir gehen wollen. Ist es die Zeit, als in der Nähe von Düsseldorf unser Urahn siedelte, dem Mammut nachstellte und es schließlich ausrottete? Oder ist es die Zeit von Ar-



ABB. 1 Was hier recht „unordentlich“ aussieht, ist eine sorgfältig gebaute „Benjeshecke“ aus Schnittgut und Totholz. Sie bietet Brutstätten für Vögel und Unterschlupf für eine Vielzahl an Insekten und Kleintieren. Durch Vögel und Wind werden Samen von Wildpflanzen eingebracht, die die Hecke mit der Zeit verdichten und begrünen.

minius, der kurz nach Christi Geburt in Germaniens undurchdringlichen Wälder den Römern einen Denkmäler verpasste? Oder ist es doch das Mittelalter, wo unglaublich viel Holz für den Bau von Häusern und zum Heizen verbraucht wurde? So ganz einfach ist die Definition nicht.

Ich will jetzt nicht weiter provozieren und Ihnen sagen, dass ich als Landwirt Biodiversität kann. Ich kann Hecken anlegen, ich kann Blühstreifen aussäen, ich kann Teiche baggern, Nistkästen aufhängen, Totholzhecken (= Benjeshecke, Abbildung 1) aufschichten. All das kann ich. Im letzten Herbst erst habe ich zusammen mit unserem Sohn eine 60 Meter lange Benjeshecke angelegt. Das war richtig viel Arbeit. Wir haben das gemacht, weil wir Freude am praktizierten Naturschutz haben. Geld dafür gab es nicht.

Wir müssen aber über Geld reden. Wenn ich sage, dass wir Bauern Biodiversität können, dann ist das richtig, aber nur die halbe Wahr-

heit. Wir Bauern betreiben nämlich Land-Wirtschaft, um damit Geld zu verdienen. Ich weiß, in bestimmten Kreisen ist Geldverdienen verpönt, aber ich bin nun mal ein Kapitalist und da wir Kinder und Enkel haben, bin ich auch noch nicht die letzte Generation. Ich habe auch eine Lösung, wie es gehen kann. Auf einem Workshop des Bundesamtes für Naturschutz, an dem mit mir drei Landwirte und 21 Naturschützer teilnahmen, haben wir uns auf einen einfachen und genialen Satz geeinigt: „Macht Naturschutz zum Betriebszweig“. Dann ist Naturschutz für uns planbar – es gibt konkrete Ziele, deren Erreichung auch messbar ist. Wenn der Satz der Politik „Öffentliches Geld für öffentliche Leistung“ stimmt, dann sind wir uns einig, dass unsere Leistungen für den Naturschutz auch etwas wert sind. Ich höre Sie jetzt laut nicken.

*Willi Kremer-Schillings,
Rommerskirchen*

MEINUNG

Was forstliche CO₂-Zertifikate tatsächlich wert sind

Der VBIO setzt sich für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Erde und den Erhalt der Biodiversität ein. Christian Körner, Mitglied des Editorial Boards der BiuZ hat einen Gastbeitrag für die „Neue Züricher Zeitung“ (NZZ) verfasst und sich zum Greenwashing durch Zertifikatehandel mit Holz als Biomassenspeicher geäußert. Seine fachliche Expertise deckt hier Zusammenhänge auf, die für politische Entscheidungen wichtig sind. Wir danken der NZZ für die Genehmigung des gekürzten Nachdrucks.



Mit Waldbäumen kann man entweder Kohlenstoff im Holz speichern oder das Holz als nachwachsenden, nahezu CO₂-neutralen Rohstoff nutzen. Einige Forstbetriebe sind auf die Idee gekommen, sich die Bildung von Holzvorräten im Wald mit CO₂-Zertifikaten abgelden zu lassen. Das Konzept beruht auf der für einen bestimmten Zeitraum unterlassenen Nutzung des Waldes. Der so über sein typisches Erntealter von etwa 100 Jahren hinaus ungenutzte Wald legt weiter Kohlenstoff im Holz fest. Würde man jedes Jahr nur jenes eine Prozent der Waldbäume ernten, die grad 100 Jahre alt wurden, bliebe der Vorrat (und damit der Kohlenstoffspeicher) insgesamt konstant – das Prinzip der nachhaltigen Forstwirtschaft. Da Bäume nicht beliebig größer werden, sondern irgendwann einmal natürlich sterben oder vom Förster geerntet werden, ist so ein Speicher zeitlich begrenzt. Das ist die harmlose Seite dieses Geschäftsmodells mit Ablaufdatum.

Die aus meiner Sicht schwerwiegendere Schwachstelle ist, dass in dieser Phase der Nicht-Nutzung das Potenzial des Waldes, fossile Bau- und Brennstoffe zu ersetzen, nicht genutzt wird. Das muss dem CO₂-Wert des erhöhten Holzspeichers gegengerechnet werden, womit nicht mehr viel vom Wert eines CO₂-Zertifikats übrigbleibt. Man kann also nicht gleichzeitig nutzen und mehr speichern.

Nun kann man sagen, man zögert die Nutzung nur 20 Jahre hinaus, wartet also, bis der hieb reife Waldanteil jeweils 120 Jahre alt ist, und dann beginnt man wieder mit der nachhaltigen Nutzung. Man entnimmt also nur, was jährlich wächst, aber auf diesem höheren Vorratsniveau. Diesen Vorratssprung hat man sich per Zertifikat einmal abgelden lassen. Sobald die nachhaltige Nutzung wieder einsetzt, bleibt der Vorrat konstant. Dabei wird ausgeblendet, dass in der Zeit der Nicht-Nutzung das Nutzholz einfach von woanders herkommt. Wenn viele Betriebe da mitmachen, muss letztlich das fehlende Holz importiert werden oder der Holzkonsum wird eingeschränkt, was ja niemand möchte. Es ist dem Klima völlig egal, ob das Nutzholz aus der Schweiz oder aus Finnland kommt. Das Nicht-Nutzen-CO₂-Zertifikat hätte nur dann den behaupteten CO₂-Speicherwert, wenn der Holzkonsum reduziert würde.

Beim Zertifikatehandel mit Biomasse gibt es immer den Wider-

spruch zwischen Speicherung (Kapital) und Zuwachs (Umsatz). Im Gegensatz zu einem Bankkonto kann man das Kapital in Baumbiomasse nicht beliebig hochfahren. Man kann dieses Reservoir auf einer gegebenen Fläche auch nur einmal füllen.

Eine Waldflächenvermehrung ist in der Schweiz kaum mehr möglich, ohne Acker- und Weideland aufzugeben. Im Gegensatz dazu kann man den Ertrag aus dem Umsatz, also den Holzzuwachs pro Fläche, bei konstantem „Kapital“ theoretisch ewig nutzen, wenn die Nutzung nachhaltig ist. Die mittlere Verweildauer von geerntetem Holz-Kohlenstoff (also z. B. als Dachbalken) im Wirtschafts-/Bau-Kreislauf beträgt etwa 20–25 Jahre: genau so lang, wie ein im Wald liegengelassener Baumstamm grob zu seiner biologischen Zersetzung braucht. Am Ende ist das mit der Fotosynthese ursprünglich aufgenommene CO₂ wieder in der Luft – ein ewiger Kreislauf!

Zertifikatehandel mit Biomassenspeicherung ist also zu einem großen Teil ein *Greenwashing*, weil es erstens ein Ablaufdatum hat und zweitens der Nutzung eines nachwachsenden Rohstoffes zuwiderläuft. Ich gönne den Forstbetrieben den Ertrag von Herzen. Es ist gut angelegtes Geld für die großartige Wald- und Wegpflege. Jene, die sich so „freikaufen“, sollten aber wissen, dass die gute Absicht allein nicht reicht, um so wirklich weniger CO₂ in die Luft zu entlassen. Das Problem ist nicht auf der Ebene einzelner Waldparzellen zu lösen. Ohne gleichzeitig reduzierten Holzkonsum, bewegt man sich in der Nähe eines Nullsummenspiels.

Am Ende besteht die Gefahr, dass man mit dem Zertifikat sein schlechtes Gewissen beruhigt, ohne dass der erhoffte ökologische Effekt eintritt. Damit sinkt auch der Druck, fossiles CO₂ gar nicht erst freizusetzen.

Christian Körner, Universität Basel

IMMUNBIOLOGIE

Immunabwehr fremder Nukleinsäuren – Thema mit Variationen

Ob DNA oder RNA, das Erbgut von Viren und Mikroorganismen zeigt Infektionen an. Die zellfremden Nukleinsäuren werden von den cGAS (cyclic GMP-AMP-synthase) ähnlichen Mustererkennungsrezeptoren aufgespürt, die dabei enzymatisch aktiv werden und zyklische Nukleotide als sekundäre Botenstoffe bilden. Diese wiederum initiieren Signalketten, die das Alarmsignal in den Zellkern weiterleiten und die angeborene Immunabwehr anschalten. Das Erbe von Bakterien, die mit entsprechenden Komponenten Phagen abwehren, haben Metazoa von Hydra bis zum Menschen für ihre angeborene Immunabwehr adaptiert.

Unter dem Stichwort zyklische Nukleotide rangieren an erster Stelle bislang die Mononukleotide cAMP (2,3-zyklisches Adenosinmonophosphat) und cGMP (2,3-zyklisches Guanosinmonophosphat). Bekanntlich wirken diese als sekundäre Botenstoffe, die – ausgelöst durch externe Signale bzw. deren Bindung an Rezeptoren der Plasmamembran – intrazelluläre Signalketten anstoßen. Letztlich wird so beispielsweise der Stoffwechsel an wechselnde Bedingungen angepasst oder beim Sehvorgang ein Nervenimpuls ausgelöst. Ihrer Struktur nach handelt es sich um *intramolekulare* zyklische Diester, bei denen Phosphorsäure zwei benachbarte Hydroxygruppen eines Ribosemoleküls verbindet. Bei einer bislang wenig beachteten Gruppe von Botenstoffen, den zyklischen Dinukleotiden, verbinden dagegen *intermolekulare* Phosphodiesterbrücken zwei Ribosemoleküle zu einem Ring mit unterschiedlichen Kombinationen von Purin- und Pyrimidin-Basen (Abbildung 1). Lange Zeit galten die zyklischen Dinukleotide als Besonderheit von Bakterien, bei denen sie als Botenstoffe komplexe Vorgänge wie den Übergang von einer schwimmenden zur sessilen Lebensweise (3'3'-c-di-GMP), Chemotaxis oder Virulenz (3'3'-cGAMP) regulieren [1].

Dass zyklische Dinukleotide auch bei Eukaryonten relevant sind, zeigte sich erstmals 2013 anhand des cGAS-STING-Signalwegs der Säugetiere, eines Mechanismus zur Abwehr fremder, in Zellen eingedrungener

Nukleinsäuren. Als Sensor fungiert dabei das Enzym cGAS (*cyclic GMP-AMP-synthase*), das nur aktiv ist, wenn es doppelsträngige DNA als Effektor gebunden hat. Im Cytosol angesiedelt kommt die cGAS mit der im Zellkern verpackten DNA nicht in Kontakt, sondern spürt zellfremde DNA auf, beispielsweise nach Infektionen mit Viren oder Mikroorganismen. Aktiviert durch DNA als Alarmsignal bildet die cGAS das zyklische 2'3'-GMP-AMP, kurz 2'3'-cGAMP. Letzteres bindet an das STING-Protein (*stimulator of interferon genes*) und initiiert so eine von Interferon- β und NF- κ B vermittelte, die angeborene Immunabwehr aktivierende Signalkette [2]. Zu bemerken bleibt, dass diese Signalkette – im Gegensatz zu den für die zyklischen Mononukle-

otide genannten – zwar von einem zellfremden, aber dessen ungeachtet intrazellulären Signal ausgelöst wird.

Einen regelrechten Boom in der Erforschung zyklischer Dinukleotide und ihrer Funktion ermöglichten zuletzt Hochdurchsatzmethoden der Genom-Sequenzierung, die bei Bakterien sowohl cGAS-ähnliche Enzyme als auch Homologe von STING zutage förderten [1]. Beide beteiligen sich auch bei Bakterien an Abwehrreaktionen, die in diesem Fall durch die Nukleinsäuren von Bakteriophagen ausgelöst werden [3]. Dieser Abwehrmechanismus wurde offenbar im Verlauf der Evolution konserviert: Die bislang nur von Bakterien bekannten zyklischen Dinukleotide 3'3'-c-di-GMP, 3'3'-c-di-AMP und 3'3'-cGAMP aktivieren den cGAS-STING-Signalweg auch bei Zellen der Maus [1].

Neue cGAS-ähnliche Proteine in Metazoa

Bei Insekten – dem Käfer *Tribolium castaneum* und 42 Dipteren-Arten einschließlich *Drosophila melanogaster* – wurden bereits vor zwei Jahren der cGAS des Menschen ähnliche Enzyme charakterisiert, die ebenfalls zyklische Nukleotide synthetisieren, obwohl ihre Aminosäuresequenzen insgesamt nur begrenzte Ähnlichkeit (25% Identität zur cGAS des Menschen) aufweisen [4,5].

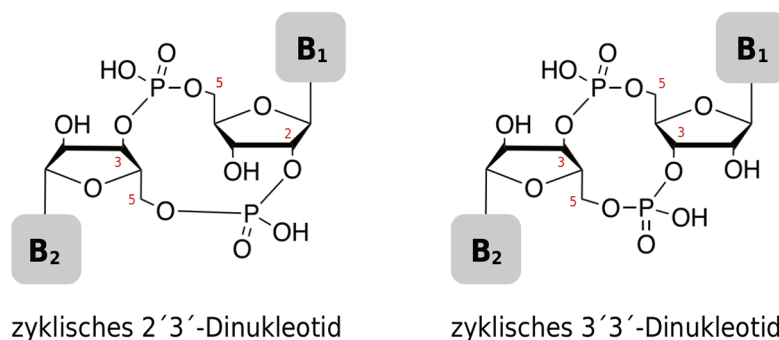


ABB. 1 Grundstruktur der zyklischen Dinukleotide mit 2'-5'/3'-5'-Verknüpfung (zyklische 2'3'-Dinukleotide) und 3'-5'/3'-5'-Verknüpfung (zyklische 3'3'-Dinukleotide). Die roten Ziffern benennen die an den Diesterbindungen beteiligten Kohlenstoffatome (zur Orientierung: das mit der Base (B) verknüpfte Kohlenstoffatom am reduzierenden Ende ist C1). Bei der Nomenklatur gemischter zyklischer Dinukleotide steht Base 1 an erster Stelle, z. B. B1 = G, B2 = A beim 2'3'-cGAMP.

Aufbauend auf diesen Befund durchforstete kürzlich ein multinationales Autorenteam unter der Leitung von Philip Kranzusch mit der BLAST-Methode alle sequenzierten Genome von Metazoa nach cGAS-ähnlichen Sequenzen [6]. Als Suchkriterien dienten unter anderem ein für die Nukleotidsynthese erforderliches saures Proteinmotiv der cGAS sowie deren Proteinstruktur determinierende Motive. So gelang die Identifizierung von insgesamt mehr als 3000 Kandidaten mit einem der cGAS ähnlichen katalytischen Zentrum in fast allen Phyla der Metazoen. Lediglich Fadenwürmer (Nematoden) und die meisten Plattwürmer (Plathelminthes) besitzen zwar entfernt ähnliche Proteine, denen aber vermutlich die enzymatische Aktivität als Nukleotidsynthase fehlt. Einzelne Genome der fast 600 untersuchten Spezies enthalten meistens ein bis fünf Kandidatengene. Besonders viele Kandidaten – über zweihundert pro Genom – fanden sich bei zwei Mollusken: der Zebrauschel (*Dreissena polymorpha*) und der Auster *Crassostrea virginica* [6]. Fliegen der Gattung *Drosophila* liegen mit drei bis sieben Kandidaten im Mittelfeld [4], während beim Menschen nach dem bisherigen Kenntnisstand nur die eingangs genannte cGAS enzymatisch aktiv ist [6].

Dass die Ähnlichkeit nicht nur die Aminosäuresequenz betrifft, sondern auch die Proteinstruktur, zeigte die Kristallisation ausgewählter cGAS-ähnlicher Proteine. Je ein Kandidat der Koralle *Stylophora pistillata* [6], der Auster *C. virginica* [6] und des Käfers *T. castaneum* [4] teilen mit der cGAS des Menschen wichtige Strukturmerkmale: Das katalytische Zentrum ist in einer tiefen, Nukleotide bindenden Tasche angesiedelt, und in einer Grube auf der gegenüber liegenden Seite fördern zahlreiche positive Ladungen die Bindung der doppelsträngigen Nukleinsäuren als Effektoren.

Funktionen cGAS-ähnlicher Proteine

Die bemerkenswert konservierte Struktur der cGAS-ähnlichen Proteine von im Stammbaum der Metazoa weit entfernten Spezies wirft die Frage nach ihrer physiologischen Funktion auf. Bei Insekten wurde enzymatische Aktivität cGAS-ähnlicher Proteine bereits vor zwei Jahren mit Hilfe isotope markierter Nukleosidtriphosphate nachgewiesen. Auch diese werden – wie die cGAS der Säugetiere – durch Bindung von Nukleinsäuren aktiviert, allerdings nicht durch DNA, sondern durch doppelsträngige Ribonukleinsäuren (dsRNA) [4]. Überraschend war, dass Fliegen der Gattung *Drosophila* neben 2'3'-cGAMP weitere zyklische Dinukleotide bilden – darunter bislang nicht bekannte wie das 3'2'-cGAMP, bei dem die Position der Nukleobasen Adenin und Guanin im Vergleich zum 2'3'-cGAMP vertauscht ist [4, 5], sowie 2'3'-c-di-GMP, das sich vom 3'3'-c-di-GMP der Bakterien durch die Position einer Diesterbrücke unterscheidet [7]. Jetzt wurden auch bei anderen Wirbellosen weitere Dinukleotide gefunden: Zyklisches di-AMP (3'3'-c-di-AMP) bei der Koralle *Stylophora pistillata* sowie gemischte Dinukleotide mit Adenin und der Pyrimidin-Base Uracil (3'3'-cUAMP bei der Koralle und 2'3'-cUAMP bei Austern) [6]. Demnach sind die von Metazoen gebildeten zyklischen Dinukleotide ähnlich vielfältig wie die von Bakterien. Allerdings ist nach dem bisherigen Kenntnisstand 2'3'-cGAMP am weitesten verbreitet: Es fand sich bei Nesseltieren, Insekten und dem Menschen als Vertreter der Wirbeltiere, während die vier übrigen Dinukleotide bislang jeweils nur in einer systematischen Gruppe nachgewiesen sind. Die Entwicklung vielfältiger zyklischer Dinukleotide wird als Anpassung an Mechanismen der Immunevasion von Viren diskutiert, die durch spezielle Nukleasen, beispielsweise die Poxine, spezifisch das 2'3'-cGAMP hydrolysieren können.

Ein Teil der neu entdeckten cGAS-ähnlichen Proteine ließ sich im Reagenzglasversuch durch Nukleinsäuren aktivieren [6]. Bei zwei Austern-Spezies gelang dies wie bei Säugetieren durch DNA, während die Mehrzahl der Synthesen von Nesseltieren und Insekten durch doppelsträngige RNA aktiviert werden. Beide Gruppen kommen demnach als Nukleinsäure-Sensoren infrage. Rätselhaft bleibt die Funktion einer Reihe von Synthesen, die in gereinigter Form auch ohne Zusatz von Nukleinsäuren aktiv waren. Bislang können die Autoren der Studie nur spekulieren, ob diese Autoaktivität auf am gereinigten Enzym verbliebene endogene Nukleinsäuren der Produzentenzelle zurückzuführen ist oder ob sie auf von der cGAS abweichende Funktionen hinweist. In diesem Zusammenhang ist bemerkenswert, dass für einzelne cGAS-ähnliche Proteine anhand der Aminosäurezusammensetzung große Unterschiede bezüglich des isoelektrischen Punkts (pI) vorhergesagt werden: Etwa zwei Drittel davon sind basische Proteine (pI > 8,5), so dass die Bindung von Nukleinsäuren als aktivierende Liganden plausibel erscheint. Passend dazu ließen sich nur basische Kandidaten durch Nukleinsäuren aktivieren, aber nicht solche mit einem isoelektrischen Punkt unter 7,0. Ein Teil der sauren Proteine war autoaktiv, andere zeigten unter den experimentellen Bedingungen keine enzymatische Aktivität. Ob sich letztere durch bislang unbekannt, möglicherweise positiv geladene Liganden aktivieren lassen, bleibt unklar [6].

Auch STING, das nächste Glied der durch fremde Nukleinsäuren initiierten Signalkette, ist gemäß der Genomanalyse bei Metazoen weit verbreitet [6]. In den allermeisten Fällen (88 %) fand sich pro Spezies ein Gen mit Ähnlichkeit zu dem des STING von Säugetieren, bisweilen auch mehrere (bis zu 10) Kandidaten wie bei Austern und Korallen. Strukturvorhersagen auf Basis der Aminosäuresequenz deuten auf eine

dem humanen STING ähnliche Architektur: Die aminoterminal Transmembrandomäne verankert das Protein am Endoplasmatischen Retikulum und die carboxyterminale Domäne bindet das zyklische Dinukleotid.

Bei der Koralle *Stylophora pistillata* wurden die Komponenten der cGAS-STING-Signalkette exemplarisch untersucht [6]. *S. pistillata* besitzt mit 42 besonders viele cGAS-ähnliche Gene und bei drei der kodierten Proteine gelang der Nachweis enzymatischer Aktivität: Sp-cGGLR-1 und -3 wurden durch dsRNA aktiviert und synthetisierten sowohl 3'3'-cUAMP als auch 3'3'-c-di-AMP. Sp-cGGLR-2 war autoaktiv und bildete 2'3'-cGAMP. Von den sieben STING-ähnlichen Proteinen, die untereinander eine relativ hohe Sequenzidentität aufwiesen (54–75 %), gelang bei fünf die Charakterisierung der Bindungsspezifität: Sp-STING5 war dem STING des Menschen insofern am ähnlichsten, als es 2'3'-cGAMP wesentlich stärker band als alle übrigen zyklischen Dinukleotide. Sp-STING7 dagegen band alle getesteten Nukleotide gleichermaßen. Sp-STING1, -2 und -3 nahmen eine Mittelstellung ein, wobei die beiden ersteren bevorzugt 2'3'-cGAMP banden, Sp-STING3 dagegen bevorzugt 3'3'-Nukleotide. Anhand der Kristallstruktur von Sp-STING1 und 3, jeweils im Komplex mit Ligand, bestätigte sich die funktionelle Ähnlichkeit zum STING des Menschen: Alle drei Proteine bilden ein V-förmiges Homodimer mit einer zentralen Ligandbindungsstelle, in der zwei konservierte aromatische Aminosäuren mit den Basen der zyklischen Dinukleotide interagieren und ein Arginin mit den Phosphatgruppen [6].

Somit erfüllen die durch Genomanalyse ermittelten Proteinfamilien alle Kriterien einer cGAS-STING-Signalkette, deren Funktion der von Säugetieren entspricht (Abbildung 2). Die Beteiligung an der Abwehr von Viren gilt bei der Taufliege *Drosophila melanogaster* als

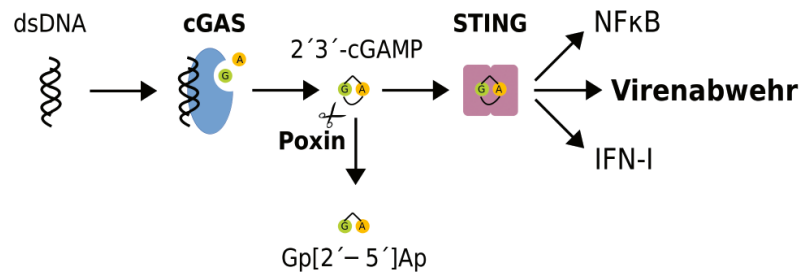


ABB. 2 Vereinfachtes Schema des cGAS-STING-Signalwegs. Die DNA infektiöser Mikroorganismen aktiviert die Nucleotidsynthase cGAS, die 2'3'-cGAMP bildet. Das zyklische Dinukleotid bindet und aktiviert das STING-Protein, das seinerseits die Aktivierung von Transkriptionsfaktoren vermittelt und so die angeborene Immunabwehr aktiviert. Das im Cytosol eukaryontischer Zellen sehr stabile 2'3'-cGAMP kann durch virale Nucleasen, die Poxine, inaktiviert werden, die spezifisch die 3'-5'-Bindung spalten.

bestätigt [4, 5, 7]. Dazu passend [6] zeigte die Koralle *S. pistillata* nach Behandlung mit 2'3'-cGAMP und 3'3'-cUAMP (18 h) Veränderungen der Genexpression, wie sie für die Aktivierung der Immunabwehr typisch sind: Die Transkriptionsfaktoren NF- κ B, IRF-3 und IRF-9 wurden verstärkt gebildet, ebenso Mustererkennungsrezeptoren sowie Signalproteine, beispielsweise der Tumornekrosefaktor TNF. Die Auster *C. virginica* reagierte auf die Injektion von 2'3'-cUAMP ebenfalls mit einem für die aktive Immunabwehr typischen Expressionsmuster, das dem nach Infektion mit Austern-Herpesvirus ähnelt. Dabei bleibt die Frage offen, wie die applizierten zyklischen Nukleotide in die Zelle gelangen, um gebunden an STING ihre Wirkung zu entfalten.

Weit verbreiteter Abwehrmechanismus

Zusammengenommen weisen die aktuellen Studien darauf hin, dass Signalketten mit cGAS-ähnlichen Enzymen, verschiedenen zyklischen Dinukleotiden und STING-Proteinen Teil eines bei Metazoen verbreiteten Abwehrmechanismus darstellen, den für die Zelle fremde Nucleinsäuren von Viren oder Mikroorganismen auslösen. Demnach gehören die cGAS-ähnlichen Nucleotidsynthasen zu den Mustererkennungsrezeptoren (*pattern recognition receptors, PAMP*), die unterschied-

lichste Komponenten von Viren und Mikroorganismen aufspüren und dafür sorgen, dass die angeborene Immunabwehr aktiviert wird. Entsprechend ihrer mutmaßlichen Funktion erhielt die neue Proteinfamilie den Namen *cGAS-like receptors* (cGLRs) in Anlehnung an die Gruppe der Toll-ähnlichen-Rezeptoren (*Toll-like receptors, TLR*), die sich ebenfalls an der Regulation von Immunreaktionen beteiligen [4]. Im Detail ist bemerkenswert, dass cGLRs offenbar auch bei *Drosophila* Bestandteil der Immunabwehr sind, während die Toll-ähnlichen Rezeptoren bei dieser Fliege entwicklungsbiologisch relevant sind. Die bislang geltende Auffassung, dass die Abwehr von *Drosophila* allein auf RNA-Silencing zurückgeht, muss damit als obsolet gelten.

Literatur

- [1] A. T. Whiteley et al. (2019). *Nature* 567, 194–199.
- [2] P. J. Kranzusch (2019). *Curr. Opin. Struct. Biol.* 59, 178–187.
- [3] B. R. Morehouse et al. (2020). *Nature* 586, 429–433.
- [4] K. M. Slavik et al. (2021). *Nature* 597, 109–113.
- [5] A. Holleufer et al. (2021). *Nature* 597, 114–118.
- [6] Y. Li et al. (2023). *Cell* 186, 3261–3276. e20.
- [7] H. Cai et al. (2023). *Immunity* 28, S1074–7613(23)00362-X.

Annette Hille-Rehfeld

LICHTVERSCHMUTZUNG

Insektensterben durch *artificial light at night*

Künstliches Licht ist aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken, um unsere Aktivitäten unabhängig vom Tageslicht zu machen. Dabei kennen wir inzwischen viele Risiken für unsere Gesundheit. Auch Ökosysteme werden durch die zunehmende künstliche Beleuchtung massiv beeinflusst; man spricht bereits von einer Lichtverschmutzung. Eine neue Studie untersucht nun, wie künstliches Licht Glühwürmchen bei der Partnersuche beeinträchtigt und damit zum Insektensterben beitragen könnte.

Mit Hilfe von künstlicher Beleuchtung machen wir die Nacht immer mehr zum Tag – auch nach Sonnenuntergang können wir Freizeitaktivitäten und Arbeit nachgehen [1]. Eine umfassende Beleuchtung der Straßen dient unserer Sicherheit [2]. Diese Unabhängigkeit fordert aber

auch ihren Tribut – der schädliche Einfluss von Schichtarbeit auf unsere Gesundheit ist inzwischen hinlänglich bekannt [3]. So führt die Störung des natürlichen Tag-Nacht-Rhythmus bei Frauen, die nachts arbeiten müssen, zu einem erhöhten Brustkrebs-Risiko. Es ist auch bekannt, dass der Blaulichtanteil in künstlichem Licht dafür verantwortlich ist, dass die Ausschüttung des Hormons Melatonin reduziert wird und dadurch unser Schlaf gestört wird.

Auch Flora und Fauna werden durch die immer stärker ausgedehnte nächtliche Beleuchtung in zunehmendem Maße beeinträchtigt. Der Vogelzug wird gestört, da die Zugvögel durch die zusätzlichen Lichtquellen die Orientierung verlieren. Es ist schon länger bekannt, dass Lichtverschmutzung zum Insektensterben beiträgt. Insekten können von dem Licht der Lampen angezogen werden, ihre Orientierung verlieren und an den Lampen zugrunde gehen. Entsprechend kann künstliches Licht auch die Bestäubung von Pflanzen und damit deren Reproduktion beeinträchtigen, da es nachtaktive Insekten irritiert [4].

Kürzlich wurde ein neuer Aspekt der Lichtverschmutzung untersucht, nämlich wie Tiere, die ihr eigenes Licht produzieren, um einen Partner zu finden, durch künstliches Licht zur Unzeit gestört werden [5]. Beim Gemeinen Glühwürmchen

(*Lampyris noctiluca*) senden die Weibchen grünes Licht aus, um die Männchen anzulocken. Dieses Licht wird als Biolumineszenz bezeichnet, da es bei einer chemischen Reaktion im Organismus entsteht: Das Enzym Luziferase katalysiert mit Hilfe von Sauerstoff und unter Beteiligung von ATP die Oxidation der chemischen Verbindung Luziferin. Dabei entsteht Energie, die als Licht und Wärme freigesetzt wird.

Ein Team der Universität Sussex hat nun untersucht, wie die Männchen das Leuchten ihrer Partnerin in einer Umgebung mit künstlicher Beleuchtung überhaupt finden können [5]. Dazu haben sie einen simplen experimentellen Aufbau entworfen. Die männlichen Glühwürmchen wurden eingesammelt und in ein Labyrinth in Form eines Y gebracht (Abbildung 1). An einem Ende wurde durch ein grünes LED-Licht die Anwesenheit eines Weibchens simuliert. Lag das Y-förmige Labyrinth im Dunkeln, fanden alle Männchen das grüne LED-Licht. Wurde das ganze Labyrinth zusätzlich mit weißem Licht von 25 Lux beleuchtet, was der Helligkeit von Mondlicht entspricht, fanden immerhin noch etwa 70 Prozent der Männchen die vermeintlichen Weibchen. Sie brauchten dafür 60 Sekunden. Wurde das ganze Labyrinth zusätzlich mit Licht der Helligkeit einer Straßenlaterne (145 Lux) beleuchtet, gelang dies nur noch etwa 21 Prozent. Den Grund dafür vermutet das Forschungsteam darin, dass die Männchen ihre Augen gegen das Licht mit einem Kopfschild abschirmen. Tatsächlich bedeckten die Männchen bei Beleuchtung des Labyrinths ihre Facettenaugen etwa 25 Prozent der Zeit, während sie das nur während 0,5 Prozent der Zeit taten, wenn das Labyrinth im Dunkeln lag. Damit ist ein weiterer schädlicher Effekt von künstlichem Licht bei Nacht beschrieben, der zum Rückgang von Insektenpopulationen beitragen kann.

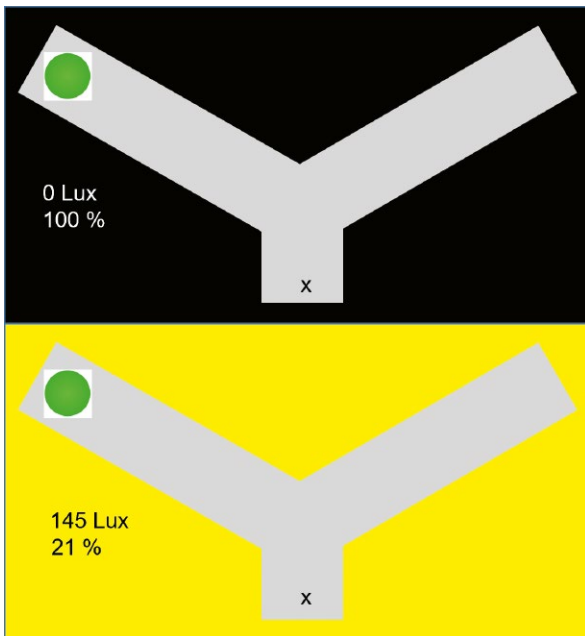


ABB. 1 Versuchsaufbau zur Simulation eines weiblichen Glühwürmchens. Der Y-förmige Versuchsaufbau ist an einem Ende mit einer grünen LED-Lampe ausgestattet, die das weibliche Glühwürmchen simuliert. Die Position des männlichen Glühwürmchens zu Beginn des Versuchs ist durch das schwarze Kreuz angezeigt. Der Versuchsaufbau liegt entweder im Dunkeln, wie in einer natürlichen Nacht (oben, 0 Lux, 100 % der Männchen erreichen das grüne Licht) oder wird mit Licht der Intensität einer Straßenlampe beleuchtet (unter 145 Lux, 21 % der Männchen erreichen das grüne Licht). Abb. nach [5].

Literatur

- [1] F. Falchi et al. (2016). *The new world atlas of artificial night sky brightness*. Science Advances 2, e1600377.
- [2] T. W. Davies et al. (2013). *Artificial light alters natural regimes of night-time sky brightness*. Scientific Reports 3, 1722.

- [3] T. Kantermann et al. (2012). *Noisy and individual, but doable: shift-work research in humans*. Prog Brain Res 199, 399–411.
- [4] E. Knop et al. (2017). *Artificial light at night as a new threat to pollination*. Nature 548, 206–209.
- [5] E. M. Moubarak et al. (2023). *Artificial light impairs local attraction to females in*

male glow-worms. Journal of Experimental Biology 226, jeb245760.

Dorothee Staiger,
Lehrstuhl für RNA Biologie
und Molekulare Physiologie,
Fakultät für Biologie,
Universität Bielefeld

ÖKOLOGIE

Nicht nur Gewächshäuser lassen Vögel früher singen

Untersuchungen zur Auswirkung künstlicher Lichtquellen auf freilebende Tiere beschränken sich meist auf die Straßenbeleuchtung. Dem Licht aus anderen Quellen wie Gewächshäusern und Schiffen wurde bislang allerdings wenig Aufmerksamkeit geschenkt.

Gewächshäuser können vom Herbst bis zum Frühjahr eine Quelle erheblicher Lichtverschmutzung sein. Wie die tägliche 4–8-stündige nächtliche Beleuchtung aus einem Gewächshaus die Zeit der täglichen Lautäußerungen von Waldvögeln in einem außersstädtischen Gebiet beeinflusst, hat nun ein polnisches Forscherteam untersucht. Das wichtigste Ergebnis: Vögel, die dem Kunstlicht ausgesetzt sind, beginnen in der Morgendämmerung früher mit ihrem Gesang und ihren Rufen und hören in der Abenddämmerung später damit auf – insbesondere vor der Brutsaison in der zweiten Februarhälfte. Mit am stärksten betroffen sind das Rotkehlchen und die Amsel [1] (Abbildung 1). Die ökologischen Auswirkungen von künstlichem Licht sind komplex und können einzelne Arten und ihre Lebensphasen unterschiedlich stark und auf unterschiedliche Weise beeinflussen. Sogar auf See sind sie von Relevanz. So stellen Schiffe eine mobile Quelle von Lichtverschmutzung dar [2]. Häufig hell erleuchtet, erhöhen sie temporär das Helligkeitsniveau in ansonsten relativ dunklen Gegenden. Da diverse nachtaktive Seevogelarten sowohl natürliches als auch künstliches Licht meiden und bei Helligkeit ihre Aktivität reduzieren,

ist zu erwarten, dass helle Schiffsbeleuchtungen die Verhaltensmuster von Seevögeln bei ihren Koloniebesuchen verändern können. Ob die Anwesenheit von Schiffen vor Steilküsten in Malta die nächtlichen Koloniebesuche von Mittelmeer-Sturmtauchern (*Puffinus yelkouan*) beeinflusst, haben Forschende der Arbeitsgruppe für Verhaltensökologie und Ökophysiologie der Abteilung für Tierökologie und Systematik

der Universität Gießen in Kooperation mit BirdLife Malta und der britischen *Royal Society for the Protection of Birds* untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass diese u. a. durch eine erhöhte Helligkeit an der Felswand die Koloniebesuche der bedrohten Seevogelart deutlich reduzierte. „Im Durchschnitt verringerte die Anwesenheit von Schiffen die Anzahl an Sturmtauchern, die pro Stunde in die Kolonie einfliegen, um 18 Prozent (+/- 24 % Standardabweichung). Vermutlich wirkt sich die Störung der natürlichen Verhaltensmuster in den Koloniebesuchen sowohl kurz- also auch langfristig auf den Bruterfolg, den physiologischen Zustand der Vögel und die Lebensfähigkeit der Kolonie aus“, berichten die Autoren im Journal für Ornithologie [3]. Sie empfehlen daher gezielte Maßnahmen, die die



ABB. 1 Rotkehlchen (a, *Erithacus rubecula*) und Amseln (b, *Turdus merula*) gehören zu den Vogelarten, die in Europa besonders von Lichtverschmutzung beeinflusst werden. Fotos: W. Irsch.

INFORMATIONEN DER EU-KOMMISSION

In einem Briefing vom November hat die EU-Kommission Anpassungen der Beleuchtungsplanung und Maßnahmen zur Eindämmung der Umweltverschmutzung, die auf empfindliche Lebensräume und Taxa zugeschnitten sind, zusammengetragen. Außerdem werden die laufenden Bemühungen der lokalen Behörden und Gemeinden zur Bekämpfung der nächtlichen Lichtverschmutzung (Artificial Light at Night Pollution, ALAN) beleuchtet. Das Briefing findet sich unter <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/5727bc7c-843c-11ee-99ba-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-296551457>

negativen Auswirkungen der kommerziellen Schifffahrt auf höhlenbrütende Seevögel reduzieren könnten. Lokale Vorschriften seien notwendig, um den Einfluss auf bestimmte Kolonien zu verringern. Darüber hinaus wäre es von weitreichendem Nutzen, verbindliche Regelungen zu Verdunklungs- und Abschirmvorrichtungen sowie zu Helligkeitshöchstwerten auf Schiffen in internationalen Konventionen zu verankern.

Bereits wenig künstliches Licht gefährdet Ökosysteme

Neue Studien über künstliches Licht bei Nacht zeigen, dass die Auswirkungen der Lichtverschmutzung sehr weitreichend sind. Geringe Mengen künstlichen Lichts können Artgemeinschaften und Ökosysteme stören. In einer Sonderausgabe der Fachzeitschrift *Philosophical Transactions of the Royal Society B* widmet man sich schwerpunktmäßig den Auswirkungen der Lichtverschmutzung auf Ökosysteme. Forschende des Deutschen Zentrums für integrative Biodiversitätsforschung (iDiv) und der Friedrich-Schiller-Universität Jena betonen darin den Dominoeffekt, den Lichtverschmutzung auf Funktionen und Stabilität von Ökosystemen haben kann [3].

Weltweit nimmt künstliche Beleuchtung zu – auch der Nachthimmel wird dadurch immer heller. Die Lichtverschmutzung, die jedes Jahr

um bis zu zehn Prozent steigt, unterbricht die natürlichen Lichtzyklen, die im Laufe der Erdgeschichte weitgehend konstant waren. Diese Zyklen sind für Organismen, die auf Licht als Energie- und Informationsquelle angewiesen sind, lebenswichtig. Bislang konzentrierten sich die meisten Studien, die die Auswirkungen von Lichtverschmutzung untersucht haben, weitgehend auf die menschliche Gesundheit und auf einzelne Arten. Die Untersuchung ganzer Ökosysteme, in denen Arten durch vielfältige Interaktionen miteinander verbunden sind, blieb hingegen meist außen vor. „Arten existieren nicht isoliert, sondern interagieren auf vielfältige Weise“, so Dr. Myriam Hirt von iDiv und der Universität Jena, die gemeinsam mit Dr. Remo Ryser für die Herausgabe der Sonderausgabe verantwortlich zeichnen. „Unser Ziel war es, besser zu verstehen, wie sich die Aufhellung des Nachthimmels auf ganze Ökosysteme und die damit verbundenen Ökosystemleistungen auswirkt.“

Mithilfe des iDiv Ecotron, das aus mehreren kontrollierbaren Ökosystemen (sogenannten EcoUnits) besteht, simulierten und veränderten die Forschenden die nächtlichen Lichtverhältnisse. Zu den wichtigsten Ergebnissen in diesem Zusammenhang gehören:

- Die Auswirkungen von künstlichem Licht erreichen auch unterirdische Bodengemeinschaften und beeinflussen die Bodenatmung sowie die Effizienz der Kohlenstoffnutzung.
- Künstliches Licht beeinflusst die Aktivität von Insekten, was unter anderem zu höheren Prädationsraten in der Nacht führte, es gab also mehr Jagdverhalten.
- Künstliches Licht führt zu einer Verringerung der pflanzlichen Biomasse und Diversität sowie zu Veränderung von Pflanzenmerkmalen wie die Behaarung der Blätter.
- Durch künstliches Licht können sich die Zeiträume, in denen Arten aktiv sind, verschieben bzw.

angleichen, was zu größeren Überschneidungen in deren Aktivität führt und letztendlich den Fortbestand von Arten beeinflussen kann.

Selbst geringe Intensitäten der Lichtverschmutzung – weniger als bei Vollmond – können bereits tiefgreifende Auswirkungen haben, nicht nur auf das Verhalten und die physiologischen Reaktionen einzelner Arten. Sie können sich auch auf komplexeren Ebenen widerspiegeln, etwa in Gemeinschaften und ökologischen Netzwerken wie zum Beispiel Nahrungsnetzen. „Wie die einzelnen Arten auf künstliches Licht reagieren und in welcher Beziehung sie zueinander stehen, beeinflusst, wie das gesamte Ökosystem reagiert. So verändert beispielsweise eine Verschiebung der Aktivität von tagaktiven und dämmerungsaktiven Arten in die Nacht die Aussterberisiken in der gesamten Artengemeinschaft“, so Ryser.

Eine weitere Untersuchung ging der Frage nach, wie künstliches Licht indirekte Kaskadeneffekte hervorruft, die sich auch auf den Menschen auswirken. So kann künstliches Licht bei Nacht zum Beispiel die Häufigkeit und das Verhalten von Stechmücken beeinflussen, indem es zu Veränderungen in der zeitlichen Abfolge wichtiger Verhaltensweisen der Mücken führt wie der Wirtssuche, der Paarung und der Flugaktivität mit weitreichenden Folgen für die Übertragung von Krankheiten wie z. B. Malaria.

Literatur

- [1] K. Skorb et al. (2023). *Journal of Ornithology* 164, 399–405, <https://doi.org/10.1007/s10336-022-02029-5>
- [2] M. Austad et al. (2023). *Journal of Ornithology* 164, 527–536, <https://doi.org/10.1007/s10336-023-02045-z>
- [3] M. R. Hirt et al. (2023). Light pollution in complex ecological systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, <https://doi.org/10.1098/rstb/378/1892>

Wilhelm Irsch, Reblingen-Siersburg

ÖKOLOGIE

Eine Zauneidechse als Beute der Gottesanbeterin

Dass die Europäische Gottesanbeterin (*Mantis religiosa*) in Einzelfällen auch kleine Wirbeltiere erbeuten kann, ist bekannt, aber nur sehr selten gelang es bisher, eine solche Beobachtung zu dokumentieren. Ende September 2023 wurden die Teilnehmenden einer Exkursion des Deutschen Landschaftspflegetags in Sielmanns Naturlandschaft Döberitzer Heide unmittelbar westlich von Berlin Zeugen dieses besonderen Ereignisses: Eine weibliche Gottesanbeterin hielt am Wegesrand eine juvenile Zauneidechse (*Lacerta agilis*) in ihren Fangbeinen.

Die grün gefärbte Gottesanbeterin saß hervorragend getarnt kopfüber an Grashalmen neben dem sandigen Hauptwanderweg (Abbildung 1). Nur die hell schimmernde Bauchseite der Eidechse verriet Räuber und Beute und lenkte den Blick auf das Geschehen. Die Fangschrecke hatte bereits mit ihrem erkennbar blutigen Mahl begonnen (Abbildung 2). Die Eidechse hatte im erfolglosen Abwehrkampf einen Teil ihres Schwanzes offenbar durch Autotomie abgeworfen.

In einer Zusammenstellung von R. Ehrmann finden sich Berichte, die bis weit ins 19. Jahrhundert zurückreichen, über Fälle, in denen kleine Wirbeltiere zur Beute von Gottesanbeterinnen wurden: Es gelang unterschiedlichen Fangschrecken-Arten auf verschiedenen Erdteilen, unter anderem Frösche und sogar Vögel zu erbeuten. Außerdem wird auf die Schilderung von H. Schmidt verwiesen, der eine Europäische Gottesanbeterin 1989 in Kroatien mit einer erbeuteten Etrusker-Spitzmaus (*Suncus etruscus*) fotografierte [1].

In ihrer ausführlichen Darstellung der Biologie von *Mantis religiosa* weisen M. Berg, C. Schwarz und J. Mehl auf einen Rollentausch zwischen der Gottesanbeterin und Eidechsen im Laufe des Jahres hin: Erwachsene Eidechsen erbeuten im Frühjahr gern junge Gottesanbeterinnen, während ab dem Spätsommer junge Eidechsen zur Beute erwachsener Gottesanbete-

rinnen werden können. Belegt wird dies mit dem Foto einer erbeuteten Zauneidechse in den Fängen einer Gottesanbeterin am Neusiedler See in Ungarn aus dem Jahr 1995. Ähnlich spektakulär sind Aufnahmen eines jungen Basiliskenchamäleons (*Chamaeleon africanus*), dem das gleiche Schicksal 2006 in Griechenland widerfuhr [2].



ABB. 1 Weibchen der Gottesanbeterin (*Mantis religiosa*) mit erbeuteter junger Zauneidechse (*Lacerta agilis*) in der Döberitzer Heide (28.9.2023). Alle Fotos: H. Petrischak.

Im Rahmen von mehrjährigen Beobachtungen an Gottesanbeterinnen in Berlin-Schöneberg, wo eine wohl auf Einschleppung zurückgehende Population lange Zeit isoliert vom eigentlichen Verbreitungsgebiet vorkam, erwähnt M. Berg ein Weibchen von *Mantis religiosa* mit einer erbeuteten jungen Zauneidechse, das er im August 2001 entdeckte [3].

Mittlerweile bilden die Schöneberger Gottesanbeterinnen kein isoliertes Vorkommen mehr, sondern sind aufgegangen in der rasanten Expansion dieser wärmeliebenden Art, die im Osten Deutschlands über weite Teile von Sachsen, Thüringen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Berlin schon flächendeckend verbreitet ist. Parallel hat sich die Gottesanbeterin im Südwesten Deutschlands von Baden-Württemberg, dem Saarland und Rheinland-Pfalz aus bis weit nach Hessen und Nordrhein-Westfalen hinein ausge-

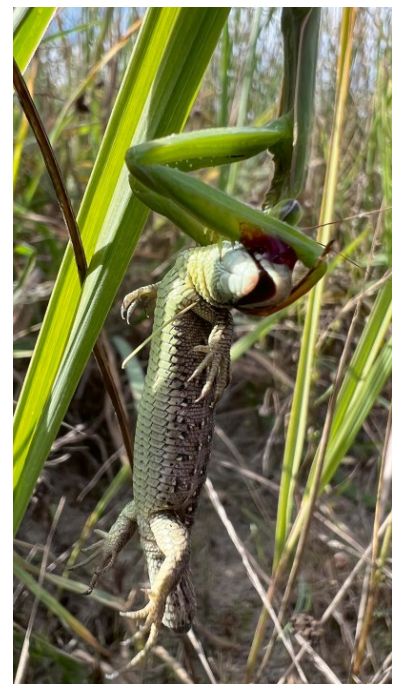


ABB. 2 Die kräftigen Dornen an den Fangbeinen der Lauerjägerin machen ein Entkommen für eine einmal ergriffene Beute fast unmöglich. Die Gottesanbeterin wird so lange an der Eidechse fressen, bis sie vollkommen gesättigt ist.



ABB. 3 Gottesanbeterinnen-Paarung auf blühender Besenheide in der Döberitzer Heide (31.8.2022).

breitet. Von immer mehr Orten in Deutschland erfolgen jährlich neue Nachweise, oft angeregt durch Online-Meldeportale. In der Döberitzer Heide wird sie seit 2019 beobachtet, wo sie sich nicht selten auch inmitten blühender Besenheide (*Calluna vulgaris*) aufhält (Abbildung 3).

Literatur

[1] R. Ehrmann (1992). Wirbeltiere als Nahrung von Gottesanbeterinnen (Mantodea). Entomologische Zeitschrift 102 (9), 153–172.

- [2] M. K. Berg et al. (2011). Die Gottesanbeterin. Die Neue Brehm-Bücherei Bd. 656, Westarp Wissenschaften, Hohenwarleben.
- [3] M. Berg, M. Keller (2004). Die Gottesanbeterin, *Mantis religiosa* Linnaeus, 1758 (Mantodea: Mantidae), im Stadtgebiet von Berlin-Schöneberg – Ihre Lebensweise und faunistische Beobachtungen in den Jahren 1998 bis 2003. Märkische Entomologische Nachrichten 6 (1), S. 55–84.

Hannes Petrischak,
Heinz Sielmann Stiftung,
hannes.petrischak@sielmannstiftung.de

AUSSERSCHULISCHE LERNORTE

Frankfurt, die Stadt mit den drei großen Gärten

Der Botanische Garten, der Palmengarten und der Wissenschaftsgarten haben mit verschiedenen Schwerpunkten ein gemeinsames Ziel: die Faszination für Pflanzen erwecken.

Frankfurt kann sich als Stadt glücklich schätzen, denn die Wirtschaftsmetropole ist mit drei Botanischen Gärten gesegnet. Diese Gärten bieten den aus mehr als 180 Nationen stammenden Bürger/-innen die Mög-

lichkeit, sowohl die Pflanzen Deutschlands als auch exotische Pflanzen aus der ganzen Welt kennenzulernen und zu bestaunen. Für die Abteilung der Biologiedidaktik der Goethe-Universität Frankfurt

sind die bestehenden Kooperationen und die enge Zusammenarbeit mit diesen drei Gärten von besonderer Bedeutung. Neben Führungen und Projekten im Rahmen des fachwissenschaftlichen Studiums werden diese drei außerschulischen Standorte auch für die Ausbildung von zukünftigen Lehrkräften genutzt. Studien zum Interesse an Lebewesen haben gezeigt, dass das Interesse an Pflanzen viel weniger ausgeprägt ist als das Interesse an Tieren. Daher ist es von grundlegender Bedeutung, Kinder und Jugendliche möglichst früh für botanische Inhalte zu begeistern.

Der Palmengarten

Der in der Nähe der Frankfurter Innenstadt gelegene Palmengarten (Abbildung 1) ist eine gepflegte historische Parkanlage mit umfangreichen Gewächshäusern. Insbesondere beherbergt er mit dem Tropicarium einen modernen Gewächshauskomplex, der verschiedene Vegetationsformationen der Tropen darstellt. Seit 2021 ist das neue Blüten- und Schmetterlingshaus dazugekommen, welches tropische Schmetterlinge und deren Nektar- und Nahrungspflanzen zeigt.

Bereits für die Kleinsten bietet der Palmengarten Bildungs- und Erlebnisangebote zum Thema Pflan-



ABB. 1 Tropicarium mit Frankfurter Skyline im Hintergrund. Foto: Hilke Steinecke.

zen. In der Bildungseinrichtung „Kinder im Garten“ können Kindergarten-Kinder in mehrtägigen Veranstaltungen den Palmengarten und seine Pflanzen erforschen. Unter gärtnerischer Anleitung können Pflanzen getopft und Gemüsepflanzen kennengelernt werden. Die Kinder lernen, wie Nahrungspflanzen wachsen; bei Gelegenheit darf auch geerntet werden. Von der Vorschule bis zur Berufsschule bietet der Palmengarten eine Vielfalt an Bildungsangeboten in Form von Führungen, Workshops und Vorträgen zu verschiedenen Aspekten der Biodiversität, darunter tropische Nutzpflanzen, Vielfalt und Anpassungen in den Tropen und Blütenökologie. Auch für den Erdkundeunterricht eignet sich der Palmengarten, denn die Gewächshäuser des Tropicariums zeigen die Pflanzenwelt aus nicht weniger als zehn verschiedenen Vegetationszonen.

Die neueste Attraktion des Palmengartens ist das Blüten- und Schmetterlingshaus. Bei diesem Haus geht es nicht nur darum, den Besucher/-innen die Möglichkeit zu geben, wunderschöne bunte tropische Schmetterlinge wie zum Beispiel den blauen Morpho- oder den Bananen-Falter lebend zu beobachten. Sie sollen auch für das Thema Insektensterben sensibilisiert werden und Anregungen bekommen, was man selbst zum Erhalt der Insektenvielfalt tun kann. Neben dem tropischen Schmetterlingshaus begeistert die Dauerausstellung „Abgestaubt“ über eines der faszinierendsten Themen der Biologie: die Blüten-Bestäuber-Interaktionen. Anhand von Modellen, Informationstafeln und Mitmach-Stationen werden Kinder und Erwachsene an die Thematik der Wechselbeziehungen zwischen Pflanzen und Insekten herangeführt. Außerdem werden Handlungsoptionen aufgezeigt, mit denen dem Insektensterben entgegengewirkt werden kann. Speziell für Schulklassen ist auch ein Workshop-Raum vorhanden.



ABB. 2 Unterrichtssimulation mit Lehramtsstudierenden zum Thema „Heilpflanzen“ im Botanischen Garten. Foto: Marilú Huertas de Schneider.

Der Botanische Garten im Westend

Vom Palmengarten kann man sich in wenigen Minuten zu Fuß einheimische Pflanzengesellschaften Mitteleuropas im Botanischen Garten anschauen. Hier können Schüler/-innen in verschiedenen Waldformationen (z. B. Buchenmischwald, Eichen-Hainbuchenwald, Birken-Eichenwald) die Merkmale der häufigsten Baumarten erlernen oder während des Urlaubs am Mittelmeer beobachtete Pflanzen wiederfinden. Eine große Attraktion ist der Teich mit seinem Schilfröhricht, in dem Frösche quaken und Wasservögel wie Eisvögel, Reiher und Teichhuhn beobachtet werden können.

Der ursprünglich von Johann Christian Senckenberg als „Hortus Medicus“ gestiftete und konzipierte Garten enthält auch einen Arzneipflanzengarten (Abbildung 2), in dem die Pflanzen nach ihrer Wirkung auf die verschiedenen Organe und Symptome geordnet sind.

Projekte zum Thema „Erhaltungskulturen“ engagieren sich direkt im Artenschutz und sensibilisieren durch Vermittlungsangebote das Gartenpublikum. Bei einem anderen Projekt zum Thema „Lebendige Dächer“ wird die Eignung insbesondere seltener oder gefährdeter heil-

mischer Arten für die Dachbegrünung über einen mehrjährigen Beobachtungszeitraum untersucht. Solche Projekte zeigen die verantwortungsvolle Rolle der Botanischen Gärten für den Schutz der Biodiversität.

Die Grüne Schule bietet in beiden vorgestellten Gärten vielfältige Führungen und andere Veranstaltungen für die ganze Familie an. Im Botanischen Garten gibt es außerdem samstags kostenlose Führungen vom Freundeskreis des Botanischen Gartens, die sich neben den Pflanzen auch mit Pilzen und Tieren beschäftigen.

Der Wissenschaftsgarten am Campus Riedberg

Der jüngste, erst 2014 eröffnete Wissenschaftsgarten am Campus Riedberg ist stark in Forschung und Lehre eingebunden. Neben den drei imponierenden Gewächshäusern mit Spezialsammlungen in verschiedenen Klimakammern beinhaltet dieser Garten eine nach Wirkstoffgruppen sortierte Arzneipflanzenabteilung, eine Magerwiese, eine systematische Abteilung und Forschungsflächen. Anhand eines jungen Buchenwalds und einer Eichenpflanzung mit mediterranen Eichenarten werden im Rahmen des Projekts



ABB. 3 Wissenschaftsgarten am Campus Riedberg: die systematische Abteilung mit nach Pflanzengruppen geordneten Beeten. Foto: Uwe Dettmar.



ABB. 4 Schulgarten als Grünes Klassenzimmer. a) Schulgartenseminar Sommersemester 2022, b) Radieschen-Ernte im Schulgarten am Campus Riedberg. Foto: Marilú Huertas de Schneider.

„Wald der Zukunft“ Auswirkungen des Klimawandels erforscht. Auch wird im Wissenschaftsgarten die genetische Vielfalt innerhalb von Pflanzenarten – wichtig für die evolutive Anpassung von Pflanzen an Umweltveränderungen wie den Klimawandel – untersucht. Dazu sind im Südosten des Wissenschaftsgartens zwei Schattenhallen für schattenliebende Waldunterwuchspflanzen sowie eine große Versuchsfläche mit abbaubaren Folientunneln eingerichtet, die die gleichzeitige Kultivierung von Hunderten von Pflanzen ermöglichen. Mit Totholzexperimenten wird die Besiedlung

mit Pilzen nachgestellt. In der systematischen Abteilung werden Pflanzen nach ihren verwandtschaftlichen Beziehungen in unterschiedlichen Beeten gezeigt (Abbildung 3). Diese eignet sich besonders gut für Studierende und interessierte Laien, um die häufigsten Pflanzenfamilien kennenzulernen.

Obwohl in erster Linie für die universitäre Lehre und Forschung vorgesehen, werden auf Anfragen auch Kinderführungen angeboten; Schulklassen sind ebenso willkommen. Der benachbarte und zum Wissenschaftsgarten gehörende Schulgarten wurde 2016 gegründet

und als ökologischer Biotopgarten im Rahmen des Projektes „Close to Science – Schule im Wissenschaftsgarten“ der Abteilung der Didaktik der Biowissenschaften angelegt (Abbildung 4). Dieser Garten wurde so konzipiert, dass Lehramtsstudierende hier Unterrichtseinheiten für Schülerinnen und Schüler planen und simulieren können. Neben einem Wildbienenlehrpfad sind ein Teich, eine Wildblumenwiese, verschiedene Hochbeete und Parzellen zum Gemüseanbau vorhanden. So können vielfältige botanische, zoologische und ökologische Themen behandelt werden. Außerdem wer-

BESUCHERINFORMATIONEN

Palmengarten der Stadt Frankfurt am Main

Öffnungszeiten:

November bis Februar 9:00 – 16:00 Uhr

März bis Oktober 9:00 – 19:00 Uhr

Täglich geöffnet (geschlossen am 24.12. und 31.12.)

Adresse: Zwei Eingänge:

Siesmayerstraße 63 und Palmengartenstraße

60323 Frankfurt am Main

Tel.: 069/212-33939

info.palmengarten@stadt-frankfurt.de

<https://www.palmengarten.de/>**Botanischer Garten Frankfurt**

Öffnungszeiten:

Montag – Samstag:

9.00 – 18.00 Uhr

Sonn- und Feiertage:

9.00 – 13.00 Uhr

Vom letzten Sonntag im Februar bis Ende Oktober täglich geöffnet. Im Winter geschlossen.

Eintritt frei

Adresse: Siesmayerstraße 72

60323 Frankfurt am Main

<https://www.botanischergarten-frankfurt.de/>

Buchung von Führungen sowohl für den Botanischen Garten als auch für den Palmengarten über die Grüne Schule:

Gruene.Schule@stadt-frankfurt.de

<https://www.palmengarten.de/de/fuehrungen-bildungsangebote/gruene-schule.html>**Wissenschaftsgarten am Campus Riedberg**

Öffnungszeiten

Montag bis Freitag 9:00 – 15:00 Uhr

Während der Saison von März bis Oktober am Samstag

11:00 – 17:00 Uhr geöffnet, an Feiertagen geschlossen.

Alexander-Todd- Straße, auf dem Lageplan des Campus Nr. 11

(Gebäude 610). Für Navigationssysteme am besten Max-von-

Laue-Straße 13, 60438 Frankfurt am Main, angeben.

wissenschaftsgarten@uni-frankfurt.de

<https://www.uni-frankfurt.de/51846702/Willkommen>

den im Rahmen von Schulgartenseminaren Themen aus dem Bereich „Bildung für Nachhaltige Entwicklung“ (BNE) vermittelt.

Fazit:

Oft verbindet man Weltmetropolen mit viel Beton und wenig Natur. Frankfurt ist ein gutes Beispiel, dass

es auch anders geht. Neben seinem Grüngürtel verfügt die Stadt über drei Botanische Gärten mit verschiedenen Schwerpunkten. Diese werden von den Bürger/-innen als „Grüne Oasen“ geschätzt. Ihre Bedeutung reicht aber über die Ästhetik und den Erholungsfaktor hinaus. Durch Bildungsprogramme sind sie

ein wichtiger Bestandteil der Umweltbildung für Schulen und Universitäten. In Zeiten der Biodiversitätskrise und des Klimawandels haben sie in dieser Funktion sogar noch an Bedeutung gewonnen.

Marilú Huertas de Schneider,

Volker Wenzel,

Goethe-Universität Frankfurt

BESTIMMUNGSAPP

Flora Incognita – mehr als Pflanzenbestimmung

Eine Pflanze am Wegrand, ein Smartphone und eine Prise Neugier – mehr braucht es heute nicht, um wildwachsende Pflanzen zu bestimmen. Flora Incognita ist eine Pflanzenbestimmungsapp, die genau das möglich macht.

Einfacher geht Artbestimmung nicht: Mit dem Smartphone oder Tablet wird eine Pflanze fotografiert, und in Sekundenschnelle bekommt man ihren Namen und einen Steckbrief mit Informationen zu Merkmalen, Ökologie, Verbreitung, Schutz und Verwendung (Abbildung 1). Wird die Beobachtung gespeichert, entsteht eine persönliche digitale

Pflanzensammlung – und für die Wissenschaftler/-innen des Projekts ein Datensatz aus wertvollen Pflanzenvorkommensdaten, mit denen verschiedene Fragestellungen aus dem Bereich Biodiversität beantwortet werden können.

Aber Flora Incognita ist mehr als nur Pflanzenbestimmung. In regelmäßigen Flora-Stories werden Natur-

interessierte über viele verschiedene Themen informiert: Phänologie, invasive Arten, Pflanzengesellschaften, neue wissenschaftliche Erkenntnisse und vieles mehr. Um auch Zielgruppen mit eher extrinsischer Motivation zu begeistern, wurde die App um einen Gamification-Aspekt erweitert, bei dem für das Bestimmen von Pflanzen eine Vielzahl von Abzeichen gesammelt werden kann.

Die App dient auch als Werkzeug zur Durchführung von *Citizen-Science*-Projekten. Mit einem gemeinsamen Code können mehrere Personen Daten zur Beantwortung einer Fragestellung zusammentragen. Ein erfolgreiches Beispiel hierfür ist die „Krautschau“, bei der deutschlandweit über 100 Menschen knapp 1000 verschiedene

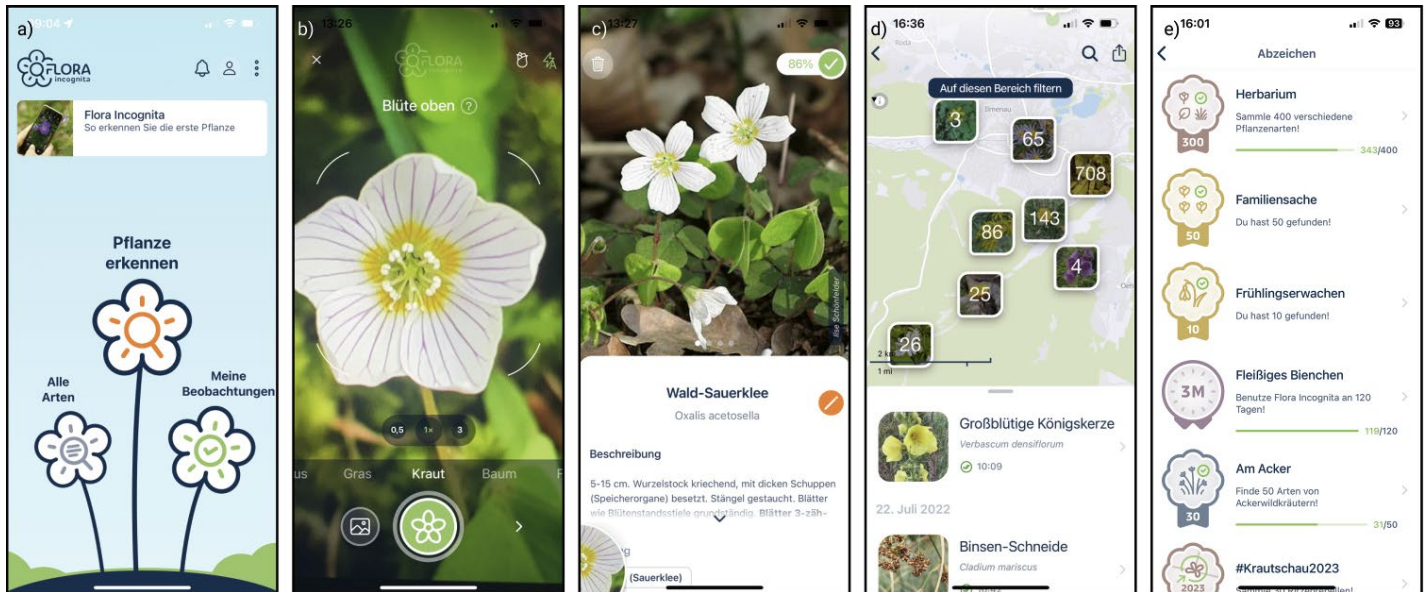


ABB. 1 Screenshots der Flora-Incognita-App. a) Startseite, b) Pflanzenbestimmung, c) Steckbrief, d) Beobachtungsübersicht, e) Abzeichen.

Arten in den Wegen und Mauern ihrer Städte und Dörfer dokumentiert haben. Im Projekt „Wildflora-Explorer“ kartieren Schüler/-innen ihre Schulhöfe. Das Projekt hat zum Ziel, Kinder und Jugendliche für das Thema Biodiversität zu sensibilisieren und durch das digitale Lernangebot zudem ihre Medienkompetenz zu verbessern.

Digitalisierung soll in der Bildung eingesetzt werden, um die Nachhaltigkeitsziele des „Nationalen Aktionsplans Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE)“ zu erfüllen. Das eben vorgestellte Projekt ist ein gutes Beispiel dafür, aber es gibt noch weitere: Bereits in Kindertagesstätten hilft Flora Incognita, Kinder mit Artenvielfalt in Kontakt zu bringen. Auch ohne Lesekompetenz helfen die vielen Bilder, verschiedene Blüten-, Blattformen und -farben, Lebensformen und Früchte kennenzulernen und mit dem zu vergleichen, was auf dem Spielplatz wächst. Pädagog/-innen berichteten, dass das Anlegen eines Herbariums Kindern in der Grundschule leichter fällt, wenn sie die Wiese zunächst mit der App untersuchen können – die angelegten Herbarien sind zudem artenreicher. In höheren Schulklassen können Projektwochen

unter ökologischen Gesichtspunkten durchgeführt werden – auch ohne (zunächst) ausgeprägte Artenkenntnis der Schülerinnen und Schüler.

Forschung für Flora Incognita

Die Entwicklung der Flora-Incognita-App wurde von zahlreichen wissenschaftlichen Studien begleitet. Eine erste kam zum Ergebnis, dass die Pflanzen in ihrer natürlichen Umgebung aufgenommen werden sollten, und dass es nicht notwendig ist, das Objekt vor der Bestimmung vom Hintergrund zu lösen – es reicht, wenn das zu bestimmende Objekt scharf und zentral im Bild zu sehen ist und möglichst flächenfüllend fotografiert wird [1]. Eine weitere Untersuchung fand heraus, welche Pflanzenorgane für eine automatisierte Bestimmung am besten geeignet sind: Ideal ist die Kombination von Perspektiven, wobei Blatt- und Blütenbilder zusammen zur höchsten Bestimmungsgenauigkeit führen. Auch bei Gräsern ist der Blütenstand die wichtigste Perspektive, und auch hier können die Identifikationsergebnisse signifikant verbessert werden, wenn mehrere Perspektiven kombiniert werden [2]. Diese Ergebnisse flossen mit in die Entwicklung der App ein und sind der

Grund dafür, dass Flora Incognita heute bis zu drei Perspektiven für eine Bestimmung anfordert [3].

Bereits 2021 erkannte Flora Incognita 4800 Arten der mitteleuropäischen Flora zu 93 Prozent [4]. Seitdem gab es mehrere Erweiterungen der Liste der bestimmbar Arten, und fünf Jahre nach Erstveröffentlichung ermöglicht die App die Bestimmung von über 16.000 Pflanzenarten. Sie wurde mehr als sechs Millionen Mal heruntergeladen und erreichte eine Bewertung von 4,9 von 5 möglichen Punkten aus über 20.000 Ratings. Unter allen Bildungsapps erreichte sie Platz eins im deutschsprachigen Raum. Dieser Erfolg spiegelt sich auch in den Beobachtungszahlen wider. 2023 konnten bis zu 600.000 Identifikationen pro Tag verzeichnet werden und zu Spitzenzeiten mehr als 150 Bestimmungsanfragen pro Sekunde.

Wissenschaftliche Nutzung der Beobachtungsdaten

Trotz gewisser Verzerrungen in den Daten (zeitlich: Observationen werden vor allem am Wochenende und im Sommer gemacht; taxonomisch: Die meisten Funde sind von auffälligen, häufigen Pflanzen; räumlich:

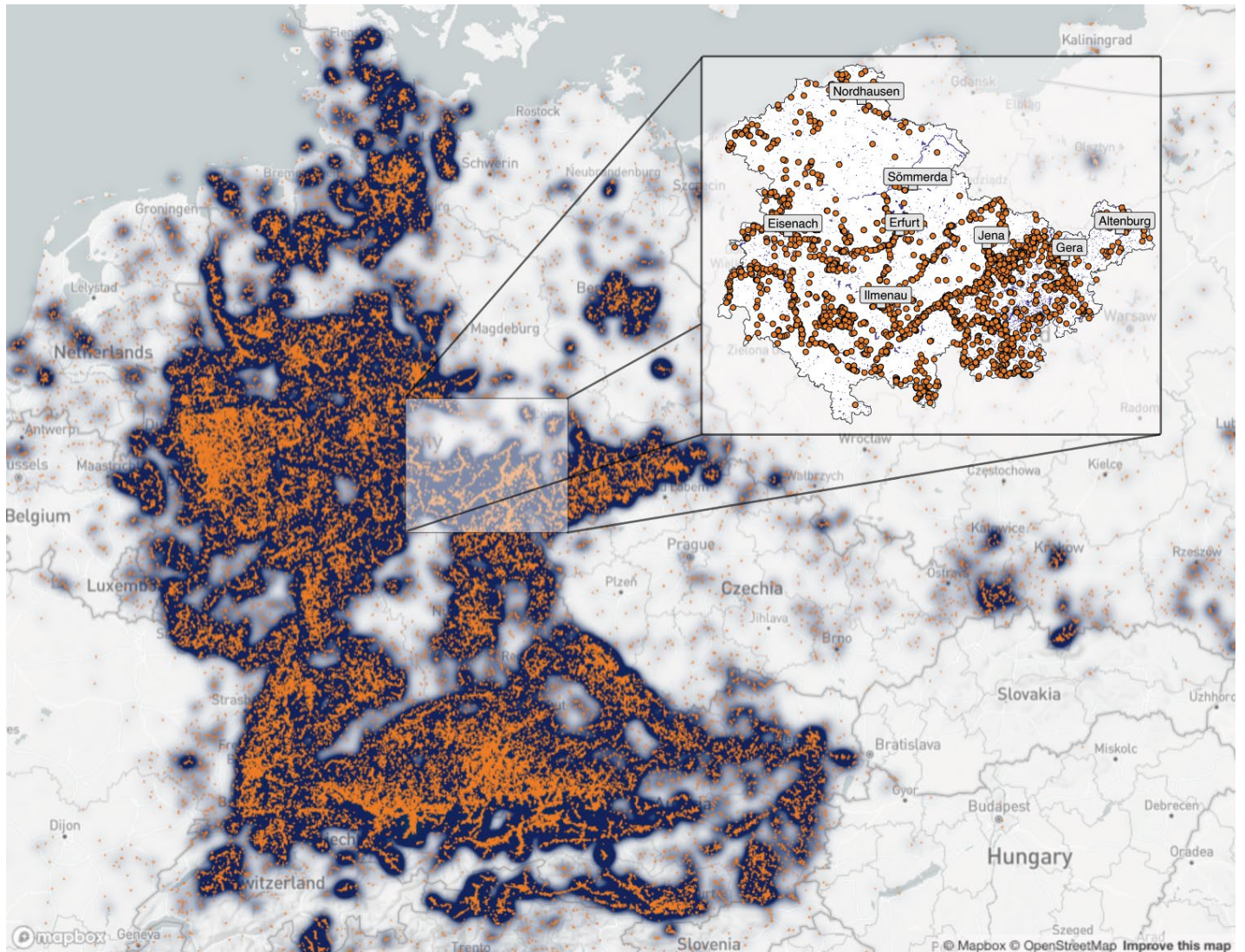


ABB. 2 Ausschnitt der Beobachtungen des Drüsiges Springkrauts (*Impatiens glandulifera*) mit Flora Incognita in Deutschland, Österreich und der Schweiz (davon Thüringen als Detailaufnahme) seit 2018.

Dicht besiedelte Gebiete und Urlaubsregionen sind Schwerpunkte der Beobachtungen) können die gewonnenen Daten für verschiedene Zwecke genutzt werden. Ein erstes Beispiel ist das Monitoring der Pflanzen-Phänologie. Der Ablauf saisonaler Ereignisse wie Knospenaufbruch, Blüte, Fruchtbildung und Seneszenz steht in direktem Zusammenhang mit klimatischen Bedingungen und spielt eine große Rolle in Ökosystemprozessen. In einer aktuellen Publikation wird dargestellt, dass sich aus den Beobachtungskurven der Flora-Incognita-

Daten der Blühbeginn berechnen lässt. So können opportunistische Pflanzenbeobachtungen das traditionelle Phänologie-Monitoring unterstützen – und sogar um weitere Arten ergänzen [5]. Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist die Überwachung der Ausbreitung von invasiven Arten (Abbildung 2). Mit Flora-Incognita-Pflanzenbestimmungen werden präzise Echtzeitdaten generiert, die es langfristig möglich machen könnten, ein Frühwarnsystem für invasive Arten in Deutschland zu etablieren.

Literatur

- [1] Rzanny et al. (2017). *Plant Methods* 13, <https://doi.org/10.1186/s13007-017-0245-8>
- [2] Rzanny et al. (2022). *Frontiers in Plant Science* 12, <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.804140>
- [3] Rzanny et al. (2019). *Plant Methods* 15, <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0462-4>
- [4] Mäder et al. (2019). *Methods in Ecology and Evolution* 12, 1335-1342, <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13611>
- [5] Katal et al. (2023). *Frontiers in Plant Science* 14, <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1150956>

Anke Bebber, Dr. Jana Wäldchen,
Jena

UNIVERSITÄRE BIOLOGIEDIDAKTIK

Wie wird man eigentlich Biolog/-in? Und was hat das alles mit Kultur, Sprache und Identität zu tun?

Für das Verständnis unseres Fachs, seiner Kultur und nicht zuletzt eine optimale Förderung unserer Studierenden stellt sich die Frage, inwiefern vorhandene Vorstellungen darüber kollidieren und so Studien- und Karrierewege beeinflussen können.

Wie sich Studierende, Forschende und Lehrende mit einem Fach identifizieren, beeinflusst fundamental die Zusammenarbeit zwischen diesen Gruppen, aber auch, wie ein Fach im Inneren und von und nach außen wahrgenommen wird. Während Identität im essentialistischen Sinn eine unveränderliche Wesensart ist, geht eine sozialkonstruktivistische Sicht davon aus, dass ihre Ausformung ein nicht endender Prozess ist, beeinflusst von Sprache und sozialen und gesellschaftlichen Normen. Die universitäre Praxis formt also die Identität von Fach und Teilnehmenden in der Wechselwirkung zwischen Studierenden, Lehrenden und fachlichen Inhalten.

Naturwissenschaftliche objektive Praxis ohne Kultur und Identität?

Während es zu Physik oder Chemie oft klare Vorstellungen innerhalb wie außerhalb des Fachs gibt, haftet der Biologie der Ruf an, ein Fach ohne typischen Charakter zu sein. Gleichsam häufig als auch in ihrer Kultur „weichere“ Wissenschaft wahrgenommen, wird sie oft als Fach mit ausgewogenem Geschlechterverhältnis gesehen, das für eine vielfältige Studierendenschaft zugänglicher ist. Dies steht allerdings in Kontrast zu dem auffälligen Abfall des Frauenanteils über die verschiedenen Stufen akademischer Karrieren, was zeigt, dass ein hoher Frau-

enanteil zu Studienbeginn nicht gleichzustellen ist mit einer Abwesenheit von geschlechtsspezifischen Hürden [1].

Aufbauend auf zwei Studien zur Identitätsarbeit von Biologiestudierenden und -lehrenden an einer schwedischen Universität [2, 3] haben wir an drei europäischen Universitäten Studierende der Biologie zu ihren Studienwegen und Erlebnissen während des Studiums interviewt [4] und sind dabei immer wieder auf drei teilweise überlappende und teilweise konkurrierende Vorstellungswelten (sogenannte „figured worlds“, Abbildung 1) gestoßen, die für die Identitätsfindung Biologiestudierender zentral sind.

Welten der Biologie, der Naturwissenschaften und des Selbst

Zum einen ist es die Welt der Biologie als Fach, das sich in seiner Breite von Tieren und Pflanzen über Zellen, Gene und Moleküle bis zur medizinischen Anwendbarkeit erstreckt. Während diese Welt auf Studierende große Faszination ausübt und entscheidend für ihre persönliche Motivation ist, wirkt sie in ihrer Breite auch einschüchternd und wenig greifbar. Dies äußert sich unter anderem darin, dass viele Studierende sich scheuen, das Label der Biologin oder des Biologen für sich anzunehmen und stattdessen im Zweifel lieber eine als präziser empfundene Bezeichnung wie Pflanzenökologin oder Neurowissenschaftlerin verwenden – ein Phänomen, das auch noch bis hin zur Professur zu beobachten ist.

Die zweite Vorstellungswelt mit großem Einfluss auf Biologiestudierende ist die der akademischen Naturwissenschaft. Diese ist wenig spezifisch für die Biologie und entspricht in vieler Hinsicht der in Physik oder Chemie beschriebenen Wissenschaftsvorstellung. Sie ist geprägt von einem Fokus auf fachlichen Inhalt, Leistungsdenken – insbesondere der Teilnahme an aktiver Forschung und Publikationen – aber

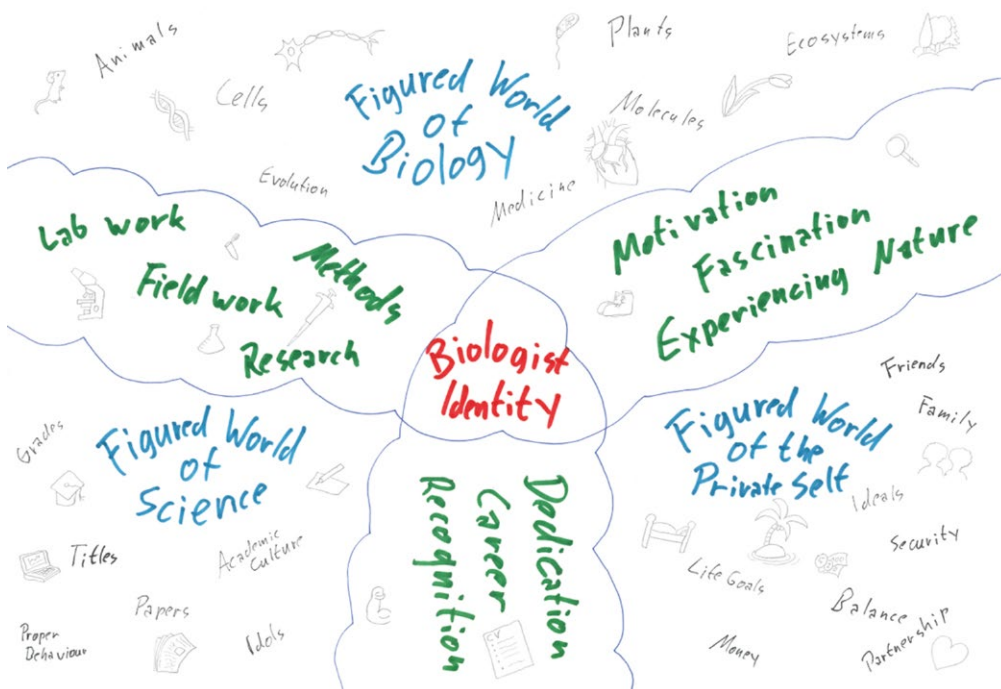


ABB. 1 Kollidierende Welten: Die Entstehung der Identität aus drei interagierenden Vorstellungswelten (figured worlds), skizziert während der Entstehung der Arbeit.

auch von Vorstellungen angemessenen Verhaltens und Auftretens sowie speziellen Formen fachlicher Kompetenz. Hierbei werden Seriosität, Objektivität und eine gewisse Emotionslosigkeit, aber auch das implizite Anerkennen von Karriere-stufen, Rängen und akademischen Graden als Werte gesehen. Auffällig ist, dass diese Vorstellungswelt viele als klassisch männlich gelesene Eigenschaften als akademische Ideale aufgreift. Dies und das als stark formalisiert wahrgenommene Abarbeiten von Studienleistungen wird oft in einem starken Konflikt zu einem idealistischer geprägten Bild der Biologie als Fach wahrgenommen. Bemerkenswert ist, dass das Erreichen einer Selbstidentifikation als Wissenschaftler/-in oft an der Teilnahme an bestimmten Handlungen, insbesondere der selbstständigen Forschungstätigkeit festgemacht wird und damit unabhängig von der Identifikation als Biologin oder Biologe eintritt.

Die dritte entscheidende Vorstellungswelt ist die des privaten Selbst. Diese ist zwar für jeden Menschen einzigartig, umfasst aber viele gemeinsame Faktoren wie Selbstverwirklichung, Freizeitgestaltung, persönliche Ideale, Familien- und Karriereplanung oder weiteres. Für Studierende ist es wichtig, für dieses private Ich jenseits des Studiums Raum zu finden, gleichzeitig besteht aber auch der starke Wunsch, persönliche Eigenschaften in das Studium einzubringen und hierfür angemessene Anerkennung zu erhalten. Gelingt dies nicht, entsteht leicht der Eindruck, sich selbst verstellen zu müssen, um in der akademischen Welt Erfolg haben zu können oder sonst keinen Platz in dieser zu finden. Der entstehende Konflikt zwischen der erlebten akademischen Kultur und dem eingangs beschriebenen und zu Studienbeginn erwarteten Bild der Biologie als vielfälti-

gem, gleichberechtigtem und leicht zugänglichem Fach hat für viele Studierende ein besonders hohes Frustrationspotenzial. Vorstellungen über fachliche Kultur(en), deren Reproduktion und die Möglichkeit der Identifikation sind folglich zentral in der Identitätsarbeit von Studierenden und Lehrenden.

Potenzial für Veränderung

Wir denken, dass ein klareres Bewusstsein für ein Vorhandensein von kulturellen Normen innerhalb der Biologie und des Studiums essenziell ist, um die Idee eines kulturellen Fachs und einer rein objektiven und leistungsgetriebenen Praxis zu überwinden. Diese in den Naturwissenschaften weit verbreiteten Klischees bergen die Gefahr, ein Bild zu erzeugen, welches suggeriert, in der Biologie seien unter anderem geschlechterspezifische Ungleichheiten überwunden und Erfolg ausschließlich von der eigenen Leistung abhängig. Statt Chancen zu schaffen, verschleiern solche Ideen und sprachliche Reproduktionen (sogenannte Diskurse) bestehende Probleme und erschweren die Arbeit in Richtung Chancengleichheit für alle Studierenden [5]. Die andere große Aufgabe ist es, das Bild der Biologie als Fach und der naturwissenschaftlich-akademischen Praxis im Allgemeinen kritisch zu reflektieren. Dazu sollte einerseits gehören, sicht- und nachvollziehbarer zu machen, inwiefern akademische Handlungsweisen, Organisationsstrukturen und explizite sowie „ungeschriebene“ Normen konkret sinnvoll und wichtig sind, zum anderen aber auch, diese Elemente der akademischen Kultur bewusst wahrzunehmen, auf Sinnhaftigkeit zu prüfen und nicht an eingefahrenen Strukturen festzuhalten.

Auf den Punkt brachte es Oakley, eine nicht-binäre Person aus

unserer Studie, mit dem Satz: „**Die Biologie muss besser darin werden, den Menschen hinter der Praxis zu sehen.**“ Diese bewusste Wahrnehmung von Menschlichkeit und die darauf aufzubauende tatsächliche aktive Integration aller Teilnehmenden muss das Ausruhen auf der Vorstellung eines uneingeschränkt objektiven, ausgeglichenen und zugänglichen Fachs ablösen. Nur dann kann es uns gelingen, diesem Ideal tatsächlich näher zu kommen!

Literatur

- [1] S. L. Eddy, S. E. Brownell (2016). Beneath the numbers: A review of gender disparities in undergraduate education across science, technology, engineering, and math disciplines. *Physical Review Physics Education Research* 12(2), 020106, <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.12.020106>
- [2] K. P. Günter et al. (2021). “Quite ironic that even I became a natural scientist”: Students’ imagined identity trajectories in the Figured World of Higher Education Biology. *Science Education* 105(5), 837–854, <https://doi.org/10.1002/sce.21673>
- [3] K. P. Günter et al. (2022). “I try to encourage my students to think, read, and talk science”: intelligible identities in university teachers’ figured worlds of higher education biology. *Journal of Research in Science Teaching* 60(6), 1195–1222, <https://doi.org/10.1002/tea.21829>
- [4] K. P. Günter et al. (2023). Dedicating, faking, and surviving: Disclosing tensions in how three women university students negotiate collectively celebrated norms across European contexts. *International Journal of Science Education* 45(12), 1032–1052, <https://doi.org/10.1080/09500693.2023.2183098>
- [5] A. J. Gonsalves et al. (2019). “It’s not my dream, actually”: students’ identity work across figured worlds of construction engineering in Sweden. *International Journal of STEM Education* 6(1), 1–17, <https://doi.org/10.1186/s40594-019-0165-4>

Roland Gromes, Heidelberg
Katerina Pia Günter,
Umeå/Schweden
und San Francisco/USA
Luc Bussière, Göteborg/Schweden

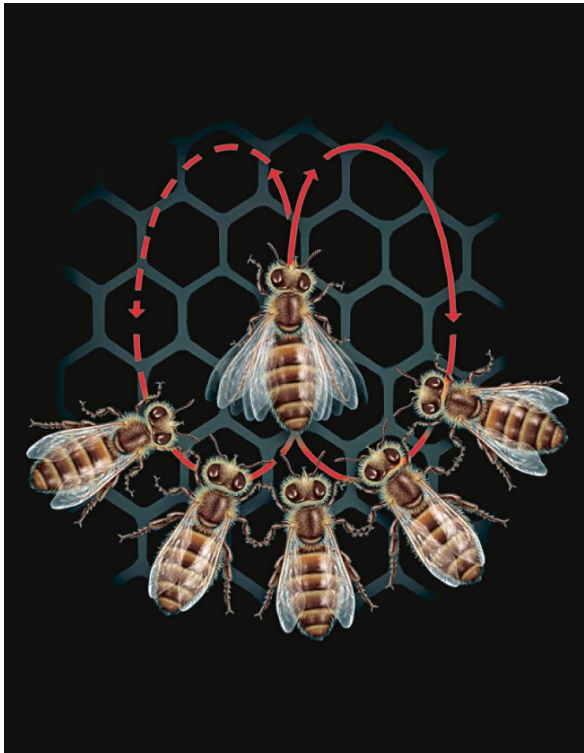
Die Kontroverse um den Schwänzeltanz aus wissenschaftshistorischer Sicht (Nachdruck aus MaxPlanckForschung 1/2010)

Der Forscher, der auf Bienen flog

TINA HEIDBORN

Aristoteles hat ihn beobachtet, Karl von Frisch für seine Erklärung den Nobelpreis bekommen: Mit dem Schwänzeltanz verständigen sich Honigbienen über die Lage von Nahrungsquellen.

Abb.: Science Photo Library / BONNIER PUBLICATIONS / LENA UNTIDT.



In der Lederhose und mit seinen schneeweißen Haaren sah der ältere Herr recht schneidig aus. Unzähligen Schülgenerationen wurden die Schulfilme präsentiert, in denen der Zoologe Karl von Frisch die Tänze der Honigbiene erklärte. Und die machten ihn weltberühmt. Im Rahmen eines Projekts über wissenschaftliches Beobachten beschäftigt sich Tania Munz am Berliner Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte mit dem Leben des Forschers.

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 36 erklärt.

Der Herr pff, der Fisch kam: Zu den Lieblingsversuchstieren des Karl von Frisch gehörten Fische, und im Besonderen ein blinder Zwergwels namens Xaverl. Den hatte von Frisch so dressiert, dass der angeschwommen kam, sobald er leise pff. Womit bewiesen war: Fische können hören. Noch lieber als Fische mochte der Wissenschaftler allerdings Bienen. „Der Schwänzeltanz sieht drollig aus. Er ist aber eigentlich nicht drollig, er ist fabelhaft interessant. Er gehört zu den wunderbarsten Vorgängen im Reich der Insekten. Und das will viel sagen“, erinnerte sich Karl von Frisch im Rückblick. Die Entschlüsselung des Schwänzeltanzes der Honigbiene brachte dem Verhaltensbiologen 1973 den Nobelpreis ein. Und ein gewaltiges allgemeines Interesse. „Es war ein Riesenummel“, sagt die Wissenschaftshistorikerin Tania Munz, die gerade an einem Buch über von Frisch arbeitet (Abbildung 1, Anmerkung der Redaktion: Das Buch ist 2018 auf Deutsch im Czernin-Verlag erschienen).

Was von Frisch Mitte der 1940er Jahre herausgefunden hatte, faszinierte nicht nur Forscherkollegen. „Von Frisch hat viele öffentliche Vorträge gehalten, an Schulen, an Bildungseinrichtungen und so weiter. Ich habe im Archiv zum Beispiel einen Brief von einer Schule gefunden, die den Wissenschaftler um einen Vortrag bittet. Ein Jahr zuvor war von Frisch bereits dort gewesen. Auf die erneute Einladung schrieb er zurück, er könnte ja mal über Fische vortragen, das sei auch ein spannendes Thema. Woraufhin die Schule zurückschrieb: Jaja, das sei sicher sehr interessant. Aber er solle doch bitte über die Bienen sprechen!“, erzählt Tania Munz. Die Amerikanerin, die auch die Schweizer Staatsangehörigkeit besitzt, kam über die Nobelpreisrede von Frischs zu ihrem Thema. „Ich fand die Experimente faszinierend. Von Frisch hat sehr sorgfältig gearbeitet, sehr genau, sehr kreativ. Er hat einfach gute Forschung gemacht – was man auch daran sehen kann, dass seine Arbeiten heute immer noch zitiert werden“, sagt sie. Als Sinnesphysiologe beschäftigte sich von Frisch seit den 1920er Jahren mit Fragen wie: Können Fische oder Bienen Geräusche hören, können Bienen Farben, Gerüche und Geschmäcker unterscheiden?

Wackeln mit dem Hinterteil als Entfernungsmesser

Für seine Experimente entwickelte Karl von Frisch ein ausgeklügeltes Markierungssystem, mit dem er einzelne Bienen innerhalb des Schwarms verfolgen konnte. So suchte er nach dem Sinn und Zweck der sogenannten Bientänze, die bereits Aristoteles aufgefallen waren: Honigbienen, so postulierte der Wissenschaftler, übermitteln mithilfe von bestimmten Rund- und Schwänzeltänzen (Abbildung 2) ihren Artgenossen Informationen über Nahrungsquellen. Kehren sie von einer ergiebigen Futterquelle zurück, die nicht weiter als 100 Meter entfernt liegt, so alarmieren sie die anderen Bienen mit einem Rundtanz. Ist die Nahrung weiter entfernt, macht sich die fündige Biene ans Schwänzeln. Zurück im Stock läuft sie eine Acht: Zunächst eine gerade Strecke, dann einen Halbkreis, wiederum die gerade Strecke und einen Halbkreis in der anderen Richtung. Der Winkel, den die Biene zum Bienenstock einnimmt, entspricht dabei dem Winkel zur Sonne, in dem die Biene auf ihrem Flug zu dem Futterplatz unterwegs war (Abbildung 3). Die Geschwindigkeit, mit der die Biene auf der geraden Strecke mit ihrem Hinterteil hin- und herwackelt („schwänzelt“), zeigt die Entfernung zur Futterquelle an.

Die vierte Kränkung der Menschheit?

„Es war eine Sensation“, sagt Munz, „dass Tiere so exakt und noch dazu symbolisch kommunizieren können.“ Für das Selbstverständnis der Menschen warf von Frischs Entdeckung zudem schwerwiegende Fragen auf: Wenn selbst so niedrige Tiere wie Insekten so meisterhaft kommunizieren können, was bedeutet das für die Unterscheidung von Mensch und Tier? Jahrhundertlang war die Sprache allein den Menschen vorbehalten gewesen (glaubten die Menschen zumindest), sie war als das Trennende angesehen worden, das *Homo sapiens* von den anderen Lebewesen auf der Erde schied. Von Frischs Forschungen nagten an diesem Selbstbild.

Karl von Frisch stieß mit seinen Arbeiten nicht überall auf Zustimmung. Noch bevor er mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurde, erhob sich Kritik, vorgetragen insbesondere von dem Amerikaner Adrian Wenner. Dieser glaubte durchaus, dass die Bienen in ihren Tänzen Informationen übermittelten. Doch er bezweifelte die Bedeutung dieser Informationen: Ausschlaggebend dafür, ob eine Biene eine Futterquelle finde oder nicht, sei allein der Duft dieser Futterquelle, so Wenner. Die Angaben in den Tänzen würden nicht gebraucht und sogar ignoriert werden. „Karl von Frisch war schon über 80 Jahre alt, als diese Debatte ausbrach“, sagt Tania Munz, „er hatte Unmengen von Daten und Studien, er hatte viele Schüler, aber er selbst war zu diesem Zeitpunkt nicht mehr aktiv mit Experimenten beschäftigt.“ Dank seiner Studien und einer Vielzahl internationaler Unterstützer habe er dennoch eine gute Figur in der Auseinandersetzung gemacht. Und natürlich habe ihm



ABB. 1 Die promovierte Wissenschaftshistorikerin Tania Munz hat 2018 im Czernin-Verlag ein Buch über Karl von Frisch veröffentlicht. Fotos: T. Munz: organicheadshots.com, Karl von Frisch: Archiv Karl Daumer.

die Verleihung des Nobelpreises enorme Rückendeckung gegeben.

Die Debatte über den Informationsgehalt der Bientänze ist bis heute nicht zu einem Ende gekommen. Für die Zunft der Bienenforscher ist es ein echter Aufreger – und seit Jahrzehnten ein Dauerbrenner. Erst Ende vergangenen Jahres (Anmerkung der Redaktion: Dieser Beitrag ist ein Nachdruck aus MaxPlanckForschung 1/2010.) meldete sich erneut ein Wissenschaftler in der SÜD-

IN KÜRZE

- Der Wiener Verhaltensbiologe Karl von Frisch (1886–1982) hat unter anderem die **Sinneswahrnehmung der Honigbiene** erforscht. Dabei hat er entdeckt, dass sich die Tiere mithilfe einer Art „Tanzsprache“ miteinander verständigen.
- Für seine Entdeckung des Schwänzeltanzes wurde Karl von Frisch 1973 mit dem **Nobelpreis für Medizin oder Physiologie** ausgezeichnet. Die Debatte über den Informationsgehalt der Tänze ist bis heute nicht zu einem abschließenden Ende gekommen.
- In dieser Ausgabe der *BiuZ* veröffentlichen wir zwei Artikel zur Bedeutung des Schwänzeltanzes, die unterschiedliche Sichtweisen einnehmen. Wir verstehen diese Artikel als einen Beitrag zur **konstruktiven und sachorientierten Diskussion** und überlassen die inhaltliche Bewertung unseren Leserinnen und Lesern.
- Der vorliegende wissenschaftshistorische Artikel von Tina Heidborn soll dazu dienen, die Debatte um die Tanzsprache der Honigbienen in **einen gesellschaftlichen Kontext einzubetten**. Da er aus dem Jahr 2010 stammt, sind nicht alle wissenschaftlichen Details Stand der Forschung.
- Der Text wurde ursprünglich im Forschungsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft veröffentlicht (www.mpg.de/779937/MPF_2010_1). Die Zusammenfassung wurde von *BiuZ* ergänzt und auch die Bebilderung wurde angepasst. **Wir danken der MPG herzlich für die Erlaubnis den Text abzdrukken.**

DEUTSCHEN ZEITUNG zu Wort: Der Würzburger Biologe Jürgen Tautz erklärte darin, dass Bienen nicht allein mithilfe des Schwänzeltanzes eine nicht duftende Nahrungsquelle finden könnten, Karl von Frisch habe die Bedeutung gerade der Ortsangaben in den Schwänzeltänzen überschätzt.

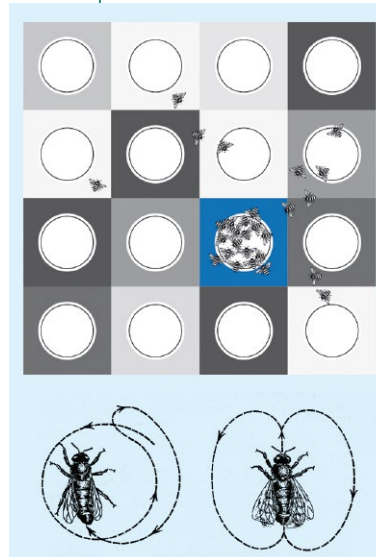
Schlagabtausch zwischen Wissenschaftlern

Tautz reihte sich damit in die nicht abreißende Reihe der von-Frisch-Kritiker ein. Und erntete prompt heftigen Widerspruch aus dem eigenen Umfeld. Umgehend insistierte etwa sein Berliner Kollege Randolph Menzel, dass die Bientänze eine Fülle wichtiger Informationen enthielten und eine bedeutende motivierende und instruierende Funktion hätten. Mit diesem neuerlich aufgeflamten Schlagabtausch geht die Debatte um die menschliche Interpretation des tierischen Tanzes in eine neue Runde.

Die Historikerin Tania Munz beobachtet den Zwist mit wissenschaftlichem Interesse, ohne selbst Stellung zu beziehen. „Ich bin keine Bienenforscherin, ich kann den Streit nicht schlichten“, betont sie. Sicher sei nur, dass die Kommunikation der Bienen enorm komplex und das letzte Wort in der Debatte noch nicht gesprochen sei. Munz kann die Auseinandersetzung aber in die Entwicklung der vergangenen Jahrzehnte einordnen. Für sie als Wissenschaftshistorikerin sind die aktuellen Debatten eine interessante Wiederauflage der Auseinandersetzungen zwischen Wenner und von Frisch in den 1960er- und 1970er-Jahren. Gegen einen Punkt der Kritik Adrian Weners, der derzeit wieder ins Feld geführt wird, nimmt Munz von Frisch aber ausdrücklich in Schutz: Wenn Wenner und seine Nachfolger behaupteten, von Frisch selbst habe in den 1920er- und 1930er-Jahren deutlich vorsichtiger formuliert, so sei das nicht fair argumentiert. Denn Karl von Frisch habe seine endgültige Theorie erst Mitte der 1940er-Jahre aufgebaut. Damals habe er seine früheren Forschungen revidiert und seine berühmten Thesen von der Bedeutung der Bientänze aufgestellt.

Die Max-Planck-Forscherin kann von Frischs damaliges Interesse an den Bienen auch in einen weiteren historischen Kontext einbetten. „Während des Nationalsozialismus fand man heraus, dass von Frisch eine jüdische Großmutter hatte. Daraufhin wollten ihn die Nazis aus dem Universitätsbetrieb rausdrängen. Aber viele Leute haben sich für ihn eingesetzt. Und von Frisch argumentierte, dass

ABB. 2 | DIE HONIGBIENE ALS FORSCHUNGSOBJEKT



Oben: Versuchsanordnung, mit der Karl von Frisch das Farbsehen der Honigbiene nachwies. Unten: Rund- und Schwänzeltanz geben Auskunft über nahe und weiter entfernte Nahrungsquellen. Abb. oben aus [1] und unten aus [2].

seine Forschungen helfen könnten, die ►Nosema-Plage, die Anfang der 1940er-Jahre die Bienenbestände bedrohte, zu bekämpfen“, sagt Munz. Da die Bienen die wichtigsten Blütenbestäuber waren, sahen die Nazis die Arbeiten von Frischs als wichtig für die Versorgung der deutschen Bevölkerung an. Er konnte weiter forschen und bekam sogar offiziell Staatsgelder dafür.

Mehr Bedeutung als für die reichsdeutsche Honigproduktion entwickelten die Arbeiten des Wissenschaftlers von Frisch auf einem anderen Feld: der Kommunikationsforschung. Von Frischs Erkenntnisse und Experimente beflügelten andere Wissenschaftler, sich mit Fragen der tierischen Kommunikation auseinanderzusetzen. Im Hintergrund, gibt Tania Munz aus wissenschaftshistorischer Sicht zu bedenken, spielte dabei auch eine Rolle, dass sich die Erforschung von Kommunikation nach dem Zweiten Weltkrieg zu einem weltweiten Trend entwickelte.

Computerwissenschaftler und Kybernetiker beschäftigten sich mit ihr im Rahmen der künstlichen Intelligenz, wenig später revolutionierten Noam Chomskys Thesen von der Tiefengrammatik die Welt der Linguisten. In Laboren auf der ganzen Welt begannen Wissenschaftler, sich an die Lippen und Mandibeln von Bienen, Affen, Vögeln, Walen oder auch Delfinen zu hängen, um ihre Sprache zu untersuchen. Zum Star in diesem Forschungszirkus brachte es

GLOSSAR

Anthropozentrismus: Bedeutet, dass der Mensch sich selbst als den Mittelpunkt der weltlichen Realität versteht.

Anthropomorphismus: Bezeichnet das Zusprechen menschlicher Eigenschaften etwa auf Tiere, Götter oder Naturgewalten.

Behaviourismus: Abgeleitet vom englischen *behaviour* (Verhalten); wissenschaftlicher Standpunkt, der davon ausgeht, dass sich das Verhalten von Menschen und Tieren mit den Methoden der Naturwissenschaft untersuchen lässt. Der Behaviourismus wurde zu Beginn des 20. Jahrhunderts begründet und in den 1950er Jahren vor allem durch die Arbeiten von Burrhus Frederic Skinner bekannt.

Nosema: Die Nosema (auch Nosemose, Frühjahrsschwindsucht oder Darmseuche genannt) ist eine durch die Jochpilzarten *Nosema apis* oder *Nosema ceranae* verursachte Erkrankung bei Honigbienen. Nosema ist die häufigste Krankheit bei erwachsenen Bienen und hochansteckend.

die Schimpansin Washoe, die mehr als 30 Symbole einer Zeichensprache lernte.

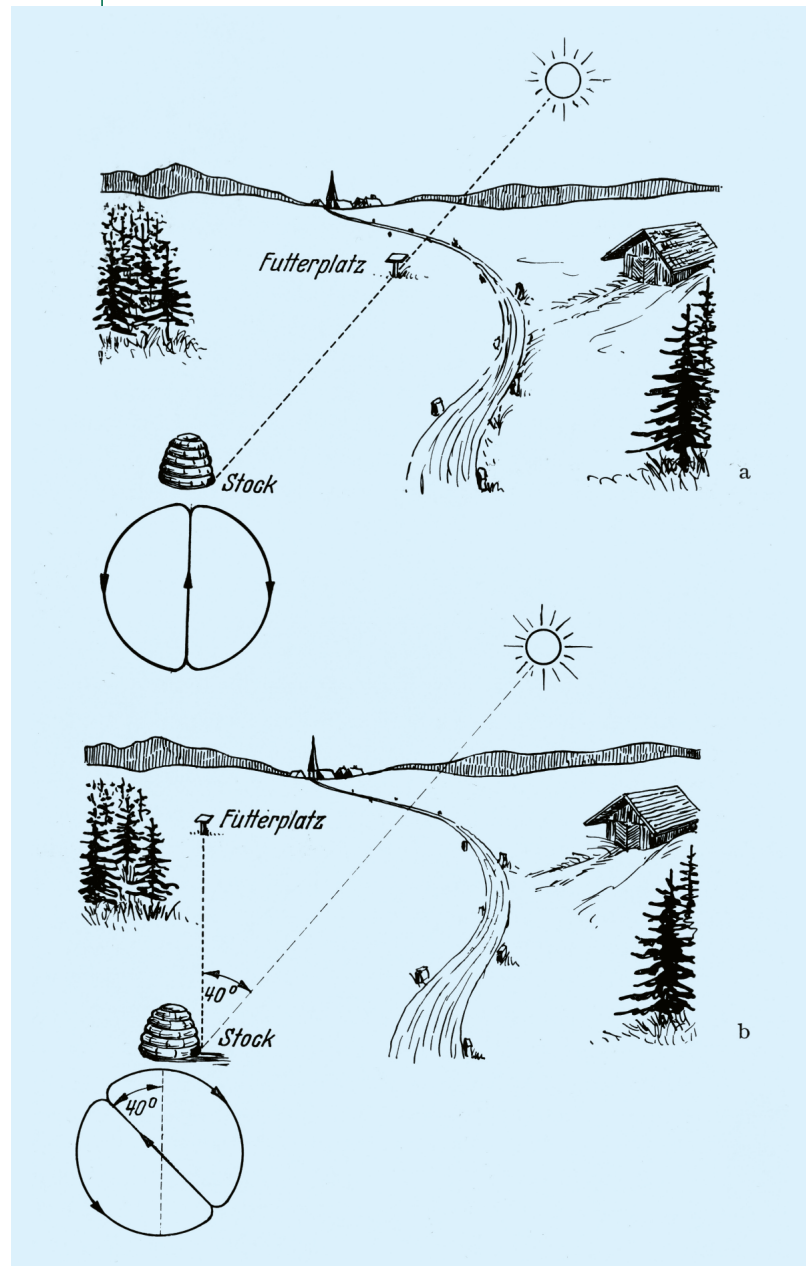
Doch es war nicht allein die Faszination, die von den Arbeiten Karl von Frischs ausging, die Nachahmung hervorrief. Tania Munz sieht in dem enormen Interesse auch eine Gegenbewegung zum damals herrschenden ► Behaviourismus. „Die Leute hatten den Behaviourismus satt. Er verbot ihnen jegliche Aussage, die über das beobachtbare Verhalten von Tieren hinausging“, sagt sie. Und zugleich verschärften von Frischs Untersuchungen Überlegungen, die zu den Kern- und Kardinalfragen seriöser Forschung gehören: Wie forscht man, ohne selbst einzugreifen? Wie also beobachtet man Tiere möglichst objektiv? Ist dies überhaupt möglich? Wie entgeht man als Wissenschaftler der Falle des ► Anthropozentrismus und ► Anthropomorphismus?

Die Geschichte des Beobachtens im Blick

Dass auch die Forschung Trends unterliegt und sich in ihr bisweilen Umschwünge vollziehen, gehört zu jenen Phänomenen, die Wissenschaftshistoriker untersuchen. Die Arbeit von Tania Munz zu Karl von Frisch ist in ein größeres Projekt eingebettet: der Geschichte des wissenschaftlichen Beobachtens, an der Munz und Kollegen derzeit (2010) am Berliner Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte arbeiten. Der Doktorand Nils Güttler beschäftigt sich etwa mit der Entwicklung der Pflanzengeografie ab dem 18. Jahrhundert. „Die übergeordnete Fragestellung bei dem Projekt lautet: Wie erkennen und stabilisieren Wissenschaftler einen Gegenstandsbereich?“, sagt er. Denn die Frage, wie Pflanzen über die Erde verteilt sind, umfasst einen gigantischen, kaum zu überblickenden Untersuchungsraum: den gesamten Globus. Mit den Forschungsreisenden des 19. Jahrhunderts, speziell mit Alexander von Humboldt, rückte die Frage ins Blickfeld. Und es entwickelte sich eine Darstellungsform, die die Disziplin fortan prägte: geografische Karten. „Mithilfe der Karten konnte man das Beobachtungsfeld jetzt organisieren“, erklärt Güttler. Damit, sagt der Wissenschaftler, habe man den Beobachtungsgegenstand in eine bestimmte Form gebracht. Eine Form, die nicht frei erfunden war, sondern sich aus den Beobachtungen ergab und die sich als eine Art Maßstab zunehmend etablierte.

Doch die Karten, die Alexander von Humboldt entwickelte, sind heute überholt: Sie sind zu abstrakt und zu großflächig. Heute weiß man auch, dass mehr Faktoren die Verteilung der Pflanzen beeinflussen als die von Humboldt selbst ausgemachten: Nicht nur die Temperatur oder die Bodenverhältnisse, wie von diesem behauptet, spielen eine Rolle. Nach von Humboldts Tod etwa veränderten die Evolutionstheorien den Blick auf die Karten. Man betrachtete nun das aktuelle Vorkommen von Pflanzen und Pflanzengemeinschaft immer stärker als ein Ergebnis historischer Prozesse, etwa von Wanderungen. „Die Perspektive, aus der ich einen Gegenstand betrachte, ist entscheidend“, sagt Güttler. Und die ändert sich oftmals im Laufe

ABB. 3 | TIERISCHE POLARKOORDINATEN



Der Winkel zum Bienenstock und die Schwänzelsbewegung geben Richtung und Entfernung des Futterplatzes an. Abb. aus [1].

der Wissenschaftsgeschichte. Wissenschaftshistoriker sprechen vom *period eye*, dem spezifischen Blickwinkel einer bestimmten historischen Forschergeneration oder -epoche. In diesem Sinne blickte Alexander von Humboldt anders als heutige Wissenschaftler auf die Pflanzengeographie.

Tania Munz ist sich dieser Historizität wissenschaftlichen Arbeitens seit ihrer Beschäftigung mit Charles Darwin bewusst, dem Thema ihrer Masterarbeit. So wie Darwin würden heutige Wissenschaftler nicht mehr arbeiten, sagt sie. „Darwin hat nicht nur sehr unterschiedliche

Methoden angewandt. Er hat auch sehr heterogene Informationen zusammengetragen. Zum Beispiel hat er Informationen von Kollegen benutzt, die er für glaubwürdig hielt. Allerdings würde man heute dabei eher von Anekdoten sprechen, die nicht als wissenschaftliche Quellen gelten können. Aber damals gab es diesen Standard noch nicht.“ Auch die Bedeutung sich verändernder, oft sich weiterentwickelnder Beobachtungsmöglichkeiten lässt sich gut an den Arbeiten Karl von Frischs zeigen – mit seinem Markierungssystem für Bienen (Abbildung 4) schuf er ganz neue: Erstmals konnte er damit einzelne Bienen im Stock und an den verschiedenen Futterquellen identifizieren. Doch heute sind Bienenforscher dank neuer

Technik noch deutlich weiter: Sie können die Bienen auch im Flug verfolgen, etwa mit Radiotransmittern.

Mit einem simplen Verfahren zum Erfolg

Technik macht mittlerweile auch den Einsatz von programmierbaren Roboterbienen möglich – verglichen mit den künstlichen Holzbienen, die ein Mitarbeiter von Frischs entwickelt hatte, ein Fortschritt. „Aber die Bienenforschung von Karl von Frisch zeigt auch, dass Innovation und neue Denk- und Sichtweisen nicht immer nur mit Hightech möglich sind“, sagt Munz. Das Markieren der Bienen von Hand muss wohl eher als Lowtech-Verfahren gelten, brachte aber immensen Erkenntnisgewinn. Neuen

Techniken und Verfahren gegenüber war der 1886 in Wien geborene Biologe durchaus aufgeschlossen. So setzte er bereits Filmaufnahmen ein – vor allem zur Präsentation seiner Forschungen. „Von Frisch war der Erste, der auf der Tagung deutscher Ärzte und Naturforscher im Jahr 1924 Filmaufnahmen gezeigt hat. Damit konnte er die Bienen im Kongresssaal vorführen, auch im Winter, wenn eigentlich Schnee lag und die Bienen im Stock dämmerten. Das war natürlich sehr eindrucksvoll“, erzählt Tania Munz.

Für Karl von Frisch war die Beobachtung des Bienenanzes und anderer tierischer Phänomene sein Lebensthema (Abbildung 5). Die Liebe zu den unterschiedlichsten Tieren wurde dem späteren Wissenschaftler bereits im elterlichen Haushalt nahegebracht. Schon als Kind beherbergte er dort einen ganzen Zoo unterschiedlichster Tierarten, angeblich rund 170, die er leidenschaftlich beobachtete. Sein Vater, ein bekannter Chirurg, hätte es allerdings lieber gesehen, wenn der Sohn beruflich in seine Fußstapfen getreten wäre. So studierte von Frisch zunächst Medizin, bevor er dann zur Zoologie wechselte. Am Beobachten von Tieren, so schilderte es der Wissenschaftler selbst, kam er einfach nicht vorbei. „Jeder Frosch interessierte mich mehr als meine Schulaufgaben“, erzählte er einmal im Rückblick. „Die Liebe zur Tierwelt, die Freude an der Beobachtung ihrer Lebensregungen hat mir ein freundliches Geschick in die Wiege gelegt. Für meine Eltern war manche

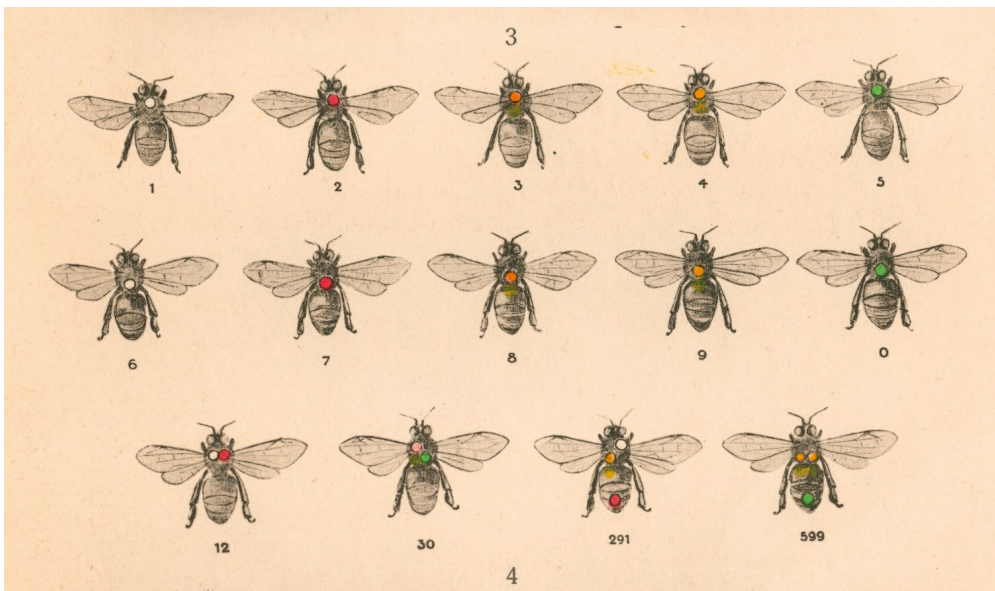


ABB. 4 Historisches Vorbild für die moderne Technik: Mit kleinen Farbtupfern kennzeichnete Karl von Frisch Hunderte Bienen und war in der Lage, mit diesem Lowtech-Verfahren jede Einzelne sogar im Flug zu identifizieren. Abb. aus [3].

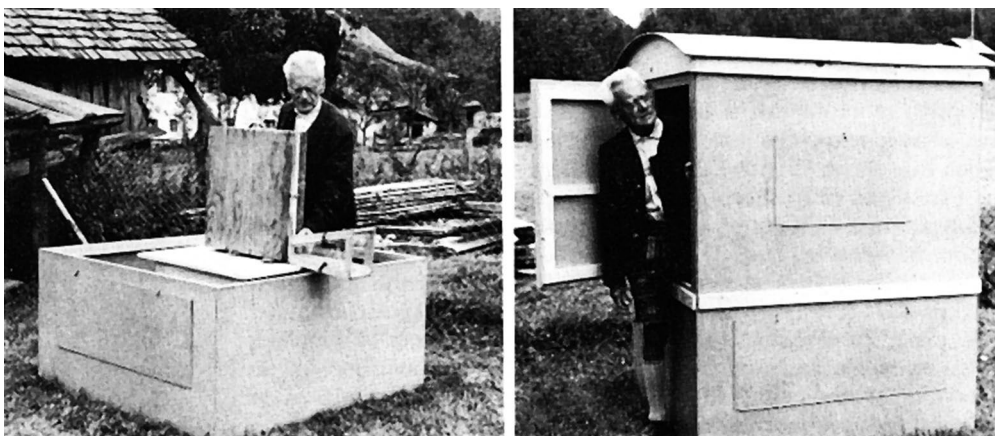


ABB. 5 Heimisch bei seinen Tieren fühlte sich Karl von Frisch schon als Kind. Noch in hohem Alter inspizierte der Zoologe, Verhaltensforscher und Sinnesphysiologe den eigens für seine Forschung angefertigten Bienenstock. Abb. aus [4].

Unbequemlichkeit damit verbunden. Dass sie trotzdem meine Neigung in jeder Weise gefördert haben, war wohl bestimmend für meinen künftigen Beruf.“ Und weiter: „Tiere aller Art, gekaufte Tiere, geschenkte, selbst gefangene, sind die ständigen Gäste meiner Kinderstube gewesen. Auch meine Mutter hatte gern in der trüben Winterzeit ein munteres Vögelchen um sich, meist eine Blauweisse, die im Zimmer herumfliegen durfte und der sie im Frühjahr die Freiheit zurückgab. Von meiner Mutter habe ich schnell gelernt, in den Tieren fühlende Wesen zu sehen.“

Zusammenfassung

Die Kontroverse um den Schwänzeltanz aus wissenschaftshistorischer Sicht

Karl von Frisch erlangte durch seine Forschungen zu den Bienen – insbesondere zur Entschlüsselung des Schwänzeltanzes – weltweite Berühmtheit und erhielt dafür 1973 den Nobelpreis. Der Artikel betont die Bedeutung von Frischs Entdeckung für die Verhaltensbiologie und hebt die Komplexität der Bienenkommunikation hervor. Der Artikel wirft auch einen Blick auf seine Experimente mit anderen Tieren wie Fischen und seine Rolle während des Nationalsozialismus. Die Debatte über den Informationsgehalt der Bientänze ist bis heute nicht abgeschlossen. Technologische Fortschritte ermöglichen laufend neue Erkenntnisse, die Bienenforschung von Karl von Frisch zeigt aber, dass auch mit Lowtech-Verfahren bahnbrechender Erkenntnisgewinn möglich ist. Aus der Perspektive der Historizität beleuchtet die Autorin den Wandel wissenschaftlichen Beobachtens.

Summary

Controversial discussions on the waggle dance from a scientific-historical perspective

Karl von Frisch achieved worldwide fame because of his research on bees – particularly for decoding the waggle dance, for which he was awarded the 1973 Nobel Prize. The article emphasizes the significance of Frisch's discovery for behavioural biology and points out the complexity of bee communication. The article also takes a look at his experiments with other animals, like fish, for instance, and his role during Nazi Germany. The debate on the informational content of bee dances has not been completed to this day. Technological advances continuously provide new scientific insights, but Karl von Frisch's bee research demonstrates that groundbreaking findings can also be gained through low-tech methods. From the perspective of historicity, the author reflects upon the change in scientific observation.

Schlagworte:

Karl von Frisch, Bienenanz, Nobelpreis, Historizität, *period eye*, Markierungsexperimente, wissenschaftliches Beobachten, tierische Kommunikation

Literatur

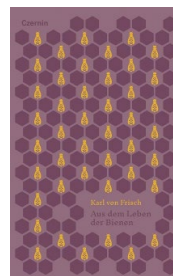
- [1] K. von Frisch (1957). *Erinnerungen eines Biologen*. Springer, Berlin Heidelberg New York.
- [2] K. von Frisch (1915). Der Farbensinn und Formensinn der Bienen. *Zoolog. Jahrb., physiol. Abt.* 35, 1–188.
- [3] K. von Frisch (1923). Über die „Sprache“ der Bienen. Eine tier-physiologische Untersuchung. *Zoolog. Jahrb., physiol. Abt.* 40, 1–186.
- [4] K. von Frisch (1965). *Tanzsprache und Orientierung der Bienen*. Springer, Berlin Heidelberg New York.

Zum Weiterlesen:



Der Tanz der Bienen.

Karl von Frisch und die Entdeckung der Bienensprache, Tania Munz, Czernin-Verlag, Wien, 2018, 360 S., 27,00 €, ISBN 978-3-70760-648-5.



Aus dem Leben der Bienen.

Karl von Frisch, Czernin-Verlag, Wien, 2019 (Neuausgabe), 280 S., 24,00 €, 978-3-70760-661-4.

Verfasst von:



Tina Heidborn hat sich als Journalistin auf die Themenbereiche Zeitgeschichte und Migration spezialisiert. Ihr Studium der Slavistik und Ost-europäischen Geschichte bietet dafür einen fundierten Hintergrund.

Korrespondenz

Dr. Tina Heidborn
Agnes-Wabnitz-Straße 3
10249 Berlin
E-Mail: kontakt@tinaheidborn.de
www.tinaheidborn.de

Eine Sammelbiene wirbt mit dem Schwänzeltanz für ein lohnendes Ziel und beginnt damit eine Kommunikationskette, die im Feld fortgesetzt wird. Foto: Ingo Arndt.



50 Jahre nach dem Nobelpreis

Die „Sprache“ der Bienen

JÜRGEN TAUTZ

Die „Sprache“ der Bienen ist weit komplexer, als es das einfache Modell zum sogenannten Schwänzeltanz wiedergibt. Die hohe Attraktivität des einfachen Modells aufgrund seiner kurzen klaren Aussage, die beeindruckende Sonderstellung unter den Insekten, die der Honigbiene als Folge dieses Modells zugeschrieben wird, aber auch bisherige methodische Beschränkungen, haben das Modell zementiert. Im Laufe der Zeit wurde nicht mehr verfolgt, was bereits Karl von Frisch in seinen ersten Studien zur Bienenkommunikation entdeckt hatte: Der Tanz im dunklen Stock ist Teil einer Verständigungskette; er findet seine Fortsetzung in Kommunikationssignalen draußen im Feld.

Am 12. Dezember 1973 wurde Karl von Frisch in Stockholm der Nobelpreis für Physiologie und Medizin verliehen. Seine zentrale wissenschaftliche Entdeckung wird auf der offiziellen Web-Seite der Nobelpreisstiftung in einer Kurzfassung wie folgt vorgestellt: „Ende der 1920er-Jahre zeigte von Frisch, dass Bienen, wenn sie Nektar in einer Blüte finden, in einem speziellen Muster fliegen und eine Art Tanz aufführen, der anderen Bienen in der Nähe zeigt, wo sie den Nektar finden können.“¹

Zwei experimentelle Kniffe waren entscheidend für diese Entdeckung: Zum einen wurden Honigbienen zu künstlichen Futterstellen dressiert, die zur leichteren Auffindbarkeit für die Sammelbienen mit Blütendüften dotiert waren. Zum anderen wurden Bienen mit Farbpunkten markiert, um erfahrene Bienen, die an ihnen bekannten Futterplätzen sammelten, und Rekruten, die erstmals an diesen Orten auftauchten, zu unterscheiden und Bienen sogar individuell wiedererkennen zu können. So gelang Karl von Frisch unter anderem die vom Nobelpreiskomitee hervorgehobene Entdeckung, dass die gleichen Bienen, die man in einem Beobachtungsstock beim Aufführen ihrer

¹ <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1973/frisch/facts/>

Tänze sieht, am Futterplatz auffallende Brauseflüge – also Flüge in einem speziellen Muster – aufführen (Abbildung 1). Neulinge, die als Nachtänzerinnen im Bienenstock zu sehen waren, trafen an den beworbenen Orten ein. Ein halbes Jahrhundert nach der Verleihung des Nobelpreises ist es nun an der Zeit, diese bahnbrechende Entdeckung von Karl von Frisch an die neuen Entwicklungen der Bienenforschung der letzten 40 Jahre anzupassen. Im folgenden Beitrag wird kursorisch und auszugsweise vorgestellt, welche Entwicklung die Bienenforschung genommen hatte, in deren Verlauf entscheidende Entdeckungen Karl von Frischs in Vergessenheit geraten sind.

Klassisch ist die Formulierung, mit der Professor Börje Cronholm, Mitglied des Nobel-Komitees für Physiologie und Medizin, anlässlich seiner Einführungsrede zur Preisverleihung (stellvertretend für Karl von Frisch an dessen Sohn Otto von Frisch, der bei der Preisverleihung in Stockholm vor Ort war) den Informationsgehalt der Tänze vorstellte: „Der Tanz informiert die Bienen im Bienenstock über das Vorhandensein von Nahrung, oft auch über die Richtung, in der die Blumen gefunden werden und über die Entfernung zu ihnen“. Die leicht zu machende Beobachtung, dass Bienenneulinge genau dort eintreffen, wo bereits erfahrene Bienen sammeln, erschien dafür als Beleg. Es folgte bei den Wissenschaftlern die Schlussfolgerung, dass rekrutierte Bienen aufgrund dieser Tanz-Information das Ziel finden. Eine Kommunikation zwischen Bienen im Feld wurde hier nicht erwähnt.

Diese Einschätzung zu einer „Sprache der Bienen“ bekam rasch und anhaltend erhebliche Aufmerksamkeit und Bewunderung. Stellvertretend sei aufgeführt, was die *Los Angeles Times* in einem Beitrag 1991 schrieb „... eine der wichtigsten wissenschaftlichen Hypothesen des 20. Jahrhunderts: Honigbienen führen sich gegenseitig mit komplizierten Tänzen zu Futterstellen“.² Nicht nur Biologen waren von der Vorstellung einer „Sprache der Bienen“ elektrisiert. Auf den Web-Seiten des Max-Planck-Institutes für Wissenschaftsgeschichte kann man dazu lesen: „Die Sprache der Honigbienen nahm ... einen herausragenden Platz ein – Zoologen, Psychologen, Linguisten, Soziologen und Anthropologen machten sie zur am häufigsten untersuchten Form der Tierkommunikation, und die Forscher hielten sie in Bezug auf ihre Komplexität für die zweitwichtigste Form nach der menschlichen Sprache.“³

Man findet bis heute immer wieder die Einschätzung, dass nur Menschen und Honigbienen die Fähigkeit besäßen, untereinander abstrakte Informationen zur Richtung und Entfernung eines Ortes auszutauschen [1]. So gesehen finden sich die Honigbienen über alle anderen Tiere herausgehoben wieder. Was lässt sich heute, 50 Jahre nach der Verleihung des Nobelpreises und rund 100 Jahre nach dem Beginn ihrer modernen Erforschung zum Wissensstand über die „Sprache der Bienen“ und dem dazu etablierten Modell sagen?

² <https://www.latimes.com/archives/la-xpm-1991-11-05-vw-842-story.html>

³ https://www.mpiwg-berlin.mpg.de/research/projects/deptll_munz_ScienceofAnimals



ABB. 1 Bereits Karl von Frisch hat in seinen frühen Versuchsprotokollen festgehalten, dass die gleichen Bienen, die im dunklen Stock Tänze aufführen, das Ziel mit auffallenden „Brauseflügen“ und geöffneter Nasanov-Drüse umfliegen. Foto: Ingo Arndt.

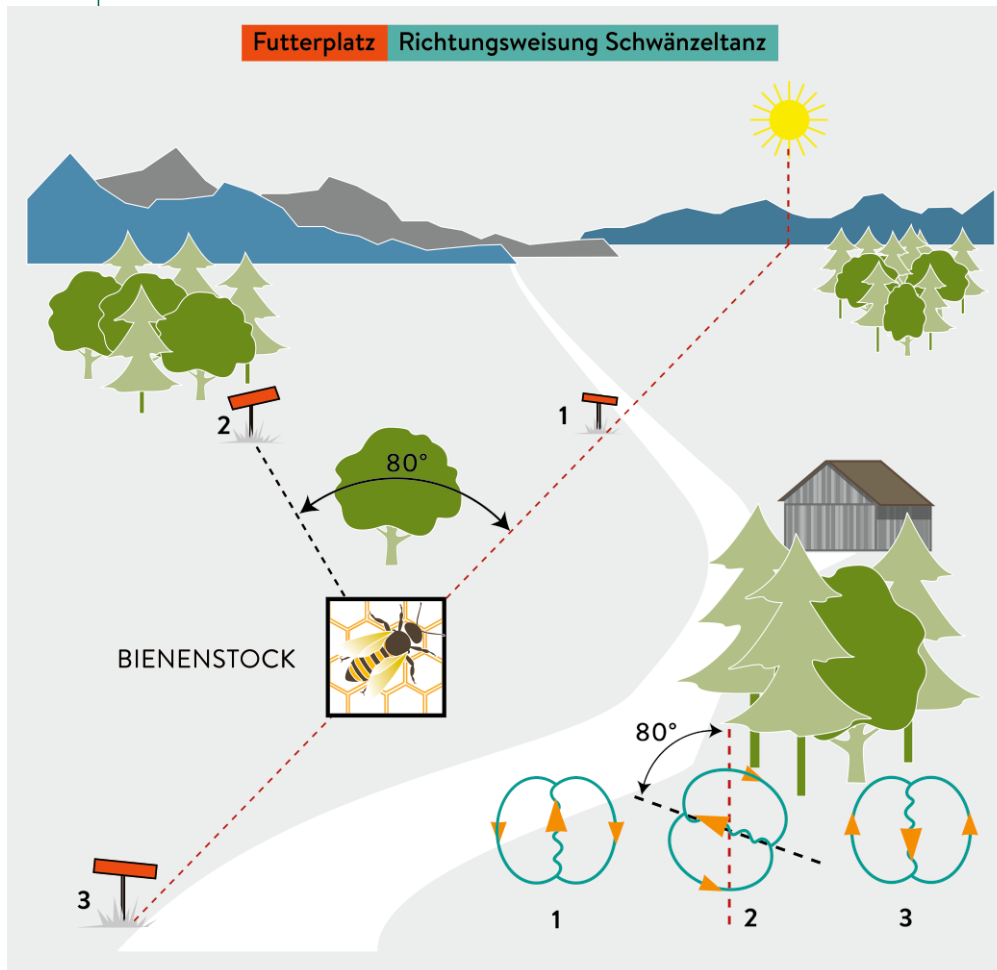
Die Fokussierung auf das Tanzverhalten

Mit den vielen neuen Puzzlestücken, die in den letzten Jahrzehnten gewonnen wurden, kann deutlich gemacht werden, dass das klassische Modell, das von Karl von Frisch begründet wurde und so auch in verkürzter Form Eingang in die Lehrbücher gefunden hat, mit vielen neueren experimentellen Daten nicht in Einklang zu bringen ist. Es zeigt sich, dass das Festhalten an dem bislang propagierten, „alten“ Modell nur einen sehr eingeschränkten Blick auf das an sich komplexe Kommunikationsverhalten erlaubt. Karl von Frisch konzentrierte sich bei der Untersuchung der Rekrutierung von Bienen an einen Futterplatz ausschließlich auf die Untersuchung von Bientänzen. Er erkannte schon sehr früh in seinen Studien, dass es damals

IN KÜRZE

- Karl von Frisch hatte mit dem Einsatz von Beobachtungsstöcken und der Dressur von Bienen auf beduftete Futterplätze **die moderne Bienenforschung eröffnet**.
- Dabei erkannte er die **Bientänze als Bausteine in der Kommunikation** zwischen Bienen.
- Er erkannte auch die Bedeutung einer **Kommunikation zwischen Bienen im Feld** für die Zielfindung der Rekruten – der Bienen, die im dunklen Stock den Tänzen gefolgt waren.
- Das **klassische Modell zur „Tanzsprache“** der Bienen und jahrzehntelange Forschung erfassen den Aspekt einer Verständigung zwischen Bienen im Feld nicht. Die Fülle an neueren Daten, schwer einzupassen in das alte Modell, machte eine neue Sicht immer drängender.
- **Ein neues Modell** löst eine Reihe von Widersprüchen und erlaubt den Verzicht auf zahlreiche Hypothesen.

ABB. 2 | KLASSISCHE DARSTELLUNG ZUR „SPRACHE“ DER BIENEN



Gezeigt ist hier die klassische auf den Fächerversuchen von Karl von Frisch basierende Darstellung, wie Nachtänzerinnen die Richtungsinformationen aus dem Bientanz entschlüsseln. Unten rechts sind drei Tänze schematisch dargestellt. Die Tanzbiene, die vom Sammelflug zurückgekehrt ist, markiert im Bientanz während seitlichem Schwingen des Hinterleibs eine besondere Linie und signalisiert damit eine Richtung. Tanz 1 und 3 weisen nach oben beziehungsweise unten, folgen also der Richtung der Schwerkraft. Damit wird jene Richtung signalisiert, in der der Futterplatz (orange markiert) positioniert ist. Die Nachtänzerin transformiert diese schwerkraftbezogene Richtungsinformation aus dem Tanz dann im freien Feld mit Referenz zum Sonnenstand. Nach diesem Modell findet eine Nachtänzerin, z. B. aus Tanz 2, den Weg zum Futterplatz, indem sie in einem um 80 Grad vom Sonnenstand nach links abweichendem Winkel fliegt. Die Darstellung folgt der Originalabbildung aus [2], 137, Abb. 119.

praktisch unmöglich war, am Zielort (der Futterstelle) die mögliche kommunikative Bedeutung von zwei Informationsquellen gleichzeitig zu entschlüsseln („ein spezielles Flugmuster“ und „eine Art Tanz“ – so das Zitat der Nobel-Stiftung). Systematische Beobachtungen und Zählungen der Bienen direkt am Ziel wurden bewusst aufgegeben [2].

In der Vorstellung von Bienenkommunikation im Sinne des klassischen Modells der Bienen-sprache spielt ein möglicher Austausch von Signalen zwischen Bienen außerhalb des Stocks bislang keine Rolle. Bis heute wird ausschließlich auf die Erforschung des Tanzverhaltens in allen möglichen Einzelheiten fokussiert. Das punktgenaue Eintreffen von Rekruten nach der Verfolgung von Tänzen in der

Dunkelheit des Bienenstockes wird ausschließlich dem Verhalten der Bienen im Stock zugeschrieben (Abbildung 2). Dabei zeigte sich von Beginn an ein Problem: Das Erscheinungsbild der Tänze zeigt eine hohe Variabilität; die vom Menschen abgelesene Zielangabe schwankt zum Teil erheblich. Trotzdem erreichen die Rekruten punktgenau das beworbene Ziel – und das bis in mehreren Kilometern Entfernung. Ein menschlicher Beobachter kann aus den streuenden Einzelwerten arithmetische Mittelwerte für Richtung und Entfernung berechnen, die recht gut die tatsächliche Lage des Zieles wiedergeben. Aus diesen Analysewerten wird dann die Hypothese formuliert, dass die rekrutierten Bienen mehrere Tanzrunden verfolgen, daraus Mittelwerte entnehmen und somit über die so verfeinerten genauen Zielkoordinaten verfügen [3]. Die Genauigkeit der errechneten Angabe steigt mit der Anzahl der Rohdaten. Das Weglassen der ersten und letzten Tanzrunden erhöht die Zielgenauigkeit zusätzlich [4].

Eine Frage, die über viele Jahrzehnte hinweg die Bienenforschung beschäftigte, war: In welchen Details der Tänze sind die Informationen über die Lage eines Zieles verschlüsselt? Die Ausrichtung der Schwanzphase relativ zur Schwerkraft auf den senkrecht hängenden Waben ist der Richtungsanzeiger – eine Tatsache, die als entscheidende Einsicht Karl von Frischs die moderne Erforschung der Kommunikation bei Honigbienen eröffnete. Die damals erfolgte Zusammenschau von Tanzfigur und letztlich auch punktgenauem Eintreffen von Rekruten am

beworbenen Futterplatz lässt es nachvollziehbar erscheinen, dass den Tanzfiguren eine hohe Präzision zugeschrieben wurde. Karl von Frisch hat dabei die Ablesewerte auf einen halben Winkelgrad genau tabelliert (Abbildung 3).

Die zweite Information, die der Tanzsprache zugeschrieben wurde, betrifft die Distanz vom Bienenstock zum Zielpunkt. Es zeigte sich, dass die Dauer der Schwanzphase mit der Entfernung zum Ziel zunimmt. Werden die Verhaltensdaten zur Dauer der Schwanzphase gegen die tatsächliche Entfernung des Futterplatzes vom Bienenstock aufgetragen (wenn diese kontrolliert in sukzessiven Experimenten verändert wird), entsteht eine Eichkurve, aus der im Falle einer für einen Beobachter unbekannt

Futterquelle die Entfernung zum Bienenstock abgelesen werden kann.

Stark variierende Angaben und Hilfhypothesen

Es fällt auf, dass in der Fachliteratur eine ganze Reihe höchst unterschiedlicher Eichwerte publiziert sind. Da es sich zeigte, dass Sammelbienen zurückgelegte Flugdistanzen nicht, wie ursprünglich angenommen, der im Flug verbrauchten Energiemenge entnehmen, sondern dem sogenannten optischen Fluss, der im Flug ihren Sehsinn reizt [5], liegt eine plausible Erklärung für die Tatsache der vielen unterschiedlichen Eichkurven auf der Hand: Der optische Fluss ändert sich mit der Struktur der in den Versuchen unterschiedlichen durchflogenen Landschaften [6]. Diese Einsicht zog eine Hilfhypothese nach sich, der zufolge rekrutierte Sammelbienen auf der gleichen Flugroute in der gleichen Flughöhe wie die Tänzerin zum Ziel fliegen müssten, um die Entfernungsangabe aus dem Tanz richtig umzusetzen.

Auch diese Hilfhypothese ist nicht belegt. Im Gegenteil spricht alles dafür, dass rekrutierte Bienen bei ihrem ersten Flug zum beworbenen Futterplatz nur mit einer groben Information ausgestattet wurden. Sie haben mit Sicherheit nicht jene zur Verfügung, die durch Mittelung vieler experimentell gemessener Tanzläufe oder durch Weglassen der ersten und letzten Tanzrunden präzisiert und virtuell zu Eichkurven standardisiert wurden. Bestimmt man die Flugzeiten zwischen Bienenstock und Ziel, benötigen Neulinge bis zur 50-fachen Dauer im Vergleich zu den Tänzerinnen [7]. Die Neulinge überladen sich um das 3-4-fache mit Nektar als Treibstoff für den Flug im Vergleich zu den Bienen, die das Ziel bereits besucht haben und dessen Position nun kennen [8]. Eine ebenfalls umstrittene Hypothese ist das Vorhandensein einer Landkarte im Kopf der Biene [9], für die bis heute überzeugende Belege fehlen [10, 11].

Rund- und Schwänzeltänze gibt es nicht als klare Kategorien

In den letzten Jahren haben zwei methodische Fortschritte die Tanzbewegungen bis ins letzte Detail aufklären lassen: Zeitlupen-Videoaufzeichnungen und das automatische Verfolgen und Aufzeichnen von Bewegungsspuren des exakten Tanzbewegungsverlaufes in Raum und Zeit über auf den Bienen angebrachte und optisch oder elektronisch erfasste Kennzeichen (Abbildung 4). Die Resultate dieser Studien bestätigen den prinzipiellen Aufbau der Schwänzeltänze, zeigen aber auch den hohen Grad an Idealisierung der klassischen Vorstellung (Abbildung 5). Die genaue Aufzeichnung der Tanzbewegungen hat auch ergeben, dass eine Unterscheidung in Rund- und Schwänzeltänze willkürlich ist. Mit zunehmender Distanz zwischen Bienenstock und Ziel verändert sich das Erscheinungsbild der Tänze fließend. Die immer wieder als klare Kategorien aufgeführten Rundtänze für nahe Ziele und

ABB. 3 | KARL VON FRISCHS VERSUCHSPROTOKOLL ZUR GENAUIGKEIT DER TÄNZE

69) 25. VIII Fortsetzung

es wird jetzt also alle Bienen von den alten Vätern, sofern sie noch vorhanden, empfangen. Alle mit weißem Papier sind normal

	Nr.	rechts	links	Winkel	Fehler
9 ¹⁰	103	ca 230°	130°	119,5°	150,5° - 20,5°
9 ¹¹	43	213°	147°	119,5°	150,5° - 3,5°
9 ¹³	106	224°	136°	120°	150° - 14°
9 ¹⁵	40	222°	138°	120,5°	149,5° - 11,5°
9 ¹⁶	48	218°	142°	121°	149° - 7°
"	48	210°	150°	121°	149° + 1°
9 ¹⁷	50 (Kurz)	ca 221°	ca 139°	121°	149° ca. - 10°
9 ¹⁸	45	228°	132°	121,5°	148,5° - 16,5°
9 ²⁰	43	220,5°	139,5°	122°	148° - 8,5°
9 ²¹	43	213,5°	146,5°	122°	148° - 1,5°
"	104	208,5°	151,5°	122°	148° + 3,5°
9 ²²	101	208,5°	151,5°	122,5°	147,5° + 4°
"	103	211,5°	148,5°	122,5°	147,5° + 1°
9 ²³	50	219°	141°	122,5°	147,5° - 6,5°
9 ²⁴	106	222°	138°	123°	147° - 9°
"	41	210°	150°	123°	147° + 3°
9 ²⁸	40	209°	151°	124°	146° + 5°

Originalprotokoll aus den Arbeiten von Karl von Frisch, in denen von Frisch und seine Mitarbeiter/-innen die Winkel der Ausrichtung bei der Schwänzeltänze im Verhältnis zur Schwerkrafttrichtung vermaßen. Sie gaben Winkelwerte bis auf 0,5 Winkelgrad genau an. Abb. aus [21].

Schwänzeltänze für weiter entfernte Ziele gibt es nicht. Es lassen sich keine klar getrennten Kategorien an Rekrutierungstänzen unterscheiden [12].

Es ist bekannt, dass Rekruten nachweislich allein durch Düfte vom Bienenstock aus zu bestimmten Futterzielen gelockt werden können. Deshalb lehnte eine Gruppe von Wissenschaftlern die Vorstellung ab, dass der Bientanz eine Ortsinformation beinhaltet [13]. Das war ein Standpunkt, der bereits durch die frühen Versuche Karl von Frischs widerlegt wurde. Karl von Frisch und Mitarbeiter konnten in den berühmten Fächer- und Stufenversuchen zeigen, dass die neu angeworbenen Rekruten an Kontrollstationen breit gestreut um das beworbene Ziel auftauchen

ABB. 4 | AUTOMATISCH AUFGEZEICHNETE TANZRUNDEN



Auf Basis optischer Daten automatisch aufgezeichnete Bewegungen des Hinterleibes einer Tänzerin mit mehreren aufeinanderfolgenden Schwänzelphasen und Rückläufen. ABB. aus [22].

(Abbildung 6 und 7). Dabei erscheinen sie an den aufgefächerten Zielen insgesamt umso häufiger, je kürzer die Entfernung zum von den Tänzerinnen beworbenen Ziel war.

Am Ziel selbst sind die Vorgänge komplex. Eine der seltenen Protokollierungen der Anflüge von Neulingen direkt am Ort, zu dem die Tänzerinnen selbst flogen, zeigte den erheblichen Rekrutierungserfolg zu diesem Ziel (Abbildung 7). Dieser Erfolg wäre erklärbar durch entweder eine hochpräzise „Tanzsprache“ oder durch eine

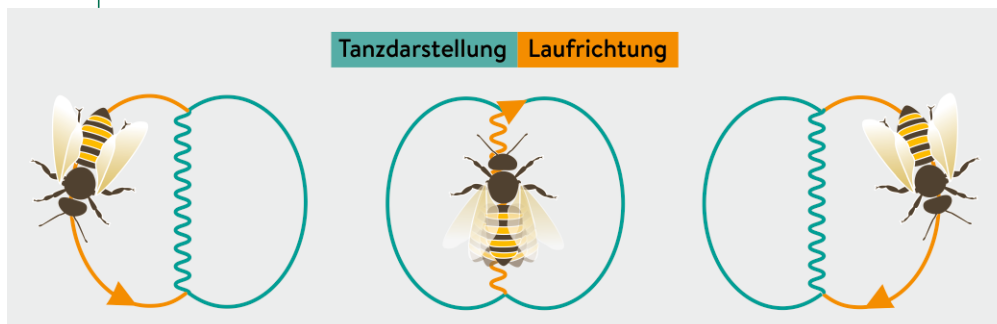
Fortsetzung der Kommunikation im Feld. Karl von Frisch hatte früh erkannt, dass letzteres der Fall ist. Doch ihm fehlte das methodische Rüstzeug, diese hoch komplexe Kommunikation weiter zu erforschen. Bis heute fehlen geeignete Methoden, um das Verhalten von erfahrenen Bienen und Rekruten auf dem Flug zum Ziel und dabei relevante Signale und Reize zu erfassen. Erst beim Ziel kommen die Bienen im wahrsten Sinne ins Blickfeld.

Methodische Fortschritte entwirren eine hochkomplexe Kommunikation

Seit den 1970er Jahren gelang es mit zwei unterschiedlichen experimentellen Ansätzen, den im Schwänzeltanz enthaltenen Informationswert zu isolieren. Dabei werben die Tänzerinnen für eine vorhandene Futterstelle, die sie auch selbst aufgesucht haben. Doch auf ihrem Flug zum Zielort durchflogen sie einen Tunnel mit einem experimentell-künstlich deutlich erhöhten optischen Fluss und bekommen so eine falsche Information über die Lage der Futterstelle. Den Bienen wird durch einen aufgezwungenen höheren optischen Fluss eine deutlich größere Flugweite vorgespielt, als es der tatsächlichen Strecke zwischen Bienenstock und Futterplatz entspricht. Diese Falschinformation geben sie im Tanz weiter. In diesem Experiment flogen die angeworbenen Bienen auch tatsächlich weiter als zu jenem Futterplatz, zu dem die Tänzerinnen tatsächlich geflogen waren [14].

Auch in einem zweiten diesbezüglichen Experiment wurde die Anwesenheit erfahrener Bienen in der Umgebung eines Zieles ausgeschlossen, damit keine Kommunikation zwischen den erfahrenen Bienen und den von ihnen rekrutierten Nestgenossinnen am Futterplatz zustande kommen kann. Dazu wurden die Nachtänzerinnen, unmittelbar nachdem sie den Tänzen gefolgt waren, am Stockausgang abgefangen. Sie wurden dann mit dünnen Metallantennen versehen, die vom Radar erfasst werden können, und zu einem entfernten Ort transportiert, von dem aus sie starten durften. Diese mit Radartechnik aufgezeichneten Flugspuren waren nicht beliebig ausgerichtet. Jede dieser Bienen flog in denselben Sektor hinein, der eine Öffnungsweite von dreißig bis vierzig Winkelgrad hatte [15]. Diese Öffnungsweite entspricht einem niedrigen Informationsgehalt für die Richtungsangabe von etwa 3 bit. Dieser geringe Informationsgehalt wurde bereits Jahre vor dem Vorliegen von Flugspuraufzeichnungen aus der Ungenauigkeit der Richtungsangaben in den Tanzfiguren im Bienenstock bestimmt [16, 17]. Es konnte damals nicht überprüft werden, ob Rekruten beim Flug vom Bienenstock diese ungenaue Angabe voll ausnutzen und sie in ihren ersten Flügen

ABB. 5 | STARK IDEALISIERTE DARSTELLUNG DES SCHWÄNZELTANZES



Drei Bewegungsphasen im Schwänzeltanz nach einer ersten zeichnerischen Darstellung durch Karl von Frisch: Rücklauf linksherum, Schwänzelphase, Rücklauf rechtsherum. Ein kompletter Tanzzyklus dauert nur wenige Sekunden und spielt sich auf einer Fläche von etwa zwei bis vier Zentimetern Durchmesser ab. Die Darstellung folgt der ersten und seitdem unzählige Male oft kopierten Originalabbildung eines Schwänzeltanzes aus [23].

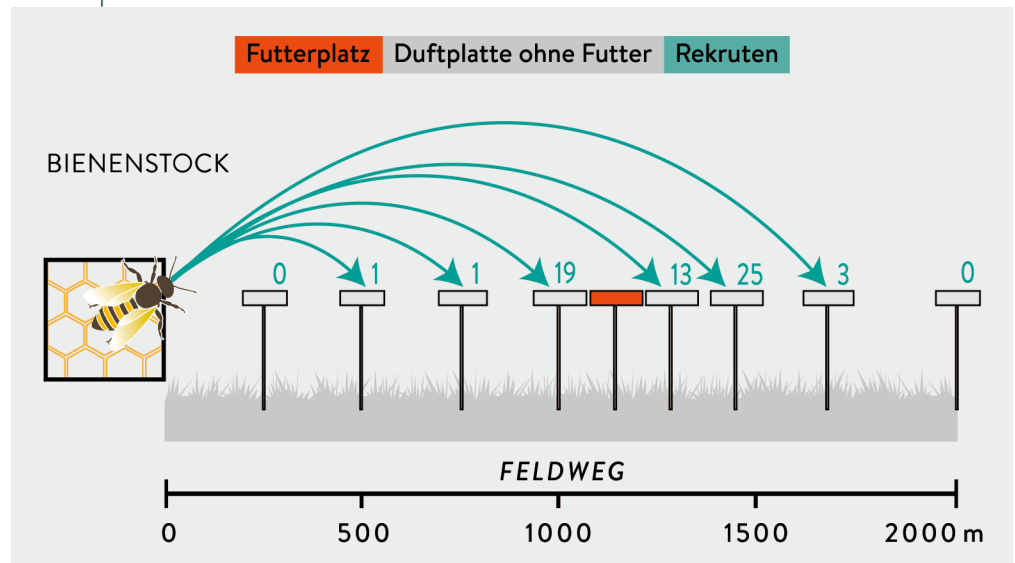
zum Ziel voll umsetzen. Die Aufzeichnungen der Flugspuren von Rekruten zeigen, dass der Informationsgehalt der Tänze und die daraus vorhergesagten Öffnungsweiten der Anfangsrichtung der Ausflüge der angeworbenen Rekruten gut zusammenpassen. Die Resultate aus den beiden geschilderten Versuchsansätzen belegen, dass die Bienen die Angaben aus den Tänzen durchaus nutzen, diese sind aber zu ungenau, um sie auch zum Ziel zu führen.

Das neue Modell – die Zugvögel machen es vor

Für die offene Frage, wie Neulinge trotz ungenauer Information über die Position eines beworbenen Futterplatzes dieses Ziel finden können, sind zwei Überlegungen hilfreich: Zum einen führt bereits der Kurztext auf den Seiten der Nobelstiftung über die allerersten Beobachtungen von Karl von Frisch auf die richtige Spur: Er konnte zeigen, dass die rekrutierenden Bienen, die im Stock tanzen, anschließend im Feld die Brauseflüge aufführen [7]. Zum anderen ist ein analoges Modell sehr hilfreich, das bereits sehr früh von Ornithologen für die sogenannte Fernorientierung von Zugvögeln aufgestellt worden war: Die Annäherung an ein Ziel erfolgt über mehrere unterschiedliche Schritte [18, 19].

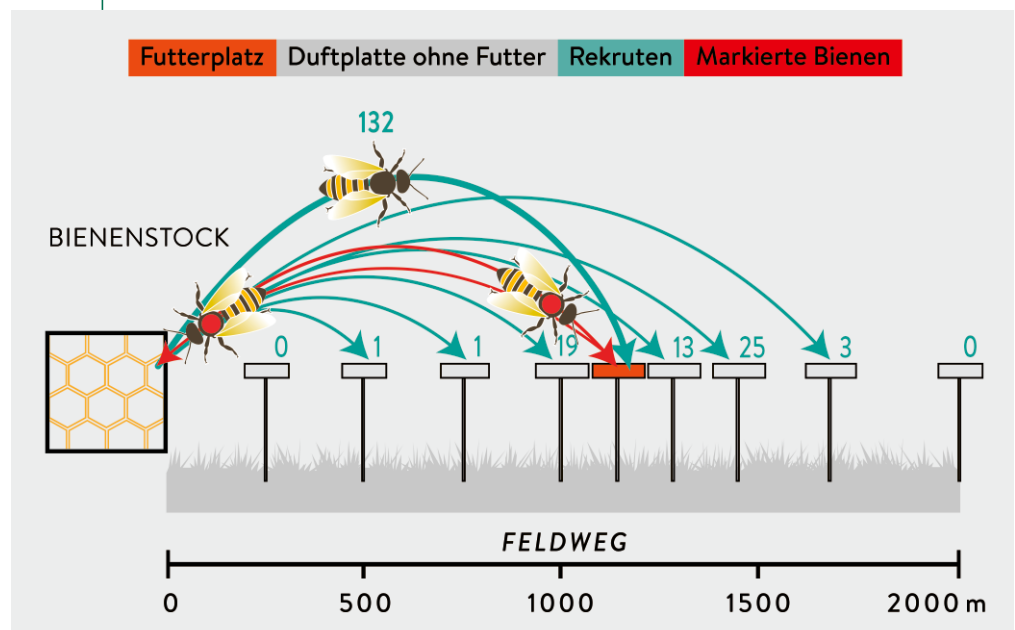
Die Methode, nach der Tiere ein räumliches Ziel erreichen können, das sie beim Aufbruch zu ihrer Reise oder im ersten Streckenabschnitt nicht direkt wahrnehmen, bezeichnet die Verhaltensforschung als Fernorientierung oder Navigation. Das angepeilte Ziel wird beim Start und im ersten Teil der Flugstrecke weder gesehen, noch gerochen oder gehört, es gibt also keine direkte wie immer geartete Verbindung mit dem Ziel. Navigationsleistungen von Tieren wurden schon sehr früh beim Heimfindevermögen von Zugvögeln untersucht – Jahre vor der modernen Erforschung der Kommunikation bei Honigbienen. Dabei wurden maximal drei aufeinanderfolgende Phasen identifiziert, über die ein Vogel zu

ABB. 6 | STUFENVERSUCH IN ORIGINALDARSTELLUNG



Gezeigt ist einer der vielen Stufenversuche, die Karl von Frisch und seine Mitarbeiter/-innen durchgeführt haben. Von einem Beobachtungsstock wurden dreißig Sammelbienen darauf dressiert, an einem Futterplatz (orange markiert) in 1050 Metern Abstand zum Bienenstock zu sammeln. Diese Bienen tanzten im Stock und aktivierten Rekruten. Acht Kontrollstationen wurden in gerader Linie und unterschiedlichen Abständen vom Bienenstock eingerichtet. Gezählt wurden die Rekruten, die sich den Kontrollstationen bis auf zwanzig Zentimeter angenähert hatten (nicht aber die, die den Futterplatz erreichten). Der Versuch ergab, dass an Kontrollstationen in der Nähe des Futterplatzes die meisten Rekruten beobachtet werden konnten (Anzahl und Flugbahn der Rekruten in Petrol). Die Darstellung folgt der Originalabbildung aus [2], S. 90, Abb. 85.

ABB. 7 | STUFENVERSUCH MIT ERGÄNZUNG DER BIENEN AM FUTTERPLATZ

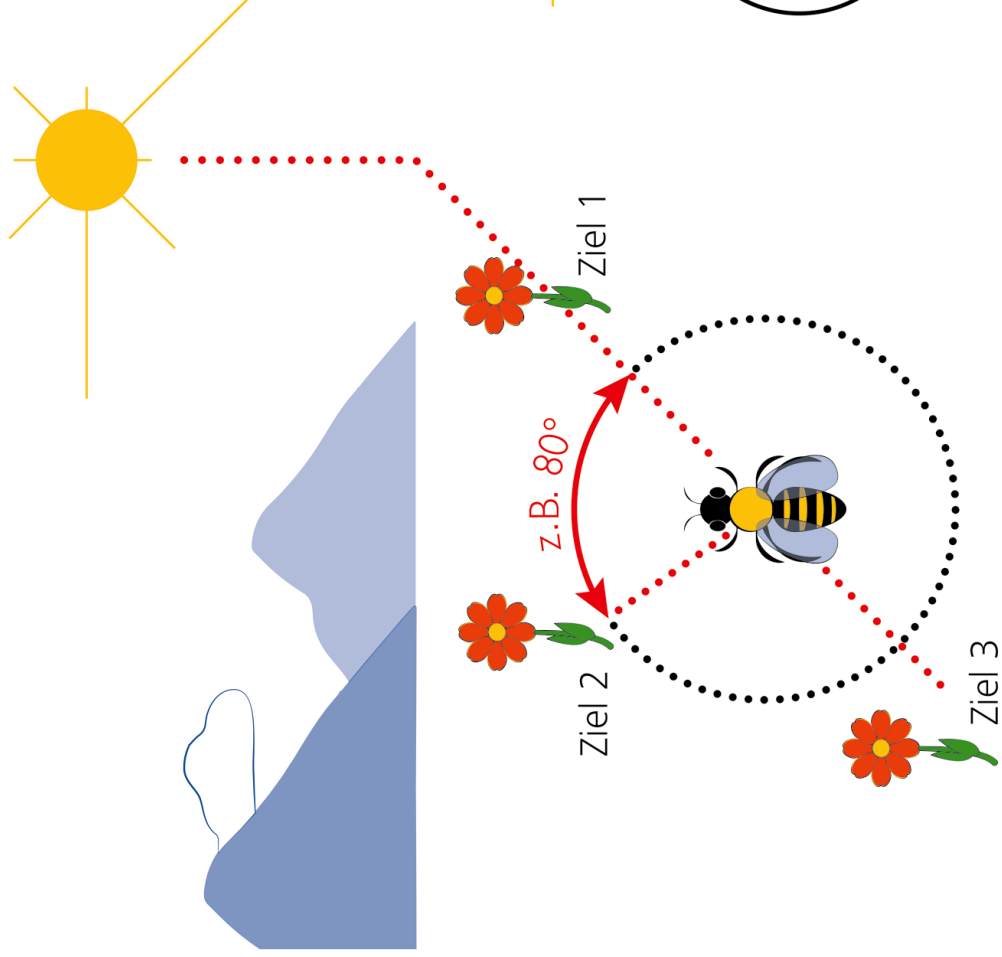


Für einige von Karl von Frischs Stufenversuchen lässt sich aus dem Text, der die Versuche beschreibt [2], entnehmen, wie viele Rekruten direkt an dem Futterplatz (orange markiert) gelandet sind, für den die erfahrenen Bienen tanzten und den sie während der Versuchszeit kontinuierlich anfliegen (rote Flugbahn). In diesem Versuch haben 132 Tiere den von den erfahrenen Bienen beworbenen Futterplatz erreicht (Anzahl und Flugbahn der Rekruten in Petrol). Dagegen erscheint die Zahl der Rekruten, die an die gefächerten Kontrollstationen versprengt wurden, relativ klein (vergleiche Abbildung 6).

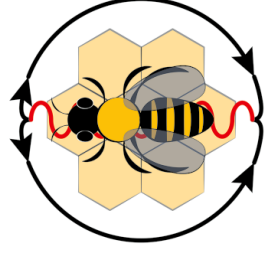
REKRUTIERUNG BEI HONIGBIENEN



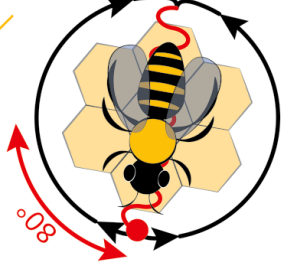
Das klassische Modell zum Schwänzeltanz



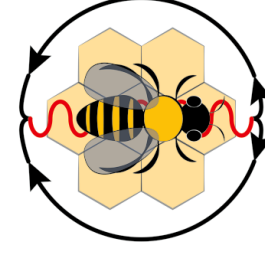
Der Schwänzeltanz gibt die Richtung und Entfernung zu einem Ziel an. Die Tänze zu den Zielen 1 und 3 weisen nach oben bzw. unten. Da sich die Biene im Feld an der Sonne orientiert, verstehen die Tänzerinnen, dass die Futterstelle in einer Linie mit dem Stand der Sonne liegt. Entsprechend finden sie zur Futterstelle 2, indem sie einen um 80 Grad links vom Sonnenstand abweichenden Winkel anfliegen. Die Entfernung zum Ziel lesen sie aus der Länge der Schwänzeltrecke.



zu Ziel 1



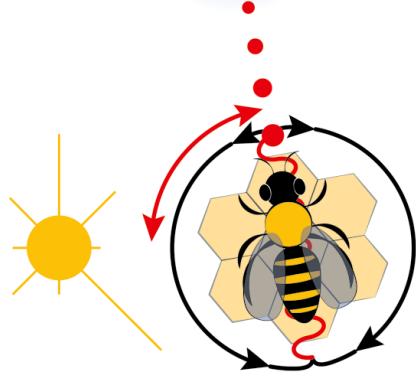
zu Ziel 2



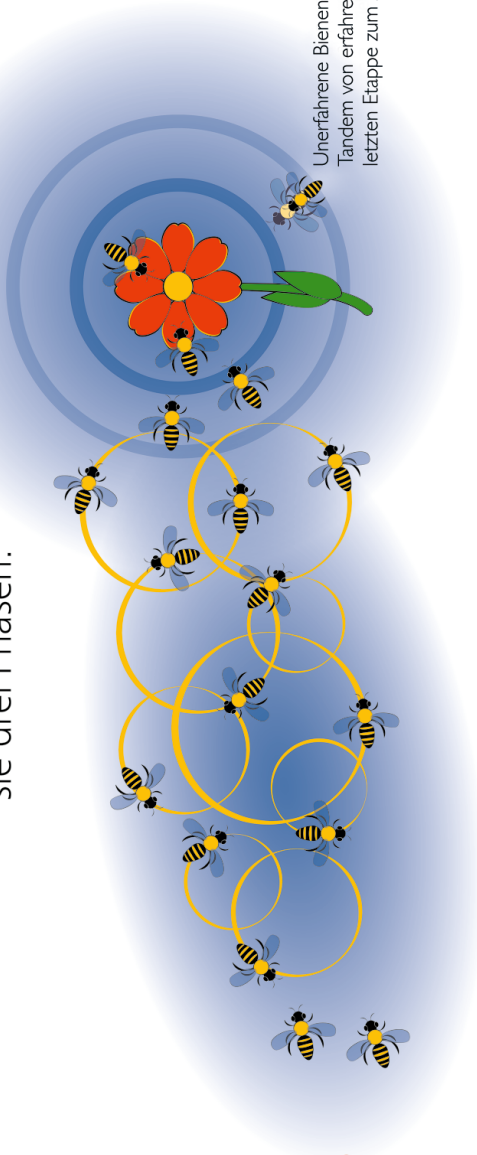
zu Ziel 3

Das neue Drei-Phasen-Modell

Die Information aus dem Schwänzeltanz ist ungenau und gibt lediglich ein unscharf abgegrenztes Areal an, in dem sich das Ziel befindet. Fliegen die Bienen zu einem neuen Futterplatz, den eine andere Sammelbiene durch ihren Tanz beworben hat, durchlaufen sie drei Phasen.



Schicken: Die Bienen folgen den Hinweisen der Tänzerin und fliegen vom Bienenstock in das im Tanz angezeigte grob umrissene Areal.



Suchen: Die Bienen erreichen das Suchareal, dessen Lage, Form und Ausdehnung von äußeren (Wetter) und inneren (Motivation) Faktoren der Rekruten abhängt.

Locken: Treffen die Rekruten im Suchareal auf Düfte der Blüten, die sie auf der Tänzerin wahrgenommen hatten, und/oder die Signale der Tänzerinnen, welche die Kommunikation im Feld fortsetzen, werden die Bienen zum Ziel geführt.

Unerfahrene Bienen werden im Tandem von erfahrenen auf der letzten Etappe zum Ziel geleitet.

einem Fernziel gelangen kann. In einer ersten Flugphase wird eine Richtung eingeschlagen, die über eine bestimmte Strecke beibehalten wird; in der zweiten Phase kommt es zu einer Suchorientierung. Und erst in der dritten Phase kommt es zu einer gerichteten (Nah-) Orientierung, in der das Tier durch Signale wie Landmarken das Ziel auch erreicht. Das neue Drei-Phasen-Modell zur Rekrutierung bei Honigbienen umfasst die gleichen drei Phasen:

1. Schicken: Die Bienen folgen den Hinweisen der Tänzerin und fliegen – eine Flugstreckenausrichtung beibehaltend – vom Bienenstock in das im Tanz angezeigte grob umrissene Areal.
2. Suchen: Die Bienen erreichen das Suchareal, dessen Lage, Form und Ausdehnung von äußeren (Wetter) und inneren (Motivation) Faktoren der Rekruten abhängt.
3. Locken: In der Nahorientierungsphase treffen die Rekruten im Suchareal auf Düfte der Blüten und/oder die Signale der Tänzerinnen, welche die Kommunikation im Feld fortsetzen. Dadurch werden die Bienen zum Ziel geführt.

Das klassische Modell zur Rekrutierung bei Honigbienen nimmt an, dass es lediglich der Phase 1 der oben dargestellten Navigationshypothese bedarf, um Neulinge zum beworbenen Ziel zu bringen. Differenziert man den Rekrutierungsvorgang in die drei erwähnten Phasen einer Fernorientierung, kann die inzwischen angehäuften Fülle an Beobachtungsdaten in der Forschung des Bientanzes problemlos interpretiert und eingeordnet werden. Das klassische Modell kann durch die umfangreichen Daten, die bisher in diesem Prozess gesammelt wurden, nur durch Hilfhypothesen gestützt werden, die bis heute unbewiesen sind und unser Konzept der Bienenkommunikation nur verkomplizieren. Das hier vorgestellte angepasste Navigationsmodell für Honigbienen ist differenziert und ermöglicht es – anders als das alte Modell – alle bisher erhobenen Daten in ein einheitliches Konzept einzufügen.

Schlussbemerkung

Um das klassische seit vielen Jahrzehnten gängige Modell durch ein neues Modell zu ersetzen, ist eine sehr detaillierte in die Tiefe gehende Betrachtung unumgänglich. Der vorliegende Beitrag kann diese notwendige komplette Argumentationskette nicht liefern, aber er soll im Grobschnitt deutlich machen, wie sehr Karl von Frisch mit seiner anfänglichen Einschätzung richtig lag und wie sehr ein entscheidender Teil seiner Einsichten von der späteren Forschung vernachlässigt worden ist. Wie eine Analyse der 100 Jahre Forschung zur Kommunikation der Honigbienen zu dem neuen Modell führt, ist unter Angaben aller relevanter Quellen nachzulesen in [20]. Auch das neue Modell wirft Fragen auf, die im Buch klar benannt werden und nicht zuletzt als eine To-do-Liste für kommende Bienenforscher gedacht sind. Ein Poster (siehe Seite 46/47), das altes und neues Modell gegenüberstellt, eignet sich zusätzlich als schulisches Übungsfeld für wissenschaftliches Argumentieren.

Zusammenfassung

Die „Sprache“ der Bienen

Das klassische Modell zur „Tanzsprache“ der Honigbienen lautet wie folgt: Honigbienen teilen ihren Stockgenossinnen mit einem Tanz die Lage einer neu entdeckten Futterstelle mit; Rekruten erreichen aufgrund dieser Information das Ziel. Die Bienenforschung der letzten Jahrzehnte ergibt dazu ein deutlich differenzierteres Bild. Der Bientanz allein besitzt keinen hohen Informationsgehalt. Aber er ist im dunklen Bienenstock der unverzichtbare Beginn einer Kommunikationskette zwischen erfahrenen und unerfahrenen Bienen, die im Feld bis zum Erreichen des Zieles dem neuen Drei-Phasen-Modell folgend seine Fortsetzung findet (siehe Poster S. 46/47).

Summary

The “language” of bees

The classic model of the “dance language” of honeybees is as follows: Honeybees inform their hive mates about the location of a newly discovered feeding site with a dance. Recruits reach the target based on this information. Bee research over the last decades provides a significantly more differentiated picture. The bee dance alone has no high information content. However, in the dark hive it is the indispensable beginning of a communication-chain between experienced and non-experienced bees, which – according to the new three phase model – continues in the field until the goal is reached (see poster p. 46/47).

Schlagworte:

Nobelpreis, Karl von Frisch, Honigbienen, Tanzsprache, neues dreistufiges Modell zur Futterplatzrekrutierung

Danksagung

Mein Dank für anhaltende Unterstützung meiner Arbeit, auch zum Zustandekommen dieser Publikation, geht an David C. Sandeman. Ebenso danke ich zwei Gutachtern für deren konstruktiven Beiträge zu dieser Publikation.

Zusatzmaterial

Das Poster haben wir unter www.biuz.de in Druckauflösung zum Download für Sie bereitgestellt: Unter dem entsprechenden Artikel finden Sie es als separates PDF-Dokument.

Literatur

- [1] T. Seeley (2021). How Karl von Frisch deciphered the waggle dance. *BeeCraft* 10/21, 9–13.
- [2] K. von Frisch (1965). *Tanzsprache und Orientierung der Bienen*. Heidelberg, Springer.
- [3] K. von Frisch, R. Jander (1957). Über den Schwänzeltanz der Bienen. *Z. vergl. Physiol.* 40, 239–263.
- [4] M. J. Couvillon et al. (2012). Intra-dance variation among waggle runs and the design of efficient protocols for honey bee dance decoding. *Biol Open* 15, 467–472.
- [5] H. Esch, J. Burns (1996). Distance estimation by foraging honeybees. *J. exp. Biol.* 199, 155–162.
- [6] J. Tautz et al. (2004). Honeybee odometry: performance in varying natural terrain. *PLOS* 2, 0915–0923.

- [7] K. von Frisch (1923). Über die „Sprache“ der Bienen. Zool Jb. 40, 1–186.
- [8] K. Harano et al. (2013). Honeybee foragers adjust crop contents before leaving the hive. Behav. Ecol. Sociobiol. 67, 1169–1178.
- [9] R. Menzel et al. (2005). Honeybees navigate according to a map-like spatial memory. Proc Natl Acad Sci USA 102, 3040–3045.
- [10] H. J. Cruse, R. Wehner (2011). No Need for a Cognitive Map: Decentralized Memory for Insect Navigation. PLoS. Comp Biol. 7, e1002009.
- [11] A. Cheung et al. (2014). Still no convincing evidence for cognitive map use by honeybees. PNAS USA 111, E4396–E4397.
- [12] K. E. Gardner et al (2008). Do honeybees have two discrete dances to advertise food sources? Animal Behaviour 75, 1291–1300.
- [13] A. Wenner, P. H. Wells (1990). Anatomy of a controversy – the question of a “language” among bees. NY: Columbia Press.
- [14] H. Esch et al. (2001). Honeybee dances communicate distance by optic flow. Nature 411, 581–583.
- [15] J. R. Riley et al. (2005). The flight paths of honeybees recruited by the waggle dance. Nature 435, 205–207.
- [16] J. B. S. Haldane, H. Spurway (1954). A statistical analysis of communication in “Apis mellifera” and a comparison with communication in other animals. Insectes sociaux 1, 247–283.
- [17] R. Schürch, F. L. W. Ratnieks (2015). The spatial information content of the honey bee waggle dance. Front. Ecol. Evol. 18, doi.org/10.3389/fevo.2015.00022.
- [18] W. Wiltschko, R. Wiltschko (2021). Das Navigationssystem der Vögel – Teil 1. Das Karte-Kompass-Prinzip und die Kompassmechanismen. Biologie in unserer Zeit 51 (2), 150–160.
- [19] W. Wiltschko, R. Wiltschko (2021). Das Navigationssystem der Vögel – Teil 2. Mechanismen zur Bestimmung der Richtung zum Ziel. Biologie in unserer Zeit 51 (3), 254–263.
- [20] J. Tautz (2021). Die Sprache der Bienen. Kneesebeck, München.
- [21] U. Kreutzer (2010). Karl von Frisch. Eine Biografie, München.
- [22] S. M. Oh et al. (2008). Learning and inferring motion patterns using parametric segmental switching linear dynamic systems. Int. J. Comput. Vis. 77, 103–124.
- [23] K. von Frisch (1946). Die Tänze der Bienen. Österr. Zool. Z. 1, 1–48.

Verfasst von:



Jürgen Tautz ist Professor i. R. am Biozentrum der Julius-Maximilians-Universität Würzburg und Autor u. a. des Bestsellers „Phänomen Honigbiene“, sowie vielfach ausgezeichnet für vorbildliche Vermittlung von Wissen in eine breite Öffentlichkeit.

Korrespondenz

Prof. Dr. Jürgen Tautz i. R.
 Universität Würzburg
 Email: tautz@biozentrum.uni-wuerzburg.de



Jürgen Tautz
DIE SPRACHE DER BIENEN
 256 Seiten | € 22,- [D] |
 978-3-95728-503-4



Ingo Arndt, Jürgen Tautz
**HONIGBIENEN -
 GEHEIMNISVOLLE WALDBEWÖHNER**
 192 Seiten | € 38,- [D] | 978-3-95728-362-7

Sensationelle Bilder und aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse!

Bienenforscher Jürgen Tautz gibt einen spannenden Einblick in die Kommunikation von Bienen und dokumentiert die ursprüngliche Lebensweise der Wald-Honigbiene.

Mit
 einzigartigen
 Bildern des
 preisgekrönten
 Naturfotografen
 Ingo Arndt



KNESEBECK

www.knesebeck-verlag.de

© 2024 Die Autoren. Biologie in unserer Zeit veröffentlicht durch VBIO e.V. unter der CC-BY-SA 4.0-Lizenz

www.biuz.de

1/2024 (54) | Biol. Unserer Zeit | 49

Die Entdeckung durch Karl von Frisch, die Bestätigung und die weitergehende Bedeutung 100 Jahre Schwänzeltanz

RANDOLF MENZEL

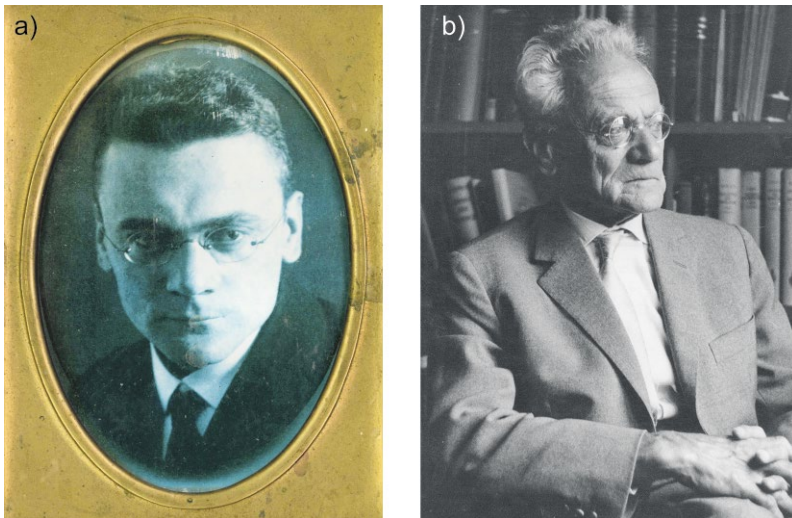


ABB. 1 Karl von Frisch, zu der Zeit, als er zum ersten Mal den Schwänzeltanz der Biene untersuchte (links), und als er den Nobelpreis erhielt (rechts).

Fotos: Archiv Karl Daumer.

Der Schwänzeltanz ist eine der wichtigsten Entdeckungen der Verhaltensbiologie im vorigen Jahrhundert. Von Anfang an gab es um seine Bedeutung viel wissenschaftlichen Streit, und auch heute noch sind skeptische Berichte nicht verstummt. Mit neuen Methoden konnte in den letzten 20 Jahren die

Vor 100 Jahren publizierte ein junger Wissenschaftler, Karl von Frisch (Abbildung 1), eine Beobachtung, von der er später sagte: „... die wohl folgenreichste Beobachtung meines Lebens“ und „...ich traute meinen Augen nicht. Was sich hier ereignete, war zu reizvoll und fesselnd als dass man es in trockenen Worten schildern könnte“ ([1], S. 61). Viele Jahrzehnte haben er und seine Schüler an der Aufklärung dieser Beobachtung gearbeitet. Vor nunmehr 50 Jahren, im Jahr 1973, erhielt Karl von Frisch – gemeinsam mit Konrad Lorenz und Nico Tinbergen – den Nobelpreis für seine Entdeckung des Schwänzeltanzes der Bienen. Wie wohl bei allen ganz großen Entdeckungen der experimentellen Wissenschaften blieb sie nicht unwidersprochen. Es waren vor allem drei Kon-

Interpretation des Tanzes durch seinen Entdecker Karl von Frisch weitgehend bestätigt werden: Tänzerinnen teilen ihren nachlaufenden Bienen die Richtung und Entfernung – den ► Flugvektor – vom Stock zu einer Futterstelle, aber auch anderen Zielen wie Wasser, Harz oder einer neuen Niststelle mit. Die nachlaufenden Bienen suchen dann sehr gezielt, ohne dabei von Duft gelenkt oder dorthin geleitet zu werden. Neuste Ergebnisse zeigen nun, dass die Botschaft für die nachlaufenden Bienen viel bedeutsamer ist als zuvor gedacht. Diese ordnen nämlich die Vektorinformation in ihr ► kartenartiges Landschaftsgedächtnis so ein, dass sie von allen Orten und nicht nur vom Stock an die angezeigte Stelle fliegen können. Dies bedeutet, dass Bienen in der von ihnen erkundeten Landschaft gezielt zwischen mehreren Orten navigieren können – auch solchen, die sie über eine ► symbolische Kommunikation angezeigt bekamen.

troversen, die noch heute immer wieder erwähnt werden und Zweifel sähen: (1) Die dem Tanz folgenden Bienen würden nach dem Duft zur Futterstelle der Tänzerin finden. (2) Die Tänze wären so ungenau, dass sie keine wirkliche Information über den Flug zur Futterstelle vermitteln. (3) Die tanzfolgenden Bienen würden der Tänzerin im Flug folgen und so zur Futterstelle geführt werden. In der Tat hatte von Frisch ein großes Problem: Er konnte den Flug der Bienen nicht verfolgen, weder den der Tänzerin, noch den der tanzfolgenden Bienen. Seit 20 Jahren steht nun eine Methode zur Verfügung, um dieses Problem zu lösen: das harmonische Radar [2]. Systematische Experimente mit dieser Methode haben nicht nur gezeigt, dass von Frisch mit seinen Interpretationen Recht hatte,

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 59 erklärt.

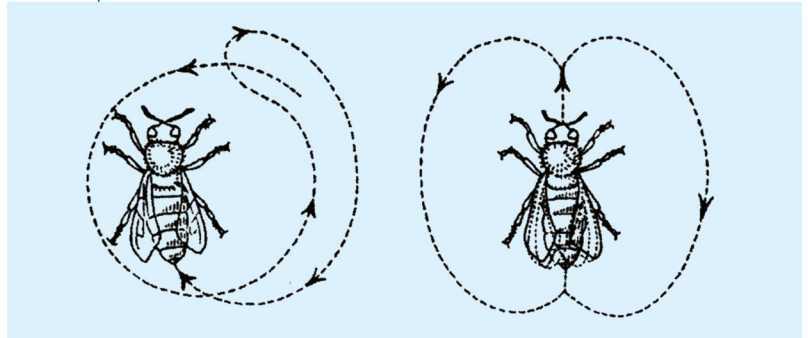
sondern dass der Kommunikationsprozess noch viel reichhaltiger ist, als von Frisch dachte.

Der Schwänzeltanz

Der Schwänzeltanz tritt in zwei Formen auf, dem Rundtanz und dem eigentlichen Schwänzeltanz mit seinen geraden Strecken, während denen die Tänzerin das Abdomen hin und her bewegt, also schwänzelt (Abbildung 2). Lassen wir von Frisch noch einmal selbst zu Wort kommen. Seine erste Beschreibung des Schwänzeltanzes [3] bezieht sich auf den Rundtanz: „Der Tanz besteht darin, dass sie mit großer Schnelligkeit im Kreis herum trippelt, dabei aber häufig um 180° schwenkt, so dass die Richtung ständig wechselt. Die Kreise sind eng, im Innern liegt meistens eine Zelle, an den angrenzenden 6 Zellen läuft die Biene herum, beschreibt ein bis zwei Kreise einer Richtung, oft auch nur einen halben oder dreiviertel Kreisbogen, um dann plötzlich kehrt zu machen, und sich im entgegengesetzten Sinne weiter zu drehen.“ In dieser Arbeit beschreibt er den Schwänzeltanz, den er anfänglich Pollen eintragenden Bienen zuschreibt. „Eine Biene, die mit Hörschen ankommt, kriecht auf den Waben aufwärts und beginnt dann inmitten der anderen Bienen sich zu drehen; aber sie beschreibt keine vollen Kreise, wie es beim Rundtanz geschieht, sondern zunächst einen Halbkreis. Läuft dann geradlinig über 2–3 Zellen zum Ausgangspunkt zurück, wendet sich nun nach der anderen Seite und läuft einen zweiten Halbkreis, der den früheren zu einem vollen Kreis schließt.“ Später erkannte er, dass der Schwänzeltanz weiter entfernte Futterstellen anzeigt, während der Rundtanz nahe Futterstellen angibt. Das charakteristische Schwänzeln während der geraden Strecke, das den Code für die Richtung und Entfernung des Fluges zu der Futterstelle enthält, erwähnt er an dieser Stelle nicht. Erst als er nach dem 2. Weltkrieg seine Arbeiten über die Tanzkommunikation wieder aufnahm, untersuchte er mit vielfältigen und eleganten Experimenten den Schwänzeltanz und seine kodierenden Eigenschaften für die Richtungs- und Entfernungsangabe [4].

Nun war Karl von Frisch nicht der erste, der die wunderbaren Tänze der Bienen beobachtete. Im Jahr 1828 schrieb der deutsche Imker Nikolaus Unhoch ([5], S. 81): „Es wird manchem lächerlich, ja wohl gar unglaublich erscheinen, wenn ich behaupte, dass auch die Bienen (...) gewisse Lustbarkeiten und Freuden unter sich haben, dass sie sogar auch nach ihrer Art zuweilen einen gewissen Tanz anstellen. (...) Was eigentlich dieser Tanz bedeuten soll, kann ich noch nicht erklären, ob es vielleicht eine muthige Freude und Aufmunterung ist, das muss die Zukunft klären.“ Von Frisch erwähnt in seinem epochalen Buch über „Tanzsprache und Orientierung der Bienen“ ([6], S. 6), dass bereits Aristoteles so etwas wie einen Tanz der Bienen beschreibt: „...Sobald sie in den Stock kommt, schüttelt sie ihre Last ab, und einer jeden folgen drei oder vier andere. Was diese in Empfang nehmen, ist schwer zu sehen, auch ist noch nicht ihre Arbeits-

ABB. 2 | RUND- UND SCHWÄNZELTANZ



Zeichnung aus [4].

weise beobachtet worden...“. Maeterlinck [7] hatte die Idee, dass Sammelbienen bei ihrer Rückkehr in den Stock den anderen Bienen etwas mitteilen, konnte aber nicht herausfinden, was das war. Wie kam es, dass von Frisch das beste Rüstzeug hatte, um seine Entdeckung zu machen?

Die aufregende Beobachtung machte von Frisch als er die Bienen auf Düfte dressierte. Dabei verwandte er eine Methode, die es ihm erlaubte, Bienen als Individuen zu erkennen (siehe Kasten „Markierung von Bienen“). Auf dem Thorax wurden vier Farbpunkte bestehend aus fünf verschiedenen Farben gesetzt. Daraus konnte ein Nummerncode abgeleitet werden. Er wusste also, welche Biene zu welchem Zeitpunkt an seiner Dressurstelle war und was sie anschließend im Stock tat, denn er verwendete zudem ab 1917 eine Beute mit einem Glasfenster. Heute ist es üblich, den Bienen Nummernschildchen oder einen QR-Code für eine Erkennung über eine Videokamera anzubringen. Videoanalysen des Tanzverhaltens sind heute Standard und erlauben es, die für den Tanzcode wichtigen Parameter – also die Richtung der Schwänzelstrecke zur Schwerkraft, die Zahl der Schwänzelbewegungen, die Dauer und Länge des Schwänzellaufs – genau zu vermessen.

Die mit dem Nobelpreis gewürdigte Entdeckung von Karl von Frisch bestand darin, dass er den Code für die

IN KÜRZE

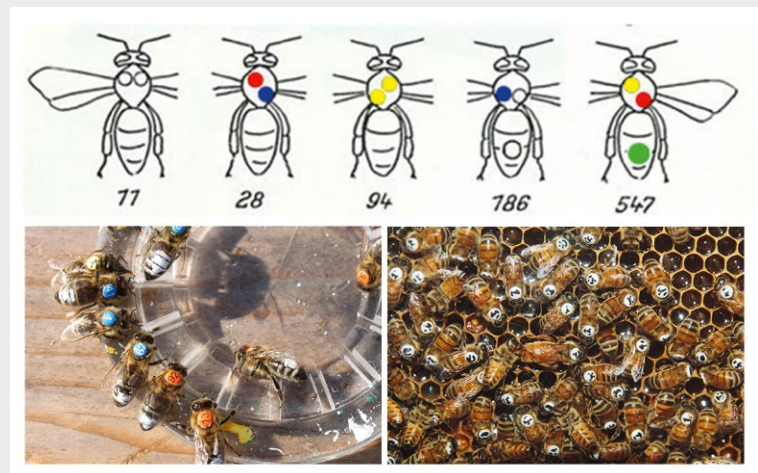
- Die Interpretation eines symbolischen Informationstransfers im Schwänzeltanz der Honigbienen wurde immer wieder angezweifelt.
- Das Gehirn eines Insekts erschien als zu klein, um eine solche anspruchsvolle kognitive Leistung zu vollbringen.
- Mit neuer Methodik (**harmonisches Radar**) konnten diese Zweifel ausgeräumt werden.
- Darüber hinaus zeigte sich, dass Bienen die symbolische Information über den Flugvektor zum Ziel auch dazu verwenden, um **einen Ort in ihrem kartenartigen Landschaftsgedächtnis** zu bestimmen.
- Die kognitiven Leistungen der Bienen gehen also über die symbolische Enkodierung einer Flugstrecke hinaus und schließen **die Zielfindung von jedem Ort** des von ihnen erkundeten Landschaftsbereichs mit ein.

MARKIERUNG VON BIENEN

Bienen-Arbeiterinnen sehen alle gleich aus. Die Zuordnung von Verhaltensweisen zu einzelnen, individuellen Bienen verlangt eine eindeutige Markierung. Von Frisch entwickelte ein System von Farbpunkten, die aus 5 verschiedenen Farben und 4 verschiedenen Orten auf dem Thorax bestand. Farbpunkte vorne rechts markieren die Einerreihen: weiß 1, rot 2, blau 3, gelb 4, grün 5. Farbpunkte vorne links markieren die entsprechenden Zehnerreihen. Jeweils unten werden die fehlenden Zahlen dargestellt, rechts die Einer und links die Zehner: weiß 6, rot 7, blau 8, gelb 9, grün 0. Farbpunkte auf dem Abdomen markieren die Hunderterreihen von 100 bis 500. Damit konnte von Frisch 599 Bienen individuell markieren.

Arbeiterinnen können auch mit den Nummern auf dem Abdomen ausgestattet werden, die im Imkerhandel für die Markierung von Königinnen vorgesehen sind. Wir haben die Zahl der so markierten Bienen dadurch erhöht, dass wir 4 verschiedene Richtungen der Zahlen relativ zu der Achse „vorne-hinten“ der Bienen verwenden, um die Hunderterreihen zu kodieren. Damit lassen sich $4 \times 490 = 1960$ (6 und 9 sind spiegelbild-

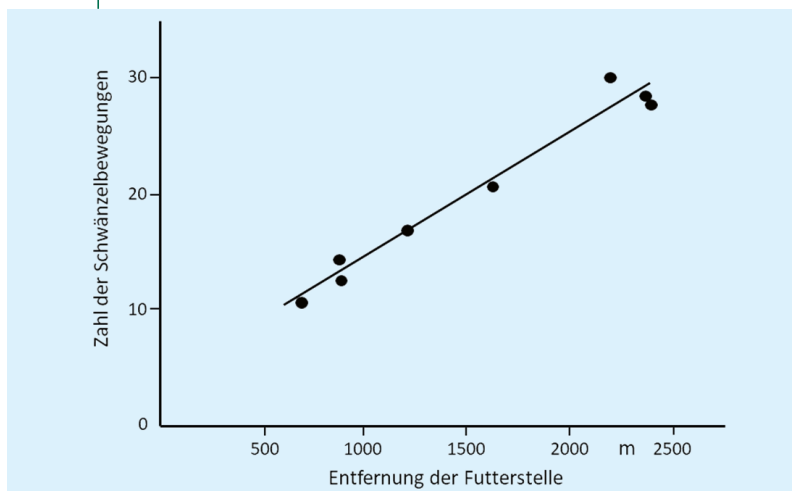
lich nicht zu trennen) Bienen markieren. Mit 5 verschiedenen Farben auf dem Abdomen lassen sich fast 10.000 Bienen individuell markieren. Eine viel größere Zahl an individuellen Markierungen kann man mit einem runden Mustercode erreichen, der dann für einen Computer, aber nicht direkt für den Experimentator, lesbar ist. Abb. aus [14].



Richtung und Entfernung des Flugs zu der von der Tänzerin angezeigten Futterstelle entschlüsselte. Die Zahl der Schwänzelaufbewegungen – und damit zusammenhängend die Dauer des Schwänzellaufs, die Länge und die Dauer der Läufe zurück zum Ausgangspunkt – nimmt mit der Entfernung weitgehend linear zu (Abbildung 3). Dieser Zusammenhang war für ihn und jeden, der die Bienen dressierte, recht leicht zu erkennen, weil verschiedene Entfernungen zur Futterstelle getestet wurden. Dabei zeigt

te sich auch, dass für Entfernungen unter etwa 100 m der Rundtanz verwendet wird. Von Frisch und die vielen nachfolgenden Forscher haben verschiedene Messgrößen für die Entfernungskodierung während des Schwänzellaufs ausgewertet. Am genauesten ist die Zahl der Schwänzelaufbewegungen (Abbildung 3). Inzwischen wissen wir, dass im Schwänzeltanz jede Schwänzelaufbewegung 65–75 m Flug zur Futterstelle kodiert. Das Geheimnis der Richtungskodierung war schon schwieriger zu lüften. Im Tagesverlauf änderte sich die Richtung des Schwänzellaufs relativ zur Schwerkraft. Es lag also nahe, dass die Sonne eine Rolle spielt, und in der Tat verwenden die Bienen einen ► Sonnenkompass. Hier gilt, dass der Schwänzellauf nach oben gerichtet ist, wenn zu diesem Zeitpunkt die Bienen zum ► Sonnenazimut, also der Projektion der Sonne auf den Horizont, fliegen. Dabei muss die Biene nicht unbedingt die Sonne sehen, auch das Muster des polarisierten blauen Himmelslichts reicht aus, da dieses Muster mit der Sonne wandert. Eine spezielle Augenregion am oberen Rand des Komplexauges ist für diese Wahrnehmung zuständig. Zudem verfügt die Biene über eine innere Uhr. Damit erlernt sie auch die für den Standort des Stockes geltende Zeitabhängigkeit der Sonnenwanderung. All dies waren weitere Entdeckungen von Karl von Frisch und seinen Schülern, die nachfolgend vielfältig bestätigt wurden. Nach all diesen Entdeckungen konnte von Frisch aus dem Schwänzellauf den Flugvektor zu der Futterstelle herauslesen. Aber können das auch die tanzfolgenden Bienen? Das war die große Streitfrage.

ABB. 3 | ENTFERNUNGSKODIERUNG IM SCHWÄNZELTANZ



Die Zahl der Schwänzelaufbewegungen während des Schwänzellaufs gibt die Entfernung der Futterstelle besonders genau an.

Das harmonische Radar

Bevor wir uns den drei wichtigsten Kontroversen rund um den Schwänzeltanz widmen, möchte ich darstellen, warum diese heute weitgehend gelöst sind. Das liegt an einem methodischen Durchbruch. Die Schwierigkeit für von Frisch bestand ja darin, dass er die tanzfolgenden Bienen nicht in ihrem Flug registrieren konnte. Wenn man Bienen im Flug beobachtet, dann gelingt das unter den günstigsten Bedingungen über eine Strecke von höchstens 30 m. Mit einem speziellen Radargerät ist es aber möglich, sie über einen Radius von bis knapp einem Kilometer (unter günstigen Bedingungen auch bis 1,5 km) zu verfolgen. Wie Abbildung 4a zeigt, hat das Radargerät zwei Antennen, die größere für den abgestrahlten Radarpuls, die kleinere für das Signal, das von einem Transponder zurückkommt, den die Biene trägt (Abbildung 4b). Dieser Transponder nimmt den Radarpuls auf und strahlt die erste harmonische Radarfrequenz zurück. Zwar ist dieses harmonische Signal sehr schwach, kann aber gut gefiltert, verstärkt und so registriert werden. Für jeden Radarpuls

(alle 3 Sekunden) bekommt man ein Standortsignal der Biene. Allerdings darf der Radarstrahl nicht durch Bäume, Häuser oder andere Objekte abgeschirmt werden. Außerdem muss die Gegend flach und horizontal sein. Wenn dies alles erfüllt ist, erhält man die Flugspur der fliegenden Biene zwischen 70 cm und 9 m Höhe über dem Boden (Abbildung 4c). Nun darf man sich nicht vorstellen, dass der Einsatz dieser Methode so einfach wäre. Die Radarschirme müssen sehr genau ausgerichtet sein, und bei Windgeschwindigkeiten über 30 km/h muss das Radar abgeschaltet werden. Wir haben einige tausend Flüge aufgenommen und konnten dabei nicht nur die Interpretationen von Karl von Frisch in jeder Hinsicht bestätigen, sondern noch erstaunliche ► Navigationsleistungen der Bienen entdecken.

Kontroverse 1: Die tanzfolgenden Bienen werden vom Duft der Futterstelle angelockt

Von den vielfältigen Experimenten, mit denen die Bedeutung der Tänze für die nachfolgenden Bienen durch von

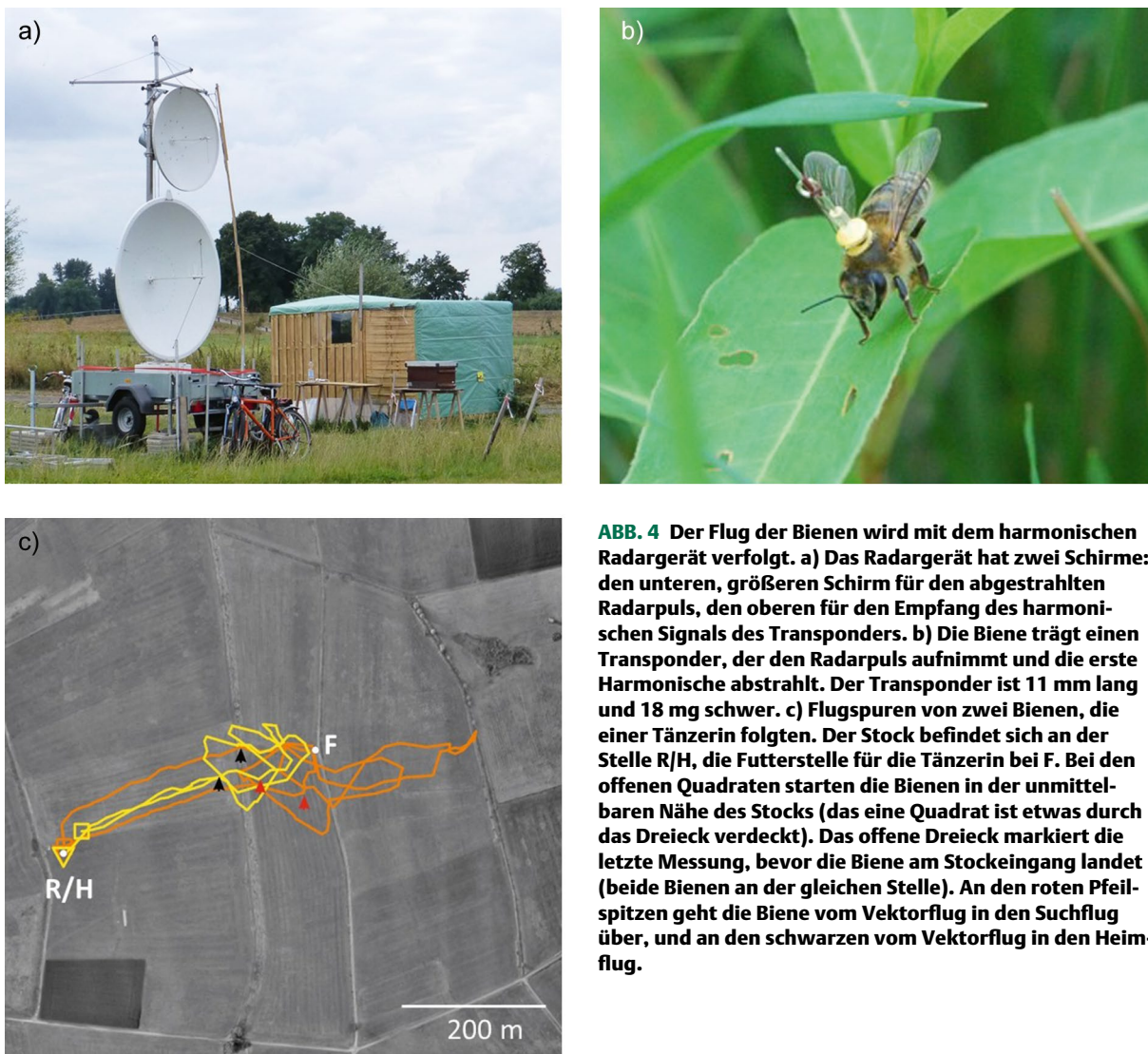
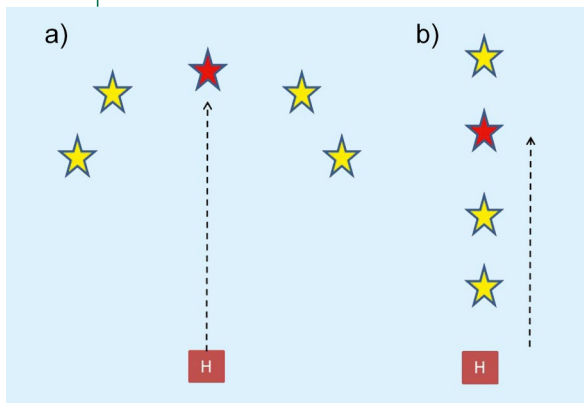


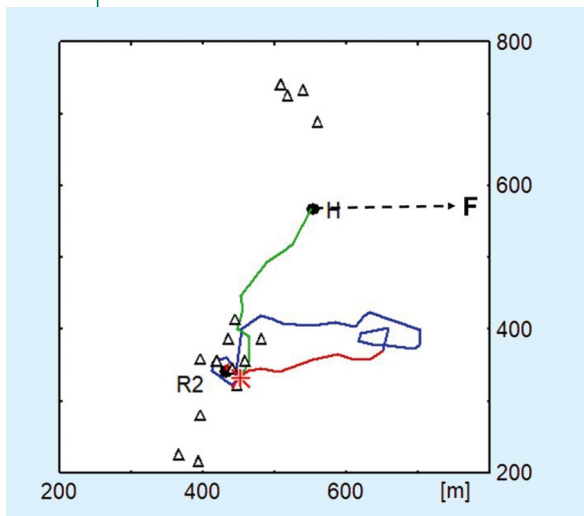
ABB. 4 Der Flug der Bienen wird mit dem harmonischen Radargerät verfolgt. a) Das Radargerät hat zwei Schirme: den unteren, größeren Schirm für den abgestrahlten Radarpuls, den oberen für den Empfang des harmonischen Signals des Transponders. b) Die Biene trägt einen Transponder, der den Radarpuls aufnimmt und die erste Harmonische abstrahlt. Der Transponder ist 11 mm lang und 18 mg schwer. c) Flugspuren von zwei Bienen, die einer Tänzerin folgten. Der Stock befindet sich an der Stelle R/H, die Futterstelle für die Tänzerin bei F. Bei den offenen Quadraten starten die Bienen in der unmittelbaren Nähe des Stocks (das eine Quadrat ist etwas durch das Dreieck verdeckt). Das offene Dreieck markiert die letzte Messung, bevor die Biene am Stockeingang landet (beide Bienen an der gleichen Stelle). An den roten Pfeilspitzen geht die Biene vom Vektorflug in den Suchflug über, und an den schwarzen vom Vektorflug in den Heimflug.

ABB. 5 | EXPERIMENTE ZUR RICHTUNGSKODIERUNG



Um die Richtungskodierung und die Entfernungskodierung zu überprüfen, führte von Frisch mit seinen Mitarbeitern viele Experimente dieser Art durch. Die Tänzerinnen wurden an einem mit Duft markierten Ort (hier mit rotem Stern markiert) dressiert. Im Test wurde kein Futter angeboten. An jedem der mit einem gelben Stern markierten Orte sowie an der geschlossenen Futterstelle saß ein Beobachter, der jede ankommende Biene notiert hat. Auch diese Stellen waren mit dem Duft der Futterstelle markiert. Abb. nach [6].

ABB. 6 | ERGEBNIS EINES VERSETZUNGSVERSUCHS



Flugspur einer Biene, die einer Tänzerin für F (Futterstelle der Tänzerin) gefolgt und dann an der Stelle R2 mit einem Transponder gestartet war. R2 liegt 250 m südlich des Stocks H. Sie fliegt erst 200 m nach Osten (rote Spur, folgt also der Vektroinformation des Tanzes) und dann wieder zur Auflassstelle zurück (blaue Spur). Dort entscheidet sie sich, zum Stock zurückzuflogen (grüne Spur, direkter Heimflug). Das sternförmige Symbol gibt die erste Messung mit dem Radargerät an, der schwarze Punkt markiert die Auflassstelle. Der Rahmen gibt die Entfernungen an. Das Experiment wurde auf einer großen gemähten Wiese durchgeführt.

Frisch und seine Mitarbeiter untersucht wurde, möchte ich zwei erwähnen (Abbildung 5). Eine Gruppe von Bienen wurde an eine mit Duft markierte Futterstelle in ein

paar hundert Meter Entfernung vom Stock dressiert. Teststellen, die mit dem gleichen Duft markiert waren, wurden entweder in gleicher Entfernung, aber unterschiedlichen Winkeln zum Stock (Abbildung 5a) oder in gleicher Richtung, aber unterschiedlichen Entfernungen (Abbildung 5b) aufgestellt. An jeder Teststelle und auch an der Futterstelle saß ein Beobachter. Dieser registrierte jede ankommende Biene und überführte sie in ein Kästchen. Die Markierung mit Duft war nötig, weil die suchenden Bienen sonst nicht landen und nur um die Teststellen herumfliegen. Die überwältigend größte Zahl von Bienen wurde an der Futterstelle für die Tänzerin weggefangen. An den nächstgelegenen Futterstellen fanden sich weniger Bienen ein, aber immerhin noch mehr als an den ferner gelegenen. Auf die erste Kritik, die nachfolgenden Bienen könnten von dem Duft angelockt worden sein [8], vielleicht auch von dem Duft der an der Futterstelle verkehrenden Bienen, führte ein Schüler von von Frisch, Martin Lindauer, eine Wiederholung des Versuchs bei verschiedenen Windbedingungen durch. Die Ergebnisse waren dieselben. Tatsächlich leitet der Duft die Bienen zur Futterstelle nur über kurze Entfernungen und dann auch nur in die Richtung, aus der der Wind kommt, wie mit den Flugspuren von dressierten Bienen mit dem harmonischen Radar gezeigt wurde [9]. Der Duft ist ein Nahsignal und spielt ganz sicher bei Entfernungen von mehr als 50 m keine Rolle, selbst wenn es sich um einen sehr starken Duft handelt und die Biene gegen den Wind zur Futterstelle fliegt.

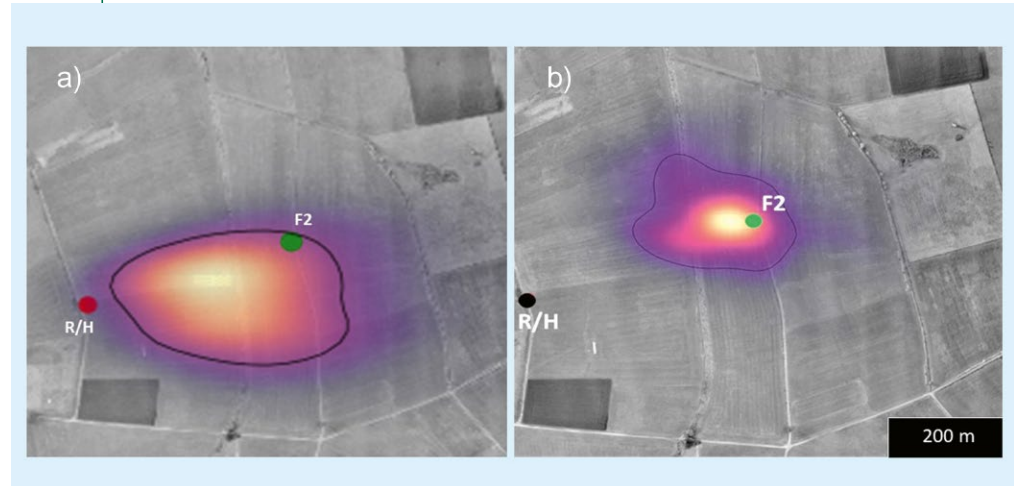
Ganz sicher kann man einen Einfluss des Duftes ausschließen, wenn man die tanzfolgenden Bienen nicht am Eingang des Stockes starten lässt, sondern an eine andere Stelle versetzt und deren Flug dann mit dem Radar verfolgt. Die so versetzten Bienen hatten die Umgebung des Stockes erkundet. Die Gegenden, in die die Bienen versetzt wurden, boten während des gesamten Experiments keine Nahrung an, weil die Wiesen von den Bauern regelmäßig gemäht wurden. Die Bienen kannten diese Orte also nur von ihren exploratorischen Orientierungsflügen. So ein Experiment zeigt Abbildung 6. Hier wurde eine Biene, die einer Tänzerin für die Futterstelle F (200 m im Osten) gefolgt war, an die Stelle R2 250 m südlich des Stockes versetzt und dort mit einem Transponder freigesetzt. Sie fliegt genau 200 m nach Osten (roter Teil der Flugspur), sucht kurz herum und fliegt zuerst zur Auflassstelle zurück (blaue Spur), um dann nach systematischem Suchen direkt zum Stock zurückzuflogen. An der Auflassstelle befinden sich natürlich keine Bienen und an der virtuellen Stelle, die dem im Tanz kodierten Vektorendpunkt entspricht, auch nicht. Von der Stelle, die sie anfliegt, geht kein Duft aus, denn das ganze Experiment wurde auf einer abgemähten Wiese durchgeführt. Auch optische Marken spielten keine Rolle [2]. Um auch die Nahwirkung des Duftes an der Futterstelle mit Sicherheit auszuschließen, wurden alle Experimente mit dem Radargerät, die ich im weiteren Verlauf besprechen werde, ohne Duft durchgeführt.

Kontroverse 2: Die Tänze sind so ungenau, dass sie keine wirkliche Information über den Standort der Futterstelle anzeigen

Auch diese These lässt sich mit den Radarspuren widerlegen. Bereits die Flugspuren in Abbildung 4c und Abbildung 6 zeigen, wie genau die Bienen suchen. Weitere Beispiele zeigt Abbildung 7a. Diese gibt die Dichte der Suchflüge von 32 Bienen wieder, die einer Tänzerin für eine Futterstelle F2 (391 m in Richtung Nord-Ost-Ost vom Stock) gefolgt waren. Nur sehr wenige Tänzerinnen verkehrten an F2, so dass eine Duftlenkung durch die dort sammelnden Bienen auch ausgeschlossen werden kann. Die Stärke der Farbe von Violett über Rot nach Weiß gibt die Dichte der Radarpunkte während der Suchflüge an. Die Bienen suchen recht konzentrisch um die im Tanz angegebene Stelle herum. Nur zwei dieser tanzfolgenden Bienen landeten, was am Fehlen einer Duftmarke und an der künstlichen Anordnung an der Futterstelle lag (ein Plastikgefäß auf einem Tisch ohne Farbmarkierung).

Wie die beiden Abbildungen 7a und b zeigen, suchen die Bienen genauer als es von der Streuung des im Tanz angegebenen Vektors zu erwarten ist. Wir haben die Tänze von vielen Bienen für sieben verschiedene Entfernungen bis zu einer maximalen Entfernung von 2400 m gemessen und dann mit den Suchflügen der tanzfolgenden Bienen verglichen. Werden Entfernungen über einen Kilometer getestet, werden die Tänzerinnen in den Abtastbereich des Radars aus größeren Entfernungen dressiert. Misst man die Streuung der im Tanz angezeigten Richtung und Entfernung für diese Futterstellen, dann findet man, dass das Entfernungsmaß (Dauer des Schwänzellaufs, Zahl der Schwänzel) ungenauer ist als das Richtungsmaß. Auf die Fläche projiziert liegen vom Stock aus gesehen 50 Prozent der Entfernungsangaben im Bereich von $\pm 20^\circ$, während das Richtungsmaß nur um $\pm 9^\circ$ streut. Schaut man sich dann an, wie die tanzfolgenden Bienen nach der Futterstelle suchen, dann findet man, dass sie in der Tat genauer suchen als der Tanz angibt und zwar um den Faktor 3 bzw. 9 genauer, wobei die erste Zahl für die Entfernung gilt und die zweite für die Richtung. Wahrscheinlich mitteilen die tanzfolgenden Bienen mehrere Schwänzellaufe. Dies schließen wir aus Modellrechnungen, in denen unterschiedlich viele Schwänzellaufe gemittelt wurden und dann die Verteilung der entsprechenden Vektorendpunkte ausgewertet wurde. Wir fanden, dass nach zehn gemittelten Schwänzellaufen die Dichteverteilung mit der der Suchflüge am besten übereinstimmt.

ABB. 7 DICHTEN VON GETANZTEN VEKTORENDPUNKTEN UND RADARMESSUNGEN WÄHREND DER SUCHFLÜGE



Gezeigt ist eine Visualisierung in Falschfarben. a) Dichte der Tanzvektor-Endpunkte von Tänzerinnen für die Futterstelle F2. b) Dichte der Suchflüge von 32 tanzfolgenden Bienen für die Futterstelle F2. Die Dichte der beiden Messgrößen wird durch die Übergänge von violett (<10%), rot (10–50%) und weiß (>50%) ausgedrückt.

Kontroverse 3: Die tanzfolgenden Bienen werden von der Tänzerin zur Futterstelle geleitet

Diese Vermutung hängt mit der Beobachtung zusammen, dass manchmal tanzfolgende Bienen in Gruppen mit den Tänzerinnen an der Futterstelle landen. Das ist aber kein Hinweis darauf, dass sie über längere Strecken einander gefolgt sind und schon gar nicht, dass sie einer oder mehreren Tänzerinnen gefolgt sind. Vielmehr fliegen die suchenden tanzfolgenden Bienen in der näheren und weiteren Umgebung um die Futterstelle herum, wenn sie an dieser noch nicht gelandet sind und belohnt wurden. Wenn aber eine Biene ankommt, die sich auskennt, dann macht sich diese durch einen schnellen und gezielten Anflug bemerkbar, und die unsicheren Bienen folgen ihr – ein Verhalten, das wir vom Schwarm kennen. In den hunderterten von Flügen, die wir bei unseren mit Transpondern ausgestatteten Bienen aufgenommen haben, gab es keinen einzigen Flug, bei dem ein Zusammenhang mit einer anderen Biene geschweige denn einer Tänzerin erkennbar war. Die meisten unserer Flugdaten kommen auch von Bienen, die in Gegenden fliegen, wo keine Tänzerin zu erwarten ist oder wo sicher ausgeschlossen werden kann, dass eine Tänzerin unterwegs ist.

Heutiger Stand der Forschung zum Schwänzeltanz

Die Fülle der Daten, die mit dem harmonischen Radar gewonnen wurden, belegt eindeutig, dass Karl von Frisch seine Daten korrekt interpretiert hat: Die tanzfolgenden Bienen lernen von der Tänzerin den Flugvektor (Richtung und Entfernung) zu einer Stelle (Futterstelle, Stelle für Wasser oder Harz, eine neue Niststelle für den Schwarm).

Vergegenwärtigen wir uns nochmals, welche erstaunliche Leistung dies ist. Die Entfernungsangabe (Zahl der Schwänzellaufbewegungen im Schwänzellauf und die damit zusammenhängenden Maße: Dauer des Schwänzellaufs, seine Länge und die Dauer des ganzen Rundlaufs inklusive des Schwänzellaufs) haben keinen direkten Bezug zu der Flugstrecke. Die Länge der Flugstrecke wird auf komplexe Weise bestimmt, wobei der ► optische Fluss, also die mit den Augen wahrgenommene Bewegung der Landschaftsstrukturen während des Flugs, aber auch die Abstände zwischen Landmarken und deren Zahl eine Rolle spielen. Die Richtungsangabe ist ebenfalls symbolisch, weil der Winkel relativ zum augenblicklichen Sonnenazimut während des Hinflugs in den Winkel relativ zur Schwerkraft auf der vertikalen Wabe im dunklen Stock übertragen wird. Diese Übertragung bedarf keiner kurzfristig zuvor wahrgenommenen Messung des Sonnenstands; sie kann auch über das Muster des polarisierten Lichtes erfolgen oder über die Landschaftsmerkmale. Zudem geben Bienen auch in der Nacht die richtige Richtung an, wenn man sie zum Tanzen stimuliert.

Kommunikation mit Symbolen hat eine gewisse Ähnlichkeit mit der menschlichen Sprache. Tatsächlich hat von Frisch diese Metapher auch verwendet; sie darf aber nicht wörtlich genommen werden und wurde von ihm auch nicht so verstanden. Selbst die einfachste menschliche Sprache hat eine Fülle von Symbolen, die in freier Kombination zu jeweils unterschiedlichen Bedeutungen zusammengesetzt werden können – also Wörter bilden können. Diese wiederum können nach den Regeln der Grammatik neue Inhalte vermitteln. Der Anteil an erlerntem Verhalten in diesem Zusammenhang ist außerordentlich groß, und nur wenige Grundstrukturen sind genetisch verankert. Das ist in der symbolischen Tanzkommunikation ganz anders. Es gibt nur ganz wenige Symbole und die Kombination von diesen ist außerordentlich beschränkt. Man kann auch nicht von einer Grammatik reden; allerdings haben verschiedene Kontexte unterschiedliche Bedeutungen für dasselbe Kodierungssystem. Eine Späherbiene im Schwarm verwendet den gleichen Code für

Richtung und Entfernung einer potenziellen Niststelle, und die Ausdauer sowie die Lebendigkeit des Tanzes kodieren wie im Tanz für eine Futterstelle die Wichtigkeit der Mitteilung. Die Schwarmbienen deuten die Botschaft eindeutig als Hinweis für eine Niststelle. Diese Kontextabhängigkeit könnte man als eine sehr einfache Form von „Grammatik“ verstehen. All diese Einschränkungen bedeuten aber nicht, dass die Tanzsymbole eine Bedeutung bei den tanzfolgenden Bienen haben können, die über die reine Vektorinformation des Hinflugs – also eine Fluganweisung – hinausgeht. Darauf werde ich gleich eingehen. Zuvor will ich fragen, welche Sinnesreize bei der Tanzkommunikation bedeutsam sind.

Welche Signale werden von der Tänzerin ausgesandt?

Visuelle Signale fallen im dunklen Stock aus, allerdings kann die tanzende Biene den Vektor auch richtig kodieren, wenn die Wabe waagrecht angeordnet ist und sie Sicht auf den Himmel hat. Diese Anordnung hat von Frisch verwendet, um die Rolle des polarisierten Himmelslichtes zu untersuchen. Andere Honigbienenarten wie die kleine asiatische Zwerghonigbiene (*Apis florea*) und die große asiatische Riesenhonigbiene (*Apis dorsata*), die ihre Waben im Freien an Ästen und Zweigen anbringen, tanzen häufig auf der waagerechten Oberseite und richten sich dabei nach den Himmelsmarken, möglicherweise auch den nahen Landmarken. Hier könnte eine visuelle Kommunikation zwischen Tänzerin und Nachläuferin eine Rolle spielen. Als Signale im dunklen Stock wurden sogenannte *jet streams* – Luftstöße, die von den Flügeln am Körperende ausgehen – als mögliche Signale angenommen. Dagegen spricht, dass die nachlaufenden Bienen meist ringsherum um die tanzende Biene stehen, so dass die *jet streams* für die meisten unwirksam sind (Abbildung 8). Weiterhin wurde spekuliert, dass die Vibrationen der Wachswabe von den nachfolgenden Bienen gespürt werden könnten. Das ist sehr unwahrscheinlich, weil die vielen auf der Wabe herumlaufenden Bienen so viele Störungen der Vibrationen erzeugen, dass solche Signale verloren gehen müssen. Zu-



ABB. 8 Tanzfolgende Bienen ordnen sich rings um die Tänzerin und nicht nur am Hinterende ihres Abdomens an. Sie folgen ihr auch nicht im strengen Sinne. Insofern ist der Begriff tanzfolgende Bienen oder Nachtänzerin in einem weiteren Sinne zu verstehen. Abb. rechts aus [6], S. 61.

dem tanzt die Biene auf vielen verschiedenen Untergründen, etwa auf dem Holzbrett vor und in der Beute (dem Bienenstock) oder auf den Körpern anderer Bienen im Schwarm. Zudem wurden keine Anzeichen gefunden, dass die Vibrationen des Untergrunds tatsächlich eine Rolle für die Kommunikation spielen. Da sich mit einem Mikrophon akustische Signale registrieren lassen, die von der Tänzerin ausgehen, wurde vermutet, dass diese auch für die Kommunikation zwischen den Bienen eine Rolle spielen. Allerdings arbeiten Mikrophone nicht in dem Frequenzbereich, der für die Tanzkommunikation der Bienen vor allem bedeutsam ist (ab 5–25 Hz entsprechend der Schwänzelfrequenz). Tanzende Bienen lassen sich auch selbst durch starke Töne nicht stören.

Ferner fanden wir, dass sich Bienen im Flug durch Reibung an geladenen Teilchen elektrostatisch aufladen (► Reibungselektrizität, siehe auch Kasten „Wahrnehmung von elektrostatischer Ladung“) und mit Körperladungen bis zu 400 V zum Stock zurückkehren. Zudem laden sie sich durch Reibung im Stock auch aneinander auf [10]. Wenn ein geladener Körper bewegt wird, gehen von ihm elektrostatische Felder aus (Abbildung 9) und wirken auf andere geladene Körper über ► Coulombsche Kräfte. Diese Kräfte bewegen die mechanosensitiven Haare und die Antenne, die mit einem komplexen Bewegungssensor (Johnston’sches Organ) ausgestattet ist. Diese Bewegungen entsprechen im Zeitmuster und im Frequenzgehalt

WAHRNEHMUNG VON ELEKTROSTATISCHER LADUNG

Da der Bienenkörper mit Wachs überzogen ist, das einen sehr hohen elektrischen Widerstand hat, können die durch Reibung entstandenen Ladungen nicht abfließen, selbst wenn die Biene auf einer feuchten Oberfläche läuft. Der Bienenkörper ist also elektrostatisch aufgeladen. Wenn die Ladungsträger bewegt werden, ändert sich das elektrostatische Feld in seiner Stärke entsprechend der Bewegungen des Ladungsträgers. Das elektrostatische Feld enthält daher Information über die Bewegung

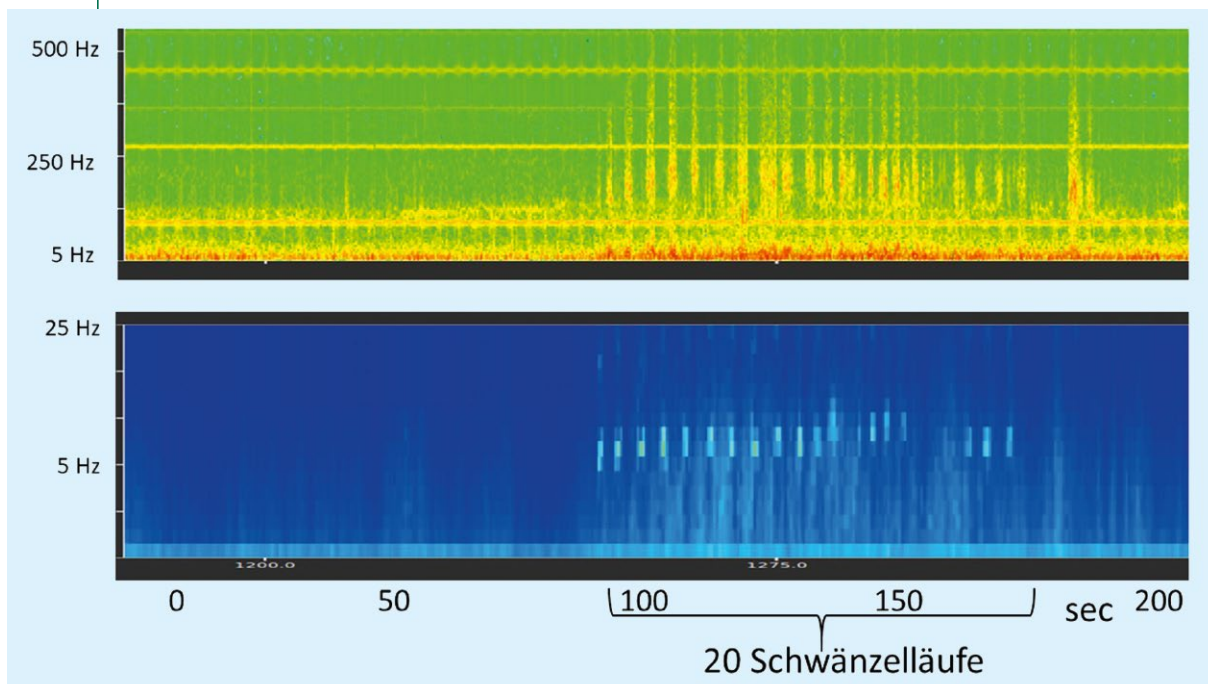
des geladenen Körpers (Frequenz, zeitliche Struktur). Bienen besitzen keine elektrischen Sinnesorgane, es fließt auch kein elektrischer Strom, um elektrostatische Ladung und deren Änderung wahrzunehmen. Vielmehr treffen die elektrostatischen Felder auf die geladenen Haare der Mechanorezeptoren und die geladene Antenne. Dies führt über Coulombsche Kräfte zu Bewegungen der Mechanorezeptoren. Elektrostatische Felder werden also von den Bienen gefühlt.

genau den elektrostatischen Kräften. Die Bienen nehmen diese Felder wahr und zwar über eine Entfernung von ungefähr einer Bienenlänge. Sie fühlen also die zeitlichen Muster und die Frequenzspektren dieser durch Bewegung ausgelösten Felder, können diese erlernen und anhand ihres Zeitmusters und Frequenzgehaltes unterscheiden.

Das Landschaftsgedächtnis und die Tanzinformation

Bevor Bienen beginnen Nektar und Pollen einzutragen, erkunden sie die Gegend um ihren Stock herum. Sie ler-

ABB. 9 | SPEKTROGRAMME DER ELEKTROSTATISCHEN FELDER EINER TANZENDEN BIENE



Gezeigt sind die Spektrogramme für die hochfrequenten (oben) und die niederfrequenten (unten) Anteile des elektrostatischen Felds. Ein Spektrogramm zeigt entlang der Zeitachse an, wann bestimmte Frequenzen stärker auftreten. Die horizontale Achse gibt daher die Zeit in Sekunden an, die vertikale Achse die Frequenz. Die Stärke des Signals wird in Falschfarben dargestellt, wobei im oberen Diagramm starke Signale gelb bis rot angezeigt werden, im unteren Diagramm mit weißer Markierung.

nen dabei Landschaftsmerkmale erst in der näheren und dann in der weiteren Gegend (etwa 500 m Umkreis), verwenden dies zum Erlernen der standortabhängigen Sonnenazimut-Zeitfunktion und zum Kalibrieren ihrer Entfernungsmessung. Dabei führen sie systematische Erkundungsflüge durch, die sie immer weiter vom Stock weg und in verschiedene Richtungen führen [11]. Welcher Art ist dieses Landschaftsgedächtnis? Die grüne Flugspur des Heimflugs in Abbildung 6 zeigt, dass Bienen auch dann auf direktem Flug zurück zum Stock fliegen können, wenn sie in einem dunklen Kästchen an einen Standort innerhalb des erkundeten Bereichs versetzt wurden, ohne dass sie das Ziel – den Stock – sehen können und ohne dass sie ferne Landmarken wie das Horizontprofil nutzen können, denn ein solches gab es bei diesen Experimenten nicht. Viele Experimente dieser und abgewandelter Art haben nachgewiesen, dass das Landschaftsgedächtnis in einer Art Karte gespeichert ist [12].

Wir stellten uns die Frage, ob dieses kartenartige Gedächtnis auch bei der Tanzkommunikation eingesetzt wird. In einem solchen Falle würde die tanzfolgende Biene die Vektorinformation nicht nur als eine Fluganweisung verwenden, nämlich vom Stock zu der Futterstelle der Tänzerin zu fliegen, sondern auch dazu nutzen, um einen Ort in ihrem Landschaftsgedächtnis zu bestimmen. Das Flugverhalten der Biene in Abbildung 6 legt eine solche Möglichkeit nicht nahe. Untersucht man aber dressierte Bienen mit solchen Versetzungsexperimenten, findet man, dass ein Drittel der Bienen tatsächlich nicht direkt zum Stock zurückfliegt, sondern zuerst zur Futterstelle und dann zum Stock. Es liegt daher nahe anzunehmen, dass die Vektorinformation des Tanzes zu zwei Botschaften für die tanzfolgenden Bienen führt: eine Fluganweisung (fliege entsprechend Vektorinformation unabhängig vom Startort wie in Abbildung 6) und eine Ortsbestimmung über deren Landschaftsgedächtnis. Die zweite Möglichkeit bedeutet nicht, dass die Tänzerin irgendwelche anderen Informationen als die Vektorinformation überträgt, sondern dass die tanzfolgende Biene die Vektorinformation in ihr Landschaftsgedächtnis einbettet. Der Endpunkt des Vektors charakterisiert dann einen Ort.

Um diese Frage zu prüfen, haben wir die tanzfolgenden Bienen nicht nur am Stock, sondern auch an fünf verschiedenen Stellen frei gelassen und ihren Flug mit dem Radar verfolgt. Abbildung 10 zeigt ein Beispiel für die Stelle R5. Die Biene fliegt ein kurzes Stück entsprechend der Fluganweisung (gerade grüne Strecke in Richtung auf vF, die virtuelle Futterstelle der Tänzerin), beginnt dann aber bereits mit dem Suchflug (hellblaue Spur), der sie in die Nähe der Auflassstelle zurückführt, und dann über die reale Futterstelle für die Tänzerin F zurück zum Stock (gelbe Spur). Viele solche Experimente zeigten:

1. Der anfängliche Vektorflug ist umso kürzer, je mehr die Gegend, die die Biene überfliegt, von der abweicht, die auf direktem Flug vom Stock zu der Futterstelle der

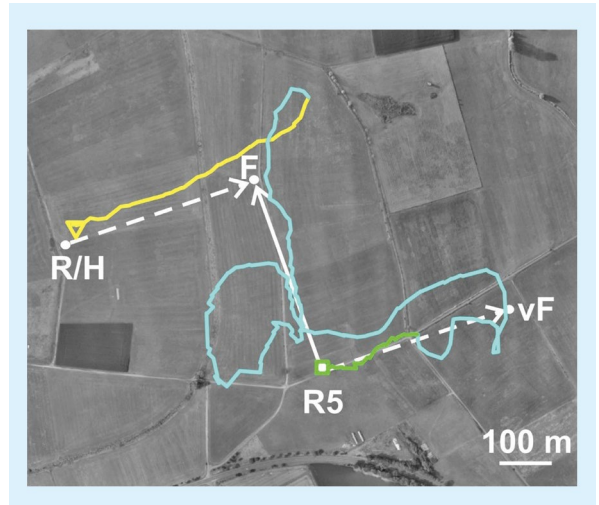


ABB. 10 Exemplarischer Flug einer tanzfolgenden Biene, die einer Tänzerin für die Futterstelle F (in Ost-Nord-Ost Richtung vom Stock) gefolgt war und dann an die Auflassstelle R5 transportiert wurde. Ihr Flug wird in drei Segmenten aufgeteilt. Grüne Strecke: anfänglicher Vektorflug (bis zur ersten Wendung über 60°), blaue Strecke: Suchflug, gelbe Strecke: gerader Heimflug (zurückverfolgt bis zur letzten Wendung $>60^\circ$). Abb. aus [13].

Tänzerin geführt hätte (über eine abgemähte Wiese in Richtung Ost-Nord-Ost).

2. Die Suchflüge verlaufen entweder über die Auflassstelle R zu der realen Futterstelle F der Tänzerin oder direkt vom abgebrochenen Vektorflug zu F. Ein solches Verhalten ist nur möglich, wenn die Biene über ein kartenartiges Landschaftsgedächtnis verfügt, denn die Stelle F kennt sie nur über die Tanzkommunikation [13].

Schlussfolgerung

Von Frischs Interpretation der Kodierungseigenschaften des Schwänzeltanzes wurde durch die Radarverfolgung der Flüge der dem Tanz folgenden Bienen bestätigt. Die Geruchsführung spielt nur in der unmittelbaren Umgebung des durch den Tanz angezeigten Ortes eine Rolle. Eine Orientierung durch die Tänzerinnen oder andere informierte Bienen an der Futterstelle kann ausgeschlossen werden. Die Präzision des Dekodierungsprozesses auf Seiten der tanzenden Biene wird nach unserer Interpretation durch die Mittelung mehrerer Schwänzellaufe verbessert, was zu beeindruckend fokussierten Suchmustern führt. Wahrscheinlich sind mehrere sensorische Signale an der Übermittlung der Tanzinformation, also des Vektors (Entfernung und Richtung) des Abfluges beteiligt. Elektrostatische Felder, die von den geladenen Körpern sowohl der Tänzerin als auch der Tanzverfolger ausgehen, führen zu mechanosensorischen Reizen, die möglicherweise eine entscheidende Rolle im Kommunikationsprozess spielen. Die tanzfolgenden Bienen verankern die Vektorinformationen in ihrem kartenartigen räumlichen Ge-

GLOSSAR

Coulombsche Kräfte: Das Coulombsche Gesetz beschreibt die Kräfte, die elektrische Ladungen aufeinander ausüben. Unterschiedliche Ladungen (+ -) ziehen einander an, gleiche Ladungen stoßen einander ab (+ +, - -). Die elektrischen Kräfte wirken über Entfernungen, die exponentiell mit dem Abstand abnehmen. Man spricht von einem elektrischen (Kraft)feld.

Exploratorisch: Exploratorisches Lernen erfolgt anders als assoziatives Lernen (klassische oder instrumentelle Konditionierung) ohne eine offensichtliche Belohnung. Die Tätigkeit selbst aus „Neugier“ ist die Belohnung.

Flugvektor: Besteht aus der Entfernung und der Richtung, die geflogen wird oder im Schwänzeltanz angezeigt wird.

Kartenartiges Landschaftsgedächtnis (► kognitive Karte): Ein solches Gedächtnis der erkundeten Landschaft wird dann angenommen, wenn neue und kürzeste Wege zwischen Orten zurückgelegt werden können und dieses Verhalten nicht durch einfachere Gedächtnisphänomene erklärt werden kann. Solche einfacheren Gedächtnisphänomene können sein: ► Wegintegration, Ansteuern eines Ziels, das aus der Ferne wahrgenommen werden kann (Zielorientierung), zunehmende Passung des Erinnerungsbildes, das am Zielort gelernt wurde.

Kognition: Dieser Begriff wird in verschiedenen Zusammenhängen sehr unterschiedlich verwendet. Im Kontext der Verhaltensbiologie der Tiere bezeichnet man mit Kognition eine reichhaltige sensorische Welt, vielfältige Lernvorgänge und erfahrungsabhängige und komplexe Verhaltensweisen.

Navigation: Dieser Begriff wird hier für eine mittlere Entfernung verwendet, also über räumliche Bereiche, die das Tier erkundet hat.

Optischer Fluss: Die Bewegung des Auges in einer strukturierten Umwelt führt zu einem Wechsel von helleren und dunkleren Flächen auf der Retina. Diese Wechsel von Hell und Dunkel an vielen Stellen der Retina stehen im direkten Zusammenhang mit der Entfernung zu der strukturierten Umwelt. Nahe Objekte erzeugen so einen hohen optischen Fluss, ferne Objekte einen geringeren optischen Fluss (die Bäume am Wegrand, die Sterne am Himmel). Hält die Biene eine bestimmte Flughöhe ein, kann sie aus dem optischen Fluss die zurückgelegte Flugstrecke

erschließen. Da die Struktur der Umwelt wie auch die Flughöhe variiert, kalibriert sie ihre optische Entfernungsmessung über auffällige Landschaftsmerkmale, die sie mehrfach und unter unterschiedlichen Bedingungen erfährt.

Reibungselektrizität: Elektrische Ladungen können auf einen Körper übergehen, wenn sich zwei geeignete Körper reiben. Typisch ist die Reibung eines Tierfells oder eines Nylonstoffes auf trockener Haut. Im Fall der Biene entsteht Reibungselektrizität im Flug, weil die UV-Strahlung in der Luft geladene Teilchen erzeugt. Zudem entsteht diese elektrische Aufladung auch bei der Reibung der Körperteile (Flügel gegen Körper) und der Tiere untereinander.

Sonnenazimut: Darunter versteht man die Richtung zu der Projektion der Sonne auf den Horizont. Im Tagesverlauf ändert sich die Richtung in unseren Breiten von östlich auf südlich und dann westlich.

Sonnenkompass: Der Zeitverlauf der scheinbaren Sonnenbewegung hängt vom Standort (Länge und Breite) ab. Da Bienen an sehr vielen Standorten auf der Welt vorkommen können, müssen sie diesen Zeitverlauf erlernen, um die Sonne als Kompass verwenden zu können. Sie müssen auch eine recht genau gehende innere Uhr haben und den Sonnenazimut bestimmen können, um eine stationäre Futterstelle anfliegen und im Tanz mitteilen zu können.

Symbolische Kommunikation (auch symbolischer Code): Eine Nachricht wird dann symbolisch kodiert, wenn das Signal keinen Bezug zu seiner Bedeutung hat. Der Schwänzeltanz kodiert den Flugvektor vom Stock zu einer Futterstelle symbolisch, weil die beiden Größen, die den Flugvektor bestimmen – die Entfernung und die Richtung – innerhalb des Stockes in Körperbewegungen verschlüsselt übermittelt werden. Diese Verschlüsselung hat keine offensichtliche Beziehung zu dem Flug im Freien.

Wegintegration: Die Fähigkeit von Tieren, einen direkten Rückweg aus dem gewundenen Hinweg dadurch zu erschließen, dass segmentweise Vektoren (also die Richtung und die Entfernung) des Hinweges verrechnet werden und 180° addiert wird.

dächtnis, was zu zwei Formen der Orientierung führt: dem Vektor, wie er von der Tänzerin kodiert wurde, und der Abkürzung zum Ort der Futterstelle der Tänzerin. Die Kommunikation bei Schwänzeltänzen ist also reichhaltiger als bisher angenommen. Dies betrifft die Kodierung durch ein zusätzliches sensorisches Signal (elektrostatische Feldabtastung), die Mittelwertbildung von mehreren Schwänzellaufen und die Einordnung dieses so gewonnenen präziseren Vektorendpunkts in ein kartenartiges Landschaftsgedächtnis.

Zusammenfassung 100 Jahre Schwänzeltanz

Der Schwänzeltanz der Honigbienen wurde vor 100 Jahren von Karl von Frisch entdeckt. Damit gelang ihm eine der wichtigsten Beiträge zur Verhaltensbiologie des letzten Jahrhunderts. Tanzende Bienen kodieren die Entfernung

und die Richtung des Fluges zu einer Futterstelle im dunklen Stock auf der vertikalen Wabe in symbolischer Weise. Neue Untersuchungen mit Hilfe eines Radargeräts haben diese Entdeckung nicht nur voll bestätigt, sondern auch gezeigt, dass dieser Flugvektor von den dem Tanz folgenden Bienen in ihr kartenartiges Landschaftsgedächtnis eingebettet wird. Dadurch ist es den Bienen möglich, von jedem Ort des von ihnen erkundeten Bereichs zu der im Tanz angegebenen Stelle zu fliegen.

Summary 100 years of waggle dancing

100 years ago, Karl von Frisch discovered the waggle dance of the honeybee. Thus, he succeeded in making one of the most important contributions to the behavioural biology of the last century. Dancing bees encode the distance and the direction of the flight to a food source in the dark beehive

on the vertical honeycomb in a symbolic way. Recent studies with a special radar equipment have not only confirmed this discovery, but have also shown that bees following the dance decode this vector information in two ways, as a flight instruction (distance and direction) and as a location by embedding the vector information into their cognitive map of the explored environment. In this way, it is possible for the bees to fly from any location in an area which they have explored to that point indicated by the dance.

Schlagworte

soziales Verhalten, individuelle Markierung, Dressur, symbolische Kommunikation, Kodierung des Flugvektors, elektrostatische Signale, Sonnenkompass, Entfernungsmessung, kartenartiges Gedächtnis, kognitive Karte

Literatur

- [1] K. von Frisch (1957). *Erinnerungen eines Biologen*. Springer, Berlin Heidelberg New York.
- [2] J. R. Riley et al. (2005). The flight paths of honeybees recruited by the waggle dance. *Nature* 435, 205–207.
- [3] K. von Frisch (1920). Ueber die „Sprache“ der Bienen. *Muench. med. Wochenschrift* 20, 566–569.
- [4] K. v. Frisch (1950). Bees: their vision, chemical senses and language.
- [5] N. Unhoch (1828). Anleitung zur wahren Kenntniß und zweckmäßigsten Behandlung der Bienen: ein Auszug aus dem größern Bienenbuch mit mehreren neuen Anmerkungen und Verbesserungen besonders den Landschullehrern und Landleuten gewidmet. Lindauer. *Schweizer Bienenfreund* 2.
- [6] K. von Frisch (1965). *Tanzsprache und Orientierung der Bienen*. Springer, Heidelberg.
- [7] M. Maeterlinck (1901). *The life of the bee*. Dodd, Mead.
- [8] D. L. Johnson, A. M. Wenner (1970). Recruitment efficiency in honey bees: studies on the role of olfaction. *Journal of Apicultural Research* 9, 13–18.

- [9] R. Menzel, U. Greggers (2013). Guidance by odors in honeybee navigation. *J Comp Physiol A Neuroethol. Sens. Neural Behav Physiol* 199, 867–873.
- [10] U. Greggers et al. (2013). Reception and learning of electric fields in bees. *Proc. Biol Sci* 280, 20130528.
- [11] J. Degen et al. (2016). Honeybees Learn Landscape Features during Exploratory Orientation Flights. *Current Biology* 26, 2800–2804.
- [12] R. Menzel (2023). Navigation and dance communication in honeybees: a cognitive perspective. *Journal of Comparative Physiology A*, 1–13.
- [13] Z. Wang et al. (2023). Honey bees infer source location from the dances of returning foragers. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 120, e2213068120.
- [14] F. Boenisch et al. (2018). Tracking all members of a honey bee colony over their lifetime using learned models of correspondence. *Frontiers in Robotics and AI* 5, 35.

Verfasst von:



Randolf Menzel, Jahrgang 1940, Promotion 1967 und Habilitation 1972. Forschungsaufenthalte in Australien, USA, Brasilien, Neuseeland, Norwegen, China. Leiter des Instituts für Neurobiologie an der Freien Universität Berlin von 1976 bis 2008. Seitdem emeritierter Professor. Leibniz-Preis 1991, Körber-Preis der Europäischen Wissenschaft 2000, Karl-Ritter-von-Frisch-Preis 2004, Mitglied mehrerer Akademien (Leopoldina, Berlin-Brandenburgische Akademie, Mainzer Akademie der Wissenschaften, Königlich-Norwegische Akademie), Ehrenpromotion der Universität Toulouse 2007.

Korrespondenz:

Randolf Menzel
Institut für Biologie
Freie Universität Berlin
Königin-Luise-Str. 1–3
14195 Berlin
menzel@neurobiologie.fu-berlin.de

BIONIK-TAGUNGSBAND ERSCHEIENEN

Zehn Vortrags- und 13 Posterbeiträge umfasst der 207 Seiten starke Tagungsband des 10. Bremer Bionik-Kongresses, der am 12./13. Mai 2023 in Bremen stattfand. Er war eine Gemeinschaftsveranstaltung der Gesellschaft für Technische Biologie und Bionik e. V. (GTBB), des Bionik-Innovations-Centrums (B-I-C) der Hochschule Bremen sowie des Bionik-Kompetenz-Netztes e. V. (BIOKON). Inhaltlich reicht das Themenspektrum von Anwendungen aus dem Bereich praktisch-technischer Anwendungen („Vom Fisch zum Filter“, „Suspensionsfresser als biologisches Vorbild für einen Mikroplastikfilter“) über „Laufroboter“, „Greifsysteme“, „Satellitenbremssegel“ bis hin zu „Betrachtungen und der Analyse des Brennnesselhaares als Beitrag zur Optimierung von Mikronadeln.“ Auch die Standortbestimmung kommt selbstverständlich nicht zu kurz: „Wissenschaftliche Herausforderungen der Bionik – Wo stehen wir und wo geht es hin?“, „Biointelligenz – Ausdruck einer biologischen Zeitenwende?“, „Bionik und Biomechatronik – zwei Teamplayer“. Der Tagungsband ist zu beziehen über die Gesellschaft für Technische Biologie und Bionik e. V. (GTBB): www.gtbb.net oder E-mail: info@gtbb.net



Foto: W. Irsch

Die Rückkehr der Wölfe

Vom Konflikt zur Koexistenz

REINHARD HEHL

Foto: KLICKFaszination

Der Wolf (Canis lupus) ist einer der umstrittensten Beutegreifer, dem bei uns Gefühle von vollkommener Ablehnung bis zu begeisterter Akzeptanz entgegen gebracht werden. Als Schädling über Jahrhunderte verfolgt wurde er nach seinem Verschwinden in Deutschland und in weiten Teilen Europas unter Schutz gestellt. Vielleicht hat niemand mit seiner Rückkehr gerechnet; eine aktive Wiederansiedlung der Wölfe wurde – im Gegensatz zu Luchsen – nicht wirklich in Erwägung gezogen. Umso spannender waren die selbstständige Einwanderung der Wölfe nach Deutschland und die Etablierung eines ersten Familienverbandes in Sachsen im Jahr 2000 in der Muskauer Heide. Das Rudel hat sich sein Revier sorgfältig ausgewählt: ein

Truppenübungsplatz, der nicht der Öffentlichkeit zugänglich ist. Dadurch blieb es relativ ungestört. Was dem Wolf insgesamt sehr zugutekam, war der vollständige gesetzliche Schutz vor Verfolgung. Dieser begünstigte eine starke Vermehrung der Wolfsbestände, führte zu Konflikten mit Nutztierhaltern und zu aktuellen Regelungen, die im Rahmen von länderspezifischen Wolfsverordnungen, Wolfsmanagementplänen und einer Neufassung des Bundesnaturschutzgesetzes den Umgang mit dem Wolf genau regeln. Die aktuelle Diskussion, wie mit dem Wolf weiter verfahren wird, dreht sich um den sogenannten „günstigen Erhaltungszustand“. Dieser ist die Voraussetzung für eine Änderung des Schutzstatus.



a)



b)

ABB. 1 Kommunikationsverhalten freilebender Wölfe. a) Ein interagierendes Wolfspaar. b) Das Heulen als Mittel der Verständigung. Fotos: Cornelia Arens, KLIICKFaszination, mit freundlicher Genehmigung.

IN KÜRZE

- Der Wolf wurde als schädlicher Beutegreifer in den vergangenen Jahrhunderten **in Mitteleuropa ausgerottet**.
- In Deutschland ist er nach Berner Konvention und Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie **eine streng geschützte Tierart**.
- Im Jahr 2000 ist der Wolf **nach Deutschland zurückgekehrt**, wo er sich seitdem vermehrt und geeignete Lebensräume besiedelt.
- Der Wolf richtet **Schäden bei der Nutztierhaltung an**, hat aber auch eine **Schutzfunktion vor Wildtierschäden** auf landwirtschaftlichen Anbauflächen durch Reduktion der Wildtierpopulation.
- Der Wolf nimmt eine **wichtige Rolle als Teil seines Ökosystems** ein.
- Wie in Zukunft mit dem Wolf umgegangen wird, ist Teil der **aktuellen Diskussion**.

Ein Wolfsrudel besteht in der Regel aus einem Elternpaar, den in diesem Jahr geborenen Welpen und den Jungtieren des Vorjahres, die das elterliche Rudel noch nicht verlassen haben [1]. Die Jungtiere verlassen das Rudel ab dem zweiten Lebensjahr und suchen sich neue Reviere und Partner. Die Rüden wandern auf der Suche nach neuen Revieren sehr viel weiter als die Fähen, die sich oft in der Nähe des Reviers des elterlichen Rudels ansiedeln. Auf diese Weise wird Inzucht und Geschwisterpaarung vermieden. Das Elternpaar weist eine enge soziale Bindung auf, und die Kommunikation innerhalb des elterlichen Rudels findet durch Heulen statt (Abbildung 1). Wölfe pflanzen sich einmal im Jahr fort, wobei die Welpen nach einer etwa zwölfwöchigen Tragzeit Ende April, Anfang Mai geboren werden und nach ca. drei Wochen den Wurfbau verlassen. Der Wurf besteht im Schnitt aus 4–6 Welpen (maximal 11), wobei es große Schwankungen geben kann. Die Welpen werden 6–8 Wochen gesäugt und sind mit etwa zehn Monaten ausgewachsen. Nach ca. 22 Monaten sind sie geschlechtsreif. Das Wolfsrevier ist – je nach Nahrungsangebot – 150 bis 350 km² groß und wird mittels Duftmarken und Heulen markiert. Bei niedriger Beutetierdichte kann ein Revier über 1000 km² groß sein [2]. Ein erwachsener Wolf benötigt etwa 2–3 kg Fleisch am Tag und seine natürliche Nahrung besteht in Europa aus wild lebenden Huftieren wie Rothirsch, Wildschwein, Reh, Elch und Rentier. Der Wolf spielt eine wichtige Rolle im Ökosystem, indem er verhindert, dass die Population von Huftieren zu groß wird – eine Rolle, die heutzutage die Jäger übernommen haben [1]. Wölfe sind Opportunisten und unterscheiden nicht zwischen Wild- und Nutztieren, was ihnen in den letzten Jahrhunderten zum Verhängnis wurde.

Die Ausrottung der Wölfe

Kaiser Karl der Große hat bereits 813 ein Gesetz erlassen, um die Wölfe, die große Schäden unter den im Wald und auf Wiesen ungeschützt weidenden Nutztieren anrichteten, zu erlegen [3]. Durch dieses Gesetz musste jeder Graf zwei sogenannte Luparii oder Wolfsjäger einstellen, die einen Anteil an der Getreideernte als Lohn erhielten. Die Luparii, die heute Louvetiers genannt werden, sind heutzutage in Frankreich Ehrenamtliche, die zwischen Landwirtschaft und Jagd vermitteln, tollwütige Tiere töten und die Wildbestände überwachen [3]. Wölfe wurden über Jahrhunderte stark verfolgt. Da die Bauern keine Schusswaffen hatten – das war den Adeligen und Landbesitzern vorbehalten – mussten diese andere Methoden anwenden, um die Wölfe zu fangen und zu töten. Ein Beispiel hierfür waren sogenannte Wolfsgruben (Abbildung 2). Dabei wird eine tiefe Grube ausgehoben, deren Wände aus Mauern bestehen, die der Wolf nicht überwinden kann. Diese Gruben wurden mit Ästen und Gras bedeckt, so dass ein Wolf, der über diese Falle läuft, einbricht und sich nicht mehr selbst befreien kann. Solche Wolfsgruben waren oft mit sogenannten Wolfsgärten verbunden, die durch trichter-

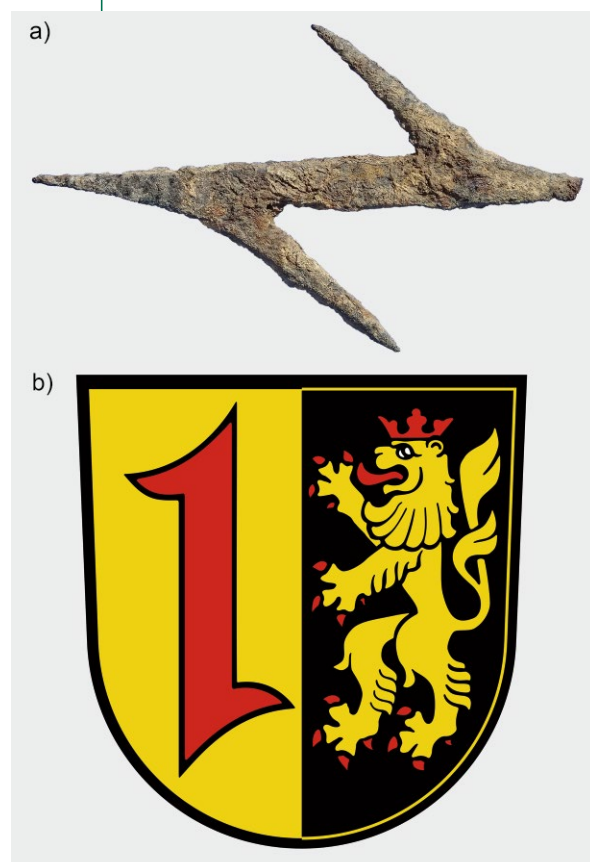


ABB. 2 Ein Wolf wird von Bauern in einen Brunnen getrieben und erschlagen. Das Tier wird anschließend als Mensch verkleidet und gehängt, um seine Rückkehr als Werwolf zu verhindern. Zeitgenössisches Flugblatt aus dem 17. Jahrhundert, gemeinfrei über Wikipedia.

förmige Zäune die dort hineingetriebenen Wölfe in die am Ende des Trichters liegende Wolfsgrube leiteten. Die in der Wolfsgrube gefangenen Wölfe konnten nun mit Knüppeln und Heugabeln getötet werden. Hatte man den Verdacht, dass es sich bei einem Wolf um einen sogenannten Werwolf handelte, dann wurde der tote Wolf oftmals noch gehängt, um eine Wiederkehr in Menschengestalt zu verhindern (Abbildung 2). Noch heute zeugen Wolfsgalgen von dieser Praxis. Eine besondere Art der Wolfsjagd wurde mit sogenannten Wolfsangeln durchgeführt (Abbildung 3). Diese bestanden aus einem S-förmigen, geschärften Metall, welches in einem Baum eingehakt wurde. Der untere Teil zeigte wie ein Haken nach außen. An dieser Angel wurden Fleischstücke befestigt, die der Wolf durch einen Sprung zu erreichen versuchte. Dabei blieb er wie ein Fisch an der Angel am unteren Haken hängen. Noch heute führen viele Städte die Wolfsangel in ihrem Wappen.

Durch die starke Verfolgung der Wölfe nahm der Wolfsbestand stetig ab und erreichte seinen Tiefpunkt – die Ausrottung des Wolfs in Deutschland – im 19. Jahrhundert. Danach gab es immer wieder vereinzelt Einwanderungsversuche, die aber alle an der Wachsamkeit der Jäger scheiterten. Alfred Brehm hat die letzten Jahre der Ausrottung als Zeitzeuge miterlebt und in seinem „Tierleben“ dokumentiert. Dort wurde noch zwischen guten und bösen Tieren unterschieden, und der Wolf war eindeutig den bösen Tieren zugeordnet. Alfred Brehm schrieb im 19. Jahrhundert: „Im vorigen Jahrhunderte fehlte das schädliche Raubtier keinem größeren Waldgebiete unseres Vaterlandes, und auch in diesem Jahrhunderte sind hier nach amtlichen Angaben immerhin noch Tausende

ABB. 3 | DIE WOLFSANGEL



a) Eiserner Wolfsangel aus dem 8. Jahrhundert, gefunden in der mittelalterlichen Siedlung Villa Arnesburg. b) Wappen der Stadt Mannheim. Bild a: CC BY-SA 3.0, Bild b gemäß § 5 Urheberrechtsgesetz gemeinfrei über Wikipedia.

erlegt worden“ [4]. Um 1850 verlieren sich die letzten Hinweise auf Wolfsrudel in Brandenburg und 1904 wurde der „letzte“ Wolf auf dem Gebiet des heutigen deutschen Staatsgebietes bei Hoyerswerda geschossen. Von den Wölfen in Deutschland zeugten dann nur noch die vielen Gedenksteine, die an den Abschuss des „letzten Wolfs“ erinnern.

Im Westen Europas sah es nicht viel anders aus. Nur in Spanien, im nördlichen Portugal, in Italien, Griechenland und auf dem Balkan gab es noch Wolfsbestände. In den Alpen verschwand die Wolfspopulation bis Mitte des letzten Jahrhunderts. Genetische Untersuchungen an vereinzelt auftretenden und getöteten Tieren deuteten darauf hin, dass es in den Alpen noch bis 1954 eine versteckt lebende Wolfspopulation gab [5]. Die letzten ca. 100 italienischen Wölfe lebten in den Siebzigerjahren des 20. Jahrhunderts im Apennin. Wissenschaftliche Untersuchungen ergaben eine Anpassung dieser Wölfe an Haus- und Schlachtabfälle, die sie sich von den Müllkippen der Orte holten, da es kaum noch natürliche Beutetiere gab [1]. Diese sogenannten „Spaghettiwölfe“ haben sich seit ihrer Unter-Schutz-Stellung und der Wiederansiedlung ihrer Beutetiere stark vermehrt und über die französischen Seealpen bereits die Schweizer Alpen wiederbesiedelt. Diese Tiere sind ausgesprochene Wanderer: Die ersten italienischen Wölfe wurden bereits in den östlichen Pyrenäen nachgewiesen [6]. Das war insofern überraschend, als Spanien eine relativ große Wolfspopulation hat, die sich

aber kaum ausbreitet. Das könnte daran liegen, dass in den Wolfsgebieten des Landes die Wölfe bejagt werden und so eine Besiedelung benachbarter Territorien verhindert wird [7].

Die Rückkehr der Wölfe

In Deutschland begann die Rückkehr der Wölfe mit der Etablierung eines ersten Familienverbandes in Sachsen im Jahr 2000 in der Muskauer Heide [8]. Ausgehend von diesem ersten Rudel etablierten sich weitere Rudel in der direkten Umgebung und haben in den folgenden Jahren die Bundesländer Brandenburg, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen-Anhalt besiedelt. Auffällig war, dass die Ausbreitung schwerpunktmäßig im deutschen Tiefland in nordwestlicher Richtung erfolgte und die Mittelgebirge eher selten, wenn überhaupt, besiedelt wurden. In Deutschland sind es vor allem aktive oder stillgelegte Truppenübungsplätze, auf denen sich Wolfsrudel etabliert haben. Dort werden sie am wenigsten gestört, und die Wölfe, die sich dort ansiedeln, wurden oft selber auf Truppenübungsplätzen großgezogen.

Die von der Dokumentations- und Beratungsstelle des Bundes zum Thema Wolf (DBBW) gesammelten Daten über Wolfsterritorien der Bundesländer für das Monitoringjahr 2021/2022 führen insgesamt 161 Territorien auf, bei denen es sich um etablierte Rudel, einzelne revierbildende Paare und territorial lebende Einzeltiere handelt (Abbildung 4). Die Mehrzahl der Wolfsterritorien wird

ABB. 4 | WOLFSTERRITORIEN 2021/22 IN DEUTSCHLAND

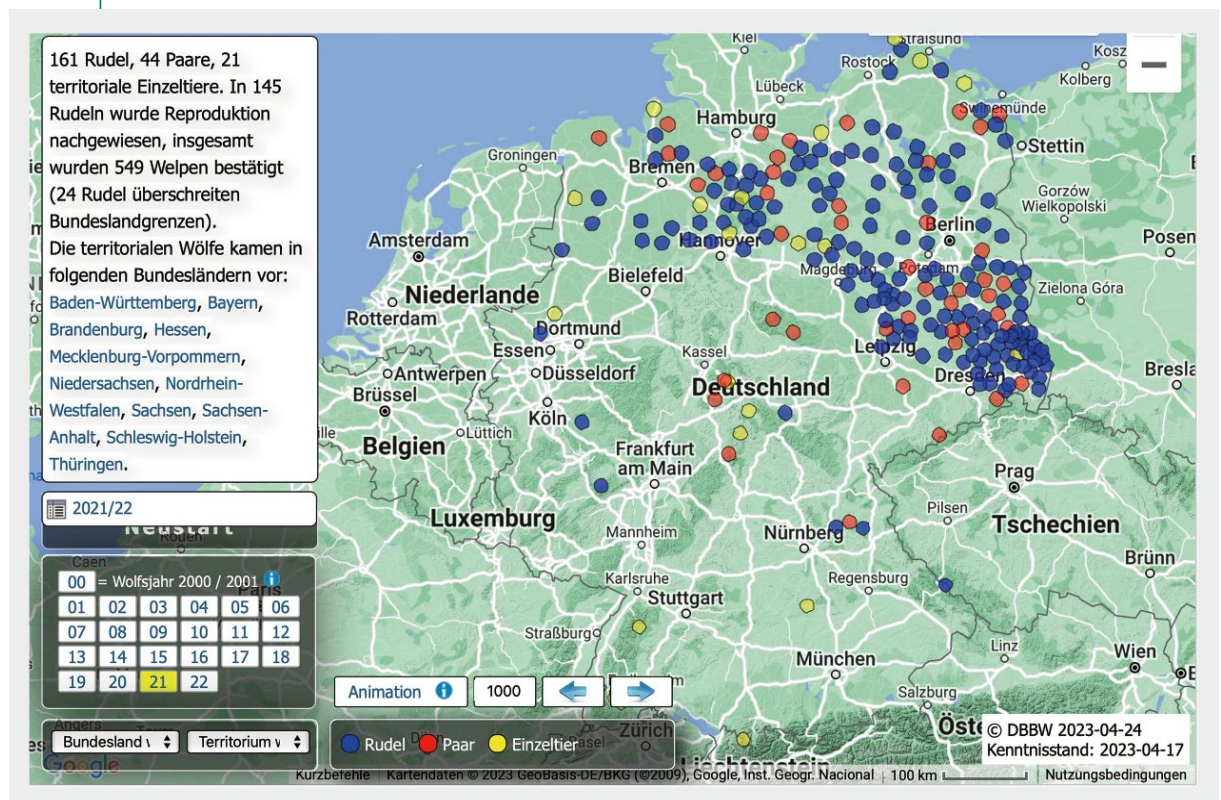


Abb.: Dokumentations- und Beratungsstelle des Bundes zum Thema Wolf (DBBW).

von Wolfsrudeln besiedelt. Die Zunahme der Territorien seit dem ersten Monitoringjahr 2000/2001 zeigt einen kontinuierlichen Anstieg, aus dem man auf eine weitere Zunahme der Wolfsterritorien schließen kann (Abbildung 5). Der Wolf hat sich mittlerweile über Deutschland bis in die Niederlande und nach Dänemark ausgebreitet.

Neben der ostwestlichen Zuwanderung ist auch mit einer Zuwanderung aus dem Süden zu rechnen. In Italien wurde der Wolf in den Siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts unter Schutz gestellt. Seitdem hat er sich über den Apennin bis in die französischen Seealpen ausgebreitet und besiedelt von dort den Alpenraum. Westlich des Rheins hat er mittlerweile die Vogesen erreicht [9]. Von den Vogesen kann man eine weitere Ausbreitung in den Pfälzer Wald und die Eifel nach Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen erwarten. Die Ausbreitung der Wölfe wird durch seinen strengen gesetzlichen Schutz begünstigt.

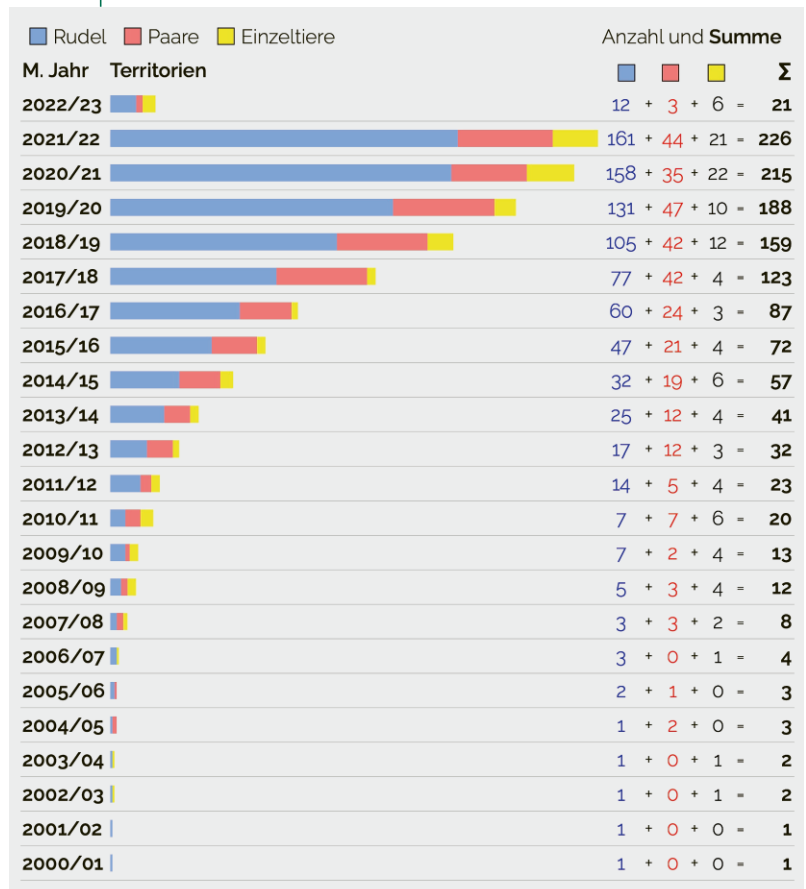
Rechtliche Grundlagen

Nach der Ausrottung der Wölfe in Mitteleuropa wurden Wölfe unter internationalen Schutz gestellt [10]. Länder, in denen es keine Restbestände gab, führten meistens die strengste Schutzstufe ein, wohingegen Länder wie Spanien oder Griechenland sich die regionale Bejagung der Wölfe vorbehalten. Diese Regelungen sind in dem „Übereinkommen über die Erhaltung der europäischen wild lebenden Pflanzen und Tiere und ihrer natürlichen Lebensräume“, kurz die Berner Konvention vom 19.9.1979, und in der „Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie“, kurz FFH, der Europäischen Gemeinschaft vom 5.6.1992 festgelegt [10].

Die Berner Konvention unterscheidet in den Anhängen II und III zwischen streng geschützten Tierarten und geschützten Tierarten. Für die etwa 710 Tierarten des Anhangs II gelten strenge Artenschutzvorschriften. Sie dürfen weder gestört noch gefangen, getötet oder gehandelt werden. Anhang III enthält solche Tierarten, die zwar schutzbedürftig sind, aber im Ausnahmefall bejagt oder in anderer Weise genutzt werden dürfen. Der Wolf ist in beiden Anhängen gelistet und die einzelnen Länder und Regionen haben entschieden, welcher Anhang für sie gelten soll.

Ziel der FFH ist die Sicherung der Artenvielfalt durch die Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wild lebenden Tiere und Pflanzen im europäischen Gebiet der Mitgliedstaaten. Ähnlich wie in der Berner Konvention wird durch Anhänge der Schutzstatus des Wolfs unterschiedlich bewertet, je nachdem welcher Anhang der FFH in den jeweiligen Mitgliedsländern und deren Regionen gilt. Anhang IV der FFH führt den Wolf als streng zu schützende Tierart von gemeinschaftlichem Interesse auf. Dabei werden aber bereits explizit europäische Regionen ausgenommen, die noch einen größeren Wolfsbestand haben oder die aufgrund der Art der Nutztierhaltung von Wölfen besonders betroffen sind. Das sind die griechischen Populationen nördlich des 39. Breitengrades, die estnischen Populationen, die spanischen Populationen

ABB. 5 | ENTWICKLUNG DER WOLFSTERRITORIEN SEIT 2000

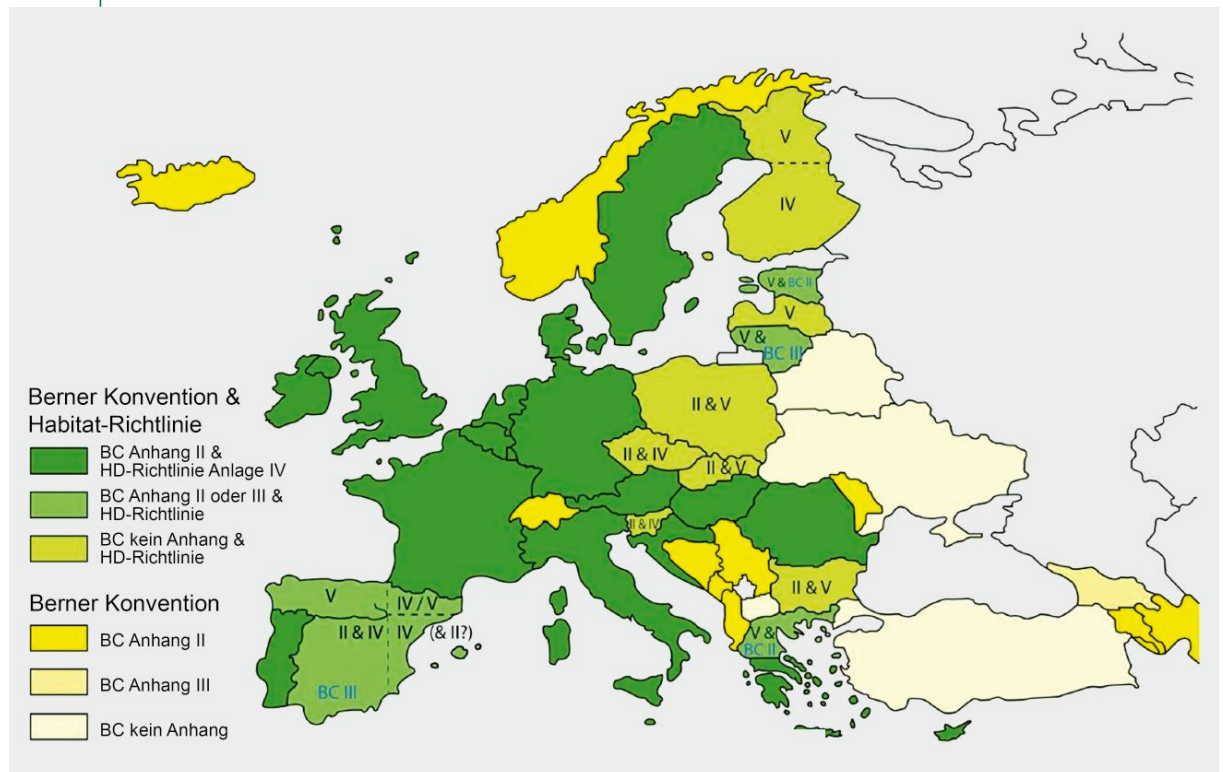


Die Daten für das Monitoringjahr 2022/23 sind unvollständig und geben den Stand zum Zeitpunkt der Datenbankabfrage wieder. Abb. durch Abfrage der DBBW-Datenbank am 24.04.2023 erstellt.

nördlich des Duero, die bulgarischen, lettischen, litauischen, polnischen und slowakischen Populationen sowie die finnischen Populationen innerhalb des Rentierhaltungsareals. In diesen Regionen gilt der Anhang V der FFH, die den Wolf als Tierart von gemeinschaftlichem Interesse definiert, dessen Entnahme aus der Natur und dessen Nutzung Gegenstand von Verwaltungsmaßnahmen sein kann. Dies führte zu einem Flickenteppich europäischer Regelungen zum Schutz des Wolfs (Abbildung 6), je nachdem welche Anhänge der Berner Konvention oder der FFH in den Ländern und Regionen gelten [10]. In Deutschland gilt vor und seit der Rückkehr der Wölfe Anhang II der Berner Konvention und Anhang IV der FFH. Somit wurde dem Wolf der strengste Schutzstatus gewährt – die beste Voraussetzung für die Wiederbesiedelung geeigneter Lebensräume in Deutschland.

Was oft übersehen wird und zu teils sehr unterschiedlichen Interpretationen führt, ist die Tatsache, dass die Berner Konvention und die FFH, unabhängig davon welche der Anhänge im Unterzeichnerstaat gelten, bereits Ausnahmen zulassen, bei denen die geschützten Tiere erlegt werden dürfen. Die Berner Konvention besagt in

ABB. 6 | SCHUTZSTATUS DES WOLFES IN EUROPA



Europaweite Gültigkeit der Anhänge II und III der Berner Konvention (BC) und der Anlagen IV und V der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (HD). Die Berner Konvention unterscheidet in den Anhängen II und III zwischen streng geschützten Tierarten und geschützten Tierarten. Für die Tierarten des Anhangs II gelten strenge Artenschutzvorschriften. Anhang III enthält solche Tierarten, die im Ausnahmefall bejagt werden dürfen. Ähnliches gilt für die Anlagen IV und V der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie. Der Wolf ist sowohl in den Anhängen der Berner Konvention als auch in der Fauna-Flora-Richtlinie gelistet, und die einzelnen Länder und Regionen haben entschieden, welcher Anhang für sie gilt.
Abb. verändert nach [10] gemäß CC BY-NC-ND 4.0.

Artikel 9, dass es unter der Voraussetzung, dass es keine andere befriedigende Lösung gibt und dass die Ausnahme dem Bestand der betreffenden Population nicht schadet, jede Vertragspartei Ausnahmen von den den Artenschutz und den Schutz des Lebensraums betreffenden Artikeln zulassen kann. Das kann zum Schutz der Pflanzen- und Tierwelt, zur Verhütung ernster Schäden an Kulturen, Viehbeständen, Wäldern, Fischgründen, Gewässern und anderem Eigentum erfolgen. Außerdem kann es im Interesse der öffentlichen Gesundheit und Sicherheit, der Sicherheit der Luftfahrt oder anderer vorrangiger öffentlicher Belange geschehen. Genau wie die Berner Konvention lässt auch die FFH in Artikel 16 Ausnahmen unter den in der Berner Konvention genannten Voraussetzungen zu. Darüber hinaus ermöglicht auch das Bundesnaturschutzgesetz in § 45 Ausnahmen unter fast den gleichen Voraussetzungen wie die Berner Konvention und die FFH, und ermächtigt die nach Landesrecht für Naturschutz und Landschaftspflege zuständigen Behörden zum Erlass von Rechtsverordnungen.

In Bezug auf den Wolf sind das die sogenannten Wolfsverordnungen, die je nach Bundesland früher oder später erlassen wurden oder erlassen werden sollen. Vorreiter

war das Land Brandenburg, das am stärksten vom Wolf besiedelte Bundesland, welches mit der Brandenburgischen Wolfsverordnung (BbgWolfV) den Umgang mit dem Wolf regelt. Die Brandenburgische Wolfsverordnung und die Wolfsverordnungen anderer Bundesländer regeln unter anderem das Verscheuchen und Vergrämen von Wölfen mit auffälligem Verhalten, die Tötung von Wölfen mit für den Menschen problematischem und aggressivem Verhalten sowie die Entnahme von Wolf-Hund-Hybriden.

Welchen Stellenwert der Wolf in der Rechtsprechung hat, wird dadurch deutlich, dass im März 2020 der § 45a des Bundesnaturschutzgesetzes in Kraft getreten ist. Dieser regelt spezifisch den Umgang mit Wölfen. Dieser Paragraph verbietet das Füttern und Anlocken von freilebenden Wölfen mit der Ausnahme von Maßnahmen der für Naturschutz und Landschaftspflege zuständigen Behörde. Außerdem sind die Voraussetzungen für die Entnahme von Wölfen und die Bestimmung von geeigneten Personen, die die Entnahme durchführen dürfen, genau geregelt. Es wird weiterhin vorgegeben, Hybriden zwischen Wolf und Hund in der freien Natur durch die für Naturschutz und Landschaftspflege zuständige Behörde zu entnehmen.

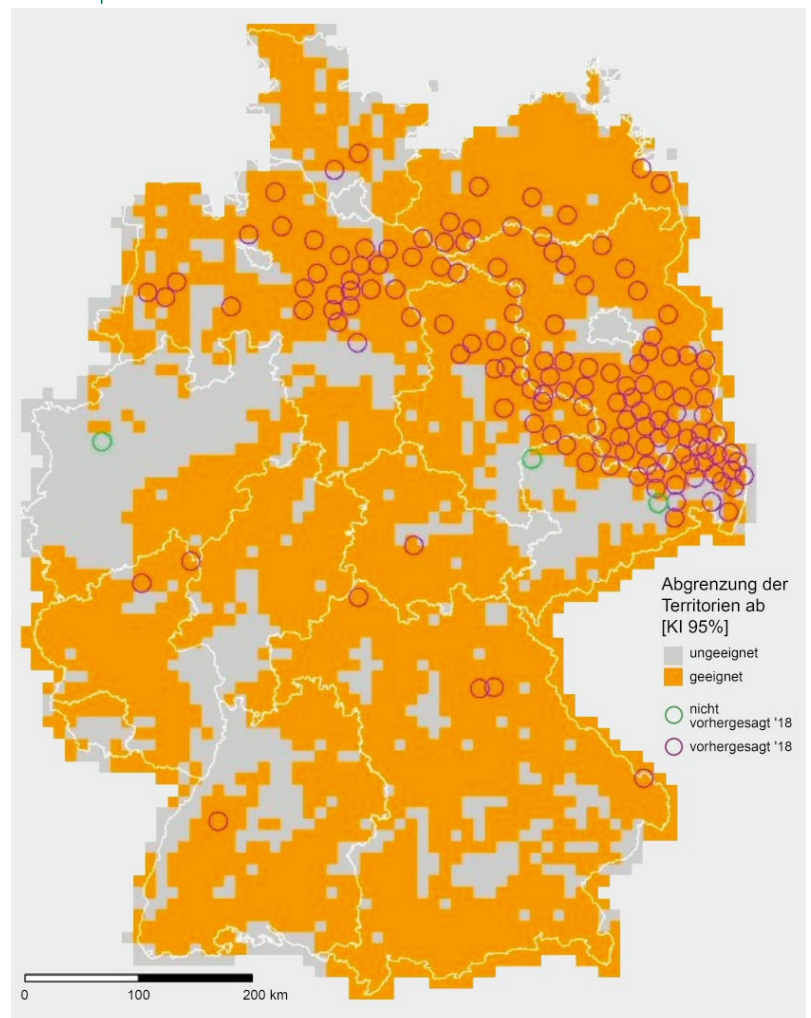
Vom Konflikt zur Koexistenz

In Zukunft wird mit einer weiteren Zunahme der Wolfsterritorien zu rechnen sein. Eine aktuelle Abschätzung der potenziellen Anzahl von Wolfsterritorien in Deutschland geht bei einer Territoriengröße von 200 km² von 700 bis 1400 Territorien aus, die grundsätzlich Platz für die entsprechende Anzahl von Rudeln bieten [11]. Diese Studie bezieht sich auf bisherige Erfahrungswerte zur Größe und Eigenschaft der bereits besetzten Territorien und unterscheidet generell zwischen geeigneten und ungeeigneten Lebensräumen (Abbildung 7). Wölfe sind absolute Habitatsgeneralisten und könnten potenziell fast die gesamte deutsche Landschaft nutzen [11]. Um auf dieses Szenario vorbereitet zu sein, ist es auch für die noch nicht besiedelten Territorien von Interesse, Managementpläne und effektive Herdenschutzmaßnahmen vorzubereiten. Eine kürzlich erschienene Studie zur regionalen Verteilung von Wolfsschäden zeigt, dass die größten Schäden in neu besiedelten Territorien bei ungeschützter Nutztierhaltung entstehen, wohingegen in den etablierten Territorien mit entsprechenden Schutzmaßnahmen die Anzahl der Schadensfälle eher konstant bleibt bzw. abnimmt [12]. In Zukunft sollte neben den Schäden, die der Wolf bei der Nutztierhaltung anrichtet, auch die Schutzfunktion des Wolfs vor Schäden durch Wildtiere auf landwirtschaftlichen Anbauflächen berücksichtigt werden. Dies ist mittlerweile Teil aktueller Forschungsprojekte [13].

Mit der zunehmenden Wolfspopulation wächst auch die Wahrscheinlichkeit menschlicher Nahbegegnungen mit Wölfen. Deshalb ist es besonders wichtig, Wölfe scheu zu halten. Jeder Wolf, der seine Scheu vor dem Menschen verliert – das kann beispielsweise durch Fütterung geschehen – und auf aggressive Art und Weise agiert, soll der Population entnommen werden. Diese Vorgehensweise wird in den Managementplänen der Bundesländer und im Bundesnaturschutzgesetz geregelt. Ob und wann der Wolf in das Bundesjagdgesetz aufgenommen wird, wie der Deutsche Jagdverband fordert, wird zurzeit kontrovers diskutiert. Die Aufnahme ins Jagdrecht hat auf den gegebenen Schutzstatus keine Auswirkung. Wenn der Wolf in Deutschland ins Jagdrecht aufgenommen wird, aber noch Anhang IV der FFH-Richtlinie für Deutschland gilt, genießt er ganzjährige Schonung. Einen Wechsel der Gültigkeit von der Liste der streng geschützten Arten im Anhang IV auf die Liste der geschützten Arten im Anhang V in Deutschland bedarf der Zustimmung der EU-Kommission und muss mit den Nachbarländern abgestimmt werden. Ob der Schutzstatus reduziert werden kann, hängt vom sogenannten „günstigen Erhaltungszustand“ ab. Nach den im Auftrag der EU-Kommission erstellten *Leitlinien für Managementpläne für Großraubtiere auf Populations-ebene* vom 01.07.2008 ist der günstige Erhaltungszustand dann erreicht, wenn „aufgrund der Daten über die Populationsdynamik der Art anzunehmen ist, dass diese Art ein lebensfähiges Element des natürlichen Lebensraumes, dem sie angehört, bildet und langfristig weiterhin

bilden wird“ [14]. Wann und unter welchen Bedingungen dies erreicht wird, ist Gegenstand der aktuellen Diskussion. Ob in Zukunft ein Modell tragfähig ist, welches weiterhin auf Schadensausgleichszahlungen beruht, steht ebenfalls zur Diskussion. Eine Alternative könnten Zahlungen für diejenigen sein, die in einem Beutegreifergelände leben, ähnlich wie die Unterstützung für Landwirte, die auf Grenzertragsflächen produzieren [15]. Ein weiterer interessanter Vorschlag ist ein Naturschutz-Grundeinkommen. Für beide Systeme sind jedoch noch viele Fragen offen, bevor sie in größerem Maßstab angewandt werden können, zum Beispiel in Bezug auf die Abgrenzung des

ABB. 7 | GEEIGNETE WOLFSHABITATE IN DEUTSCHLAND



Die Modellierung bezieht sich auf bisherige Erfahrungswerte zur Größe und Eigenschaft der bereits besetzten Territorien und unterscheidet generell zwischen geeigneten und ungeeigneten Lebensräumen. Ein geeignetes Wolfsterritorium (orange) umfasst in dieser Modellrechnung mindestens 200 km². Die Karte ist in 100 km²-Zellen eingeteilt. Deshalb umfasst ein geeignetes Wolfsterritorium zwei orangene 100 km²-Zellen, die nebeneinander liegen. Die Anzahl möglicher Territorien ergibt sich dann aus der Hälfte der Anzahl geeigneter 10×10 km-Rasterzellen. Die außerhalb der orangenen Raster liegenden Wolfsterritorien (Kringel) befinden sich in den als ungeeignet vorhergesagten Territorien, die anderen innerhalb. Abb. gemäß CC BY-ND 4.0 aus [11].

Gebiets, die Finanzierung und die Legitimität [15]. Wie in Zukunft eine Koexistenz in den Alpen aussehen könnte, erforschen Partner aus Slowenien, Österreich, Frankreich und Italien im Rahmen des von der EU geförderten Projekts LIFE WolfAlps [16]. Das Projekt gliedert sich in neun thematische Bereiche: 1. Schadensvermeidung, 2. Monitoring, 3. Bekämpfung der Wilderei, 4. Kontrolle der Wolf-Hund-Hybridisierung, 5. Einbeziehung von Interessengruppen, 6. Kommunikation, 7. Bildung, 8. Ökotourismus und 9. Wechselwirkungen zwischen Beutetieren, Raubtieren und menschlichen Aktivitäten. Das Projekt LIFE WolfAlps setzt sich für ein konkretes Zusammenleben von Mensch und Wolf ein. Die von ihm entwickelten Instrumente sollen alle Betroffenen bei der Analyse, Planung und Ressourcenzuteilung unterstützen. Dies ist für ein Gleichgewicht zwischen dem Schutz von Beutegreifern und menschlichen Aktivitäten unerlässlich [16]. Unabhängig davon, welche Gesetze, Verordnungen und Managementpläne erlassen und gelten werden, ist eines sicher: Der Wolf ist zurückgekehrt, um zu bleiben und wieder eine wichtige Rolle als Teil seines Ökosystems einzunehmen.

Zusammenfassung

Wölfe sind soziale Tiere, die in einem Familienverband und einem relativ fest umgrenzten Territorium leben. Sie wurden aufgrund von Schäden, die sie in der Landwirtschaft anrichten, in den vergangenen Jahrhunderten in weiten Teilen Europas ausgerottet. Heutzutage wird der Wolf in seinem Ökosystem als wichtiger Teil einer naturnahen Landschaft gesehen. Deshalb ist der Wolf nach Berner Konvention, Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie und nach Bundesnaturschutzgesetz streng geschützt, was seine Rückkehr begünstigt hat. Zwischen den Jahren 2000 und 2022 wurden in Deutschland 161 Wolfsterritorien besetzt und es ist abzusehen, dass es Raum für über 700 Territorien gibt. Mit der Zunahme der Wolfsbestände erhöhen sich die Konflikte mit der Landwirtschaft durch Nutztierrisse und die Nahbegegnungen mit Menschen. Deshalb werden Maßnahmen zum Herdenschutz je nach Wolfsmanagementplan der Bundesländer finanziell unterstützt, und es können Schäden an Nutztieren bei Einhaltung von Herdenschutzmaßnahmen finanziell kompensiert werden. Problematische Tiere, die ihre Scheu vor Menschen verloren haben, sowie schadenstiftende Wölfe können gemäß der gesetzlichen Vorgaben getötet werden. Wie in Zukunft Mensch und Wolf koexistieren, ist Teil der aktuellen Diskussion.

Summary

The return of the wolves: From conflict to coexistence

Wolves are social animals that live in a family unit and a relatively clearly defined territory. They were eradicated from large parts of Europe in recent centuries due to the damage they cause to agriculture. Nowadays, the wolf is

seen as an important part of a near-natural landscape in its ecosystem. Therefore, the wolf is strictly protected according to the Bern Convention, the Fauna-Flora Habitat Directive and the Federal Nature Conservation Act, which has favoured its return. Between the years 2000 and 2022, 161 wolf territories were occupied in Germany and it is likely that there is room for more than 700 territories. With the increase in wolf populations, conflicts with agriculture grow due to livestock depredation and close encounters with humans. Therefore, depending on the wolf management plan of the federal states, measures for herd protection are financially supported and damages to farm animals can be financially compensated if herd protection measures are followed. Problematic animals that have lost their shyness towards humans as well as wolves that cause damage can be killed according to the legal requirements. How humans and wolves will coexist in the future, is part of the current discussion.

Schlagworte:

Canis lupus, Wolfsterritorien, Wolfsmonitoring, Berner Konvention, Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie, günstiger Erhaltungszustand

Danksagung:

Ich möchte mich beim Freundeskreis freilebender Wölfe e.V. für seinen unermüdlichen Einsatz zum Schutz der Wölfe und seine Unterstützung meiner Arbeit bedanken. Mein besonderer Dank gilt Cornelia Arens, KLIICKFaszination, für die Erlaubnis zur Verwendung ihrer Wolfsfotos und Robert Hänsch, Institut für Pflanzenbiologie der Technischen Universität Braunschweig, für die Anregung zu diesem Artikel.

Internet-Anschriften

Dokumentations- und Beratungsstelle des Bundes zum Thema Wolf (DBBW):

– <https://www.dbbw-wolf.de>

Freundeskreis freilebender Wölfe e.V.:

– <https://www.freundeskreiswoelfe.de>

Literatur

- [1] E. Zimen (2023). Der Wolf. Verhalten, Ökologie und Mythos. Das Vermächtnis des bekannten Wolfsforschers. Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co. Stuttgart.
- [2] M. Tikkanen, I. Kojola (2019). Hunting dogs are at biggest risk to get attacked by wolves near wolves' territory boundaries. *Mammal Research* 64, 581–586.
- [3] M. Weiß (2014). Vergiftetes Verhältnis. *Süddeutsche Zeitung*, 11.05.2014.
- [4] A. Brehm (1890). Brehm's Tierleben. Allgemeine Kunde des Tierreichs. Leipzig und Wien, Bibliographisches Institut.
- [5] C. Dufresnes et al. (2019). Last but not beast: the fall of the Alpine wolves told by historical DNA. *Mammal Research* 64, 595–600.
- [6] C. Garcia-Lozano et al. (2020). Landscape Connectivity and Suitable Habitat Analysis for Wolves (*Canis lupus* L.) in the Eastern Pyrenees. *Sustainability* 12, 5762.
- [7] M. Quevedo et al. (2019). Lethal management may hinder population recovery in Iberian wolves. *Biodiversity and Conservation* 28, 415–432.
- [8] H. Ansorge et al. (2010). Die Rückkehr der Wölfe. Das erste Jahrzehnt. *Biologie in unserer Zeit* 40, 244–253.

- [9] J. Louvrier et al. (2018). Mapping and explaining wolf recolonization in France using dynamic occupancy models and opportunistic data. *Ecography* 41, 647–660.
- [10] A. Trouwborst (2018). Wolves not welcome? Zoning for large carnivore conservation and management under the Bern convention and EU habitats directive. *Review of European, Comparative and International Environmental Law*, Tilburg Law School Research Paper No. 2018–12, 306–319.
- [11] S. Kramer-Schadt et al. (2020). Habitatmodellierung und Abschätzung der potenziellen Anzahl von Wolfsterritorien in Deutschland. *Bundesamt für Naturschutz-Skripten* 556.
- [12] L. Singer et al. (2023). The spatial distribution and temporal trends of livestock damages caused by wolves in Europe. *Biological Conservation* 282, 110039.
- [13] M. Davoli et al. (2022). Changing patterns of conflict between humans, carnivores and crop-raiding prey as large carnivores recolonize human-dominated landscapes. *Biological Conservation* 269, 109553.
- [14] J. Linnell et al. (2008). Guidelines for population level management plans for large carnivores in Europe. A Large Carnivore Initiative for Europe report prepared for the European Commission (contract 070501/2005/424162/MAR/B2).
- [15] H. Pettersson et al. (2022). „They Belong Here“: Understanding the Conditions of Human-wolf Coexistence in North-Western Spain. *Conservation and Society* 20, 113–123.
- [16] M. De Biaggi, T. Walter (2023). Wolf-Human coexistence in the Alps: the LIFE WolfAlps EU project. *Journal on Protected Mountain Areas Research and Management* 15, 46–53.

Verfasst von:



Reinhard Hehl wurde 1957 in Leverkusen geboren. Nach dem Studium der Biologie an der Universität zu Köln fertigte er seine Doktorarbeit am Max-Planck-Institut für Züchtungsforschung in Köln Vogelsang an. Nach einem vierjährigen Aufenthalt als Postdoktorand in den USA, ist er seit 1991 als akademischer Rat/Oberrat und außerplanmäßiger Professor am Institut für Genetik der Technischen Universität Braunschweig tätig. Als Mitglied des Freundeskreises freilebender Wölfe e. V. informiert er regelmäßig über aktuelle wissenschaftliche Arbeiten zum Thema Wolf, die als Zusammenfassungen auf der Internetseite des Vereins veröffentlicht werden.

Korrespondenz

Prof. Dr. Reinhard Hehl
Institut für Genetik
Technische Universität Braunschweig
Spielmannstr. 7
38106 Braunschweig
E-Mail: r.hehl@tu-bs.de

Freundeskreis freilebender Wölfe e. V.
Grauhorststr. 42
38440 Wolfsburg

Freundeskreis freilebender Wölfe e.V.

Grauhorststraße 42
38440 Wolfsburg

www.freundeskreis-wolf.de



Freundeskreis
freilebender Wölfe e.V.

Der Freundeskreis freilebender Wölfe e.V. möchte mit seiner umfassenden und vielschichtigen Arbeit dazu beitragen, dass die Wölfe als Bestandteil der Natur und als wichtiger Baustein des ökologischen Gleichgewichtes in Deutschland und Europa anerkannt werden.

Durch Öffentlichkeitsarbeit und Mitarbeit in den verschiedenen politischen Gremien zum Thema Wolf leisten wir unseren Beitrag dazu, dass sich die Wolfspopulation, wie nationale und internationale Gesetze fordern, erholen und ausbreiten kann.

Darüber hinaus sind wir an der Mitgestaltung von Lösungsansätzen beteiligt, um ein möglichst konfliktarmes Zusammenleben von Mensch und Wolf zu ermöglichen.

Der Freundeskreis freilebender Wölfe e.V. ist eine bundesweit staatlich anerkannte Naturschutzvereinigung!

Der Freundeskreis freilebender Wölfe e.V. ist gemeinnützig.

Alle Spenden und Beiträge werden ausschließlich satzungsgemäß verwendet.

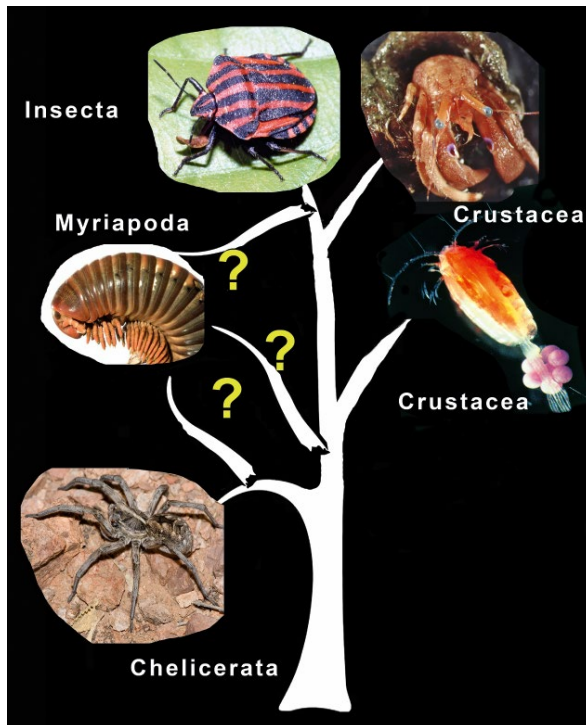


Erweitern Sie den Freundeskreis - werden Sie Mitglied!

Trotz beeindruckender Fortschritte bleibt Forschungsbedarf für biologische und methodische Fragen

Molekulare Phylogenetik

WOLFGANG WÄGELE | PATRICK KÜCK | LARS PODSIADLOWSKI



Ungeklärte Abstammungsfragen bei den Arthropoda.

Fotos: Myriapoda: Dr. T. Wesener, Spinne: Prof. O. Niehuis.

Neue Labortechniken, leistungsfähige Computer und Algorithmen ermöglichen es, in Genomen Ereignisse ihrer Evolution zu identifizieren und Stammbäume zu rekonstruieren. Seither musste u. a. die traditionelle Klassifikation der Tiere revidiert werden. Die beeindruckenden Erfolge dürfen aber nicht täuschen: Es gibt zahlreiche Fehlerquellen sowie wenig plausible Ergebnisse. Der Forschungsbedarf betrifft sowohl theoretische Grundlagen für die Datenauswertung als auch evolutionäre Szenarien, die über die Genome hinaus die Evolution erklären.

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 76 erklärt.

Die Rekonstruktion der Stammesgeschichte von Organismen (Phylogenetik) mit Hilfe genomischer Information ist in Analogie zur Geschichtsforschung auf Spuren historischer Prozesse angewiesen. Evidenzen für historische Ereignisse sind zum Beispiel Genduplikationen, die in mehreren Arten gefunden werden, Insertionen neuer Sequenzabschnitte oder eine Serie von Punktmutationen. Voraussetzung für die phylogenetische Nutzung der genomischen Veränderungen ist, dass diese wahrscheinlich homolog sind. In der molekularen Systematik sprechen wir vom phylogenetischen Signal. Wir müssen die Wahrscheinlichkeit der Einmaligkeit einer Veränderung schätzen (Homologiewahrscheinlichkeit), um eine Abstammungshypothese begründen zu können. Die Wahrscheinlichkeit der Homologie von Mutationen hängt von der Häufigkeit und Komplexität der Veränderung ab. Die Substitution eines einzelnen Nukleotids „X“ durch ein „A“ in einer DNA-Sequenz ist nicht sehr aussagekräftig. Würfeln wir mit den vier Buchstaben A, G, C und T, erhalten wir in 25 Prozent der Fälle durch Zufall ein A. Finde ich jedoch bei zwei Arten an einer bestimmten Stelle im Gen eine längere Nukleotidfolge (z. B. AAGCTTCA), ist das „Erwürfeln“ der exakten Sequenz selten bzw. weniger wahrscheinlich, und damit steigt die Wahrscheinlichkeit, dass es eine homologe Sequenz ist. Um zu schätzen, ob Übereinstimmungen nicht durch Zufall entstanden sind, sind Modelle für Substitutionswahrscheinlichkeiten entwickelt worden. Wenn sich in zwei von einem gemeinsamen Vorfahren abstammenden und jetzt getrennten Linien von Populationen die DNA-Sequenzen parallel entwickeln, nimmt nach einiger Zeit die Anzahl sichtbarer, vom gemeinsamen Ahnen geerbter Neuheiten ab. Der Grund: Je älter die Linien sind, desto häufiger tritt an einer Position mehr als eine Substitution auf (multiple Substitution). Das phylogenetische Signal ist dann nicht mehr sichtbar.

Die Wahrscheinlichkeit von Substitutionen entlang eines Stammbaumastes wird mit Substitutionsmodellen beschrieben. Damit können auch multiple Substitutionen berücksichtigt werden. Implizite Annahmen der Modellparameter können zum Beispiel sein: Bestimmte Nukleotide werden häufiger als andere ersetzt, Regionen eines Gens können durch Selektionsdruck weniger veränderlich als andere sein, einige Arten verändern sich in gleicher Zeit schneller. Bei Berücksichtigung vieler Parameter werden die Modelle realistischer, komplexe Modelle verlängern

jedoch die Rechenzeit. Die Zahl geschätzter Substitutionen einer Abstammungslinie wird in Grafiken meist in der Länge der Linie (Ast des Stammbaums) dargestellt. Lange Linien sprechen für eine längere Existenzzeit der Linie, sie können aber auch durch schnellere Substitutionsraten entstehen. Auffällig ist, dass rekonstruierte alte Stamm-linien oft kurz sind (Abbildung 1). Die kurzen Linien können auf eine schnelle Arttaufspaltung hinweisen, können aber auch die Folge des Verlustes von phylogenetischem Signal und damit ein Artefakt sein.

Das grundlegende Rechenverfahren, das sich für die Datenauswertung durchgesetzt hat, beruht auf der *Maximum-Likelihood*-Methode (ML-Methode), mit der bei gegebenen Sequenzen rezenter Arten eine große Zahl von Stammbäumvorschlägen („Topologien“) untersucht wird. Die Wahrscheinlichkeiten von Substitutionen jeder Topologie werden für jede Sequenzposition über alle Äste der Topologie multipliziert. Der beste Gesamtwert bestimmt, welche der verglichenen Topologien als die optimale gewählt wird. Substitutionsmodelle werden vom Anwender ausgewählt, deren Parameter können von den Algorithmen aus den Daten geschätzt werden. Es gibt zahlreiche Algorithmen und entsprechende Software zur Anwendung der Methode (Sammlung in <https://evolution.genetics.washington.edu/phylip/software.html>). Die komplexe mathematische und theoretische Literatur dazu kann hier nicht wiedergegeben werden (siehe [2, 3, 4]).

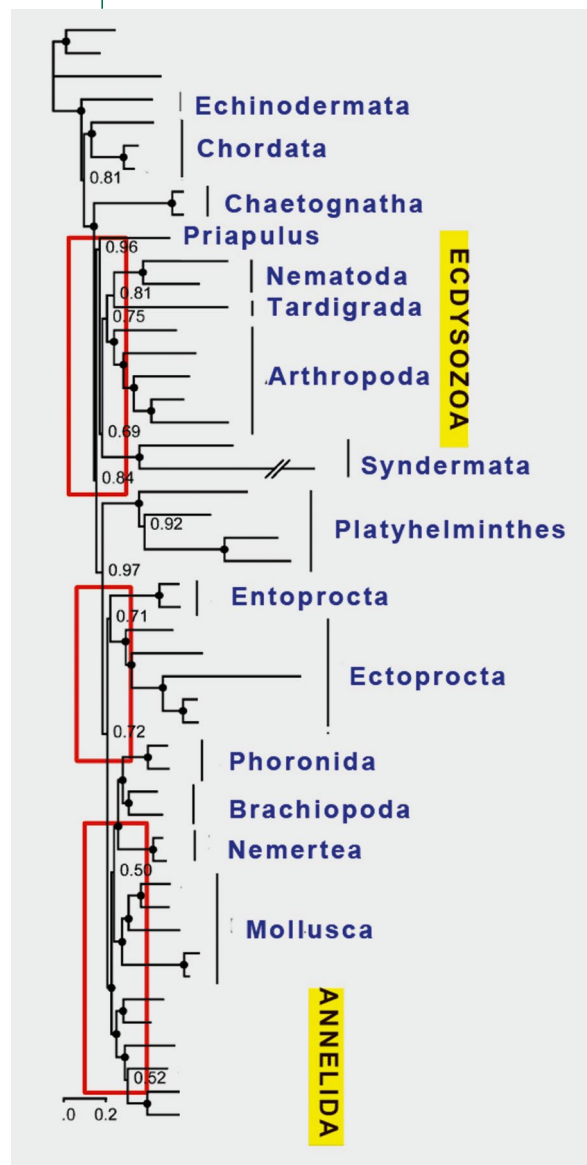
An dieser Stelle sei daran erinnert, dass sich die o. g. Modellannahmen nur auf rekonstruierte Substitutionsprozesse im Genom beziehen, nicht jedoch auf die Wahrscheinlichkeit, dass ein Organ sich entwickelt oder dass die Evolution einer Organismengruppe eine bestimmte Richtung einnimmt. Die Wahrscheinlichkeit eines Evolutionsprozesses hängt von vielen Faktoren ab. Dazu gehören Anpassungen an Klimaveränderungen, an aufkommende Konkurrenz, an nutzbare ökologische Nischen, Folgen von Orogenesen etc. Wir sehen nur die Effekte der Evolution als Veränderungen im Genom. Aus Erfahrungen ergibt sich, dass Verwandtschaftsaussagen der molekularen Phylogenetik immer unsicherer werden, je weiter wir in die Vergangenheit zurückblicken. Sie sind weiterhin abhängig von der Qualität der Daten (Datenmenge, korrekte Homologisierung von Genen und Sequenzregionen, Informationsgehalt, Vermeidung von Kontaminationen etc.) und von der Verlässlichkeit der verwendeten Software (siehe unten).

Fortschritte in der Labortechnik

Mehrere methodische Durchbrüche erleichtern seit den 1980er Jahren den Einsatz molekularbiologischer Ansätze in der Evolutionsforschung:

(1) Die Anwendung der bekannten Polymerase-Kettenreaktion (PCR) ermöglichte ab Mitte der 1980er Jahre die gezielte Sequenzierung von DNA einzelner Gene. Synthetisierte DNA-Stränge konnten gelelektrophoretisch getrennt werden, zunächst auf manuell hergestellten Gelplatten, dann in Kapillaren. Radioaktive

ABB. 1 | PHYLOGENIE DER METAZOA



Die Ecdysozoa-Hypothese stellt die Arthropoda zu den Fadenwürmern, weit getrennt von den Annelida. Beachte die Regionen mit kurzen basalen (erdgeschichtlich älteren) Ästen (rot markiert), die entweder eine schnelle Aufspaltung des Stammbaumes oder den Verlust des phylogenetischen Signals bedeuten können. Abb. nach [1].

IN KÜRZE

- Fortschritte der Labortechnik und der Bioinformatik haben es ermöglicht, effizient die **DNA ganzer Genome zu lesen** und für die Verwandtschaftsforschung zu nutzen.
- Die **Klassifikation der Tiere musste seitdem revidiert werden**. Nicht alle neueren phylogenetischen Hypothesen sind jedoch untereinander kompatibel oder plausibel.
- Die **Suche nach Fehlerquellen in den bioinformatischen Verfahren** sowie das Verständnis der Evolution von Organsystemen und Ontogenesen entlang der Stammbäume erfordern weitere Forschung.

Nukleotide wurden durch Fluoreszenzmarker ersetzt. Später konnten die Reaktionen weiter miniaturisiert werden. Phylogenetische Analysen wurden bevorzugt mit Genen durchgeführt, die leicht über PCR vervielfältigt werden konnten, weil sie häufig sind, wie z. B. bei Tieren die Gene für ribosomale RNA oder Abschnitte des mitochondrialen Genoms, bei Pflanzen Abschnitte des Genoms von Chloroplasten.

- (2) Eine bedeutende Erweiterung ergab sich ab etwa Anfang der 2000er Jahre durch die Hochdurchsatzsequenzierung (HTS, *high-throughput sequencing*). Viele Millionen kurzer Sequenzketten (50–300 bp) konnten mit einer einzigen DNA-Probe erstellt werden. Hierzu wird die fragmentierte Proben-DNA auf einem Glasobjektträger gebunden, auf der Sequenzierreaktionen stattfinden. Damit können hunderte von Genen parallel sequenziert werden. Weitere Methoden wurden in den nachfolgenden Jahren erfunden, womit die Kosten sanken, während der Durchsatz stieg. Verblüffend ist die Nanopore-Methode, bei der lange DNA-Stränge durch Nanoporen eines Trägermaterials gefädelt werden. Veränderungen elektrischer Ströme im Nanopore-Träger, die mit den Nukleotiden variieren, werden detektiert. Molekularbiologische Experimente können jetzt die Gesamtheit des Genoms oder der RNA eines Organismus (Transkriptomdaten) als Datenbasis nutzen. Für die phylogenetischen Analysen werden informative Gensequenzen gewählt, die innerhalb der untersuchten

Taxa universal vorhanden sind, aber möglichst auch nur eine Genkopie pro Art besitzen. Deren Identifizierung in der zunächst unsortierten Datenmenge eines HTS-Experiments erfordert aufwendige bioinformatische Analysen. Der große Nachteil der HTS-Verfahren ist, dass eine ausreichende Menge DNA hoher Qualität benötigt wird, weshalb alte Proben oder sehr kleine Objekte nicht genutzt werden können.

- (3) Eine Lösung für dieses Problem sind Anreicherungsverfahren (*target capture*, auch als *anchored hybrid enrichment* bezeichnet, Abbildung 2). In den meisten Varianten dieser Methodik werden kurze (50–200 bp) Abschnitte der anzureichernden Genombereiche als künstliche RNA-Sonden hergestellt, was vorab Wissen über die Struktur der untersuchten Genbereiche erfordert. Diese RNA-Moleküle, die als „Fangsequenzen“ dienen, binden an einzelsträngige Proben-DNA. Durch Hinzugabe von winzigen präparierten Magnetkugeln, an denen die RNA-Sonden mit den Fragmenten der Zielgene binden, können die DNA-Stränge mit einem Magneten aus dem Gemisch herausgeholt werden. Der große Vorteil dabei ist, dass zur Sequenzierung nur die für die Analyse relevanten DNA-Fragmente isoliert werden. Zudem ist diese Methode sehr empfindlich: Mit geringen Mengen an partiell zersetzter (fragmentierter) DNA von altem Museumsmaterial oder von Fossilien lassen sich sehr gute Ergebnisse erzielen. Nachteile sind der hohe Preis für die Herstellung tausender RNA-Sonden, und es muss Vorabinformation über die Zielgene bekannt sein, um gute Sonden zu entwerfen.
- (4) Weitere Fortschritte in den Sequenziertechnologien (Echtzeit-Einzelmolekülanalyse, Erstellung von langen und ultralangen Sequenzen) werden insbesondere für den möglichst lückenlosen Zusammenbau ganzer Genome eingesetzt sowie für die Analyse von Modifikationen. Für die Anwender ist besonders erfreulich, dass die Sequenzierkosten in den vergangenen Jahren sehr gesunken sind. Kostete die Sequenzierung des menschlichen Genoms 1990 (*human genome project*) mindestens 500 Millionen Dollar (eine exakte Angabe ist wegen der vielen Beteiligten nicht möglich), muss man heute nur mit ca. 7000 € für eine Genomanalyse rechnen. Braucht man nur Anteile des Genoms, ist die Genomsequenzierung für viele Laboratorien heute alltagstauglich.

FEHLERQUELLEN IN DER MOLEKULAREN PHYLOGENETIK

Fehler in den Daten

- inkorrekte Bestimmung der Arten
- Kontaminationen im Labor: Die DNA stammt nicht vom Untersuchungsobjekt
- Kontamination aus dem Untersuchungsobjekt (Darminhalt, Parasiten, Symbionten)
- Lesefehler bei der Sequenzierung: Einzelne Nukleotide werden nicht korrekt identifiziert
- Paraloge Gene: Duplizierte, sich getrennt entwickelte Gene werden nicht unterschieden
- Datensätze haben Lücken (bei einzelnen Arten wurden Gene/Sequenzbereiche nicht sequenziert)
- Folgen von Hybridisierung: Ein Anteil der Gene gehört zu einer anderen Abstammungslinie

Fehler in den Algorithmen

- Rechenverfahren sind Näherungsverfahren, die das optimale Ergebnis verpassen können
- Astlängen der Stammbäume beeinflussen die Fähigkeit der Algorithmen, die korrekte Verwandtschaft zu finden
- Parameter des verwendeten Substitutionsmodells weichen stark von den (unbekannten) historischen Substitutionsraten ab
- Nicht erkannte konvergente Evolution: Verwandtschaftsannahme auf Grund zufälliger Übereinstimmungen der DNA-Sequenzen (z. B. als Folge gleicher Basenfrequenzen)
- Verrauschen des phylogenetischen Signals durch multiple Substitutionen wird nicht erkannt
- Systematische Fehler: Algorithmen berücksichtigen keine Zeitrichtung und unterscheiden nicht zwischen ► Plesiomorphien und ► Apomorphien

Big Data, approximative Algorithmen und Software

Bestanden zu Beginn der Nutzung von DNA-Sequenzen die Datensätze aus z. B. maximal 20 Arten und aus Sequenzen der Länge von 200 bis 1800 Nukleotiden, werden heute Datensätze mit Sequenzen von mehr als 1000 Genen und mehreren Dutzend bis über 100 Arten verwendet [5]. Es hat sich gezeigt, dass es bei den statistischen Auswertungsmethoden (ML-Methoden) auf Grund des sehr hohen Rechenbedarfs bei heute üblichen Datenmengen

nicht möglich ist, die Phylogenie exakt zu berechnen. Die Algorithmen sind keine algebraischen Operationen, für die es nur eine korrekte Lösung gibt, sondern approximative Verfahren. Dabei kann es sein, dass heuristische Methoden nicht immer den besten (optimalen) Baum finden, wenn sie in einem lokalen Optimum stecken bleiben oder wenn die Modellannahmen unrealistisch sind.

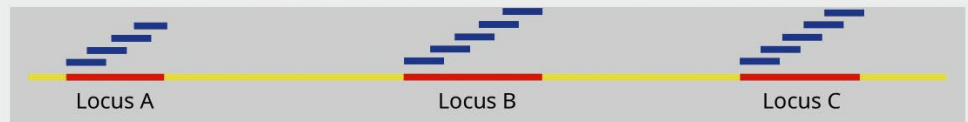
Die verwendeten Algorithmen können auch, unabhängig von der Datenqualität, systematische Fehler erzeugen (siehe auch Kasten „Fehlerquellen in der molekularen Phylogenetik“). Dass es diese gibt, kann man mit Simulationen nachweisen. Ein bisher ungelöstes Problem ist, dass die Algorithmen implizit eine von der Zeitachse unabhängige Substitutionsrate voraussetzen. Substitutionswahrscheinlichkeiten ändern sich nicht, wenn die Sequenzevolution entgegen dem Zeitverlauf angenommen wird, was in unserem Universum nicht vorkommen kann. Es ist nicht erforscht, wie sich das auf die Ergebnisse auswirkt. In Simulationen zeigt sich jedenfalls, dass ▶ Plesiomorphien (ältere Homologien) bei bestimmten ▶ Astlängenverhältnissen zu falschen Gruppierungen führen [6] (Abbildung 3). Simulationen sind auch hilfreich, um die Leistung von Computerprogrammen zu vergleichen (Abbildung 4). Dafür erzeugt man im Computer die Evolution einer artifiziellen DNA-Sequenz entlang eines vorgegeben Stammbaums mit einem ebenfalls vorgegebenem Substitutionsmodell. Dadurch kennt man den richtigen Stammbaum, das richtige Modell und die am Ende der Linien entstandenen Sequenzen und kann mit dem künstlichen Datensatz prüfen, ob der richtige Baum von den Programmen gefunden wird.

Forschungsergebnisse verändern die Klassifikation der Tiere

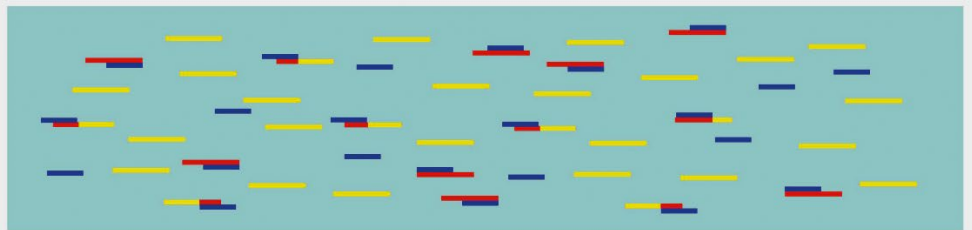
Analysen der letzten Jahre zeigen, dass für den Stammbaum der Tiere Aussagen über Ereignisse im Paläozoikum oft widersprüchlich sind. Eine Erklärung dafür ist das Verwaschen des phylogenetischen Signals im Zeitverlauf. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Hypothese plausibel ist, steigt jedoch, je weiter wir uns der Gegenwart nähern, bis

ABB. 2 | HYBRID-ENRICHMENT VERFAHREN

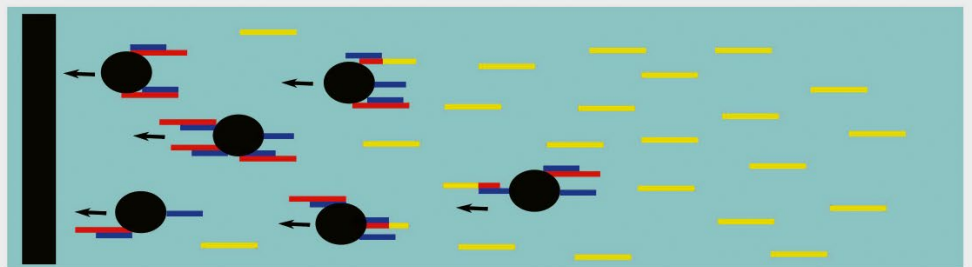
1. Bioinformatik: Identifizierung der Loci (rot) und Auswahl der Sonden (blau)



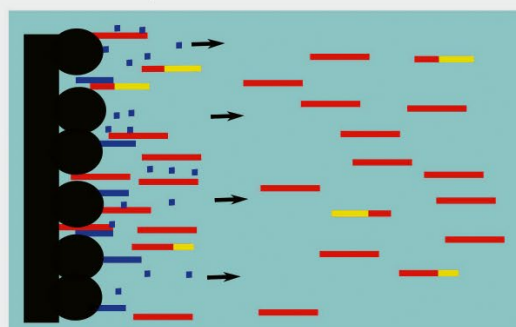
2. Fragmentierte DNA (gelb/rot), gemischt mit RNA-Sonden (blau): Hybridisierung der Sonden mit Fragmenten der ausgewählten Loci



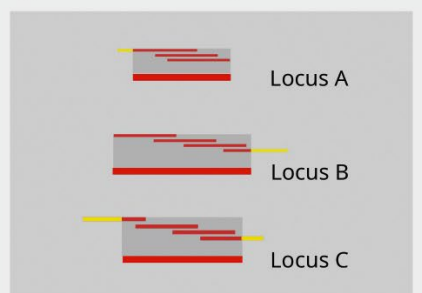
3. RNA/DNA-Hybride werden aus der Mischung mit Hilfe von kleinen Magnetkugeln (schwarz), die an die Sonden binden, herausgefischt



4. Gefischte Fragmente werden von den Magnetkugeln abgelöst, die RNA verdaut, die DNA sequenziert



5. Bioinformatik: Zusammenbau der überlappenden Fragmente (dünne Linien) zur Sequenz des gewählten Locus (dicke Linien)



hin zur sicheren Klassifikation nah verwandter Arten. Heute sind viele Klassifikationen aus der tradierten „klassischen“ Literatur des vergangenen Jahrhunderts, wie in A. Kaestners „Lehrbuch der Speziellen Zoologie“ dargestellt, überholt:

- Die Igelwürmer (Echiurida) und Spritzwürmer (Sipunculida) galten lange als eigene Tierstämme. Heute ist anerkannt, dass es sich um sehr abgeleitete Ringelwürmer (Annelida) handelt. Ebenso werden die Clitellata (Regenwürmer und Egel) nicht mehr von den Viel-

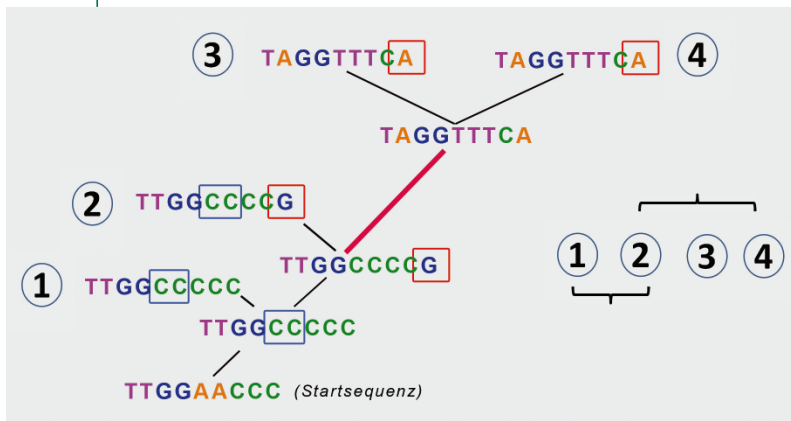
borstern (Polychaeta) getrennt [7], da sie aus einem Zweig der Polychaeta hervorgegangen sind.

- Obwohl sie sich äußerlich sehr unterscheiden, stammen die in Afrika beheimateten Elefanten, Klippschliefer, Schliefer, Erdferkel, Rüsselspringer, Goldmulle, Tenreks sowie die Seekühe von einem gemeinsamen Vorfahren ab, dessen Nachkommen sich in Afrika ent-

faltet haben (Abbildung 5). Die Gruppe wird Afrotheria genannt [10, 11].

- Die Sacoglossa (Schlundsackschnecken) gehören nicht zu den übrigen Hinterkiemerschnecken (Opisthobranchia), sondern sind mit den Lungenschnecken (Pulmonata) verwandt. Die posteriore Lage oder Reduktion der Kiemen und die Tendenz der Reduktion des Schneckengehäuses sind mehrfach unabhängig evolviert [8]. Das Taxon Opisthobranchia wird daher nicht mehr anerkannt.
- Die Insekten gelten nicht mehr als evolutive Linie, die sich getrennt von den Krebsen entwickelt hat. Sie gehen vielmehr aus Krebsen hervor, die sehr spezialisierte Mandibeln und Maxillen sowie paarige Extremitäten an allen Körperringen haben. Die Unterscheidung Krebse versus Insekten ist daher falsch; Insekten sind landlebende Krebse [9]. Unklar ist noch die Stellung der Tausendfüßer (Myriapoda, siehe unten).

ABB. 3 | SYSTEMATISCHER FEHLER BEI SEQUENZREKONSTRUKTION

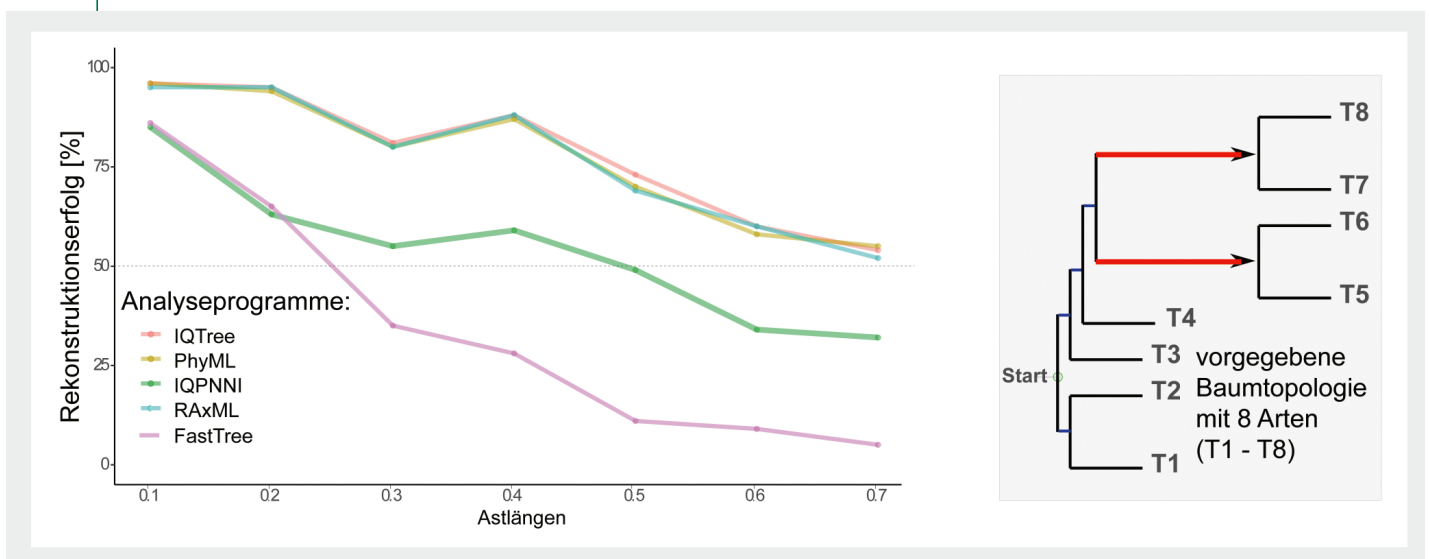


Beispiel einer Sequenzevolution, deren Rekonstruktion zu Fehlern führen kann. Das phylogenetische Signal für die korrekte Gruppierung (2, 3, 4) ist das rot eingerahmte G. Da auf dem langen Ast (rot) viele Substitutionen stattfinden, ist dieses G in den Arten 3 und 4 nicht mehr erhalten. Unterstützt wird dagegen die falsche Gruppierung (1, 2) durch Plesiomorphien (blau eingerahmt), die bei (3, 4) nicht mehr vorhanden sind. Die Gruppierung (1, 2) ist nicht monophyletisch, da nicht alle Nachkommen des letzten gemeinsamen Vorfahren (zu denen auch 3 und 4 gehören) in der Gruppe enthalten sind.

Nicht alle neuen Hypothesen sind plausibel

Viele Zeitgenossen sind von den technischen Fortschritten so fasziniert, dass neue, auf genomischen Daten basierende phylogenetische Hypothesen unkritisch als neue Paradigmen akzeptiert werden. Angesichts der Fehlerquellen, die auftreten können, muss jedoch grundsätzlich die Plausibilität neuer Hypothesen diskutiert werden. Plausibilität bedeutet, dass bekannte Fakten aus der Fossilgeschichte, der vergleichenden Anatomie und Entwicklungsbiologie die Evolution einer Organismengruppe im Lichte eines vorgeschlagenen Stammbaums erklären. Nicht plau-

ABB. 4 | REKONSTRUKTIONSERFOLG PHYLOGENETISCHER ANALYSEPROGRAMME



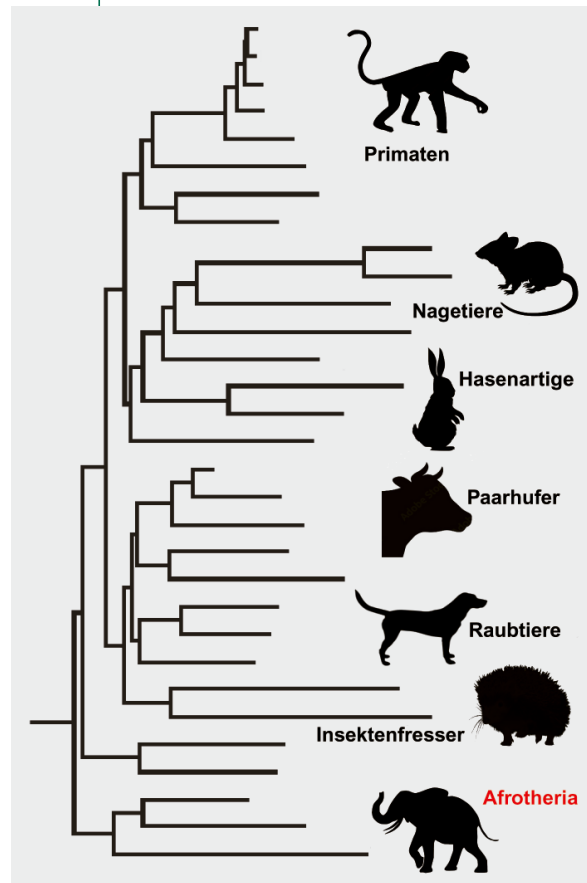
Verwendet wurden die Analyseprogramme IQTree, PhyML, IQPNNI, RAxML und FastTree bei vorgegebenem Stammbaum mit acht Arten (T1-T8, rechts). Im Experiment wurde je Datensatz die Länge von zwei Ästen (Pfeile in der Baumtopologie) verändert. Für jeden Astverlängerungsschritt wurden 100 Datensätze mit einer Sequenzlänge von 5.000 Nukleotiden simuliert. Den Algorithmen wurde das korrekte Substitutionsmodell vorgegeben. Dennoch sinkt der Rekonstruktionserfolg stetig mit zunehmenden Astlängen, wobei die Rekonstruktionsmethoden unterschiedlich fehleranfällig sind. Es können inkorrekte Ergebnisse entstehen, wenn eine Topologie neben kurzen Ästen einige besonders lange aufweist.

sibel ist zum Beispiel, dass dieselben komplexen, im Detail der Konstruktion und Ontogenese übereinstimmenden Organe zweimal parallel entstanden sein sollen. Analog ist es unwahrscheinlich, dass zwei Komponisten unabhängig voneinander die „Kleine Nachtmusik“ erfinden (das Plagiat ist sofort erkennbar). Grund für Skepsis sind aber auch die Widersprüche zwischen verschiedenen molekularen Phylogenien. So gibt es Ergebnisse, die die Rippenquallen (Ctenophora) als frühesten Seitenzweig der Tiere ausweisen, während andere (und auch morphologische Indizien) die Schwämme (Porifera) in dieser Position sehen. Bärtierchen (Tardigrada) gruppieren mal mit Fadenwürmern (Nematoda), mal mit Gliederfüßern (Arthropoda).

Sehr prägend war für die letzten Jahre die Ecdysozoa-Hypothese, die in allen bisherigen molekularen Analysen bestätigt wurde. Demnach sind die Gliedertiere (Arthropoda) nicht mit Anneliden verwandt, wie u. a. die gemeinsamen Merkmale der Embryonalentwicklung und der Anatomie (z. B. metamere Körpergliederung, komplexes Gehirn mit Pilzkörpern, ventrales Strickleiternnervensystem, paarige Extremitäten, dorsales Röhrenherz etc.) sowie der Fund fossiler Übergangsformen (sog. Lobopoda) nahelegen, sondern sie erscheinen als nahe Verwandte der Fadenwürmer. Es gibt bisher keine Erklärung für die dann konvergent anzunehmenden, zahlreichen Übereinstimmungen zwischen Anneliden und Arthropoden. Die Fadenwürmer sind viel einfacher organisiert. Sie haben kein richtiges Gehirn, kein Strickleiternnervensystem, kein Herz oder Blutgefäße, keine sekundäre Leibeshöhle (Cölon), keine Körpersegmente. In der Literatur gibt es kein evolutionäres Szenario, das erklärt, wie eine derart einfache Organisation sich ohne Übergänge in Spinnen, Krebse und Insekten hat wandeln können. Das wäre die Erfindung eines modernen Rennwagens auf der Grundlage der Technologie eines Eselkarrens. Hier liegt vermutlich ein systematischer Fehler der molekularen Analysen vor, der noch nicht entdeckt wurde. Ein weiteres Beispiel ist die Herkunft der Tausendfüßer (Myriapoda). Anatomisch und morphologisch haben sie sehr viele Übereinstimmungen mit Insekten, weshalb sie bisher als Tracheata zusammengefasst wurden [12]. Molekular konnte die Verwandtschaft der Tracheata bisher nicht nachgewiesen werden, vielmehr knüpfen die Tausendfüßer in den Stammbäumen je nach Analyse an die Chelicerata (Myriochelata-Hypothese) oder die niederen Krebsen (Variante der Mandibulata-Hypothese) an.

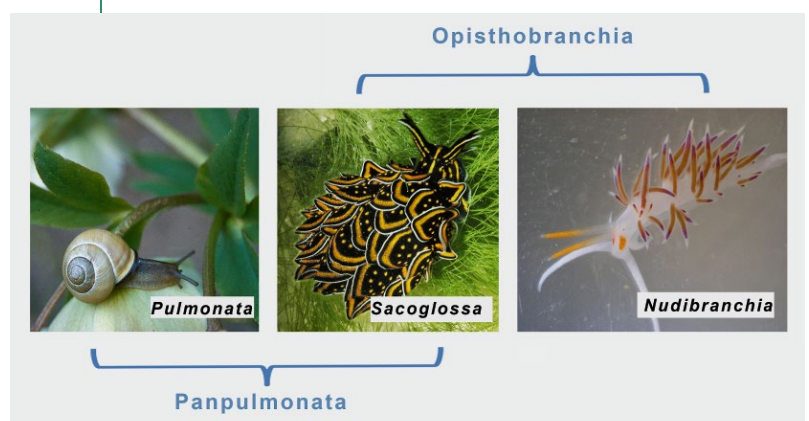
Unzureichende Kenntnisse der Literatur zu Anatomie und Morphologie begünstigen die Akzeptanz wenig plausibler Hypothesen. Für die Wissenschaft ist es von Nachteil, dass die Lehre in diesem Bereich sehr zurückgenommen wurde. Eine weitere Quelle unzureichender Kenntnisse und damit Unsicherheit mit Blick auf eine genaue phylogenetische Zuordnung von Lebewesen ist die hohe Anzahl kurzlebiger Publikationen – geschuldet dem Verlangen nach hohen Zitationszahlen und langen Publikationslisten auf Kosten der Sorgfalt.

ABB. 5 | VEREINFACHTER STAMMBAUM DER PLAZENTATIERE



Die Afrotheria sind ein von den übrigen Placentalia getrennter Seitenast. Details weichen bei Analysen anderer Autoren ab. Abb. nach [10].

ABB. 6 | AKTUALISIERTE KLASSIFIKATION DER MARINEN NACKTSCHNECKEN



Die Schnecken ohne Gehäuse können nicht mehr als Opisthobranchia zusammengefasst werden, da die Sacoglossa näher mit den Pulmonata verwandt sind. Dafür wurde das Taxon Panpulmonata geschaffen.

Zusammenfassung

Die Erforschung der Stammesgeschichte der Organismen hat mit der Entwicklung der Molekulargenetik große Fortschritte gemacht. Wesentlich waren die Entwicklung der Sequenzieretechniken für genomische DNA und effiziente

GLOSSAR

Apomorphie: Homologie, die beim letzten gemeinsamen Vorfahren erstmalig auftrat und Indiz für ein Schwestergruppenverhältnis ist.

Astlänge: Grafische Darstellung der Existenzdauer einer Abstammungslinie in einem Stammbaum oder der Anzahl der auf dieser Linie aufgetretenen Substitutionen.

Homologiewahrscheinlichkeit: Wahrscheinlichkeit, dass eine Übereinstimmung von einem gemeinsamen Vorfahren stammt und nicht eine Konvergenz ist.

Konvergenz: Übereinstimmung (hier in DNA-Sequenzen), die zufällig oder durch parallele Evolution entstanden ist.

Orogenese: Gebirgsbildung (z. B. Auffaltung der Anden).

Plesiomorphie: Ältere Homologie, die nicht nur bei Nachkommen des letzten gemeinsamen Vorfahren nachweisbar ist, sondern auch bei anderen Arten.

Phylogenetisches Signal: Nachweisbare genetische Veränderungen aus der Stammlinie rezenter Arten.

Substitution: Eine Mutation, die bei allen Individuen einer Population oder einer Art vorkommt.

Substitutionsmodell: Beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass bestimmte Substitutionen in Abhängigkeit von der Zeit entlang eines Stammbaumes auftreten.

Substitutionsrate: Häufigkeit, mit der Substitutionen entlang des Astes eines Stammbaumes pro Zeiteinheit auftreten.

heuristische Verfahren für die Datenanalyse. Die traditionelle Klassifikation der Tiere konnte mehrfach revidiert werden, es bleiben jedoch ungeklärte Fragen. Ergebnisse widersprechen sich oft, besonders wenn Ereignisse aus der Frühzeit der Evolution der Vielzeller rekonstruiert werden. In anderen Fällen lassen sich aus DNA-Daten errechnete Stammbäume nicht mit anatomischen Daten in Einklang bringen. Systematische Fehler der Algorithmen sowie die Verfügbarkeit von einem phylogenetischen Signal in den Daten müssen weiter erforscht werden.

Summary

Molecular phylogenetics: In spite of impressive advances, there remains a need for research on biological and methodical questions

With the recent development of molecular genetics, research on the phylogeny of organisms has made great progress. In particular, the development of new DNA sequencing techniques and efficient heuristic methods for data analysis have been important. Repeatedly, the traditional classification of animals could be revised; however, there remain unanswered questions. The results are often contradictory, especially when events from the early days of the evolution of multicellular organisms are reconstructed. In other cases, phylogenetic trees obtained from DNA data do not match the anatomical data. Systematic errors of algorithms as well as the availability of a phylogenetic signal in the data need further investigation.

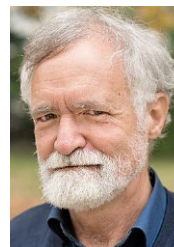
Schlagworte:

Molekulare Phylogenetik, Klassifikation der Tiere, Fehlerquellen, Ecdysozoa, Afrotheria, Tracheata, Opisthobranchia

Literatur

- [1] M. P. Nesnidal et al. (2010). Compositional heterogeneity and phylogenomic inference of metazoan relationships. *Mol. Biol. Evol.* 27, 2095–2104.
- [2] J. Felsenstein (2004). *Inferring phylogenies*. Sinauer Associates, Sunderland.
- [3] K. S. Strimmer (1997). *Maximum Likelihood Methods in Molecular Phylogenetics*. Herbert Utz Verlag, München.
- [4] A. von Haeseler (1999). Maximum likelihood tree reconstruction. *Zool.* 102, 101–110.
- [5] B. Misof et al. (2014). Phylogenomics resolves the timing and pattern of insect evolution. *Science* 346 (6210), 763.
- [6] P. Kück et al. (2015). Plesiomorphic character states cause systematic errors in molecular phylogenetic analyses: a simulation study. *Cladistics*, <https://doi.org/10.1111/cla.12132>
- [7] T. H. Struck et al. (2007). Annelid phylogeny and the status of Sipuncula and Echiura. *BMC Evol. Biol.* 7, 57.
- [8] H. Wägele et al. (2014). Flashback and foreshadowing – a review of the taxon Opisthobranchia. *Org. Div. Evol.* 14, 133–149.
- [9] J. C. Regier et al. (2005). Pancrustacean phylogeny: hexapods are terrestrial crustaceans and maxillopods are not monophyletic. *Proc. R. Soc. B.* 272, 395–401.
- [10] B. M. Hallstrom et al. (2010). Mammalian evolution may not be strictly bifurcating. *Mol. Biol. Evol.* 27, 2804–2816.
- [11] M. J. Stanhope et al. (1998). Molecular evidence for multiple origins of Insectivora and for a new order of endemic African insectivore mammals. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 95, 9967–9972.
- [12] J. W. Wägele et al. (2014). *Arthropod phylogeny and the origin of Tracheata (= Atelocerata) from Remipedia-like ancestors*, in: *Deep Metazoan Phylogeny: The Backbone of the Tree of Life* (Hsg. J. W. Wägele, T. Bartolomaeus), de Gruyter, Berlin, 285–341.

Verfasst von:



J. Wolfgang Wägele promovierte im Fach Zoologie an der Universität Kiel und arbeitete danach an den Universitäten Oldenburg, Bielefeld und Bochum, ab 2004 als Direktor des heutigen Leibniz-Institut zur Analyse des Biodiversitätswandels (Museum Koenig) in Bonn, wo u. a. das Zentrum für Molekulare Biodiversitätsforschung aufgebaut wurde. Heute ist er pensioniert und forscht zur Taxonomie und Evolution von Crustaceen.



Patrick Kück promovierte im Fach Zoologie an der Friedrich-Wilhelms-Universität und dem Leibniz-Institut zur Analyse des Biodiversitätswandels (LIB) in Bonn. Er arbeitete anschließend als Postdoc zuerst am LIB und danach als Marie-Curie-Stipendiat am Natural History Museum in London, wo er unter anderem neue Methoden zur Erfassung und Verbesserung phylogenetischer Daten entwickelte. Seit 2018 ist er als sektionsleitender Wissenschaftler und Bioinformatiker am LIB tätig.



Lars Podsiadlowski promovierte und habilitierte im Fach Zoologie an der Freien Universität Berlin. Danach arbeitete er an der Universität Bonn und ist seit 2017 wissenschaftlicher Laborleiter am Leibniz-Institut zur Analyse des Biodiversitätswandels (Museum Koenig) in Bonn. Sein Forschungsschwerpunkt ist vergleichende und evolutionäre Genomik bei Arthropoden.

Korrespondenz

Prof. Dr. J. Wolfgang Wägele
Leibniz-Institut zur Analyse des Biodiversitätswandels
Adenauerallee 160, 53113 Bonn
E-Mail: w.waegle@leibniz-lib.de

Ameisenpflanzen – Überleben durch Teamwork

Pflanzen mit Bodyguards

ANDREA T. MÜLLER | AXEL MITHÖFER

Myrmekophytische Pflanzen bieten den mit ihnen vergesellschafteten Ameisen Wohnraum und/oder Nahrung. Im Gegenzug schützen die Ameisen ihre Wirte effizient vor Angreifern. Ob sich die Pflanzen in dieser Symbiose völlig auf den Schutz durch die Ameisen verlassen und ihre Verteidigungsmechanismen verloren haben oder sich noch selber verteidigen können, ist Gegenstand laufender Studien.

Pflanzen können als ortsgebundene Organismen ihren Feinden nicht ausweichen. Um sich dennoch gegen Angriffe durch pathogene Mikroben oder Fraßfeinde zu verteidigen, haben sie im Laufe ihrer Evolution eine Reihe sehr erfolgreicher, zum Teil subtiler Abwehrmechanismen entwickelt. Diese reichen von rein physikalischen Barrieren wie Dornen, Stacheln oder Haaren bis zur chemischen Verteidigung. Pflanzen können durchgehend (*konstitutiv*) oder bei Bedarf (*induzierbar*) zahllose (>200.000) chemische Verbindungen produzieren, die unmittelbar gegen die angreifenden ► Herbivoren (hauptsächlich pflanzenfressende Arthropoden wie Insekten und Milben) gerichtet sind. Bei dieser direkten Verteidigung nutzt die

Pflanze sogenannte sekundäre oder spezialisierte Verbindungen aus unterschiedlichsten chemischen Klassen, unter anderem Alkaloide, Terpene, Phenylpropanoide, Peptide und Proteine. Solche spezialisierten Verbindungen sind für die Insekten oft toxisch, verdauungshemmend, entwicklungshemmend oder wirken abschreckend. Besonders raffiniert sind jedoch indirekte Verteidigungsstrategien. Die indirekte Verteidigung schützt die Pflanze, indem sie andere Organismen als Verteidiger anlockt. Dazu synthetisieren die befallenen Pflanzen unter anderem flüchtige Verbindungen (VOCs, *volatile organic compounds*) die sie an die Umgebung abgeben. Diese Duftstoffe locken spezifisch räuberische oder parasitische Feinde der Herbivoren an, die gezielt zu der befallenen Pflanze kommen und die dort fressenden Organismen dezimieren [1, 2]. Neben flüchtigen Stoffen, die von den Pflanzen als „Hilferuf“ ausgestoßen werden, produzieren manche Pflanzen bei Fraßschäden auch extrafloralen Nektar (EFN). Dies lockt Ameisen zu den Pflanzen, die sich nicht nur vom EFN ernähren, sondern auch die Herbivoren attackieren, denen sie begegnen [3, 4].

Ameisenpflanzen: Working for Bed & Breakfast

Sehr häufig arbeiten Pflanzen mit Ameisen zusammen, um ihre Angreifer zu bekämpfen. Während viele Pflanzen nur bei Bedarf nach zusätzlicher Hilfe gegen Aggressoren

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 82 erklärt.



ABB. 1 *Bed and Breakfast*: Myrmekophytische Pflanzen bieten Ameisen ein geschütztes Nest: hohle Strukturen, auch Domatien genannt, zum Beispiel am Blattstiel von *Hirtella physophora* (a) oder im Stamm von *Duroia hirsuta* (b). Außerdem produzieren viele Ameisenpflanzen, wie etwa *Vachellia chiapensis* (c) und *V. collinsii* (d), Nahrung für ihre Bewohner: entweder extrafloralen Nektar (c, gelbe Pfeile) und/oder Futterkörper (c, d, weiße Pfeile). Fotos: a) und b) Dr. Pierre-Jean Malé, c) und d) A. T. Müller.

suchen (fakultative Interaktion), leben andere dauerhaft mit den Ameisen zusammen. Solche Pflanzen werden als ► Myrmekophyten oder Ameisenpflanzen bezeichnet. Darunter finden sich Arten der Gattungen *Acacia*, *Cecropia*,

Duroia, *Piper*, *Tococa* und *Macaranga*. Im Gegensatz zu Pflanzen, die nur gelegentlich mit Ameisen interagieren, bieten Myrmekophyten den Ameisen auch Behausungen. Dabei handelt es sich um spezielle hohle Strukturen (hohle Dornen, Stängel, Blattaschen und Knollen – sogenannte ► Domatien), um Ameisen dauerhaft aufzunehmen und ihnen geschützte Nistplätze zu bieten (Abbildung 1a, b). Viele Ameisenpflanzen bieten den Ameisen darüber hinaus eine permanente Nahrungsquelle, entweder EFN wie viele *Acacia*-Arten oder Futterkörper (FB) wie *Cecropia*- oder *Macaranga*-Arten [3, 5] (Abbildung 1c, d). Manchmal erfolgt die Nährstoffversorgung auch indirekt: Ameisen pflegen oft Phloem-saugende Schildläuse und ernähren sich von dem Honigtau, den diese ausscheiden. Myrmekophyten haben sich wiederholt entwickelt, so dass bis heute mehr als 600 Arten von Gefäßpflanzen aus 50 Pflanzenfamilien beschrieben wurden, die in den tropischen Zonen der Welt vorkommen [6]. In ähnlicher Weise haben sich die sogenannten Pflanzenameisen an das Nisten in Pflanzen angepasst, wobei bisher Arten aus über 40 Gattungen aus fünf verschiedenen Unterfamilien der Formicidae identifiziert wurden [7].

IN KÜRZE

- Die in den Tropen vorkommenden **Ameisenpflanzen leben in mutualistischen Symbiosen mit Ameisen** zusammen. Die Pflanzen liefern Nistplätze und Nahrung, die Ameisen dafür einen sehr effizienten Schutz gegen (Fraß-)feinde.
- Ameisenfreie Myrmekophyten werden schnell von Herbivoren attackiert und haben kaum eine Überlebenschance. Dies führte zu der Hypothese, dass Ameisenpflanzen keine eigene Verteidigung mehr haben und **einzig auf die Ameisen angewiesen sind**.
- Feldstudien haben diese These widerlegt und gezeigt, dass zumindest in der Ameisenpflanze *Tococa quadrialata* typische **pflanzliche, Jasmonat-vermittelte Verteidigungsmechanismen** wie Duftstoffe und abwehrrelevante Gene oder Metaboliten durch Herbivorenfraß induziert werden.
- Ameisenpflanzen können zusätzlich noch **von durch die Ameisen eingetragenen Stickstoffverbindungen profitieren**, die in ihren Stoffwechsel eingebaut werden. Dies verbessert generell die Fitness von besiedelten im Vergleich zu unbesiedelten Ameisenpflanzen.



ABB. 2 Ameisen als induzierbare Verteidigung: *Azteca* cf. *tonduzi*-Ameisen machen kurzen Prozess mit allen Tieren, die sich auf ein *Tococa quadrialata*-Blatt verirren wie hier ein Regenwurm. Binnen Minuten finden sich immer mehr Ameisen auf dem Blatt ein, um den Wurm aufzufressen. Foto: Dr. Karsten Zunk.

Während die Vorteile für die Pflanzenameisen (Nahrung und Unterschlupf) bei all diesen Interaktionen recht einheitlich sind, können die Vorteile für myrmekophytische Pflanzen je nach geografischem Standort, Jahreszeit, kolonisierender Ameisenart und Pflanzenart variieren. Dennoch bietet die Ameisenkolonisation im Allgemeinen Schutz für ihren Wirt. Dabei kann es sich um die Verringerung der Belastung durch Krankheitserreger [8], die Beseitigung konkurrierender Pflanzen [9] oder vor allem um die Abwehr von Fraßfeinden – Säugetiere wie Insekten – handeln, darunter Elefanten, Giraffen und Antilopen sowie Käfer, Raupen und Blattschneiderameisen. Da dieser Austausch – Ressourcen gegen Schutz – für beide Partner von Vorteil ist, wird diese Symbiose als ► Mutualismus bezeichnet. Darüber hinaus können Ameisen weitere Fitnessvorteile wie zusätzliche Nährstoffe bieten. Diese durch Ameisen vermittelte Versorgung der Pflanze wird als Myrmekotrophie bezeichnet. Dies ist allerdings vor allem für Aufsitzerpflanzen bekannt, bei denen Schutz vor Fraßfeinden eine untergeordnete Rolle spielt.

Verteidigungsstrategien von Ameisenpflanzen

Die Verteidigung von Myrmekophyten wurde in den letzten Jahrzehnten eingehend untersucht, wobei der Schwerpunkt auf Kosten und Nutzen im Zusammenhang mit Ameisen lag. Seit dem ersten Bericht von D. H. Janzen im Jahr 1966 [10] wurde mehrfach für verschiedene Ameisenpflanzenarten gezeigt, dass unbesiedelte Myrmekophyten enorm unter Herbivorie leiden [10, 11]. Dies bedeutet, dass die indirekte Verteidigung durch die Ameisen die wichtigste Strategie der Myrmekophyten ist. In Übereinstimmung mit dieser Hypothese stellte Janzen [10] das Fehlen von Bitterstoffen (hier cyanogene Glykoside) in Ameisen-Akazien im Vergleich zu nicht-myrmekophyti-

schen Akazien fest und stellte daher die These auf, dass Myrmekophyten nicht länger in direkte Abwehrmechanismen wie die Bildung spezialisierter Verbindungen investieren, da der Ameisen-vermittelte Schutz schon sehr effizient ist. Dieser Hypothese liegt die Annahme zugrunde, dass alle Verteidigungsmaßnahmen für die Pflanze kostspielig sind und daher eine räumliche und zeitliche Überschneidung der Verteidigungsstrategien vermieden werden sollte.

Viele Studien haben seither versucht, den vermuteten Kompromiss zwischen indirekter Abwehr durch Ameisen und direkter pflanzeigener physikalischer oder chemischer Abwehr zu bestätigen – mit unterschiedlichen Ergebnissen. So wurde beispielsweise in unbesiedeltem *Piper cenocladum* ein höherer Gehalt an Amiden gefunden, eine geringere Chitinaseaktivität in myrmekophytischen *Macaranga*- und *Acacia*-Arten sowie eine höhere Blattzähigkeit und Dichte an Pflanzenhaaren (Trichomen) in ameisenfreien *Tococa guianensis*-Pflanzen [12, 13]. Andererseits konnte beim Vergleich mehrerer myrmekophytischer und nicht-myrmekophytischer *Piper*-, *Macaranga*- oder *Acacia*-Arten keine negative Korrelation zwischen Ameisenbesiedlung und chemischer Abwehr festgestellt werden [14]. Die Frage, ob es einen Kompromiss gibt oder nicht, ist also immer noch umstritten.

Ameisenpflanzen und Herbivorie

Interessanterweise wurde die Herbivorie als Einflussparameter in den meisten Studien nicht berücksichtigt. Dementsprechend gibt es nicht viele Informationen über die Regulierung und Induktion von Abwehr in Ameisenpflanzen als Reaktion auf Fraßfeinde oder die Anwesenheit oder Abwesenheit von Ameisen. Erste Studien von M. Heil und Mitarbeitern zur Regulierung der indirekten Verteidi-

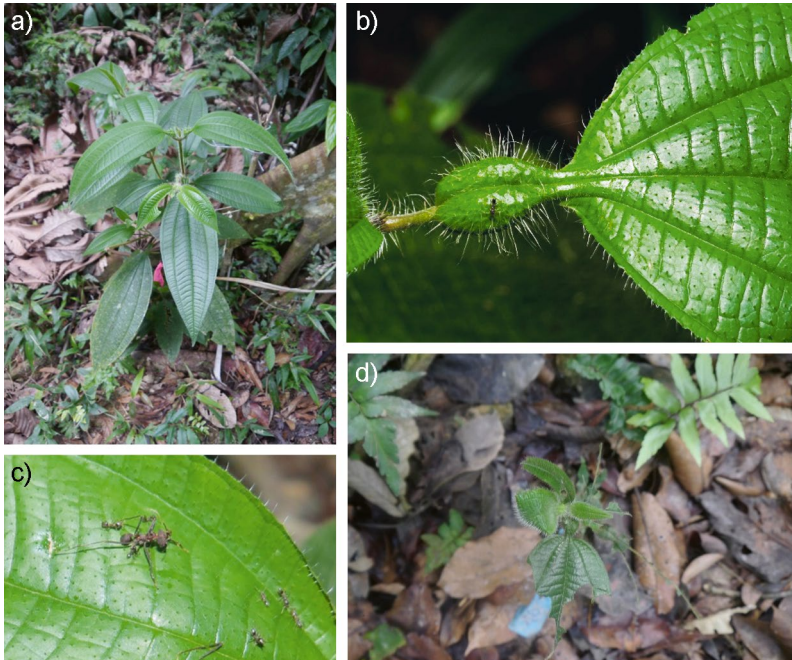


ABB. 3 Die myrmekophytische Pflanze *Tococa quadrialata*. a) *Tococa*-Pflanzen sind kleine Büsche, die oft in Gruppen an lichten Stellen im Regenwald wachsen. b) Sie bilden Blattdomatien, in welchen sie verschiedene Ameisenspezies wie z. B. *Azteca cf. tonduzi* beherbergen können. c) Ameisen gegen Ameisen: Blattschneiderameisen gehören zu den größten Gefahren für die Pflanzen, gegen die *Azteca*-Ameisen ihre Pflanze verteidigen müssen. d) Ohne Ameisen haben die Pflanzen kaum eine Überlebenschance, da sie durch Herbivoren ständig ihre Blätter verlieren. Im Vergleich zu mit Ameisen besiedelten Pflanzen bleiben sie winzig klein. Fotos: A. T. Müller.



ABB. 4 Ein Teufelsgarten (*devil's garden*). Dieser „Teufelsgarten“ besteht aus myrmekophytischen *Duroia*-Pflanzen und ihren Beschützern, *Myrmelachista*-Ameisen, und wurde in der Region Loreto im Nordosten von Peru gefunden. Foto: Dr. Pierre-Jean Malé.

gung von Myrmekophyten zeigten, dass die Nachahmung der Herbivorie durch Besprühen mit ► Jasmonaten, der für die induzierte Abwehr von Herbivoren wichtigsten Gruppe an Phytohormonen [3, 4], die EFN-Produktion in

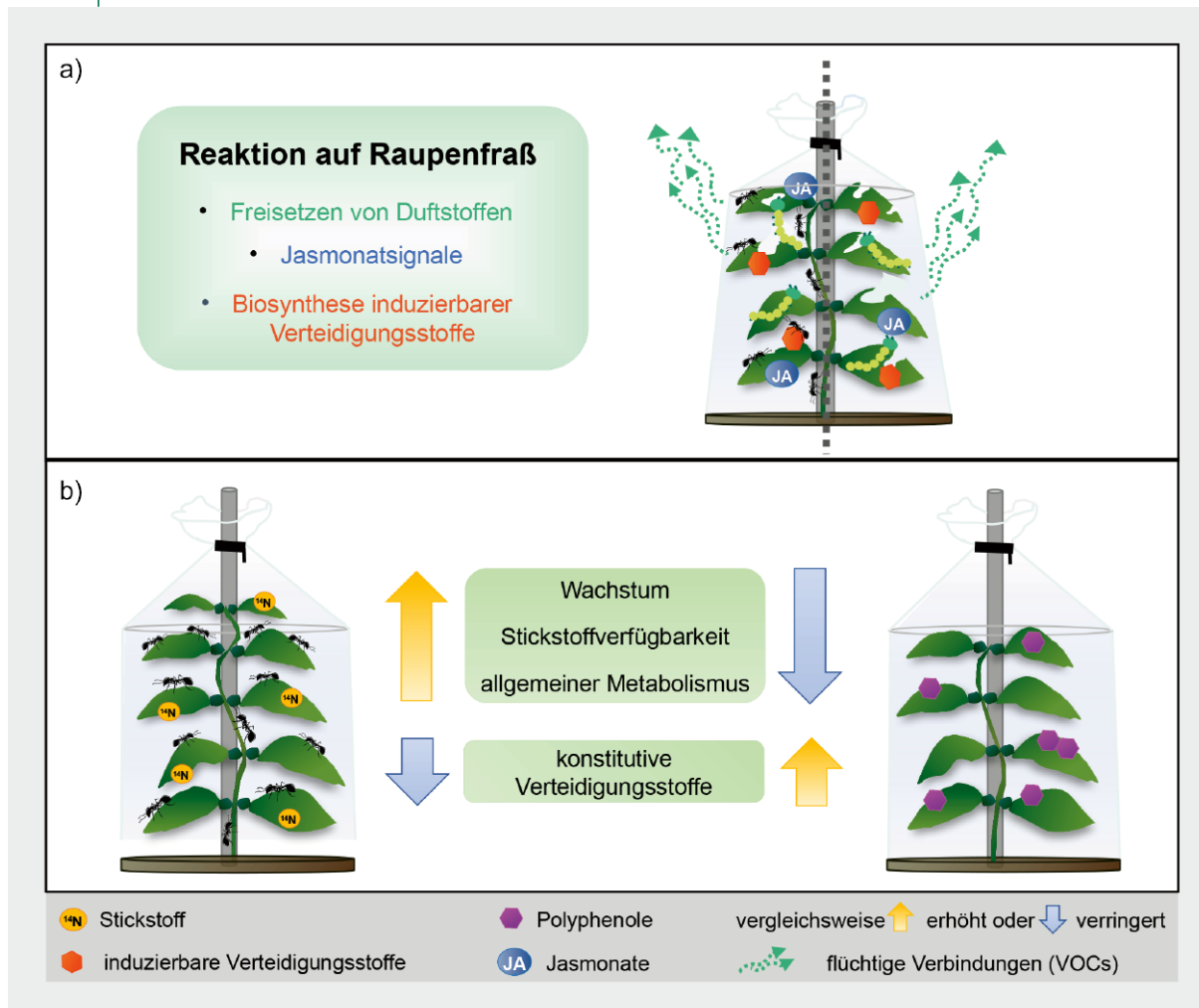
myrmekophytischen Akazien nicht steigern konnte, während die EFN-Produktion in nicht-myrmekophytischen Akazien zunahm [15]. In die gleiche Richtung geht eine Studie, die zeigte, dass von Ameisen besiedelte Akazien im Gegensatz zu nicht-myrmekophytischen Akazien weder Jasmonat-Signale und die daraus resultierende EFN-Induktion an entfernte Blätter weitergeben, noch VOCs als Signale für Pflanzen aussenden [16]. Diese Daten deuten darauf hin, dass Ameisenpflanzen möglicherweise eine reduzierte induzierbare Pflanzenabwehr oder/und eine gestörte Signalübertragung durch Jasmonate aufweisen.

Andererseits werden auch die Ameisen selbst als induzierbarer biotischer Schutz von Myrmekophyten betrachtet. Mutualistische Ameisen patrouillieren in der Regel kontinuierlich auf den Blättern, doch beim Auftreten von Pflanzenfressern oder Pflanzenschäden vervielfacht sich die Zahl der Ameisen am Ort der Gefahr rasch – in der Regel innerhalb von 10 Minuten (Abbildung 2). Dies führt letztlich dazu, dass die Bedrohung schnell beseitigt wird. H. L. Vasconcelos [17] beobachtete beispielsweise, dass alle lebenden Termiten und 92,5 Prozent der Hemipteren-(Schnabelkerfen-)eier, die auf *Maieta guianensis*-Pflanzen platziert wurden, von Ameisen der Art *Pheidole minutula* gefunden und angegriffen wurden, bis sie entweder von der Pflanze sprangen oder an Ameisenlarven verfüttert wurden. In ähnlicher Weise agierten Ameisen der Art *Crematogaster borneensis*, die 96,6 Prozent der Versuchsraupen innerhalb einer Stunde entweder vom Blatt trieben oder töteten [18].

Da die Geschwindigkeit und Effizienz der Ameisen beim Auffinden und Beseitigen von Herbivoren so hoch sind, ist es für myrmekophytische Pflanzen möglicherweise gar nicht notwendig, auf einen entsprechenden Angriff mittels Aktivierung der Jasmonat-Signalkaskade und nachgeschalteten chemischen Abwehrmaßnahmen zu reagieren. Die Frage, die sich logischerweise stellt, ist: Verlassen sich Myrmekophyten gänzlich auf ihre Ameisen-Bodyguards oder existiert ein Plan B, das heißt, gibt es Verteidigungsmechanismen als „schlafende Reserve“, wenn keine Ameisenverteidiger zur Verfügung stehen?

Tococa, eine myrmekophytische Modell-Pflanze

Unseres Wissens nach wurden bisher abgesehen von den eben erwähnten Jasmonat-Experimenten [3, 4, 15, 16] keine Studien über die Regulierung der Abwehrkräfte auf molekularer Ebene bei Ameisenpflanzen durchgeführt. Daher war bislang nur wenig über induzierte VOCs, die chemische Verteidigung oder über die Rolle von induzierten Phytohormonen – insbesondere Jasmonate – bei der Reaktion von Myrmekophyten auf Herbivorie bekannt. In einer mehrjährigen Studie im Tambopata Nationalpark in Peru wurden diese Fragen an Pflanzen der Art *Tococa quadrialata* untersucht (Abbildung 3) [19]. *Tococa* ist eine Gattung von schnell wachsenden Sträuchern und

ABB. 5 | DIE WECHSELBEZIEHUNG ZWISCHEN *T. QUADRIALATA* UND *AZTECA CF. TONDUZI*

Die Abbildung fasst die Forschungsergebnisse an *Tococa quadrialata* zusammen. In einer kürzlich veröffentlichten Studie [19] wurde der Stoffwechsel von *T. quadrialata*-Pflanzen mittels Transkriptom- und Metabolomanalysen untersucht. Um die Auswirkungen der Besiedlung durch *Azteca cf. tonduzi*-Ameisen auf den Stoffwechsel und das Wachstum zu studieren, wurden junge *T. quadrialata*-Pflanzen in zwei Gruppen geteilt: von Ameisen besiedelte und ameisenfreie Pflanzen. In letzterer Gruppe wurden die Ameisen durch mehrfaches Spülen der Domatien mit Wasser von den Pflanzen entfernt. Anschließend wurden Netze um die Pflanzen angebracht, um eine Wiederbesiedlung und unkontrollierten Fraßschaden zu verhindern. Um gleiche Lichtbedingungen zu erreichen, wurden auch die von Ameisen besiedelten Pflanzen mit Netzen bedeckt, wobei diese zum Boden hin offen gehalten wurden (siehe b). a) Es wurden kontrollierte Fraßexperimente durchgeführt und die Reaktion von ameisenfreien und von mit Ameisen besiedelten Pflanzen auf Blattschäden auf Transkriptions- und Metabolitenebene studiert. Die Ergebnisse der Untersuchung sind graphisch vereinfacht dargestellt. b) Die physiologischen Unterschiede zwischen *T. quadrialata*-Pflanzen mit und ohne Ameisen sind schematisch dargestellt.

kleinen Bäumen aus der Familie der Melastomataceae. Sie ist in der gesamten Neotropis verbreitet und dafür bekannt, dass die meisten Arten (Blatt-)domatien produzieren und mit mutualistischen Ameisen zusammenleben [11]. Je nach Standort werden verschiedene Gattungen (*Azteca*, *Allomerus*, *Crematogaster*, *Pheidole*, *Myrmelachista*) gefunden, deren Arten die *Tococa*-Pflanzen besiedeln und effizient gegen Herbivoren verteidigen [11, 19]. In Verbindung mit *Myrmelachista*-Ameisen können *Tococa*-Pflanzen in Monokulturen im Regenwald wachsen – ein Phänomen, das als „Teufelsgarten“ bezeichnet wird

(Abbildung 4) [20, 21]. Die Ameisen greifen jede Nicht-Wirtspflanze an und injizieren Ameisensäure in die Schösslinge, was zu Blattnekrosen führt. Auf diese Weise entstehen große Flächen mit einer oder zwei Arten von Ameisenpflanzen (*Tococa*, *Clidemia* und/oder *Duroia*), die von einer einzigen *Myrmelachista*-Kolonie in dem ansonsten artenreichen Wald besiedelt werden [21]. Diese Interaktion ist auf *Myrmelachista*-Ameisen beschränkt und wurde bei anderen Ameisengattungen nicht beobachtet. Während die Rolle der Ameisen bei der Abwehr von *Tococa* gegen Pflanzenfresser von verschiedenen Forscher-

GLOSSAR

Domatien: Oftmals hohle Pflanzenteile, die symbiotischen Insekten Wohnraum und/oder Nistplätze bieten. Im Fall von *Tococa quadrialata* ist dies ein vergrößerter Blattstiel.

(Ellagi)tannine: Gruppe bioaktiver sekundärer Pflanzenstoffe; unter anderem in einigen Nüssen und Samen zu finden. Sie gehören zur Klasse der hydrolysierbaren Tannine innerhalb der Polyphenole.

Herbivoren: Pflanzenfresser, d. h. Tiere (z. B. Arthropoden wie Insekten aber auch Säugetiere), die sich ausschließlich von Pflanzen ernähren.

Jasmonate: Klasse von Fettsäure-abgeleiteten Phytohormonen. Jasmonate sind in der Regulation von pflanzlichen Abwehrreaktionen auf (a)biotischen Stress involviert, zum Beispiel bei Verwundung oder gegen Herbivore.

Mutualismus: Form einer Symbiose (Wechselbeziehung) zwischen zwei artfremden Organismen zu beiderseitigem Vorteil.

Myrmekophyten: Ameisenpflanzen; Pflanzen, die eine Symbiose mit Ameisen eingehen.

Myrmekotrophie: Wechselbeziehung zwischen Ameisen und Pflanzen, bei der die Pflanze den Ameisen Nistraum bietet und die Ameisen der Pflanze Nährstoffe zur Verfügung stellen.

Neotropis: Tropen in Nord-, Mittel- und Südamerika

gruppen bereits untersucht wurde, wurde den pflanzlichen Abwehrmechanismen und den spezialisierten Stoffwechselprodukten von *Tococa* im Allgemeinen sehr wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Allein hohe Mengen an hydrolysierbaren Tanninen (2,6 % des Trockengewichts und typisch für Melastomataceae) waren bekannt; mögliche chemische Pflanzenabwehrstoffe, ihre Biosynthese, Regulierung und Wirkungsweise allerdings noch nicht.

Mit einer Kombination aus molekularbiologischen und chemisch-analytischen Methoden konnte jetzt gezeigt werden, dass *Tococa*-Pflanzen sich nicht vollständig auf den von ihren Ameisensymbionten bereitgestellten Schutz verlassen. Im Falle von Herbivorenbefall können sie eine eigene Verteidigung aktivieren. Durch eine Kombination aus Transkriptomsequenzierung (RNA-Seq), Duftstoffsammlung und (un-)gerichteter Analyse der Blattmetaboliten mittels Massenspektrometrie konnten in *T. quadrialata* induzierbare, Jasmonat-vermittelte Abwehrreaktionen, einschließlich der Hochregulierung von Signal- und Abwehrgenen und die Emission von VOCs nachgewiesen werden (siehe Abbildung 5a, [19]). Dies geschah interessanterweise unabhängig vom Besiedlungsstatus durch Ameisen.

Ein Vergleich von Metaboliten und Genexpression von *T. quadrialata*-Pflanzen, die von der Ameise *Azteca* cf. *tonduzi* besiedelt waren, mit solchen, bei denen die Ameisen ein beziehungsweise zweieinhalb Jahre zuvor entfernt worden waren, zeigte weiterhin, dass die Anwesenheit der Ameisen selbst unter Ausschluss von Fraßfeinden starke Effekte auf den Metabolismus der Ameisenpflanzen hat. Wie in Abbildung 5b dargestellt, erhöhen die Ameisen den Stickstoffgehalt der Pflanzen, vermutlich durch ihren Abfall und ihre Ausscheidungen (► Myrmekotrophie). Dies fördert wiederum den allgemeinen Stoff-

wechsel und das Wachstum der besiedelten Ameisenpflanzen [19]. Umgekehrt wuchsen ameisenfreie *T. quadrialata*-Pflanzen langsamer und akkumulierten im Vergleich zu Besiedelten mehr ► Ellagitannine, eine wichtige Klasse von konstitutiven Abwehrstoffen. Zusammengefasst bedeutet das: Unbesiedelten *Tococa*-Pflanzen fehlt nicht nur eine wichtige Verteidigungsstrategie (die Symbionten), wodurch sie mehr Fraßschäden zu verkraften haben und mehr in die Verteidigung (sowohl konstitutiv als auch induzierbar) investieren müssen um zu überleben, sondern sie haben auch weniger Ressourcen zur Verfügung (Blattstickstoff, Zucker, Aminosäuren und andere Metabolite). Während *T. quadrialata* in der Lage sein könnte, den von den Ameisen gewährten Schutz zum Teil auszugleichen, hat die Pflanze keine Möglichkeit, die geringere Stickstoffversorgung zu kompensieren. Alles in allem erklärt dies die drastischen Fitnessunterschiede zwischen besiedelten und unbesiedelten *Tococa*-Pflanzen in An- und Abwesenheit von Herbivoren.

Die Studie zeigt auf, wie hier mutualistische Ameisen gleichzeitig durch ihre Ernährungsweise und den durch sie vermittelten Schutz vor Herbivoren die Verfügbarkeit und Verteilung von Ressourcen innerhalb der Pflanze verändern und so den gesamten Stoffwechsel der Myrmekophyten positiv beeinflussen können. Dies verdeutlicht die hohe Komplexität der Symbiosen zwischen Ameisen und Ameisenpflanzen.

Zusammenfassung

*Mutualistische Ameisen-Pflanzen-Wechselbeziehungen mit Myrmekophyten sind in den tropischen Regionen der Welt zu finden. Sie basieren immer auf der Bereitstellung von Nistplätzen (Domatien) durch die Pflanze und können mit zusätzlicher Bereitstellung von Nahrung einhergehen (extrafloraler Nektar und/oder Futterkörper). Im Gegenzug dafür verteidigen die Ameisen die Pflanze gegen andere Organismen, insbesondere Herbivore. Zusätzlich profitieren manche Ameisenpflanzen – wie etwa *Tococa* – bei Ameisenbesiedlung von einem erhöhten Gehalt an Stickstoff, der durch die Ameisen eingebracht wird. Somit können zusätzlich zur Verminderung von Fraßschäden zumindest manche Ameisenspezies den allgemeinen Stoffwechsel und das Wachstum der Ameisenpflanzen positiv beeinflussen. Kommt es trotz der Anwesenheit oder wegen des Fehlens der schützenden Ameisen dennoch zu Fraßschäden, können Myrmekophyten typische pflanzliche Abwehrreaktionen wie etwa die Freisetzung von flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs) aktivieren.*

Summary

Myrmecophytes: Plants protected by bodyguards

Mutualistic ant-plant-interactions with myrmecophytes are found in tropical regions of the world. They are always based on the provision of nesting sites (domatia) by the plant and may be accompanied by the additional provision

of food (extrafloral nectar and/or food bodies). In return, the ants defend the plant against other organisms, especially herbivores. In addition, some ant plants – such as *Tococa* – benefit from an increased level of nitrogen introduced by the ants, when they are colonized by ants. Thus, in addition to reducing feeding damage, at least some of the ant species can positively influence the general metabolism and growth of ant plants. If feeding damage occurs despite the presence or because of the absence of protective ants, myrmecophytes can activate typical plant defence reactions such as the release of volatile organic compounds (VOCs).

Schlagworte:

Ameisenpflanzen, Herbivorie, pflanzliche Verteidigung, Symbiose, *Tococa*

Danksagung:

Eigene hier eingebrachte Studien in Peru erforderten einiges an Logistik und Unterstützung. Wir danken dem Team des *Explorer's Inn* für die Unterbringung, insbesondere während der Pandemie, Eric G. Cosio, Norma Salinas, Alex Nina, Rudi Saul, Fabian Limonchi und Eliana Esparza, Alfredo Ibañez (PUCP, Lima) für die Hilfe bei der Organisation der Feldarbeit, für Laborraum und Ausrüstung, Daniel Veit und Saskia Gablenz (MPI-CÖ) für technische Ausstattung, AIDER für die Unterstützung bei den Genehmigungen, SERNANP und SERFOR für die Genehmigung der Feldarbeiten. Die Forschung wurde von der Max-Planck-Gesellschaft und durch Stipendien der Friedrich-Schiller-Universität Jena im Rahmen der *International Max Planck Research Schools* (IMPRS) und des Deutschen Akademischen Austauschdienstes (DAAD) finanziert.

Literatur

- [1] A. Mithöfer, W. Boland (2012). Plant defense against herbivores: Chemical aspects, *Annu. Rev. Plant Biol.* 63, 431–450.
- [2] A. Mithöfer, M. Schuman (2014). Düfte zum Überleben: Subtile Verteidigungsstrategien in Pflanzen, *Biol. Unserer Zeit* 44, 26–32.
- [3] B. L. Bentley (1977). Extrafloral nectaries and protection by pug-nacious bodyguards. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 8, 407–427.
- [4] M. Heil (2015). Extrafloral nectar at the plant-insect interface: a spotlight on chemical ecology, phenotypic plasticity, and food webs. *Annu. Rev. Entomol.* 60, 213–232.
- [5] M. González-Teuber, M. Heil (2015). Comparative anatomy and physiology of myrmecophytes: ecological and evolutionary perspectives. *Res. Rep. Biodivers. Stud.* 4, 21–32.
- [6] G. Chomicki, S. S. Renner (2015). Phylogenetics and molecular clocks reveal the repeated evolution of ant-plants after the late Miocene in Africa and the early Miocene in Australasia and the Neotropics. *New Phytol.* 207, 411–424.
- [7] D. McKey, D. W. Davidson (1993). Ant-plant symbioses in Africa and the Neotropics - history, biogeography and diversity. In P. Goldblatt, ed, *Biological relationships between Africa and South America*. Yale University Press, USA, pp 568–606.
- [8] M. González-Teuber et al. (2014). Mutualistic ants as an indirect defence against leaf pathogens. *New Phytol.* 202 640–650.
- [9] S. S. Renner, R. E. Ricklefs (1998). Herbicidal activity of domatia-inhabiting ants in patches of *Tococa guianensis* and *Clidemia heterophylla*. *Biotropica* 30, 324–327.
- [10] D. H. Janzen (1966). Coevolution of mutualism between ants and acacias in Central America. *Evolution* 20, 249–275.
- [11] F. A. Michelangeli (2003). Ant protection against herbivory in three species of *Tococa* (Melastomataceae) occupying different environments. *Biotropica* 35, 181–188.
- [12] M. Heil, D. McKey (2003). Protective ant-plant interactions as model systems in ecological and evolutionary research. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 34, 425–553.
- [13] S. C. Moraes, H. L. Vasconcelos (2009). Long-term persistence of a Neotropical ant-plant population in the absence of obligate plant-ants. *Ecology* 90, 2375–2383.
- [14] M. Heil et al. (2002). Reduced chemical defence in ant-plants? A critical re-evaluation of a widely accepted hypothesis. *Oikos* 99, 457–468.
- [15] M. Heil et al. (2004). Evolutionary change from induced to constitutive expression of an indirect plant resistance. *Nature* 430, 205–208.
- [16] O. F. Hernandez-Zepeda et al. (2018). Reduced responsiveness to volatile signals creates a modular reward provisioning in an obligate food-for-protection mutualism. *Front. Plant Sci.* 9, 1076.
- [17] H. L. Vasconcelos (1991). Mutualism between *Maieta guianensis* Aubl., a myrmecophytic melastome, and one of its ant inhabitants: Ant protection against insect herbivores. *Oecologia* 87, 4.
- [18] B. Fiala et al. (1989). Studies of a South East Asian ant-plant association: Protection of *Macaranga* trees by *Crematogaster borneensis*. *Oecologia* 79, 463–470.
- [19] A. T. Müller et al. (2022). Combined -omics framework reveals how ant symbionts benefit the Neotropical ant-plant *Tococa quadrialata* at different levels. *iScience* 25, 105261.
- [20] W. Morawetz et al. (1992) Tree killing by herbicide producing ants for the establishment of pure *Tococa occidentalis* populations in the Peruvian Amazon. *Biodivers. Conserv.* 1, 19–33.
- [21] M. E. Frederickson et al. (2005) Ecology: 'Devil's gardens' bedevilled by ants. *Nature* 437, 495–496.

Verfasst von:



Andrea T. Müller, Jahrgang 1992, studierte Biochemie bzw. Chemische Biologie an der Friedrich-Schiller-Universität Jena und ist aktuell Doktorandin am Max-Planck-Institut für chemische Ökologie, in der Arbeitsgruppe „Plant Defense Physiology“. Ihre Forschung konzentriert sich auf pflanzliche Naturstoffe, deren Biosynthese, Regulierung und Funktion in der Pflanze.



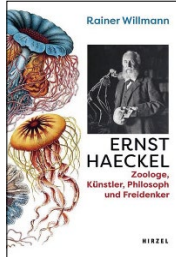
Axel Mithöfer, Jahrgang 1961, studierte Biologie an der Universität in Osnabrück und promovierte 1992 in der Pflanzenphysiologie der Ruhr-Universität Bochum. 1999 erfolgte die Habilitation in Botanik an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Nach einem Aufenthalt im Jahr 2000 am Institut National de la Recherche Agronomique in Toulouse, Frankreich, kehrte er für weitere zwei Jahre nach München zurück. 2003 wechselte er an das Max-Planck-Institut für chemische Ökologie in Jena, um dort die Arbeitsgruppe „Plant Defense Physiology“ zu leiten. Gleichzeitig ist er Privatdozent an der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Seine Forschungsgebiete sind die Wechselwirkungen von Pflanzen mit anderen Organismen.

Korrespondenz

Priv.-Doz. Dr. Axel Mithöfer
Max-Planck-Institut für chemische Ökologie
Hans-Knöll-Str. 8
07745 Jena
Email: amithoef@ice.mpg.de

BIOGRAFIE

Widersprüchlicher Haeckel



Der US-amerikanische Wissenschaftshistoriker Robert Richards wies darauf hin, dass zur Jahrhundertwende mehr Menschen weltweit aus Ernst

Haeckels (1834–1919) Feder von der Evolutionstheorie erfuhren als aus jeder anderen Quelle einschließlich Darwins eigenen Schriften. Trotz Haeckels enormer Bedeutung für die Biologiegeschichte kann man nicht von einer „Haeckel-Industrie“ sprechen, die vergleichbar mit *The Darwin industry* wäre. Aus diesem Grund sind neue Forschungen, die Haeckels Bedeutung hervorheben und seinen wissenschaftlichen Nachlass analysieren, sehr zu begrüßen. Der „Deutsche Darwin“ bleibt ja nach wie vor eine sehr kontroverse Figur, die sowohl Bewunderung als auch Kritik hervorruft.

Das vorliegende Buch rekonstruiert Haeckels Lebensgeschichte von der Kindheit bis zur Rezeption nach seinem Tod. In 20 Kapiteln werden neben der Wissenschaft auch weltanschaulich wichtige Themen wie Politik, Kunst, und Reisen angesprochen. Die biografischen Details werden durch eine Darstellung der Entwicklung von Haeckels Theorien ergänzt. So wird z. B. die Bedeutung von Haeckels Auftritt bei der 38. Versammlung der Vereinigung Deutscher Naturforscher und Ärzte im separaten Kapitel „Triumph von Stettin“ hervorgehoben und dessen Bedeutung für den Kampf für die Autonomie der Biologie (als Loslösung von der Physik) diskutiert. Haeckels Buch „Generelle Morphologie der Organismen“, das zur Weiterentwicklung des Darwinismus entscheidend beigetragen hat und viele neue Begriffe in die Wissenschaft einführte, wurde ebenfalls vom

Autor detailliert behandelt. Haeckels berühmte „Stammbäume“, die die Visualisierung des darwinschen Evolutionsgedankens vorantrieben, werden zu Recht gewürdigt; Phylogenetik ist ja heute in der Tat, wie von Willmann betont, ein zentraler Begriff der Evolutionsbiologie.

Die Kontroversen um Haeckels Figur werden ebenfalls angesprochen. In einem großen Kapitel „In den Fäden der Politik“ werden u. a. das Problem des angeblichen Haeckelschen Antisemitismus angegangen und Daniel Gasmans Anschuldigungen ausdiskutiert und zu Recht abgewiesen. Leider versucht der Autor auch Haeckels biologischen Rassismus zu relativieren. In der heutigen Zeit, in der selbst Darwin im *Editorial* von *Science*, einer der bedeutendsten wissenschaftlichen Zeitschriften, Rassismus vorgeworfen wird (10.1126/science.abj4606), ist die Vorstellung, dass es 12 zeitgenössische Menschenarten gäbe, die in 36 Rassen eingeteilt sind – mit Indogermanen an der Spitze der Hierarchie – eine extreme Form des theoretischen Rassismus! Haeckel sah jedoch Arten als „willkürliche Konstrukte“ an, so Willmann, man kann sie mit „Rassen“ gleichsetzen. Willmann gibt zwar zu, dass Haeckels „Äußerungen“ rassistisch waren, nimmt ihn jedoch als Person in Schutz und behauptet, Haeckel vertrete keinen „feindseligen Rassismus“ (S. 237). Für Haeckel, so Willmann, „war von Anfang klar, dass der Mensch biologisch eine Einheit ist“; Haeckel „hatte sich damit klar gegen die Polygenisten positioniert“ (S. 236). Die Frage ist jedoch nicht, ob der Mensch für Haeckel eine Einheit ist, sondern wo auf dem Stammbaum ein letzter gemeinsamer Vorfahr zu platzieren ist. Je tiefer auf dem phylogenetischen Baum der gemeinsame Vorfahr einen Platz findet, desto größere Unterschiede sind zwischen heute lebenden „Menschenrassen“ zu erwarten. Haeckels Position zum Polygenismus – also zu der Lehre, dass die Menschheit nicht auf einen, sondern

auf viele Stammväter zurückgeht – war vielschichtig. Er unterschied zwischen dem Polygenismus im weiteren Sinne (Menschenarten sind von keinem gemeinsamen Urstamme abzuleiten), den er entschieden ablehnte, und einem Polygenismus im engeren Sinne (verschiedene Zweige der sprachlosen Menschen entwickelten sich unabhängig zu sprechenden Menschen), den er nicht ausschloss. Haeckel war somit ein Biologietheoretiker, der eine rassistische Theorie entwickelte, die in der Hierarchisierung der Menschenrassen und Betonung ihrer Unterschiede viel weiter ging als die Theorie seines wissenschaftlichen Vorbildes Charles Darwin. Haeckel weigerte sich jahrzehntelang seine theoretischen Grundsätze zu revidieren. Seine persönliche Einstellung den anderen „Menschenrassen“ gegenüber mögen nicht feindselig sein, doch das ändert nichts an der ausgeprägt rassistischen Natur seiner wissenschaftlichen Theorien.

Zusammenfassend kann man sagen, dass das Buch wertvolle Information zu Haeckels Biografie und seinen wissenschaftlichen Verdiensten liefert. Der Autor zeigt, dass Haeckel eine der bedeutendsten Biologen war, der auch außerhalb der Naturwissenschaften wie z. B. in der Kunstgeschichte Spuren hinterlassen hat.

Kritisch ist zu bemerken, dass man den Eindruck bekommt, dass das Buchprojekt wenig durch die antirassistischen Bewegungen der letzten Jahre beeinflusst wurde. Haeckels naturwissenschaftlicher Rassismus wird unzureichend beleuchtet und immer wieder relativiert. Aus technisch-wissenschaftshistorischer Sicht ist das Buch zu sehr auf Sekundärliteratur angewiesen. Es ist ferner schwer nachzuvollziehen, warum der Autor eine ganze Reihe der jüngsten einschlägigen englischsprachigen Publikationen nicht berücksichtigt hat.

Georgy Levit, Jena

Ernst Heinrich Philipp August Haeckel gilt als wichtigster Vorkämpfer der von Charles Darwin und Alfred Russel Wallace begründeten Evolutionslehre im Deutschland des 19. Jahrhunderts. Der Göttinger Zoologe Rainer Willmann meint sogar, Haeckel sei nach Darwins Tod der „weltweit bekannteste lebende Wissenschaftler“ gewesen (S. 11). Dagegen fand John Simmons in seinem 1996 erschienenen *Who is Who der Wissenschaften*: „Außer bei Biologen ist der deutsche Botaniker und Zoologe Ernst Haeckel heute kaum noch bekannt“ [1]. Auch im 21. Jahrhundert haben wohl die Wenigsten außerhalb (und wahrscheinlich auch nicht Viele innerhalb) der Biologie eine einigermaßen fundierte Vorstellung vom Leben und vom wissenschaftlichen Erbe dieses ehemals doch so wirkmächtigen Zoologen aus Jena. Anlässlich des 100. Todestags von Ernst Haeckel veröffentlichten Mitglieder der Deutschen Zoologischen Gesellschaft eine Erklärung zur Frage nach den Menschenrassen und zu Rassen und Rassismus allgemein [2]. Die in diesem Dokument und nach dessen Publikation in der Öffentlichkeit geführte Diskussion lenkte den Blick auf Ernst Haeckel und weckte erwachendes Interesse an seinem Werk und seiner Person. Rainer Willmann stillt mit seinem biografischen Buch jedes denkbare Bedürfnis nach Auskunft über den „deutschen Darwin.“

In 20 Kapiteln zeichnet Willmann ein detailliertes Bild vom Leben und Arbeiten Ernst Haeckels. Die ersten 19 Kapitel behandeln in chronologischer Reihenfolge Haeckels persönlichen und wissenschaftlichen Werdegang. Ausführlich sind die familiären, sozialen und politischen Hintergründe geschildert. Zahlreiche bisher nicht oder nur unvollständig bekannte Einzelheiten hat Rainer Willmann Originalquellen entnommen. Schon allein diese Informationsfülle macht die Lektüre dieses Buches lohnend. Wir erfahren aus ihm, welche Wünsche und

Zweifel Ernst Haeckel während seines Studiums und in der ersten Phase seiner akademischen Karriere bewegten. Rainer Willmann beschreibt mit viel Empathie Haeckels Verhältnis zu den Frauen in seinem Leben. An seiner ersten Ehefrau, Anna Sethe, hing Haeckel mit schon fast übersteigert wirkender Innigkeit. Ihr Tod im Alter von 29 Jahren, sechs Jahre nach der Verlobung und nicht einmal zweijähriger Ehe, stürzte Haeckel in eine tiefe Traurigkeit. In der zweiten Ehe, mit Agnes geb. Huschke, fand Haeckel nicht wirklich die erhoffte Erfüllung. Dass aber auch Agnes nicht glücklich war, belegt Rainer Willmann mit ausführlichen Zitaten aus ihren Briefen. Auch Haeckels fünfjährige – (fast) ausschließlich platonische – Beziehung mit Frida von Uslar-Gleichen schildert er empathisch und in erstaunlicher Tiefe.

Doch auch Haeckels wissenschaftliche Seite wird in jedem einzelnen Schritt seiner Entwicklung dargestellt. Der „Kampf um den Entwicklungsgedanken“, also Haeckels kämpferisches Eintreten für die Abstammungslehre, seine bis heute bedeutenden systematischen Arbeiten über Einzeller und Hohltiere wie auch seine Beiträge zur Entwicklungsbiologie werden in einer auch für biologische Laien gut verständlichen Sprache ausgeführt. Nicht zuletzt Haeckels künstlerische Ambitionen, seine zoologischen Illustrationen, seine Landschaftsaquarelle und seine Stammbaum-Darstellungen nehmen breiten Raum ein und sind reich bebildert. Ein ganzes Kapitel ist Haeckels konsequenter Ablehnung des kirchlichen Dogmatismus und seiner Philosophie des Monismus gewidmet.

Die umstrittenen Seiten der Persönlichkeit und der Weltsicht von Ernst Haeckel werden nicht verschwiegen oder beschönigt, so wenig wie sein zweifelhaftes Bemühen, das von ihm formulierte „Biogenetische Grundgesetz“ mit unseriösen Darstellungen von Wirbeltier-Embryonen zu untermauern. Auch disku-

tiert Rainer Willmann ausführlich Haeckels eindeutig rassistische Vorstellung von der Evolution der Menschen, die nach ihm menschenfeindlichen Bewegungen zur wissenschaftlichen Rechtfertigung von Diskriminierung, Unterdrückung und Eliminierung angeblich minderwertiger Menschengruppen diene. Hier fällt auf, dass Rainer Willmann eher verständnisvoll und wohlwollend urteilt als streng kritisch. Bei gleicher Aktenlage könnte man Haeckels Rassismus durchaus schärfer kritisieren (z. B. [3]). Beispielsweise ist es nicht stichhaltig, den Vorwurf, Haeckel habe „einen Markstein auf dem Weg zum Nationalsozialismus“ unterstützt, mit dem Hinweis darauf zu entkräften, dass „die politischen Wege zum Nationalsozialismus“ um 1900 noch nicht erkennbar gewesen seien. Auch wenn eine politische oder gesellschaftliche Entwicklung noch nicht absehbar ist, kann doch trotzdem eine vorher vertretene Position dazu beigetragen haben, den Weg dorthin zu ebnen.

Ein 15seitiges kommentiertes Personenverzeichnis und ein achtseitiges Register erleichtern es ungenügend, auch nach abgeschlossener Lektüre des Buches bestimmte Inhalte zu erschließen. Das Literaturverzeichnis von 15 Seiten listet ungefähr 520 Titel auf, darunter über 50 Veröffentlichungen von Ernst Haeckel. Ich vermisse lediglich Nick Hopwoods ausführliche Auseinandersetzung mit dem „Embryonenstreit“ [4].

Insgesamt ist Willmanns Buch eine überaus präzise, fundierte und doch gut verständlich geschriebene und ausgesprochen sympathische Annäherung an eine vielschichtige und wissenschaftlich einflussreiche Persönlichkeit. Es bietet eine Fülle von Informationen, die so nutzerfreundlich und gut belegt auf deutsch nirgends sonst vorliegt. Rainer Willmann zeichnet von Ernst Haeckel das Bild eines empfindsamen und dabei streitbaren und widersprüchlichen Menschen und

Wissenschaftlers. Haeckel trat für Frauenrechte und für Völkerverständigung ein, schloss seine zweite Frau aber völlig von seinen wissenschaftlichen Unternehmungen aus und wies Großbritannien die Schuld am Ausbruch des Ersten Weltkriegs zu. Er würdigte den Beitrag jüdischer Autoren und Künstler zur deutschen Kultur, bezeichnete „die Juden“ aber als „fremde Art ... im Volke“. Er sprach bestimmten „Rassen“ des Menschen „höhere“ Fähigkeiten ab, vertrat aber – nach Ansicht des Autors – keinen „feindseligen Rassismus“.

All dies behandelt Rainer Willmann ausführlich und ausgewogen. Dabei ist der Text spannend, und die Abbildungen laden ein zur tieferen Beschäftigung mit dem Thema. Wer immer an der Geschichte der Wissenschaft im deutschen Sprachraum interessiert ist, oder auch wer mit Freude an der emotionalen und akademischen Entwicklung einer eindrucksvollen Persönlichkeit in ihrer gesellschaftlichen Umwelt teilnimmt, wird dieses Buch mit Spaß und großem Gewinn lesen.

*Michael Schmitt,
Universität Greifswald*

Ernst Haeckel.

Zoologe, Künstler, Philosoph und Freidenker. Rainer Willmann, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 2023, 235 S., 32 Euro, ISBN 978-3-777-62900-1.

ARTENSTERBEN

Eindringlicher Appell

Eigentlich wollte Josef Settele, Ökologe am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ in Halle/Salle, „nur“ ein Buch über den Insektenchwund schreiben. Erst ein paar Jahre zuvor war der alarmierende Rückgang der Insektenbiomasse durch die 2017 veröffentlichte Stu-

die des Entomologischen Vereins Krefeld besonders eindrücklich ins öffentliche Bewusstsein gerückt. Doch dann begann der SARS-CoV-2-Erreger seinen Siegeszug um die Welt und Settele war der Ansicht, dass ein Buch über die Bedrohung der Insekten alleine zu kurz gegriffen sei. Stattdessen schrieb er also über „Die Triple-Krise“ aus Artensterben, Klimawandel und Pandemien – drei Bedrohungen, die miteinander zusammenhängen und einander verstärken. Für die ersten beiden Punkte – Klimawandel und Artensterben – ist das offensichtlich. Die Hinzunahme von Pandemien ist dagegen auf den ersten Blick vielleicht überraschend. Aber Settele macht deutlich, dass die Übertragung von Krankheiten von Tieren auf Menschen – also Zoonosen wie COVID-19 – immens dadurch gefördert werden, dass wildlebende Tiere durch den Klimawandel und menschliche Aktivitäten ihren Lebensraum verlieren und so immer enger zusammenleben müssen: mit anderen Arten, aber auch mit dem Menschen. Die Gefahr, dass Viren die Artengrenze durchbrechen, also neue Wirtsarten befallen können, steigt durch die räumliche Nähe der Wirte zueinander naturgemäß stark an.

Settele beginnt sein Buch mit einer Dystopie: In einer Welt ohne – oder mit deutlich weniger – Insekten als heute, insbesondere ohne die Honigbiene, ist Obst fast unerschwinglich, Vogelstimmen sind verstummt, weil Vögel keine Nahrung mehr finden, und im Wald müssen Menschen in Schutzanzügen tierische Kadaver entsorgen, weil die Insekten als Aasverwerter fehlen. Nach diesem kurzen „düsteren Ausblick in die Zukunft“, wie Settele den Einstieg überschreibt, geht das Buch jedoch weitaus optimistischer weiter. Die Situation ist ernst, doch noch haben wir die Möglichkeit zu handeln, so Setteles Tenor. Wie das aussehen könnte, beschreibt der Ökologie-Professor der Martin-Luther-Universität Halle und Koordinierende Leitautor des Sachstands-

berichts des IPBES (*Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*) anhand vieler Beispiele.

Alles hängt mit allem zusammen und so müssen die drei Krisen der Triple-Krise gemeinsam betrachtet und auch gemeinsam bekämpft werden. Im Mittelpunkt von Setteles Buch stehen trotzdem die Insekten – nicht nur ihr Rückgang, sondern vor allem ihre faszinierende Vielfalt, ihre Fähigkeiten und ihre Aufgaben in Ökosystemen. Das ist kein Wunder, denn Settele ist Insektenforscher und ein großer Liebhaber von Schmetterlingen, die sich passenderweise besonders gut dazu eignen, Menschen die ansonsten eher unliebsamen Insekten nahezubringen. Schmetterlinge als bedrohte Sympathieträger analog zum einsamen Eisbären „auf seiner Eisscholle“ können beispielsweise in der Schule Lernende für den Artenschutz begeistern. So beschreibt Settele zum Abschluss seines Buches einige Projekte, um Schülerinnen und Schülern die Bedeutung der Biodiversität und die Notwendigkeit von Klima- und Artenschutz bewusst zu machen.

Trotz des schwierigen Themas strahlt „Die Triple-Krise“ Optimismus aus. Das Buch ist anschaulich geschrieben und richtet sich an alle, die sich für Umwelt- und Klimaschutz interessieren und die die Zusammenhänge zwischen beiden Phänomenen verstehen wollen. Im Grunde kann man sogar sagen, dass Settele versucht ALLE Menschen anzusprechen, denn am liebsten würde er wohl jede/jeden mit seinem eindringlichen Appell erreichen. Indem er auf den moralischen Zeigefinger verzichtet, gelingt es dem Autor, beim Lesenden ein „Wir-Gefühl“ zu erzeugen: „Wenn jeder von uns sein Verhalten in nur kleinen Dingen ändert, kann das einen großen Effekt haben.“ Dazu trägt auch bei, dass der Autor sehr authentisch auftritt, über seinen Werdegang und seine Motivation schreibt und das Ganze mit einer sympathischen Prise Humor würzt.

- [1] J. Simmons (1999). Who is Who der Wissenschaften. Bastei Lübbe, Bergisch-Gladbach.
- [2] M. Fischer et al. (2019). *Biuz* 49, 399–402.
- [3] C. Hertler, M. Weingarten (2001). Ernst Haeckel (1834–1919). S. 434–455 und 535–537 in I. Jahn, M. Schmitt, M. (Hrsg.) Darwin & Co., C. H. Beck, München.
- [4] N. Hopwood (2015). Haeckel's Embryos: Images, Evolution, and Fraud. University of Chicago Press, Chicago.



Die „Triple-Krise“ wurde 2020 geschrieben und ist bereits in mehreren Auflagen erschienen. Von seiner Aktualität hat das Buch jedoch nichts eingebüßt. Im Gegenteil: Je mehr Zeit vergeht, ohne dass sich etwas ändert in den Bemühungen, dem Klimawandel und damit dem Artensterben entgegenzuwirken, desto dringlicher wird Setteles Appell: „Wir müssen endlich handeln!“

Larissa Tetsch, Maisach

Die Tripe Krise – Artensterben, Klimawandel, Pandemie.

Warum wir dringend handeln müssen, Josef Settele, EDEL Books, Hamburg, 2020, 320 S., 22,95 Euro, ISBN 978-3-84190-653-3.

BILDUNGSARBEIT

Für mehr rassismuskritische Bildung



Auch aus biologischer Sicht gibt es keinen wissenschaftlichen Grund, von „Rassen“ zu sprechen. Dies machte zuletzt die Jenaer Erklärung deutlich. „Den Begriff ‚Rasse‘ überwinden“, wie es im Titel des vom Jenaer Biologiedidaktiker Karl Porges herausgegebenen Sammelbandes heißt, ist also geboten. Es bedarf jedoch mehr, um den hinter dem sozialen Konstrukt der „Rasse“ stehenden Rassismus aus der Welt zu schaffen. Dazu einen Beitrag zu leisten, ist das Anliegen des Bandes: Er beabsichtigt die „Theorie-Praxis-Verzahnung für eine rassismuskritische Bildungsarbeit“ (S. 19).

Ausgangspunkt des Sammelbandes war die gleichnamige Tagung an der Friedrich-Schiller-Universität Jena im Jahr 2021. Er versammelt wissenschaftliche Beiträge, aber

auch Anregungen für und Berichte aus der Bildungspraxis. Von den Tagungsbeiträgen finden sich leider nur wenige im Band wieder. Dafür kommen neue, qualitativ hochwertige Beiträge wie Wulf D. Hunds Begriffsgeschichte von „Rasse“ dazu. Hund zeigt kenntnisreich, wie das von Ernst Haeckel wissenschaftlich legitimierte Rassedenken „von Linien ethnischer, nationalistischer, rassen-typologischer, religiöser und klassenspezifischer Differenzierungen durchzogen“ war, „die immer auch wertenden Charakter hatten“ (S. 45). Den von Hund angeschnittenen Rassismus Kants vertieft die Philosophin Peggy H. Breidenstein in diesem Sammelband. Ihr anregendes Plädoyer lautet: Die rassistischen Ausführungen Kants seien weder zu verbannen, noch zu bagatellisieren. Stattdessen solle „Kant gegen Kant und über ihn hinaus“ (S. 117) gelesen werden. In zwei Beiträgen beleuchten Porges' Kollegen der Jenaer AG Biologiedidaktik Haeckels humanphylogenetische Suchbewegungen und Antisemitismus. Sie zeichnen detailreich nach, wie politische Überzeugungen und Sozialdarwinismus in Haeckels Forschung Einzug hielten, und führen den Nachweis, warum sie Haeckel nicht als einen „antisemitische[n] ‚Vordenker‘ des Nationalsozialismus“ (S. 166) charakterisieren. Jedoch kommt dabei die Diskussion gegenläufiger Forschungsmeinungen etwas zu kurz.

Unter den drei Beiträgen zu den „Grundlagen moderner rassismuskritischer Bildungsarbeit“ sticht Michael Mays Beitrag hervor, weil er Theorie und Praxis hervorragend miteinander verknüpft. Der Jenaer Politikdidaktiker präsentiert eine Matrix zur Analyse von schulischen Situationen, in denen es zu rassistischer Hatespeech kommt. Wie May mikrosoziologische Analyse und sozialpsychologische Forschung verbindet, überzeugt. Weniger überzeugen können dagegen Maria Palmes Ausführungen zu Kinderrechten und Rassismus, da es ihnen

an sprachlicher und inhaltlicher Sorgfalt fehlt.

Anschließend stellen fünf Beiträge außerschulische „(Bildungs-) Räume für das Erinnern und den Dialog“ vor. Hervorzuheben ist der Beitrag von Lisa Caspari und Rebekka Schubert, der überzeugend skizziert, was die aktuelle Ausstellung „Wohin bringt ihr uns? ‚Euthanasie‘-Verbrechen im Nationalsozialismus“ im Erinnerungsort Topf & Söhne für die historische und rassismuskritische Bildungsarbeit zu leisten vermag. Annegret Harendt zeigt kreativ auf, wie das Schullabel „Schule ohne Rassismus. Schule mit Courage“ mit neuem Leben gefüllt werden kann.

Den Abschluss bilden vier „Impulse für den (Fach-)Unterricht“, die in doppelter Hinsicht wirken: Zum einen laden sie wie der Vorschlag einer Zeitreise im Biologieunterricht zur Nachahmung ein. Zum anderen stoßen sie das Nachdenken über die eigene Lehrpraxis an: Während sich an mancher Anregung sicherlich reiben lässt, werden die Erfahrungsberichte aus dem Schulltag bei Leser/-innen aus dem Schulkontext sicherlich resonieren.

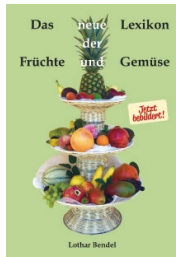
Auch wenn es dem Sammelband nicht immer gelingt, dass sich Theorie und Praxis wechselseitig befruchten, bringt er doch beides und viele Perspektiven auf eine verdienstvolle Weise zusammen. Somit leistet er einen relevanten Beitrag zur rassismuskritischen Bildung(-sarbeit). Da der Band im Internet frei zugänglich ist, sei insbesondere allen im Bildungsbereich Aktiven angeraten, sich eingehend mit ihm zu beschäftigen.

Johannes Streitberger, KomRex - Zentrum für Rechtsextremismusforschung Jena

Den Begriff „Rasse“ überwinden.

Die Jenaer Erklärung in der (Hoch-) Schulbildung, Karl Porges (Hrsg.), Verlag Julius Klinkhardt, Bad Heilbrunn, 2023, 384 S., 24,90 Euro, ISBN 978-3-7815-6008-6.

LEXIKON

Gemüslisches
Lesevergnügen

Es ist viel informatives „Lese-futter“, das uns der Vollblutkoch und Nahrungspflanzenkenner hier mit vielerlei Verwendungsmöglichkeiten

anbietet: umfassende Sachinformationen zu ca. 270 Obst- und Gemüsesorten (regionaltypische Bezeichnungen, Allgemeines/Herkunft/Geschichtliches, Aussehen, Geschmack, Hauptinhaltsstoffe, Verwendung/Zubereitung, Lagerung, volksmedizinische Bedeutung, Tipps und weitere – teils verblüffende –

Details, die nur der Fachmann kennt). Bendel hat an alles gedacht, geradezu so, als wenn er in einen virtuellen Dialog mit seinem „botanischen Rechercheobjekt“ getreten wäre und sich dabei alles Wissenswerte offenbart hätte. Das – bezogen auf die Informationsfülle textgewaltige, kombinierte Nachschlage- und Lesewerk mit je einem, die Arten- bzw. Sortentypica dokumentierenden Foto – ist unter den Konkurrenzprodukten ein Buch mit individuellem Gepräge und „Leidenschaft“ für Obst und Gemüse. Es ist in vielen Passagen auch einfach „nur“ ein unterhaltsam-informativer Lesestoff zu Nahrungspflanzen, die uns persönlich interessieren. Dabei werden gerne mal die Grenzen zum Schmunzeln überschritten: Kakis in Japan als Katerkiller, „Ladyfinger“ als Bezeichnung für Okras, Baby-Bananen als englischer Begriff für

Löffelbiskuit-Gebäck sowie das leidige „Paranuss-Prinzip“, das die oft seltsame Verteilung von Mischnüssen erklärt.

L. Bendel hat eine sorgfältig recherchierte Datenmenge einschließlich Kalorientabelle und Saisonkalender zu einer lesenswerten Lexikonvariante zusammengetragen – für „gemüslische“ Stunden, wie er selbst schreibt. Als Sahnehäubchen zieht sich zudem der Leitgedanke der Lebensmittelwertschätzung mit durch das Werk.

Christiane Högermann, Osnabrück

Das neue Lexikon der Früchte
und Gemüse.

Lothar Bendel, Eigenverlag
(bendel@t-online.de), Roxheim,
589 S., 24,00 Euro, ISBN 9-783-
00073-134-1.

ANWALT FÜR DIE WISSENSCHAFT: ERWIN BECK VERLÄSST DAS EDITORIAL BOARD DER BIUZ



Erwin Beck bei der Eröffnung der von ihm geleiteten Wanderausstellung zur Biodiversität („Vielfalt zählt“) im Naturhistorischen Museum Wien. Foto: DFG 2016.

Nach mehr als 33 Jahren verlässt der Bayreuther Pflanzenphysiologe Erwin Beck das Editorial Board der Biologie in unserer Zeit (BiuZ). Diese lange Zeit ist gekennzeichnet durch sein breites biologisches Interesse, seine Zuverlässigkeit, seine Empathie für die Akteure, seine Bereitschaft, regionale wie globale Verantwortung zu übernehmen und seine stete, aber bedachte Zukunftsorientierung. Im Sinne eines Eisenbahnvergleichs ist Erwin Beck die seit der Inbetriebnahme störungsfrei fahrende starke E-Lok und kein flüchtiger ICE, der kommt oder nicht und dessen Technik regelmäßig ausfällt. Das BiuZ-Team und der VBIO sagen Danke für dieses unglaubliche und beeindruckende Engagement für die BiuZ.

Becks wissenschaftliches Werk zeigt eine für heutige Verhältnisse außergewöhnliche Breite und prädestiniert ihn als Ratgeber und Gutachter sowohl für das wissenschaftliche Publizieren als auch für die Forschungsförderung. Daraus ergab sich wiederum sein starkes und einflussreiches politisch-gesellschaftliches Engagement für die Wissenschaft im Allgemeinen und die Biologie im Besonderen.

Diese Kombination aus Wissenschaft und wissenschaftspolitischem Wirken war für die BiuZ ein riesiger Gewinn und trug maßgeblich zum Erhalt der Qualität von BiuZ bei. Die kritische und doch empathisch unterstützende und konstruktive Weise, mit der Erwin Beck in seinen Kommentaren Lösungen anbot, beeindruckte immer wieder das Kuratorium/Editorial Board und die vier BiuZ-Redakteurinnen, mit denen er über die Jahre stets vertrauensvoll und mit Freude zusammenarbeitete. Dass Erwin Beck der BiuZ bis ins 87. Lebensjahr so aktiv verbunden blieb und noch weiter bleiben wird, kann gar nicht genug gewürdigt werden. Ein ganz großes Dankeschön!

Karl-Josef Dietz, Präsident des VBIO

Christian Körner, Mitglied des Editorial Board der BiuZ



Erwin Beck (Mitte) im Oktober 2022 mit zwei Mitarbeitern auf einem Messturm über den Baumkronen des ecuadorianischen Bergwalds. Foto A. Bräuning.

MIKROBEN VERSTEHEN

Wo kommen Mikroben *nicht* vor?

Mikroben leben (fast) überall. Tatsächlich ist es kaum möglich, Stellen auf der Erde zu finden, die unter natürlichen Bedingungen völlig unbelebt sind. Vor allem Archaeen sind dafür bekannt, dass sie in den unwirtlichsten Umgebungen vorkommen und sich dort vermehren oder überleben können: in Gewässern mit extremen pH-Werten, in Seen mit sättigender Salzkonzentration, bei Temperaturen über 100 °C oder in trockenen Böden. Es könnte aber Orte mit Kombinationen ökologischer Extreme geben, bei denen auch Mikroben passen müssen.



ABB. 1 Geothermalgebiet am Dallol-Vulkan der Afar-Region im Grabenbruch Äthiopiens. Im freien Wasser heißer, extrem salzhaltiger und saurer Tümpel sind Mikroben bisher nicht nachweisbar. Foto: A. Savin, WikiCommons (2018).

Sollen Gegenstände oder Räume frei von Mikroorganismen bleiben, so greift man zu drastischen Mitteln, um die Zellen abzutöten oder zu entfernen – was trotz größerem technischen Aufwand nicht immer vollständig gelingt. Manche Mikroben widerstehen Bedingungen, die für unsere Vorstellung äußerst lebensfeindlich anmuten und die zu besonderen evolutionären Anpassungen geführt haben müssen. So überleben einige Arten an Satelliten im Orbit, leben in kochendheißen vulkanischen Quellen oder tausende Meter unter dem Meeresboden, wo sie vermutlich seit Jahrmillionen überdauern [1]. Doch finden wir auch natürliche Orte auf unserer Erde, die frei von Mikroben bleiben?

Lebensräume für Extremophile

Um unbesiedelbare Gewässer oder Böden zu entdecken, sucht man nach Orten mit überaus harschen Bedingungen wie extrem heiße, kalte, saure, basische, trockene, salzige, giftige oder strahlenbelastete Stätten. Die Untersuchung unwirtlicher Umgebungen nahm vor etwa 50 Jahren Fahrt auf, als Thomas Brock im vulkanisch geprägten Yellowstone Nationalpark hitzeliebende Mikroben isolierte [2]. Heute kennt man viele sogenannte extremophile Mikroorganismen. Darunter sind Thermophile (hitzeliebend bis 80 °C), Cryophile (kälteliebend unter -10 °C), Acidophile (säureliebend bis pH 2), Alkaliphile (laugeliebend bei pH > 9), Halophile (salzliebend bis zur Sättigungskonzentra-

tion), Piezophile (druckliebend ab 40 MPa, dem 400-fachen des Atmosphärendrucks) und nach anderen Vorlieben eingeordnete Mikroben [3]. Tabelle 1 listet einige Biotope mit Extremophilen auf. Reichen die ökologischen Parameter nicht an existenzbedrohende Werte heran, so steigt die Vielfalt vorkommender Organismen [3, 4]. Ob Mikroben an extreme Habitate angepasst sind und sich nur dort vermehren können oder diese Bedingungen gerade noch aushalten, ist vor Ort nicht immer ersichtlich. Man unterscheidet dabei etwa zwischen Thermophilen, die hohe Temperaturen benötigen, und Thermotoleranten, die bevorzugt bei niedrigeren Temperaturen leben, aber höhere überleben. Die Entdeckung von Archaeen, die selbst in kochendem Wasser existieren, und der Art *Methanopyrus kandleri*, die noch bei 122 °C wächst und sich unter 85 °C nicht mehr vermehrt, weil es zu kalt ist [5], erzwang eine Erweiterung der Einordnung – sie zählen zu den Hyperthermophilen. Der Spitzenreiter ist ein kokkoides Archaeon, das mehrere Stunden bei 130 °C überlebt (Tabelle 1). Spezialisierte Organismen sind zumindest an einen außergewöhnlichen Umweltparameter gut angepasst [6]. Denn was wir als extreme Bedingungen bezeichnen, ist für dort lebende Organismen seit Jahrmillionen oder länger eine normale Umwelt. So würden halophile Archaeen in extrem verdünnten Salzlösungen (Süßwasser) nicht überleben und schlicht platzen. Die reine Suche nach exotischen Extremophilen mündete inzwischen in die Erforschung physikochemischer Grenzen mikrobiellen Lebens [7]. Permanent sterile Orte sollten demnach eher Kombinationen von Extremen aufweisen.

Lebensräume für Polyextremophile

Auch in heißen Salzlaken, in sauren und heißen Quellen und in anderen, durch mehrfache Extreme ausgezeichneten Orten findet man

TAB 1. BEISPIELE FÜR EXTREME HABITATE MIT ORGANISMEN¹⁾

Habitat	ökologische Extreme	vorkommende Organismen ²⁾	tolerierte Extreme	Anpassung	Referenzen
Salzseen, Salinen	extrem hohe Salinität (NaCl)	<i>Halarsenatibacter silvermanii</i> (B) <i>Halobacterium salinarum</i> (A)	1 – 5,5 M (sättigend) 1 – 5,5 M	halophil	R1 R2
Obsidian Pool Yellowstone Nationalpark	sehr hohe Temp.	<i>Geothermobacterium ferrireducens</i> (B)	100 °C	hyperthermophil	R3
hydrothermaler Schlot Pazifik, 2000 m Tiefe	extrem hohe Temp. hoher Druck	<i>Methanopyrus kandleri</i> (A)	116 °C / 0,4 MPa 122 °C / 20 MPa	hyperthermophil piezotolerant	R4
hydrothermaler Schlot Cayman Trough, 5000 m Tiefe	extrem hoher Druck hohe Temperatur	<i>Thermococcus piezophilus</i> (A)	0,1 – 125 MPa 60 – 95 °C	piezophil (tolerant) hyperthermophil	R5
hydrothermaler Schlot Guaymas Becken (USA)	sehr hohe Temp.	<i>Thermococcus gammatolerans</i> (A)	55 – 95 °C 30 kGy ³⁾	hyperthermophil γ-Strahlen-tolerant	R6
Dung	alkalisches Milieu hohe Temperatur	<i>Anoxybacillus pushchinensis</i> (B)	pH 8 – 10,5 37 – 66 °C	alkalithermophil	R7
Fumarolen (Hokkaido, Japan)	extrem saures Milieu hohe Temperatur	<i>Picrophilus oshimae</i> (A)	pH < 0,5 50 – 65 °C	hyperacidophil thermophil	R8, R9
Sediment von Seen im Geothermalgebiet am Dallol-Vulkan (Äthiopien)	extrem saures Milieu extrem hohe Salinität hohe Temperatur	Nanohaloarchaeen (A) (mikroskopischer und genetischer Nachweis)	pH 0,25 – 2,4 Na ⁺ 3,9 – 5,1 M 47 – 86 °C	hyperacidophil halophil, thermophil (in Mineralien en- krustiert)	R10
Wadi an-Natron (Ägypten)	extrem salzhaltig alkalisch, heiß	<i>Natronaerobius thermophilus</i> (B)	Na ⁺ 3 – 3,9 M pH 8,3 – 10,6 37 – 54 °C	haloalkaliphil thermophil	R11
arktischer Permafrostboden	extrem kalt salzhaltig (NaCl)	<i>Planococcus halocryophilus</i> (B)	–15 – –25 °C 1,7 – 3,0 M	cryophil halophil	R12

¹⁾ weitere Beispiele in [7]; ²⁾ ausgewählte Arten der Archaea (A), Bacteria (B); ³⁾ etwa die vierfache für Menschen absolut tödliche Strahlendosis

Referenzen zu Tabelle 1

- R1 J.S. Blum et al. (2009). Appl. Environ. Microbiol. 75, 1950–1960, <https://doi.org/10.1128/AEM.02614-08>
R2 F. Pfeifer (2017). Biologie in unserer Zeit 47, 378–384, <https://doi.org/10.1002/biuz.201710633>
R3 K. Kashefi et al. (2002). Appl. Environ. Microbiol. 68, 1735–1742, <https://doi.org/10.1128/AEM.68.4.1735-1742.2002>
R4 K. Takai et al. (2008). Proc. Natl. Acad. Sci. USA 105, 10949–10954, <https://doi.org/10.1073/pnas.0712334105>
R5 C. Dalmasso et al. (2016). Syst. Appl. Microbiol. 39, 440–444, <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2016.08.003>
R6 E. Jolivet et al. (2003). Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 53, 847–851, <https://doi.org/10.1099/ijs.0.02503-0>
R7 E. Pikuta (2000). Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 50, 2109–2117, <https://doi.org/10.1099/00207713-50-6-2109>
R8 C. Schleper et al. (1996). Int. J. Syst. Bacteriol. 46, 814–815, <https://doi.org/10.1099/00207713-46-3-814>
R9 C. Schleper et al. (1995). Nature 375, 741–742, <https://doi.org/10.1038/375741b0>
R10 F. Gómez et al. (2019). Sci. Rep. 9, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44440-8>
R11 N.M. Mesbah et al. (2007). Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 57, 2507–2512, <https://doi.org/10.1099/ijs.0.65068-0>
R12 N.C.S. Mykytczuk et al. (2013). ISME J. 7, 1211–1226, <https://doi.org/10.1038/ismej.2013.8>

Mikroben – die Polyextremophilen (Tabelle 1). Untersuchungen heißer vulkanischer Gewässer des neuseeländischen Taupō-Gebiets zeigen, dass (sehr) saure pH-Werte die mikrobielle Diversität einschränken. Der primär selektierende pH-Einfluss verschwindet jedoch bei Temperaturen über 70 °C. Nun begrenzt eher die heiße Umgebung die Artenvielfalt der Thermoacidophilen oder pH-toleranten Mikroben bei pH-Werten zwischen 1 und 9. Wobei 46 gemessene physikochemische Parameter nicht ausreichen, um das Ausmaß der Biodiversität des geothermalen Ökosystems von 925 untersuchten Quellen einzuordnen [4]. Man vermutet, dass eine lokale (Nischen-)Evolution der Organismen

mitspielt, die sich schon bei benachbarten heißen Quellen im Yellowstone Nationalpark beobachten ließ. Auch die Anpassung an mehrere ökologische Extreme haben viele Mikrobenarten bewältigt. Inzwischen kennt man neben thermoacidophilen auch thermohalophile, thermopiezophile, hitze-strahlenresistente sowie hitze-trockenresistente und noch andere bi-extremophile Mikroben (Tabelle 1). Das Interesse erstreckt sich deshalb auf Orte mit weiteren bizarren Eigenschaften. Besonders lebensfeindlich versprochen dabei zwei sehr unterschiedliche Stätten zu sein: die erst 1926 entstandene Geothermalregion am Dallol-Vulkan in der Danakil-Senke Äthiopiens und die seit Millionen

Jahren existierenden schnee- und eisfreien Trockenböden der Antarktis [8, 9].

Das Geothermalgebiet Dallol

Die extrem heiße und aride Region des äthiopischen Grabenbruchs wird mit seinen schwefeligen Thermalfeldern, salzig-sauren Tümpeln und Trockengebieten auch bildhaft als das „Tor zur Hölle“ bezeichnet (Abbildung 1) [3]. Hier finden wir Quellen mit 90–110 °C, pH < 0 und Salzlaken an der Sättigungsgrenze mit durch Metallionen gefärbtem Wasser [8, 10]. Proben, deren Mischung nicht in allen Komponenten extrem ausfällt, enthalten DNA einiger Bakterien und zahlreicher Archaeen aus mehreren phylogenetischen

schen Zweigen [10]. Freies Wasser aus Tümpeln mit besonders extremen Eigenschaften birgt aber offenbar auch für Polyextremophile Probleme. Als lebensfeindliche Konstellation stellt sich Hypersalinität ($\text{NaCl} > 5,5 \text{ M}$) mit Hyperacidität ($\text{pH} \approx 0$) heraus, unabhängig von der Temperatur. Allerdings kommen Nanohaloarchaen enkrustiert in Mineralien bei $\text{pH} 0,25$, $\approx 5 \text{ M Na}^+$ und $86 \text{ }^\circ\text{C}$ vor und scheinen sich dort eine Nanonische zu schaffen (Tabelle 1) [8]. Eine zweite Grenze bilden hohe Mg^{2+} -Konzentrationen ($> 0,4 \text{ M}$) in Salzlaken [10]. Ca^{2+} und Mg^{2+} stören durch ihre chaotrope Eigenschaft die Struktur von Proteinen und senken die Wasseraktivität mit dem Effekt, dass trotz einer flüssigen Umgebung H_2O nicht mehr ausreichend für Reaktionen mobilisiert werden kann. Hohe Mg^{2+} -Konzentrationen allein ($\text{MgCl}_2 \geq 5 \text{ M}$ bei $\approx 15 \text{ }^\circ\text{C}$) verhindern anderenorts mikrobielles Wachstum aber nicht [7].

Trockengebiete der Antarktis

Die Verfügbarkeit von Wasser spielt auch in der Antarktis eine Rolle. Es gibt „Oasen“, die eisfrei und extrem nährstoffarm bleiben, weil seit Jahrtausenden starke Winde jegliche Ablagerung verwehen und dort (nahezu) kein Niederschlag fällt. In den bis $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ kalten, extrem trockenen und stark Chlorat-haltigen Böden der höheren Gebirgshänge des Shackleton-Gletscher-Gebiets (Abbildung 2) ließen sich meist weder DNA noch Zellen nachweisen. Vermutlich sind weitere Parameter im Zusammenhang mit der Höhenlage von Einfluss, wobei Proben aus tiefer gelegenen Regionen Bakterien, Pilze und wenige Archaeen enthielten [9]. Der salzhaltigste Teich der



ABB. 2 Schnee- und eisfreie Gebirgshänge und Täler im Gebiet des Shackleton-Gletschers in der Antarktis. Die kalten, salzigen und trockenen Böden höherer Gebirgsregionen enthalten (nahezu) keine Mikroben. Foto: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Landsat7_dry_valley_lrg.jpg

Antarktis, der Don Juan Pond, mit bis zu 470 g Salz/l (überwiegend CaCl_2 neben NaCl) und einer geringen Wasseraktivität friert selbst bei $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ nicht zu, ist aber vermutlich für Mikroben zu „trocken“; frühere Hinweise auf Leben sind umstritten [11]. Gleichwohl leben trotz Kälte, Trocken- und Salzstress auch verschiedenste Mikroben in der Antarktis [7].

Ob die erwähnten unwirtlichen Orte wirklich dauerhaft unbelebt sind, bleibt zunächst offen. Die fehlende Evidenz mikrobiellen Lebens in punktuellen Proben bedeutet noch nicht, dass ein endgültiger Nachweis steriler Flecken auf unserer Erde erbracht wäre. Die Untersuchungen zeigen aber, welche natürlichen Bedingungen Organismen an die Grenze der Nachweisbarkeit und Lebensfähigkeit bringen [7]. Und sie führen zurück zu der spannenden Frage nach den biologischen Anpassungen, die Leben in der Welt extremer Habitate zulassen.

Literatur

- [1] Y. Morono et al. (2020). Nat. Commun. 11, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17330-1>
- [2] T. Brock (1978). Thermophilic microorganisms and life at high temperatures. Springer, New York.
- [3] S. Elleuche (2018). Extreme Lebensräume. Springer-Verlag Deutschland.
- [4] J. F. Power et al. (2018). Nat. Commun. 9, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05020-y>
- [5] K. Takai et al. (2008). Proc. Natl. Acad. Sci. USA 105, 10949–10954, <https://doi.org/10.1073/pnas.0712334105>
- [6] D. Bregnard et al. (2023). Geothermal Energy 11, <https://doi.org/10.1186/s40517-023-00269-z>
- [7] N. Merino et al. (2019). Front. Microbiol. 10, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00780>
- [8] F. Gómez et al. (2019). Sci. Rep. 9, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44440-8>
- [9] N. B. Dragone et al. (2021). JGR Biogeosci. 126, <https://doi.org/10.1029/2020JG006052>
- [10] J. Belilla et al. (2019). Nat. Ecol. Evol. 3, 1552–1561, <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1005-0>
- [11] A. Oren (2013). In: J. Seckbach et al. (Ed.) Polyextremophiles. Springer, Dordrecht, 217–232.

Harald Engelhardt, Martinsried

PARTNER DES MENSCHEN

Rhizobien

Die Menschen haben sich im Laufe ihrer kulturellen Entwicklung wiederholt Mikroben zu Partnern gemacht. Zu ihnen gehören die Rhizobien oder Knöllchenbakterien, die mit ihrem Vermögen, Hülsenfrüchtler wie Bohnen, Linsen und Erbsen auf stickstoffarmen Böden wachsen zu lassen, die menschliche Ernährung bereichern. Seit Jahrtausenden profitieren Menschen davon, und seit etwa 130 Jahren werden Rhizobien auch gezielt in der Landwirtschaft eingesetzt.



ABB. 1 Wachstumsversuche mit Erbsen (*Pisum sativum*) in sterilem Sand ohne Stickstoffverbindungen und ohne (328–330) oder mit Beigabe einer Mikrobensuspension aus natürlichen Böden (339–341). Originalfoto (Ausschnitt) aus [3, Tafel III].

Pflanzliche Kost spielte für Menschen immer eine Rolle, doch erst als sie im Neolithikum sesshaft zu werden begannen und in der Folge intensiv Ackerbau betrieben, entwickelte sich beiläufig die versteckte Annäherung von Mensch und Rhizobien. Die Bodenbakterien gehen eine Symbiose mit Hülsenfrüchtlern (Leguminosen) ein und vermitteln ihnen Wachstumsvorteile und Eigenschaften, die sich auch günstig auf

unsere Ernährung auswirken (die Gattung *Rhizobium* war deswegen *Mikrobe des Jahres 2015*, <https://vaam.de>).

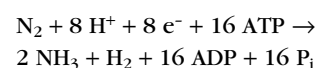
Getreide wurde im Mittelmeerraum vor etwa 6000 Jahren zum bevorzugten Nahrungsmittel, wie sich aus Zahnsteinproben alter Skelette entnehmen lässt [1]. Stetiger Anbau verarmt den Boden an Mineralien und besonders Stickstoff, so dass Felder erst nach einer Ruhezeit wieder genügend Ertrag brachten. Das erwähnt bereits Plinius (23 bis 79 n. Chr.) in seinem über viele Jahrhunderte geschätzten Werk „Die Naturgeschichte“ [2]. So entstand zunächst die Zwei- und im Mittelalter die Dreifelderwirtschaft mit Brachen und in neuerer Zeit mit ausgesuchten Fruchtfolgen. Aber schon Plinius berichtete über eine Alternative zur Brache: „Virgil will, man solle ein Feld um das andere brach liegen lassen, was [...] unbezweifelt das Beste ist. Gestatten diess die Umstände nicht, so säe man Dinkel oder etwas anderes [...] dahin, wo Wolfsbohne, Wicken oder grosse Bohnen standen.“ [2, 18. Buch]. Er erwähnt im Text neben großen Bohnen (*Vicia faba*), Wolfsbohne (Lupine) und Wicke auch Linse, Kichererbse, Luzerne und Klee. Die Leguminosen dienen und dienen bis heute zur Bodenregeneration, Gründüngung durch Unterpflügen, als Tierfutter und die proteinreichen Samen der essbaren Körnerleguminosen unserer Ernährung.

Vom Kommensalen zum Symbionten

Warum Leguminosen auf stickstoffarmen Böden gedeihen, hat man

erst seit Ende des 19. Jahrhunderts genauer verstanden. Man fand die Ursache in Bakterien, den Rhizobien, die die schon lange bekannten Wurzelknöllchen hervorrufen, sie besiedeln, sich von normalen Zellen zu N₂-fixierenden Bacteroiden wandeln, die Stickstoffverbindungen an den Pflanzenwirt weitergeben und so sein Wachstum fördern (Abbildungen 1 und 2) [3–5]. Mit dem Sammelnamen Rhizobien bezeichnet man Arten mehrerer Gattungen der Proteobakterien, die spezifische Symbiosen mit Leguminosen eingehen (Tabelle 1).

Die organismische Beziehung begann vor etwa 100 Millionen Jahren, als bei einem Leguminosenvorfahren die Eigenschaft ausgebildet wurde, mit damaligen Rhizobien in Kontakt treten zu können. Diese vermochten Luftstickstoff noch nicht zu nutzen; sie erwarben die Fähigkeit vermutlich später durch horizontalen Gentransfer (nur Mikroben können N₂ fixieren). Es dauerte rund 40 Millionen Jahre, bis sich eine Lebensgemeinschaft etablierte und auf weitere Arten übertrug [6]. Die Symbiose hat mitbewirkt, dass heute Leguminosen mit fast 20.000 Arten zu den vielfältigsten Blütenpflanzen und die Knöllchenbakterien zu den besonders reichhaltigen Familien zählen [7]. Obwohl die Symbiose in Zeiten eines atmosphärischen CO₂-Anteils von 1000 bis über 1500 ppm (vor 65–45 Millionen Jahren, heute 420 ppm mit steigender Tendenz) Wachstumsvorteile für die Pflanzen brachte und zu ihrer Verbreitung beitrug, blieb die Lebensgemeinschaft fakultativ. Einen Grund dafür sieht man in dem Aufwand für die Knöllchenbildung und N₂-Fixierung. Die Reaktion der Nitrogenase (des N₂-reduzierenden Enzyms) erfordert viel Stoffwechselenergie:



Rhizobien wie Leguminosen können auch – und das energiesparender – mineralische Stickstoffverbindungen

wie NH_4^+ oder NO_3^- direkt aufnehmen. Sind sie im Boden vorhanden, werden der komplexe Symbioseprozess mit wechselseitiger Genaktivierung und die Nitrogenasesynthese nicht in Gang gesetzt [8, 9, 6]. Der evolutionäre Druck zu einer obligaten Symbiose war so nicht hoch oder stetig genug und ließ mitunter den Verlust der Symbiosekompetenz zu.

Der Effekt der Symbiose zeigt sich im etwas höheren Stickstoffgehalt (Protein) besonders der Samen gegenüber Pflanzen ohne Wurzelknöllchen. Der Gehalt korreliert mit einer rascheren Keimung und dient vermutlich als Ressource für die künftige Knöllchenbildung und von Alkaloiden zur Herbivorenabwehr [7]. Die Symbiose bietet auch Rhizobien Vorteile. Sie vermehren sich in den Knöllchen, werden mit Verbindungen aus der pflanzlichen CO_2 -Fixierung und einer für die N_2 -Bindung notwendig geringen und für die bakterielle Atmungskette hinreichenden O_2 -Konzentration versorgt. Das Gleichgewicht gewährleistet das Leguminosen-(Leg-)Hämoglobin, welches aktive Wurzelknöllchen sichtbar rot färbt (Abbildung 2). Rhizobien in durchlüfteten Böden fixieren N_2 ineffizienter.

Ein neuer Mitspieler

Die symbiotische Win-Win-Situation erweiterte sich seit Einbeziehung der Hülsenfrüchtler in die Landwirtschaft um einen weiteren (fakultativen) Mitspieler und Nutznießer zu einem speziellen Dreiergeschäft (Abbildung 3). Rhizobien verbessern mit den Leguminosen den Ackerboden, dadurch die Ernterträge und die Ernährungsbedingungen der Menschen; der verstärkte Anbau von Leguminosen verbreitet nicht nur die bevorzugten Hülsenfrüchtler, sondern auch ihre mikrobiellen Partner. Man schätzt, dass landlebende Bakterien jährlich etwa 170 Millionen Tonnen N_2 binden, davon allein ein Viertel auf Landwirtschaftsflächen [10].

TAB 1. BEISPIELE FÜR SYMBIOSEN ZWISCHEN LEGUMINOSEN UND RHIZOBIEN*)

Pflanze	Art (Beispiel)	Knöllchenbakterium
Körner- und Ölleguminosen		
Erbse	<i>Pisum sativum</i>	<i>Rhizobium leguminosarum</i> var. <i>viciae</i>
Ackerbohne	<i>Vicia faba</i>	<i>R. leguminosarum</i> var. <i>viciae</i>
Linse	<i>Lens culinaris</i>	<i>R. leguminosarum</i> var. <i>viciae</i>
Gartenbohne	<i>Phaseolus vulgaris</i>	<i>R. leguminosarum</i> var. <i>phaseoli</i> , <i>R. etli</i>
Kichererbse	<i>Cicer arietinum</i>	<i>Mezorhizobium ciceri</i>
Sojabohne	<i>Glycine max</i>	<i>Bradyrhizobium japonicum</i> , <i>B. alkanii</i> (Amerika) <i>Sinorhizobium fredii</i> (China, Indien)
Erdnuss	<i>Arachis hypogaea</i>	<i>R. hainanense</i>
Weide- und Futterleguminosen		
Klee	<i>Trifolium</i> spp.	<i>R. leguminosarum</i> var. <i>trifolii</i>
Lupine	<i>Lupinus luteus</i> <i>L. albus</i> , <i>L. angustifolius</i>	<i>B. lupini</i>
Luzerne	<i>Medicago sativa</i>	<i>S. meliloti</i> , <i>Allorhizobium undicola</i>

*) Daten nach [12]

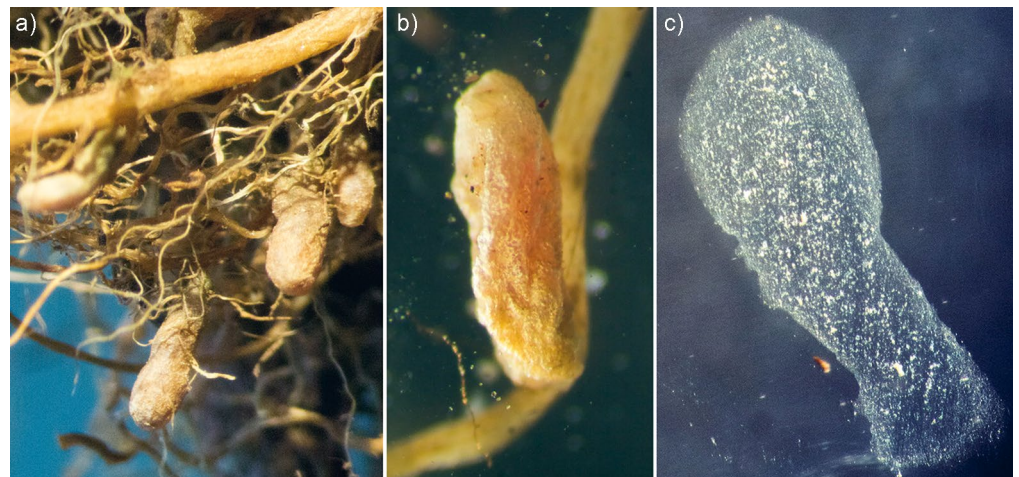


ABB. 2 Wurzelknöllchen des Rotklee (*Trifolium pratense*). a) Wurzelwerk, b) aktives Wurzelknöllchen mit Rotfärbung durch Leg-Hämoglobin, c) membranumhülltes Kompartiment des Knöllchens (Symbiosom) mit Bacteroiden von *Rhizobium leguminosarum*.

Als Hellriegel und Wilfahrt 1888 die symbiotische Bedeutung der Bakterien erkannt hatten und Beijerinck die Rhizobien beschrieben und isoliert hatte [3, 4], studierte der „Pionier der landwirtschaftlichen Bakteriologie“ Lorenz Hiltner die Wirtsspezifität der Rhizobien und patentierte 1896 die Beimpfung von Leguminosensamen [11]. Noch heute kann man Impfkulturen unter dem damals geprägten Namen „Nitragin“ erwerben. Die Behandlung versorgt die Sämlinge mit ihren spezifischen Symbionten und lässt sie in ungedüngten Böden zügig wachsen. Das Verfahren wird heute weltweit zur Ertragssteigerung von Leguminosen-

produkten angewandt, insbesondere beim Anbau von Sojabohnen auf bis zu 20 Millionen Hektar jährlich. In tropischen Plantagekulturen regeneriert man den Boden bevorzugt durch N_2 -bindende Gründungspflanzen [12].

Allerdings konkurrieren die Rhizobien als natürliche Partner der Landwirtschaft mit der künstlichen Stickstoffdüngung. Die Entwicklung des Haber-Bosch-Verfahrens zur Reduktion des Luftstickstoffs machte den Anbau von Getreide ohne natürliche Bodenregeneration möglich. Inzwischen erkennt man die negativen Folgen der permanenten Überdüngung unserer Wiesen und

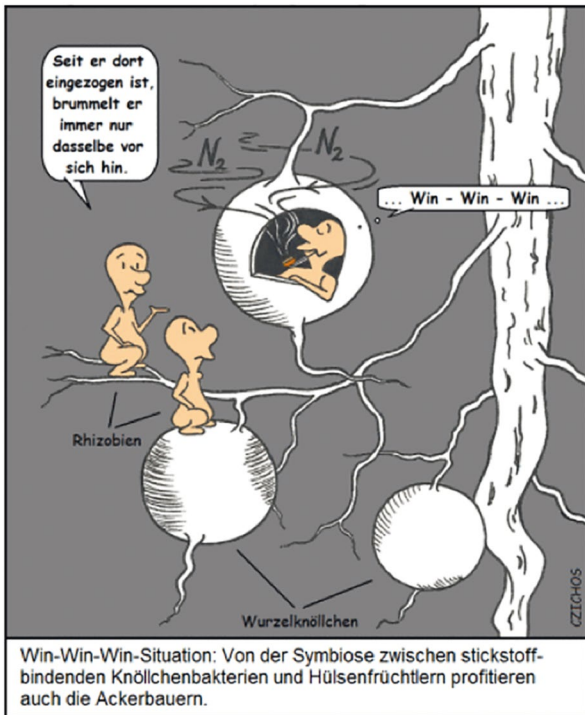


ABB. 3 Rhizobien in Wurzelknöllchen: Symbiose mit mehreren Nutznießern. © Joachim Czichos, www.joachim-czichos.de.

Felder für die Artenvielfalt und das Trinkwasser. Auch deswegen versucht man, die Fähigkeit N_2 -fixierender Bakterien zu nutzen, Teile ihrer DNA in Pflanzen zu übertragen (speziell von *Rhizobium radiobacter*, ehemals *Agrobacterium tumefaciens*), um letztlich Düngung entbehrlich zu machen. Diesen Weg hat die Evolution bereits eingeschlagen, er hat aber (noch) nicht zum N_2 -fixierenden Getreide geführt. Sollte es der Wissenschaft (schneller) gelingen, wäre es ein wahrer Durchbruch. Und wir gewinnen einen mikrobiellen Partner hinzu.

Harald Engelhardt, Martinsried

Literatur

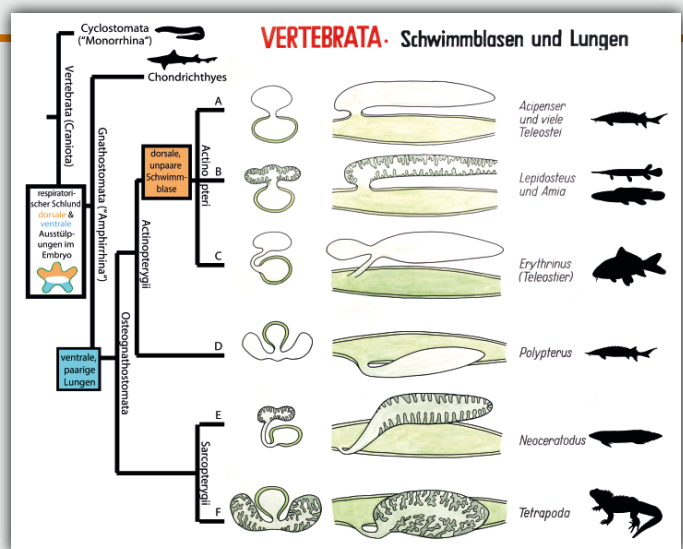
[1] A. Quagliariello et al. (2022). Nat. Commun. 13, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34416-0>

[2] G. C. Wittgenstein (1881). Die Naturgeschichte des Cajus Plinius Secundus. Band 3 (XII. – XIX. Buch), Verlag Gressner & Schramm, Leipzig.
 [3] H. Hellriegel, H. Wilfarth (1888). Zeitschr. Ver. Rübenzuckerindustrie D R 38 (Beilageheft) 1–234.
 [4] M. W. Beijerinck (1888). Bot. Zeitg. 46, 725–735, 741–750, 757–771, 797–804.
 [5] H. Engelhardt (2015). Biospektrum, 21, 232–233.
 [6] K. Wippel et al. (2019). Biologie in unserer Zeit 49, 426–434.
 [7] U. Mathesius (2022). J. Plant Physiol. 276, <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2022.153765>
 [8] S. Zehner, M. Göttfert (2015). Biologie in unserer Zeit 45, 296–302.
 [9] A. Becker (2015). Biospektrum 21, 151–153.
 [10] P. Vorony, D. Derry (2008). in: J.S. Schepers, W.R. Raun (Hrsg.). Nitrogen in Agricultural Systems. Am. Soc. Agronomy, Madison, S. 1–30.
 [11] A. Hartmann (2005). Biospektrum 11, 191–192.
 [12] J. C. G. Ottow (2011). Mikrobiologie von Böden. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

MORGENDÄMMERUNG DER EVOLUTIONSFORSCHUNG

Eine der großen Fragen der Vergleichenden Anatomie beschäftigt sich mit dem Ursprung und der Evolution der Schwimmblasen und der Lungen bei Wirbeltieren. Dem gingen nun Ingmar Werneburg (Tübingen), Uwe Hoßfeld und Georgy S. Levit (Jena) wissenschaftshistorisch nach und sind auf erstaunliche Dokumente gestoßen. Untersuchungen der 1930er Jahre zeigten, dass sich der hintere Schlundbereich der Wirbeltiere dorsal in eine unpaare Schwimmblase und ventral in eine paarige Lunge entwickelt. Beide Gasorgane können respiratorische (Atmung) als auch pneumatisch-statische Funktionen übernehmen. Dabei treten Lunge und Schwimmblase aber nie gleichzeitig auf. Ihre Bildung hängt von der Fortbewegungsweise und den damit verbundenen Körperproportionen der Tiere, also von epigenetischen Faktoren, ab. Fische, die in der Wassersäule vertikal schwimmen, haben hohe ovale Körper, die dorsal Platz für die Schwimmblase bieten. Im bewachsenen Uferbereich lebende Fische, aus denen im Oberdevon auch die Landwirbeltiere entstanden, haben eher flache Körper mit weiten Flossen und beidseitig des Herzens können sich Lungenflügel ausbreiten.

Mit diesem Thema beschäftigten sich bereits keine Geringeren als Ernst Haeckel und Charles Darwin, wie ein jüngst entdeckter Briefwechsel von 1868 belegt. Ein Mitarbeiter von Haeckel, Nikolai Miklucho-Maclay, hatte eine Ausstülpung im oberen Schlundbereich bei Haijischen entdeckt und wollte damit zeigen, dass diese vermeintliche Schwimmblase bei diesen als ursprünglich betrachteten Tieren zuerst auftrat. Haeckel und Darwin verstrickten sich in eine hitzige Diskussion über die Bedeutung des Fundes. Für die Wissenschaftsgeschichte von größter Bedeutung ist, wie die beiden Heroen der Evolutionsbiologie ihre Gedanken entwickelten. Während der Theoretiker Darwin eine schärfere Formulierung evolutionärer Mechanismen verwendete, konnte Haeckel als Morphologe erstmals ein tief durchdachtes Stammbaum-Schema der Wirbeltiere als Basis seiner Argumentationskette vorlegen. Stärken und Schwächen beider Ansätze veranschaulichten



lichen eindrücklich diese Anfangsphase der Evolutionsforschung. Dabei ist vor allem Haeckels Beitrag nicht zu unterschätzen, der mit seinem morphologischen Denken „Blätter und Farbe“ in Darwins nacktes Stammbaumdiagramm einführte.

Literatur:

[1] I. Werneburg et al. (im Druck). Darwin, Haeckel, and the “Mikluskian gas organ theory”. Developmental Dynamics, <https://doi.org/10.1002/dvdy.661>
 [2] I. Werneburg, U. Hoßfeld (2024). Die Bestimmung der Morphologie – Haeckel, Darwin und ein Homologie-Problem. Naturwissenschaftliche Rundschau 77 (1): 4-9.

AUSSERSCHULISCHE LERNORTE

Das XLAB – Göttinger Experimentallabor für junge Leute

Naturwissenschaftliche Forschung und Schule treffen im XLAB, einem der größten Schülerlabore Deutschlands, aufeinander: Interessierte Schüler/-innen und Lehrkräfte wenden in professionell ausgestatteten Laboren aktuelle Techniken an und nutzen digitale Werkzeuge, um spannende Fragen aus der Biologie, Chemie, Physik und Informatik zu beantworten. Diese Erfahrung hilft bei der Studienorientierung und erleichtert den Übergang an die Universität.

Mit seinem Konzept „Hands-on – Wissenschaft zum Anfassen“ hat das XLAB seit seiner Gründung im Jahr 2000 mehr als 200.000 Jugendliche, junge Erwachsene und Lehrkräfte für die Wissenschaft begeistert. Das moderne Laborgebäude (Abbildung 1) liegt auf dem naturwissenschaftlichen Campus der Georg-August-Universität Göttingen in Sichtweite der Fakultäten, der Universitätsmedizin sowie der ansässigen Leibniz- und Max-Planck-Institute und bietet eine motivierende Umgebung, um Neues zu lernen und „Uni-Luft“ zu schnuppern. Auf dem Programm stehen mehr als 200 Experimente für die Sekundarstufe II, die in dieser Form an Schulen in der Regel nicht durchgeführt werden können, beispielsweise die Polymerase-Kettenreaktion (PCR), die Anwendung der Genschere CRISPR/Cas,

die Präparation von Chromosomen aus Zellkulturzellen, ELISA (*enzyme-linked immunosorbent assay*), die Messung des Gaswechsels während der Photosynthese, Experimente mit selbst präparierten Biomembranvesikeln, die Bestimmung des Membranpotenzials und der Flickerfusionsfrequenz, die Präparation eines Gehirns vom Schwein mit den Hirnnerven, die Elektronenmikroskopie, die Quantifizierung des Fettgehaltes von Lebensmitteln, die Synthese und Analyse von Duft- und Aromastoffen, die Synthese von Biokunststoffen aus Holz, Identifizierung von Substanzen mit Massenspektrometrie, der Aufbau von Festkörperlasern und vieles mehr. Schüler/-innen der Sekundarstufe I beschäftigen sich beispielsweise mit Infektionskrankheiten, Lumineszenz, medizininfor-

matischem Programmieren oder Astronomie.

Mit DNA die Evolution „vermessen“

Sind bestimmte Arten miteinander verwandt und wenn ja, wie eng? Im XLAB gehen Schüler/-innen im Klassenverband innerhalb eines Tages (in der Regel 9:00–17:00 Uhr) einer Leitfrage wie dieser nach, bestimmen dazu die Verwandtschaft von Bakterien anhand von DNA-Sequenzen (Abbildung 2) und erstellen einen phylogenetischen Stammbaum. Dabei lernen sie die Arbeitsweise der molekularen Phylogenie kennen und nutzen die Variationen in den konservierten Genen, die die ribosomale RNA (rRNA) kodieren, als Gradmesser für die Verwandtschaft. Im S1-Labor führen sie eine Polymerase-Kettenreaktion (PCR) durch. Die Sequenzen der DNA-Fragmente erhalten sie aus Online-Datenbanken und analysieren sie mit digitalen Werkzeugen, die in der biologischen Forschung ein ebenso alltägliches Arbeitsmittel sind wie beispielsweise Mikropipetten und Reaktionsgefäße.

Ein Aktionspotenzial braucht seine Zeit

Die Spannungs-Zeit-Kurve eines Neurons während eines Aktionspotenzials ist ein typischer Gegenstand



ABB. 1 Die farbigen Etagen des XLAB-Laborgebäudes auf dem naturwissenschaftlichen Campus der Georg-August-Universität Göttingen stehen für Physik, Chemie, Biologie und Informatik. Foto: M. Mehle.



ABB. 2 Im Molekularbiologie-Labor der Sicherheitsstufe 1 ist die Agarosegelelektrophorese eine Standardmethode bei der Untersuchung von DNA, beispielsweise um der Evolution von Bakterien auf die Spur zu kommen. Foto: XLAB.

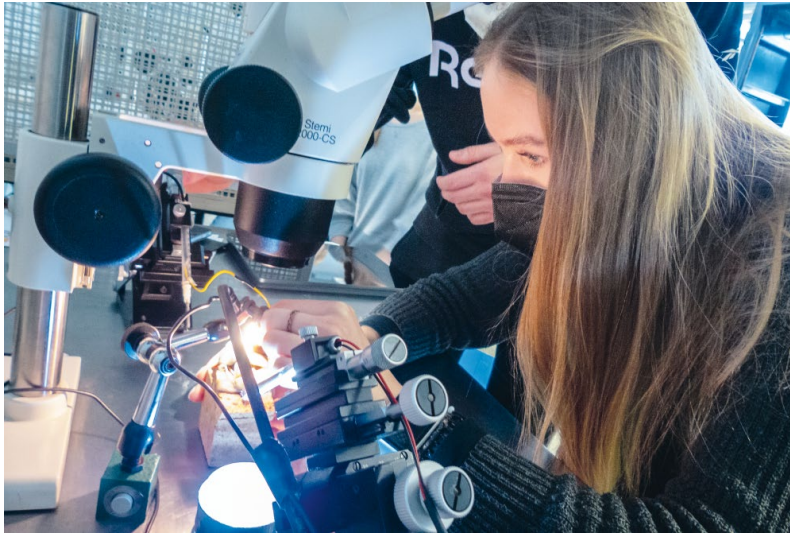


ABB. 3 Nach zwei Tagen handwerklichen Übens und Trainings an den Geräten zeichnen Schüler/-innen das Aktionspotenzial einer lebenden Nervenzelle auf. Foto: XLAB.

von Abiturprüfungen. Im XLAB nehmen die Schüler/-innen Aktionspotenziale selbst auf und nutzen dabei schwingungsgedämpfte Tische, Faraday-Käfige, Mikroskope, Mikromanipulatoren und -elektroden. Um ein Aktionspotenzial einer lebenden Nervenzelle aufzuzeichnen, benötigen ungeübte Kursteilnehmende zwei Tage, während der sie Schritt für Schritt die Handhabung der Geräte lernen, ihre handwerklichen Fähigkeiten verfeinern und sich mit vielen Zwischenergebnissen von einfachen zu komplexeren Tätigkeiten vorarbeiten (Abbildung 3). Viele

Teilnehmende bringen nach dieser Erfahrung einen großen Respekt vor der Leistung der Forscher/-innen zum Ausdruck, die das neurobiologische Wissen im Lauf der Zeit erarbeitet und seine Grenzen immer weiter hinausgeschoben haben.

Von den Daten zum Modell und zurück

Welche Lehrkraft kennt nicht das Problem, die auf einer freilandökologischen Exkursion gesammelten Daten und Befunde vor dem Hintergrund ökologischer Konzepte und Modelle – wie den Trophiestufen in

einem See oder im Wald oder dem globalen Kohlenstoff- oder Stickstoffkreislauf – zu interpretieren? Häufig scheinen Befunde und Erwartungen sich sogar zu widersprechen, und der Weg der Erkenntnisgewinnung kann von den Schüler/-innen nicht vollständig beschriftet werden. Grund ist, dass Daten je nach den konkreten Rahmenbedingungen, beispielsweise dem Wetter oder der Jahreszeit, sowie statistisch schwanken. Im XLAB fügen die Schüler/-innen ihre Daten in Langzeiterhebungen ein und können sie mit diesem Hintergrund sinnvoll interpretieren und die ökologischen Zustände am ausgewählten Standort bewerten (Abbildung 4).

Fit fürs Studium

Um den Umgang mit Daten und deren Auswertung geht es auch in der Systembiologie (Abbildung 5). Um sich ein Bild von den genetischen Regulationsvorgängen innerhalb einer Zelle zu machen und ein Modell des Zuckerstoffwechsels von *Escherichia coli* zu entwickeln und zu erproben, generieren Schüler/-innen im Labor mit ihren Bakterienkulturen viele verschiedene Daten, die in einem iterativen Prozess in die Modellbildung, -evaluierung und -verbesserung einfließen. Systembiologisch arbeiten Schüler/-innen im XLAB bei einem einwöchigen *Science Camp* in den Ferien oder bei einer Kursfahrt und reflektieren dabei, wie ihnen persönlich die Arbeit im Labor und am Computer liegt. Wer kurz vor dem Studium noch mehr Sicherheit gewinnen will, kann sich zwischen Schule und Studium im Crashkurs „Fit fürs Studium“ auf naturwissenschaftliche Praktika im Haupt- und Nebenfach vorbereiten.

Gemeinsam für eine nachhaltige Entwicklung

Zusammenarbeit wird im XLAB gelebt durch die Kooperation der verschiedenen Fachbereiche im Haus und mit aktiven Wissenschaftler/-innen. Studierende erar-



ABB. 4 Die Erhebung und Verarbeitung vieler Daten ist erforderlich, um in der Freilandökologie zu Aussagen über den Standort und das Ökosystem zu gelangen. Foto: XLAB.

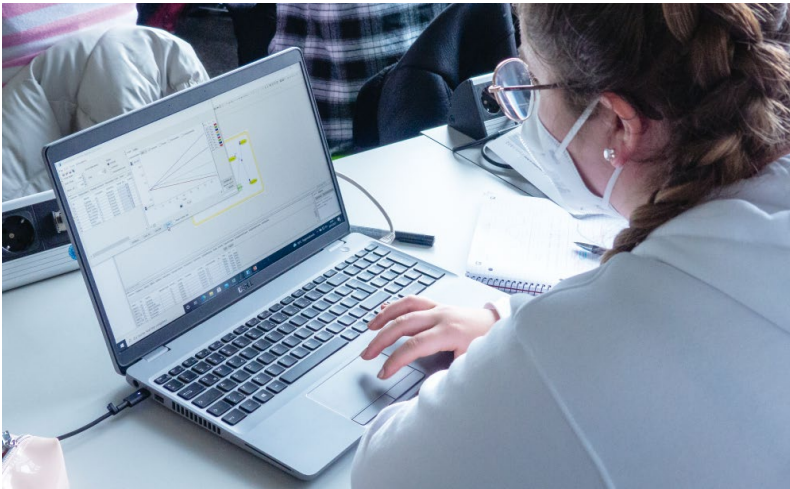


ABB. 5 Digitale Werkzeuge helfen bei der Entschlüsselung von Genregulationsvorgängen im Science Camp „Systembiologie“. Foto: XLAB.

beiten im Rahmen ihrer Qualifikationsarbeiten schülergerechte Experimente und Unterrichtsmaterialien zu aktuellen Forschungsthemen. Bei der Bildung für eine nachhaltige Entwicklung (BNE) gehen typischerweise die Disziplinen Biologie und Chemie oder Chemie und Physik Hand in Hand. So sind beispielsweise für eine gute medizinische Versorgung biologisches Wissen über den Organismus, chemische Wirkstoffe und auf physikalischen

Prinzipien beruhende diagnostische Methoden erforderlich. Andere Beispiele sind neuartige Solarzellen und biobasierte Kunststoffe, wie in der Medizin oder bei den Themen Kunststoffe oder Solarzellen. Kurse mit BNE-Schwerpunkt sind fächerübergreifend auf einer eigenen Webseite zusammengestellt. Die XLAB-Dozierenden freuen sich über Vorab-Informationen zur Lerngruppe und gehen auf Besonderheiten in der Regel ein. Zu Ferien-

und Nachmittagsangeboten melden sich interessierte Schüler/-innen einzeln an.

Ein XLAB-Aufenthalt bereichert den Unterricht, weckt Verständnis für naturwissenschaftliche Forschung, kann das Interesse an den MINT-Fächern steigern und zur Aufnahme eines naturwissenschaftlichen Studiums motivieren.

Almut Popp, XLAB – Göttinger Experimentallabor für junge Leute

BESUCH IM XLAB

Die in diesem Beitrag vorgestellten Themen stellen nur einen Ausschnitt aus einem (viel) größeren Angebot dar. Auf der Webseite <https://xlab-goettingen.de> sind viele weitere Themen und aktuelle Veranstaltungen zu finden.

Lehrkräfte buchen dort online ihren Wunschtermin oder sie lassen sich telefonisch beraten (ab 210 EUR/Schülergruppe).

Schüler/-innen, die mehr wissen wollen, melden sich zu Science Camps (Klasse 10–13, 80 EUR, „Fit fürs Studium“ 100 EUR), Nachmittagsangeboten (Klasse 4–13, kostenfrei) oder Forscherferien (Klasse 5–10, 140–190 EUR) an.

Lehrkräfte melden sich online zu 1- bis 2-tägigen Fortbildungen in Präsenz (0–20 EUR) oder zu kostenfreien 2-stündigen Online-Fortbildungen an.

Rufen Sie uns an, wir beraten Sie gerne unter 0551 39 28840.

MUMIEN UNTER DER LUPE

In den Archiven der Friedrich-Schiller-Universität Jena lagern umfangreiche Sammlungsbestände – darunter auch rund 20 Mumienfragmente. Forschende aus der Ur- und Frühgeschichtlichen Archäologie, Biologie und Medizin haben diese Stücke erstmals umfassend untersucht und nun ihre Ergebnisse in den *Annals of the History and Philosophy of Biology* vorgelegt. Die meisten Stücke sind Teil der Medizinhistorischen Sammlung von Theodor Meyer-Steineg. Der Augenarzt habilitierte sich 1907 an der Universität Jena für die Geschichte der Medizin, lehrte anschließend als Professor bis 1933 und veröffentlichte 1921 gemeinsam mit einem Kollegen eine „Geschichte der Medizin“. Während seiner Zeit in Jena trug er eine aus etwa 700 Objekten bestehende medizinhistorische Sammlung zusammen, zu der auch die Mumien gehörten. „Woher Meyer-Steineg diese bezogen hat, lässt sich heute nicht mehr nachvollziehen“, erklärt Dr. Enrico Paust. Einige wenige Fragmente stammten zudem aus der Sammlung des Insektenforschers Otto Schmiedeknecht, der 1877 bei Ernst Haeckel promoviert wurde. Alle Mumien stammen aus nachchristlicher Zeit, genauere Angaben sind aber aufgrund des Erhaltungszustands nicht möglich.



Dr. Enrico Paust betrachtet verklebte Textilfragmente einer Ägyptischen Mumie. Foto: Jens Meyer (Universität Jena).

Ein besonderes Augenmerk legte das Jenaer Forschungsteam auf die Gewebe, mit denen die Mumien eingewickelt sind. „Bisher konzentrierten sich die Forschungen bei solchen Stücken in der Regel auf anthropologische Untersuchungen und den Mumifizierungsprozess. Wir haben die Textilrestauratorin Friederike Leibe-Frohnsdorf hinzugezogen, die sich u. a. die vorliegenden Gewebeararten und die Fadendichte genau angeschaut hat“, sagt der Biologiedidaktiker Prof. Uwe Hoßfeld, der ebenfalls am Projekt beteiligt war. Große Unterschiede in der Gewebefeinheit lassen darauf schließen, dass die Textilien, mit denen die ägyptischen Mumien umwickelt waren, für einen unterschiedlichen Gebrauch hergestellt wurden. Die Gewebe bestehen in erster Linie aus Flachs oder Hanf, die Verwendung von Baumwolle bei einigen Stücken gab aber auch eine Datierungshilfe, da ein Baumwollanbau vor Ort erst ab dem ersten nachchristlichen Jahrhundert nachzuweisen ist.

Literatur:

E. Paust et al. (2023). Mumienfunde aus der Jenaer Sammlung Theodor Meyer-Steineg, *Annals of the History and Philosophy of Biology*, <https://doi.org/10.1177/00131644231182486>



MANAGEMENT-FALLSTRICKE, TEIL 19

Illusorische Wahrheit

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?

Schon seit Stunden wehten dicke Flocken vom Himmel. Eine weiße, kalte Schicht bedeckte die Erde. Eichhörnchen Emilia war bereit für ihren Winterschlaf. Gemeinsam mit den Murmeltieren, den Fledermäusen und den Siebenschläfern gähnte sie um die Wette, bevor sie schließlich alle in einen überaus tiefen, langen Schlaf fielen. Kröte Kerstin war froh, endlich Ruhe zu haben. Fettgefressen vom Herbst brauchte sie nun nichts weiter als absolute Ruhe. Die Natur schien stillzustehen. Tief unter dem Schnee und dem Eis war es aber lange nicht überall still.

Jungkönigin Hannah Hummel schien zwar bewegungslos, lauschte aber gespannt den heiteren Erzählungen des dunklen Fellbüschels im Hintergrund. Gerade erst geschlüpft, saß sie mit Vera Wespe und Horten-

sia Hornisse in der sicheren Erdhöhle. Mäusedame Mara leistete ihnen Gesellschaft. Mara hatte sich einen ordentlichen Vorrat an Leckereien mitgebracht und hatte somit alle Punkte auf ihrer To-do-Liste abgehakt. Manni Maulwurf hatte noch keine Zeit zum Ausruhen. Ausgiebig stapelte er die langen Regenwürmer in seiner Kammer bis unter die Decke. Zur Belustigung aller gab er dabei seine gesammelten Geschichten zum Besten. Gemeinsam hingen Hannah und die anderen an Manni Maulwurfs Lippen: „Ihr kennt sicher Emilia, unser Eichhörnchen“, fragte er in die Runde. Und als er einstimmiges Gemurmel hörte, fuhr er mit seiner Erzählung fort. „Genau diese Emilia hat es doch tatsächlich geschafft, die ganzen Waldbewohner an der Nase herumzuführen.“

FAKTENBOX

Je öfter man eine Sache hört, umso eher ist man davon überzeugt, dass sie auch der Wahrheit entspricht. Warum unser Gehirn sich so verhält, ist nicht gesichert, aber dass es so ist, wurde in mehreren Studien eindeutig bewiesen. Eichhörnchen halten keinen Winterschlaf! Genau so, wie Sie vielleicht dem Eichhörnchen auf den Leim gegangen sind, verhält es sich täglich mit dem Wahrheitsgehalt vieler weiterer Informationen. Das ist weiter nicht schlimm. Es wird dann aber zur Last, wenn diese falsche Einschätzung Einfluss auf die Prozesslandschaft, die Produkte, Projekte und Mitarbeiter in Ihrem Unternehmen nimmt. Der Projekt-Meilenstein muss in fünf-facher Ausfertigung an verschiedenen Stellen im Unternehmen abgelegt werden? Das Dokument xy muss handschriftlich signiert werden? Das müssen Sie so tun, weil es von den Behörden verlangt wird? Oder weil es schon immer so getan wurde und doch auch wirklich jeder weiß, dass es so ist? Folgen Sie nicht blind allem, was sich so über die Jahre eingebürgert hat. Trauen Sie sich „Warum?“ zu fragen, und forschen Sie nach, wer das wann und warum entschieden hat, und wo das tatsächlich steht. Nicht selten werden sie feststellen, dass sich die Randbedingungen geändert haben oder viele bürokratische Hürden irgendwann selbst diktiert wurden und später nie hinterfragt wurden.

Die Jungköniginnen lauschten neugierig. „Jaja, unsere Emilia wurde letztes Jahr zum Abschluss der Herbstsaison gebeten, ihre tollen Kletterkünste hinten beim alten Haselnussstrauch vorzuführen“, begann Manni Maulwurf. „Das fand sie aber nicht so lustig, denn sie hasste es, auf Bühnen zu stehen. Jede Nacht überlegte sie in ihrem Kobel, welches Kunststück wohl am eindrucklichsten erscheinen mochte und wie sie ihre Aufregung in den Griff bekommen könnte. Ihre Vorstellung musste auf alle Fälle diejenige der Grauhörnchen um Klassen übertrumpfen; das war klar. Doch der Teufel ist ein Eichhörnchen, dachte sie sich wohl, und so kam es zu einer äußerst unangenehmen Überraschung am Tag der geplanten Vorstellung. Emilia war nämlich einfach verschwunden. Sie tauchte schlicht und einfach nicht auf. Stattdessen hatte sie ein kleines Plakat in die Vorstellung der Grauhörnchen gemogelt, auf dem zu lesen war: ‚Wie Sie alle wissen, befinden sich die Eichhörnchen bereits im tiefen Winterschlaf, die Grauhörnchen werden ihr Bestes geben, um die wahren Kletterkünstler zu vertreten. Bitte werfen Sie Ihre Spende in den Kobel links oben‘. Somit hatte Emilia ihre ungeliebte Vorführung umgangen und gleichzeitig einen ganzen Kobel voller Nusspenden erhalten.“ „Echt clever, unsere Emilia“, säuselte Mäusedame Mara beeindruckt. „Und dieses Jahr?“, erkundigte sich Hortensia Hornisse. „Dieses Jahr wurde die Vorführung aus Rücksicht auf unsere Eichhörnchen nicht durchgeführt“, wusste Manni Maulwurf zu berichten. „Sie halten zu der Zeit schließlich ihren Winterschlaf.“

Und die Moral von der Geschichte: Stört den Winterschlaf der Eichhörnchen nicht.

*Ihre Andrea Hauk,
andreabauk@gmx.de*

RÜCKBLICK

- 3/23 *Warum sterben wir an einem Defekt im Molybdän-Stoffwechsel?*
- 3/23 *Wie menschenpezifische Gene den Primaten-Neokortex vergrößerten*
- 3/23 *Die Art als Reproduktionsgemeinschaft*
- 3/23 *Fantastische Hefen in der Geschichte der Menschheit*
- 3/23 *Wissen schaffen mit Citizen Scientists*
- 3/23 *Aufbau von Viren und die Rolle der viralen Proteasen*
- 4/23 *Die Infrarotrezeptoren feuerliebender Insekten*
- 4/23 *Ameisen – ein Erfolgsmodell der Evolution*
- 4/23 *Pflanzliche Milchalternativen*
- 4/23 *Multitasking in evolutionsgeschichtlich alten Epithelmuskelzellen*
- 4/23 *Wissenschaft, die Wissen schafft*
- 4/23 *Mit UV-Licht der Natur auf der Spur*

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 Beiträgern oder Teilen von ihnen einzelne Vervielfältigungsstücke hergestellt werden. Der Inhalt dieses Heftes wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber, Redaktion und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

BiuZ 2/2024 erscheint im Mai 2024

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

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

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



IM NÄCHSTEN HEFT

Kleine Juwelen im Ölschiefer

Die Fossilagerstätte Grube Messel – ein UNESCO-Naturdenkmal – ist besonders für ihre herausragend gut erhaltenen Wirbeltiere berühmt. Weniger bekannt ist, dass in Messel auch sehr viele fossile Insekten gefunden werden, die einzigartige Einblicke in eine Zeit vor 47,5 Millionen Jahren erlauben.



Foto: U. Kiel.

Pflanzenzüchtung durch Genom-Editierung

Für eine hocheffiziente und gleichzeitig umweltschonende Landwirtschaft ist die Züchtung neuer Pflanzensorten unerlässlich. Die Neuen Genomischen Techniken (NGT) liefern hierfür wertvolle Werkzeuge, mit denen bereits mehr als 60 Kulturpflanzenarten züchterisch bearbeitet wurden. Ein Entwurf der Europäischen Kommission für ihre Neuregulierung liegt vor.

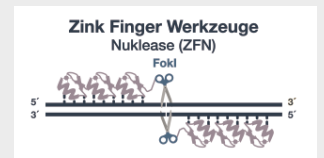
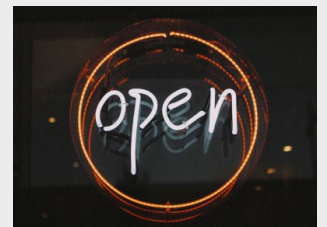


Abb.: R. Boehm et al.

Offene Daten, offene Wissenschaft?

Mit der „UNESCO-Empfehlung für offene Wissenschaft“ haben 193 Staaten im Herbst 2021 gemeinsame wissenschaftspolitische Leitlinien formuliert, die von Publikationen, Daten und Lehrmaterialien bis hin zur Öffnung von Forschungsprozessen für gesellschaftliche Akteure reichen. Vier Autor/-innen mit sehr unterschiedlichem Hintergrund beleuchten, welchen Effekt die wachsende Bewegung hin zu offener Wissenschaft auf das Alltagsgeschäft von Biolog/-innen hat.

Abb.: Pexels über www.pixabay.com**Umwelt-DNA aus der Vergangenheit**

Alle Organismen hinterlassen DNA-Spuren in ihrer Umgebung, die unter den richtigen Bedingungen über sehr lange Zeit erhalten bleiben können. Alte Umwelt-DNA kann helfen, vergangene biologische Vielfalt zu rekonstruieren und genomische Variationen zu erkennen, selbst wenn Arten keine sichtbaren Überreste hinterlassen.



Foto: A. Junginger, L.S. Epp, M. Bálint

200 Jahre Nathanael Pringsheim

Der Pionier der Botanik und Algenforschung wurde weltberühmt, als er in einer unscheinbaren Alge erstmals die Befruchtung in einem lebenden Organismus beobachtete. Damit zeigte er, dass Sexualität ein allgemeines Lebensprinzip ist und nicht nur das Privileg Höherer Pflanzen und von Tieren.

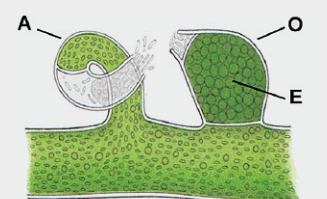


Abb.: Zeichnung von N. Pringsheim (1855)

ONLINE



KARRIERE-EVENT

FÜR NATURWISSENSCHAFTLER

2024

07. MÄRZ

06. JUNI

26. SEPTEMBER

05. DEZEMBER



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

**Kostenfrei
anmelden!**





Verband | Biologie, Biowissenschaften
& Biomedizin in Deutschland

**GEMEINSAM
FÜR DIE**

BIEWISSENSCHAFTEN

Gute Gründe, dem VBIO beizutreten:

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



www.vbio.de

Jetzt beitreten!

