

4 | 2023

VBio

Verband | Biologie, Biowissenschaften
& Biomedizin in Deutschland

EPIGENETIK
Die Plastizität
von Ameisen

EXKURSION
Lebewesen unter
der UV-Lampe

**LEBENSMITTEL-
TECHNOLOGIE**
Pflanzliche
Milchalternativen



BIOLOGIE

IN UNSERER ZEIT

**Leben
mit dem Feuer**



Open Science und die Leichtigkeit des wissenschaftlichen Publizierens

Liebe Leserinnen und Leser, liebe Mitglieder des VBIO, Lallerorten werden *Open Access* und *Open Science* propagiert. Warten rosige Zeiten auf die Wissenschaftler? Wissenschaft wird transparenter, denn Methoden und Daten werden leichter zugänglich. Die Zeiten der Verteidigung fachlicher *Claims*, der Karrierebahnenden Publikationen in Superjournals und der Überbewertung von Impact-Faktoren wären vorbei. Ausschließlich Innovation, Sorgfalt und Erkenntnisgewinn zählen und Empathie begleitete demokratisch und fair den Prozess des Publizierens.

Leider ist der Weg zu diesem Paradies steinig und in großen Teilen utopisch. Fortschritt hängt vom Wettstreit um innovative Ideen und Hypothesen ab. Kluge Experimente müssen wegweisend interpretiert werden. Allerdings verlangt überzeugender Fortschritt die Offenlegung aller methodischen Details und der erhaltenen Ergebnisse durch Veröffentlichung. Standards an unabhängiger Wiederholung und statistischer Auswertung sind einzuhalten [1]. Die so über die Zeit akkumulierten Beiträge zum Erkenntnisgewinn sind der zentrale Baustein der Karriereentwicklung, für erfolgreiche Drittmittelanträge und die Qualifizierung für wissenschaftliche Stellen.

Wie allerdings finden Wissenschaftler den optimalen Weg zum Publizieren ihrer Ergebnisse? Ideal und Realität scheinen auseinanderzuklaffen. Gutachter und Kommissionen sind gehalten, den geleisteten wissenschaftlichen Fortschritt und nicht das Renommee von Zeitschriften zu bewerten. Die in den Kommissionen geführten Diskussionen und Rankinglisten erfassen vielfach auch andere Kriterien wie Impact-Faktoren, kumulative Impact-Faktoren und Reputation der Journale.

Kollegen aus dem Fachkollegium Zoologie der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) stellen in diesem *Biuz*-Heft aus ihrer Sicht vor, wie Wissenschaftler die am besten geeigneten Zeitschriften zum Veröffentlichenden auswählen sollten [2]. Es ist ein starkes Plädoyer dafür, Zeitschriften mit hohen Qualitätsstandards und Bezug zu wissenschaftlichen Fachgesellschaften zu wählen. Dadurch kann eine hohe Qualität des Begutachtungsprozesses erreicht und Überkommerzialisierung vermieden werden. Und zusätzlich würden Fachgesellschaften gestärkt. Diese Empfehlungen sind zu begrüßen.

Daneben gibt es allerdings vielfältige Randbedingungen oder sogar Zwänge, die die Entscheidungen der Autoren zum Veröffentlichenden hinsichtlich Zeitpunkt und Zeitschriftenauswahl im Alltag beeinflussen. Wesentliche Kriterien sind die verfügbaren Ressourcen in Form von Projektmitteln zur Fortführung des Projekts, Mittel zum Publizieren, anstehende Berichte oder Anträge, Karriereaspekte und Konkurrenz. Dadurch ergibt sich ein Entscheidungsbaum in etwa so wie in der Abbildung 1 vorgeschlagen.



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

Selbst bei sehr guter Datenlage, die die Hypothesen aus Sicht der Autoren umfassend und schlüssig belegen, und bei hohem Innovationsgrad ist das Einreichen bei *high profile*-Journals riskant. Dort treffen vielfach professionelle Editoren nach nicht transparenten Kriterien eine Vorauswahl. Erfolgt die Entscheidung gegen die Begutachtung der Arbeit, liegt im besten Fall die Ablehnung binnen Wochenfrist vor und das *journal hopping* kann beginnen. Die enttäuschten Autoren suchen eine andere Zeitschrift mit etwas niedrigerem Profil und der Einreichungsprozess beginnt von vorne. Es kann aber auch Wochen bis zur unmittelbaren Ablehnung dauern.

Wurde die Arbeit zur Begutachtung durch wissenschaftliche Kollegen im Peer-Review-Verfahren hinausgeschickt, ergibt sich eine neue Situation. Die Gutachter bewerten die Qualität der Arbeit anhand vorgegebener Leitlinien, aber vor allem aus ihrem eigenen, subjektiven Blickwinkel. Häufig spielt eine Rolle, wie sie selbst diese Studie angelegt hätten oder ob die Ergebnisse zu den eigenen Anschauungen passen. Folglich fehlt vielen Gutachten der wünschenswerte unterstützende Tenor und die Begeisterung für Neues selbst bei geringerem Erkenntnisgewinn. Der Begutachtungsprozess zieht sich in die Länge und kann Monate dauern – vor allem dann, wenn die Editoren keine Gutachter finden. Hier ist nicht der Platz, alle Kriterien und neuen Konzepte zu diskutieren, wie solche zweifelhaften Begutachtungen vermieden werden können. Erwähnt seien die Offenlegung der Gutachten und die Gründung neuer Journale mit maximaler Transparenz. Bisher führen diese neuen Konzepte nur zu kleinen Veränderungen und erweitern die Vielfalt an Journals.

Die Empfehlung von Bucher et al. [2] fußt auch auf der Annahme, dass der Begutachtungsprozess in der Regel transparent, fair und zielführend ist, dass die renommierten Zeitschriften einen schnellen Begutachtungsprozess realisieren und die Editoren zeitnah entschei-

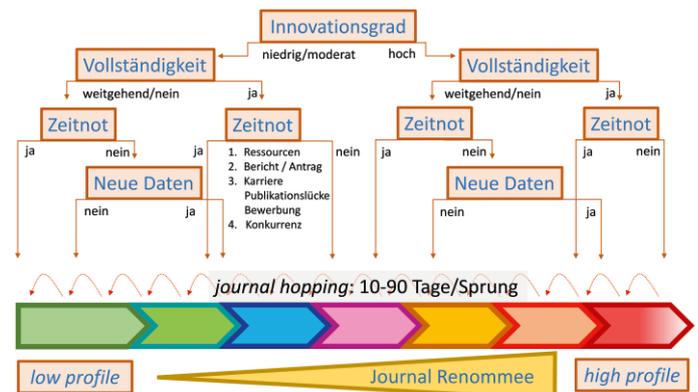


Abb. 1 Entscheidungsweg im Publikationsprozess. Die farbigen Pfeile symbolisieren unten Journale in der Skala von niedrigem Renommee (*low profile*) links zu hohem Renommee (*high profile*) rechts. Der Entscheidungsweg wird im Text besprochen.

den. Vielfach führen Forderungen der Gutachter nach zusätzlichen Daten zur „Explosion“ der *supplementary materials*, so dass inzwischen häufig der größere Teil der Ergebnisse nicht in der Publikation gezeigt wird. Es ist zu hinterfragen, ob die umfangreichen Nachforderungen von Gutachtern angemessen sind und die Qualität der Publikationen hinreichend heben. Oder schaffen sie Benachteiligungen durch Abverlangen kompletter „Stories“? Klar ist auf jeden Fall, dass sie die Veröffentlichung um Monate oder viele Jahre hinauszögern.

Bei vielen Zeitschriften, die dem hybriden Modell aus Subskription und *Open Access* oder ausschließlich dem *Open Access*-Modell folgen, fallen Publikationsgebühren an (*Article Processing Charges*, APCs), die sich in erstaunlichen Höhen bewegen können. So listet der Elsevier-Verlag mehr als 2700 Zeitschriften mit Gebühren von bis zu 9030 € für *Cell*, der Wiley-Verlag mehr als 1900 Journale mit APCs von bis zu 5900 € für *EMBO Reports* und Springer *Nature* mehr als 2700 Journale mit vielen *Nature*-Abkömmlingen, beispielsweise *Nature Genetics*, *Nature Ecology & Evolution* oder *Nature Climate Change* mit APCs in Höhe von 9750 €, zzgl. MwSt! Erkennbar steigen die APCs mit Renommee und Impact-Faktor. Dient dieses Geschäftsmodell der Wissenschaft? Oder ist es ein Selbstbedienungsladen mit hohen Gewinnen? Nationale Verträge, sogenannte „Deals“, helfen hier nur punktuell.

Neben den klassischen Verlagen haben sich in den letzten Jahren neue Verlage positioniert, die eine rasch zunehmende Zahl an Zeitschriften im *Open Access*-Modell herausgeben. Manche dieser Zeitschriftensammlungen wurden von etablierten Verlagen übernommen. Andere bewegen sich auf dem Pfad der *predatory journals* ohne ersichtliche oder angemessene Qualitätskontrolle [3] (Beispiel einer interaktiven Liste [4]). Diese Raubtierjournale verstopfen täglich unsere E-Mail-Inbox mit absurden Angeboten zum leichtesten Publizieren. Allerdings gibt es auch neue Verlage mit hochwertigen Zeitschriften. Der Artikel von Bucher et al. [2] greift diese Problematik auf und rät Autoren, sich daran zu orientieren, in welchen Zeitschriften Kollegen zuletzt publiziert haben.

Ein vielfach geäußerter Vorwurf gegenüber den neuen Verlagen ist, dass sie im Vergleich zu den klassischen Verlagen eine rein kommerzielle Strategie verfolgten. Die durchschnittlichen APC der neuen Angebote liegen jedoch weit unter denen der klassischen Verlage. Das Argument der Kommerzialisierung erscheint deshalb nicht schlüssig. Es sind andere Kriterien, die Raubjournale und Raubverlage kennzeichnen, insbesondere ein schlechtes oder fehlendes Qualitätsmanagement: Vielfach erfolgt bei diesen neuen Zeitschriften die Begutachtung in kurzer Zeit. Die Gutachter werden unter Druck gesetzt. Dies muss nicht zu mangelhafter Begutachtung führen. Als Editor klassischer Zeitschriften erlebe ich zunehmend, dass bis zu zehn, gar 20 potenzielle Gutachter angeschrieben werden müssen, um das Peer-Review-Verfahren durchzuführen. Wir sind bei einem System angelangt, in dem jeder an Überlastung leidet. Letztlich erbarmen sich Wissenschaftler, die möglicherweise nicht die allerbeste fachliche Passung für die Bewertung des Manuskriptes haben. Die Revision wird oft nur noch einem der Gutachter der ersten Runde vorgelegt. Dieses gestraffte Verfahren ist für Autoren mit Zeitdruck interessant. Binnen weniger Tage nach finaler Annahme durch den Editor erscheint die Arbeit.

Es gibt eine Reihe weiterer Gründe, die den Autoren den idealen Weg zu publizieren erschweren oder verbauen. Zu Ende gehende Projektförderung, befristete Stellenlaufzeiten und fehlende Sach- und Personalmittel verhindern die Gewinnung weiterer Ergebnisse. In solchen Fällen ist ein neuer Antrag auf Drittmittelförderung zu stellen und ein Bericht zu verfassen. Eine erschienene Publikation erhöht die Chancen der erfolgreichen Antragstellung oder ist sogar die Voraussetzung für den Erfolg; dies ist ein Teufelskreis.

Sollen Daten verworfen werden? Ich sage, „keinesfalls“. Auch Bestätigungen von Befunden oder Widerlegung von Hypothesen sind Teil des Erkenntnisgewinns und wissenschaftlichen Fortschritts. Publikationen sind essentiell für die eigene Karriereentwicklung. Wissenschaftler benötigen sie für die erfolgreiche Bewerbung um Stellen und zum Erfüllen von Zielvereinbarungen, um beispielsweise die zweite Phase von Juniorprofessuren zu erreichen, oder um leistungsabhängige persönliche Zulagen oder Ausstattung zu erhalten. Jahre ohne Veröffentlichungen, sogenannte Publikationslücken im Lebenslauf, werden in Auswahlkommissionen kritisch diskutiert und vermindern die Berufungschancen. So ist es möglicherweise empfehlenswert, wissenschaftliche Arbeiten in *low profile*-Zeitschriften nach dem Motto „besser als nichts“ zu veröffentlichen.

Bei der Erforschung aktueller Fragestellungen ist zu erwarten, dass konkurrierende Arbeitsgruppen gleiche oder ähnliche Studien durchführen. Die eigenen Befunde verlieren an Bedeutung, wenn dieselben oder ähnliche Ergebnisse zuerst von anderen Wissenschaftlern publiziert wurden. Nur selten eröffnet sich die Gelegenheit, im Einvernehmen die Ergebnisse mit der konkurrierenden Gruppe gemeinsam zu publizieren. Die Publikation muss unter Umständen „raus“, wenn Wissenschaftler von solcher Konkurrenz erfahren.

Jede dieser Konstellationen kann hinreichend Grund sein, die Daten schnellstmöglich zu veröffentlichen. Immer wieder ergibt sich die Notwendigkeit zu entscheiden, ob man die Publikation in einer maximal erreichbaren Zeitschrift hohen Profils nach langer Zeit und unter Einsatz umfangreicher Ressourcen anstreben kann oder sie bei einer Zeitschrift niedrigen Profils einreichen muss.

Unabhängig davon muss es allerdings der Anspruch guter Wissenschaft sein, mit höchster Sorgfalt und genauester Beschreibung der Experimente zuverlässige Ergebnisse zu veröffentlichen. Letztendlich gilt: „Es kommt auf den Inhalt an“. Kein Autorenteam macht sich die Entscheidung über die Art der Veröffentlichung leicht. Die Empfehlungen von Bucher et al. [2] geben meines Erachtens hierbei eine wertvolle Hilfestellung. Lang und steinig hingegen erscheint der Weg zu kommerzfreier *Open Science*.

[1] K.-J. Dietz (2022). *BiuZ* 52, 112–115.

[2] G. Bucher et al. (2023). *BiuZ* 53, 311.

[3] C. C. Pereira CC et al. (2023). *Neotropical Biology and Conservation* 18, 97–105.

[4] Norwegian Register for Scientific Journals, Series and Publishers: <https://kanalregister.hkdir.no/publiseringskanal>

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:

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

Herstellung:

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

Anzeigenleitung:

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

Mitglieder- und Abo-Service:

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

Preise:

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

Geschäftsstellen des Verbandes:**Geschäftsstelle München**

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

Geschäftsstelle Berlin

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

Satz:

TypoDesign Hecker GmbH, Leimen.

Druck und Bindung:

ColorDruck Solutions GmbH, Leimen.

© VBIO e.V., München, 2023.

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

BIOLOGIE

4 | 2023 IN UNSERER ZEIT
www.biuz.de



Einen Tag nach einem großen Waldbrand wurde auf dieser Brandfläche im Gngangara-Moore River State Forest nördlich von Perth in Westaustralien der Australische Feuerkäfer (*Merimna atrata*) aus der Familie der Prachtkäfer in großer Anzahl gefunden. Das Beobachten und Sammeln dieser an Feuer angepassten Insekten ist jedoch nicht ganz ungefährlich. Im Vordergrund ist ein Ast zu sehen, der aus dem Kronenbereich herabgestürzt war, da er langsam im Innern ausbrannte. Als Spezialanpassung an die Gefahren auf einer frischen Brandfläche verfügen einige pyrophile („feuerliebende“) Insekten wie *M. atrata* über Infrarotrezeptoren. Mehr darüber lesen Sie in unserem Titelthema auf S. 332. Abb.: Helmut Schmitz.

MELDUNGEN

306 Forschung & Entwicklung, Standorte, Citizen Science, Ausstellung

POLITIK UND GESELLSCHAFT

- 311 Publizieren in einem sich wandelnden Umfeld
313 Gelungene Online-Veranstaltung für Schüler/-innen – Ozeane: Zeugen und Akteure des Klimawandels
314 Karl von Frisch: Ein Meister der Biologie
316 EU-Kommission: Regulation Neuer Genomischer Techniken
317 Jahrestreffen der Vorsitzenden der VBIO-Landesverbände

TREFFPUNKT FORSCHUNG

- 319 mRNA als revolutionäre Wirkstoffklasse
320 Was die Walnuss mit Liebstöckel und Haferflocken verbindet
321 Waldameisen sind vom Aussterben bedroht!
323 Parthenogenese durch genetische Manipulation bei *Drosophila*
324 Zwei Zugwege beim Kormoran
325 Schülerlabor Künstliche Intelligenz – Verhaltensforschung im Biologieunterricht mit neuen Methoden
327 Biodiversität: Vom Regenwald ins Klassenzimmer
330 Deutschland wird Europameister
331 Menschengemachter Lärm belastet Vögel

MAGAZIN

- 388 Bücher und Medien
391 Mikroben verstehen: Die weltweit häufigsten Mikroben
393 Außerschulische Lernorte: Bildung für die Zukunft im *Future Space*
396 Partner des Menschen: Die Korkeiche: bedrohte Nutzpflanze des Mittelmeerraums
398 Kolumne: Maslows Hammer: Das Gesetz des Instruments

IM FOKUS

- 332** Die Infrarotrezeptoren feuerliebender Insekten
Helmut Schmitz, Anke Schmitz
- 342** Ameisen – ein Erfolgsmodell der Evolution
Juliane Hartke, Susanne Foitzik
- 350** Pflanzliche Milchalternativen
Lena Szczepanski, Gesa Ostermann, Florian Fiebelkorn

- 361** Multitasking in evolutionsgeschichtlich alten Epithelmuskelzellen
Oliver Holz, Monika Hassel
- 368** Wissenschaft, die Wissen schafft
Annette Göddertz, Marga Radermacher
- 379** Mit UV-Licht der Natur auf der Spur
Andreas Korn-Müller

361 Multitasking in evolutionsgeschichtlich alten Epithelmuskelzellen

Epithelzellen grenzen Gewebe und Organe nach außen oder innen hin ab. Bei Nesseltieren übernehmen sie zusätzlich die Funktion einer Muskulatur. Möglich wird dieses Multitasking durch subzelluläre Kompartimentierung von Signalwegen.



350 Pflanzliche Milchalternativen



Der Konsum von Milch trägt in hohem Maße zu den derzeitigen Umweltproblemen bei. Pflanzliche Produkte könnten eine nachhaltige und gesunde Alternative darstellen. Unser Artikel beleuchtet sie hinsichtlich Produktion, Nachhaltigkeit und Akzeptanz.

332 Die Infrarotrezeptoren feuerliebender Insekten

Eine kleine Gruppe von Insekten ist für ihre Fortpflanzung auf eine frische Brandfläche angewiesen. Eine Anpassung an diese pyrophile Lebensweise sind Rezeptoren zur Wahrnehmung von Infrarotstrahlung.

Dabei sind zwei Funktionsprinzipien realisiert, die unser Artikel vorstellt.



342 Ameisen – ein Erfolgsmodell der Evolution

Ameisenstaaten sind durch Arbeitsteilung gekennzeichnet, die einen wesentlichen Anteil an ihrem ökologischen Erfolg hat. Dabei ist der Unterschied zwischen den Ameisenkasten meist nicht in der DNA fest kodiert, sondern wird durch differenzielle Genregulation erzeugt.



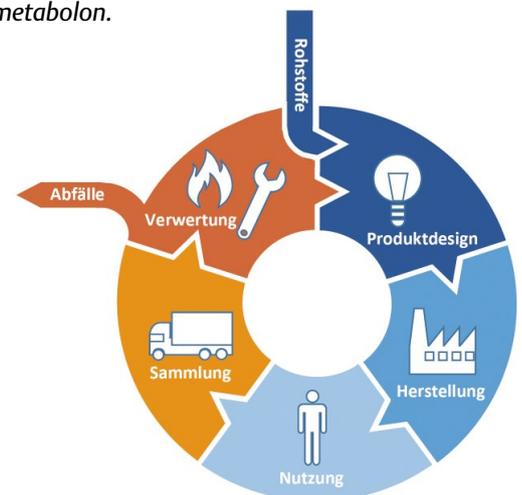
379 Mit UV-Licht der Natur auf der Spur



Mit einer einfachen UV-Taschenlampe kann man in der Natur ein farbenfrohes Fluoreszenzspektakel entdecken. Dabei kommt auch der Spaßfaktor nicht zu kurz.

368 Wissenschaft, die Wissen schafft

Auf der ehemaligen Zentraldeponie Leppe im Oberbergischen Lindlar bei Köln entstand im Rahmen der EU-Strukturförderung eine authentische Lehr- und Lernlandschaft: der Forschungs- und Innovationsstandort :metablon.





Das Ceylonpapageichen (*Loriculus beryllinus*) lebt nur in Sri Lanka. Es ist eine sehr seltene Art, d. h. es gibt nur wenige Individuen. Foto: Corey Callaghan

FORSCHUNG & ENTWICKLUNG

„Wer kann erklären, warum eine Art weit verbreitet und sehr häufig ist und warum eine andere, verwandte Art nur eine geringe Verbreitung hat und selten ist?“ Diese Frage stellte Charles Darwin vor über 150 Jahren in seinem Buch *The Origin of Species*. Eng verknüpft ist die Frage, wie viele Arten häufig und wie viele selten sind – die sogenannte globale Artenhäufigkeitsverteilung (*global species abundance distribution*, gSAD). Wissenschaftler haben im vergangenen Jahrhundert zwei bedeutende gSAD-Modelle vorgeschlagen: Laut dem Log-Serien-Modell sind sehr seltene Arten am häufigsten, und die Zahl der Arten nimmt ab, je mehr Individuen es von ihnen gibt. Das Log-Normal-Modell besagt stattdessen, dass nur wenige Arten sehr selten sind und die meisten Arten eine mittlere Häufigkeit (an Individuen) aufweisen. Klar war, dass sich dieses Problem nur mit sehr vielen Daten lösen lässt. Die Autoren einer Studie um Erstautor Dr. Corey Callaghan nutzten dazu die *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF) mit über einer Milliarde Artenbeobachtungen zwischen 1900 und 2019. Sie unterteilten die Daten in 39 Artengruppen, z. B. Vögel, Insekten oder Säugetiere, und erstellten für jede Gruppe die globale Artenhäufigkeitsverteilung. Dabei fanden sie ein potenziell universelles Muster, das erkennbar wird, sobald die Artenhäufigkeitsverteilung vollständig enthüllt ist: **Die meisten Tier- und Pflanzenarten sind selten, aber nicht sehr selten, und nur wenige Arten sind sehr häufig** – so wie es das Log-Normal-Modell vorher sagt. Die Forscher stellten auch fest, dass dieses Muster erst für wenige Artengruppen wie Vögel oder Palmfarne vollständig enthüllt worden ist. Die Forscher glauben, dass ihre Ergebnisse dazu beitragen könnten zu beantworten, warum manche Arten selten und andere häufig sind.

Dies wird allerdings dadurch erschwert, dass unser Handeln die Häufigkeit von Arten verändert. Bis zur endgültigen Beantwortung von Darwins Frage ist es deshalb vielleicht noch ein weiter Weg. www.idiv.de

Um den genetischen Ursachen von Krankheiten auf die Spur zu kommen, hat es sich bewährt, in Tieren ein einzelnes Gen auszuschalten und die Folgen davon zu untersuchen. Allerdings tragen bei vielen Krankheiten mehrere Gene zum Krankheitsbild bei. In diesem Fall müssten viele Tierversuche durchgeführt werden, um die beteiligten Gene zu untersuchen. Forschende unter der Leitung von Randall Platt, Professor für Biologisches Engineering am Departement für Biosysteme der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich in Basel, haben nun eine Methode entwickelt, um mit Hilfe der Genschere CRISPR/Cas **in einem einzigen Tier mosaikartig mehrere Dutzend Genveränderungen gleichzeitig vorzunehmen**: In jeder Zelle ist höchstens ein Gen verändert, die verschiedenen Zellen eines Organs sind aber auf unterschiedliche Weise verändert. Einzelne Zellen lassen sich anschließend präzise analysieren. Die ETH-Forschenden haben diesen Ansatz nun zum ersten Mal erfolgreich in lebenden Tieren angewandt. Um die Information darüber, welche Gene die Genschere zerstören soll, in die Körperzellen von Mäusen zu bringen, verwendeten die Forschenden eine Mischung von Adeno-assoziierten Viren, die unterschiedliche Anleitungen zur Genzerstörung trugen. Auf diese Weise konnten sie in den Zellen eines Organs – in der Studie wählten sie das Gehirn – unterschiedliche Gene ausschalten. Die ETH Zürich hat die Technologie zum Patent angemeldet. Die Forschenden möchten sie nun im Rahmen eines Spin-offs nutzen, das sie noch gründen werden. www.ethz.ch



Mit der neuen Methode lassen sich die Zellen in einzelnen Organen von Tieren mosaikartig genetisch verändern.
Abb.: Midjourney, ETH Zürich.

Pflanzen werden vielfach Fähigkeiten zugeschrieben, wie sie von Tieren bekannt sind. In einem Beitrag für das Review-Journal *Trends in Plant Science* sind nun 32 internationale Pflanzen- und Forstwissenschaftler solchen Zuschreibungen nachgegangen. Gegenstand des Artikels waren die Aussagen in zwei breit rezipierten Büchern, die sich mit dem verborgenen Leben der Bäume und der Suche nach dem sogenannten „Mutterbaum“ beschäftigen. Darin werden Bäumen menschliche Eigenschaften zugeschrieben wie die Fähigkeit, Schmerz oder Glück zu empfinden, miteinander zu kommunizieren oder altruistisch zu handeln. Für beide Veröffentlichungen wies das Team um Prof. David Robinson vom *Centre for Organismal Studies* (COS) der Universität Heidelberg detailliert nach, **dass zentrale Aussagen wissenschaftlich nicht haltbar sind**. Danach wird beispielsweise die Behauptung, wonach Bäume einer Art sich gegenseitig unterstützen und am Leben halten, durch zahlreiche Forschungsarbeiten zur Bedeutung innerartlicher Konkurrenz klar widerlegt, wie Robinson erläutert. Auch das Konzept des „Mutterbaums“ sei nicht haltbar, da zugrundeliegende Publikationen, die vermeintlich einen gezielten Transfer von Kohlenstoff von älteren zu jüngeren Bäumen mittels vernetzender Pilze – den sogenannten Mykorrhizzen – belegen können, unter anderem wegen fehlender



Waldbäume konkurrieren untereinander um Licht und Nahrung. Foto: jplenio über www.pixabay.com.

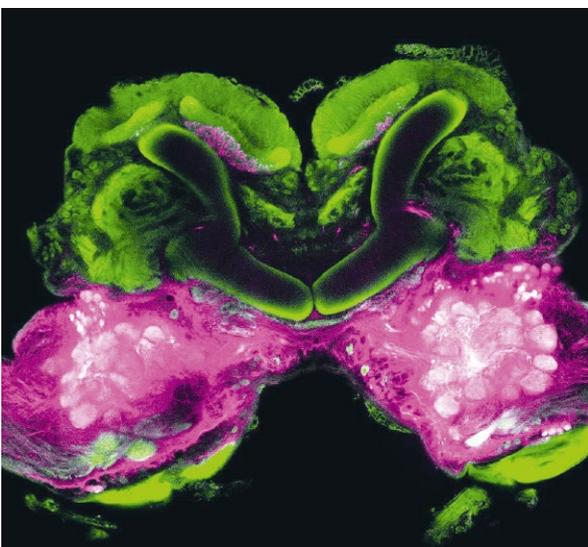
Kontrollvarianten inkorrekt seien. „Und dort, wo die Daten einen solchen Transfer tatsächlich nahelegen, ist die ausgetauschte Kohlenstoffmenge so gering, dass sie für den empfangenden Baum physiologisch völlig irrelevant ist“, sagt Robinson. In ihrem Beitrag zeigen die Autoren schließlich auf, welche fatalen Folgen es für die Anpassung der Wälder an den Klimawandel haben könnte, wenn politische Weichenstellungen dafür nicht auf der Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse, sondern auf „der Grundlage wohlklingender,

aber falscher Botschaften“ getroffen werden, so Robinson. www.uni-beidelberg.de

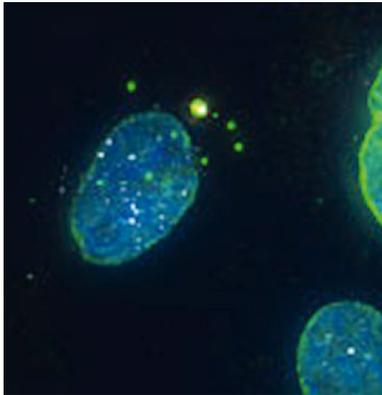
In der Forschung galt lange, dass Insekten roboterartig nach einfachen Reiz-Reaktionsschemata agieren, doch diese Sicht hat sich in den vergangenen zwei Jahrzehnten stark gewandelt: „Insekten besitzen einfache kognitive Fähigkeiten wie die Bildung und den Abruf von Gedächtnissen und die erfahrungsbasierte Entscheidungsfindung“, sagt Prof. Nawrot vom Institut für Zoologie der Universität zu Köln. Ausschlaggebend dafür ist ein wichtiges Schaltzentrum im Zentralgehirn des Insekts, das aufgrund seiner anatomischen Form als Pilzkörper bezeichnet wird. Nawrot und seine Mitarbeiterin Dr. Cansu Arican zeigten nun, dass der Pilzkörper auch dafür verantwortlich ist, **dass Insekten abstrakte Verhaltensentscheidungen treffen können.** Für ihre Studie hatten sie die Aktivität der Ausgangsneurone im Pilzkörper in der Amerikanischen Schabe (*Periplaneta americana*) gemessen und gleichzeitig das Fressverhalten der Tiere gefilmt. Das Forschungsteam beobachtete, dass die Neurone nicht nur den Wert eines bestimmten Duftes kodieren, zum Beispiel einen

Futterduft im Vergleich zu einem neutralen Duft, sondern sich auf der Grundlage dieser Information auch für oder gegen das jeweilige Fressverhalten entschieden. Dabei spielt auch der momentane Zustand des Tieres eine Rolle, zum Beispiel, ob es in dem Moment hungrig oder satt ist. Auf Basis des neuronalen Antwortmusters war es so möglich, präzise vorherzusagen, ob das Tier nur etwa eine zehntel Millisekunde später das Fressverhalten zeigt oder nicht. Ähnlich der motorischen Großhirnrinde im menschlichen Gehirn fällt der Pilzkörper somit eine erste Verhaltensentscheidung und sendet ein abstraktes motorisches Kommando an das nachgeschaltete motorische System – in der Analogie des Menschen ist dies das Rückenmark – welches das Verhalten dann durch die konkrete Ansteuerung von Muskeln ausführt. „Dieses Ergebnis ändert die Sichtweise auf den Pilzkörper, der nun als Zentrum für Gedächtnisbildung und Verhaltensentscheidung gesehen werden kann. Das ist wichtig, da die Erforschung von Insektengehirnen auch für das Verständnis der Funktion von komplexeren Gehirnen relevant ist“, resümiert Erstautorin Arican. www.uni-koeln.de

Forschende vom Institut für Biochemie der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich um Ruth Kroschewski haben im Zellplasma von Säugetierzellen ein neues zelluläres Kompartiment gefunden, das sie als Exklusom bezeichnet haben. Offensichtlich wird darin nicht-chromosomale von chromosomaler DNA ferngehalten. **Die Autoren halten dies für ein zellautonomes Genomabwehrsystem.** Das ist eine Besonderheit, denn normalerweise bewahren eukaryotische Zellen die meiste DNA im Zellkern auf, wo sie in Chromosomen organisiert ist. Die Plasmide, die sich im Exklusom ansammeln, stammen von außerhalb der Zelle oder von den Endkappen der Chromosomen, den Telomeren. Vor allem in gewissen



Schabengehirn mit Pilzkörper. Bild: Claudia Groh.



Fast wie ein Mond bei einem Planeten liegt das Exklusom (gelbgrüner Punkt) im Zellplasma in der Nähe des Zellkerns (blau). Abb.: Schenkel L. et al. (2023). *Molecular Biology of the Cell*.

Krebszellen werden diese sich wiederholenden und nicht für Proteine kodierenden DNA-Bereiche abgeschnürt und zu Ringen zusammengefügt. Die Zelle kann also eigene und noch benötigte DNA von fremder oder vermutlich nicht mehr benötigter DNA unterscheiden und letztere aus dem Zellkern entfernen. „Das ist eine wichtige Hygienefunktion des Zellkerns, die die Chromosomen schützt“, sagt Studienleiterin Ruth Kroschewski. Sonst bestände die Gefahr, dass Plasmide in die Chromosomen eingebaut werden, oder dass ihre Gene, die von Viren oder Bakterien stammen, im Zellkern in Proteine übersetzt werden. Die ETH-Forscherin geht davon aus, dass das Exklusom evolutionär alt ist und aus der Frühzeit der Eukaryoten stammt. Seine Hülle ähnelt der des Zellkerns, ist aber deutlich einfacher, wie Kroschewski erklärt: „Die Hülle des Exklusoms weist Lücken auf, die bei der Kernhülle nur am Anfang ihrer Bildung zu beobachten sind.“ Diese Lücken werden bei der Kernhülle mit der Zeit geschlossen oder werden mit spezifischen Proteinporen gefüllt. Die Hülle des Exklusoms hingegen entwickelt sich nicht weiter. „Vielleicht ist das Exklusom der erste Versuch, einen Zellkern zu bilden“, sagt Kroschewski. Die ETH-Zellbiologin und ihr Team wollen deshalb in nächster Zeit die

Veränderungen der Plasmid-DNA in der Zelle und die „Lizenz“ für den Transport der Plasmide ins Exklusom untersuchen, um dessen Geheimnissen auf die Spur zu kommen.

www.ethz.ch

STANDORTE

Die Technische Universität München (TUM) feiert den offiziellen Start des *Munich Data Science Institute* (MDSI), welches als zentrales Element ihrer TUM AGENDA 2030 durch die Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder gefördert wird. Das MDSI bündelt die Stärken der TUM in Datenwissenschaften, maschinellem Lernen und Künstlicher Intelligenz von der Grundlagenforschung über interdisziplinäre Fachanwendungen bis hin zur Vermittlung von Datenkompetenzen für Master-Studierende, Forschende und berufstätiges Fachpersonal. Als integratives Forschungsinstitut bündelt das MDSI die Kompetenzen von über 60 Professor/-innen über disziplinäre Grenzen hinweg. Unter seinem Dach entsteht unter anderem das *Center for Digital Medicine and Health* als Bund-/Land-geförderter Forschungsneubau, um die Kernkompetenzen der Informatik auf den Medizincampus des Klinikums rechts der Isar zu bringen. Unter der Leitung des MDSI-Direktors Daniel Rückert liegt der **Schwerpunkt auf der Entwicklung datengetriebener Ansätze und KI-Methoden in der Medizin** – von der Früherkennung und Diagnose von Krankheiten über die Identifizierung von Biomarkern für individualisierte und personalisierte Behandlungen bis hin zu Ethik, Sicherheit und Datenschutz bei der Verwendung von Patientendaten.

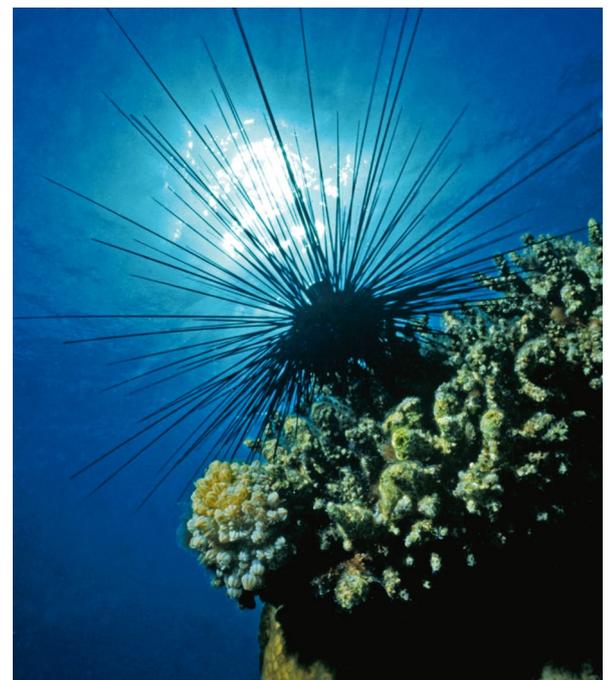
CITIZEN SCIENCE

Seeigel sind eine der wichtigsten Tiergruppen in den Korallenriffen im Roten Meer. Sie ernähren sich von Algen und sind daher auch die „Rasenmäher“ der Riffe. Bis vor

kurzem konnte man noch bis zu 30 Seeigel der Art *Diadema setosum* pro Quadratmeter im Roten Meer finden. Aufgrund eines Massensterbens sind die dämmerungs- und nachtaktiven Tiere inzwischen fast vollständig verschwunden. Deshalb starten Forschende der Forschungseinheit Biodiversität und Wissenschaftliches Tauchen der Universität Stuttgart in Kooperation mit 47 Tauchcentern, Tauchreiseveranstaltern, Tauchausbildungsorganisa-



Eröffnungsveranstaltung des MDSI mit Wissenschaftsminister Markus Blume. Foto: Astrid Eckert (TUM).



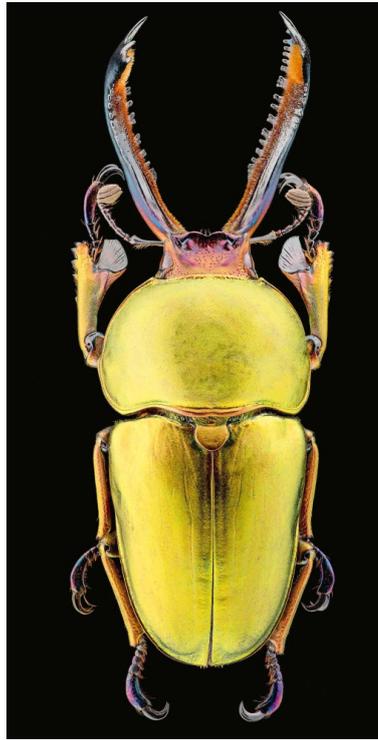
Zum Fressen kriechen Diadem-Seeigel nachts auf mit Algen bewachsene Flächen hinaus, während sie tagsüber bewegungslos in Verstecken sitzen oder auf offenen Flächen Ansammlungen bilden. Foto: Paul Munzinger.

tionen und vielen Nichtregierungsorganisationen, die im Umwelt- und Meeresschutz aktiv sind, das Citizen-Science-Projekt Dive4Diadema. „Mit dieser Herangehensweise möchten wir **so viel wie möglich über die Ausbreitung der Seeigelkrankheit erfahren**“, erklärt Prof. Franz Brümmer vom Institut für Biomaterialien und biomolekulare Systeme der Universität Stuttgart. „Wir versuchen Diadem-Seeigel-Populationen im Roten Meer zu finden, die nicht betroffen oder sogar resistent gegen die Krankheit sind, die das Massensterben verursacht hat“, ergänzt sein Kollege Prof. Ralph Schill vom Institut für Biomaterialien und biomolekulare Systeme. Über die neue kostenlose und mehrsprachige App für iPhone, iPad und Android Smartphones können Sporttaucherinnen und Sporttaucher ihre Beobachtungen aus dem Mittelmeer und Roten Meer eingeben.

www.uni-stuttgart.de

AUSSTELLUNG

„Gott scheint eine übertriebene Vorliebe für Käfer zu haben“, soll der Evolutionsbiologe John Haldane geantwortet haben, als ihn ein



Lamprina adolphinae, ein Käfer aus der Familie der Schröter (Lucanidae).
Foto: Thomas Büchsemann.

Theologe fragte, was uns die Schöpfung über deren Urheber verrät. Hintergrund ist, dass die Käfer mit 380.000 bekannten Arten so etwas

wie das Erfolgsmodell der Evolution sind. Auch gibt es kaum ein pflanzliches oder tierisches Material, das nicht von irgendeinem Käfer gefressen wird, und mit Ausnahme der Ozeane haben sie jeden nur denkbaren Lebensraum erobert. Grund genug, diesen Tieren mit „Ganz nah“ eine kleine aber feine Sonderausstellung zu widmen. Bis zum 07. Januar 2024 zeigt das Museum Mensch und Natur in München daher in seinem kleinen Sonderausstellungsbereich insgesamt **17 großformatige Fotografien von Käfern**, die der Augsburger Fotograf Thomas Büchsemann mit Hilfe spezieller Aufnahmeverfahren im Naturkundemuseum Augsburg gemacht hat. Sie weisen eine extreme Tiefenschärfe und Auflösung auf, was es ermöglicht, die Tiere in zigfacher Vergrößerung darzustellen, so dass auch feinste Details erkennbar sind. Um ein Gefühl für die Größe der Originalkäfer zu bekommen, wird jeweils ein Exemplar derselben Art aus der Zoologischen Staatssammlung München neben dem Bild gezeigt.

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

ERRATUM

In BiuZ 3/23 berichteten wir in der Rubrik „Partner des Menschen“ über den blauen Pfau. Im Artikel heißt es, die ersten Pfauen seien vor 4000 Jahren mit Alexander des Großen nach Griechenland gekommen.



Tatsächlich sind die Pfauen laut Quellen zwar vor 4000 Jahren nach Europa gekommen, aber nicht durch Alexander d. Gr., der erst 356 v. Chr. geboren wurde. Wir bitten, dieses Versehen zu entschuldigen!

VERBORGENE WELTEN – LIFESCIENCES-KALENDER 2024

MIT FRÜHBUCHERRABATT FÜR VBIO-MITGLIEDER

Der Insidern gut bekannte LifeSciences-Kalender 2024 mit spektakulären Photoshop-kolorierten rasterelektronenmikroskopischen Motiven aus dem Hause eye of science kann ab sofort vorbestellt werden. Der Kunstkalender ist sehr hochwertig produziert und hat das Format 50 × 70 cm. Ein sehr originelles Geschenk für alle mit einem Faible für die Natur und/oder die Lebenswissenschaften. Der Moosbaum-Verlag gewährt dem VBIO Sonderkonditionen für ein limitiertes Kontingent von 50 Stück unter: <https://lifesciences-calendar.com/special/vbio224/>



MEINUNG

Publizieren in einem sich wandelnden Umfeld

Das Publikationssystem verändert sich gerade grundlegend, was zu unterschiedlichen Auffassungen über die beste Publikationsstrategie führt. Als DFG-Fachkollegium „Zoologie“ begutachten wir Anträge in all ihren Dimensionen, wozu auch die Beurteilung der Qualifikation der Antragsteller u. a. anhand ihrer Publikationsleistung gehört. Es ist nicht einfach, in dem sich wandelnden Publikationssystem die am besten geeignete Zeitschrift für die Publikation von Forschungsergebnissen auszuwählen. Wir möchten diesbezüglich einige Gedanken teilen, damit bei der Publikationsstrategie auch die Erwartungen von Entscheidungsgremien mit einbezogen werden können.

Es gibt viele Gründe, warum die sorgfältige Auswahl der Zeitschrift wichtig ist. Entscheidungen über Bewerbungen um Stipendien oder Stellen beinhalten eine Bewertung der bisherigen wissenschaftlichen Leistungen auf der Grundlage der in Publikationen veröffentlichten Erkenntnisse und somit auch anhand des Publikationsverzeichnisses. Im klassischen Publikationssystem brachten Veröffentlichungen in der Mehrzahl der Zeitschriften wissenschaftliches Prestige, da die meisten Zeitschriften selektiv waren. Ihre Motivation, streng nach Qualität zu selektieren, wurde durch einen starken finanziellen Anreiz aufrechterhalten: Nur wenn eine Zeitschrift einen hohen Anteil an qualitativ hochwertigen Beiträgen enthielt, kauften die Forscher und Bibliotheken ein Abonnement, was die eigentlichen Einnahmen generierte.

Unter dem neuen *Open-Access*-Publikationssystem mit Autor-finanzierten Gebühren für die Publikation von Artikeln hat sich der finanzielle Anreiz geändert: Jetzt werden die Einnahmen durch die Veröffentlichung einer Arbeit erzielt – unabhängig von ihrer Qualität oder ihrer späteren Wahrnehmung durch die wissenschaftliche Gemeinschaft. Die meisten klassischen und viele neue Zeitschriften verbinden die Vorteile des *Open-Access*-Publizierens mit einer strengen Qualitäts-

kontrolle und verbessern damit unser Publikationssystem. Leider gibt es auch eine Flut von Zeitschriften, die Kompromisse bei der Qualität eingehen, um mehr Einnahmen zu generieren. Die wissenschaftliche Gemeinschaft nimmt aber die mangelnde Selektivität dieser Zeitschriften wahr, so dass Veröffentlichungen in solchen Zeitschriften mit weniger Prestige verbunden sind, selbst wenn die Arbeit selbst von hohem Wert ist. Dies wirkt sich später auf die Einschätzung der wissenschaftlichen Leistung aus. Deshalb sollte man Arbeiten hauptsächlich in Zeitschriften veröffentlichen, die in der wissenschaftlichen Gemeinschaft einen guten Ruf genießen!

Wie man Zeitschriften mit gutem Ruf erkennt

Manche behaupten, dass die Bedeutung des Ansehens einer Zeitschrift langfristig ersetzt werden wird durch quantitative Messungen auf Artelebene, die auf dem Feedback der Community basieren. Und in der Tat erfüllen nicht alle Arbeiten in angesehenen Zeitschriften die höchsten Standards, während andererseits eine sehr gute Arbeit auch dann Aufmerksamkeit erregen kann, wenn sie in weniger bekannten Zeitschriften veröffentlicht wird. Allerdings akkumuliert das Community-Feedback nur langsam, was die Aussagekraft für neuere



Foto: kconcha auf www.pixabay.com.

Arbeiten verringert. Wir sind der Meinung, dass zumindest derzeit die selektiven Zeitschriften einen deutlich höheren Anteil an qualitativ hochwertigen Arbeiten enthalten. Daher werden Veröffentlichungen in selektiven Zeitschriften mit hohem Ansehen auch weiterhin ein Indikator der bisherigen Leistung sein.

Doch wie lassen sich qualitativ hochwertige Zeitschriften von solchen mit geringem Ansehen unterscheiden? Dies ist schwierig, da die Bandbreite von eindeutig räuberischen Zeitschriften bis hin zu Zeitschriften reicht, die zwar ein ordnungsgemäßes Begutachtungsverfahren durchführen, aber selbst schlechte oder vorläufige Arbeiten nicht ablehnen. Darüber hinaus kann sich die Qualität einer Zeitschrift im Laufe der Zeit ändern, das Prestige zweier Zeitschriften eines Verlags kann unterschiedlich sein und die Publikationstraditionen der verschiedenen Fachgebiete sind unterschiedlich. Konkrete Positiv- oder Negativlisten sind ungeeignet, weil sie unvollständig und zum Zeitpunkt der Veröffentlichung bereits veraltet sein könnten.

Der Impact-Faktor von Zeitschriften war schon immer ein umstrittener Indikator, hat aber weiter an Bedeutung verloren, seit einige Zeitschriften gezielte Maßnahmen zur künstlichen Erhöhung der Zitationen treffen. Dazu gehören z. B. strategische Selbstzitate, die Veröffentlichung einer großen

Zahl von Überblicksartikeln, Sonderausgaben und die Veröffentlichung von Manuskripten, die aufgrund ihres Themas, aber nicht unbedingt aufgrund ihrer Qualität Aufmerksamkeit erregen sollen. In der Tat haben inzwischen einige Zeitschriften mit höchstem Prestige in ihrem Fachgebiet einen niedrigeren Impact-Faktor als einige aufstrebende Zeitschriften mit einem großen Anteil an Veröffentlichungen von minderer Qualität. Daher ist der Impact-Faktor von Zeitschriften alleine nicht geeignet, um qualitativ hochwertige Zeitschriften zu identifizieren. Wir empfehlen sowohl erfahrenen als auch angehenden Forschern, die folgenden Fragen zu stellen, um qualitativ hochwertige Zeitschriften zu identifizieren:

- Welche Zeitschriften haben in letzter Zeit Artikel veröffentlicht, die in Deinem Fachgebiet als wichtig angesehen werden?
- In welchen Zeitschriften veröffentlichen Deine am meisten geschätzten Kollegen ihre Arbeiten?
- Werden die Einreichungen von Redakteuren bearbeitet, die aktive und anerkannte Wissenschaftler auf ihrem Gebiet sind?
- Werden die Zeitschriften von bekannten wissenschaftlichen Gesellschaften betrieben?
- Handelt es sich um Zeitschriften, die von gemeinnützigen Organisationen betrieben werden?

Folgende Indikatoren sprechen dagegen für minderwertige Zeitschriften:

- Drängt die Zeitschrift Dich, eine Arbeit einzureichen, einen Überblicksartikel zu schreiben oder eine Sonderausgabe zu editieren?
- Deutet die kurze Zeit bis zur Entscheidung auf eine schnelle und oberflächliche Begutachtung hin?

- Erscheinen die meisten Artikel dieser Zeitschrift als Teil von Sonderausgaben?
- Hat die Zeitschrift einen Namen, der den Namen einer bekannten Zeitschrift nachahmt?
- Ist die Redaktion extrem groß, was auf eine Strategie des hohen Durchsatzes hindeutet?
- Bist Du sicher, dass Dein Manuskript auch im Falle von Schwächen sicher und schnell in dieser Zeitschrift angenommen werden wird? Dann werden das Deine Kollegen auch wissen. Und sie werden weniger beeindruckt sein als bei einer Veröffentlichung in einer Zeitschrift, die für ihre Selektivität bekannt ist.

Diese Fragen sind nicht als strenge Kriterien zu sehen, die alle erfüllt sein müssen, um eine bestimmte Entscheidung zu treffen. Vielmehr sind sie als Ausgangspunkt für entsprechende Diskussionen unter Fachkollegen gedacht.

Aufgrund der dynamischen Entwicklung der Publikationslandschaft wollen wir hier keine spezifischen Zeitschriften oder Verlage als hoch- oder minderwertig einstufen. Und auch unsere Publikationsstrategien haben sich mit der veränderten Einschätzung von Journalen verändert und werden sich weiter ändern. In diesem Sinne hoffen wir, eine Diskussion anzustoßen, aus der sich mit der Zeit eine konsensfähigere Sichtweise herauskristallisieren wird.

Den Zeitschriften-Tsunami eindämmen

Nur die wissenschaftliche Gemeinschaft ist in der Lage, etwas gegen die Verlage zu tun, die finanzielle Interessen über die Wissenschaft stellen und damit den wissenschaftlichen Prozess gefährden. Diese

Verlage werden Einnahmen verlieren, wenn Wissenschaftler ihr Engagement künftig auf Zeitschriften beschränken, die in ihrem Fachgebiet Prestige genießen. Anhand der oben genannten Kriterien sollte man daher sorgfältig entscheiden, für welche Zeitschriften man Arbeiten begutachtet, Überblicksartikel erstellt, als Gastredakteur an Sonderausgaben mitwirkt und als Redakteur mitarbeitet. Bei profitorientierten Zeitschriften sind solche Bemühungen möglicherweise mit mehr Arbeit als Prestige verbunden.

Einige Zeitschriften mit hohem Ansehen haben die Kosten für die Einreichung von Beiträgen weit über wirtschaftliche Erwägungen hinaus erhöht. Die Veröffentlichung in einer solchen Zeitschrift wird zu einer Frage der Verfügbarkeit von Mitteln und zu viele Forschungsgelder fließen in diese Verlage. Die etablierten Wissenschaftler sind weniger auf eine möglichst hohe Sichtbarkeit angewiesen und können daher als Vorbilder dieser Entwicklung entgegenwirken, indem sie ihre besten Arbeiten in stärker von der Gemeinschaft getragenen Zeitschriften veröffentlichen, wobei sie aber die Interessen ihrer Mitautoren im Auge behalten müssen. Wir hoffen, dass unsere Gedanken und Vorschläge einen Beitrag zur Verbesserung unseres Publikationssystems leisten und eine lebhafte Diskussion anregen.

DFG-Fachkollegium 203 Zoologie

Gregor Bucher, Klaus Fischer, Gabriele Gerlach, Steffen Harzsch, Hans Merzendorfer, Achim Paululat, Klaus Reinhold, Mark-Oliver Rödel, Thomas Röder, Andreas Schmidt-Rhaesa, Jutta Schneider, Ingolf Steffan-Dewenter, Gabriele Uhl

AUS DEM VBIO

Gelungene Online-Veranstaltung für Schüler/-innen – Ozeane: Zeugen und Akteure des Klimawandels

Ozeane spielen eine wichtige Rolle im globalen Klimasystem. Umgekehrt beeinflusst der Klimawandel auch die Ozeane. Der VBIO hat gemeinsam mit dem Dachverband der Geowissenschaften e. V. (DVGeo) Wissenschaftler/-innen eingeladen, einen Einblick in die Funktion der Ozeane und deren Erforschung zu geben. Etwa 2.000 Schüler/-innen aus ganz Deutschland und von deutschen Auslandsschulen nahmen an der Online-Veranstaltung teil.



Copyright: DVGeo/VBIO

Die Ozeane bedecken 71 Prozent unseres Planeten und übernehmen eine wichtige Rolle in unserem Erdsystem: Sie speichern 50-mal mehr Treibhausgase als die Atmosphäre und sind eine wichtige natürliche Kohlenstoffsенke. Gleichzeitig dienen Meeresfrüchte für 1/3 der Menschheit als Hauptproteinquelle. Trotzdem ist die Tiefsee schlechter erforscht als die Rückseite des Mondes. Eine von VBIO und DVGeo organisierte Online-Veranstaltung „Ozeane: Zeugen und Akteure des Klimawandels“ bot Ende September Schüler/-innen Informationen aus erster Hand.

Der Ozean als Klimapuffer

Dr. Tobias Bayr vom GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel zeigte, dass sich die Erde durch uns Menschen seit 1850 um 1,1 Grad erwärmt hat, dabei nehmen die Ozeane mit 93,4 Prozent den größten Anteil der Erd-

erwärmung auf. Ursache dieser Entwicklung ist die *Great Acceleration*: Die starke Zunahme der Weltbevölkerung seit 1950 sowie die Steigerung der Wirtschaftskraft, des Energie-, Dünger- und Wasserverbrauchs führten zu entsprechenden Steigerungen von CO₂, Stickstoff, Temperatur und Ozeanversauerung. Um die Folgen einzudämmen, wurde das 1,5-Grad-Ziel festgelegt.

Das Ökosystem Korallenriff

Prof. Dr. Dirk Erpenbeck von der Ludwig-Maximilians-Universität München ging in seinem Vortrag speziell auf das Ökosystem Korallenriffe ein. Auch wenn diese nur 1,2 Prozent der Meeresflächen einnehmen, so übernehmen sie wichtige Funktionen wie Sicherung der Artenvielfalt, Küstenschutz, Fischerei und Tourismus: Weltweit profitieren mehr als 500 Millionen Menschen von den Riffen. Viele Riffe befinden sich allerdings in einem schlechten Zustand: Ursachen dafür sind Überfischung, Schadstoffeinträge, Verschmutzung durch Plastik und natürlich die Erwärmung der Ozeane. Diese führt u. a. zu der sogenannten Korallenbleiche, bei der Korallen ihre für die Energieversorgung wichtigen Zooxanthellen abstoßen.

Was kann getan werden?

Basierend auf den sehr eindrücklichen Vorträgen und den Fragen

der Schüler/-innen entspann sich eine lebhafte Diskussion. Dabei ging es nicht nur um inhaltliche Nachfragen wie etwa zur Korallenbleiche, der Bedeutung der Ozeane in Klimamodellen oder der Vorhersagegüte von Klimamodellen.

Die Fragen der Schüler/-innen belegten vielmehr auch den dringenden Wunsch, dem Klimawandel entgegenzutreten. Im Zentrum der Diskussion stand daher die große Frage, wie wir alle gemeinsam – und jeder einzelne – mit den prognostizierten Entwicklungen umgehen können. Andiskutiert wurden verschiedene Lösungsansätze im Rahmen der Klimaanpassung. Sehr deutlich wurde auch die Notwendigkeit eines Wertewandels: Klimaschutz ist Menschheitsschutz; zu ergreifende einschneidende Maßnahmen sind im wohlverstandenen „egoistischen“ Eigeninteresse der Menschheit. Die Vortragenden waren sich einig: Nicht die steigende Weltbevölkerung ist das Problem, sondern wie sie lebt. Klar benannt wurde auch, dass hier die Industrie- und Schwellenländer mit ihrem überproportionalen Ressourcenverbrauch eine besondere Rolle spielen müssen. Deutschland als eine der führenden Wirtschaftsmächte und Teil der EU hat eine besondere Verantwortung, hier zu einem Wandel beizutragen.

Positives Fazit

Insgesamt etwa 2.000 Schüler/-innen aus ganz Deutschland – aber auch von deutschen Auslandsschulen – nahmen an der Veranstaltung teil und brachten ihre Fragen und Anliegen ein. Wie so oft konnten in der zur Verfügung stehenden Zeit von 90 Minuten leider nicht alle Fragen beantwortet werden. Diese lassen sich sicher bei einer weiteren Veranstaltung in diesem Format wieder aufgreifen.

*Tamara Fabry-Seelig, DVGeo,
und Kerstin Elbing, VBIO*

MENSCHEN

Karl von Frisch: Ein Meister der Biologie

Am 10. Dezember 1973 wurde der renommierte österreichische Biologe Karl Ritter von Frisch (1886-1982) mit dem Nobelpreis für Physiologie oder Medizin ausgezeichnet. Dieses Jubiläum erinnert uns nicht nur an seine bahnbrechenden Forschungen, sondern auch an die frühere Anerkennung seiner Arbeit durch den Balzan-Preis für Biologie im Jahr 1962. Karl v. Frisch war ein Pionier auf dem Gebiet der Verhaltensbiologie und seine Arbeiten revolutionierten unser Verständnis von der Kommunikation im Tierreich.

DER BIOLOGE

In stiller Arbeit trachtet man
Zusammenhänge zu begreifen.
Als vollen Lohn sieht man es an
Wenn solcher Mühe Früchte reifen
Und man in frohen, selten guten Stunden
Ein Körnchen laute Wahrheit neu gefunden.

Daß *goldne* Früchte reifen mögen,
Hab' ich bisher noch nie gedacht,
Doch dankbar pflückt man solchen Segen.
Am hellsten hat mein Herz gelacht,
Da rings die Freunde ihren Gruß bekunden
Und ihren Spruch: sie hätten's *recht* gefunden.

München, Frühjahr 1963

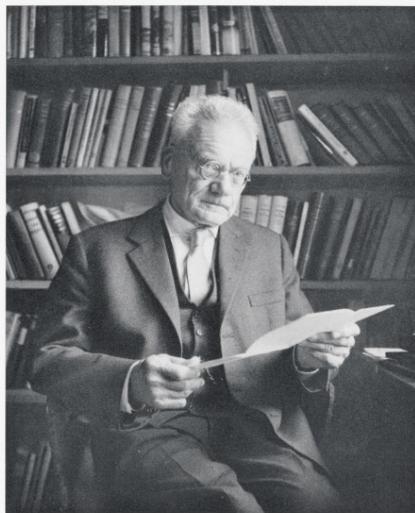


ABB. 1 Grußkarte Karl von Frischs im Jahre der Verleihung des Balzan-Preises (1963). Foto: Archiv Karl Daumer.

Die Internationale Stiftung Preis Balzan prämiert seit 1961 herausragende Leistungen der Geistes- und Naturwissenschaften sowie Persönlichkeiten im Bereich Kunst und Kultur. Der erste Balzan-Preis an eine Einzelperson wurde Karl v. Frisch im Jahr 1962 zugesprochen und 1963 in der Schweiz verliehen (Abbildung 1). Er erhielt diese Auszeichnung für seine bahnbrechenden Forschungen zur Verhaltensbiologie von Bienen.

Karl v. Frisch hatte bereits in den 1920er Jahren begonnen, die faszinierende Sprache der Bienen zu entschlüsseln. Seine Arbeit konzentrierte sich auf die Entdeckung, wie Bienen mithilfe von Tanzbewegungen ihre Artgenossen zu den besten Nektarquellen führen. Er identifizierte verschiedene Tanzarten, die

unterschiedliche Informationen über die Entfernung und Richtung der Futterquellen vermitteln. Diese Erkenntnisse revolutionierten unser Verständnis von der Kommunikation im Tierreich und trugen dazu bei, die komplexe Sprache der Bienen zu entschlüsseln.

Der Nobelpreis von 1973

Zehn Jahre nach der Verleihung des Balzan-Preises erhielt der Biologe die höchste Auszeichnung in der Wissenschaftswelt: Für die Entdeckungen zur Organisation und Auslösung von individuellen und sozialen Verhaltensmustern wurde ihm der Nobelpreis für Physiologie oder Medizin 1973 verliehen. Seine Forschungen zur Kommunikation der Bienen und deren Fähigkeit, Informationen über Nahrungsquel-

len weiterzugeben, hatten nicht nur einen großen Einfluss auf die Biologie, sondern auch auf die Landwirtschaft und die Imkerei. Karl v. Frischs Arbeit (Abbildung 2) zeigte, dass Bienen mit ihren komplexen und hochsozialen Verhaltensweisen in der Lage sind, Informationen auf erstaunliche Weise zu übermitteln und zu nutzen. Dieses Verständnis der Bienenkommunikation hatte nicht nur wissenschaftliche, sondern auch praktische Auswirkungen. Imker konnten diese Erkenntnisse nutzen, um die Effizienz ihrer Bienenzucht zu verbessern und die Honigproduktion zu steigern.

Karl von Frisch und sein Erbe

Karl v. Frisch verstarb im Jahr 1982, aber sein Erbe in der wissenschaftlichen Gemeinschaft lebt weiter. Seine Forschungen zur Bienenkommunikation haben nicht nur unser Verständnis von der Tierkommunikation erweitert, sondern auch die Grundlagen für die Erforschung anderer sozialer Insekten gelegt. Darüber hinaus hat Karl v. Frischs Arbeit zur Bienenkommunikation wichtige Erkenntnisse für die Robotik und künstliche Intelligenz inspiriert. Die Art und Weise, wie Bienen Informationen sammeln, verarbeiten und weitergeben, hat dazu beigetragen, Algorithmen für kooperative Systeme und Schwarmintelligenz zu entwickeln.

Insgesamt war Karl v. Frisch nicht nur ein herausragender Wissenschaftler, sondern auch ein Visionär, dessen Arbeit weit über sein eigenes Fachgebiet hinausreichte. Das Jubiläum der Nobelpreisvergabe an ihn erinnert uns daran, wie bedeutend seine Forschung war und wie wichtig es ist, die Leistungen von Wissenschaftlern wie ihm zu würdigen, die die Grenzen unseres Wissens erweitern und unser Verständnis der Natur vertiefen.

Karl-von-Frisch-Preise

Als Hommage an Karl v. Frisch, der mit seinen populärwissenschaftlichen Schriften immer auch darauf

bedacht war, der Bevölkerung und der Jugend einen Einstieg in bio-wissenschaftliche Erkenntnisse zu ermöglichen, wurde 1993 zuerst in Baden-Württemberg von Prof. Hans Dieter Frey der „Karl-von-Frisch-Abiturientenpreis“ ins Leben gerufen. Inzwischen wird der Preis in 12 Bundesländern für besonders herausragende Leistungen im Fach Biologie in der Oberstufe verliehen. In 2024 planen weitere Landesverbände, diesen Preis zu verleihen.

Seit 1980 verleiht die Deutsche Zoologische Gesellschaft (DZG) die Karl-Ritter-von-Frisch-Medaille und würdigt mit dieser Auszeichnung das Lebenswerk des Nobelpreisträgers und Mitglieds des Ordens *Pour le Mérite*. Mit diesem Wissenschaftspreis zeichnet die DZG hervorragende und originelle Leistungen aus, insbesondere solche Werke, die eine Integration der Erkenntnis mehrerer biologischer Einzeldisziplinen darstellen. Der Wissenschaftspreis besteht aus einer Medaille und einem Preisgeld von 10.000,- €. Der Preis wird im zweijährigen Turnus verliehen.

Kritik an Karl von Frisch

Prof. Dr. Karl v. Frisch musste wegen seiner teilweise jüdischen Abstammung während des Dritten Reiches heftige Anfeindungen in Kauf nehmen. Er konnte durch Fürsprache bedeutender Kollegen und aus der Reichsfachgruppe Imker (dem früheren Deutschen Imkerbund) seine Forschungstätigkeit aber weiterführen. So wurde seine drohende Versetzung in den Ruhestand bis nach dem Kriege verschoben [1].

Karl v. Frisch stieß mit seinen Arbeiten auch inhaltlich nicht überall auf Zustimmung. Noch bevor er mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurde, bezweifelten insbesondere der Amerikaner Adrian Wenner die Bedeutung des Bientanzes. Ausschlaggebend für das Auffinden einer Futterquelle sei allein der Duft der Futterquelle, so Wenner. Die Angaben in den Tänzen würden nicht gebraucht und könnten sogar igno-

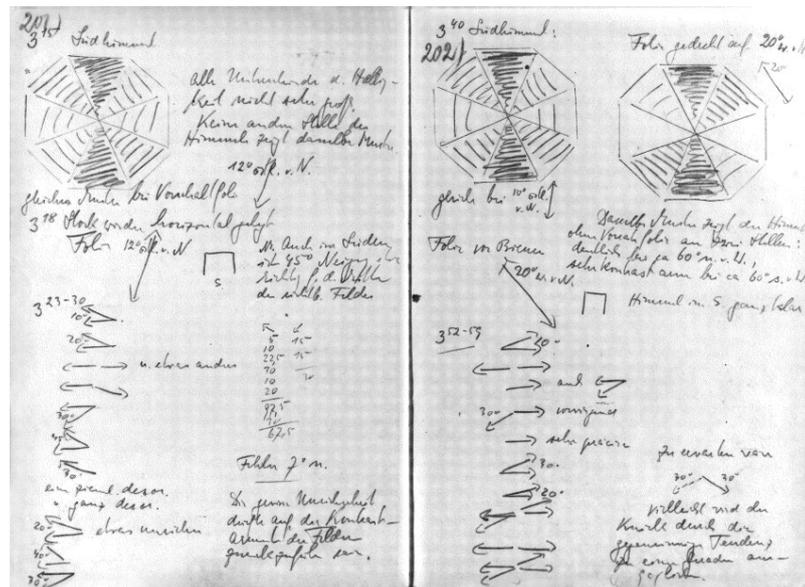


ABB. 2 Aus dem Laborbuch von Karl von Frisch: Auch ohne direkte Sonneneinstrahlung können sich Bienen anhand der Himmelspolarisation optimal orientieren. Foto: Archiv Karl Daumer.

riert werden. Die Wissenschaftshistorikerin Tania Munz, die über Karl von Frisch geforscht hat, nimmt ihn ausdrücklich in Schutz [2]: „Karl v. Frisch war schon über 80 Jahre alt, als diese Debatte ausbrach. Er hatte Unmengen von Daten und Studien, er hatte viele Schüler, aber er selbst war zu diesem Zeitpunkt nicht mehr aktiv mit Experimenten beschäftigt.“ Die Behauptungen, er hätte seine eigenen Forschungen bereits in den 1920er Jahren selbst relativiert, sind unfair, da Karl v. Frisch seine endgültige Theorie erst Mitte der 1940er-Jahre aufgebaut hat [3].

Was bleibt von Karl von Frisch?

Die Debatte über den Informationsgehalt der Bientänze ist bis heute nicht zu einem Ende gekommen, obwohl insbesondere durch die Arbeiten von Prof. Dr. Randolf Menzel die Sonnenkompassorientierung sowie die Bedeutung der Informationsübermittlung des Schwänzeltanzes für die Fernorientierung bestätigt und erweitert worden sind [4]. Karl v. Frisch ist unbestritten einer der bedeutendsten deutschsprachigen Verhaltensforscher, und seine Unter-

suchungen beschränkten sich nicht nur auf die Honigbiene. Er hat auch auf anderen Gebieten geforscht und beispielsweise zur Sinnesphysiologie der Fische gearbeitet und die Pheromonforschung mit angestoßen. Als begnadeter Hochschullehrer inspirierte er eine Vielzahl an Forschern, die in seine wissenschaftlichen Fußstapfen traten. Sein Bestseller „Aus dem Leben der Bienen“ wurde 2019 wieder aufgelegt [5].

Literatur

- [1] R. Stripf (2018). Die Bienenzucht in der völkisch-nationalistischen Bewegung. Diss. phil., PH Heidelberg. <https://opus.ph-heidelberg.de/frontdoor/index/index/docId/282>
- [2] T. Munz (2018). Der Tanz der Bienen. Karl von Frisch und die Entdeckung der Bienen-sprache. Czernin Verlag, Wien.
- [3] T. Heidborn (2010). Der Forscher, der auf Bienen flog in MaxPlanckForschung 1 | 10, S. 77–82, www.mpg.de/779937/MPF_2010_1
- [4] R. Menzel, M. Eckoldt (2019). Die Intelligenz der Bienen – Wie sie denken, planen, fühlen und was wir daraus lernen können, Penguin Verlag, München.
- [5] K. v. Frisch (2019). Aus dem Leben der Bienen, Verlag Czernin, Wien.

Carsten Roller, VBIO

AUS DEM VBIO

EU-Kommission: Regulation Neuer Genomischer Techniken



Pixabay CC0.

Die EU-Kommission hat im Juli 2023 einen Entwurf zur künftigen „Regulierung der Nutzung von Pflanzen, die mithilfe Neuer Genomischer Techniken (NGT) gezüchtet wurden“ vorgelegt. In einer anschließenden Konsultation gab es insbesondere von Seiten der Kritiker/-innen der NGT deutliche Ablehnung, aber auch zustimmende Äußerungen von Wissenschaftler/-innen. Wie bewertet der VBIO den vorliegenden Entwurf?

Der VBIO hat im September gemeinsam mit seiner Mitgliedsgesellschaft, dem Wissenschaftskreis Genomik und Gentechnik e. V. (WGG) eine detaillierte Stellungnahme zum Entwurf der EU-Kommission vorgelegt. Darin weisen sie darauf hin, dass Wissenschaftler/-innen bereits in der Vergangenheit mehrfach nachdrücklich eine zeitgemäße Reform der veralteten Gentechnikgesetze angemahnt hatten. Bereits in den Jahren 2016 [1] und 2020 [2] hatten VBIO und WGG Stellung bezogen und entsprechende Kriterien zur Umsetzung vorgeschlagen. Der nun vorliegende Vorschlag der EU-Kommission spiegelt viele der dort vortragenen Gedanken wider.

Differenzierte Regulierung

Nach Überzeugung von VBIO und WGG wird die vorgeschlagene Gesetzesänderung die Pflanzenforschung erleichtern und dazu beitragen, das große Potenzial der Neuen Genomischen Techniken für eine nachhaltige Landwirtschaft in Europa zu nutzen. Es handelt sich um einen gut ausbalancierten Vorschlag, der die Empfehlungen und Interessen von Wissenschaft und Forschung angemessen berücksichtigt. So sollen Pflanzen, die mit NGT entwickelt werden, künftig in zwei Kategorien (NGT-1, NGT-2) mit unterschiedlichen Prüfanforderungen eingestuft werden. Zur Kategorie 1 gehören alle Pflanzen, die gleichwertig zu konventionell gezüchteten Pflanzen sind, und die Äquivalenzkriterien mit konventio-

nellen Pflanzen gemäß Annex I [3] des Vorschlags erfüllen. Dies ist fachlich sinnvoll und aus gesetzgeberischer Sicht folgerichtig. Die nach aktuellem Stand der Technik gängigsten Anwendungen von NGT mit Techniken wie CRISPR/Cas werden damit ermöglicht.

Wissenschaftlich nachvollziehbare Grenzen zur Kategorisierung

Die ebenfalls im Annex I festgelegte Größenordnung von bis zu 20 Nukleotiden, die ersetzt oder eingefügt werden können, um den Kriterien von NGT-Pflanzen der Kategorie 1 zu entsprechen, ist wissenschaftlich weitgehend nachvollziehbar, da statistisch bei der Größe der Pflanzengenome nur Sequenzabfolgen mit deutlich mehr als 20 Nukleotiden als fremd klassifiziert werden können. Die Begrenzung erlaubt also eine recht sichere Unterscheidung von NGT- und klassischen transgenen Pflanzen, da zur Einbringung artfremder Gene (Transgenese) längere Sequenzen notwendig sind. Die vorgeschlagene Grenze von 20 Nukleotiden ist eher konservativ, aber als pragmatische Grenze zu akzeptieren.

Sicherheitsbewertung folgt Empfehlungen aus der Wissenschaft

Die EU-Kommission folgt in ihrem Vorschlag – auch in Hinblick auf die Sicherheit der NGT-Pflanzen – der Bewertung, wie sie von der Europäischen Behörde für Lebensmittel-

sicherheit (EFSA) sowie wissenschaftlichen Organisationen in Deutschland, Europa und weltweit vertreten wird: Diese Pflanzen sind ebenso sicher für Mensch, Tier und Umwelt wie jene aus konventioneller Zucht. Die Beurteilung von Pflanzen nach ihren Eigenschaften und nicht nach Art der Erzeugung, ist aus wissenschaftlicher Sicht sinnvoll.

Abwägung von Risikoprofil und Nachhaltigkeitspotential

Die vorgeschlagenen Bestimmungen stellen sicher, dass alle NGT-Pflanzen einer Regulierungsaufsicht unterliegen, die auf ihr Risikoprofil zugeschnitten ist. Zudem muss auch das Saatgut von NGT-1-Sorten im Sinne der Transparenz verbindlich gekennzeichnet werden und in einer öffentlichen Datenbank registriert werden. Damit hat jedes landwirtschaftliche Unternehmen Wahlfreiheit. Mit einem generellen Verbot von NGT-Pflanzen für den ökologischen Landbau wiederum soll dem Wunsch der Bioverbände entsprochen werden.

Darüber hinaus ist es aus Sicht des VBIO und der WGG sinnvoll, dass der Gesetzesentwurf die Regulierung an nachhaltige Eigenschaften knüpft, beispielsweise wenn mithilfe von NGT-Methoden Pflanzen erhöhter Toleranz oder Resistenz gegenüber Krankheiten und Schädlingen generiert werden. Gleiches gilt auch in Hinblick auf höhere Toleranz gegenüber abiotischen Belastungen (z. B. extreme Temperaturen oder Dürren), einen höheren Nährwert oder höhere Erträge. Solche Pflanzen können maßgeblich dazu beitragen, die ambitionierten Ziele im Bereich des EU *Green Deals* und der *Sustainable Development Goals* (SDG), insbesondere SDG 2 „Beendigung des Hungers“ und SDG 13 „Bekämpfung des Klimawandels“ zu erreichen.

Freilandstudien zu NGT-1-Pflanzen werden ermöglicht

Die Durchführung notwendiger Feldstudien von NGT-1-Pflanzen

wird durch den Vorschlag – an den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik angepasst – ermöglicht. Dies ist auch für die Forschung von Bedeutung. Bisher waren entsprechende Forschungsarbeiten aufgrund der hohen bürokratischen Hürden und der massiven Feldzerstörungen der Vergangenheit kaum und *de facto* nur im Ausland durchführbar. Für Forschende ergeben sich nun neue Möglichkeiten, die Funktion von genetischen Varianten in der Anpassung an bestimmte Umweltsituationen experimentell im Freiland zu überprüfen. Damit lässt sich zukünftig ein tieferes Verständnis von Genomen und

Wechselwirkungen von Genen unter verschiedenen Stressfaktoren gewinnen. Der von der EU-Kommission vorgelegte Vorschlag wird daher nicht nur die Zulassung, sondern auch die Freilandforschung deutlich erleichtern. Dies wird eine große Innovationsdynamik mit sich bringen. Die EU zieht damit endlich mit anderen Staaten gleich und ermöglicht den Einsatz notwendiger Zukunftstechnologien in der Pflanzenzucht.

Vor diesem Hintergrund begrüßen VBIO und WGG den Vorschlag der EU-Kommission und hoffen auf eine erfolgreiche Umsetzung im Rahmen der weiteren regulatorischen und politischen Prozesse.

AUS DEM VBIO

Jahrestreffen der Vorsitzenden der VBIO-Landesverbände

Zum diesjährigen Treffen der Landesverbände im VBIO am 30. September hatte der Vorsitzende des Landesverbands Mecklenburg-Vorpommern, PD Dr. Christian Wirkner von der Universität Rostock in das Zoologische Institut eingeladen. Vor der mehrstündigen Arbeitssitzung erhielten die Landesvorsitzenden eine Führung durch die Zoologische Sammlung der Universität Rostock, die im Jahr 1775 gegründet wurde und damit eine der ältesten zoologischen Sammlungen Norddeutschlands ist. Am Spätnachmittag rundete ein Besuch der Robbenstation in Warnemünde das Programm ab.

Neben den Ländervertretungen war auch Prof. Dr. Felicitas Pfeifer, Sprecherin der Fachgesellschaften, anwesend, was sich erneut als sehr bereichernd herausstellte. Unterstützung kam ferner durch die Geschäftsstelle München: Dr. Simon Häußler berichtete nicht nur zur Mitgliederentwicklung und den Finanzen, er übernahm auch den Tagesordnungspunkt zur Karl-von-Frisch-Preisverleihung mit Überlegungen zur bundesweiten

Vereinheitlichung der logistischen Abwicklung. Margarete Radermacher informierte zu Inhalten der letzten Präsidiumssitzungen und berichtete insbesondere auch zur Arbeit der Ständigen Ausschüsse „Publikationswesen“, „Fachgesellschaften und Landesverbände“ sowie „Public Relations“. Mit Blick auf ein geeignetes Informationsformat, um die Arbeit des VBIO nach außen besser sichtbar zu machen, berichtete Marga Radermacher, dass statt der zunächst angedachten Broschüre der so gut ankommende, kompakte und aussagekräftige Jahresbericht zu einem Jahresband aufgewertet werden soll. Der Erfolg des Angebots „Faszination Biologie“ wurde beschrieben und die Vorbereitungen für das zweite Dialogforum Anfang 2024 zum Thema „Tierversuche“ wurde in seiner Komplexität deutlich gemacht.

Breiten Raum nahmen schließlich die Aktivitäten der Landesvorsitzenden ein, die ihre Arbeit und das damit verbundene Investment schilderten. Wieder zeigte sich, dass die Bandbreite der öffentlichkeitswirksa-

Den Wortlaut der gemeinsamen Stellungnahme von VBIO und WGG finden Sie hier: <https://t1p.de/1jtls>

Literatur

- [1] <https://www.wgg-ev.de/aktionen/impulspapier-1-0/>
- [2] https://www.vbio.de/fileadmin/user_upload/wissenschaft/pdf/200129_Impulse_Genome_Editing_2.pdf
- [3] https://food.ec.europa.eu/system/files/2023-07/gmo_biotech_ngt_proposal_annex.pdf

*Kerstin Elbing
auf Basis der Stellungnahme
von VBIO und WGG*



ABB. 1 Die Vorsitzenden der einzelnen Landesverbände.

men Anstrengungen – u.a. in Kooperation mit Universitäten und anderen Institutionen – sehr groß ist. Sie reicht über Beratung vor Ort – vor allem in Schulen, Unterstützung bei Wettbewerben über zahlreiche und verschiedenartige Vortragsformate mit wissenschaftlichem Input bis hin zu Workshops und groß angelegten Lehrerfortbildungsangeboten und Biologentagen.

Rückschauend war die Tagung von dem gemeinsamen Wunsch geprägt, dass die Leitwissenschaft Biologie und was sie leistet, in der Öffentlichkeit stärker bewusst gemacht werden sollte. Dazu wäre eine Profilschärfung der Biologinnen und Biologen notwendig. Wie kann diese aber angesichts der unglaublichen Diversität von biologischen Disziplinen gelingen?

*Marga Radermacher,
Sprecherin der Landesverbände*



ARS LEGENDI[®] FAKULTÄTENPREIS

MATHEMATIK UND NATURWISSENSCHAFTEN **2024**

Zum elften Mal loben der Stifterverband, die Deutsche Mathematiker-Vereinigung, die Deutsche Physikalische Gesellschaft, die Gesellschaft Deutscher Chemiker und der Verband Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland den Ars legendi-Fakultätenpreis aus.

Der Preis wird in den Kategorien Biowissenschaften, Chemie, Mathematik und Physik vergeben. Ausgezeichnet werden Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen für herausragende und innovative Leistungen in Lehre, Prüfung, Beratung und Betreuung an Hochschulen.

DER PREIS IST MIT JEWEILS 5.000 EURO DOTIERT.

Fakultäten und Fachbereiche, lokale Vertretungen der jeweiligen Fachgesellschaften und Fachschaften können Vorschläge einreichen; Eigenbewerbungen sind zulässig.

BEWERBUNGSSCHLUSS: 26. JANUAR 2024

Nähere Informationen und die Ausschreibungsunterlagen unter:

[www.stifterverband.org/
ars-legendi-mn](http://www.stifterverband.org/ars-legendi-mn)



NOBELPREIS FÜR PHYSIOLOGIE ODER MEDIZIN 2023

mRNA als revolutionäre Wirkstoffklasse

Katalin Karikó und Drew Weissman werden für „Erkenntnisse über Nukleosid-Basenmodifikationen, die die Entwicklung wirksamer mRNA-Impfstoffe gegen COVID-19 ermöglichten“ mit dem Nobelpreis für Physiologie oder Medizin ausgezeichnet.

Die beiden Laureaten leisteten Pionierarbeit für den Einsatz von mRNA als Medikamente oder Impfstoffe. Bei diesem neuartigen Konzept produziert der Körper selbst den eigentlichen Wirkstoff, das von der mRNA kodierte Protein. So entfällt der enorme Zeitaufwand für die Produktion und Reinigung der betreffenden Proteine und – im Gegensatz zu rekombinanter Produktion – erfahren die Proteine in menschlichen Zellen posttranslationale Modifizierungen, die unter Umständen funktionell wichtig sind. Ungeachtet der gegenüber DNA geringeren Stabilität fiel die Wahl auf mRNA, die direkt als Matrize für die Proteinsynthese dient und nicht erst den Weg in den Zellkern, den Ort der Transkription von DNA, finden muss. Vorteilhaft ist weiterhin, dass nach dem gegenwärtigen Wissensstand die genetische Information der mRNA mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit nicht in das Genom der Empfängerzelle integriert wird.

Auch wenn – oder vielleicht weil – die COVID-19-Impfstoffe bei der Würdigung durch das Nobel-Komitee dominieren, muss an dieser Stelle an weitere, breit gefächerte Anwendungsoptionen erinnert werden. Dass sich mRNA schnell und kostengünstig produzieren sowie an wechselnde Bedingungen anpassen lässt, begünstigt zwar den Einsatz als Impfstoff gegen wandelbare Erreger wie Influenza- oder Coronaviren. Aber auch für die Therapie von Tumoren, deren Antigene in der Regel schwerer zugänglich sind als die von Infektionserregern, eröffnen sich dadurch völlig neue Perspektiven. Weiteres Anwendungspotenzial ergibt sich für die Therapie von Erbkrankheiten: Mit Hilfe der als Medikament applizierten

mRNA kann der Körper fehlende körpereigene Proteine selbst herstellen bzw. funktionslose ersetzen.

In allen Fällen bleibt die therapeutische Anwendung von mRNA eine Herausforderung, nicht nur bezüglich ihrer Stabilisierung und Verpackung in für eine zielgerichtete Applikation speziell entwickelte Liposomen oder der Effizienz der Proteinproduktion. Die Vermeidung unerwünschter Wirkungen, d. h. die Sicherheit bei der Anwendung, war ein wesentliches Anliegen der Laureaten. Sie hatten festgestellt, dass synthetische bzw. durch *in vitro*-Transkription generierte mRNA nicht nur die für Impfstoffe gewünschte Bildung spezifischer Antikörper auslöst, sondern auch die unspezifische angeborene Immunantwort, d. h. durch Cytokine gesteuerte Entzündungsreaktionen. Vermittelt wird diese Reaktion einerseits durch Toll-ähnliche Rezeptoren (TLR), andererseits durch die 2'5'-Oligoadenylat-Synthase (OAS) – eine Komponente der Abwehr fremder Nukleinsäuren im Cytoplasma. Demnach wird *in vitro* transkribierte mRNA als fremd erkannt, muss sich also von der zelleigenen unterscheiden. Indem Katalin Karikó mRNA mit verlängertem stabilisierendem Poly-A-Schwanz einsetzte, konnte sie die unspezifische Immunantwort abschwächen und die Effizienz der Translation verbessern. Doch den Durchbruch brachte erst die Berücksichtigung von Basenmodifikationen der körpereigenen mRNA, die der *in vitro*-transkribierten fehlen. Dazu gehören die Methylierung von Cytosin, Adenin oder Uracil und die Isomerisierung von Uridin zu Pseudouridin (Abbildung 1). Sie sind zwar bei mRNA wesentlich seltener als bei tRNA,

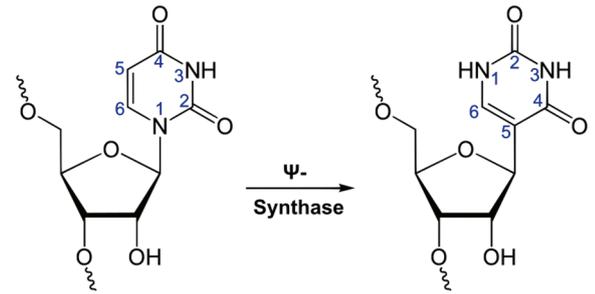


ABB. 1 Bei der enzymatischen Isomerisierung von Uridin zu Pseudouridin (Ψ) wird die Position der beiden Keto-Gruppen der Nucleobase vertauscht. Die Basenpaarung mit Adenin sowie die Codierung durch Pseudouridin enthaltende Basentriplets bleiben davon unbeeinflusst. Abb.: Wikimedia Commons.

doch nicht minder bedeutsam, um mRNA als körpereigen zu kennzeichnen. Dabei sind nach den Erkenntnissen der Laureaten Uridin-Modifizierungen entscheidend für die Vermeidung der unspezifischen Cytokin-Antwort. Bei der Produktion von Impfstoffen wie den COVID-19-Vakzinen wird dem meist durch Inkorporation von *N1*-Methyl-Pseudouridin in die mRNA Rechnung getragen.

Bemerkenswert ist, dass die mRNA-Impfstoffe – im Gegensatz zu herkömmlichen – nicht nur die CD⁴⁺-T-Zell-Antwort und damit die Produktion zirkulierender Antikörper stimulieren können, sondern auch die für die Elimination von Tumoren oder mit Viren-infizierten Zellen erforderliche cytotoxische CD⁸⁺-T-Zell-Antwort.

Katalin Karikó, gebürtige Ungarin, wirkte seit ihrer Postdoktorandenzeit als Biochemikerin an der Universität von Pennsylvania, wo sie auf den Immunologen Drew Weissman traf. Ihre durch komplementäre Expertise zweier Fachgebiete befruchtete Zusammenarbeit lieferte bahnbrechende Erkenntnisse, die bis zuletzt in der Öffentlichkeit wenig beachtet wurden. Neben der anwendungsorientierten Forschung agiert Katalin Karikó als externe Beraterin für BioNTech RNA Pharmaceuticals.

Literatur

- [1] K Karikó et al. (2008). Incorporation of pseudouridine into mRNA yields superior nonimmunogenic vector with increased translational capacity and biological stability. *Mol Ther.* 16, 1833–1840.

Annette Hille-Rehfeld, Stuttgart



III. Niklas Elmhed © Nobel Prize Outreach.



BIOCHEMIE

Was die Walnuss mit Liebstöckel und Haferflocken verbindet

Bei der Walnuss führt die Kombination bekannter Aromastoffe zu einem völlig neuen Geschmackseindruck: Der Aromastoff des Liebstöckel, Sotolon (3-Hydroxy-4,5-dimethylfuran-2(5H)-on), und das für den Geruch von Haferflocken verantwortliche (2E,4E,6Z)-Nona-2,4,6-trienal prägen im Mischungsverhältnis 1:1 den typischen Walnussgeschmack.

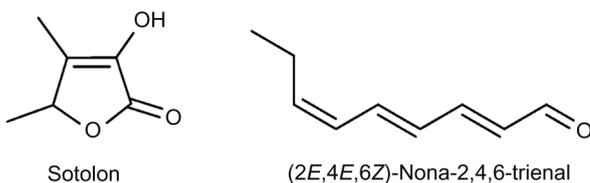


ABB. 1 Struktur der geschmacksbildenden Substanzen der Walnuss.

Unser Eindruck vom Geschmack einer Speise basiert bekanntlich auf dem Zusammenspiel verschiedener chemischer Sinne: Die hauptsächlich auf der Zunge gelegenen Geschmackssinneszellen nehmen die Qualitäten süß, sauer, salzig, bitter oder umami wahr, Schmerzrezeptoren tragende Sinneszellen der Zunge vermitteln den Eindruck scharf und die Riechsinneszellen der Nasenschleimhäute registrieren flüchtige Geruchsstoffe. Die große Vielfalt solcher Aromen und dazu passender olfaktorischer Rezeptoren ermöglicht eine differenzierte Geschmacksempfindung.

Der typische Geschmack der Walnuss (*Juglans regia* L.) unterscheidet sich klar von dem anderer Nusskerne wie Haselnuss, Mandeln oder Cashew. Bereits seit etwa 50 Jahren geht man davon aus, dass der Geschmack der Walnuss durch eine Kombination mehrerer Aromastoffe entsteht, ohne dass die relevanten Komponenten bislang identifiziert werden konnten. Wissenschaftler vom Leibniz-Institut für Lebensmittel-Systembiologie an der Technischen Universität München gelang jetzt an Diethylether-Extrak-

ten aus Walnusskernen die massenspektroskopische Identifizierung von 50 flüchtigen Aromastoffen, überwiegend Oxidationsprodukte von Fettsäuren, darunter Aldehyde, Ketone und Lactone [1]. Die Mehrzahl der Substanzen wurde in Walnüssen erstmals nachgewiesen, ist aber in anderem Zusammenhang als Aromastoffe bekannt. Die ihnen zugeschriebenen Geruchsqualitäten reichen vom Fettgeruch über Blütenduft bis hin zu grasartig, süßlich oder käsig. Im Einklang mit der Ausgangshypothese zeigt keine dieser Substanzen für sich allein den typischen Walnussgeruch.

Bei Riechtesten an Verdünnungsreihen fiel auf, dass zwei Substanzen selbst bei äußerst starker Verdünnung noch wahrnehmbar waren (Abbildung 1): Sotolon (Verdünnungsfaktor 512) und (2E,4E,6Z)-Nona-2,4,6-trienal (Verdünnungsfaktor 1024). Beide gehörten mit Konzentrationen von jeweils ca. 10 µg/kg zu den abundanteren Geruchskomponenten, nach Essigsäure (44 mg/kg), anderen niedermolekularen Alkansäuren und Vanillin (105 µg/kg). Dies war insofern bemerkenswert, als der Geruch der Einzelsubstanzen nicht an Walnüsse erinnert: Sotolon vermittelt den charakteristischen Geruch der Samen und Blätter des Liebstöckel (*Levisticum officinale*) und weiterer Gewürzpflanzen wie Bockshorn- und Schabzigerklee. Bei verarbeiteten Lebensmitteln bestimmt es den Geruch bekannter Suppenwürzen sowie von Currypulver und Sojasauce. Sotolon wird nicht nur im Stoff-

wechsel von Pflanzen gebildet, sondern auch im Rahmen der so genannten Maillard-Reaktion, die beim Erhitzen bestimmter Lebensmittel zur Bräunung führt. (2E,4E,6Z)-Nona-2,4,6-trienal wird für den Geruch von Haferflocken verantwortlich gemacht, trägt unter anderem zum Geruch von schwarzem sowie grünem Tee bei und wird von den Pflanzen aus Linolensäure gebildet.

Für Geruchstests wurden die isolierten Komponenten des Etherextrakts als Einzelsubstanzen oder in unterschiedlichen Kombinationen in Öl mit einem geringen Anteil an gepufferter Phosphatlösung gelöst, um die Verhältnisse in den fettreichen Walnüssen nachzustellen. Der Geruch dieser Proben wurde systematisch mit dem kompletten, nach Walnuss riechenden Extrakt verglichen. Dabei repräsentierte ein binäres Gemisch aus Sotolon und (2E,4E,6Z)-Nona-2,4,6-trienal im Verhältnis von 1:1 am besten den Walnussgeruch. Dazu passend enthielt der Walnussextrakt beide Substanzen ebenfalls im 1:1-Verhältnis, während anders riechende Nusskerne (Cashew, Haselnuss, Mandeln) davon abweichende Mischungsverhältnisse aufwiesen. Dies galt auch für die mit der Walnuss verwandte Pekannuss, obwohl deren Geruch eine gewisse Ähnlichkeit mit dem der Walnuss aufweist. Demnach bestimmt das Mengenverhältnis der beiden Substanzen den ausgeprägten Walnussgeruch. Das Ergebnis wurde in Weglass-Versuchen bestätigt, bei denen die Proben die Zusammensetzung des Walnussextrakts jeweils ohne einzelne Komponenten repräsentierten. Der verblüffende Befund lässt sich nach Martin Steinhaus, dem federführenden Autor der Studie, im Mischversuch einfach nachvollziehen [2]: einen Esslöffel Haferflocken in einem Glas tropfenweise mit Liebstöckel enthaltender Suppenwürze mischen und riechen.

Abschließend sei bemerkt, dass das verblüffende Phänomen völlig neuer Geschmacksqualitäten durch

die Kombination von Geruchsstoffen nicht unbekannt ist: Beispielsweise ergibt sich durch Mischen des nach gekochten Kartoffeln riechenden Methional mit dem nach Geranienblättern riechenden (5Z)-Octa-1,5-dien-3-on im Verhältnis von

100:1 ein fischartiger Geruch. Im Hinblick auf die große Zahl bekannter Geruchsstoffe stellt sich die Frage, ob sich bei genauem Hinsehen weitere derartige Beispiele finden lassen.

ARTENSCHUTZ

Waldameisen sind vom Aussterben bedroht!

Obwohl die Waldameisen seit über 200 Jahren unter Naturschutz stehen, sind sie in Deutschland inzwischen vom Aussterben bedroht. Die Gründe dafür sind vielfältig. Neben einer menschengemachten Vernichtung ihres Lebensraumes und witterungsbedingtem Nahrungsmangel werden Ameisen auch an vielen Orten direkt mit Insektiziden bekämpft. Ein Verlust der Ameisen wird aber ökologische Konsequenzen haben – nicht zuletzt, weil sie die Nahrungsquelle vieler Vögel sind.

In Deutschland leben 116 verschiedene Ameisenarten, in Bayern sind 87 Ameisenarten bekannt. Davon werden bereits 59 Arten in der „Roten Liste gefährdeter Ameisen Bayerns“ geführt. Am auffälligsten sind die heimischen Waldameisen mit ihren großen Nesthügeln. In einem Waldameisennest können mehr als eine Million Arbeiterinnen leben, diese wiegen zusammen etwa nur 7 kg. In den Nestern kön-

nen eine Königin oder auch mehrere hundert leben und diese werden bis zu 25 Jahre alt. Die Arbeiterinnen werden bis zu 6 Jahre alt und können etwa das 40-fache ihres Eigengewichtes tragen. Durch ihre räuberische Tätigkeit vertilgen große Waldameisenvölker bis zu 100.000 Insekten pro Tag. Durch die Pflege von Rinden-, Schild- und Blattläusen tragen die Ameisen zur Steigerung der Honigtauproduktion

Literatur

- [1] C. A. Stübner, M. Steinhaus (2023) J. Agric. Food Chem. 71, 7099–7108.
[2] <https://idw-online.de/de/news815982>

Annette Hille-Rehfeld, Stuttgart

bei. Hiervon haben nicht nur unsere Honigbienen einen großen Vorteil. Ameisen sind eine wichtige Nahrungsquelle für viele Tierarten, vor allem viele Vogelarten; besonders die Spechte (Abbildung 1) benötigen die Ameisen zur Aufzucht ihrer Brut.

Obwohl die Waldameisen seit über 200 Jahren unter Naturschutz stehen, sind sie neben den vielen kleineren Ameisenarten nun vom Aussterben bedroht. Waren es vor 35 Jahren nur punktuelle Ausfälle von Waldameisenvölkern oder Kolonien, haben wir seit ca. 6 Jahren einen enormen Verlust aus allen Regionen Deutschlands zu verzeichnen. In Bayern betrifft dies ebenfalls alle Gegenden. Selbst durch Ameisenheger intensiv betreute Bestände sind davon betroffen.

Hier einige Beispiele: Von den ehemals drei großen Kolonien der Wiesen-Waldameise (*Formica pratensis*, Abbildung 2) in der Rhön leben heute nur noch drei. Eine Kolonie mit 16 großen Einzelnestern der Kahlrückigen Waldameise (*Formica polyctena*) im Landkreis Erding ist innerhalb von vier Jahren auf drei kleine Nester geschrumpft. Im Jahr 2017 ist über den Winter eine Waldameisenkolonie mit 20 großen Einzelvölkern im Landkreis Wunsiedel ausgestorben. Im Landkreis Regensburg ist innerhalb von 20 Jahren eine Kolonie der Kahlrückigen Waldameise von 134 Völkern auf 4 kleine Völker geschrumpft. Im Landkreis Schwandorf sind bayernweit die meisten Waldameisenbestände kartiert, hier ist der Rückgang ebenso gravierend.



ABB. 1 Buntspecht mit Ameisen. Foto: Kirsten Krebs.



ABB. 2 Wiesen-Waldameise (*Formica pratensis*). Foto: Gerhardt Schmidt.

Habitatverlust und Nahrungsmangel

Die Ursachen sind nach unserer Ansicht zum einen die fehlende Eiweißnahrung (Insekten) der Ameisen im Spätherbst. Dadurch können sich die Tiere nicht das erforderliche Fettpolster für die Überwinterung anfressen und Ameisen legen keine Futtermittel an. Das hat zur Folge, dass bei solchen Witterungsverhältnissen mit extremer Trockenheit wie beispielsweise im Frühjahr 2021 die Nahrung nicht ausreicht, bis von außen wieder welche eingetragen werden kann. Ein weiterer Grund waren die extrem hohen Temperaturen der letzten zwei Jahre und die dadurch entstehende Trockenheit, welche den Bäumen große Probleme mit der Flüssigkeitsversorgung bereitete. Dies bedeutete wiederum für die Ameisen, dass die Honigtauerzeuger – Rinden-, Schild- und Blattläuse – ebenfalls in ihrer Entwicklung gehemmt waren und so der für die Ameisen wichtige Honigtau nicht produziert werden konnte. Ein weiterer Grund für den Rückgang ist die Zerschneidung und Vernichtung der Lebensräume durch den Verbrauch von Flächen durch Baumaßnahmen aller Art. Hinzu kommen noch die Schäden in den Wäldern durch Stürme.

Bei Waldameisen ist der Ausfall der Völker leicht festzustellen. Viel schlimmer ist es bei den vielen kleineren Ameisenarten. Hier ist der Zustand nach unserer Einschätzung noch viel schlimmer. Gerade in Bereichen von Gärten werden Ameisen mit allen möglichen Methoden bekämpft. Was aber bei uns immer für Erschrecken sorgt, ist die Tatsache, dass sogar auf Kinderspielplätzen mit Insektiziden Jagd auf sie gemacht wird. Dies geschieht in kleinen Kommunen genauso wie in Großstädten wie München. Es werden Unmengen von Giften ausgebracht, welche oft in den Boden gespritzt werden und über lange Zeit dort verbleiben und vermutlich auch von den spielenden Kindern aufgenommen werden. Dabei gibt es andere effektive Methoden, um Ameisen aus den Spielbereichen fernzuhalten wie das regelmäßige Austauschen des Sandes und das Ersetzen von angefaulten Teilen von Spielgeräten und Klettereinrichtungen aus Holz.

Bei Baumaßnahmen ignoriert

Erschreckend ist der Umgang mit Ameisen bei Baumaßnahmen. Bei fast allen von uns ersichtlichen Baumaßnahmen müssen wir immer wieder feststellen, dass in den von

Landschaftsplanern erstellten Begleitplänen die Waldameisenbestände ganz fehlen. Teilweise werden Völker mit Ausmaßen der Nestkuppel von 3 m im Durchmesser und Höhen von 1,50 m nicht registriert. Bei Nachfragen unsererseits bekommen wir in der Regel die Antwort, dass die Erfassung der Ameisenvölker nicht im Auftrag des Baulastträgers beinhaltet war und auch von den Naturschutzbehörden nicht gefordert wurde. Auf Grund der dadurch unzureichend erstellten Pläne werden viele Völker bei der Bauausführung zerstört. Selbst Waldameisenvölker welche mit Pflöcken und Trassierband kenntlich gemacht sind, werden bei der Erstellung der Planungsunterlagen nicht aufgenommen. Bei der Betrachtung der Vernachlässigung der Waldameisen bei Planungen lässt sich nur erahnen, was mit den vielen kleineren Ameisenarten geschieht.

Um die weitere Zerstörung von Ameisenbeständen zu verhindern, ist eine sorgfältige Planung bei Eingriffen in die Lebensräume aller Ameisen erforderlich. Es ist nicht nachvollziehbar, dass in den meist sehr pompös aufgemachten Begleitplänen viele Arten, für die Schutzgebiete im NATURA 2000-Netz eingerichtet werden müssen (sogenannte FFH-Arten, z. B. Vögel), angeführt werden, deren Nahrungsquellen – die Ameisen – aber keine Berücksichtigung finden. Sollten sich die Beeinträchtigungen auf unsere Ameisen weiter so fortsetzen, wird es bald in manchen Gegenden keine Ameisen mehr geben. Die negativen Auswirkungen auf das Ökosystem werden sehr groß sein, allein das Fehlen der Ameisen als Nahrungsquelle für Vögel und andere Tiere führt auch zur Dezimierung dieser Arten. Dies gilt vor allem auch für die kleineren Ameisenarten, welche eine wichtige Nahrungsquelle für die Singvögel sind.

*Hubert Fleischmann,
Ameisenschutzbeauftragter LV Bayern*

ENTWICKLUNGSBIOLOGIE

Parthenogenese durch genetische Manipulation bei *Drosophila*

Einem Forschungsteam ist es durch genetische Manipulation gelungen, „jungfräuliche Geburten“ (Parthenogenese) bei der Taufliege *Drosophila melanogaster* auszulösen, also bei einem Tier, das sich normalerweise rein geschlechtlich fortpflanzt. Zu diesem Zweck sequenzierten sie Gene, deren Aktivität bei der verwandten, fakultativ parthenogenetischen Art *Drosophila mercatorum* darüber entscheiden, ob sich eine Eizelle auch ohne befruchtende Spermienzelle weiterentwickelt. Beeinflusst man die Genaktivität einer passenden Genkombination in *Drosophila melanogaster*, erzeugen auch diese Taufliegen parthenogenetische Nachkommen. Sie entstehen durch eine Verschmelzung von Meiose-Polzellen, weisen eine de-novo-Zentrosomenbildung auf und sind überwiegend triploid.

Zur sexuellen Fortpflanzung gehören normalerweise zwei Individuen: ein Weibchen mit Eizelle und ein Männchen mit Spermienzelle. Eine Jungfernzeugung (Parthenogenese) erscheint aus Menschensicht als biblische Ausnahme, ist vor allem bei Wirbellosen aber verbreitet [1].

Parthenogenese (eingeschlechtliche Fortpflanzung, engl. *asexual reproduction*) ist ein Sammelbegriff für Fortpflanzungstypen, bei denen sich eine Eizelle ohne Befruchtung zu einem Organismus mit rein mütterlichen Genen weiterentwickelt. Die zellulären Abläufe sind recht unterschiedlich: So kann eine diploide Vorläuferzelle der Eizelle sich zum Beispiel mitotisch zu einem kompletten Organismus weiterentwickeln. Geht der Parthenogenese eine Meiose voraus, kann aus der entstandenen haploiden Eizelle ein ebenfalls haploider Nachkomme hervorgehen. Dies ist etwa bei Bienen der Fall. Verschmilzt die unbefruchtete Eizelle dagegen mit einer der Meiose-Polzellen, entstehen diploide Nachkommen. Die Eizelle kann aber auch gleich mit mehreren Polzellen verschmelzen, daher ist Polyploidie bei parthenogenetischen Arten häufiger als sonst. Anders als bei der ungeschlechtlichen Vermehrung besteht der eingeschlechtliche Nachwuchs also

nicht unbedingt aus elterlichen Klonen, sondern weist durch genetische Rekombination eine gewisse Variabilität auf.

Bei Säugetieren verhindern epigenetische Methylierungen die Entwicklung von Embryonen mit rein mütterlichen Genen und damit die Parthenogenese. Väterliche Gene sind offenbar bei der Bildung von Fruchtblase und Plazenta unersetzlich. Ohne Befruchtung fehlen außerdem die von der Spermienzelle übernommenen Zentrosomen, die den Spindelapparat bei der Zellteilung organisieren.

Die Fähigkeit zur Parthenogenese hat durchaus evolutive Vorteile, denn sie erspart nicht nur die aufwändige Partnersuche und Paarung, sondern ist gleichzeitig eine reproduktive Absicherung für isolierte Weibchen in einer günstigen Umwelt. Das gilt besonders, wenn regelmäßig oder umweltbedingt zwischen sexueller Fortpflanzung und Parthenogenese gewechselt wird.

Fakultative Parthenogenese bei *Drosophila*

Das Haustier der Genlabore *Drosophila melanogaster* pflanzt sich sexuell fort, Parthenogenese kommt bei dieser Art nicht vor (Abbildung 1). Anders ist es bei der verwandten Art *Drosophila mercato-*

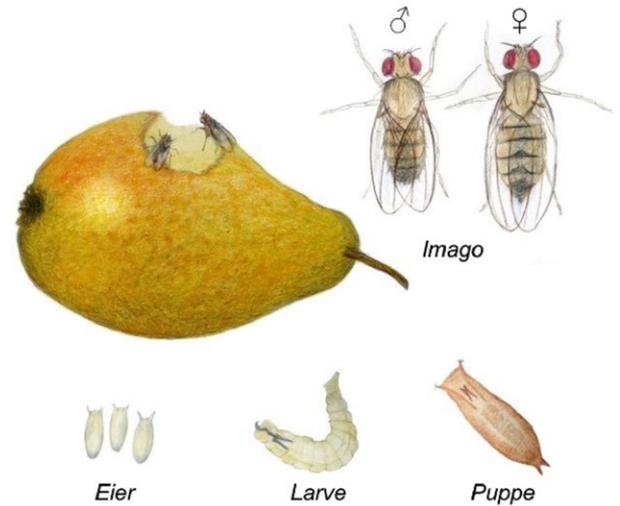


ABB. 1 Entwicklung der Taufliege *Drosophila melanogaster*. Abb. Inge Kronberg.

rum; hier gibt es Linien mit rein parthenogenetischen Nachkommen [2]. Ein Vergleich der Speicheldrüsen-Riesenchromosomen von *D. mercatorum* mit und ohne Parthenogenese zeigt bereits im Lichtmikroskop abweichende Chromosomen-Inversionen [3, 4]. Die jeweiligen Eier weisen Unterschiede in der Genexpression von 44 Genen auf, welche Zellteilung, Zentrosomenorganisation, Spindelbildung sowie den Zellzyklus beeinflussen. Sie kommen für die Steuerung der fakultativen Parthenogenese in Frage. Homologe Gene finden sich bei *D. melanogaster*; ihre Aktivität lässt sich dort mit der CRISPR/Cas-Methode ausschalten oder durch zusätzliche Kopien verstärken. Die Manipulation von nur einzelnen Genen führte dabei nicht zu entwicklungsfähigen Eiern. Wurde dagegen die Expression in der Kombination von drei ausgewählten Kandidatengen verringert bzw. gesteigert, entstanden durch diese Manipulation in *D. melanogaster* eingeschlechtliche Nachkommen, die ihrerseits zur Parthenogenese befähigt waren. Bei ihnen waren nach der Meiose Polzellen mit der Eizelle verschmolzen und Zentrosomen entstanden. Die Nachkommen waren teilweise triploid.

Damit ist eine genetische Basis der fakultativen Parthenogenese bei Tauflieden nachgewiesen. Möglicherweise lässt sich diese balancierte Über- oder Unterexpression von Genen auch bei anderen parthenogenetischen Arten finden. Das ist im Hinblick auf viele Ernteschädlinge interessant, die sich wie die Blatt-

läuse auch ohne Paarung sehr stark vermehren.

Literatur

- [1] I. Kronberg (2014). Genomik – Männerfreie Gesellschaft bei den Rädertieren. *BiuZ* 44 (4), 222–223.
- [2] A. R. Templeton (1979). The unit of selection in *Drosophila mercatorum*. *Genetics* 92, 1265–1282.

- [3] A. I. Sperling et al. (2023). A genetic basis for facultative parthenogenesis in *Drosophila*. *Current Biology*, <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.07.006>
- [4] A. Oza (2023). ‘Virgin birth’ genetically engineered into female animals for the first time. *Nature*, <https://doi.10.1038/d41586-023-02404-z>

Inge Kronberg, Büsum

ORNITHOLOGIE

Zwei Zugwege beim Kormoran

Der Kormoran ist eine Vogelart, die nicht selten im Fadenkreuz von Freizeitanglern und Berufsfischern einerseits und Vogelschützern andererseits steht. Umso wichtiger sind Erkenntnisse zur Lebensweise der Art, die so manches Vorurteil ausräumen und zur Versachlichung der Diskussionen beitragen können.



ABB. 1 Der Name Kormoran (*Phalacrocorax carbo*) leitet sich von dem altfranzösischen Wort für Wasserrabe ab. Die weitverbreiteten Küstenvögel ernähren sich fast ausschließlich von Fisch.

Im Jahr 2009 begann die Beringungszentrale Hiddensee – eine von drei dieser über Deutschland verteilten Einrichtungen – ein Farbberingungsprogramm an Kormoranen (*Phalacrocorax carbo*, Abbildung 1). Bis zum Jahr 2020 wurden 5078 Jungvögel im oder am Nest beringt, wovon 2767 bis zum 31.10.2020 wieder gefunden

wurden. Erkenntnisse zum Jahresaufenthalt, zur Zugphänologie, zum Ansiedlungsverhalten sowie zum Winterquartier waren das Ergebnis. Dabei kristallisierten sich zwei Zugwege heraus: „Der südliche über den Alpenraum nach Norditalien, von hier aus gegebenenfalls weiter über Korsika/Sardinien bzw. Italien/Malta bis nach Tunesien und Alge-

rien. Der westliche Zugweg umfasst den Abzug nach Südwesteuropa (Holland, Belgien, Frankreich, Spanien, Portugal). Auch Überwinterungen im französischen und spanischen Binnenland und an der Mittelmeerküste sowie Westalgerien und Marokko werden diesem Zugweg zugerechnet“, so die Autoren in der Zeitschrift „Vogelwarte“.

Doch nicht alle gekennzeichneten Kormorane erwiesen sich als ausgesprochene Zugvögel. Während einige Vögel unweit des Geburtsortes (in weniger als 100 km Entfernung) überwinterten, zogen andere weiter als 2500 Kilometer.

Bei der Wahl des Zugweges scheint die Herkunft eine Rolle zu spielen: Der Anteil der Vögel, der den südlichen Zugweg wählt, ist umso größer, je weiter südlich die Herkunftskolonie liegt. Auf dem westlichen Zugweg ziehen Jungvögel, die von der Ostseeküste oder aus dem norddeutschen Binnenland stammen, weiter als ältere Vögel. Auch der Heimzug von Jung- und Altvögeln unterscheidet sich deutlich: Altvögel verlassen ihre Überwinterungsgebiete überwiegend ab Mitte Februar, wobei in der zweiten Märzhälfte der Heimzug weitgehend abgeschlossen ist. Die Jungvögel dagegen kehren langsam – d. h. bis Ende Mai – aus dem Winterquartier zurück.

Literatur

- [1] C. Behringer et al. (2022). *Vogelwarte* 60, 169–192.

Wilhelm Irsch, Reblingen-Siersburg

SCHULE

Schülerlabor Künstliche Intelligenz – Verhaltensforschung im Biologieunterricht mit neuen Methoden

Die Verhaltensbiologie ist ein wichtiger Inhalt im Biologieunterricht. Das zielgerichtete, forschende Beobachten bereitet den Schüler/-innen jedoch häufig Schwierigkeiten und sollte vor allem praktisch eingeübt werden. Das Schülerlabor KILab bietet dafür eine innovative Möglichkeit.

Das Verhalten von Tieren ist ein Thema, das bei vielen Schüler/-innen Faszination auslöst, welche in verschiedenen Zusammenhängen positive Auswirkungen aufzeigen kann. So wurde beispielsweise festgestellt, dass Bildungsprogramme negative Verhaltensweisen gegenüber Tieren bei Zoobesucher/-innen verringern. Aber auch die persönliche Verbindung zur Natur kann durch das Lernen über das Verhalten von Tieren gefördert werden, insbesondere bei Schüler/-innen in größeren Städten und entsprechend geringerem Kontakt zur Natur. Vor allem aber bietet das Studium des Tierverhaltens eine praktische Forschungserfahrung und eine hervorragende Gelegenheit, den wissenschaftlichen Prozess und seine Methoden anhand eines konkreten Anwendungsbeispiels kennenzulernen.

Einige Schüler/-innen haben jedoch Probleme bei der Tierbeobachtung und es fällt ihnen

schwer, das Verhalten angemessen zu beschreiben. Oft verwechseln sie den Unterschied zwischen der Beschreibung und der Interpretation von Verhalten. Zusätzlich neigen Schüler/-innen dazu, Tiere zu vermenschlichen und emotionale Begriffe zu verwenden, um beobachtetes Verhalten auf der Grundlage ihrer eigenen Erfahrungen zu charakterisieren. Außerdem sind sie oft überrascht von der Menge an Verhaltensweisen, die in einem kurzen Zeitraum auftreten können, was eine ganzheitliche Erfassung des Verhaltens erschwert. Um diese Herausforderungen zu überwinden und von den positiven Effekten zu profitieren, müssen die Lernenden in erster Linie Erfahrungen im Erkennen und genauen Beschreiben von Verhalten sammeln. Daher sollte der Unterricht in Verhaltensbiologie einen praktischen Ansatz verfolgen, der den Lernenden wiederholt Gelegenheit gibt, das Erkennen



und Beschreiben von Verhalten zu üben und so Fehler, z. B. bei der Erstellung von Ethogrammen, zu reduzieren.

Praktischer Ansatz

Für einen praktischen Ansatz im Biologieunterricht gibt es verschiedene Möglichkeiten wie z. B. die Arbeit mit Tieren im Klassenzimmer oder den Besuch von außerschulischen Lernorten. Ein weiterer praktischer Ansatz ist die Verwendung von Videoaufnahmen. Hierbei ist vorteilhaft, dass einzelne Sequenzen des Tierverhaltens wiederholt betrachtet und ausgewertet werden können, was für Anfänger/-innen zunächst einfacher ist. Zoos bieten hier gute Möglichkeiten, entsprechende Aufnahmen von Wildtieren zu machen. Diese nicht-invasive und kostengünstige Methode ist ein wertvolles Werkzeug für den Unterricht und ermöglicht es Lehrkräften, ihre Schüler/-innen auf „digitale Exkursionen“ mitzunehmen [1]. Auch in der aktuellen Verhaltensforschung werden (längerfristige) Videoaufnahmen von Forscher/-innen häufig genutzt [2].

Schnittstelle Künstliche Intelligenz

Während es für Lernende wichtig ist, mit manuellen Verhaltensbeobachtungen zu beginnen, besteht ein weiterer Vorteil der Verwendung digitaler Methoden in der Möglichkeit, künstliche Intelligenz (KI) einzusetzen, um Aufgaben wie die Klassifizierung von Arten, Individuen, Lautäußerungen oder Verhal-



ABB. 1 Schüler/-innen bei der Durchführung des Schülerlabors Künstliche Intelligenz (KILab).

tensweisen innerhalb komplexer Datensätze zu bewältigen. Eine automatisierte Auswertung eignet sich dabei vor allem für Tiere, die schwer direkt zu beobachten sind wie etwa nachtaktive und aquatische Arten. Der Einsatz von KI ist eine gängige Methode zur Automatisierung der Analyse von Bild- und Audiodaten, die ebenfalls zunehmend in aktuellen Forschungsstudien eingesetzt wird [3]. Die hierfür erstellte Softwarelösung und das Videomaterial unterschiedlicher Wildtierarten – beides mit Hilfe der Opel-Zoo Stiftungsprofessur Zootierbiologie erarbeitet – können aber auch für ein Vermittlungskonzept zu aktueller Verhaltensforschung genutzt werden.

Schülerlabor Künstliche Intelligenz

Das „KILab“ ist ein außerschulisches Schülerlabor der Abteilung für Didaktik der Biowissenschaften (Goethe-Universität Frankfurt am Main), welches in Kooperation mit der Klaus Tschira Stiftung konzipiert wurde. Im KILab werden sowohl die digital unterstützte, manuelle Auswertung als auch die automatisierte Auswertung von Verhaltensaufnahmen mit KI vermittelt und als authentische Methoden aktueller Verhaltensforschung vorgestellt (Abbildung 1).

Der Labortag beginnt mit einer gemeinsamen Einführung, bei der die Schüler/-innen eine Videosequenz von Giraffen als Beispieltiere beobachten und deren Verhalten beschreiben. Anschließend werden typische Fehler des Operators „Verhaltensbeschreibung“ angesprochen wie z. B. voreilige Interpretationen des Verhaltens oder anthropomorphe Beschreibungen. Anschließend werden Videoaufnahmen von Elenantilopen (*Tragelaphus oryx*) des Opel-Zoos Kronberg mit Hilfe der BORIS-Software [4] digital ausgewertet. Die Dauer der Videoaufzeich-



ABB. 2 Schüler/-innen bei der Nutzung der DLoB-Software.

nung des verwendeten Forschungstieres beträgt 14 Stunden, weshalb das Video in sieben Abschnitte zu je zwei Stunden aufgeteilt und in Zweiergruppen analysiert wird. Die Ergebnisse der Gruppen werden dann zusammengefasst und kritisch hinsichtlich der Gesamtdauer der Beobachtung, der Anzahl der beobachteten Individuen und der Erfahrung der Beobachtenden bewertet.

Im zweiten Abschnitt des Labortages wird die Methode der künstlichen Intelligenz zur automatisierten Verhaltensbeobachtung genutzt. Mit Hilfe der eigens entwickelten grafischen Nutzeroberfläche DLoB (Abbildung 2) und der Free-ware LabelIMG [5] erarbeiten die Schüler/-innen die einzelnen Schritte der automatisierten Datenauswertung, um schließlich Verhaltensaufzeichnungen einer Elenantilope mit einer speziell angepassten KI-Software auswerten zu können. Abschließend werden die Vor- und Nachteile des Einsatzes von künstlicher Intelligenz diskutiert und der automatisierte Datenauswertungsprozess mit der „manuellen“ Auswertung mit BORIS verglichen.

Interessant ist die bereits nachgewiesene Technikakzeptanz gegenüber der genutzten Software. Diese zeigt, dass Schüler/-innen durchaus mit der Nutzung authentischer Forschungssoftware im Bereich der Verhaltensforschung zurechtkommen und diese nutzen können. Die Software kann daher gewinnbringend in den Unterricht eingebracht werden und auf diese Weise das Lernen mit authentischen Methoden aus der Forschung fördern. Die Teilnahme am KILab kann außerdem nachweislich die Einstellung gegenüber KI verbessern, da die Angst vor der neuen Technologie abnimmt und im Gegenzug ihre Akzeptanz zunimmt. Weiterhin fördert die Nutzung der digitalen Methoden zur Verhaltensanalyse bei Schüler/-innen die Technikaffinität, insbesondere bei den Schüler/-innen, die sich selbst als wenig technikaffin einschätzen [6].

Literatur

- [1] B. Eichhorst. (2018). Internet Webcams Provide Opportunities for College Student Research on Animal Behavior and Ecology. *The American Biology Teacher* 80, 680–685.
- [2] O. Friard, M. Gamba (2016). BORIS: a free, versatile open-source event-logging software for video/audio coding and live observations. *Methods in Ecology and Evolution* 7, 1325–1330.
- [3] J. Gübert et al. (2022). Bovids: A deep learning-based software package for pose estimation to evaluate nightly behavior and its application to common elands (*Tragelaphus oryx*) in zoos. *Ecology and Evolution* 12, e8701.
- [4] I. Seyrling et al. (2022). Diurnal and Nocturnal Behaviour of Cheetahs (*Acinonyx jubatus*) and Lions (*Panthera leo*) in Zoos. *Animals: An Open Access Journal from MDPI* 12.
- [5] Tzotalin. (2015). LabelIMG. <https://github.com/tzotalin/labelimg>
- [6] M. Henrich et al. (2023). Students' technology acceptance of computer-based applications for analyzing animal behavior in an out-of-school lab. *Front. Educ.* 8, 1216318.

Marvin Henrich, Paul Dierkes
Goethe-Universität Frankfurt

ARTENSCHUTZ

Biodiversität: Vom Regenwald ins Klassenzimmer

Das Projekt „4Wildlife – vom Regenwald ins Klassenzimmer“ umfasst ein umfangreiches digitales Bildungsmaterial, inklusive kostenfrei verfügbarer Augmented-Reality-Anwendung, und interaktive Videobotschaften. Das Material kann nicht nur von Lehrkräften sinnvoll in den Unterricht eingebaut werden, sondern auch die App selbst und die Videos bieten Schüler/-innen die Möglichkeit, spielerisch und selbstgestaltend zu lernen.



ABB. 1 Vom Regenwald ins Klassenzimmer. Foto: Nepada Wildlife e. V.

Mit unserem gemeinnützigen Verein Nepada Wildlife haben wir uns neben der Initiative im internationalen Artenschutz auch dem Engagement in der Umweltbildung verschrieben. Im Fokus steht dabei insbesondere die Förderung des Arten- und Naturschutzes, der Schutz der Biodiversität und die Förderung einer nachhaltigen Entwicklung.

Das Konzept „4Wildlife“

Mit „4Wildlife – vom Regenwald ins Klassenzimmer“ (Abbildung 1) haben wir gemeinsam mit unseren Partner/-innen von *The Turquoise Change* e.V. ein innovatives Unterrichtsmaterial entwickelt, das Schüler/-innen und Lehrkräften in Zeiten von Corona auch zu Hause problemlos erreicht. Unter dem

Motto »Groß denken, lokal handeln, global wirken« klären wir mit 4Wildlife spielerisch über die Bedeutung von Biodiversität, den Regenwald und seinen Stockwerkbau sowie den Artenschutz auf. Mittels einer Augmented-Reality-(AR)-Anwendung, die kostenfrei auf Smartphones oder Tablets geladen werden kann, bieten wir Schüler/-innen einen emotionalen Zugang zum Thema Nachhaltigkeit.

Im Zentrum unserer Arbeit stehen die globalen Ziele für nachhaltige Entwicklung (SDGs = *sustainable development goals*). Wir fördern die Auseinandersetzung mit dem Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung und ermutigen die Schüler/-innen, komplexe Zusammenhänge zu erkennen, kritisch zu

hinterfragen und zu bewerten. Dafür arbeiten wir eng mit dem gemeinnützigen Verein *The Turquoise Change* zusammen.

4Wildlife richtet sich an Schüler/-innen der 7. Klasse und ergänzt die Bildungspläne der Länder. Es eignet sich insbesondere für die Fächer Geographie, Biologie, Politik, Ethik und Sozialkunde. In Anlehnung an den Orientierungsrahmen für den Lernbereich Globale Entwicklung der Kultusministerkonferenz (KMK) und des Bundesministeriums für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) besteht das übergeordnete Bildungsziel darin, grundlegende Kompetenzen für eine zukunftsfähige Gestaltung des Lebens, für die Mitwirkung in der Gesellschaft und die Mitverantwortung im globalen Rahmen zu erwerben. Dem lösungs- und handlungsorientierten Ansatz folgend und anhand innovativer Medien stärken die Schüler/-innen Kompetenzen wie kritisches Denken, Bewerten von bestehenden Lösungsansätzen bis hin zur Entwicklung von eigenen transformativen Handlungen unter Berücksichtigung der globalen Perspektive.

Mit diesem interaktiven Unterrichtsmaterial bieten wir einen innovativen Impuls für handlungsorientierten Unterricht zu den Themen Biodiversität und Artenschutz. Innovativ deshalb, weil wir Augmented Reality im Kontext einer Bildung für Nachhaltige Entwicklung so für den Unterricht einsetzen, dass das Thema Regenwald für Schüler/-innen auf besondere Weise erfahrbar wird (Abbildung 2).

Abgestimmt mit Bildungsstandards und BNE

Das konzipierte Unterrichtsmaterial knüpft an die Empfehlungen der Kultusministerkonferenz (KMK) zur Bildung in der digitalen Welt an und verbindet diese mit dem Nationalen Aktionsplan Bildung für nachhaltige Entwicklung (NAP BNE). 4Wildlife unterstützt die Umsetzung der neuen UNESCO BNE-Dekade mit ihrem



ABB. 2 Der Regenwald wird für Schüler/-innen auf besondere Weise erfahrbar. Foto: Maximilian Probst.



ABB. 3 Kapokbaum in der Augmented-Reality-App. Foto: Maximilian Probst.

Programm BNE 2030 und trägt zur Umsetzung der 17 Ziele für Nachhaltige Entwicklung im Rahmen der Agenda 2030 bei.

Mit dem Projekt soll ein stärkeres Bewusstsein für Biodiversität (Vielfalt der Arten, der Lebensräume sowie die genetische Vielfalt) und die Auswirkungen des Artensterbens für unser aller Leben geschaffen werden. Mittels didaktisch aufbereiteter und neuer digitaler Medien sowie Visualisierung sollen interaktive Zugänge zu Themen der Biodiversität in den Unterricht gebracht werden. Mittels eines AR-Tools haben Schüler/-innen die Möglichkeit, (zunächst virtuell) Erfahrungen als Artenschützer/-innen zu machen und zu erproben. Durch diesen emotionalen Zugang zur globalen Thematik lernen sie Zusammenhänge von Artenschutz und

Klimakrise kennen, erfahren die Auswirkungen ihres eigenen Handelns und können anschließend Handlungsoptionen zum aktiven Artenschutz entwickeln und umsetzen. Das komplexe, globale Thema der Biodiversität wird im eigenen Klassenzimmer erfahrbar gemacht, lokale Handlungsoptionen können mit Wirkung erprobt werden. Mit diesem Projekt werden über den Zugang des SDG 15 (Ziel 15: Leben an Land) die Verflechtungen mit den weiteren SDGs im globalen Kontext aufgezeigt und ein Bewusstsein für die Bedeutung der Agenda 2030 in Deutschland geschaffen.

Schüler/-innen sind die nächste Generation, die von den Auswirkungen der Klimakrise und dem Verlust der Biodiversität betroffen sind. Deswegen ist es wichtig, gerade ihnen eine Begeisterung für die Natur und ein Wissen über die Bedeutung und den Nutzen von Biodiversität zu vermitteln. Zwar taucht das Thema der biologischen Vielfalt in den Lehrplänen auf, doch werden dabei konkrete Handlungsoptionen für den Artenschutz kaum berücksichtigt oder eingeübt. In diesem Projekt lernen Schüler/-innen direkt mit Expert/-innen und bekommen die Möglichkeit, virtuell zu Artenschützer/-innen und somit zu *Change Agents* zu werden. Außerdem gelingt es mit diesem Projekt, Biodiversität nicht nur vor der eigenen Haustür, sondern auch im globalen Kontext zu verstehen. Solche Möglichkeiten sind bisher kaum im Unterricht abgebildet.

Erklärvideos von Hannah Emde

Auf der Seite des gemeinnützigen Nepada Wildlife e. V. steht das digitale Bildungsmaterial zum Download zur Verfügung. Außerdem gelangt man zu den vier Videobotschaften der Tierärztin Hannah Emde, in der sie über ihre Arbeit als Tierärztin und den internationalen Artenschutzprojekten erzählt. Die Erzählungen sind mit persönlichem Bildmaterial veranschaulicht (<https://www.nepadawild.life/bildung/>).

Video 1: Artenschutz in Guatemala und der Kapokbaum (5:53)

Im ersten Video stellt sich Hannah Emde vor und berichtet von ihrer Arbeit als Wildtierärztin und Gründerin des Artenschutzvereins Nepada Wildlife e. V., mit dem sie sich für den Erhalt der biologischen Vielfalt einsetzt. Sie erklärt, dass die biologische Vielfalt sich aus der Artenvielfalt, der Vielfalt der Lebensräume und der genetischen Vielfalt zusammensetzt. Des Weiteren erzählt sie von einem Artenschutzprojekt in Guatemala, bei dem sie gearbeitet hat, um gemeinsam mit einem Forscherteam Hellrote Aras (*Ara macao*) zu schützen. Dafür haben sie zum Beispiel Nistkästen aufgehängt und Baumhöhlen von Parasiten gereinigt, um die Fortpflanzungsmöglichkeit im natürlichen Lebensraum zu erhalten. Sie berichtet auch von kranken und verletzten Küken, die sie von Hand in der Forschungsstation aufgezogen haben. Am Ende des Videos stellt Hannah den Nationalbaum Guatemalas vor – den Kapokbaum (Abbildung 3), der Lebensraum für viele heimische Tierarten darstellt. Sie erklärt den Stockwerkbau vergleichend mit den verschiedenen Schichten, die auch in europäischen Wäldern von verschiedenen Lebewesen bewohnt werden. Zuletzt wird das Problem der Abholzung und Brandrodung eingeführt, das in den übrigen Videos thematisiert wird.

Video 2: Bedrohungsfaktoren für den Regenwald (4:52)

In diesem Video klärt Hannah über die Ursachen und Faktoren für die Bedrohung des Regenwaldes auf. Sie berichtet von der Problematik, dass viele Landstriche für die landwirtschaftliche Nutzung abgeholzt werden. Hannah erzählt von ihren Erfahrungen aus Borneo, wo die Vielfalt des Regenwaldes direkt an eintönige Plantagen grenzt, die vom Menschen auf gerodeten Flächen erbaut wurden. Die Plantagen stellen ein Problem für heimische Tierarten da, weil diese dort zum einen

keine geeignete Nahrung finden können, aber auch die Orientierung verlieren, weil es in den Plantagen überall gleich aussieht. Außerdem zerschneiden die Straßen, welche die Plantagen verbinden sollen, den Lebensraum der Tiere und viele können diese Grenzen nicht überschreiten und so keine Artgenossen mehr treffen.

Video 3: Bedeutung der biologischen Vielfalt (3:21)

In diesem Video erklärt Hannah die Bedeutung der biologischen Vielfalt, indem sie einen Zusammenhang zwischen der Regenwaldabholzung und deren Folgen für die Bewohner Deutschlands herstellt. Dabei wird erläutert, wie komplex Ökosysteme aufgebaut sind und wie die Zerstörung einzelner Teile globale Auswirkungen hat. Außerdem wird erklärt, dass durch den Eingriff des Menschen Krankheitserreger, die eigentlich nur bei Tieren vorkommen, auf den Menschen übertragen werden können, wie es z. B. bei der Covid-19-Pandemie der Fall war.

Video 4: Maßnahmen für den Artenschutz (4:54)

Im letzten Video werden Lösungsansätze thematisiert. Neben globalen Artenschutzprojekten, die das Ziel haben, einen Kompromiss der Bedürfnisse der einheimischen Bevölkerung und der Tierarten und Lebensräume zu finden, werden auch für die Zuschauer umsetzbare Handlungsansätze für den Alltag vorgeschlagen. So ist es möglich, Hauskatzen Halsbänder mit Glöckchen umzubinden, um die bedrohten Singvögel zu schützen oder Wildblumen zu pflanzen, um dem Insektensterben entgegenzuwirken. Des Weiteren können Nistkästen oder Fledermauskästen gebaut werden, um den Vögeln und Fledermäusen Bruträume zu geben. Es werden auch die Auswirkungen auf die biologische Vielfalt beim Konsum bzw. Kauf von Lebensmitteln oder Kosmetika thematisiert. Hannah plädiert für ein bewusstes Leben, vor allem



ABB. 4 4Wildlife-Augmented-Reality-App. Foto: Maximilian Probst.

bezogen auf Aspekte wie den Fleischkonsum oder Fortbewegungsmittel. Sie beschreibt, dass jeder durch sein Leben einen Einfluss auf Lebewesen und Lebensräume auf der ganzen Welt hat.

„4Wildlife“: Kostenlose App mit Augmented Reality

Das Herzstück des Projektes stellt die Augmented-Reality-App „4Wildlife“ dar (Abbildung 4). Die App kann kostenfrei aus dem Apple App Store heruntergeladen werden. Sie zeichnet sich durch einfache Bedienbarkeit und kindgerechtes, ansprechendes Design aus. Beim Öffnen wird die Bedienung zunächst schrittweise erklärt, um eine problemlose Anwendung zu ermöglichen. Die App bietet die Möglichkeit, zwischen einer Indoor- und einer Outdoorfunktion auszuwählen. Die Varianten unterscheiden sich in der Größe des eingeblendeten Kapokbaumes. So kann die Software auch innerhalb von Räumen genutzt werden, bietet aber für die Anwendung im Freien eine noch realistischere Darstellung. Nach dem Auswählen des Modus (Indoor/Outdoor) muss man einen geeigneten Platz finden, um dort den Baum abbilden zu lassen. Sobald der Baum erscheint, gibt es die Möglichkeit, diesen frei zu erkunden und die Tiere entsprechend ihres Lebensraumes zu entdecken. Jede präsentierte Tierart ist mit kleinen farbigen

Kugeln ausgestattet, die beim näheren Betrachten Informationstafeln einblenden. So können Kinder spielerisch und eigenständig den Regenwald erforschen. In der Anwendung sind insgesamt vier Tierarten zu finden. Vom Boden bis zur Baumkrone aufgelistet, handelt es sich um einen Jaguar, Blattschneiderameisen, Pfeilgiftfrösche und Grünflügel-Aras. In der unteren linken Ecke des Bildschirms lässt sich ein weiteres Menü öffnen, in dem sich kurze Steckbriefe zu den Tieren befinden, die allgemeine Informationen wie Größe, Lebenserwartung oder Ernährung beinhalten. Dadurch wird eine übersichtliche Zusammenfassung der wichtigsten Informationen geschaffen. Nach dem Erkunden des Baumes oder wenn man den Modus (Indoor/Outdoor) wechseln möchte, gibt es in der unteren rechten Ecke eine Taste, mit der man zurück in das Auswahlmü gelangt.

Die App ist kindgerecht und übersichtlich aufgebaut, um Kindern die eigenständige Benutzung zu ermöglichen. Gleichzeitig ist das Design für Kinder ansprechend konzipiert und altersgerecht. Durch das selbstständige Erforschen können die Kinder sich als Entdecker/-innen erleben und erfahren somit einen emotionalen und subjektiven Zugang zum Thema Artenschutz.

Lena Kobl, *Nepada Wildlife e. V.*

WETTBEWERB

Deutschland wird Europameister

Bei der European Olympiad of Experimental Science (EOES) messen sich einmal im Jahr Schülerteams aus den Ländern der europäischen Union zum Lösen von fächerverbindenden, experimentellen naturwissenschaftlichen Aufgaben. Vom 29. April bis 06. Mai 2023 fand die EOES in der lettischen Hauptstadt Riga statt. Zwei deutsche Teams waren am Start.



ABB. 1 Die deutschen Teilnehmer/-innen der EOES: (v.l.n.r) Oliver Eckstaedt (Team A), Vinzent Schultze (Team A), Jan Kruse, Jieoh Ahn (Team A), Luise Köhler (Team B), Burkhard Schroeter, Sophie Junginger (Team B), Leon Chen (Team B), Konstantin Schwark, Annabel Maisl. Foto: B. Schroeter (IPN).

Nach den Erfolgen der deutschen Teams bei den Europäischen ScienceOlympiaden (EOES, vormals EUSO) in den vergangenen Jahren waren die Erwartungen auch in diesem Jahr hoch und wurden dennoch übertroffen: Beide deutsche Teams gewannen eine der begehrten sechs Goldmedaillen! Unter 44 teilnehmenden Teams aus 22 Ländern belegte Team A nach Abschluss des Wettbewerbs den 1. Platz und wurde Europameister. Damit geht der neue EOES-Pokal nun für ein Jahr in ihre Heimatschulen. Team B erreichte nach Teams aus Ungarn und Luxemburg einen hervorragenden 4. Platz. Ein ganz besonderer Erfolg!

Jede Delegation bestand aus zwei Schülerteams mit jeweils einer Expertin bzw. einem Experten in Biologie, Chemie und Physik und den begleitenden Mentor/-innen. Mit großer Begeisterung gingen die

Teams an die experimentellen Aufgaben und zeigten ihr Können. Die beiden fächerverbindenden Klausuren befassten sich landesbezogen mit naturwissenschaftlichen Themen: Passend zum diesjährigen lettischen Gesangs- und Tanzfestival, das ein nationales Ereignis von großer Bedeutung ist, wurde in der ersten Klausur „Singen und Tanzen aus der Perspektive der Naturwissenschaften“ untersucht. In der zweiten Klausur stand dann ein in Lettland sehr beliebtes Gemüse im Mittelpunkt der Klausur: „Clevere Gurken“. Die Klausuren waren dabei vielseitig und fachlich gut vorbereitet: So mussten verschiedene experimentelle Methoden von Mikroskopieren und Titrationen bis hin zu Kalorimetrie und Frequenzanalyse durchgeführt werden.

Für Deutschland stellten sich diesen Aufgaben (Abbildung 1):

Team A:

Jieoh Ahn (Biologie, Martin-Andersen-Nexö-Gymnasium, Dresden, Sachsen)

Vinzent Schultze (Chemie, Max-Steenbeck-Gymnasium, Cottbus, Brandenburg)

Oliver Eckstaedt (Physik, Martin-Andersen-Nexö-Gymnasium, Dresden, Sachsen)

Team B:

Leon Chen (Biologie, Weinberg-Gymnasium, Kleinmachnow, Brandenburg)

Sophie Junginger (Chemie, Robert-Bosch-Gymnasium, Langenau, Baden-Württemberg)

Luise Köhler (Physik, Carl-Zeiss-Gymnasium, Jena, Thüringen).

Begleitet wurden die Jugendlichen von PD Dr. Burkhard Schroeter vom IPN, dem Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik in Kiel, das für die nationale Vorauswahl und das Training der Olympioniken verantwortlich ist, sowie von Annabel Maisl und Jan Kruse (beide Göttingen) und Konstantin Schwark (Jena).

Neben den Klausuren stand das gegenseitige Kennenlernen der Jugendlichen aus den verschiedenen Ländern im Vordergrund. Über den Wettstreit hinaus ist dies ein wichtiger Baustein für Freundschaft und gegenseitiges Verständnis über Ländergrenzen hinweg. Als Solidaritätsbekundung war auch ein ukrainisches Schülerteam zur Teilnahme eingeladen worden. Nach einer arbeitsreichen Woche war der letzte Tag der Veranstaltung der feierlichen Preisverleihung mit zahlreichen Ehrengästen vorbehalten, bei der die Medaillen an die erfolgreichen Olympioniken vergeben wurden.

Die beiden deutschen Teams haben ein herausragendes Ergebnis erzielt und erhielten als einzige Nation zwei der sechs Goldmedaillen mit Team A als Gesamtsieger auf dem 1. Platz. Damit ist Deutschland erneut beste Nation in diesem europäischen Vergleich geworden. Den lettischen Organisatoren gebührt eine große Anerkennung für einen in schwierigen Zeiten mit sehr viel Engagement organisierten Wettbewerb. Ein besonderer Dank gilt auch dem österreichischen Team und seinen Betreuer/-innen, mit denen die deutschen Teams ein gemeinsames Trainingslager im „BIKO mach MINT“-Labor in Klagenfurt, Österreich, durchführen konnten.

*Burkhard Schroeter, IPN Kiel,
schroeter@leibniz-ipn.de*

ORNITHOLOGIE

Menschengemachter Lärm belastet Vögel

Zwei Jahre lang herrschte in Deutschland an Neujahr weitgehend Stille. Dieses Jahr durfte zum ersten Mal zum Jahreswechsel wieder geböllert werden. Dass nicht nur Menschen unter der immensen Lärm- und Schadstoffbelastung durch Feuerwerkskörper leiden, zeigt eine Studie des Max-Planck-Instituts für Verhaltensbiologie in Konstanz.

Die Forschenden haben mehr als 300 Bläß-, Weißswan- (Abbildung 1), Kurzschnabel- und Saatgänse in Deutschland, Dänemark und den Niederlanden mit GPS-Sendern ausgestattet und die Flugbewegungen der Vögel acht Jahre lang in den Wochen vor und nach den Jahreswechseln erfasst. Die GPS-Daten zeigen, dass die Wildgänse ihre Schlafstellen in den Neujahrsnächten häufiger als sonst verlassen und manchmal bis zu 500 Kilometer weit fliegen. Diese Flucht hat ihren Preis: Um wieder zu Kräften zu kommen, müssen sich die Gänse mehrere Wochen länger ausruhen und mehr fressen. Für Vögel, denen es nicht gelingt, ihre Energiereserven wieder aufzufüllen, kann die Knallerei also sogar tödlich enden [1, 2].

Auch anhaltender Stadtlärm sorgt in der Vogelwelt für Aufregung, zumindest bei Rotkehlchen (Abbildung 2). Die einzigen Vögel, die hierzulande ihren auf viele Menschen melancholisch wirkenden Gesang auch im Winter ertönen lassen, reagieren auf Stadtlärm besonders gereizt. Die „Wintersänger“ zeigen sich, wenn sie auf Nebenbühler treffen, die in ihr Revier eindringen, besonders verteidigungsbereit. Sie werfen sich dabei buchstäblich in die Brust und zeigen Farbe, indem sie sich aufplustern. Und wenn all das nicht ausreicht, gehen sie auch schon mal entschlossen auf den Gegner los. Ein Forschungsteam um Çağla Önsal von der Koc Universität in Istanbul und der britischen Anglia-Ruskin-Universität (ARU) hat 21 Individuen unterschiedlicher

Herkunft mit dem Modell eines Rotkehlchens konfrontiert, die unmittelbar in Istanbul sowie in ländlichen Gebieten in der Umgebung der Metropole lebten. Um die Attrappe möglichst echt erscheinen zu lassen, spielten sie ihnen zudem über einen Lautsprecher den Gesang eines Artgenossen vor, den sie später mit Aufnahmen von Stadtlärm unterlegten. Die Rotkehlchen vom Lande reagierten aggressiver auf die simulierten Eindringlinge, wenn sie zusätzlich mit Verkehrslärm beschallt wurden. Die städtischen Rotkehlchen dagegen zeigten sich gelassener gegenüber dem verstärkten Geräuschpegel: Sie sangen weniger. Dies könnte sich durch die chronische Lärmbelastung der städtischen Vögel erklären lassen: „Die chronisch hohe Lärmbelastung, die Tag und Nacht in städtischen Lebensräumen herrscht, zum Beispiel durch Verkehr oder Baumaschinen, kann die effiziente Übertragung akustischer Signale dauerhaft stören“, so Çağlar Akçay, Verhaltensökologe an der ARU [3].

Dass Vogelstimmen gegen schlechte Stimmung, Ängste und paranoide Gedanken helfen, haben Forschende des Max-Planck-Instituts für Bildungsforschung und des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf herausgefunden. In einem randomisierten Online-Experiment mit insgesamt 295 Teilnehmern hörten diese sechs Minuten lang entweder typische Verkehrsgeräusche oder Vogelgesänge. Das Ergebnis: Die Vogelstimmen vertrieben ängstliche Gedanken und verbesserten die Stimmungslage. Der Verkehrslärm



ABB. 1 Die Weißswan- oder Nonnengans (*Branta leucopsis*) brütet vor allem im Ostseeraum.



ABB. 2 Rotkehlchen (*Erithacus rubecula*) singen auch im Winter.

trübte diese dagegen deutlich ein, während das Vogelgezwitscher sogar Symptome von Depression und Angststörungen linderte. Vogelstimmen werden offenbar unterschwellig mit einer intakten natürlichen Umgebung in Verbindung gebracht. Dadurch wird die Aufmerksamkeit von psychischen Belastungen abgelenkt und es stellt sich ein Gefühl von Sicherheit und Geborgenheit ein. Naturgeräusche werden im Gegensatz zum Stadtlärm oder auch dem Kontakt mit anderen als nicht bedrohlich wahrgenommen, so das Fazit der Forscher [4].

Literatur

- [1] A. Kölzsch et al. (2022). Conservation letters, <https://doi.org/10.1111/conl.129279>
- [2] A. Kölzsch, H. Kruckenberg (2022). Der Falke 12, 7–9.
- [3] Ç. Önsal et al. (2022). Behavioral Ecology and Sociobiology 76, 102.
- [4] E. Stobbe et al. (2022). Birdsongs alleviate anxiety and paranoia in healthy participants. Sci Rep 12, 16414.

Wilhelm Irsch, Reblingen-Siersburg



ABB. 1 Frische Brandfläche in Westaustralien am Tag nach einem Waldbrand. Durch das Feuer sind einige bereits durch ältere Waldbrände vorgeschädigte große Eukalyptusbäume umgekippt bzw. auseinandergebrochen. Auf der Brandfläche wurde der Australische Feuerkäfer (*Merimna atrata*) in großer Anzahl beobachtet und auf den Aschefeldern der Kleine Aschekäfer *Acanthocnemus nigricans* gefunden.

Leben auf einer frischen Brandfläche

Die Infrarotrezeptoren feuerliebender Insekten

HELMUT SCHMITZ | ANKE SCHMITZ

Eine kleine Gruppe von Insekten wird von Waldbränden angezogen. Sofort nachdem die Feuerwalze über ein Waldgebiet hinweggegangen ist, besiedeln diese Insekten, die als pyrophil bezeichnet werden, die frische Brandfläche (Abbildung 1) und beginnen mit der Fortpflanzung. Vertreter von drei Käfer- und einer Wanzenart haben als Spezialanpassung an die pyrophile Lebensweise Infrarotrezeptoren entwickelt. Diese sind jedoch bei den vier Gattungen ganz unterschiedlich gebaut und daher offensichtlich unabhängig voneinander entstanden. Zudem sind zwei verschiedene Funktionsprinzipien realisiert: ein sogenanntes photomechanisches und ein thermisches.

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 340 erklärt.

Nach bisherigem Wissensstand verfügen alle Insekten über Thermorezeptoren auf ihren Fühlern, mit denen sie die Umgebungstemperatur messen können [1]. Die Thermorezeptoren, die als „Kältezellen“ oder als „Wärmeelemente“ die entsprechenden Temperaturänderungen registrieren können, sind dabei – häufig zusammen mit Rezeptoren für Feuchtigkeit – in sogenannten ▶ Sensillen angeordnet. Der von außen sichtbare, aus Kutikula bestehende Anteil eines solchen auf die Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit spezialisierten Sensillum besteht in der Regel nur aus einem wenige Mikrometer dicken und langen Zapfen. Die Thermorezeptoren können sehr empfindlich sein und dann auch zur Messung von Infrarot-(IR)-Strahlung dienen. So können nachtaktive blutsaugende Wanzen, die in Südamerika häufig die Chagas-Krankheit übertragen, mit ihren antennalen Thermorezeptoren bei Herumläufem auf ihren warmblütigen Wirten (inklusive des Menschen) gut durchblutete Hautbereiche detektieren und dann dort ihren Rüssel einstecken [2]. Diese infrarotsensorische Sinnesleistung funktioniert vermutlich nur auf kurze Entfernung (im Zentimeterbereich). Es könnte

zwar vermutet werden, dass die Wanzen ihre Infrarotsensoren ebenfalls nutzen, um ihre potenziellen Wirte aus größeren Entfernungen zu detektieren, doch dies ist bisher nicht belegt. Bei der „Fernortung“ spielen dagegen Geruchsstoffe und CO₂ eine wichtige Rolle. Hinzu kommt, dass der kleine Kutikulazapfen, der isoliert aus der Antennenoberfläche hinausragt, nicht als optimierter Absorber für IR-Strahlung bezeichnet werden kann.

Dagegen gibt es eine kleine Gruppe von Insekten, bestehend aus den Mitgliedern von drei Käfer- und einer Wanzenart, die zusätzlich zu den antennalen Thermorezeptoren über IR-Rezeptoren verfügen, die sich nicht auf den Antennen befinden. Das gemeinsame Merkmal dieser Gruppe ist das zunächst merkwürdig erscheinende Verhalten, dass alle Vertreter von Waldbränden angelockt werden und daher unmittelbar nach einem Waldbrand auf einer frischen Brandfläche gefunden werden können. Bevor im Einzelnen dargestellt wird, warum diese ► pyrophilen („feuerliebenden“) Insekten Waldbrände anfliegen, soll das Thema Waldbrand zunächst einer etwas erweiterten Betrachtung unterzogen werden, um die Evolution der Insekten-IR-Rezeptoren besser nachvollziehen zu können.

Waldbrände: verschiedene Aspekte einer Naturkatastrophe

Nicht erst seit die globale Klimaerwärmung in vielen Teilen der Welt für ein heißeres und trockeneres Klima sorgt, sind große Waldbrände für den Menschen bedrohlich. Insbesondere wenn Waldbrände außer Kontrolle geraten und nicht mehr gelöscht werden können, werden Gebäude und Infrastruktur zerstört, und es gibt Tote zu beklagen. In der EU verbrannten so im Jahre 2022 800.000 Hektar Wald (Quelle: www.euronews.com), wodurch ein Schaden von mehr als 2 Mrd. Euro entstand. Auf der anderen Seite gab es im Laufe der Evolution für viele Tiere und Pflanzen genug Zeit, sich an Feuer anzupassen und letztendlich sogar von Brandereignissen zu profitieren. Seit es Landpflanzen gibt, hat sich die Vegetation – zumeist ausgelöst durch Blitzschläge oder Vulkanismus – auch entzündet. Holzkohlereste wurden erstmalig im Silur vor 440 Mio. nachgewiesen. Große Mengen von Holzkohle wurden dann vor mehr als 300 Mio. Jahren in Ablagerungen des Karbons gefunden. In der „Steinkohlezeit“, wie das Karbon auch genannt wird, existierten die bekannten ausgedehnten Wälder aus Bärlapp-, Farn-, und Schachtelhalmbäumen, die nach ihrem Untergang maßgeblich für die Kohleentstehung verantwortlich waren. Als es im Perm dann vor 270 Mio. Jahren zunehmend trockener wurde, entstanden die ersten Nadelbäume und schließlich viel später in der Kreidezeit vor 100 Mio. Jahren auch die ersten Laubbäume.

Die Entwicklung von Bäumen war daher von Anfang an auch immer von Feuern begleitet. In periodisch von Feuern betroffenen Gebieten findet man daher häufig sogenannte Pyrophyten – also Pflanzen, die über Anpassun-

gen verfügen, um Feuer überleben zu können, oder die sogar von Waldbränden profitieren. Hierzu gehören bei Bäumen eine dicke und damit feuerresistente Rinde (viele Kiefern, Korkeichen im westlichen Mittelmeerraum, Riesenmammutbäume im Westen der USA). Laufen die Feuer als Bodenfeuer niedriger Intensität mit Temperaturen von ca. 400 bis 600 °C durch Krautschicht und Unterholz und erreichen die Kronen nicht, wird der Baum das Feuer unbeschadet überleben. Bei feuerangepassten Kiefern, Mammutbäumen aber auch bei australischen Banksia- und Eukalyptusarten öffnen sich vielfach die stark verholzten Samenstände und Nüsse überhaupt erst durch die Hitze einwirkung eines Feuers. So kann der freigesetzte Samen nach einem ersten Regen auf der nährstoffreichen Ascheschicht keimen. Ist das Feuer intensiver und greift in den Kronenbereich der Bäume, so verbrennen alle oberirdischen Teile eines im Vollfeuer stehenden Baumes oder Strauches und die Bast- und die Rinde wird durch die hohen Temperaturen von 1.000 °C und mehr abgetötet.

Feuerangepasste Bäume haben jedoch die Möglichkeit, aus unterirdischen Organen wieder auszuschlagen. Bekannte Beispiele dafür sind bei Eukalyptusarten und Banksien die Lignotuberknollen, die sich im basalen Stammbereich als Verdickungen größtenteils im Boden befinden. Hier sind Nährstoffe gespeichert und vor allem auch viele Proventivknospen („schlafende Knospen“) angesiedelt. Diese schlagen sehr schnell aus, wenn der oberirdische Teil zerstört worden ist. Solche Proventivknospen gibt es nicht nur bei feuerangepassten Bäumen auch im oberirdischen Stammbereich. Sollte also der Bast zumindest an einigen Stellen ein Feuer überstanden haben, so können aus diesen Knospen wieder Seitenäste entstehen, selbst wenn der Baum zunächst komplett verbrannt erscheint.

Die Entwicklung von geflügelten Insekten im Oberkarbon und die Entstehung von Käfern und Wanzen im Perm geht mit der geschilderten Entwicklung von Wäldern, in denen es immer schon Feuer gegeben hat, Hand in Hand. Nun muss jedoch der Blick auf die flugfähigen Insekten, um die es hier gehen soll, im Hinblick auf mögliche Feueranpassungen ein grundsätzlich anderer sein. Gerade die Flügel erlauben es einem Insekt ja, vor einem Feuer zu fliehen. Es ist davon auszugehen, dass alle geflügelten

IN KÜRZE

- Eine kleine Gruppe pyrophiler Insekten, zu der Vertreter von **drei Käfer- und einer Wanzenart** gehören, verfügt über Infrarot-(IR)-Rezeptoren.
- Innerhalb dieser Gruppe gibt es drei grundsätzlich **verschieden aufgebaute Typen von IR-Rezeptoren**, die nach zwei Funktionsprinzipien arbeiten.
- **Photomechanische IR-Rezeptoren** haben sich von Haar-Mechanorezeptoren aus entwickelt und basieren nach wie vor auf Mechanosensorik.
- **Thermische IR-Rezeptoren** messen eine durch IR-Absorption hervorgerufene Erwärmung einer für die IR-Absorption optimierten Absorberfläche des Rezeptors mit einem Thermosensor.



ABB. 2 Vertreter zweier Gattungen der pyrophilen Prachtkäfer: a) Der Schwarze Kiefernprachtkäfer *Melanophila acuminata*; Länge 1 cm. b) Der Australische Feuerkäfer *Merimna atrata* auf verbrannter Rinde eines Eukalyptusstammes; Länge 1,5 cm.

Insekten dies zunächst auch tun werden. Evolutionsbiologisch spannende Fragen sind nun, wann, von woher und warum die Insekten auf die Brandfläche zurückkehren. Nachdem die Feuerwalze über einen Waldbestand hinweggegangen ist, zeichnet sich die frische Brandfläche – im Folgenden auch als „aktive“ Brandfläche bezeichnet – in den ersten ein bis zwei Tagen durch viele lokale Brandherde aus, an denen umgestürzte Bäume oder heruntergefallene Äste noch brennen oder glühen. Rauchentwicklung und ein intensiver Brandgeruch zeichnet daher eine aktive Brandfläche aus (Abbildung 1). Auch gibt es eine Menge Aschefelder, die zum Teil noch Temperaturen von weit über 100 °C aufweisen. Bei Tageslicht kann man jedoch hier nichts mehr glühen sehen; eine Landung auf einer solchen Stelle wäre für ein Insekt fatal. Demzufolge ist eine aktive Brandfläche nicht nur für Insekten gefährlich, und Brandgeruch und Hitze werden dafür sorgen, dass dieses Areal gemieden wird.

Genau aus diesem Grund kann die aktive Brandfläche jedoch auch als interessante ökologische Nische gesehen werden: Es gibt weder Fressfeinde noch Konkurrenten! So kann unter dem Schutz von Qualm und Hitze das gesamte Fortpflanzungsverhalten von Partnerfindung bis zur Eiablage ungestört ablaufen. Die durch die hohen Temperaturen abgetöteten Bäume sind als Nahrungsquelle für holzfressende Insekten massenhaft vorhanden, da sie im Gegensatz zu gesunden Bäumen über keine Abwehrmechanismen gegen Insektenfraß mehr verfügen. Zusätz-

lich wachsen auf dem Brandholz in bodennahen Bereichen sehr bald pyrophile Pilze, die ebenfalls als Nahrungsquelle dienen können. Voraussetzung für das Auffinden und die Nutzung der aktiven Brandfläche ist natürlich das Vorhandensein spezieller Rauchgas- und Infrarot-(IR)-Sensoren.

Brandholznutzung durch pyrophile Prachtkäfer

Pyrophile Prachtkäfer der Gattungen *Melanophila* und *Merimna* werden von Waldbränden magisch angezogen und können daher nach einem Waldbrand sofort auf der aktiven Brandfläche gefunden werden [3, 4]. Die Gattung *Melanophila* enthält 11 Arten, die auf nahezu allen Kontinenten mit Ausnahme des australisch-ozeanischen Kontinents vorkommen. Die ► Wallace-Linie stellt daher die südöstliche Verbreitungsgrenze dieser Gattung dar. Jenseits dieser Linie beginnt das Verbreitungsgebiet der pyrophilen Gattung *Merimna*, die jedoch nur die Art *atrata* enthält, bekannt als *Australian Firebeetle*. *Merimna* ist auf dem gesamten australischen Kontinent verbreitet und wurde gelegentlich auch in Neu-Guinea gesichtet. Obwohl die Verbreitungsgebiete der beiden Gattungen sich nicht überlappen, weisen die *Melanophila*-Arten und die *Merimna*-Arten einige Gemeinsamkeiten auf. Zunächst machen die Vertreter beider Gattungen dem Namen ihrer Familie – Prachtkäfer – keine Ehre, da sie uniform tiefschwarz gefärbt sind (Abbildung 2). Dies ist als Anpassung an die Brandhabitats zu sehen: Sitzt ein Käfer ruhig auf einem verbrannten Baum, so ist er so gut wie unsichtbar. Auch das Verhalten auf den Brandflächen ist sehr ähnlich. Nach dem Eintreffen suchen beide Geschlechter nach Nahrung. Da die Käfer omnivor sind, kann diese aus allem bestehen, was durch das Feuer abgetötet bzw. geröstet wurde, aber noch genießbar ist – z. B. andere tote Insekten wie Ameisen aber auch Wirbeltiere. So wurde *Merimna* von den Autoren dabei beobachtet, wie zwei Käfer an einer toten Eidechse fraßen. In Gefangenschaft fressen beide Arten aber auch gerne Erdnüsse, Mandelsplitter und Rosinen. Während unbegattete Weibchen auf verbrannten Stämmen, aber auch auf dem Boden auf der Suche nach Nahrung herumlaufen und so für die Männchen sichtbar sind, zeigen die Männchen ein relativ stereotypes Suchverhalten nach Nahrung und Weibchen. Dies ist besonders bei *Merimna* in Australien gut zu beobachten [3]. Die Männchen fliegen verbrannte Eukalyptusstämme an und landen dort kopfaufwärts in Höhen zwischen 1–3 m. Dann drehen sie sich um 180 Grad und laufen stammabwärts; dabei suchen sie in Ritzen und Spalten der Rinde nach Nahrung und halten nach Artgenossen Ausschau – in der Hoffnung, ein unbegattetes Weibchen zu finden, mit dem dann sofort kopuliert wird. Kommt es nicht zur Kopulation, wird der Suchlauf in der Regel noch einige Meter auf dem Boden fortgesetzt, bis schließlich der nächste Stamm angefliegen wird.

Die begatteten Weibchen von *Melanophila* und *Merimna* legen schließlich die Eier unter der Rinde der verbrannten Bäume ab. Dazu wird der Eiablageapparat (Ovipositor) in Ritzen und Spalten in der äußeren Borke eingeführt. Wie die meisten Prachtkäferlarven fressen die Larven zunächst in der Bastschicht, bevor sie sich dann tiefer in das Holz einbohren und dort weiterfressen. Die Entwicklungszeit der *Melanophila*-Larven beträgt ein bis drei Jahre. Im Falle einer mehrjährigen Entwicklungszeit überwintern die Larven im Stamm. Bei *Merimna* ist die Dauer der Larvalentwicklung nicht genau bekannt.

Die Larven von *Melanophila* und *Merimna* nutzen beide das Holz verbrannter Bäume als Nahrungsquelle. Während *Melanophila*-Larven keine Wirtsspezifität zeigen und in über 100 verschiedenen Baumarten gefunden wurden, fressen *Merimna*-Larven ausschließlich in Eukalyptusarten. Selbst große Feuer in Banksia-Wäldern locken *Merimna* nicht an. Zu betonen ist noch, dass auch bei Bäumen, die in einem Vollfeuer standen und äußerlich völlig verbrannt erscheinen, die Bastschicht zwar durch die hohen Temperaturen abgetötet wurde, aber unverbrannt ist. Entfernt man die äußerlich verbrannte Rinde, wirkt der Bast und auch das darunter liegende Holz – außer einer durch die höhere Trockenheit bedingten geringfügigen Farbveränderung – fast völlig ungeschädigt. Die nun nicht mehr vorhandene Abwehrkraft des verbrannten Baumes ist der Hauptgrund, dass er als Nahrungsquelle für holzfressende Insektenlarven generell hochinteressant ist. So wird ein solcher Baum in den kommenden Wochen und Monaten nach einem Feuer auch von weiteren Pracht- und Bockkäfern mit Eiern belegt. Wer allerdings zuerst kommt, hat unbestreitbar viele Vorteile.

Obwohl die Brutbiologie und das pyrophile Verhalten von *Melanophila* und *Merimna* sehr ähnlich sind, verfügen die Gattungen doch über völlig unterschiedliche IR-Rezeptoren. Dies ist offensichtlich der Tatsache geschuldet, dass die Evolution der beiden Gattungen und damit auch die Entstehung der pyrophilen Lebensweise seit vielen Jahrtausenden getrennt voneinander verliefen und offensichtlich auch kein gemeinsamer pyrophiler Vorfahre existiert. Nach der Abspaltung Australiens von den Landmassen Gondwanas vor 60 Millionen Jahren verlief die Evolution der australischen Pflanzen- und Tierwelt unabhängig von der übrigen Kontinente. So entstanden auch die IR-Rezeptoren bei beiden Gattungen unabhängig voneinander. Diese werden in den folgenden Abschnitten weiter behandelt.

Von Aschefeldern angezogen: Der Kleine Aschekäfer (*Acanthocnemus nigricans*)

In den lichten australischen Eukalyptuswäldern sind die Stämme am Boden häufig von dichten krautigen Pflanzen umgeben. Durch das Bodenfeuer wird diese niedrige Vegetation vollständig verbrannt und um die Stämme herum entstehen dadurch ausgedehnte und viele Zentimeter dicke Aschefelder. Hier findet man regelmäßig den nur 3–5 mm langen Kleinen Aschekäfer (*Acanthocnemus nigricans*, Abbildung 3). Der unscheinbar dunkelbraun gefärbte Käfer ist die einzige Art in seiner Gattung, aber auch in der zugehörigen Familie Acanthocnemidae.

Ursprünglich endemisch in Australien wurde *Acanthocnemus* in den letzten Jahrzehnten auch in andere Teile der Erde verschleppt. So wurde diese Art bereits in Spanien und Russland nachgewiesen [5].

Sofort nach einem Feuer fliegen die Käfer in relativ geringer Höhe von ca. einem Meter auf die aktive Brandfläche und landen bevorzugt auf den bereits weitgehend wieder erkalteten Aschefeldern. Nach kurzem Verweilen beginnen sie dann einige Dutzend Sekunden lang äußerst hektisch herumzulaufen und tauchen schließlich in die Asche ab. Auch sieht man immer wieder Käfer aus der Asche herauskommen, die dann ebenfalls wieder kurz herumlaufen und anschließend entweder abfliegen oder wieder in der Asche verschwinden. Dies hat



ABB. 3 Der Kleine Aschekäfer (*Acanthocnemus nigricans*); Länge 4 mm. Sobald der Käfer auf einer Ascheschicht herumläuft, bleiben in den zahlreichen Borsten auf seiner Oberfläche Aschepartikel hängen; so wird der Käfer nahezu unsichtbar.

zwei Konsequenzen: Zum einen fangen sich in den Borsten, die die gesamte Körperoberseite bedecken (Abbildung 3), viele feine Aschepartikel. Da der Käfer sich bei Störungen sofort totstellt, ist er damit in der Asche unsichtbar. Zum anderen hat es das Abtauchen in die Asche bisher verhindert, dass mehr über die Biologie von *Acanthocnemus* bekannt wurde. Zwar konnten die Autoren in einigen wenigen Fällen Kopulationen beobachten; was die Käfer jedoch in der Asche machen und wo die Weibchen schließlich die Eier ablegen, ist – genauso wie die gesamte Larvalentwicklung – weitgehend unbekannt. Hinweise darauf, dass das Eintauchen in die Asche ein Schutzmechanismus vor dem Gesehenwerden durch mögliche Fressfeinde ist, lieferten Beobachtungen im Freiland und Labor. Diese Versuche zeigten, dass über die Asche bzw. ein Versteck wehender Rauch bewirkt, dass sofort sehr viel mehr Käfer wieder auftauchen und herumlaufen, um eventuell auf Kopulationspartner zu treffen. Der Rauch könnte potenzielle Fressfeinde abschrecken und damit das Aschefeld für *Acanthocnemus* sicherer machen. Am Rande einer Brandfläche wurde beobachtet, wie eine kleine Eidechse sehr erfolgreich Jagd auf *Acanthocnemus*



ABB. 4 Die australische pyrophile Rindenwanze *Aradus fuscicornis*; Länge 4 mm. Die verwandte Art *A. albicornis* sieht sehr ähnlich aus.

machte; im Bereich des Aschefeldes war in dieser Situation keinerlei Rauch mehr wahrnehmbar.

Wie bereits ausgeführt, wäre eine Landung auf einem *bot spot* in einem ansonsten erkalteten Aschefeld tödlich. Daher verfügt *Acanthocnemus* ebenfalls über IR-Rezeptoren, die es dem Käfer ermöglichen, bereits im Anflug solche *bot spots* zu detektieren und bei zu großer Hitze noch nicht zu landen. Diese unterscheiden sich jedoch fundamental von denjenigen der beiden Prachtkäfergattungen und müssen daher wiederum unabhängig entstanden sein.

Nutzung von Pilzen durch pyrophile Rindenwanzen der Gattung *Aradus*

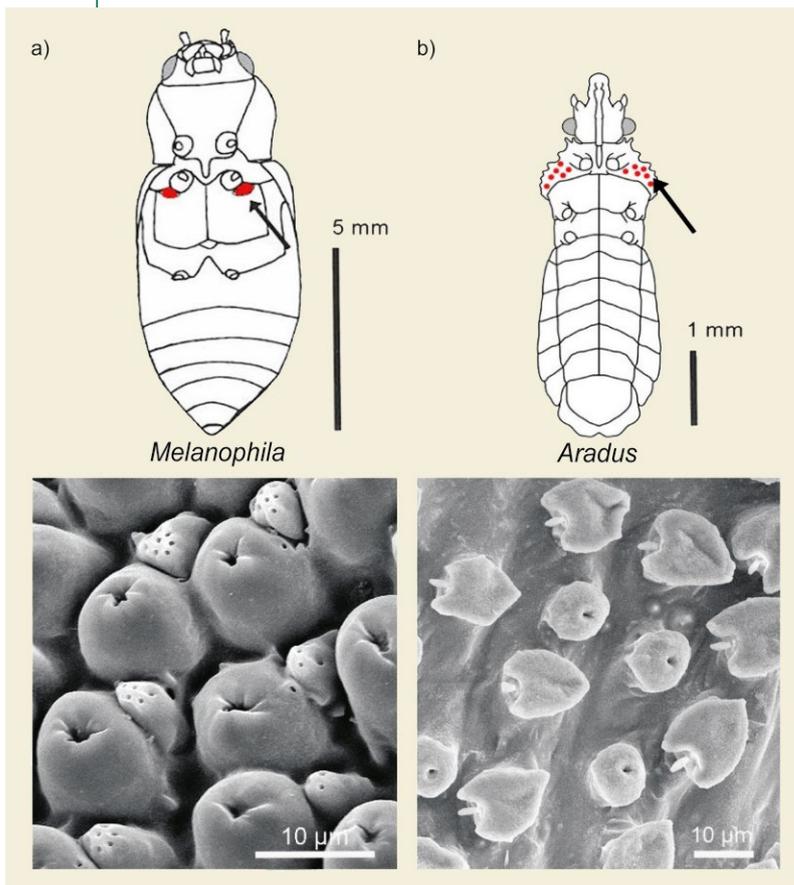
Innerhalb der großen Abteilung der Ascomyceten gibt es etliche Arten wie z. B. einige Vertreter der Gattung *Daldinia*, die als pyrophile Pilze nach einem Waldbrand

schnell beginnen, auf verbrannter Erde und Brandholz zu wachsen. Voraussetzung dafür ist ausreichende Feuchtigkeit. Indikatoren für günstige Verhältnisse für das Wachstum von Pilzen sind an Pilzen saugende pyrophile Rindenwanzen aus der Gattung *Aradus* [6]. So kann man in Australien auf frischen Brandflächen die pyrophilen Arten *A. albicornis* und *A. fuscicornis* (Abbildung 4) an dünnen Eukalyptusstämmchen finden, die an Ufern von Wasserläufen und Seen wachsen: z. B. an *Eucalyptus rudis*, dem *Western Australian Flooded Gum*.

Die Wanzen sitzen oft in Bodennähe an der Rinde und oftmals auch einige Zentimeter unterhalb der Erdoberfläche zwischen dem hier beginnenden Wurzelgeflecht. In diesem Bereich herrscht noch genügend Feuchtigkeit, und so können Pilze wachsen, an denen die Wanzen mit ihren auf das Aussaugen von Pilzhyphen spezialisierten langen Rüsseln saugen können. Die Wanzen kopulieren dort, die Weibchen legen Eier ab und sehr bald kann man dann auch verschieden weit entwickelte Jugendstadien sehen, die ebenfalls an den Pilzhyphen saugen und mit den zugeflogenen adulten Wanzen Sauggemeinschaften von einem Dutzend Tieren bilden können. Solange die Pilze wachsen, sind auch die Wanzen vor Ort. Trocknet schließlich der im Boden befindliche Teil des Stämmchens aus, so verschwinden auch die Wanzen.

Bemerkenswert ist, dass die Gattung *Aradus* aus ca. 200 Arten besteht. Wie im folgenden Kapitel genauer ausgeführt wird, zeigen jedoch nur fünf *Aradus*-Arten ein pyrophiles Verhalten, und nur diese Arten besitzen auch IR-Rezeptoren. Interessanterweise ähneln diese stark den IR-Rezeptoren, wie sie bei *Melanophila*-Käfern vorkommen.

ABB. 5 PHOTOMECHANISCHE IR-REZEPTOREN BEI *MELANOPHILA* UND *ARADUS*



Schematische Darstellung eines *Melanophila*-Käfers und einer pyrophilen *Aradus*-Wanze (Ansicht von ventral), Beine und Fühler nicht gezeigt. a) *Melanophila*: Die Lage des IR-Grubenorgans direkt hinter den Basen der Mittelbeine am 3. Thoraxsegment ist rot markiert. Unten: Rasterelektronenmikroskopische (REM)-Aufnahme einiger IR-Sensillen am Grunde der Grube. Die kleineren Vorwölbungen mit den Poren sind Ausführgänge von Wachsdrüsen. b) *Aradus*: Die Positionen einiger IR-Sensillen auf den seitlichen Oberflächen des 1. Thoraxsegmentes sind rot markiert. Unten: Einige IR-Sensillen zwischen normal ausgebildeten Mechanorezeptoren mit kurzen Borsten.

Die photomechanischen IR-Rezeptoren von *Melanophila*-Käfern und *Aradus*-Wanzen

Käfer und Wanzen haben sich seit ihrer Entstehung im Perm vor mehr als 250 Millionen Jahren von ausgestorbenen Vorläuferformen aus unabhängig voneinander entwickelt. Umso erstaunlicher erscheint es, dass sich die IR-Rezeptoren von Käfern der Gattung *Melanophila* und den pyrophilen *Aradus*-Arten im Hinblick auf Struktur und Funktion stark ähneln. Die wahrscheinlichste Erklärung hierfür ist, dass im Verlauf der Entwicklung einer pyrophilen Lebensweise nur bei den *Melanophila*-Prachtkäferarten und den wenigen pyrophilen *Aradus*-Arten IR-Rezeptoren jeweils neu entstanden sind. Als Folge dieser Entwicklungen findet man heute bei *Melanophila*-Käfern einige Dutzend IR-Sensillen dichtgedrängt am Grunde einer kleinen Grube, die sich direkt hinter den Hüften des 2. Beinpaars befinden [7] (Abbildung 5a). Bei den pyrophilen *Aradus*-Wanzen liegen die IR-Sensillen lose eingestreut zwischen normalen Haar-Mechanorezeptoren seitlich am Prothorax [8] (Abbildung 5b).

Von welchen Sensillen aus die Entwicklung der IR-Rezeptoren ihren Lauf genommen hat, kann jedoch mit großer Sicherheit gesagt werden [9]. Ausgangspunkt waren bei beiden Gattungen einfache Kontakt-Haar-Mechano-

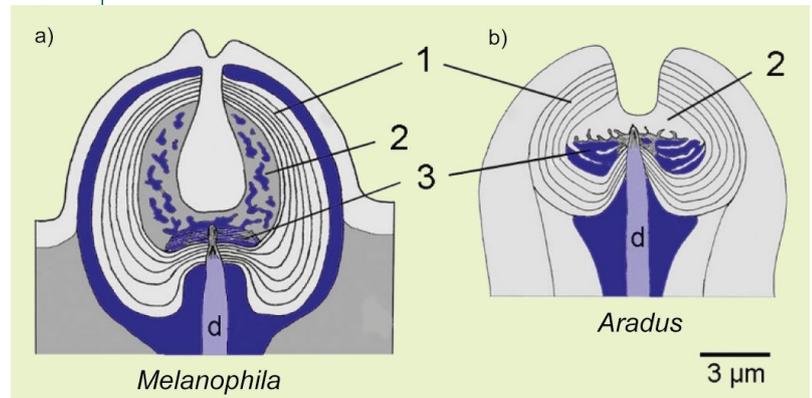
rezeptoren, die bei allen Insekten in großer Zahl auf der Körperoberfläche zu finden sind. Es handelt sich bei diesen Mechanorezeptoren um kurze Kutikulaborsten, die bei Abbiegung Nervenimpulse an das Zentralnervensystem übermitteln. Bei Insekten wird eine solche mechanosensitive Borste immer von nur einer Sinneszelle innerviert, die als typisches Strukturelement in der äußersten Spitze ihres reizaufnehmenden Dendriten einen ▶ Tubularkörper aufweist. Die Dendritenspitze mit dem Tubularkörper steckt in der Regel in der Basis der Kutikulaborste.

Etwas vereinfachend dargestellt, hat sich nun aus der Borste eine Kugel gebildet, die aufgrund ihrer größeren Oberfläche mehr IR-Strahlung absorbieren kann. Diese wird jedoch nach wie vor basal von einer einzelnen mechanosensitiven Sinneszelle innerviert, erkenntlich am in der Dendritenspitze gelegenen Tubularkörper (Abbildung 6). Da diese Sinneszelle im Experiment nach wie vor auch auf mechanische Reize antwortet, werden die IR-Rezeptoren als photomechanisch bezeichnet.

Wie funktioniert nun ein auf Mechanosensorik basierender IR-Rezeptor? Ein wichtiges Strukturelement ist zunächst die äußere Schale der Kugel, die aus harter Exokutikula besteht. Zur Erhöhung der Stabilität befinden sich in der Kutikula der Schale noch viele Lagen aus zugfesten Chitinfasern. Andererseits weist die Kugel in der Mitte ein sogenanntes „mikrofluidisches Zentrum“ auf, welches aus schwammartiger weicherer, unterhalb der Exokutikula angeordneter Mesokutikula besteht. In den Hohlräumen der Mesokutikula befindet sich eine wässrige Flüssigkeit nicht genauer bekannter Zusammensetzung. Hinzu kommt, dass Insektenkutikula – wie viele andere organische Materialien auch – IR-Strahlung im mittleren Infrarot (▶ MWIR) zwischen 3–8 μm sehr gut absorbiert. Auch Wasser absorbiert MWIR im Bereich von 3 μm sehr gut. Außerdem entspricht dieser Wellenlängenbereich ziemlich genau dem Emissionsmaximum von elektromagnetischer Strahlung, der von einem Waldbrand abgestrahlt wird. Durch die IR-Absorption kommt es zu einer Erwärmung und Ausdehnung der Kugel. Wenngleich der Wärmeausdehnungskoeffizient der äußeren Schale nicht bekannt ist, so ist doch davon auszugehen, dass die stabile Schale sich weniger stark ausdehnen wird als die im Inneren befindliche Flüssigkeit. Die Schale wirkt daher als äußere Druckkammer, die eine ungehinderte Ausdehnung der Flüssigkeit nicht zulässt. Als druckabbauende Struktur im mikrofluidischen Zentrum wirkt jedoch die Spitze des Dendriten der Sinneszelle. Diese wird durch den Druckanstieg leicht komprimiert, was einen adäquaten Reiz für einen Mechanorezeptor darstellt. Wie einen leichten Druck auf eine Fingerkuppe kann das Insekt daher die IR-Strahlung „fühlen“.

Bisher gibt es keine Verhaltensexperimente, die zeigen, aus welchen Entfernungen *Melanophila*-Käfer und *Aradus*-Wanzen Waldbrände detektierten und anfliegen können. Die nur wenige Millimeter großen Wanzen sind keine guten und ausdauernden Flieger und werden so

ABB. 6 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER PHOTOMECHANISCHEN IR-REZEPTOREN



Querschnitte durch photomechanische IR-Sensillen von a) *Melanophila* und b) einer pyrophilen Rindenwanze der Gattung *Aradus*. 1: äußere Schale der Kugel bestehend aus harter faserverstärkter Exokutikula, 2: im Zentrum der Kugel befindliche weichere Mesokutikula, im *Melanophila*-Sensillum von vielen kleinen Hohlräumen durchsetzt, 3: flüssigkeitsgefüllte „innere Druckkammer“, die die drucksensible Spitze des Dendriten (d) umgibt. In der distalen Spitze des Dendriten befindet sich der Tubularkörper.

eher von der näheren Umgebung aus eine frische Brandfläche besiedeln. Die IR-Rezeptoren schützen sie dann davor, auf einer heißen Stelle zu landen. Demgegenüber sind *Melanophila*-Käfer gute Flieger. In der entomologischen Literatur existiert ein bemerkenswerter Bericht, in dem geschildert wird, dass die nordamerikanische Art *Melanophila consputa* im Jahre 1924 in ungeheuren Massen einen über mehrere Tage brennenden Öltank im kalifornischen Coalinga angefliegen hat. Im Jahr 2012 erschien eine Simulationsstudie, in der zunächst alle heute noch verfügbaren Informationen über dieses Brandereignis und den Käferanflug zusammengetragen wurden [10]. Aufgrund dieser Daten kommt die Studie zu dem Ergebnis, dass es möglich sein könnte, dass die Käfer dieses Feuer aus über 100 km Entfernung detektierten und dass die IR-Sensorik dabei eine Rolle gespielt hat. In diesem Fall wäre eine Sensitivität der IR-Sensillen von nur wenigen Nanowatt/cm² zu fordern. Dies entspräche der Sensitivität von modernen gekühlten Halbleiter-IR-Sensoren.

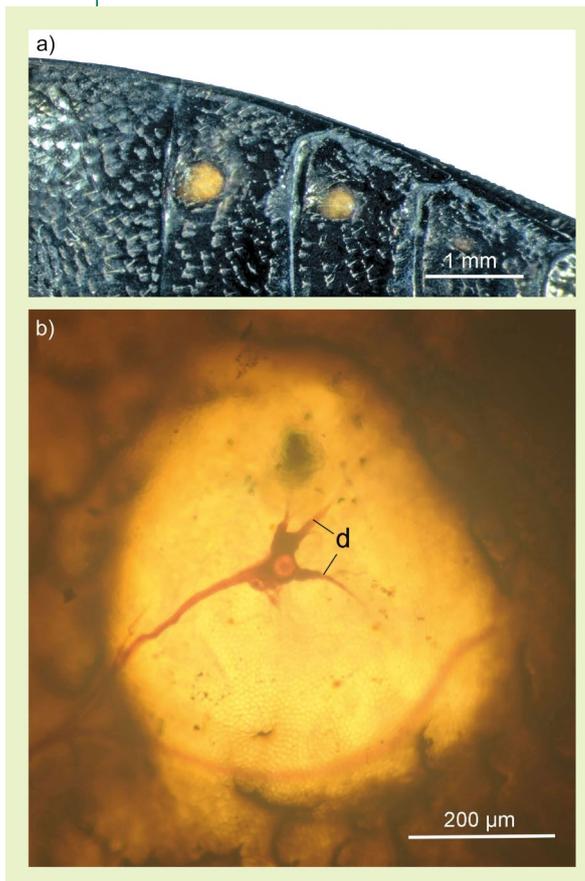
Die thermischen IR-Rezeptoren von *Merimna atrata* und *Acanthocnemus nigricans*

Über einen grundsätzlich anderen Typ von IR-Rezeptor verfügen die beiden anderen australischen pyrophilen Käfer *Merimna atrata* (Abbildung 2b) und *Acanthocnemus nigricans* (Abbildung 3). Hierbei handelt es sich um sogenannte thermische Sensoren, bei der die Erwärmung der IR-absorbierenden Rezeptoroberflächen von Thermorezeptoren gemessen wird. Die morphologischen Unterschiede zwischen den thermischen IR-Rezeptoren von *Merimna* und *Acanthocnemus* sind jedoch erheblich. Auch hier kann daher geschlussfolgert werden, dass sie bei beiden Arten unabhängig voneinander entstanden sein müssen.

Abdominale IR-Rezeptoren beim Australischen Feuerkäfer (*Merimna atrata*)

Bei *Merimna* findet man bei den meisten Käfern beider Geschlechter zwei Paare von IR-Rezeptoren am zweiten und dritten Abdominalsegment [11]. Von außen sieht man bei diesen Käfern seitlich an diesen Segmenten je einen der rundlichen Rezeptoren (Abbildung 7a). Dabei handelt es sich um die IR-absorbierenden Flächen der Rezeptoren, die wie kleine Satellitenschüsseln nach innen eingewölbt sind. Auch farblich fallen diese Bereiche auf: Sie sind hellgelb gefärbt und heben sich daher von der umgebenden tiefschwarzen Kutikula ab. Interpretiert werden kann das als Anpassung der Absorptionseigenschaften an eine bevorzugte Absorption von MWIR-Strahlung. Die hellgelbe, fast ungefärbte Kutikula absorbiert sichtbares Licht schlechter als eine durch Melanineinlagerungen schwarz gefärbte Kutikula. Im Infrarotbereich sieht dies anders

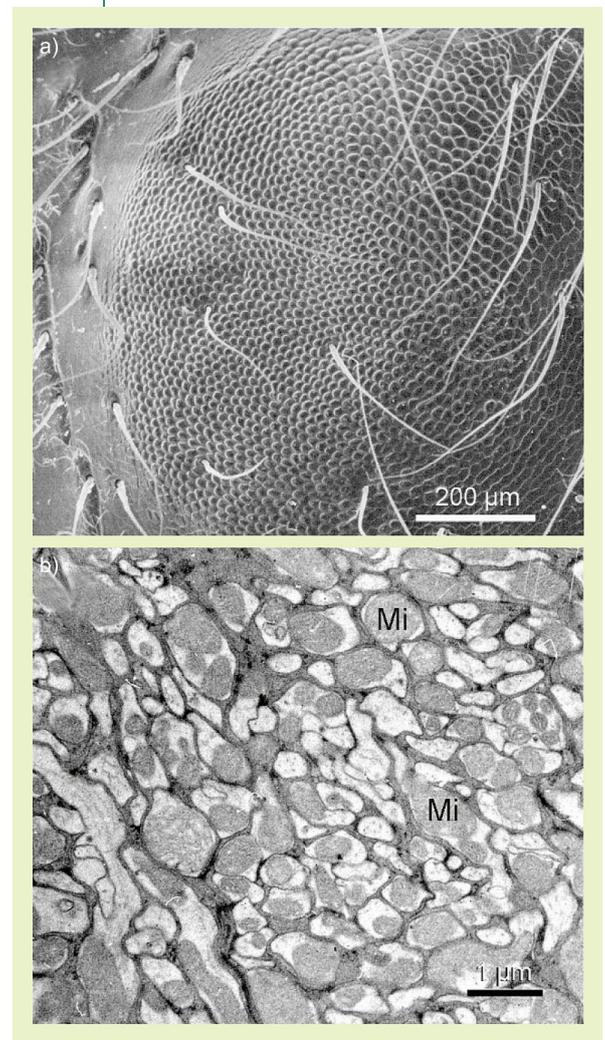
ABB. 7 | ABDOMINALE IR-REZEPTOREN BEI *MERIMNA*



a) Ventralansicht einer Abdomenhälfte von *Merimna* (Ausschnitt, Kopf links). Auf dem 2. und 3. Sternit sind die gelblichen absorbierenden Bereiche der IR-Organ sichtbar. **b)** Einzelnes IR-Organ. Unterhalb der transparenten Kutikula ist das mit einem schwarzen Farbstoff gefüllte multipolare Neuron zu sehen. Gut erkennbar sind die vom Zellkörper der Sinneszelle ausgehenden terminalen Dendritenbereiche (d).

aus, da Insektenkutikula wie gesagt gerade im MWIR sehr gut absorbiert. So kann bereits auf Rezeptorebene ein unerwünschter Temperaturanstieg durch Absorption von sichtbarem Licht minimiert werden. Auffällig ist weiterhin eine wabenartige Strukturierung der Oberfläche innerhalb der Absorberfläche (Abbildung 8a). Ob dies ebenfalls der Optimierung der IR-Absorption, der Erhöhung der Stabilität der hier relativ dünnen Kutikula oder beidem dient, kann gegenwärtig noch nicht gesagt werden. Im Körperinneren ist ungefähr in der Mitte der Absorberfläche direkt an der Unterseite der Kutikula der Thermosensor befestigt (Abbildung 7b). Es handelt sich immer um ein einzelnes

ABB. 8 | ELEKTRONENMIKROSKOPIE DER IR-REZEPTOREN VON *MERIMNA*



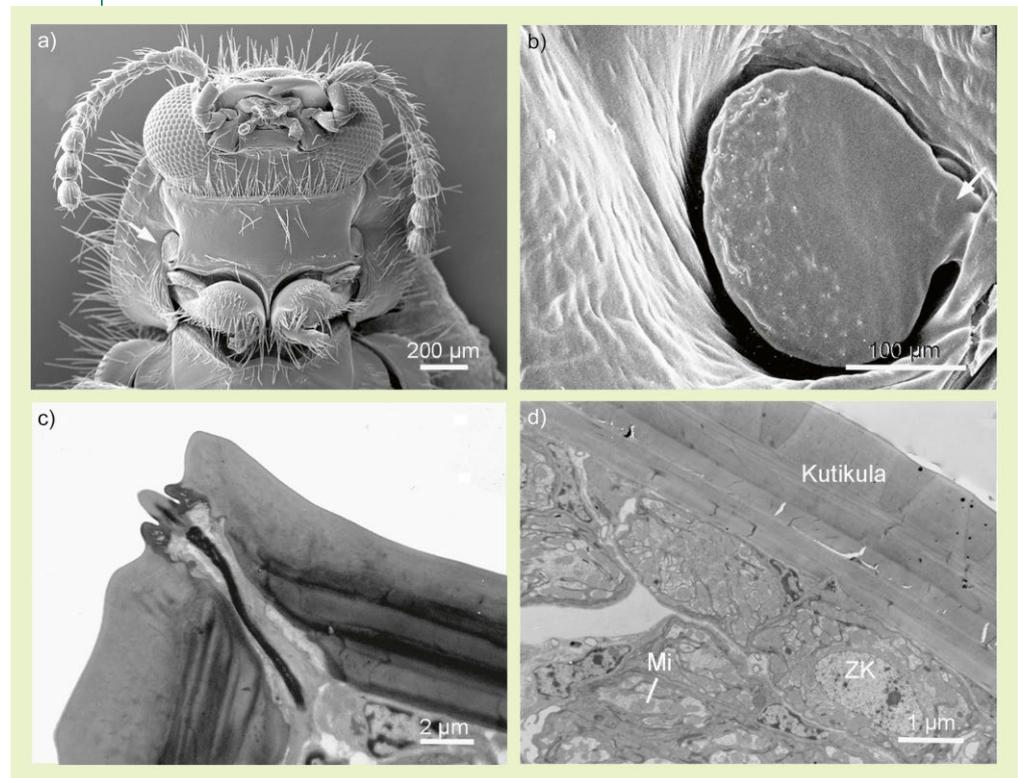
a) REM-Aufnahme einer IR-absorbierenden Fläche eines IR-Organs von *Merimna*. Gut sichtbar ist die wabenartige Mikrostrukturierung. **b)** Transmissionselektronenmikroskopische (TEM) Aufnahme eines Querschnitts durch eine terminale Dendritenmasse. Zahlreiche dünne Dendritenendigungen liegen dicht zusammengepackt und enthalten große Mengen an Mitochondrien (graue Scheibchen, Mi).

sehr großes, sogenanntes multipolares Neuron [12] – multipolar deshalb, weil der reizaufnehmende dendritische Bereich sich in unzählige lange und sehr dünne terminale Einzeldendriten aufspaltet. Diese bleiben, ähnlich wie die Borsten eines Pinsels, dicht zusammen und zeichnen sich durch große Mengen an in ihrem Inneren gelegenen Mitochondrien aus (Abbildung 8b). Daher wurde die Dendritenregion als „Terminale Dendritenmasse“ (TDM) bezeichnet. Ob die Mitochondrien bei der IR-Absorption eine Rolle spielen, ist bisher unbekannt.

Bei konstanter Temperatur sendet das Neuron kontinuierlich Nervenimpulse an das Zentralnervensystem und kodiert so die momentan herrschende Umgebungstemperatur. Bei Zimmertemperatur liegen die „Feuerfrequenzen“ zwischen 10 und 20 Hz. Bei IR-Absorption steigen die Frequenzen in Abhängigkeit der Intensität sofort an und signalisieren so eine IR-Quelle, z. B. eine heiße Stelle auf dem Boden [13]. Verhaltensversuche haben gezeigt, dass ein fliegender Käfer versucht auszuweichen, wenn er seitlich von schräg unten mit IR bestrahlt wird [14]. Dabei waren die Strahlungsintensitäten moderat: Hielt man eine Hand an die Position des Käfers, konnte man lediglich eine geringe Erwärmung spüren. Wurden die IR-Organen für IR-Strahlung blockiert, so blieb auch die Ausweichreaktion aus – ein Zeichen dafür, dass hier die antennalen Thermorezeptoren nicht involviert sind.

Auf der anderen Seite ist es im Verlaufe der Verhaltensversuche nie gelungen, den Käfer mit schwacher IR-Strahlung anzulocken. Daher wird gegenwärtig angenommen, dass die IR-Rezeptoren von *Merimna* als Frühwarnsysteme für heiße Stellen dienen, die zum Einsatz kommen, wenn der Käfer auf einer aktiven Brandfläche herumfliegt, um Nahrung und Kopulationspartner zu finden. Interessant ist noch, dass gelegentlich Käfer gefunden werden, die nur am 2. Abdominalsegment ein Paar IR-Rezeptoren ausgebildet haben, jedoch werden auch Individuen gefunden, die drei Paar IR-Rezeptoren am 2.–4. Abdominalsegment aufweisen. Für Sinnesorgane ist eine solche Variabilität eher ungewöhnlich. Eine mögliche Interpretation wäre, dass der IR-Sinn bei *Merimna* evolutionär noch relativ jung ist und sich die endgültige Anzahl der IR-Organen erst noch herauskristallisieren muss.

ABB. 9 | DIE THORAKALEN IR-REZEPTOREN VON ACANTHOCNEMUS



a) REM-Aufnahme einer Ventralansicht des Vorderkörpers von *Acanthocnemus*. Die IR-Organen liegen links und rechts unmittelbar vor den Hüften (Coxen) der Vorderbeine (Pfeil). b) Einzelnes IR-Organ (Kopf befindet sich links). Die IR-absorbierende Scheibe ist hinten mit einem kleinen Stiel (Pfeil) am Körper befestigt und wird so über der darunterliegenden Grube gehalten. Im vorderen Bereich der Scheibe liegen die kleinen thermosensitiven Sensillen. c) Längsschnitt durch ein einzelnes IR-Sensillum im Randbereich der Scheibe. Von dem kleinen äußerlich sichtbaren Zapfen verläuft ein elektronendichter (= schwarzer) Stab durch den Kanal in der Kutikula zu einer unterhalb der Kutikula liegende Sinneszelle. d) Somata der im Inneren der Scheibe liegenden Sinneszellen. Ein großer Zellkern ist sichtbar (ZK). Die Somabereiche sind durch hineinziehende Ausläufer von Gliazellen kompartimentiert und enthalten viele Mitochondrien (Mi).

Thorakale IR-Rezeptoren beim Kleinen Aschekäfer (*Acanthocnemus nigricans*)

Wie bei *Merimna* sind auch die IR-Rezeptoren des nur wenige Millimeter großen Kleinen Aschekäfers einzigartig im Tierreich. Äußerlich sichtbar ist auf jeder Seite des ersten Thoraxsegments je eine kleine Scheibe, die direkt vor der Basis des linken bzw. rechten Vorderbeins angeordnet ist (Abbildung 9a) [15]. Die Oberfläche der Scheibe dient hier als IR-Absorber. Im Unterschied zum IR-Rezeptor bei *Merimna* sind die morphologischen Verhältnisse jedoch komplexer. Unter der Scheibe befindet sich eine luftgefüllte Grube, und die Scheibe wird nur an einer Stelle durch einen kleinen Stiel über dieser Grube gehalten (Abbildung 9b). Über den die Grube umgebenden Spalt steht die Luft in der Grube mit der Außenluft in Verbindung. Dies dient offensichtlich der Verringerung der thermischen Masse der Scheibe: Bei IR-Bestrahlung erwärmt sich die Scheibe schnell und kühlt bei Unterbrechung der Bestrahlung auch entsprechend schnell wieder ab. Im Einklang mit dieser Interpretation

sind auch die Thermosensoren im vorderen Bereich der Scheibe zu finden, der sich am schnellsten erwärmt und abkühlt. Es handelt sich hier um ca. 90 miniaturisierte Sensillen, deren kleine Kutikulazapfen von außen sichtbar sind (Abbildung 9b).

Nach bisherigem Wissensstand handelt es sich hier auch – genauso wie bei den photomechanischen IR-Rezeptoren – um modifizierte kutikuläre Haar-Mechanorezeptoren. An den ursprünglichen Mechanorezeptoren hat die Evolution jedoch auf andere Weise angegriffen. Das Haar wurde nur moderat modifiziert, indem es stark reduziert wurde. Tiefgreifende Modifikationen gab es hingegen

bei der Sinneszelle. Während diese bei den photomechanischen Rezeptoren nicht erkennbar abgewandelt wurde, hat sie bei den IR-Rezeptoren auf der Scheibe sowohl morphologische als auch funktionale Änderungen erfahren. Während die distale Spitze des Dendriten bei Haar-Mechanorezeptoren und photomechanischen IR-Sensillen in direktem Kontakt zum Kutikulaapparat steht und an der Verbindungsstelle einen Tubularkörper aufweist, ist beim *Acanthocnemus*-IR-Sensillum der gesamte äußere Teil des Dendriten komplett reduziert und steht daher mit dem kleinen Zapfen nicht mehr in Verbindung. Anstelle des Dendriten ist nach elektronenmikroskopischen Befunden ein sogenannter „elektronendichter Stab“ nicht genau bekannter Herkunft zu finden, der aus extrazellulärem, kutikulaartigem Material besteht. Der Stab ist mit der Basis des Zapfens verbunden (Abbildung 9c), durchzieht den sich durch die Kutikula erstreckenden Dendritenkanal und ist direkt unterhalb der Kutikula mit dem Rest des Dendriten der Sinneszelle verbunden. Die mögliche Funktion dieses Stabes wird erkennbar, wenn man berücksichtigt, dass die Sinneszelle nun nicht mehr als Mechanorezeptor, sondern als Thermorezeptor fungiert [16]. So wurde postuliert, dass der Stab als möglicher Wärmeleiter fungieren könnte, der Wärmeenergie, die durch IR-Absorption in den äußeren Schichten der Kutikula entsteht, zur unterhalb der Kutikula angeordneten Sinneszelle leitet. Die Sinneszelle zeigt ein ähnliches elektrisches Verhalten wie die thermorezeptive multipolare Sinneszelle im IR-Organ von *Merimna*, indem sie ständig Aktionspotenziale generiert (als Spontanaktivität bezeichnet) und Änderungen der Temperatur mit Änderungen in der Feuerrate beantwortet. Eine weitere strukturelle Veränderung besteht darin, dass im Inneren der Sinneszelle zahlreiche Mitochondrien zu finden sind (Abbildung 9d). Große Mengen von Mitochondrien wurden auch in der TDM des multipolaren Neurons im *Merimna* IR-Organ gefunden.

Bisherige elektrophysiologische Untersuchungen am IR-Organ von *Acanthocnemus* weisen im Vergleich zum IR-Organ von *Merimna* auf eine etwas höhere Empfindlichkeit hin. Wenn man berücksichtigt, dass der kleine Käfer nicht schnell fliegen kann, so ist es auch hier unwahrscheinlich, dass er sein IR-Organ nutzt, um Waldbrände aus größerer Entfernung zu detektieren. Deshalb ist auch bei *Acanthocnemus* zu vermuten, dass die IR-Organe als Frühwarnsysteme vor *hot spots* genutzt werden, wenn der Käfer auf der aktiven Brandfläche einen Landeplatz auf einem Aschefeld sucht.

Zusammenfassung

Infrarot-(IR)-Rezeptoren bei Insekten sind bisher nur bei Vertretern von drei Käfer- und einer Wanzenart gefunden worden, die alle Waldbrände anfliegen und daher als pyrophil bezeichnet werden. Auf den frischen Brandflächen dienen die IR-Rezeptoren als Frühwarnsysteme, mit deren Hilfe eine Landung auf einer heißen Stelle vermieden werden kann. Bei Prachtkäfern der Gattung *Melanophila* gibt es

GLOSSAR

MWIR-Strahlung: Mid-Wavelength-IR-Strahlung im Wellenlängenbereich von 3–8 μm . Hier liegt das Emissionsmaximum elektromagnetischer Strahlung von Waldbränden, bei denen Temperaturen von bis zu 1.000 °C auftreten können. Da in diesem Bereich auch ein atmosphärisches Fenster existiert, in dem die Gase der Atmosphäre wie Kohlendioxid und Wasserdampf die IR-Strahlung nicht absorbieren, kann mit einem in diesem Fenster messenden IR-Sensor ein Waldbrand sogar aus dem Weltraum detektiert werden.

Pyrophile Insekten: Darunter versteht man eine vergleichsweise kleine Gruppe von ca. 50 Arten, die in den ersten Tagen, Wochen und Monaten signifikant häufiger auf Brandflächen als auf benachbartem unverbranntem Land gefunden werden können. Dies sind in erster Linie Käfer und Wanzen; bei einigen Arten handelt es sich auch um Fliegen und Schmetterlinge. Infrarotrezeptoren als Spezialanpassung an die pyrophile Lebensweise wurden innerhalb dieser Gruppe bisher nur bei den hier vorgestellten Käfern und Wanzen gefunden.

Sensillen: Die Sensillen der Insekten werden im Deutschen auch als „Kleinsinnesorgane“ bezeichnet. Es handelt sich um miniaturisierte Sensoren für alle Umweltreize, deren Wahrnehmung für das jeweilige Insekt wichtig ist. Da Insekten ein Exoskelett aus Kutikula besitzen, sind die Sensillen in dieses eingebettet. Daher verfügen sie auch über einen sog. äußeren Kutikulaapparat. Bei einer mechanosensitiven Borste sind das z. B. die Borste und die zugehörigen basalen Sockelstrukturen. Unterhalb des Kutikulaapparats liegen die Sinneszellen.

Tubularkörper: Für mechanosensitive Sinneszellen, die kutikuläre Mechanorezeptoren innervieren, charakteristische Struktur des Cytoskeletts. Tubularkörper liegen in den distalen Spitzen der Dendriten und bestehen aus dichten Bündeln von Mikrotubuli, die miteinander verkittet sind. Bei mechanischen Deformationen der Zellmembran dienen sie als inneres Widerlager und begünstigen daher das Öffnen von mechanosensitiven Ionenkanälen.

Wallace-Linie: Es handelt sich bei dieser in der Mitte des 19. Jahrhunderts von Thomas Henry Huxley nach Alfred Russel Wallace benannten Linie um eine biogeografische Grenze. Sie verläuft zwischen Bali und Lombok, Borneo und Sulawesi und dann weiter in östlicher Richtung südlich der Philippinen. Sie markiert die Trennung zwischen asiatischer und australischer Fauna.

jedoch Hinweise darauf, dass die IR-Rezeptoren auch zur Ortung von Waldbränden aus größeren Entfernungen dienen können. Da sich die pyrophile Lebensweise bei den vier Gattungen unabhängig voneinander entwickelt hat, gibt es auch keinen „Standard-IR-Rezeptor“. So haben sich bei *Melanophila*-Käfern und pyrophilen *Aradus*-Rindenwanzen auf Mechanosensorik basierende, sogenannte photomechanische IR-Rezeptoren entwickelt. Beim Australischen Feuerkäfer (*Merimna atrata*) und beim Kleinen Aschekäfer (*Acanthocnemus nigricans*) findet man hingegen thermische IR-Rezeptoren, bei denen ein durch IR-Absorption hervorgerufener Temperaturanstieg des Rezeptors gemessen wird.

Summary

Infrared receptors in pyrophilous insects

So far, infrared (IR) receptors in insects have only been found in representatives of three beetle genera and one hemipteran genus, all of which fly to forest fires and are therefore referred to as pyrophilous. On freshly burned areas, the IR receptors serve as early warning systems that can be used to avoid landing on a hot spot. However, there is evidence in jewel beetles of the genus *Melanophila*, that the IR receptors may also serve to locate forest fires from greater distances. As the pyrophilous lifestyle has evolved independently in the four genera, no “standard IR receptor” exists. Mechanosensory-based, so-called photomechanic IR receptors have evolved in *Melanophila* beetles and pyrophilous *Aradus* bark bugs. In the Australian fire beetle *Merimna atrata* and in the small ash beetle *Acanthocnemus nigricans*, on the other hand, thermal IR receptors are found, in which an increase in temperature caused by IR absorption is measured.

Schlagworte

Waldbrand, Feuerökologie, Infrarotrezeptor, pyrophile Insekten

Literatur

- [1] H. Altner, R. Loftus (1985). Ultrastructure and function of insect thermo- and hygrosensors. *Ann. Rev. Entomol.* 30, 273–295.
- [2] L. M. Zopf et al. (2014). Infrared detection without specialized infrared receptors in the bloodsucking bug *Rhodnius prolixus*. *J. Neurophysiol.* 112, 1606–1615.
- [3] A. Schmitz et al. (2015). Behaviour of the Australian ‘fire-beetle’ *Merimna atrata* (Coleoptera: Buprestidae) on burnt areas after bushfires. *Records of the Western Australian Museum* 30, 1–11.
- [4] W. G. Evans (1962). Notes on the biology and dispersal of *Melanophila* (Coleoptera: Buprestidae). *Pan-Pacific Entomol.* 38, 59–62.
- [5] M. Geiser (2016). An update on the distribution of the pyrophilous beetle *Acanthocnemus nigricans* (Hope, 1845) (Coleoptera: Cleroidea: Acanthocnemidae), including new records from Laos. *Entomologica Basiliensia et Collections Frey* 36, 429–432.
- [6] T. Johansson et al. (2010). Responses of eight boreal flat bug (Heteroptera: Aradidae) species to clear-cutting and forest fire. *Journal of Insect Conservation* 14, 3–9.
- [7] T. Vondran et al. (1995). The infrared receptor of *Melanophila acuminata* De Geer (Coleoptera: Buprestidae): Ultrastructural study of a unique insect thermoreceptor and its possible descent from a hair mechanoreceptor. *Tissue & Cell* 27, 645–658.
- [8] A. Schmitz et al. (2010). Distribution and functional morphology of photomechanic infrared sensilla in flat bugs of the genus *Aradus* (Heteroptera, Aradidae). *Arthropod Structure & Development* 39, 17–25.
- [9] A. Schmitz et al. (2007). The analysis of the mechanosensory origin of the infrared sensilla in *Melanophila acuminata* (Coleoptera; Buprestidae) adduces new insight into the transduction mechanism. *Arthropod Structure & Development* 36, 291–303.
- [10] H. Schmitz, H. Bousack (2012). Modelling a historic oil-tank fire allows an estimation of the sensitivity of the infrared receptors in pyrophilous *Melanophila* beetles. *Plos One* 7, e37627.
- [11] H. Schmitz et al. (2000). A new type of infrared organ in the Australian “fire-beetle” *Merimna atrata* (Coleoptera: Buprestidae). *Naturwissenschaften* 87, 542–545.
- [12] H. Schmitz et al. (2001). Morphology of a thermosensitive multipolar neuron in the infrared organ of *Merimna atrata* (Coleoptera, Buprestidae). *Arthropod Struct Development* 30, 99–111.
- [13] H. Schmitz, S. Trenner (2003). Electrophysiological characterization of the multipolar thermoreceptors in the “fire-beetle” *Merimna atrata* and comparison with the infrared sensilla of *Melanophila acuminata* (both Coleoptera, Buprestidae). *Journal of Comparative Physiology A* 189, 715–722.
- [14] M. Hinz et al. (2018). The impact of infrared radiation in flight control in the Australian “firebeetle” *Merimna atrata*. *Plos One* 13, e0192865.
- [15] E. J. Kreiss et al. (2005). Morphology of the prothoracic discs and associated sensilla of *Acanthocnemus nigricans* (Coleoptera, Acanthocnemidae). *Arthropod Structure & Development* 34, 419–428.
- [16] E.-J. Kreiss et al. (2007). Electrophysiological characterisation of the infrared organ of the Australian “Littel Ash Beetle” *Acanthocnemus nigricans* (Coleoptera, Acanthocnemidae). *J. Comp. Physiol. A* 193, 729–739.

Feuerkäfer in Aktion
Das Video auf YouTube (<https://www.youtube.com/watch?v=Cjk0lkM294A>) zeigt das Verhalten von *Merimna* und *Acanthocnemus* auf einer Brandfläche in Westaustralien.

Verfasst von:



Helmut Schmitz studierte Biologie in Bochum und Düsseldorf und promovierte 1991 an der Universität Erlangen-Nürnberg über Temperaturregulation bei Tagfaltern. Nach dem Wechsel an die Universität Bonn erfolgte dort 2001 die Habilitation. Seit der Promotion liegt das Arbeitsgebiet von Helmut Schmitz auf dem Gebiet der Thermo- und Infrarotsensorik bei Insekten. Seit 1999 wurden dabei im Rahmen von jährlichen Forschungsaufenthalten in Westaustralien die IR-Rezeptoren von pyrophilen australischen Käfern und Wanzen untersucht.



Anke Schmitz studierte Biologie an der Universität Erlangen-Nürnberg und promovierte dort 1996 mit einer Arbeit über die Morphologie der Stigmen von Insekten. Die Habilitation erfolgte 2004 an der Universität Bonn. Anke Schmitz arbeitete licht- und elektronenmikroskopisch u. a. am Atmungssystem von Spinnen, an der Seitenlinie von Fischen und aktuell arbeitet sie zusammen mit Helmut Schmitz an den IR-Rezeptoren von pyrophilen Insekten.

Korrespondenz

Dr. Helmut Schmitz
Institut für Zoologie
Universität Bonn
Meckenheimer Allee 169
53115 Bonn
Email: h.schmitz@uni-bonn.de

Die Rolle der Genregulation in der Plastizität von Verhalten und Lebenserwartung

Ameisen – ein Erfolgsmodell der Evolution

JULIANE HARTKE | SUSANNE FOITZIK

Eine gesunde (links) und eine mit dem Bandwurm infizierte (rechts) Arbeiterin der Ameisenart *Temnothorax nylanderi*. Ameisenlarven, die sich mit Bandwurmeiern infizieren, färben nach Verpuppung ihre Kutikula nur schwach ein und bleiben gelb.

Foto: Susanne Foitzik



Ameisen sind enorm erfolgreich durch ihr komplexes Sozialverhalten. Ein Blick darauf, wie diese Insektenstaaten entstanden sind und wie ihre effektive Arbeitsteilung auf molekularer Ebene reguliert wird, enthüllt die Bedeutung epigenetischer Prozesse in der Evolution.

Viele von uns werden bei einem Waldspaziergang schon einmal das hektische Treiben auf einem Ameisenhügel beobachtet haben. Auf den ersten Blick erwecken die durcheinanderlaufenden Ameisen den Eindruck von reinem Chaos. Erst bei näherem Hinsehen erkennt man jedoch das hohe Maß an Ordnung und Organisation, welches hinter diesem Gewusel steckt. Ameisen gehören zu den sozialen Insekten, deren Staaten durch eine mehr oder weniger ausgeprägte Arbeitsteilung gekennzeichnet sind [1–2]. Genau diese Arbeitsteilung wird oftmals als eine der Eigenschaften genannt, die dieser Gruppe zu ihrem herausragenden ökologischen Erfolg verholfen haben. Ameisen findet man auf nahezu allen Kontinenten, in allen Klimazonen und Ökosystemen. Es gibt deutlich mehr Ameisen als Menschen auf unserem Planeten – ob sie sogar eine höhere Biomasse als Menschen haben,

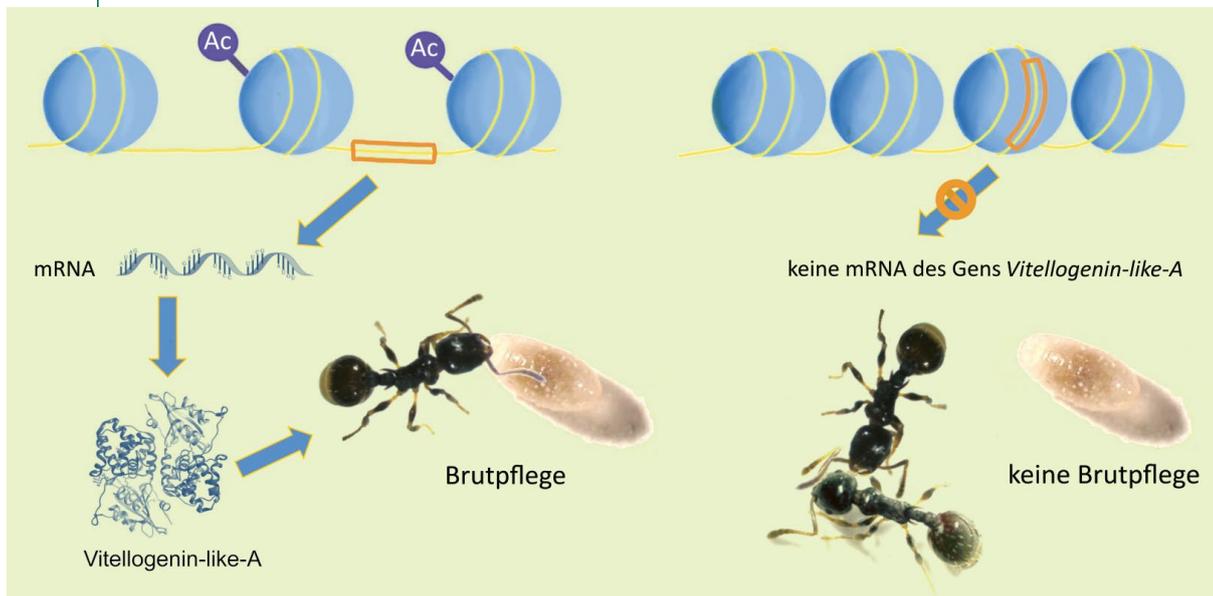
wurde diskutiert. Der evolutionäre und ökologische Erfolg der Familie der Ameisen spiegelt sich auch in der Artenzahl wider: Es wird geschätzt, dass es 22.000 verschiedene Ameisenarten gibt. Beschrieben wurden davon bisher rund 15.000 Arten und Unterarten [3].

Arbeitsteilung im Ameisenstaat

Doch wie genau werden die unterschiedlichen Aufgaben im Ameisenstaat aufgeteilt? Das klassische Modell, von dem es auf Grund der hohen Artenzahl einige Variationen gibt, funktioniert in etwa so: Oben in der Hierarchie steht die Königin – selten auch mehrere Königinnen – die meist die Mutter aller Arbeiterinnen ist. Diese hat den Ameisenstaat gegründet, die ersten Arbeiterinnen aufgezogen und ist später im Leben nur noch für das Eierlegen zuständig. Den Rest der anstehenden Aufgaben im Staat teilen die Arbeiterinnen unter sich auf. Da gibt es Brutpflegerinnen, die die Eier, Larven und Puppen versorgen, Arbeiterinnen, die erwachsene Nestgenossinnen füttern und putzen, und andere, die das Nest bauen oder verteidigen, sowie Arbeiterinnen, die nach draußen gehen und Futter suchen. Ameisen, die sich auf diese unterschiedlichen Aufgaben spezialisieren, unterscheiden sich nicht nur im Verhalten. Zwischen Königinnen und Arbeiterinnen gibt es zum Beispiel oft stark ausgeprägte morphologische und physiologische Unterschiede. Königinnen sind meist deutlich größer und kommen mit zwei Paar Flügeln auf die Welt, die sie später abwerfen. Sie sind sehr fruchtbar, leben um ein Vielfaches länger – ja können bis zu 30 Jahre alt werden – während die meist sterilen Arbeiterinnen oftmals nur wenige Wochen bis wenige Jahre leben. Noch kürzer leben die Männchen, die einmal im Jahr für den Hochzeitsflug großgezogen werden, und die nach der Paarung mit fremden Königinnen sterben. Ihre Spermien jedoch können in der Spermientasche der Königin jahrzehntelang überleben und zur Befruchtung von Eizellen beitragen.

Das Spannende an diesen Unterschieden zwischen den Ameisenkasten ist, dass sie meist nicht in der Ameisen-DNA fest kodiert sind. Aus jedem Genom – also der Gesamtheit des Erbguts – kann sowohl eine Königin, eine Arbeiterin oder auch ein Männchen entstehen. Und nicht nur das. Im Laufe ihres Lebens übernehmen Arbeiterinnen nacheinander unterschiedliche Aufgaben. Zumeist starten

ABB. 1 | EPIGENETISCHE GENREGULATION



Histon-Acetylierung resultiert in der Dekondensierung des Chromatins und der besseren Ablesbarkeit von Genen und könnte zum Beispiel die Aktivität des Brutpflege-Gens *Vitellogenin-like-A* beeinflussen.

sie als Brutpflegerinnen in der sicheren Brutkammer und wechseln dann mit fortschreitendem Alter zur Versorgung der Erwachsenen, dann zum Nestbau und Verteidigung und schließlich in den Außeneinsatz. Der Grund für diese Richtung der Arbeiterinnen-„Karriere“ ist, dass es für die Kolonie sinnvoll ist, den ältesten Arbeiterinnen mit wenig verbleibender Lebens- und Arbeitszeit, die risikoreichen Aufgaben draußen zu übertragen. Trotz der stringenten Arbeitsteilung bleiben Arbeiterinnen zeitlebens in ihrem Verhalten flexibel und können auch vom Außeneinsatz zurück zur Brutpflege wechseln, wenn dies nötig ist.

Doch wie funktioniert diese Regulation der Aufgabenspezialisierung auf molekularer Ebene? Während alle grundlegenden Funktionen im Genom einer Ameise festgelegt sind, kann die Aktivität der einzelnen Gene flexibel gesteuert werden. Genregulation – also das An- und Ausschalten verschiedener Gene – ist der Mechanismus, der dieser Vielfalt im Ameisenstaat zugrunde liegt. An der Johannes-Gutenberg-Universität (JGU) und dem Institut für Molekulare Biologie (IMB) in Mainz untersuchen wir in dem interdisziplinären DFG-Graduiertenkolleg GenEvo die Rolle der Genregulation in der Evolution und bei Anpassungsprozessen – in mehreren Projekten auch am Beispiel von Ameisen.

Wie funktioniert Genregulation?

Um zu verstehen, wie genau eigentlich Genregulation funktioniert, muss man sich zunächst anschauen, wie die DNA-Sequenz, die ein spezifisches Gen kodiert, in ein Protein übersetzt wird. Die DNA findet sich bei allen Tieren im Zellkern. Wenn ein bestimmtes Protein benötigt wird, werden dort entsprechende Abschnitte abgelesen und

die benötigte Sequenz in eine prä-mRNA-Sequenz übersetzt (Transkription). Diese kann noch variabel gespleißt werden, wodurch aus einem Transkript verschiedene Proteine entstehen können. Das gespleißte Transkript enthält die Information für die Herstellung eines einzigen Eiweißstoffes. Es wandert aus dem Zellkern heraus und wird im Zellplasma in Aminosäuren übersetzt (Translation) und als Protein synthetisiert.

Genregulation kann an allen Schritten eingreifen, die auf dem Weg zur Proteinsynthese nötig sind [4]. Wir wollen uns hier zunächst mit dem Ablesen der DNA beschäftigen. Diese passt in ihrer vollen Länge in den Zellkern, da sie auf evolutionär sehr alte Proteine, sogenannte Histone, aufgewickelt ist. Je nachdem, wie fest ein jeweiliger DNA-Abschnitt aufgewickelt wird, kann er mehr oder weniger gut abgelesen werden. Dies beeinflusst die Syntheserate der dort kodierten Proteine – die Anzahl der Proteine, die pro Zeiteinheit hergestellt werden können – und trägt dementsprechend zum Phänotyp des Organismus, also seinem Aussehen, seiner Physiologie oder seinem Verhalten bei.

IN KÜRZE

- Ameisen leben in komplexen Staaten mit verschiedenen Kasten und einer effektiven Arbeitsteilung.
- Die Regulierung der Arbeitsteilung und Kastendetermination findet über die epigenetische Regulierung von Genen statt.
- Histonmodifikationen beeinflussen das Verhalten von Arbeiterinnen, indem sie Markergene an- und ausschalten.
- Auch Parasiten können die Lebensspanne und das Verhalten ihres Wirtes verändern, z. B. durch die Sekretion von Proteinen.

Ob ein DNA-Abschnitt eher locker oder straff um ein Histon gewickelt ist, wird über die Struktur der Histone reguliert. Wird ein Histon beispielsweise acetyliert – d. h. es wird eine Acetylgruppe an ein Histon angelagert – dann wird die DNA an dieser Stelle eher locker gewickelt und die Gene können besser abgelesen werden (Abbildung 1). Histone können auch durch Methylierung, Phosphorylierung oder Ubiquitylierung modifiziert werden.

Genregulation ist also ein Mechanismus, der es Individuen mit der gleichen genomischen Basis erlaubt, unterschiedliche Phänotypen auszubilden. Bei Ameisen mit ihrer enormen Vielfalt im Aussehen, dem Verhalten und der Lebenserwartung der unterschiedlichen Kasten spielt insbesondere die epigenetische Regulation von Genen eine wichtige Rolle. Darunter versteht man molekulare Prozesse, die die Aktivität von Genen gezielt steuern, zum Beispiel Histonmodifikationen, DNA-Methylierung oder nicht-kodierende RNAs.

Regulation der Arbeitsteilung

Bei unseren Ameisenarbeiterinnen scheinen Histonacetylierungen vorzuliegen, die dazu führen, dass die Aktivität der Ameisenarbeiterinnen im Tagesrhythmus gesteuert werden und die sie im Laufe ihre Lebens zwischen Aufgaben wechseln lassen [5]. So haben wir in Experimenten neue Histonacetylierungen durch chemische Inhibierung unterbunden und konnten zeigen, dass Brutpflegerinnen sich verstärkt zu Nahrungssucherinnen entwickelten, wenn wir alte Nahrungssucherinnen entfernten [6]. Interessanterweise führte eine Inhibierung der Histonacetylierung zu einem geringeren Zurückwechseln der alten Außendienstlerinnen zur Brutpflege, wenn man Brutpflegerinnen entfernte. Dies deutet darauf hin, dass ein hoher Grad an Histonacetylierung junge Arbeiterinnen im Brutpflegemodus hält. Welche Gene genau deaktiviert bzw. aktiviert werden, versucht Marcel Caminer, ein Doktorand der JGU, in Zusammenarbeit mit David Ho, einem Doktoranden am Institut für Molekulare Biologie in Mainz und der JGU, herauszufinden. Die beiden machen sich eine Methode zunutze, die Aufschluss darüber gibt, welche Gene in der Nähe von Bindestellen für acetylierte Histone liegen und durch diese in ihrer Aktivität reguliert werden können. Dieses sogenannte ChIP-Seq-Protokoll, das Marcel Caminer und David Ho für unsere Ameisen entwickeln, wird letztendlich Histone mit aufgabenspezifischer Acetylierung im Gehirn der Ameisen zeigen. Parallel dazu messen wir, welche Gene gerade in mRNA transkribiert werden. Dies wird Aufschluss darüber geben, welche Gene durch ihre Aktivität im Gehirn in der Kontrolle der Arbeitsteilung involviert sind. Seit kurzem ist auch Doktorandin Beril Yildiz daran beteiligt, die Rolle der Genregulation in der Arbeitsteilung zu erforschen. Sie plant, die Arbeitsteilung von Ameisenkolonien so zu manipulieren, dass Arbeiterinnen ihre Rollen wechseln, um dann in verschiedenen Momentaufnahmen des Rollenwechsels die Veränderungen

in der Genaktivität und in der epigenetischen Regulierung zu beobachten.

Kontrolle der Brutpflege und die Rolle sensorischer Filter

Ein schönes Beispiel ist die Umstellung vom Brutpflegemodus zu Aufgaben, die ältere Ameisen übernehmen. Bei der Ameisenart *Temnothorax longispinosus* wurde die Aktivität eines Gens namens *Vitellogenin-like-A* experimentell reduziert, welches bei Brutpflegerinnen am stärksten hochreguliert ist. Dazu wurde an einer anderen Stelle der Genausprägung eingegriffen, nämlich auf dem Level der mRNA, bevor diese in ein Protein übersetzt werden kann. Man kann sich dafür den Mechanismus der RNA-Interferenz zu Nutze machen. Hierbei handelt es sich um einen natürlich vorkommenden Prozess, der eine wichtige Rolle bei der Genregulation spielt. Beim Menschen wird zum Beispiel die Aktivität von etwa einem Drittel der Gene in dieser Form reguliert. Wenn die mRNA den Zellkern verlassen hat, können sich kurze, doppelsträngige RNA-Moleküle an die mRNA anlagern und das Signal geben, die mRNA zu zerschneiden, damit diese nicht mehr in ein Protein übersetzt werden kann.

Bei unseren Ameisen wurde spezifische doppelsträngige RNA ins Futter von jungen Brutpflegerinnen gemischt, die dafür gesorgt hat, dass die mRNA von *Vitellogenin-like-A* nicht mehr translatiert wird. Das Fehlen des Vitellogenin-like-A-Proteins führte dazu, dass die Brutpflegerinnen die Brut vernachlässigten und sich stattdessen um ihre erwachsenen Schwestern kümmerten, wie es ältere Arbeiterinnen typischerweise machen. Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass diese ehemaligen Brutpflegerinnen nun viel weniger auf den Geruch der Brut reagierten und sich stattdessen für Geruchsstoffe der erwachsenen Ameisen interessierten [7]. Ameisen leben in einer Welt, die von Duftstoffen geprägt ist. Der Großteil ihrer Kommunikation, aber auch die Wahrnehmung von „Arbeitsanweisungen“ wird über diese chemischen Signale und deren Wahrnehmung mithilfe der Antennen – also ihren Fühlern – vermittelt. Interessanterweise unterscheiden sich Arbeiterinnen, die unterschiedliche Aufgaben übernehmen, auch stark in den Aktivitätsmustern der Gene in den Antennen (Abbildung 2).

Achtmal mehr Gene variierten in der Aktivität in den Fühlern als im Gehirn, was auf die enorme Bedeutung der Geruchswahrnehmung für die Regulierung des Verhaltens und insbesondere der Arbeitsteilung bei Ameisen hinweist. Insbesondere unterschied sich die Aktivität der Hälfte aller Gene für Geruchsrezeptoren zwischen Brutpflegerinnen und Nahrungssucherinnen [8]. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass Ameisen mit unterschiedlichen Spezialisierungen einen sensorischen Filter in den Antennen haben, der sie besonders sensibel für Signale ihres Arbeitsbereiches macht. Und dieser sensorische Filter ist nicht fix, sondern kann dynamisch mit dem Alter und den Anforderungen der Kolonie neu justiert werden.

Doktorand Marcel Caminer untersucht daher gerade, ob eine experimentelle Herunterregulierung der Aktivität des Gens *Vitellogenin-like-A* die Regulierung der Geruchsrezeptoren in den Fühlern und damit die Arbeitsteilung beeinflusst. Interessanterweise ist das produzierte Protein weder als Transkriptionsfaktor noch als epigenetischer Regulator bekannt, sondern spielt eher eine Rolle im Hormonhaushalt. Dennoch gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie Vitellogenin-like-A die Geruchsrezeptoren beeinflussen könnte: Es könnte an der Entwicklung von neuronalen Schaltkreisen beteiligt sein, die der Geruchswahrnehmung dienen. Weiterhin könnte es als Signalmolekül fungieren, das interzelluläre Kommunikation und Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Zelltypen und Geweben beeinflusst. Diese Signalwege könnten wiederum die Expression oder Aktivität von Genen – beispielsweise der für Geruchsrezeptoren kodierenden – modulieren.

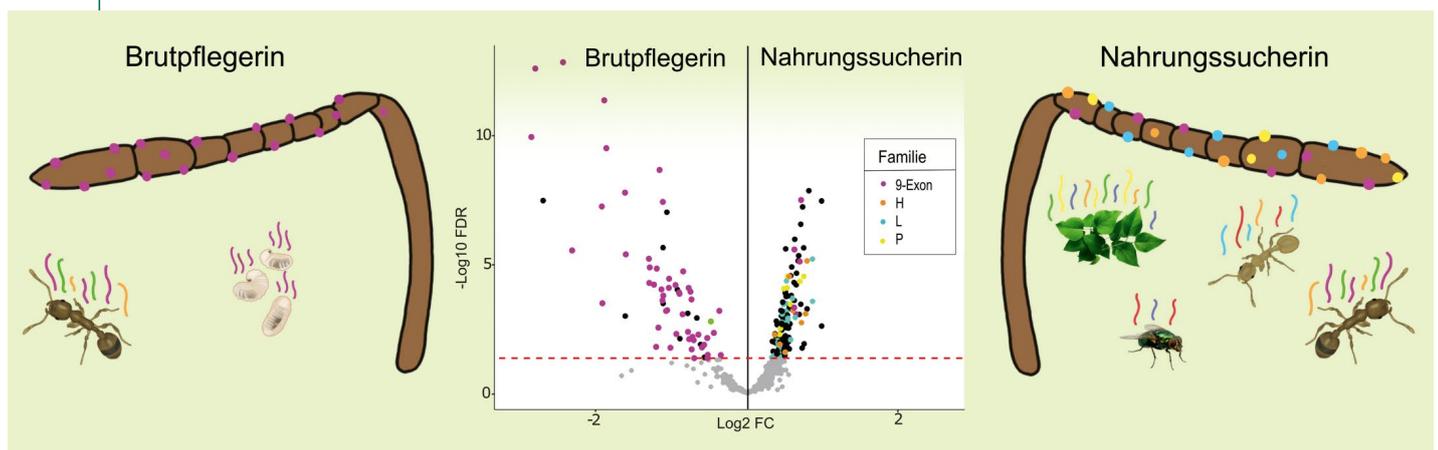
Die Flexibilität der Königinnen

Während sich die bisher genannten Beispiele auf die Arbeiterkaste fokussieren, schaut sich GenEvo-Doktorand Martin Coulm (JGU) anhand der Schwarzen Wegameise (*Lasius niger*) an, welche Rolle Genregulation im Leben von Königinnen spielt. Bislang wurde angenommen, dass Königinnen in einer etablierten Kolonie keine Verhaltensflexibilität mehr aufweisen, sondern nur als „Eierlegemaschinen“ fungieren. Allerdings lohnt es, einen Blick auf

die Phase der Koloniegründung zu werfen: Junge, geflügelte Königinnen verlassen zur Paarung ihre Geburtskolonie und gründen anschließend ihr eigenes Nest. Während dieser Zeit sind die Königinnen der meisten Ameisenarten auf sich allein gestellt. Um eine Kolonie erfolgreich zu etablieren, muss die Königin in ihren frühen Lebensmonaten Aufgaben von Arbeiterinnen übernehmen. Dazu gehört zum Beispiel der Nestbau oder die Aufzucht der Brut, manchmal sogar die Nahrungssuche. Während dieser Zeit ist die Königin also eher „Mädchen für alles“ und ähnelt im Verhalten – abgesehen vom Eierlegen – einer Arbeiterin. Es wurde gezeigt, dass Königinnen, wenn die erste Generation Arbeiterinnen schlüpft, eine Verhaltensänderung durchlaufen. Die Anwesenheit von Arbeiterinnen ist hier der entscheidende Faktor, der dazu führt, dass die Königinnen die Aufgaben der Arbeiterinnen niederlegen [9].

Martin Coulm konnte nun zeigen, dass diese Verhaltensänderung reversibel ist. Wenn alle Arbeiterinnen aus dem Nest entfernt werden, übernehmen die Königinnen wieder die Arbeiterinnenaufgaben, selbst Jahre nach der Gründung der Kolonie. Im Grunde zeigen Königinnen also die gleiche Flexibilität, die auch schon bei Arbeiterinnen nachgewiesen wurde, die wieder zu Brutpflegerinnen werden, wenn dies für die Gemeinschaft erforderlich ist. Die beobachtete Flexibilität der Königin deutet darauf hin, dass die Königin auf die Signale von hungrigen Larven reagieren können; vermutlich haben sie jedoch einen

ABB. 2 | GENREGULATION BEI BRUTPFLEGERINNEN UND NAHRUNGSSUCHERINNEN



Brutpflegerinnen und Nahrungssucherinnen unterscheiden sich stark in der Genaktivität der Geruchsrezeptoren in den Fühlern. Brutpflegerinnen zeigen eine hohe Aktivität von Rezeptoren der Exon-9-Genfamilie, die für die Wahrnehmung von Kohlenwasserstoffen auf der Kutikula von Ameisenbrut und Arbeiterinnen verantwortlich sind. Bei Außenarbeiterinnen sind unterschiedliche Genfamilien (H, L und P) aktiviert und deshalb können sie verschiedene Gerüche wahrnehmen. Rezeptoren der H-Genfamilie sind z. B. bei Honigbienen für die Wahrnehmung von Blütendüften verantwortlich [14]. Geruchsrezeptoren der vier genannten Genfamilien sind unabhängig voneinander bei sklavenhaltenden Ameisen verloren gegangen, die selbst keine Arbeiten mehr im Ameisenstaat übernehmen [15]. Diese Ergebnisse interpretieren wir so, dass die Ameisen einen sensorischen Filter verwenden, der zur Arbeitsteilung führt. Unterschiedliche Arbeiterinnen sind sensibilisiert für spezifische chemische Signale, die mit ihren Aufgaben zusammenhängen. Die Unterschiede in der Genexpression zwischen Brutpflegerinnen und Außenarbeiterinnen sind im Vulkanidiagramm in der Mitte dargestellt. Auf der horizontalen Achse werden die logarithmierten Expressionsunterschiede (fold-change, FC) gezeigt und auf der vertikalen Achse der negative dekadische Logarithmus des p-Werts, der die statistische Signifikanz quantifiziert. Die Gene sind nach ihrer Zugehörigkeit zu den verschiedenen Genfamilien der Geruchsrezeptoren eingefärbt.

höheren Schwellenwert oder eine geringere Sensibilität für diese Signale, weshalb Arbeiterinnen schneller darin sind, die Aufgaben auszuführen. Molekulare Analysen ergaben hier erste Einblicke in die Regulation des Verhaltens und identifizierten dabei zum Beispiel das Protein Sin3a: einen Repressor der RNA-Transkription, der bei Königinnen in Anwesenheit von Arbeiterinnen aktiviert wird. Auch hier scheint Histonacetylierung eine Rolle bei der Verhaltensflexibilität der Königinnen zu spielen, wie Experimente mit Inhibitoren zeigen. Zusammen mit Doktorand Maximilian Bolder (JGU) untersucht Martin Coulm, welche weiteren Gene und Regulatoren für den Übergang und die Aufrechterhaltung dieser Flexibilität verantwortlich sind. Zu diesem Zweck entwickelt Martin Coulm ein Protokoll für ATAC-Sequenzierung (siehe Kasten), welches eingesetzt wird, um Unterschiede in der Zugänglichkeit der Gene zwischen Königinnen, die während der Koloniegründung mit und ohne Arbeiterinnen leben, aufzuzeigen. Letztendlich wird diese Arbeit dazu beitragen, die Evolution der Arbeitsteilung in sozialen Insekten und die Rolle der Genregulation dabei zu verstehen.

Langlebigkeit der Ameisen

Ein für uns Menschen besonders spannendes Thema ist Altern und Langlebigkeit. Wie schaffen wir es, ein langes und gesundes Leben zu führen? Auch für Ameisen ist dieses Thema wichtig, denn der Ameisenstaat kann nur so lange fortbestehen, wie eine fitte und fertile Königin da ist, die weiterhin Eier legt und damit für den Nachschub an Arbeitskräften sorgt. Bei der Ameise *Temnothorax nylanderi* werden die Königinnen bis zu 20 Jahre alt, die Arbeiterinnen leben dagegen meist nur ein bis zwei Jahre. Herauszufinden, inwiefern genregulatorische Prozesse für diesen Unterschied verantwortlich sind, ist schwierig, da sich Königinnen und Arbeiterinnen nicht nur in diesem Merkmal unterscheiden, sondern in vielen weiteren. Aber

KASTEN: ATAC-SEQUENZIERUNG

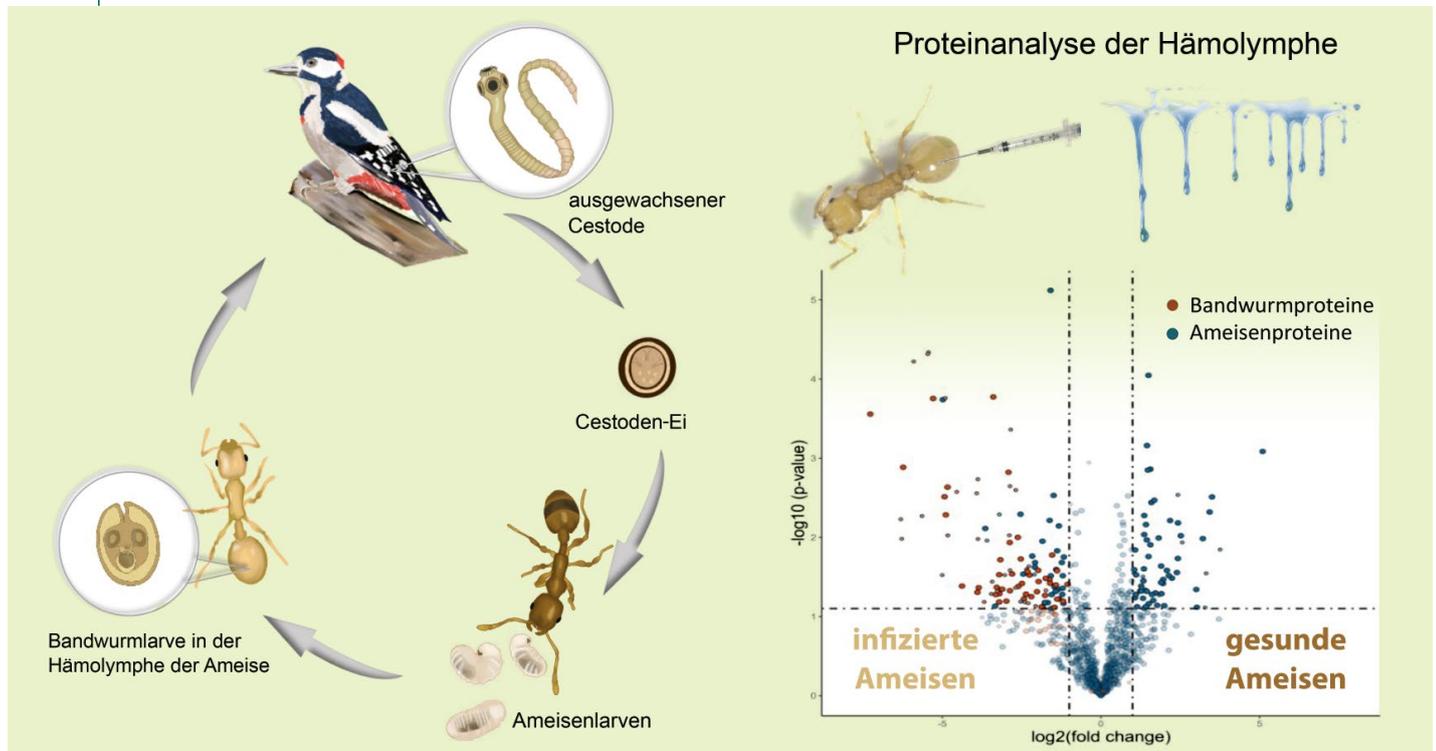
ATAC-Sequenzierung (aus dem Englischen für assay for transposase-accessible chromatin using sequencing) ist eine Technik zur Bestimmung der Zugänglichkeit von Chromatinregionen. Sie ermöglicht die Identifizierung von Bereichen im Genom, die für die Bindung von Proteinen und für eine Regulation der Genexpression zugänglich sind. Hierzu wird zunächst das Enzym Transposase, das DNA-Sequenzen in zugängliche Chromatinbereiche einfügen kann, zu den Zellen hinzugegeben. Anschließend werden die modifizierten DNA-Fragmente isoliert und sequenziert, um die zugänglichen Chromatinbereiche zu erhalten. Die veränderten DNA-Bereiche können durch eine bioinformatische Sequenzanalyse identifiziert werden. Darüber hinaus können Gene identifiziert werden, die in unmittelbarer Nähe dieser zugänglichen Regionen liegen. Dies liefert Informationen über die Genfunktionen, die in unserem Fall besonders wichtig sind, um die Flexibilität der Königinnen aufrechtzuerhalten.

beim Entwirren der Zusammenhänge kann uns ausgerechnet ein Parasit helfen.

Der Bandwurm *Anomotaenia brevis* infiziert sowohl Spechte als auch die Ameise *T. nylanderi* (Abbildung 3). Diese fungiert hier als Zwischenwirt, in dem sich die Larven des Bandwurms entwickeln. Um zu einem ausgewachsenen Bandwurm heranzuwachsen, muss die Ameise inklusive Bandwurmlarve von einem Specht gefressen werden. Infizierte Ameisen leben extrem lang – nach mehrjährigen Untersuchungen unserer Arbeitsgruppe offenbar so lange wie die Ameisenköniginnen. Sie verlassen das Nest gewöhnlich nicht und laufen auch nicht weg, wenn das Nest geöffnet wird. Wunderbare Voraussetzungen also, während ihres langen Lebens von einem hungrigen Specht gefressen zu werden. Insofern liegt die Vermutung nahe, dass der Bandwurm von der verlängerten Lebenserwartung infizierter Ameisen profitiert und diese auch beeinflusst [10].

Bisherige Studien deuten darauf hin, dass die Anwesenheit des Parasiten die Regulation von Genen der Ameisen direkt beeinflusst, wodurch seine Chancen auf eine erfolgreiche Übertragung steigen. Durch einen Vergleich von mit dem Bandwurm infizierten Ameisen mit nicht-infizierten, kurzlebigen Arbeiterinnen können wir nun einfacher Gene finden, die für ein langes Leben an- oder abgeschaltet werden. GenEvo-Doktorand Tom Siermans konnte zum Beispiel zeigen, dass in Ameisen, die mit sehr vielen Bandwurmlarven infiziert sind, Gene mit Anti-Aging-Funktionen stärker aktiv sind, die das Leben der infizierten Ameisen verlängern [11]. Eine weitere assoziierte GenEvo-Doktorandin, Marah Stoldt, konnte mit Kooperationspartnern am IMB zeigen, dass ein Gen, dessen Aktivität bei Fruchtfliegen die Lebenserwartung verlängert, sowohl in infizierten Arbeiterinnen als auch in gesunden Ameisenköniginnen hochreguliert ist [12]. In einem nächsten Schritt möchte nun Doktorandin Giulia Blasi die genregulatorischen Mechanismen erforschen, die sich der Bandwurm zunutze macht, um in die Genaktivität der Ameisen einzugreifen. Dazu wird sie sich anschauen, wie eine Infektion sowohl die Modifikationen der Histone als auch solche der DNA wie z. B. Methylierung verändert und welche Rolle kleine RNAs in der Genregulation der Ameise spielen, die möglicherweise vom Bandwurm abgegeben werden.

In einer weiteren Kooperationsstudie zwischen der JGU und dem IMB im Rahmen von GenEvo konnte Postdoktorandin Juliane Hartke zeigen, dass die Anwesenheit des Bandwurms nicht nur die Genregulation an sich beeinflusst, sondern auch, wie sich dies in einer Verschiebung der Proteinzusammensetzung der Hämolymphe, also des „Blutes“ der Ameisen, niederschlägt. So ist zum Beispiel das oben erwähnte Protein des Gens *Vitellogenin-like A*, das für Brutpflegeverhalten zuständig ist, in infizierten Ameisen deutlich häufiger vorhanden als bei ihren nicht-infizierten Kolleginnen. Ihr Lieblingsort im Nest ist deswegen wenig überraschend: direkt neben der Brut. Brutpflege betreiben

ABB. 3 | LEBENSZYKLUS DES BANDWURMS *ANOMOTAENIA BREVIS*


***A. brevis* nutzt die Ameise *Temnothorax nylanderi* als Zwischenwirt. Infizierte Tiere haben eine gelbliche Kutikula und sind inaktiv, leben aber deutlich länger. Proteomanalysen zeigen, dass sieben Prozent der Proteine in der Hämolymphe der infizierten Ameisen vom Bandwurm stammen und teilweise Antioxidanzien sind. Das Vulkandiagramm auf der rechten Seite zeigt die Unterschiede in der festgestellten Menge der Proteine in der Hämolymphe der Ameisen. Auf der horizontalen Achse werden die logarithmierten Expressionsveränderungen gezeigt, die den Unterschied in der Menge der Proteine zwischen infizierten und gesunden Ameisen repräsentieren. Die vertikale Achse zeigt den negativen dekadischen Logarithmus des p-Werts an, der die statistische Signifikanz der Unterschiede in der Menge der Proteine quantifiziert.**

sie allerdings nicht, da sie generell eine geringe Aktivität zeigen. Doch die Anwesenheit des Bandwurms beeinflusst nicht nur ameisen-eigene Proteine: Wir konnten zeigen, dass Bandwurmproteine auch direkt in die Ameise abgegeben werden, ja dass sieben Prozent aller Eiweiße in der Ameisenhämolymphe parasitischen Ursprungs sind. Diese Proteine sind zum Teil wieder Antioxidantien mit Anti-Aging-Funktionen. Ein anderes Protein hat genregulatorische Aufgaben und greift in die Histonmodifizierungen ein. Ein Großteil der gefundenen Bandwurmproteine ist jedoch der Wissenschaft gänzlich unbekannt und diesen Proteinen konnten bisher keine spezifischen Funktionen zugeordnet werden [13]. Dies deutet darauf hin, dass diese in der Evolution neu entstanden sind oder sich aus bekannten Proteinen stark weiterentwickelt haben – vielleicht um spezifische Rollen in der Manipulation des Wirtes zu übernehmen. Um Licht in ihre Herkunft und Funktion zu bekommen, sind wir auf der einen Seite gerade dabei, das Genom des Bandwurms zu entschlüsseln und auf der anderen Seite versuchen wir, mittels RNAi spezifische Gene in der Bandwurmlarve in der Ameise zu inaktivieren, um dann zu untersuchen, wie sich die Genaktivität der Ameise verändert. Es bleibt also spannend.

Nutzen der Grundlagenforschung für die Gesellschaft

Doch wieso erforschen wir die Genregulation von Ameisen? Im Rahmen des DFG geförderten Graduiertenkollegs GenEvo forschen 40 Doktorandinnen und Doktoranden an verschiedenen Organismen von Fadenwürmern bis hin zum Menschen zu verschiedensten Aspekten der Genregulation in der Evolution. Da geht es darum, wie sich diese regulatorischen Prozesse in der Evolution verändern, aber auch welche Rolle Genregulation in evolutiven Anpassungen hat. Dadurch, dass sich viele Teilaspekte nur an bestimmten Organismen erforschen lassen, bilden wir ein großes Spektrum des Tierreichs ab – von sehr simplen Organismen wie *Caenorhabditis elegans* über Ostblindmäuse bis hin zum Menschen. Durch unsere Interdisziplinarität können wir zugrundeliegende Mechanismen und die Rolle der Genregulation in der Entstehung der Vielfalt, die wir heute beobachten, besser verstehen. Genregulation ist natürlich nicht nur in der Arbeitsteilung von sozialen Insekten von Bedeutung, sondern lässt sich in jedem Lebewesen finden. Genutzt wird sie überall dort, wo sich Organismen flexibel an ihre Umwelt anpassen oder Krankheitserreger bekämpfen

müssen, spezielle Nahrungsquellen erschließen und vieles mehr. Erkenntnisse aus der Erforschung der Genregulation finden vielfältig Anwendung und sind für den Menschen von großer Bedeutung – so z. B. in der Medizin wie etwa in der Krebstherapie und bei der Untersuchung von Immunantworten auf Krankheitserreger.

LESE-TIPP:



Zusammenfassung

Genregulation spielt eine entscheidende Rolle für evolutive Anpassungsprozesse. Epigenetische Regulatoren steuern nicht nur die Entwicklung von mehrzelligen Organismen, sondern erlauben es ihnen auch, als Reaktion auf Umweltfaktoren unterschiedliche Merkmale oder Phänotypen auszuprägern. Soziale Insekten – besonders Ameisen – könnten dabei als Modell für diese phänotypische Plastizität dienen. So unterscheiden sich Königinnen und Arbeiterinnen zwar meist nicht in ihrem Genotyp, aber in ihrer Genexpression, die im Laufe ihrer Entwicklung zu unterschiedlicher Morphologie, Physiologie, Verhalten und Lebensspanne führt. Die Genregulation, also das An- und Ausschalten von Genen, hat dabei eine wichtige Bedeutung nicht nur für die Kastendifferenzierung, sondern auch bei der vielfältigen Arbeitsteilung in Ameisenstaaten. Ameisen sind soziale Insekten, in deren Kolonien sich Königin und Arbeiterinnen verschiedene Aufgaben wie Fortpflanzung, Brutpflege, Nestbau und Futtersuche aufteilen. Histonmodifikationen, DNA-Methylierung und nicht-kodierende RNAs sind dabei wichtige Regulatoren der Genexpression. Die Aktivität von Kandidatengenen wie das Brutpflegegen *Vitellogenin-like-A* oder auch Genen für Geruchsrezeptoren steuert dabei die Verhaltensspezialisierung von Arbeiterinnen. Diese können via RNAi in ihrer Aktivität verändert werden, wodurch ihre Funktion in der Regulierung der Arbeitsteilung experimentell überprüft werden kann. Auch Parasiten können die Genexpression und den Phänotyp von Ameisen beeinflussen. So führt eine Infektion durch einen Bandwurm zu einer Lebensverlängerung bei einer einheimischen Ameisenart. Die Larve dieses Bandwurms – dessen manipulative Funktionen derzeit erforscht werden – gibt Eiweißstoffe in seinen Ameisenwirt ab. Die hier beschriebene Forschung findet im Rahmen des interdisziplinären DFG-Graduiertenkollegs 2526 GenEvo statt, welches die Rolle der Genregulation in der Evolution und die Evolution der regulatorischen Prozesse selbst erforscht.

Summary

The role of gene regulation in the plasticity of behaviour and longevity: Ants – a success model of evolution

Gene regulation plays a crucial role in evolutionary adaptation processes. Epigenetic regulators not only control the development of multicellular organisms, but also allow them to express different traits or phenotypes in response to environmental factors. Social insects, especially ants, could serve as a model for this phenotypic plasticity. For example, while queens and workers usually do not differ in

genotype, they vary in gene expression, which leads to different morphology, physiology, behaviour, and lifespan over the course of their development. Gene regulation, i. e. the switching on and off of genes, has an important significance not only for caste differentiation, but also in the diverse division of labour in ant colonies. Ants are social insects in whose colonies the queen and workers divide up various tasks such as reproduction, brood care, nest building, and foraging. Histone modifications, DNA methylation, and non-coding RNAs are important regulators of gene expression. The activity of candidate genes, such as the brood care gene *vitellogenin-like A* or genes for odorant receptors, control the behavioural specialization of workers. Their activity can be altered by RNAi and thus their function in regulating the division of labour can be experimentally tested. Parasites can also influence gene expression and the phenotype of ants. For example, the infection by a tapeworm leads to life extension in a native ant species. The larva of this tapeworm – the manipulative functions of which are currently being explored – releases proteins into its ant host. The research work described here takes place as part of the interdisciplinary DFG Research Training Group 2526 GenEvo, which investigates the role of gene regulation in evolution and the evolution of regulatory processes themselves.

Schlagerworte:

Genregulation, Epigenetik, phänotypische Plastizität, Evolution, soziale Insekten.

Literatur

- [1] B. Hölldobler, E. O. Wilson (1990). "The Ants" Springer, Berlin.
- [2] S. Foitzik, O. Fritzsche (2021). *Empire of Ants: The Hidden Worlds and Extraordinary Lives of Earth's Tiny Conquerors*. The Experiment, New York, USA.
- [3] P. Schultheiss et al. (2022). The abundance, biomass, and distribution of ants on Earth. *PNAS* 119, e2201550119.
- [4] C. Buccitelli, M. Selbach (2020). mRNAs, proteins and the emerging principles of gene expression control. *Nat Rev Genet* 21, 630–644.
- [5] R. Libbrecht et al. (2020). A role of histone acetylation in the regulation of circadian rhythm in ants. *iScience* 23, 100846.
- [6] P. Kohlmeier et al. (2023). Histone acetyltransferases and external demands influence task switching in *Temnothorax* ants. *Biology Letters*, doi: 10.1098/rsbl.2023.0176.
- [7] P. Kohlmeier et al. (2018). *Vitellogenin-like A*-associated shifts in social cue responsiveness regulate behavioral task specialization in an ant. *PLoS Biol* 16, e2005747.
- [8] M. A. Caminer et al. (2023). Task-specific odorant receptor expression in worker antennae indicates that sensory filters regulate division of labor in ants. *Communications Biology*, im Druck.
- [9] V. Majidifar et al. (2022). Ontogeny of superorganisms: Social control of queen specialization in ants. *bioRxiv*. 2022.03.08.483434.
- [10] S. Beros et al. (2021). Extreme lifespan extension in tapeworm-infected ant workers. *R. Soc. Open Sci.* 8, 202118.
- [11] T. Sistermans et al. (2023). The influence of parasite load on transcriptional activity and morphology of a cestode and its ant intermediate host. *Molecular Ecology* 32, 14412–4426.

- [12] M. Stoldt et al. (2021). Parasite presence induces gene expression changes in an ant host related to immunity and longevity. *Genes* 12, 95.
- [13] J. Hartke et al. (2023). Long live the host! Proteomic analysis reveals possible strategies for parasitic manipulation of its social host. *Molecular Ecology*, im Druck.
- [14] C. Claudianos et al. (2014). Odor memories regulate olfactory receptor expression in the sensory periphery. *Eur J Neurosci.* 39(10), 1642–54.
- [15] E. Jongepier et al. (2022). Convergent loss of chemoreceptors across independent origins of slave-making in ants. *Molecular Biology and Evolution* 7, 39.

Verfasst von:



Juliane Hartke studierte Biologie in Osnabrück und Mainz und promovierte 2019 am Senckenberg Biodiversität und Klima Forschungszentrum in Frankfurt und Mainz zur Speziation tropischer Ameisenarten. Nach einer Postdoktorandenzeit am Institut für Tropische Medizin in Antwerpen, Belgien, wechselt sie in die Arbeitsgruppe von Susanne Foitzik als Postdoktorandin. Sie interessiert sich besonders für die Evolution und die molekulare Interaktion von Parasiten mit ihren Wirten, neben Ameisen insbesondere auch von Stechmücken.



Susanne Foitzik studierte Biologie in Würzburg und Albany und promovierte im Würzburg 1998 zum Verhalten und zur Evolution von Ameisen. Nach einer zweijährigen Post-Doc-Forschung an der Colorado State University, war sie wissenschaftliche Assistentin an der Universität Regensburg und von 2004-2010 Professorin für Verhaltensökologie an der LMU in München. Seit 2010 leitet sie den Lehrstuhl für Verhaltensökologie und soziale Evolution an der Johannes-Gutenberg-Universität in Mainz. Sie erforscht die Evolution und molekulare Regulation des Sozialverhaltens, der Arbeitsteilung und des Alterns in sozialen Insektenstaaten. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf dem Einfluss und der Interaktion von (Sozial)-Parasiten mit ihren Wirten. Ihre Forschungsergebnisse wurden in über 130 wissenschaftlichen Veröffentlichungen publiziert. Susanne Foitzik ist Sprecherin des durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft finanzierten Graduiertenkollegs GenEvo: Genregulation in der Evolution.

Korrespondenz

Prof. Dr. Susanne Foitzik
Institut für Organismische und Molekulare Evolution
Johannes Gutenberg Universität Mainz
Biozentrum, Hanns Dieter-Hüsch-Weg 15
55128 Mainz
E-mail: foitzik@uni-mainz.de



Verband | Biologie, Biowissenschaften
& Biomedizin in Deutschland

Berufsfelder Biologie – hier gibt es den Überblick

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

Perspektiven – Berufsbilder von und für Biologen und Biowissenschaftler

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



www.vbio.de

PERSPEKTIVEN BERUFSFELD BIOLOGIE





**Pflanzliche
Milchalterna-
tiven auf Hafer-,
Buchweizen-,
Mandel-, Soja-
und Reisbasis.**
Foto: iStock.com/
MurzikNata.

Produktion, Nachhaltigkeit und Akzeptanz

Pflanzliche Milchalternativen

LENA SZCZEPANSKI | GESA OSTERMANN | FLORIAN FIEBELKORN

Die Produktion und der Konsum von Milch tragen in einem erheblichen Maße zu den derzeitigen Umweltproblemen bei. Trotz des global hohen Konsums von Kuhmilch ist die Nachfrage nach pflanzlichen Milchalternativen in den letzten Jahren rasant gestiegen. Stellen pflanzliche Alternativen in diesem Zusammenhang eine potenziell nachhaltige Alternative zur Kuhmilch dar? Der Artikel geht dieser Frage nach und gibt einen Überblick über das Produktionsverfahren von pflanzlichen Milchalternativen, ihre Nachhaltigkeit sowie ihren Nährwerten im Vergleich zur Kuhmilch. Außerdem wird die aktuelle Marktentwicklung von pflanzlichen Milchalternativen auf der Welt, in Europa und in Deutschland näher beleuchtet. Darüber hinaus wird ein Einblick gegeben, wie es um ihre Akzeptanz bei den Konsumenten steht. Zusätzlich erfolgt ein Ausblick auf die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Milchalternativen – die Herstellung neuer Milchalternativen durch Präzisionsfermentation.

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 359 erklärt.

Die derzeitigen Umweltprobleme wie der Klimawandel und der Biodiversitätsverlust werden zu erheblichen Teilen durch die Produktion unserer Nahrungsmittel verursacht. Hierbei trägt insbesondere die industrielle Nutztierhaltung zu den derzeitigen Umweltproblemen bei [1, 2, 3S]. Sie ist für 80 Prozent der anthropogenen Treibhausgase des Agrarsektors verantwortlich, die wiederum 9 Prozent der globalen CO₂-Emissionen und 40 Prozent der globalen Methanemissionen ausmachen [3S, 4S]. Weiterhin beansprucht die Haltung der Nutztiere etwa 70 bis 80 Prozent der globalen landwirtschaftlichen Nutzflächen. Diese werden sowohl für die Haltung der Nutztiere auf Grasland und Weiden als auch für den Anbau von Futtermitteln benötigt [1, 2, 5S]. Hinzukommend fällt der Großteil des globalen Wasserverbrauchs auf die Nutztierhaltung zurück [2, 6S].

Trotz der geschilderten Umweltbelastungen ist die Nutztierhaltung – insbesondere die Milchviehhaltung – in Deutschland einer der wichtigsten Produktionszweige der Landwirtschaft. Mit rund 3,9 Millionen Milchkühen und rund 33,2 Millionen Tonnen produzierter Kuhmilch war Deutschland im Jahr 2021 der größte Milcherzeuger in der Europäischen Union [7S–9S]. Während in Deutschland eine rückläufige Tendenz des Pro-Kopf-Konsums von ▶ Konsummilch zu verzeichnen ist und im Jahr 2021 der niedrigste Konsumwert seit 2001 erreicht wurde, verläuft der Trend weltweit in die entgegengesetzte Richtung [10S, 11, 12S–14S, 15]. So haben beispielweise die Menschen in Deutschland im Jahr 2021 durchschnittlich 47,3 Liter Konsummilch pro Kopf konsumiert [11], während welt-

weit der durchschnittliche Konsum im Jahr 2021 bei 113,4 Litern Konsummilch lag [15] (Abbildung 1).

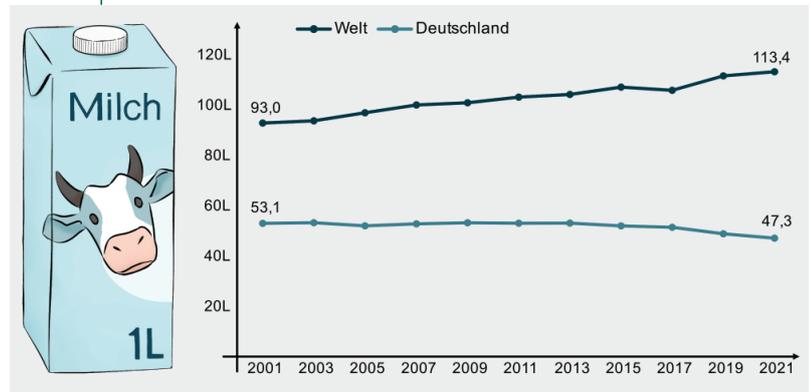
Weltweit ist der Pro-Kopf-Milchkonsum seit Jahren auf einem konstant hohen Niveau und soll nach Prognosen mit dem Anstieg der Weltbevölkerung sowie dem Pro-Kopf-Einkommen weiterhin zunehmen [11, 13S, 14S, 15]. Tritt dieser Fall ein, würden die Umweltauswirkungen der Nutztierhaltung zu einer massiven Überschreitung der planetaren Belastungsgrenzen führen [1, 14S, 16, 17S, 18S]. Es besteht daher die Notwendigkeit einer Umstrukturierung des Agrar- und Ernährungssystems – inklusive unserer Ernährungsgewohnheiten – mit dem Ziel einer nachhaltigeren Produktion unserer Nahrungsmittel. Um diese Umstrukturierung zu erreichen, hat die EAT-Lancet-Kommission die *Planetary Health Diet* als Strategie für Landwirtschaft und Ernährung entwickelt [16, 17S, 19S]. Nach der *Planetary Health Diet* ist unter anderem eine grundlegende Veränderung unserer Ernährungsweise notwendig. Demnach sollte die typischerweise fleisch- und milchproduktreiche Ernährung der westlichen Gesellschaft auf eine überwiegend pflanzliche und auf alternativen, nachhaltigeren Proteinquellen basierende Ernährung umgestellt werden [16, 17S, 19S]. In diesem Zusammenhang stellen pflanzliche Milchalternativen eine potenziell nachhaltigere Alternative zur Kuhmilch dar.

Das Interesse an pflanzlichen Alternativen zur Kuhmilch ist in den vergangenen Jahren – insbesondere in Deutschland – angestiegen. Dies spiegelt sich in Deutschland beispielsweise im sinkenden Pro-Kopf-Milchkonsum [11, 12S] und einem gleichzeitig steigenden Trend zum Konsum pflanzlicher Milchalternativen wider [12S, 15]. So hat sich der Umsatz von pflanzlichen Milchalternativen in Deutschland von 0,17 Milliarden Euro im Jahr 2018 auf 0,35 Milliarden Euro im Jahr 2020 etwa verdoppelt [15]. Auch in Europa und auf globaler Ebene zeichnet sich ein Wachstum des Marktes für pflanzliche Milchalternativen ab [20–22].

Wie sind pflanzliche Milchalternativen definiert?

Pflanzliche Milchalternativen sind Suspensionen aus Wasser und zerkleinerten sowie gelösten Pflanzenmaterialien [23–25]. Man unterscheidet allgemein zwischen pflanzlichen Milchalternativen auf Basis von Getreide, Hülsenfrüchten, Nüssen, Ölsamen und Pseudogetreide [23, 25, 26, 27S, 28] (Abbildung 2). Pflanzliche Milchalternativen wie Hafer-, Soja- oder Mandeldrinks ähneln der Kuhmilch in ihrer Optik, ihren sensorischen Eigenschaften und ihren Verwendungsmöglichkeiten. Allerdings muss beachtet werden, dass die Eigenschaften der Pflanzendrinks vom jeweiligen pflanzlichen Rohstoff und ihrer Verarbeitung abhängen [23–25, 28]. In Europa werden am häufigsten Pflanzendrinks auf Hafer-, Mandel- und Sojabasis konsumiert, gefolgt von Pflanzendrinks auf Kokosnuss- und Reisbasis [1, 29, 30]. Auch in Deutschland wird überwiegend auf Pflanzendrinks auf Haferbasis zurückgegriffen, gefolgt von Mandel-, Soja-, Kokos- und Reisdrinks [15] (Abbildung 3).

ABB. 1 | PRO-KOPF-MILCHKONSUM



Dargestellt ist der durchschnittliche Pro-Kopf-Milchkonsum auf der Welt und in Deutschland in den Jahren 2001 bis 2021. Daten adaptiert aus Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) [11] und Statista [15, S. 41].

Wenn pflanzliche Milchalternativen der Kuhmilch in ihrer Optik, ihren sensorischen Eigenschaften und ihren Anwendungsmöglichkeiten ähneln, leitet sich die Frage ab, ob diese auch als „Milch“ bezeichnet werden dürfen.

Rechtliche Rahmenbedingungen zur Nomenklatur von pflanzlichen Milchalternativen

In Europa ist die Verwendung des Begriffs „Milch“ gesetzlich geschützt. Gemäß der Verordnung Nr. 605/2010 der Europäischen Kommission können „[...] Rohmilch und daraus hergestellte Erzeugnisse nur von Kühen, Schafen, Ziegen oder Büffeln gewonnen werden [...]“ [31S, S. 2]. Laut der Verordnung Nr. 1308/2013 des Europäischen Parlaments und des Europäischen Rates darf nur das „[...] durch ein- oder mehrmaliges Melken gewonnene[s] Erzeugnis der normalen Eutersekretion, ohne jeglichen Zusatz oder Entzug [...]“ [32, S. 146] als Milch bezeichnet werden. Demnach dürfen Alternativen auf pflanzlicher Basis in Europa nicht als „Milch“ bezeichnet werden. Die Verordnung gilt für Etiketten, Handelsdokumente, Werbung und Aufmachungen aller Art [32] (siehe dazu auch Kasten „Zukünftige Entwicklung zur Bezeichnung von pflanzlichen Milchalternativen“).

Einen detaillierten Einblick in die Planetary Health Diet erhalten Sie unter <https://www.bzfe.de/nachhaltiger-konsum/lagern-kochen-essen-teilen/planetary-health-diet/>.

IN KÜRZE

- Die **Herstellung** ausgewählter Pflanzendrinks ist im Vergleich mit der Herstellung von Kuhmilch in **vielen Aspekten nachhaltiger**.
- **Pflanzendrinks** weisen basierend auf ihrem jeweiligen Rohstoff **ein einzigartiges Nährstoffprofil** mit einer großen Spannweite an Makro- und Mikronährstoffen auf.
- Die häufigsten **Gründe** für den Konsum von Pflanzendrinks sind: „**Gesundheit**“, „**Nachhaltigkeit**“ und „**Tierschutz**“.
- Pflanzendrinks sind das **am häufigsten verkaufte vegane Alternativprodukt** in Europa.
- Neben tierischer Milch und pflanzlichen Milchalternativen werden **zukünftig auch Milchalternativen auf Basis von Präzisionsfermentation** auf dem Markt verfügbar sein.

ABB. 2 | ROHSTOFFE ZUR HERSTELLUNG VON PFLANZENDRINKS

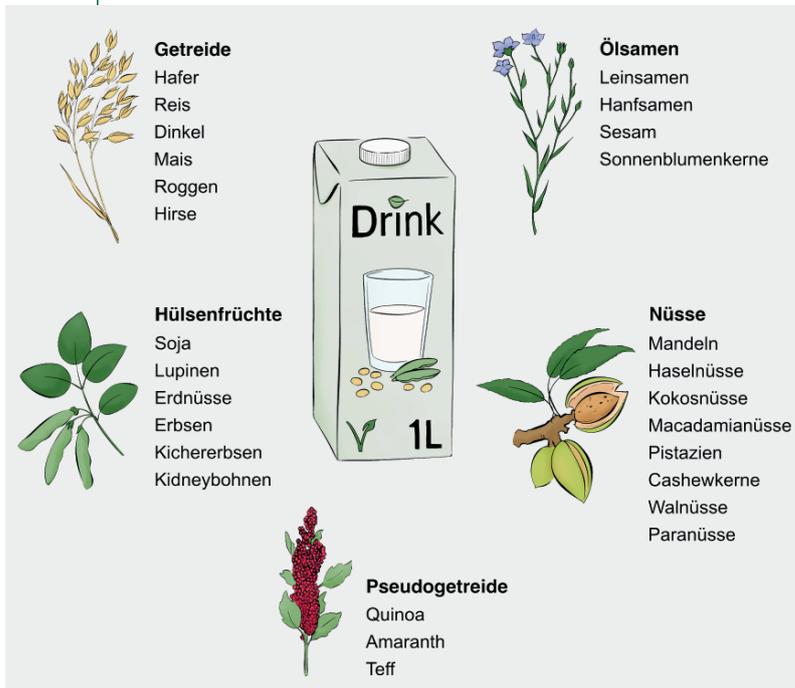
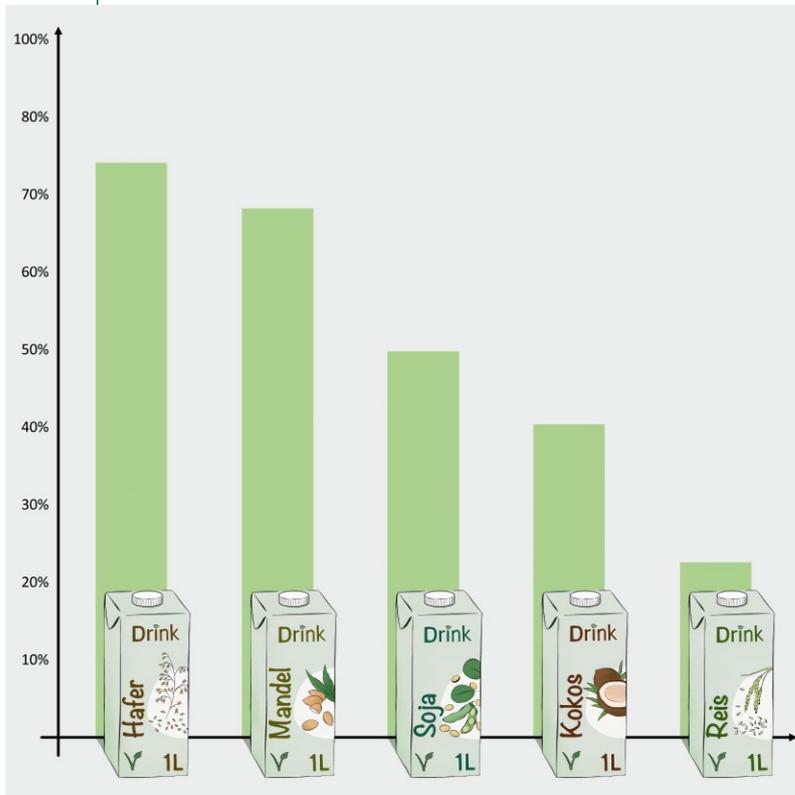


ABB. 3 | BELIEBTHEIT PFLANZLICHER MILCHALTERNATIVEN



Auf welche Milchalternativen greift die deutsche Bevölkerung zurück? Ergebnisse einer Umfrage zu den beliebtesten Milchalternativen in Deutschland im Jahr 2021. Angegeben ist die Verwendung von Hafer-, Mandel-, Soja-, Kokos-, und Reisdrink als Alternative zur Milch. Mehrfachnennungen waren möglich. Daten adaptiert aus Statista [15, S. 13].

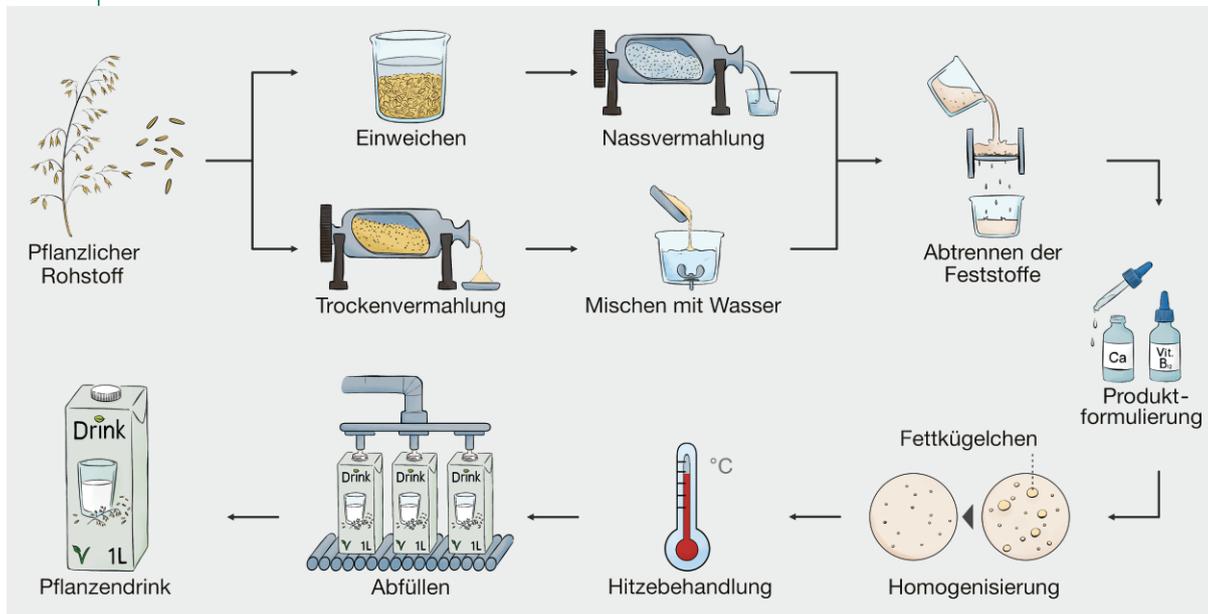
Herstellung von Pflanzendrinks

Die beiden grundlegenden Zutaten von Pflanzendrinks sind der jeweilige pflanzliche Rohstoff und Wasser. Auch wenn sich die Herstellungsverfahren abhängig vom jeweiligen Rohstoff leicht voneinander unterscheiden, ist das Grundprinzip bei allen sehr ähnlich (Abbildung 4). Die sieben Grundschritte vom pflanzlichen Rohstoff bis zum fertigen Pflanzendrink sind: (1) Einweichen oder Trockenvermahlung, (2) Nassvermahlung oder Mischen mit Wasser, (3) Abtrennen von Feststoffen, (4) Produktformulierung, (5) Homogenisierung, (6) Hitzebehandlung, (7) Abfüllen [24, 25].

Pflanzliche Rohstoffe – beispielsweise verschiedene Getreide-, Hülsenfrucht-, Nuss-, Ölsamen- oder Pseudogetreidearten – sind die Grundlage für die Herstellung von Pflanzendrinks. Um die Nährstoffe wie Kohlenhydrate, Proteine und Fette aus dem jeweiligen pflanzlichen Rohstoff zu extrahieren, wird der pflanzliche Rohstoff im ersten Herstellungsschritt in Wasser eingeweicht und anschließend nass vermahlen (Nassverfahren). Alternativ zum Nassverfahren ist es möglich, den pflanzlichen Rohstoff trocken zu vermahlen und das so entstandene Mehl für die Extraktion der pflanzlichen Bestandteile mit Wasser zu mischen (Trockenverfahren). Es entsteht eine Suspension aus Wasser und dem Mehl des pflanzlichen Rohstoffs, die nachfolgend weiterverarbeitet wird. So werden im nächsten Herstellungsschritt die groben pflanzlichen Feststoffe durch Filtrieren, Dekantieren oder Zentrifugieren von der entstandenen Suspension abgetrennt. Der Suspension aus Wasser und Pflanzenextrakten können im nächsten Herstellungsschritt zur Formulierung des Produktes weitere Zutaten zugefügt werden. Dabei handelt es sich um Zutaten wie Öle, Salz, Zucker bzw. Süßstoffe, Aromen oder Farbstoffe, die zu einer Verbesserung der Konsistenz und/oder des Geschmacks beitragen sollen. Um die Konsistenz und Stabilität des Pflanzendrinks zu optimieren, können außerdem Emulgatoren und Stabilisatoren hinzugefügt werden. Da die Nährwerte von pflanzlichen Milchalternativen nicht äquivalent zu denen der Kuhmilch sind, reichern einige Hersteller ihre Pflanzendrinks zudem mit Mikronährstoffen wie Mineralstoffen oder Vitaminen an.

Um aus dem Gemisch aus Wasser, Pflanzenextrakten und weiteren Zutaten eine homogene und stabile Emulsion herzustellen, folgt im nächsten Herstellungsschritt die Homogenisierung. Dabei werden vorhandene wasserunlösliche Partikel wie Stärke, Fasern und andere Zellmaterialien sowie Lipidtröpfchen unter hohem Druck aufgebrochen, wodurch ihre Partikelgröße verringert und deren Verteilung erhöht wird. Nach der Homogenisierung wird der Pflanzendrink einer Hitzebehandlung unterzogen. Als Hitzebehandlungsverfahren wird das ► Pasteurisieren oder eine ► Ultrahochtemperatur-Behandlung (engl. *ultra-high-temperature processing*, *UHT processing*) angewandt. Beide Verfahren tragen zur Konservierung und somit zur Verlängerung der Haltbarkeit des Pflanzendrinks bei, indem die Anzahl an Mikroorganismen in der Suspen-

ABB. 4 | SCHEMATISCHE ÜBERSICHT DER HERSTELLUNG VON PFLANZENDRINKS



Durch die Hitzebehandlung im Herstellungsprozess kann es zu Nährstoffverlusten kommen. Deswegen kommt es oftmals erst nach der Hitzebehandlung zur Supplementierung der Pflanzendrinks mit zusätzlichen Nährstoffen wie Vitaminen [24, 25].

sion reduziert und Enzyme inaktiviert werden. Hierbei gilt zu beachten, dass eine erhöhte Temperatur im Rahmen der Hitzebehandlung zur Denaturierung der Proteinstrukturen und damit zur Beeinträchtigung der Stabilität führen kann. Außerdem kann es durch die Hitzebehandlung zu Veränderungen im Geschmack und in der Optik des Pflanzendrinks kommen. Nach der Hitzebehandlung werden die Pflanzendrinks für den Vertrieb oder die Lagerung abgefüllt und verpackt. Pflanzendrinks werden üblicherweise in Kartonsystemen (Mehrschichtkartons, z. B. Tetra Pak®) oder Kunststoffflaschen verpackt [24, 25].

Nachhaltigkeitsvergleich von Pflanzendrinks und Kuhmilch

Um zu beurteilen, inwieweit die Herstellung von Pflanzendrinks nachhaltiger als die Herstellung von Kuhmilch ist, können verschiedene Nachhaltigkeitsindikatoren betrachtet werden [34]. Diesbezüglich werden häufig Treibhausgasemissionen, Flächenverbrauch, Wasserverbrauch, Energieverbrauch, Eutrophierungs-, Versauerungs- und photochemisches Ozonabbaupotenzial betrachtet [35]. Für Pflanzendrinks liegen im Vergleich zur Kuhmilch bislang nur wenige Daten zu den eben genannten Nachhaltigkeitsindikatoren vor [1, 34]. Außerdem sollte berücksichtigt werden, dass die Angaben zu den ausgewählten Nachhaltigkeitsindikatoren in Abhängigkeit vom Herstellungsverfahren sowie der Pflanzendrink- und Milchsorte stark schwanken können. Nachfolgend werden zur Beurteilung der Nachhaltigkeit die Indikatoren Treibhausgasemissionen, Flächenverbrauch und Wasserverbrauch für die Herstellung von Pflanzendrinks und Kuhmilch betrachtet. Spezifischer wird die Herstellung der drei in Europa und Deutschland am häufigsten konsumierten Pflanzendrinks Soja-, Mandel- und Haferdrink mit der Herstellung von

Kuhmilch verglichen [1, 2, 15, 29, 30] (Abbildung 5, Tabelle 1). Wenn nicht anders angegeben, wird sich zum einen auf die umfassende ► Lebenszyklusanalyse (engl. *life cycle assessment*, LCA) von Poore und Nemecek [2] und zum anderen auf die derzeit aktuellste Lebenszyklusanalyse von Geburt et al. [1] bezogen.

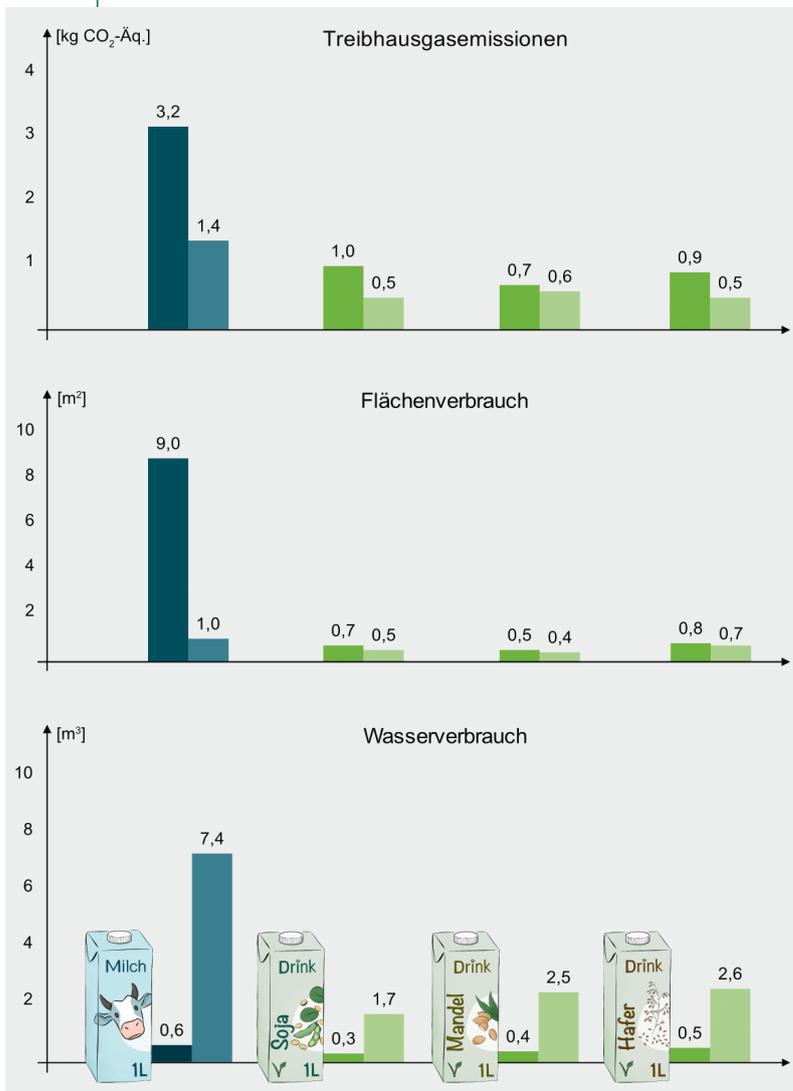
Bei der Herstellung von Kuhmilch wird verglichen mit der Herstellung eines Soja-, Mandel- und Haferdrinks etwa die dreifache Menge an Treibhausgasen emittiert [1, 2]. Dieser Unterschied ist vor allem auf die hohen Methanemissionen aus der Darmgärung der Wiederkäuer zurückzuführen [1]. Unter den Pflanzendrinks schwanken die Werte für die Treibhausgasemissionen in Abhängigkeit von der Lebenszyklusanalyse [1, 2]. Während bei Geburt et al. [1] die Herstellung eines Mandeldrinks verglichen mit der Herstellung eines Hafer- und Sojadrinks die höchsten Emissionen aufweist, gilt dies bei Poore und Nemecek [2] für die Herstellung eines Sojadrinks (Abbildung 5, Tabelle 1). Die schwankenden Werte für die Treibhausgas-

Auch wenn unter dem Begriff „Herstellung“ streng genommen ausschließlich die technologischen Verarbeitungsschritte verstanden werden, beziehen wir uns im Text und den Abbildungen auch auf die landwirtschaftliche Produktion der Rohstoffe sowie die Tierhaltung.

KASTEN: ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG ZUR BEZEICHNUNG VON PFLANZLICHEN MILCHALTERNATIVEN

Weil die Gesetzeslage in Europa vorschreibt, dass pflanzliche Milchalternativen nicht als „Milch“ bezeichnet werden dürfen, werden diese im deutschen Einzelhandel oft unter der Nennung der Rohstoffbasis und dem Zusatz „Drink“ bzw. „Getränk“ vermarktet, also z. B. „Mandeldrink“ oder „Mandelgetränk“ [28]. Im Gegensatz zu Europa ist in Nordamerika die Verwendung des Begriffs „Milch“ für Pflanzendrinks weniger umstritten, so z. B. auch in den Vereinigten Staaten von Amerika. Dort werden Pflanzendrinks wie Soja- oder Mandeldrinks weiterhin als „Milch“, also Mandel- oder Sojamilch, bezeichnet. Derzeit prüft die Food and Drug Administration (FDA), ob Hersteller den Begriff „Milch“ für pflanzliche Milchalternativen verwenden dürfen. Im Laufe des Jahres 2023 wird die Veröffentlichung von Leitlinien zur Kennzeichnung von pflanzlichen Milchalternativen erwartet [28, 335].

ABB. 5 | NACHHALTIGKEIT VON KUHMITCH UND PFLANZENDRINKS



Gezeigt sind ausgewählte Nachhaltigkeitsindikatoren für die Herstellung von Kuhmilch und Pflanzendrinks (Soja-, Mandel- sowie Haferdrink).

Daten adaptiert aus Geburt et al. [1] für je 1 Liter Kuhmilch, Soja-, Mandel- und Haferdrink (hellblaue bzw. -grüne Balken) und Poore und Nemecek [2] für je 1 Liter Kuhmilch, Soja-, Mandel- und Haferdrink (dunkelblaue bzw. -grüne Balken).

Anmerkungen zu den Daten von Geburt et al. [1]: Die Daten beziehen sich auf die Herstellung von je 1 Liter Kuhmilch, Soja-, Mandel- und Haferdrink. Die Daten für die Kuhmilch beziehen sich auf Kuhmilch hergestellt in der Schweiz mit 3,5% Fett- und 3,3% Proteingehalt. Geburt et al. [1] geben in ihrer LCA-Analyse sowohl Werte für Bio-Sojadrinks als auch für konventionelle Sojadrinks an (siehe Tab. 1). In dieser Abbildung wird sich für eine bessere Übersichtlichkeit nur auf den konventionellen Sojadrink bezogen. Die Daten für den konventionellen Sojadrink (konv.) beziehen sich auf Sojadrinks hergestellt in Brasilien, den USA und der Schweiz mit einem Anteil von 12,5% Soja. Die Daten für den Mandeldrink beziehen sich auf einen Mandeldrink hergestellt in den USA mit einem Anteil von 13,1% Mandeln. Die Daten für den Haferdrink beziehen sich auf einen Haferdrink hergestellt in der Schweiz mit einem Anteil von 12,4% Hafer.

Anmerkungen zu den Daten aus [2]: Die Angaben zur Kuhmilch beziehen sich auf 1 Liter pasteurisierte Milch mit 4% Fett- und 3,3% Proteingehalt. Die Angaben zum Sojadrink beziehen sich auf 1 Liter Sojadrink mit ca. 3,3% Proteingehalt. Zum Proteingehalt im Mandel- und Haferdrink sind keine Angaben vorhanden.

emissionen bei der Herstellung eines Soja-, Mandel- und Haferdrinks lassen sich durch die verschiedenen Anbaumethoden der entsprechenden Rohstoffe erklären. Außerdem spielt die Verpackung der pflanzlichen Milchalternativen eine große Rolle, da rund 25 Prozent der Treibhausgasemissionen auf die Verpackung zurückfallen. Weitere 9 Prozent sind auf den Transport zurückzuführen [1].

Betrachtet man den Indikator Flächenverbrauch, benötigt die Herstellung von Kuhmilch deutlich mehr Fläche im Vergleich zur Herstellung eines Soja-, Mandel- und Haferdrinks [1, 2]. Dieser Unterschied ist bedingt durch den Anbau von Futtermittel und die Aufzucht von Kälbern bei der Produktion von Kuhmilch [1]. Unter den Pflanzendrinks wird für die Herstellung eines Haferdrinks die meiste Fläche benötigt, für die Herstellung eines Mandeldrinks dagegen die geringste [1, 2]. Die Herstellung eines Mandeldrinks benötigt vermutlich deshalb am wenigsten Fläche, weil durch die Mandelbäume der vertikale Raum über derselben Fläche besser genutzt werden kann [1].

Auch bei dem Indikator Wasserverbrauch lässt sich zusammenfassen, dass die Herstellung von Kuhmilch mehr Wasser benötigt als die Herstellung eines Soja-, Mandel- und Haferdrinks [1, 2]. Die neuste Lebenszyklusanalyse zeigt, dass die Herstellung von Kuhmilch verglichen mit der Herstellung eines Soja-, Mandel- oder Haferdrinks die drei- bis vierfache Menge an Wasser benötigt [1]. Unter den Pflanzendrinks verbraucht die Herstellung eines Haferdrinks am meisten Wasser, gefolgt von der Herstellung eines Mandel- und Sojadrinks [1, 2].

Nährstoffvergleich von Pflanzendrinks und Kuhmilch

Bei der Beurteilung der Nachhaltigkeit von Pflanzendrinks werden weitere Faktoren wie die Nährstoffzusammensetzung berücksichtigt, um die Gesundheit von Pflanzendrinks im Vergleich zu Kuhmilch zu bewerten. Pflanzendrinks haben in Abhängigkeit vom Rohstoff sowie der Herstellungsmethode ein sehr spezifisches Nährstoffprofil, wodurch die Makro- und Mikronährstoffe der Pflanzendrinks stark variieren können. Im Vergleich zu Kuhmilch liegen für die Nährstoffzusammensetzung von Pflanzendrinks zudem weniger Informationen vor. Auf der Grundlage bestehender Daten wird nachfolgend der Energiegehalt und der Gehalt ausgewählter Makro- sowie Mikronährstoffe der drei in Europa und Deutschland am häufigsten konsumierten Pflanzendrinks (Soja-, Mandel- und Haferdrink) mit denen von Kuhmilch verglichen [1, 15, 28–30, 36] (Tabelle 2 und 3).

Während der Energiegehalt von Kuhmilch im Durchschnitt höher als der eines Soja-, Mandel- und Haferdrinks ist, lassen sich unter den Pflanzendrinks nur geringfügige Unterschiede feststellen. Lediglich bei dem Mandeldrink ist das Spektrum zwischen dem Minimal- und Maximalwert für den Energiegehalt größer, so dass der Mandeldrink den niedrigsten bzw. höchsten Energiegehalt unter den Pflanzendrinks aufweisen kann [1, 29, 36]. Beim Ver-

TAB 1. VERGLEICH AUSGEWÄHLTER NACHHALTIGKEITSINDIKATOREN FÜR DIE HERSTELLUNG VON KUHMILCH UND PFLANZENDRINKS

Flüssigkeit	Treibhausgasemissionen [kg CO ₂ -Äquivalent pro L Flüssigkeit]	Flächenverbrauch [m ² pro L Flüssigkeit]	Wasserverbrauch [m ³ pro L Flüssigkeit]
Kuhmilch ¹	3,2	9,0	0,6
Sojadrink ¹	1,0	0,7	0,3
Mandeldrink ¹	0,7	0,5	0,4
Haferdrink ¹	0,9	0,8	0,5
Kuhmilch ²	1,4	1,0	7,4
Sojadrink (konv.) ²	0,5	0,5	1,7
Sojadrink (bio.) ²	0,4	0,6	2,2
Mandeldrink ²	0,6	0,4	2,5
Haferdrink ²	0,5	0,7	2,6

¹ Daten adaptiert aus Poore & Nemecek [2, Zusatzmaterial]. Die Daten beziehen sich auf die Herstellung von je 1 Liter [L] Kuhmilch, Soja-, Mandel- und Haferdrink. Die Angaben zur Kuhmilch beziehen sich auf 1 Liter pasteurisierte Milch mit 4 % Fett- und 3,3 % Proteingehalt. Die Angaben zum Sojadrink beziehen sich auf 1 Liter Sojadrink mit ca. 3,3 % Proteingehalt. Zum Proteingehalt im Mandel- und Haferdrink sind keine Angaben vorhanden.

² Daten adaptiert aus Geburt et al. [1, S. 6]. Die Daten beziehen sich auf die Herstellung von je 1 Liter Kuhmilch, Soja-, Mandel- und Haferdrink. Die Daten für die Kuhmilch beziehen sich auf Kuhmilch hergestellt in der Schweiz mit 3,5 % Fett- und 3,3 % Proteingehalt. Die Daten für den konventionellen Sojadrink (konv.) beziehen sich auf Sojadrinks hergestellt in Brasilien, den USA und der Schweiz mit einem Anteil von 12,5 % Soja. Die Daten für den Bio-Sojadrink (bio.) beziehen sich auf einen Sojadrink hergestellt in der Schweiz mit einem Anteil von 12,5 % Soja. Die Daten für den Mandeldrink beziehen sich auf einen Mandeldrink hergestellt in den USA mit einem Anteil von 13,1 % Mandeln. Die Daten für den Haferdrink beziehen sich auf einen Haferdrink hergestellt in der Schweiz mit einem Anteil von 12,4 % Hafer.

gleich des Fettgehalts eines Soja-, Mandel- und Haferdrinks mit dem der Kuhmilch wird deutlich, dass die Minimalwerte für den Fettgehalt weitestgehend übereinstimmen; bezüglich der Maximalwerte gibt es teils große Unterschiede. Demnach kann der Fettgehalt von Kuhmilch etwa das Vierfache von dem eines Haferdrinks und das Doppelte von dem eines Soja- oder Mandeldrinks betragen. Darüber hinaus ist der Anteil an gesättigten Fettsäuren in der Kuhmilch höher als in einem Soja-, Mandel- und Haferdrink. Vergleicht man den Fettgehalt eines Soja-, Mandel- und Haferdrinks, so stimmt der Fettgehalt eines Sojadrinks weitestgehend mit dem eines Mandeldrinks überein, während ein Haferdrink den geringsten Fettgehalt aufweist [1, 29, 36].

Während der Kohlenhydratgehalt von Kuhmilch ähnlich zu dem eines Soja- und Mandeldrinks ist, ist der Kohlenhydratgehalt eines Haferdrinks am höchsten [28, 29, 36]. Die Kuhmilch enthält im Gegensatz zu den Pflanzendrinks den natürlichen Milchzucker Laktose [28, 29, 36]. Die Kohlenhydrate eines Soja-, Mandel- und Haferdrinks werden während des Herstellungsprozesses aus dem jeweiligen Rohstoff freigesetzt [29]. Es ist außerdem möglich, Zucker im Rahmen der Produktformulierung hinzuzufügen [25, 29]. Der Proteingehalt von Kuhmilch ist verglichen mit dem Proteingehalt eines Mandel- und Haferdrinks höher. Lediglich ein Sojadrink kann einen äquivalenten Proteingehalt zur Kuhmilch aufweisen [28, 29, 36]. Bei der ernährungsphysiologischen Charakterisierung von Proteinquellen, die beispielsweise wirksam in diätetischen Maßnahmen zur Förderung des Muskelwachstums oder zur Verhinderung von Muskelverlust eingesetzt werden könnten, ist es sinnvoll, den Gehalt an essenziellen Amino-

säuren der Nahrungsproteinquelle zu berücksichtigen. Im Allgemeinen ist der Gehalt an Lysin und Methionin bei pflanzlichen Proteinen, so zum Beispiel auch bei Hafer- und Sojaproteinisolaten, im Vergleich zu Kuhmilch niedriger. Dennoch weisen bestimmte pflanzliche Proteine, wie beispielsweise Sojaprotein, einen relativ hohen Gehalt an essenziellen Aminosäuren auf, der den Empfehlungen nationaler und weltweiter Ernährungsrichtlinien entspricht [378]. So können Kombinationen verschiedener pflanzlicher Proteinquellen Proteineigenschaften liefern, die den typischen Merkmalen von tierischen Proteinquellen sehr nahe kommen [378]. Bei einem Vergleich des Gehalts von Ballaststoffen fällt auf, dass die Kuhmilch im Gegensatz zu einem Soja-, Mandel- und Haferdrink keine Ballaststoffe enthält. Unter den Pflanzendrinks enthalten ein Mandel- und Haferdrink den höchsten Anteil an Ballaststoffen. Hierbei sollte jedoch die Spannweite des Minimal- und Maximalwerts der Ballaststoffe eines Mandeldrinks beachtet werden. Demnach kann ein Mandeldrink sowohl den geringsten als auch den höchsten Anteil an Ballaststoffen enthalten [28, 29, 36].

In der aktuellen Literatur sind derzeit nur wenige Angaben zu den Mikronährstoffen von pflanzlichen Milchalternativen vorhanden. Während Kuhmilch einen höheren Calcium- und Natriumgehalt als ein Soja-, Mandel- und Haferdrink aufweist [36], verhält es sich beim Eisengehalt genau andersherum. Soja-, Mandel- und Haferdrinks weisen einen höheren Eisengehalt als Kuhmilch auf [36]. Beim Vergleich der Mikronährstoffe Kalium und Phosphor lassen sich keine eindeutigen Aussagen treffen, da sich die Werte unter den Pflanzendrinks stark unterscheiden. Der Haferdrink weist im Vergleich zum Soja- und Mandeldrink

Eine ausführliche Übersicht über die Makro- und Mikronährstoffe können Sie unter <https://myshare.uni-osnabrueck.de/f/2b60bd3a1fe745c1aa61/> und zum Download unter www.biuz.de. Suchen Sie einfach den entsprechenden Artikel und laden Sie das dort hinterlegte PDF herunter.

TAB 2. VERGLEICH DES ENERGIEGEHALTES UND AUSGEWÄHLTER MAKRONÄHRSTOFFE VON KUHMLICH UND PFLANZENDRINKS

Flüssigkeit	Energie [kJ/100g]	Fett [g/100g]	gesättigte Fettsäuren [g/100g]	Kohlenhydrate [g/100g]	Protein [g/100g]	Ballaststoffe [g/100g]
Kuhmilch ^{1,2,3}	197,0–493,7 ⁴	1,6–6,4	1,0–1,4	3,2–5,4	2,9–6,0	0
Sojadrink ^{1,2,3}	176,1–219,7	1,7–4,3	0,3–0,4	2,5–4,9	3,2–3,9	0,6–0,8
Mandeldrink ^{1,2,3}	100,4–233,9	1,4–3,6	0,1–0,3	2,3–4,7	0,6–2,5	0,3–1,4
Haferdrink ^{2,3}	195,0–216,3	1,3–1,4	0,2	7,5–7,9	0,8–1,2	1,3

¹ Daten adaptiert aus Paul et al. [36, S. 3].

² Daten adaptiert aus Pointke et al. [28, S. 4].

³ Daten adaptiert aus Singh-Povel et al. [29, S. 1420].

⁴ Die angegebenen Zahlenwerte stellen den Minimal- und Maximalwert für den Energiegehalt bzw. ausgewählter Makronährstoffe dar.

Anmerkungen: Die Nährstoffangaben zum Haferdrink bei Paul et al. [36] beziehen sich auf frischen Haferdrink und werden deswegen bei der Analyse der Makronährstoffe nicht hinzugezogen. Zur Art des Soja- und Mandeldrinks sowie der Kuhmilch sind bei Paul et al. [36] keine Angaben vorhanden. Dasselbe gilt für Angaben zum Zuckergehalt der Pflanzendrinks und Kuhmilch. In der Studie von Singh-Povel et al. [29] gibt es keine Angaben zum Ballaststoffgehalt von Soja-, Hafer- und Mandeldrink sowie Kuhmilch.

TAB 3. VERGLEICH AUSGEWÄHLTER MIKRONÄHRSTOFFE VON KUHMLICH UND PFLANZENDRINKS

Flüssigkeit	Calcium [mg/100g]	Eisen [mg/100g]	Kalium [mg/100g]	Natrium [mg/100g]	Phosphor [mg/100g]
Kuhmilch ¹	122,0–134,0	0,1	152,0–181,0	41,0–58,0	119,0–121,0
Sojadrink ¹	4,0–5,4	0,5–0,7	141,0–215,0	2,2–12,0	49,0–62,6
Mandeldrink ¹	13,1–13,2	1,4–1,5	65,0	6,4–6,6	75,0–75,3
Haferdrink ¹	84,3–85,6	6,4–7,4	669,2–671,6	3,1–3,2	672,3–816,3

¹ Daten adaptiert aus Paul et al. [36, S. 43]. Die Nährstoffangaben zum Haferdrink bei Paul et al. [36] beziehen sich auf frischen Haferdrink, zum Soja- und Mandeldrink sowie zur Kuhmilch sind diesbezüglich keine Angaben vorhanden.

sowie der Kuhmilch den höchsten Kalium- und Phosphorgehalt auf. Im Gegensatz dazu weist ein Mandeldrink den geringsten Kalium- und ein Sojadrink den geringsten Phosphorgehalt auf [36].

In der aktuellen Literatur fehlen weitere Angaben zu den in Pflanzendrinks enthaltenen Vitaminen wie Vitamin B₂, B₁₂, A und D und weiteren Mineralstoffen wie Jod, Zink oder Magnesium, die für Kuhmilch charakteristisch sind. Es wird jedoch ersichtlich, dass pflanzliche Milchalternativen im Vergleich zu Kuhmilch nicht das exakte Nährstoffprofil aufweisen. Ferner kann im Herstellungsprozess der Mikronährstoffgehalt der Pflanzendrinks beeinflusst werden. So können beispielsweise wasserlösliche Vitamine beim Einweichen des Rohstoffes zerstört werden. Bei der Abtrennung der Feststoffe kann es außerdem zu einem Mineralstoffverlust kommen. Während der Hitzebehandlung können neben Proteinen auch hitzeempfindliche Vitamine zerstört werden [25, 29]. Aus diesen Gründen werden Pflanzendrinks oftmals mit Calcium oder den Vitaminen A, B₂, B₁₂, D und E angereichert [25, 38] (siehe hierzu auch die Kästen „Anreicherung von Pflanzendrinks mit Nährstoffen“ und „Exkurs – Darf man Pflanzendrinks überhaupt mit Kuhmilch vergleichen?“).

Entwicklung des Pflanzendrink-Marktes

Einer der weltweit am häufigsten konsumierten Pflanzendrinks ist der Sojadrink [24, 25]. Sojadrinks wurden traditionell bereits vor 2000 Jahren in China verwendet, um die Bevölkerung bei mangelnder Milchversorgung trotz-

dem mit „Milch“ versorgen zu können [25]. Der erste kommerziell erfolgreiche Sojadrink wurde 1940 in Asien auf den Markt gebracht. Nachdem Technologien für die industrielle Herstellung von mild aromatisierten Sojadrinks entwickelt wurden, wuchs der Markt in Asien in den 1970er und frühen 1980er Jahren rasch an. In Europa wurde die Nachfrage nach Sojadrinks als pflanzliche Milchalternative von Verbrauchern mit Milchunverträglichkeiten vorangetrieben. Auch in Nordamerika expandierte der Markt in den 1990er und 2000er Jahren als Teil eines Gesundheitstrends, unter anderem weil Soja im Jahr 1999 von der *United States Food and Drug Administration* (FDA) eine positive Wirkung auf die Senkung des Risikos für koronare Herzerkrankungen zugesprochen wurde. Sojaprodukte haben sowohl global als auch in Europa nach wie vor einen großen Anteil auf dem Pflanzendrink-Markt; mittlerweile nehmen hier aber auch die alternativen Produkte aus anderen pflanzlichen Rohstoffen wie Hafer, Mandel, Kokos oder Reis einen hohen Stellenwert ein [24].

Im Jahr 2021 lag der globale Umsatz mit Pflanzendrinks bei 23,2 Milliarden US-Dollar, während dieser für das Jahr 2022 bereits auf 27,3 Milliarden US-Dollar geschätzt wurde [20, 21]. Auch in Europa ist der Umsatz mit Pflanzendrinks in den letzten vier Jahren gestiegen: Während der Umsatz im Jahr 2018 noch bei 1,8 Milliarden Euro lag, betrug dieser im Jahr 2021 2,34 Milliarden Euro [22]. Der Trend, der sowohl global als auch in Europa zu verzeichnen ist, lässt sich ebenfalls in Deutschland fest-

Für weitere Informationen können Sie das Faktenblatt „Milch im Vergleich zu Pflanzendrinks“ des Europäischen Milchindustrieverbandes unter https://milchindustrie.de/wp-content/uploads/2021/06/2021-05-21_EDA_QA_Milk-vs-plant-based-beverages_AR_v2DE.pdf herunterladen.

stellen. So hat sich der Umsatz von 2018 bis 2020 mehr als verdoppelt [15] (Abbildung 6).

Laut Prognosen wird der globale Pflanzendrink-Markt von 2022 bis 2027 voraussichtlich mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 10,4 Prozent weiter ansteigen, so dass der Umsatz mit Pflanzendrinks bis 2027 einen Wert von 44,8 Milliarden US-Dollar erreichen wird [21]. Für den europäischen Pflanzendrink-Markt wird ein Wachstum mit einer jährlichen Wachstumsrate von 10 Prozent prognostiziert. So wird für das Jahr 2025 der Umsatz mit Pflanzendrinks auf 5,0 Milliarden Euro geschätzt [39S].

Gründe für den Konsum von Pflanzendrinks

Global betrachtet sind die Gründe für den Konsum von Pflanzendrinks vielfältig (Abbildung 7). Zum einen gibt es individuelle Gründe wie beispielsweise eine Veränderung des Lebensstils durch die Umstellung auf eine vegane Ernährungsweise [23–25, 28, 30]. Weitere individuelle Gründe für den Konsum von Pflanzendrinks sind gesundheitliche Gründe wie eine Laktoseintoleranz oder Kuhmilchallergie und der Geschmack von Pflanzendrinks [15, 24, 25, 28, 30, 40S]. Zum anderen gibt es gesellschaftliche Gründe wie den Nachhaltigkeits- oder Tierschutzaspekt, die für die Konsumierenden entscheidend sind [15, 28, 41S].

Europäer konsumieren Pflanzendrinks vor allem aus gesundheitlichen Gründen gefolgt von Aspekten des Umwelt- und Klimaschutzes sowie des Tierschutzes [30]. In Deutschland liegen die Gründe zum Konsum von Pflanzendrinks vor allem im Tierschutz, gefolgt vom Umwelt- und Klimaschutz sowie Unverträglichkeiten [15]. Neben all den Gründen, die aus Sicht der Konsumenten für den Konsum von Pflanzendrinks sprechen, spricht sich der Europäische Milchindustrieverband (EDA) indes eher gegen den Konsum von pflanzlichen Milchalternativen als Totalersatz für Kuhmilch aus. Dabei wird sich besonders auf den Unterschied der Nährwerte von Kuhmilch und Pflanzendrinks berufen und angeführt, dass es auf dem europäischen Markt derzeit keinen Pflanzendrink gebe, der sämtliche Nährstoffe, die Milch von Natur aus bietet, liefern kann [42S].

Akzeptanz von Pflanzendrinks

Pflanzendrinks sind nach einer Umfrage als Alternative zu konventionellen, tierischen Lebensmitteln das am häufigsten verkaufte vegane Alternativprodukt in Europa [15, 38]. Dieses Ergebnis deckt sich mit dem Ergebnis einer Jugendumfrage in Deutschland: Auch hier handelt es sich bei Pflanzendrinks um das am häufigsten gekaufte vegane Alternativprodukt [43S]. Die Entscheidung der Verbraucher zum Kauf eines Pflanzendrinks wird von unterschiedlichen Faktoren wie dem Hersteller, der Qualität und der Produktzusammensetzung des Pflanzendrinks beeinflusst. Den größten Einfluss auf die Kaufentscheidung haben jedoch der Geschmack und der Preis eines Pflanzendrinks

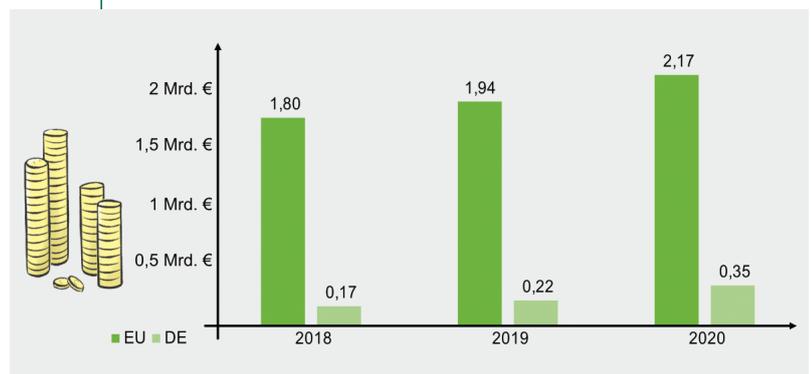
ANREICHERUNG VON PFLANZENDRINKS MIT NÄHRSTOFFEN

Damit Pflanzendrinks eine geeignete Alternative zur Kuhmilch darstellen können, supplementieren viele Hersteller ihre Pflanzendrinks mit zusätzlichen Nährstoffen. In erster Linie werden Pflanzendrinks mit Calcium angereichert, da Kuhmilch als eine wichtige Calciumquelle gilt. Weiterhin werden Pflanzendrinks die Vitamine A, B₂, B₁₂, D und E sowie Zink, Folsäure, Thiamin, Niacin, Magnesium und Kalium hinzugefügt [25]. Um die sensorischen Eigenschaften – insbesondere den Geschmack – zu verbessern, können den Pflanzendrinks außerdem Salz, Zucker, Sirup, Aromastoffe, Vanilleessenz, Kakao und Apfelsaftkonzentrat zugesetzt werden [27S]. Es gilt jedoch zu beachten, dass sich die Bioverfügbarkeit der Nährstoffe in Pflanzendrinks und in Kuhmilch unterscheidet [25, 29]. Außerdem können sich die Ergebnisse der LCAs von angereicherten und nicht angereicherten Pflanzendrinks unterscheiden, da eine Anreicherung mit zusätzlichen Umweltauswirkungen verbunden ist. Geburt et al. [1] schätzen die Auswirkungen der Nährstoffanreicherung von Pflanzendrinks auf ihre Nachhaltigkeit jedoch als eher gering ein [1].

EXKURS – DARF MAN PFLANZENDRINKS ÜBERHAUPT MIT KUHMITCH VERGLEICHEN?

Die Studien von Pointke et al. [28] und Singh-Povel et al. [29] haben herausgefunden, dass Pflanzendrinks die ernährungsphysiologischen und sensorischen Eigenschaften von Kuhmilch nicht vollständig ersetzen können und sprechen sich dafür aus, Pflanzendrinks als eigene Produktgruppe anzusehen, die entsprechend auch als solche bewertet werden muss [28, 29]. Singh-Povel et al. [29] betonen die Wichtigkeit der Berücksichtigung dieser ernährungsphysiologischen Unterschiede in den einzelnen Ernährungsempfehlungen, besonders mit Blick auf vulnerable Gruppen wie Kinder und ältere Menschen. Eine Ausnahme bilden jedoch Pflanzendrinks, die mit Nährstoffen angereichert sind und damit ernährungsphysiologisch äquivalenter zur Kuhmilch werden. Wird der Konsum von Kuhmilch durch mit Nährstoffen angereicherte Pflanzendrinks ersetzt, kann eine ausreichende Versorgung mit Mikronährstoffen gewährleistet werden [28, 29].

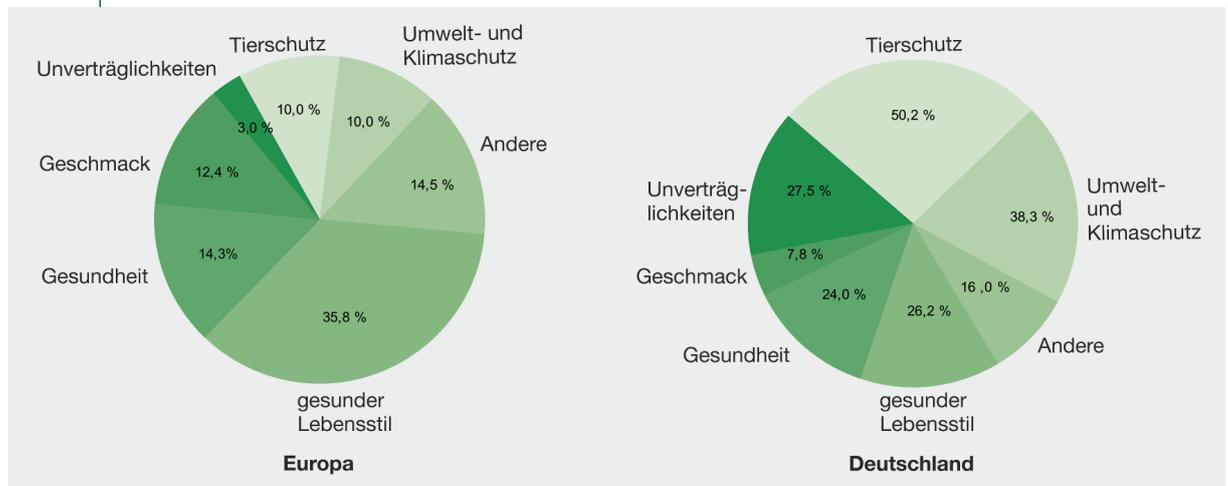
ABB. 6 | UMSATZ MIT PFLANZENBASIERTEN MILCHALTERNATIVEN



Dargestellt sind Umsätze in der Europäischen Union (EU) und Deutschland (DE) von 2018 bis 2020 in Milliarden € [Mrd. €]. Daten adaptiert aus Statista [15, S. 2] und Weiss [22].

[25, 30]. Das Kriterium des Geschmacks fällt zusammen mit dem Mundgefühl unter die sensorischen Eigenschaften von pflanzlichen Milchalternativen, die die Akzeptanz der Konsumenten maßgeblich beeinflussen. So weisen beispielsweise Pflanzendrinks auf Hülsenfruchtbasis oft einen bohnligen, erdigen oder malzigen Nebengeschmack

ABB. 7 | GRÜNDE FÜR DEN KONSUM VON PFLANZENBASIERTEN MILCHALTERNATIVEN



Daten adaptiert aus Pritulska et al. [30, S. 136] und Statista [15, S. 24].

auf [24, 25, 44]. Währenddessen hat Kuhmilch einen charakteristischen milden Geschmack, was dazu führen kann, dass Pflanzendrinks aufgrund der sich von der Kuhmilch unterscheidenden Geschmacksrichtungen von einigen Verbrauchern abgelehnt werden [25]. Beim Vergleich des Preises von Pflanzendrinks mit dem von Kuhmilch lässt sich feststellen, dass ein Pflanzendrink derzeit generell noch teurer ist als die tierische Milch [39S]. Detailliertere Informationen zum Vergleich des Preises von Pflanzendrinks und Kuhmilch lassen sich in der aktuellen Literatur nicht finden.

Ausblick

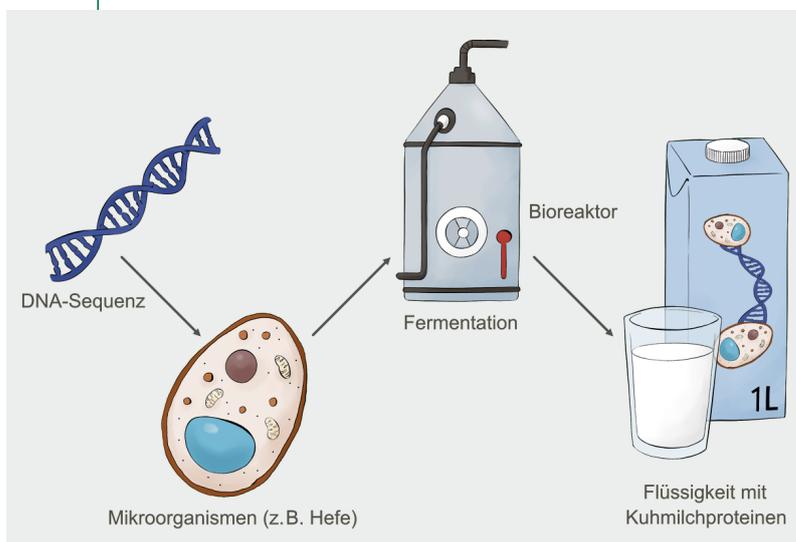
Neben dem stetigen Wachstum des Pflanzendrink-Sortiments arbeitet eine Reihe von Unternehmen und Wissenschaftlern an der Entwicklung von weiteren Milchalternativen, die hinsichtlich ihrer Optik, ihren sensorischen Ei-

genschaften sowie ihren Nährstoffen äquivalent zur tierischen Milch sein soll [20, 21, 45S, 46, 47S]. Diese Milchalternative wird unter anderem als *animal-free milk* bezeichnet und besteht aus denselben Grundbestandteilen wie die Milch von Kühen und andere Tierarten: Wasser und den Milchproteinen Kasein und Molkenproteine. Bei der Herstellung von *animal-free milk* werden die Milchproteine allerdings ohne die Beteiligung von Tieren mithilfe von Präzisionsfermentationstechnologien gewonnen [46, 48] (Abbildung 8).

Zur Gewinnung der Milchproteine durch Präzisionsfermentation wird die DNA von Mikroorganismen wie Bakterien oder Hefen verändert, so dass diese die Milchproteine synthetisieren, die traditionell in tierischer Milch vorkommen. Hierfür werden zunächst die DNA-Sequenzen beispielweise einer Kuh, die für die Synthese der Milchproteine kodieren, kopiert und mit der DNA der Mikroorganismen rekombiniert. Die DNA-Sequenzen können aus einer DNA-Datenbank bezogen werden. Die Mikroorganismen mit rekombinanter DNA werden in einem Bioreaktor mit einem entsprechenden Nährmedium kultiviert und produzieren dort die gewünschten Milchproteine. Diese werden nachfolgend aus dem Nährmedium gefiltert, gereinigt und getrocknet [45S, 46, 49, 50S, 51S]. Mit den Milchproteinen können Milch oder Milchprodukte wie Joghurt, Käse oder Eiscreme hergestellt werden, deren Textur, Geschmack und Nährwert äquivalent zu herkömmlichen Milchprodukten ist. Um *animal-free milk* herzustellen, werden die Milchproteine mit Wasser, pflanzlichen Fetten, Mineralien, Zucker und Salzen kombiniert (46, 49, 50S).

Diese Fermentationstechnologie wird bereits seit Jahrzehnten kommerziell genutzt. Trotzdem gab es über präzisionsfermentationsbasierte Milchprodukte bisher nur einen begrenzten öffentlichen und wissenschaftlichen Diskurs, obwohl präzisionsfermentationsbasierte Milchalternativen hormon-, antibiotika- und laktosefrei sind. Außerdem besteht die Möglichkeit, den Makro- und

ABB. 8 | HERSTELLUNG EINER MILCHALTERNATIVE DURCH PRÄZISIONSFERMENTATION



Mikronährstoffgehalt von präzisionsfermentationsbasierten Milchalternativen anzupassen [46, 52]. Erste Analysen zur Herstellung der Milchproteine Kasein und Molkenprotein durch Präzisionsfermentation haben darüber hinaus gezeigt, dass die Umweltauswirkungen im Vergleich zur Herstellung von Kuhmilch geringer sind. Zusammenfassend haben sie ein großes Potenzial, nachhaltiger und gesundheitsförderlicher zu sein als tierische Milch [46, 52].

Im Juni 2022 hat die Firma *Bored Cow* mit dem fermentationsbasierten Milchprotein der Firma *Perfect Day* die erste *animal-free milk* auf den amerikanischen Markt gebracht [50S]. Mindestens 16 verschiedene Lebensmittelmarken haben seitdem das Molkenprotein von *Perfect Day* in Produkte wie Milch, Eiscreme, Sahne, Frischkäse, Proteinpulver oder Schokolade verarbeitet [48, 50S]. Auf dem europäischen Markt sind präzisionsfermentationsbasierte Milchprodukte derzeit noch nicht erhältlich.

Zusammenfassung

Die derzeitige Produktion und der weltweit hohe Konsum von Milch tragen erheblich zum Klimawandel und zum Biodiversitätsverlust bei. Dies führt dazu, dass die Ressourcen unseres Planeten für die erforderliche Versorgung der wachsenden Bevölkerung mit tierischen Produkten wie Milch in Zukunft nicht ausreichen werden. Gleichzeitig besteht seit einigen Jahren weltweit großes Interesse an einer überwiegend pflanzlichen Ernährung, was sich auch in einer hohen Nachfrage nach pflanzlichen Milchalternativen zeigt. Letztere stellen insofern eine potenzielle Alternative zur tierischen Milch dar, da ihr Herstellungsprozess im Vergleich mit dem von Kuhmilch nachhaltiger ist. Auch wenn pflanzliche Milchalternativen aufgrund ihrer großen Spannweite an Makro- und Mikronährstoffen von Natur aus nicht das exakte Nährwertäquivalent zur Kuhmilch darstellen, sind sie das am häufigsten verkaufte vegane Alternativprodukt in Europa und Deutschland. Auch auf globaler Ebene wächst der Markt für pflanzliche Milchalternativen derzeit rasant. Die Gründe für den Konsum von pflanzlichen Milchalternativen basieren im Wesentlichen auf den drei Aspekten: Gesundheit, Nachhaltigkeit und Tierschutz. Dabei wird die Kaufentscheidung insbesondere durch den Geschmack und den Preis der pflanzlichen Milchalternativen beeinflusst. Dementsprechend entwickeln sich das Angebot und Sortiment von pflanzlichen Milchalternativen stetig weiter. Darüber hinaus wird derzeit intensiv an der Entwicklung neuer Milchalternativen durch Präzisionsfermentation gearbeitet.

Summary

Plant-based milk alternatives

The current production and high consumption of milk worldwide contribute significantly to climate change and biodiversity loss. As a result, the resources of our planet will not be sufficient to feed the growing population with animal products such as milk in the future. At the same time, for some years now, there has been a high interest world-

GLOSSAR

Konsummilch: Darunter fallen Rohmilch (nicht über 40 °C erhitzte Milch), Vollmilch (mind. 3,5 % Fett), teilentrahmte Milch (mind. 1,5 % und höchstens 1,8 % Fett), entrahmte Milch (höchstens 0,5 % Fett), sonstige Konsummilch, laktosefreie und eiweißangereicherte Milch.

Lebenszyklusanalyse (engl. life cycle assessment, LCA): Quantitative, standardisierte Methode zur Analyse der Gesamtumweltauswirkungen eines Produkts oder Verfahrens innerhalb eines Lebenszyklus.

Pasteurisieren: Methode zur Konservierung und Verlängerung der Haltbarkeit von Lebensmitteln, indem die Zahl der Mikroorganismen reduziert und Enzyme inaktiviert werden. Das Pasteurisieren wird bei Temperaturen unter 100 °C durchgeführt und ermöglicht eine Haltbarkeit von ca. einer Woche bei Kühltemperaturen.

Planetare Belastungsgrenzen: Wurden im Rahmen des Konzepts der globalen Nachhaltigkeit von Rockström et al. [18] definiert. Sie beziehen sich auf den Klimawandel, die Versauerung der Meere, die Ozonbildung, den Stickstoff- und den Phosphorkreislauf, den globalen Wasserverbrauch, die Landnutzung und den Verlust der Biodiversität. Überschreitungen dieser Grenzen gefährden die Stabilität und Widerstandsfähigkeit des Erdsystems.

Planetary Health Diet: Eine von der EAT-Lancet-Kommission entwickelte Strategie für Landwirtschaft und Ernährung zum Schutz der Erde und der Gesundheit der Menschen. Ziel ist eine nachhaltige und gesunde Ernährung für eine Weltbevölkerung von 10 Milliarden Menschen im Jahr 2050, die überwiegend auf pflanzlichen Lebensmitteln basiert und durch kleinere Mengen an Fisch, Fleisch und Milchprodukten ergänzt wird.

Ultrahochtemperatur-Behandlung (engl. ultra-high-temperature processing, UHT processing): Methode zur Konservierung und Verlängerung der Haltbarkeit von Lebensmitteln auf mehrere Monate, indem die Zahl der Mikroorganismen reduziert und Enzyme inaktiviert werden. Die UHT-Behandlung wird bei Temperaturen von 135–150 °C durchgeführt, wodurch ein kommerziell steriles Produkt entsteht.

wide in a predominantly plant-based diet, which is also reflected in a high demand for plant-based milk alternatives. They represent a potential alternative to animal milk in so far as their production process is more sustainable in comparison to that one of cow's milk. Even though plant-based milk alternatives are by nature not the exact nutritional equivalent of cow's milk due to a wide range of macro- and micronutrients, they are the most sold vegan alternative products in Europe and Germany. Also at a global level, the market for plant-based milk alternatives is currently growing rapidly. The reasons for the consumption of plant-based milk alternatives are essentially based on three aspects: health, sustainability and animal welfare. At the same time, the purchase decision is especially influenced by the taste and price of the plant-based milk alternatives. Correspondingly, the offer and assortment of plant-based milk alternatives constantly develop. Furthermore, intensive work is currently being done on the development of new milk alternatives through precision fermentation.

Schlagworte:

Milchwirtschaft, Kuhmilch, Nachhaltiger Konsum, Milchersatz, Pflanzendrinks

Literatur

Aufgrund der Vielzahl der Literaturangaben führen wir hier nur die nach Meinung der Verfasserinnen wichtigsten Literaturstellen auf. Die vollständige Literaturliste finden Sie unter www.biuz.de. Einfach den Artikel aufrufen und dort das Zusatzmaterial öffnen. Literaturstellen, die online zur Verfügung stehen, sind im Text mit einem S für *Supplementary* gekennzeichnet.

- [1] K. Geburt et al. (2022). A Comparative Analysis of Plant-Based Milk Alternatives Part 2: Environmental Impacts. *Sustainability* 14(14), 8424. <https://doi.org/10.3390/su14148424>
- [2] J. Poore, T. Nemecek (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science* 360, 987–992. <https://doi.org/10.1126/science.aaq0216>
- [11] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2022). Konsummilch: Herstellungsmenge und Verbrauch pro Kopf 2021 leicht gesunken. <https://www.bmel-statistik.de/ernaehrung-fischerei/versorgungsbilanzen/milch-und-milcherzeugnisse>
- [15] Statista (2021). Milchersatzprodukte. <https://de.statista.com/statistik/studie/id/88316/dokument/milchersatzprodukte/>
- [16] Bundeszentrum für Ernährung (BZfE) (2020). *Planetary Health Diet*. Speiseplan für eine gesunde und nachhaltige Ernährung. <https://www.bzfe.de/nachhaltiger-konsum/lagern-kochen-essen-teilen/planetary-health-diet/>
- [20] Grand View Research (2021). Dairy Alternatives Market Size, Share & Trends Analysis Report by Source, by Product, by Distribution Channel, and Segment Forecasts, 2021–2028. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/dairy-alternatives-market>
- [21] Markets & Markets (2022). Dairy Alternatives Market. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/dairy-alternative-plant-milk-beverages-market-677.html>
- [22] S. Weiss (2021). Das Geschäft mit den Pflanzendrinks. <https://www.nzz.ch/video/hafer-soja-mandel-vegane-milch-trend-ld.1598121>
- [23] M. Bridges (2018). Moo-ove Over, Cow's Milk: The Rise of Plant-Based Dairy Alternatives. *Practical Gastroenterology* 171, 20–27.
- [24] O. E. Mäkinen et al. (2016). Foods for Special Dietary Needs: Non-dairy Plant-based Milk Substitutes and Fermented Dairy-type Products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 56(3), 339–349. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.761950>
- [25] F. Reyes-Jurado et al. (2021). Plant-Based Milk Alternatives: Types, Processes, Benefits, and Characteristics. *Food Reviews International*, <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1952421>
- [26] M. L. Astolfi et al. (2020). Comparative elemental analysis of dairy milk and plant-based milk alternatives. *Food Control* 116. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107327>
- [28] M. Pointke et al. (2022). A Comparative Analysis of Plant-Based Milk Alternatives Part 1: Composition, Sensory, and Nutritional Value. *Sustainability* 14(13), 7996. <https://doi.org/10.3390/su14137996>
- [29] C. M. Singh-Povel et al. (2022). Nutritional content, protein quantity, protein quality and carbon footprint of plant-based drinks and semi-skimmed milk in the Netherlands and Europe. *Public Health Nutrition* 25(5), 1416–1426. <https://doi.org/10.1017/S1368980022000453>
- [30] N. Pritulska et al. (2021). Consumer preferences on the market of plant-based milk analogues. *Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences* 15, 131–142. <https://doi.org/10.5219/1485>
- [32] Europäisches Parlament und Europäischer Rat (2013). Verordnung (EU) Nr. 1308/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Dezember 2013 über eine gemeinsame Marktorganisation für landwirtschaftliche Erzeugnisse und zur Aufhebung der Verordnungen (EWG) Nr. 922/72, (EWG) Nr. 234/79, (EG) Nr. 1234/2007. *Amtsblatt der Europäischen Union* L 324/671. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:347:0671:0854:de:PDF>
- [34] E. Rööfs et al. (2018). The role of dairy and plant based dairy alternatives in sustainable diets. Swedish University of Agriculture Sciences, the research platform Future Food, https://pub.epsilon.slu.se/16016/1/roofs_e_et_al_190304.pdf
- [35] A. Carlsson Kanyama et al. (2021). Differences in environmental impact between plant-based alternatives to dairy and dairy products: A systematic literature review. *Sustainability* 13(22), <https://doi.org/10.3390/su132212599>
- [36] A. A. Paul et al. (2019). Milk Analog: Plant-based alternatives to conventional milk, production, potential and health concerns. *Critical Reviews in Food Sciences and Nutrition* 60(18), 3005–3023. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1674243>
- [38] ProVeg e.V. (2019). Pflanzmilch-Report. <https://proveg.com/de/ernaehrung/pflanzliche-alternativen/pflanzmilch-report/>
- [44] A. Cardello et al. (2022). Plant-based alternatives vs dairy milk: Consumer segments and their sensory, emotional, cognitive and situational use responses to tasted products. *Food Quality and Preference* 100. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2022.104599>
- [46] Z. Mending-Zambo et al. (2021). Dairy 3.0: cellular agriculture and the future of milk. *Food, Culture and Society* 24(5), 675–693. <https://doi.org/10.1080/15528014.2021.1888411>

- [48] E. Waltz (2022). Cow-less milk: the rising tide of animal-free dairy attracts big players. *Nature Biotechnology* 40(11), 1531–1533. <https://doi.org/10.1038/s41587-022-01548-z>
- [49] M. J. Mouat, R. Prince (2018). Cultured meat and cowless milk: on making markets for animal-free food. *Journal of Cultural Economy* 11(4), 315–329. <https://doi.org/10.1080/17530350.2018.1452277>
- [52] P. Bhandari et al. (2021). Life Cycle Assessment and Carbon Offset Potential for Cultured Milk Protein. Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions, Duke University, <https://nicholasinstitute.duke.edu/publications/life-cycle-assessment-and-carbon-offset-potential-cultured-milk-protein>

Verfasst von:



Lena Szczepanski, geb. 1995, hat an der Universität Osnabrück Biologie und Physik auf Gymnasiallehreramt studiert. Anschließend absolvierte sie ihren Vorbereitungsdienst am Zentrum für schulpraktische Lehrerbildung in Münster. Aktuell arbeitet sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Abteilung Biologiedidaktik an der Universität Osnabrück und forscht im Rahmen ihrer Promotion zum Thema „Vorstellungen, Einstellungen, Konsumbereitschaft von Jugendlichen gegenüber nachhaltigeren Alternativen zur Kuhmilch“.



Gesa Ostermann, geb. 1994, hat an der Universität Osnabrück Biologie und Germanistik sowie Deutsch auf Gymnasiallehreramt studiert. Sie verfasste ihre Masterarbeit zum Thema „Pflanzliche Milchalternativen – Produktion, Nachhaltigkeit und Akzeptanz“ in der Abteilung Biologiedidaktik an der Universität Osnabrück.



Florian Fiebelkorn, geb. 1980, absolvierte ein Doppelstudium der Biologie (Diplom) sowie der Biologie und Chemie (Lehramt an Gymnasien) an der Universität Hannover und der Universidad Nacional (Costa Rica). Anschließend forschte er an der Abteilung für Biologiedidaktik an der Universität Osnabrück und arbeitete als Projektleiter und Lehrer bei der High Seas High School[®] sowie an der Deutschen Schule in Santiago de Chile. Aktuell übernimmt er an der Abteilung Biologiedidaktik der Universität Osnabrück die Lehrstuhlvertretung für Prof. Dr. Susanne Menzel. Forschungsschwerpunkte: Wissen und Einstellungen von Schülern, Lehrern und der allgemeinen Bevölkerung zu verschiedenen Aspekten einer Nachhaltigen Ernährung und zum Schutz von Biodiversität.

Korrespondenz

Lena Szczepanski
Dr. Florian Fiebelkorn
Universität Osnabrück
Fachbereich Biologie/Chemie
Abteilung Biologiedidaktik
Barbarastrasse 11/Geb. 35
49076 Osnabrück
E-Mail: lena.szczepanski@uos.de
E-Mail: florian.fiebelkorn@uos.de

Ein Süßwasserpolymp der Gattung *Hydra*.
Foto: Frank Fox.

Differenzielle Zellfunktion
durch subzelluläre
Kompartimentierung des
Aktin-Cytoskeletts

Multitasking in evolutionsgeschichtlich alten Epithelmuskelzellen

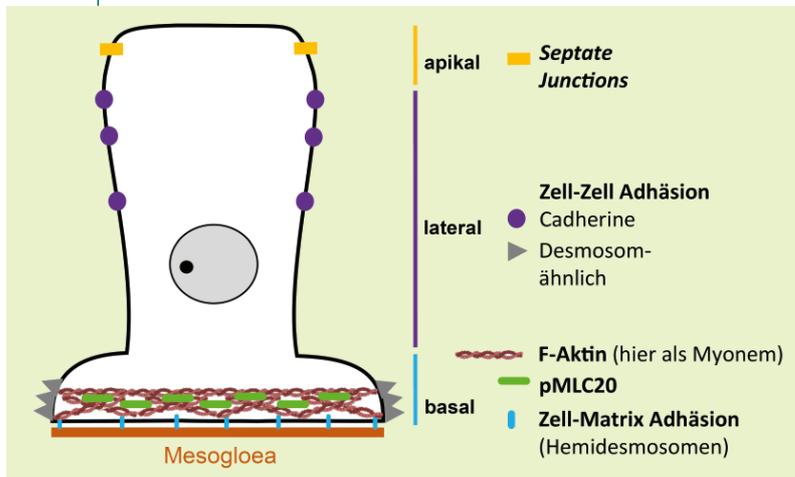
OLIVER HOLZ | MONIKA HASSEL

Epithelien sind tierspezifische Erfindungen. Sie grenzen bei den ► Eumetazoen (= echte Gewebetiere) seit mindestens 600 Millionen Jahren Gewebe und Organe durch einen fest verankerten Gewebeverband nach außen oder innen hin ab. Wegen der gegenseitigen Adhäsion der Epithelzellen und ihrer Verankerung in der basal liegenden, selbst sezernierten, elastischen extrazellulären Matrix ► (Basalmembran) ändert sich die Gewebeform, sobald einzelne Epithelzellen ihre Form ändern. Hierbei spielt das kortikale Aktin- ► Cytoskelett, ein Netz aus Aktinfasern und

vernetzenden Proteinen direkt unterhalb der Zellmembran, die entscheidende Rolle. Es erlaubt flexible und dynamische Formveränderungen z. B. während der Embryonalentwicklung, bei Regenerationsvorgängen oder während der adulten ► Morphogenese. Bei Nesseltieren (Cnidaria) übernehmen Epithelzellen als Epithelmuskelzellen zusätzlich die Funktion einer Muskulatur. Wie die beiden Funktionen innerhalb der Epithelmuskelzelle der Nesseltiergattung *Hydra* kontrolliert werden, ist ein schönes Beispiel für ► subzelluläre Kompartimentierung von Signalwegen.

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 364 erklärt.

ABB. 1 | SCHEMA EINER EPITHELMUSKELZELLE



Die kanonischen Zelladhäsionselemente finden sich lokal konzentriert, entsprechend der apikobasalen Polarität der Zellen. Im basalen Myonem interagiert nach einem Bewegung auslösenden Reiz F-Aktin mit der phosphorylierten regulatorischen Kette des Myosins (pMLC20); das Myonem kontrahiert.

Die Funktion von Epithelien besteht vor allem in der Abgrenzung von Organen und Geweben. Im Laufe der Evolution waren sie aber möglicherweise über die Stufe eines sogenannten ▶ Myoepithels auch Ausgangsmaterial für die Bildung der Muskulatur. Entsprechende Übergangsformen zwischen bifunktionalen Epithelmuskelzellen und tief im Gewebe liegenden reinen Muskelzellen wurden unter Nutzung transgener Tiere bei der Sternchenanemone *Nematostella* nachgewiesen [1]. Muskelzellen entwickeln sich in deren Körpersäule durch Absinken von Epithelmuskelzellen, die nur in einem Teil der Zelle kontraktile sind. Nach Verlust des Kontakts zur Oberfläche und damit der Epithelzellfunktion, agieren sie als komplett kontraktile Muskelzellen im vielschichtigen Gewebe der *Nematostella*.

Epithelmuskelzellen bei *Hydra*

Eine hohe Gewebekomplexität wie bei *Nematostella* findet man beim Süßwasserpolyphen *Hydra* nicht. Der Körper wird von nur zwei jeweils einlagigen Epithelien aus Epithelmuskelzellen gebildet (Abbildung 1 und 2b), zwischen denen sich interstitielle Stammzellen – die Lieferanten für Neurone und Nesselzellen – befinden. Wäh-

rend das äußere Epithel (Ektoderm) als Abgrenzung zum Süßwasser und längskontraktile Schicht fungiert, übernimmt das innere Epithel (Endoderm) neben ringförmiger Kontraktilität auch die Verdauungs- und damit Darmfunktion. Die Epithelmuskelzelle ist somit multifunktionell. Beide Epithelien sind verankert in der zwischenliegenden, kollagenhaltigen Mesogloea [2]. Die kontraktile basalen Fortsätze der Epithelmuskelzellen, die Myoneme, verlaufen jeweils auf der Basalmembran. Sie funktionieren als glatte, dehnungsrezeptive Muskulatur über die Interaktion zwischen fibrillärem Aktin (F-Aktin) und Myosin II [3].

Vorteil des einfachen, zweilagig-epithelialen Körperbaus von *Hydra* ist, dass sich die Eigenschaften der Epithelmuskelzellen mikroskopisch ohne Überlagerung mehrerer Gewebelagen untersuchen lassen. So werden die in den basalen Fortsätzen verlaufenden Aktinfasern deutlich sichtbar, wenn man fixierte Tiere mit Phalloidin inkubiert, das zuvor an einen Fluoreszenzfarbstoff gekoppelt wurde (Abbildung 2c, d und 3a). Phalloidin stammt aus dem Knollenblätterpilz *Amanita phalloides* und bindet F-Aktin irreversibel. Es ist deshalb für unsere Zellen ein tödliches Gift, wurde aber wegen seiner starken Affinität zu F-Aktin in der Zellbiologie zu einem essenziellen Werkzeug, das wunderschöne Fluoreszenzbilder liefert.

Epithelmuskelzellen – Bewegung versus Morphogenese

Bewegungsabläufe wie das Zusammenzucken oder das Ausstrecken der Süßwasserpolyphen werden durch die ektodermal längs und endodermal ringförmig verlaufenden Myoneme der Epithelmuskelzellen vermittelt (Abbildung 2b). Bei der Kontraktion interagieren analog glatter Muskulatur Aktinfasern und Myosin II miteinander, sobald in den Myonemen die regulatorische Kette von Myosin II durch Phosphorylierung in Position 20 des Proteins (pMLC20) aktiviert wird (Abbildung 1). Das Myonem verkürzt sich.

Wie Bewegungssteuerung erfolgt, soll hier nur in Kürze erklärt werden: Mehrere, erst kürzlich identifizierte, eigenständige Nervensysteme arbeiten bei *Hydra* regionsspezifisch mit Epithelmuskelzellen zusammen [4, 5]. Zum einen dienen verschiedene Neuropeptide als Transmitter, um selektiv einzelne Tentakel(abschnitte), den Oberkörper oder den unteren Körper zu bewegen. Neurone übermitteln dabei ihre Signale an der Basalseite der Epithelmuskelzellen – also dort, wo die Myoneme zu finden sind. Darüber hinaus produzieren auch Epithelmuskelzellen Peptide, sogenannte Epitheliopeptide, welche zum Beispiel den „Absprung“ der Jungpolyphen vom Muttertier durch Kontraktion eines ringförmig kontraktilen ▶ Sphincters an der Knospenbasis bewerkstelligen [6].

Die Morphogenese des Körpers als zweiter, Aktomyosin-abhängiger Prozess wird durch Formveränderung der normalerweise säulenförmigen und über Adhäsionsmoleküle eng miteinander verbundenen Epithelmuskelzellen gesteuert (Abbildung 3). Für die Formveränderung

IN KÜRZE

- Die **Epithelmuskelzellen** von *Hydra* haben eine **effiziente Kompartimentierung von Signalelementen** etabliert, welche Körperbewegung oder alternativ Morphogenese ermöglichen.
- Dieser **entwicklungsgeschichtlich alte Zelltyp**, dessen Umbildung zu echten Muskelzellen bei der Anthozoe *Nematostella* erstmals nachgewiesen wurde, stellt ein sehr schönes Beispiel für die **funktionelle Komplexität von Zellen** dar, die bereits bei den evolutionsgeschichtlich alten Nesseltieren umgesetzt ist.

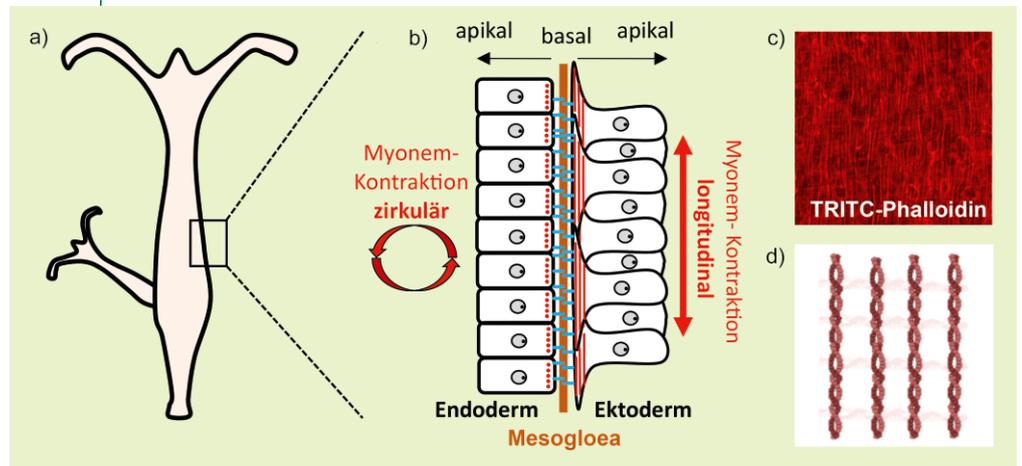
der Zellen – und damit der Epithelien und die Morphogenese des Körpers – sind nicht die Myoneme, sondern ist das kortikale Aktin-Cytoskelett essenziell. Dieses liegt unterhalb der Zellmembran und umgibt die Zelle netzartig (Abbildung 3 und Abbildung 5b). Durch Interaktion von F-Aktin mit Myosin II im kortikalen Aktin-Cytoskelett kann eine lokale Kontraktion an beliebiger Position innerhalb der Zelle ausgelöst werden. Die Zelle dehnt sich ein, verschmälert, verbreitert oder krümmt sich. Da Epithelzellen im Verband fixiert sind, verändert nachfolgend das gesamte Epithel seine Gestalt (Abbildung 3 a–d). Bei *Hydra* unterstützen intrazellulär apikobasal verlaufende Aktinfilamente die Morphogenese [7]. Epithelmuskelzellen sind somit essenzielle Architekten der Körpergestalt.

Morphogenese und Zellformveränderungen

Beispiele für die teils dramatischen Formveränderungen der *Hydra*-Zellen und nachfolgend der Körperform sind in Abbildung 3 a–d zusammengestellt. Ausgehend von der normalen Form einer ektodermalen Epithelmuskelzelle der Körpersäule mit ihren längs verlaufenden Myonemen (Abbildung 3a) lassen sich in morphogenetisch aktivem Gewebe typische Zellformveränderungen nachweisen, wenn man F-Aktin über Phalloidin-TRITC fluoreszierend (hier rot) anfärbt und gleichzeitig die phosphorylierte regulatorische Kette von Myosin II über einen Antikörper gegen pMLC20 (hier grün) darstellt. Während F-Aktin alleine ein stabilisierendes, zugfestes Gerüst bildet, zeigt das Vorkommen beider Moleküle in der Zelle an der gleichen Stelle dynamische Aktomyosin-Interaktionen an. Ablesen lässt sich dies in den *Hydra*-Zellen daran, dass sich durch Überlagerung von roter und grüner Fluoreszenz die Farbe auf gelb ändert.

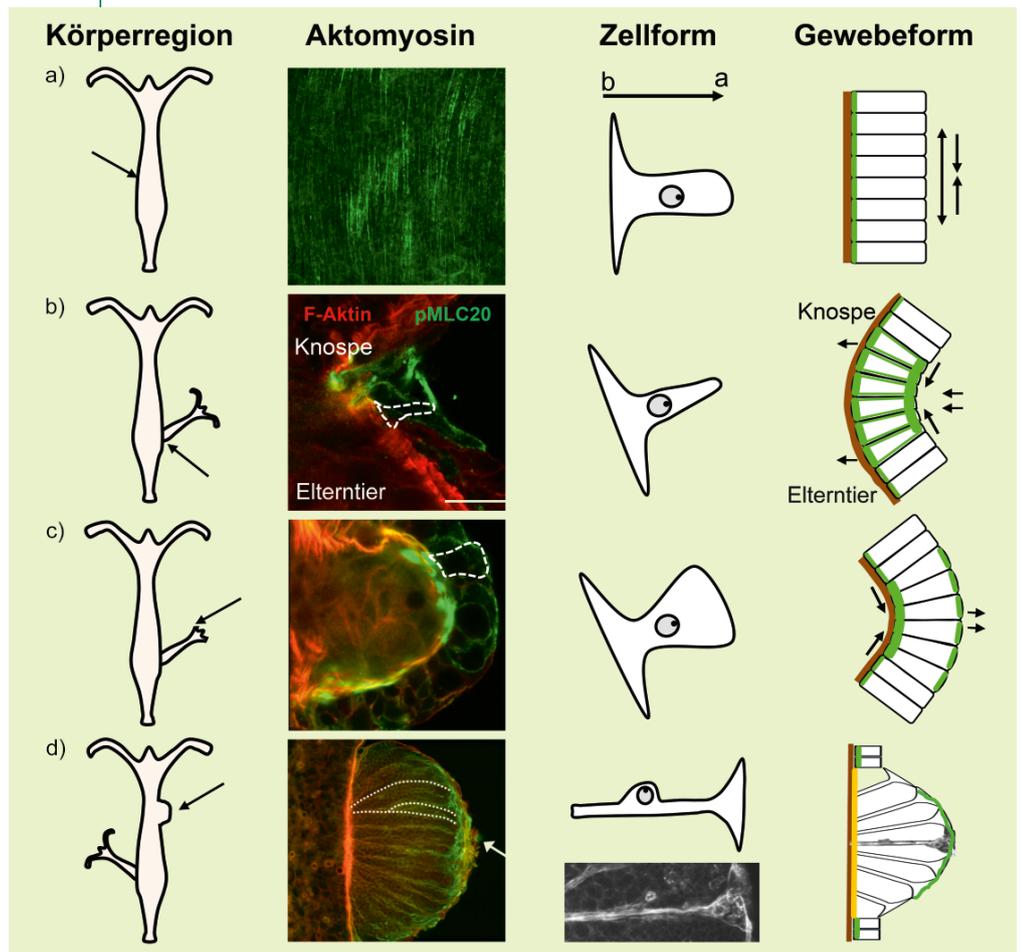
Hydra pflanzt sich vor allem durch Knospung von Jungpolypen am Elterntier fort und die Morphogenese lässt sich hier besonders gut

ABB. 2 | KÖRPERBAU VON *HYDRA* UND NACHWEIS DER MYONEME



a) Schema einer knospenden *Hydra*, b) Struktur der Körperwand und Kontraktionsfähigkeit der beiden Epithelien durch das Aktomyosin der ektodermal längs- und endodermal ringförmig verlaufenden Myoneme, c), d) TRITC-Phalloidin-Färbung der ektodermalen Myoneme und Schema der vernetzten Aktomyosin-Struktur.

ABB. 3 | MORPHOGENETISCH AKTIVE ZONEN ENTLANG DER *HYDRA*-KÖRPERSÄULE



Die differenzielle Akkumulation von F-Aktin (rot) oder dynamischen Aktomyosin-Interaktionen (grün und gelb) wurde mittels TRITC-Phalloidin (rot) und dem Antikörper pMLC20 (grün) nachgewiesen. Bei Kolokalisation ändert sich die Fluoreszenz nach gelb. a) Myoneme der Körpersäule, b) Knospenbasis bei Ablösung des Jungpolypen, c) Bildung der Tentakelknospen, d) Hodenstruktur (ektodermal).

GLOSSAR

Basalmembran: Schicht aus Kollagenen und Glykoprotein-Riesenmolekülen, die sich unterhalb von Epithelzellen findet. Sie wird von den Epithelzellen synthetisiert. Die Basalmembran dient der Zellverankerung, kann aber auch Wachstumsfaktoren und Wegweiser-moleküle binden und freisetzen. Sie wird auch extrazelluläre Matrix genannt, bei *Cnidaria Mesoglea*.

Cytoskelett: Zellskelett, das durch Aktinfasern, Mikrotubuli und Intermediärfilamente (Keratine) gebildet wird.

Eumetazoa: echte Vielzeller, die durch typische (Adhäsions-)Moleküle charakterisiert sind (Schwämme gehören nach derzeitigem Stand nicht dazu).

Morphogenese: Musterbildung.

Myoepithel: Epithel, dessen Zellen als zusätzliche Funktion kontraktile sind.

Proteinkinase: Enzym, das Phosphorylierungsreaktionen durchführt. Hierzu wird ein Phosphatrest aus ATP abgespalten und in verschiedenen Proteinen an die OH-Gruppen von Serin, Threonin oder Tyrosin übertragen. Phosphorylierung kann Proteine aktivieren oder inaktivieren oder sie schafft Bindestellen für weitere Proteine, so dass letztlich ein Signal intrazellulär weitergegeben wird (Signaltransduktion).

Sphincter: ringförmiger Muskel oder ringförmig kontrahierbare (Epithelmuskel-)Zellen.

Subzelluläres Kompartiment: Reaktionsraum innerhalb der Zelle. Es existieren sowohl durch eigene Membranen abgegrenzte Reaktionsräume (Organellen) wie z. B. die Mitochondrien als auch physisch nicht abgegrenzte Reaktionsräume. Letztere entstehen und werden stabil gehalten, indem z. B. lokale Phosphorylierung von Proteinen, gerichteter Proteintransport oder lokaler Proteinabbau Regionen schafft, in denen nur bestimmte Signalsysteme agieren.

verfolgen. In der frühen Phase beult sich Gewebe bei gut gefütterten Polypen unter Kontrolle der nichtkanonischen und kanonischen WNT-Signalwege aus der glatten Körpersäule aus [8, 2], durchläuft das vollständige Musterbildungsprogramm und vier Tage später wird ein kompletter Jungpolyp abgeschnürt (Abbildung 3b). Man sieht an der Fluoreszenz, wie dramatisch das F-Aktin bei der Ablösung vom Elterntier die flankierenden Zellen an der Knospenbasis versteift, während F-Aktin zusammen mit aktiviertem Myosin II an der Konstriktionsstelle im kortikalen Cytoskelett die Verschmälerung der Zellen bewirkt [9]. Auch beim Auswachsen der 3–5 Tentakelknospen bei den Jungpolypen am oberen Ende des Gastralrohrs werden die Zellen über dynamische F-Aktin- und Myosin II-Interaktionen in den Epithelmuskelzellen in Form gebracht (Abbildung 3c). Das auffälligste Beispiel ist aber die stabile Formveränderung von Epithelmuskelzellen, welche die rein ektodermale Hodenstruktur ausbilden (Abbildung 3d). In der Basalmembran verankerte, ektodermale Epithelmuskelzellen strecken sich hier zu schlanken Säulen und bilden eine – nach oben hin geschlossene – Kuppel aus. In den fächerartig angeordneten Zwischenräumen sammeln sich viele hundert determinierte Stammzellen und differenzieren zu Spermien. Die nach außen hin schirmartig verbreiterten Epithelmuskelzellen erfüllen zu Beginn weiterhin ihre Funktion als Deckschicht und platzen nach der Reifung der Spermien auf, um diese frei zu lassen. Auch hier wird wieder sichtbar, wie F-Aktin als stabilisierendes, versteifendes

Element an der Basis der Hoden angelagert wird, während das Aktin-Cytoskelett in der apikalen Region der Hodenstruktur dynamische Interaktionen ausbildet.

Steuerung der Morphogenese – das Beispiel Knospenablösung

Mehrere komplexe, regiospezifisch agierende Signalsysteme sichern die Bildung des *Hydra*-Bauplans und induzieren Strukturbildung [8, 10–12]. Am Beispiel der Knospenablösung wird deutlich, dass Epithelmuskelzellen Signale innerhalb der apikalen und basalen Zelldomänen selektiv beantworten. Die Ablösung von *Hydra*-Jungpolypen wird über mindestens einen der beiden Rezeptoren für Fibroblasten-Wachstumsfaktoren (FGFR) im Zusammenspiel mit dem Grenzen setzenden Notch-Signalweg kontrolliert [9, 13–14]. FGFR können nach Bindung ihrer FGF-Liganden das Signal nur indirekt in eine Zelle hinein übermitteln, da die FGF-Wachstumsfaktoren als geladene Proteine die Zellmembran nicht durchdringen. Notwendig sind daher intrazelluläre Signaltransduktionssysteme, welche selektiv aktiviert werden. Für das Timing der Ablösung ist ein MAPK-Signalweg zuständig [15], und die Signaltransduktion durch einen Rho-Rock-Signalweg auf Myosin II kontrolliert den Ablösungsprozess *per se* [9, 14]. Der experimentelle Weg, der zur Aufklärung der beteiligten Signalsysteme geführt hat, ist in Abbildung 4 zusammengefasst.

Hydra-Knospen lösen sich innerhalb von vier Tagen als komplette Jungpolypen vom Elterntier ab (Abbildung 4a, Reihe nach unten). Nach Spezifikation der Grenze zwischen Elterntier und Knospe unter Kontrolle von Notch *downstream* von FGFR [16] kontrahiert das Gewebe ringförmig. In der späten Phase erzeugt eine starke Ansammlung von dicken F-Aktinfasern, sogenannten Stressfasern, in den Zellen flankierend zur Ablösestelle hohe, stabile Zugkräfte [9]. Jungpolypen lösen sich nicht ab, wenn die Tiere mit dem FGFR-Inhibitor SU5402 behandelt werden, sondern persistieren mit breiter Gewebebrücke am Elterntier (Abbildung 4b und c). Die typischen F-Aktinstressfasern treten dann nicht auf, und das Muster der longitudinalen und zirkulären F-Aktinfasern entwickelt sich entsprechend der neuen Achse von einer Art Kreuzung ausgehend völlig normal in die neue Längsrichtung der sich nicht ablösenden Knospe.

Bei morphogenetischen Bewegungen in der Embryogenese von Wirbeltier und Fliege wird oftmals ein Weg über die GTPase RhoA und die Kinase ROCK genutzt. Bei *Hydra* getestet, verhinderten spezifische Inhibitoren gegen RhoA und ROCK tatsächlich wie schon der FGFR-Inhibitor Su5402 die Knospenablösung (Abbildung 4b und c). Interessant war, dass die Beweglichkeit der Tiere nicht beeinträchtigt wurde, die Myoneme also weiterhin ihr Aktomyosin nutzen konnten. Im Gegensatz zu den selektiven Rho- und ROCK-Kinase-Inhibitoren unterdrückt der generelle Myosin II-Inhibitor Blebbistatin ebenso wie der Inhibitor ML7 gegen *Myosin light chain kinase* (MLCK)

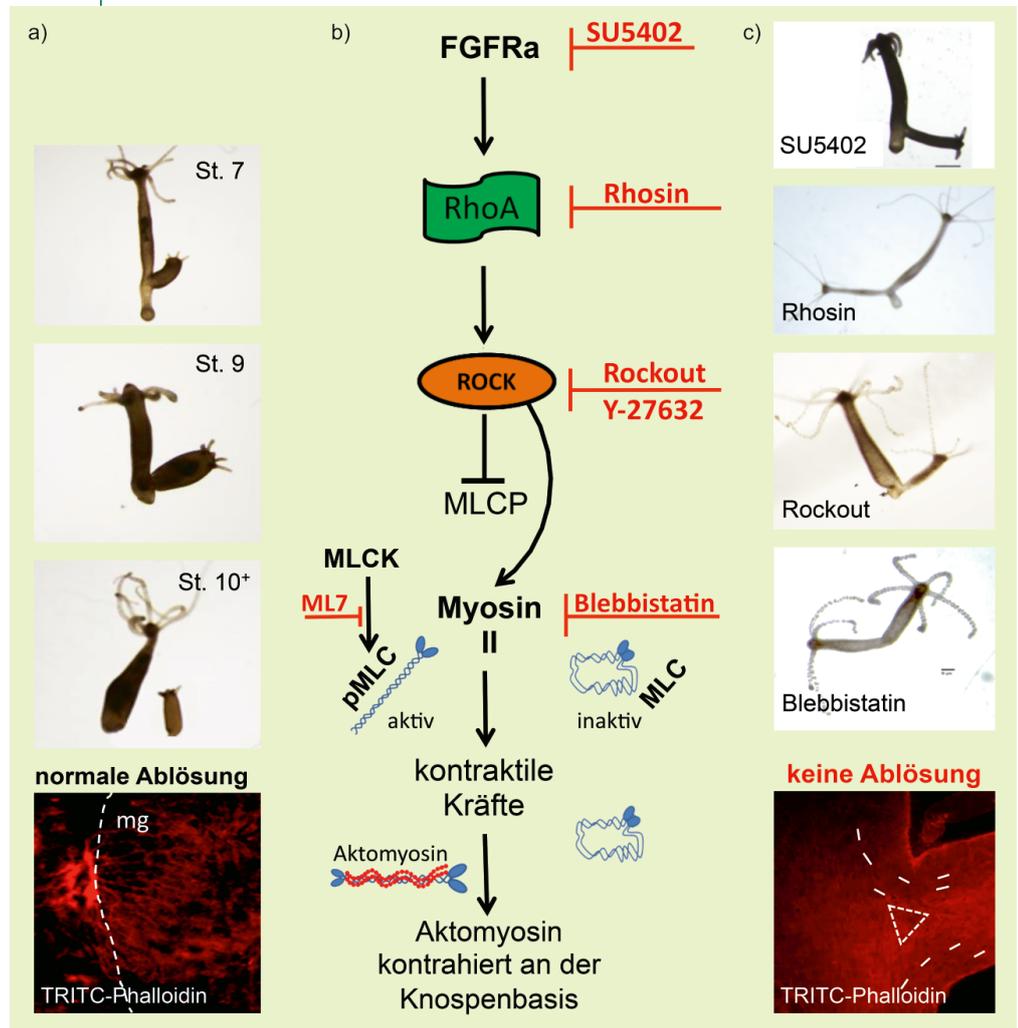
die Beweglichkeit der Tiere komplett und verhinderte parallel dazu auch die Morphogenese. Obwohl also Aktomyosin für Bewegungsvorgänge und für die Morphogenese (hier Knospenablösung) eine Rolle spielt, beantworten Epithelmuskelzellen die entsprechenden Signale differenziell – entweder Richtung Bewegung oder Richtung Morphogenese. Wie wird das molekular geregelt?

Kompartimentierung von Signalsystemen zur Aktivierung des Aktins

Die Kontraktibilität tierischer Zellen wird in aller Regel durch F-Aktin und Myosin II vermittelt. In tierischen Muskelzellen lagern sich fibrilläres Aktin (F-Aktin) und Myosin II mit der phosphorylierten regulatorischen leichten Kette des Myosins zu kontraktile Fasern zusammen (Abbildung 4b). Die Muskulatur kontrahiert dann entweder nach dem Wirbeltier-Skelettmuskeltyp, bei dem ein massiver Calciumeinstrom das Startsignal gibt, oder nach dem Typus der glatten Muskulatur, bei dem eine induzierte Proteinkinaseaktivität (MLCK) die Kontraktion auslöst. Auch wenn die Muskulatur mancher Medusen anatomisch dem Skelettmuskeltyp ähnelt, entspricht die Muskulatur von *Nematostella* und *Hydra* biochemisch dem glatten Muskeltyp [3]. Die offensichtliche Frage ist, wie *Hydra* Signale der Epithelmuskelzellen umsetzt, um eine schnelle Bewegung zu erzeugen – z. B. als Reflex, bei dem das gesamte Tier kontrahiert – oder um langsam und dauerhaft die Form zu verändern und z. B. das Ausstülpfen von Gewebe zu bewerkstelligen.

Subzelluläre Kompartimentierung ist die Lösung. Innerhalb der Epithelmuskelzellen wird eine räumliche Trennung der Signalantwort umgesetzt. Hierbei spielt die subzelluläre Kompartimentierung von Signalelementen eine Rolle (Abbildung 5). Die Zelle reagiert selektiv nur in bestimmten Regionen auf Signale, um eine koordinierte Kontraktion des Körpers oder eben eine Veränderung der Körperform zu erreichen. Das gezielte Ansteuern des basalen (bewegungsrelevanten) und des kortikalen (Morphogenese-relevanten) Aktin-Cytoskeletts wird bei *Hydra* über mindestens zwei unterschiedliche Signalwege erreicht [9]. Beide Wege konvergieren bei der essenziellen Aktivierung der leichten Kette des Myosins II durch Phos-

ABB. 4 | SIGNALWEG ZUR KNOSPENABLÖSUNG

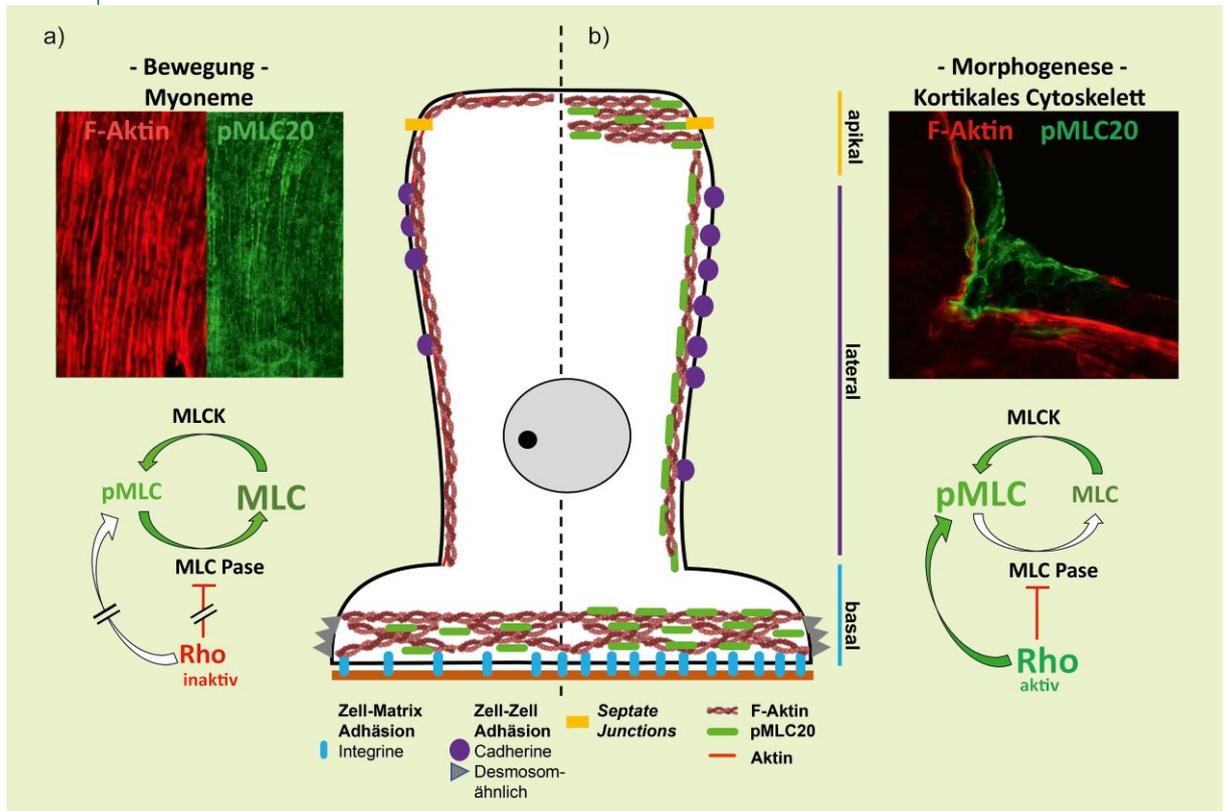


Aufklärung des Signalwegs zur Sicherung der Knospenablösung durch kortikale Aktomyosin-Interaktionen: a) normale Knospenablösung über 10 Stadien mit Akkumulation von F-Aktin an der Ablösestelle, b) Signalweg via Rho-Rock-Myosin II zur Knospenablösung; die Inhibitoren sind rot markiert. Blebbistatin und ML7 inhibieren die Myosin-Phosphorylierung generell. c) Inhibitor-induzierter Phänotyp nichtablösender Knospen; die Zellen akkumulieren kein F-Aktin.

phorylierung über die *Myosin-light-chain-kinase* (MLCK) wie in Abbildung 5a und b dargestellt.

Im Fall der Aktivierung von Aktomyosin-Interaktionen für die Körperkontraktion wird MLCK in den Myonemen, also in der basalen Region der Epithelmuskelzellen, unabhängig von der Aktivität der Rho-GTPase angesteuert (Abbildung 5a). Die regulatorische leichte Kette des Myosins (MLC) wird durch die MLC-Kinase an Serin20 zu pMLC20 phosphoryliert, und die MLC-Phosphatase (MLCP) regeneriert sie in kurzem Zeitabstand durch Dephosphorylierung. Es entsteht eine kurzzeitige Antwort. Die morphogenetischen Aktomyosin-Bewegungen, z. B. während der Knospenablösung (Abbildung 5b), wird hingegen über den in Abbildung 4 vorgestellten, von Rho/ROCK abhängigen Signalweg vermittelt. Hierbei aktiviert der Signalweg via Rho und ROCK die Phosphorylierung der MLC,

ABB. 5 | SUBZELLULÄRE KOMPARTIMENTIERUNG VON SIGNALELEMENTEN



Zwei unabhängige Signalwege aktivieren myonemales und kortikales Aktomyosin bei der Knospenablösung. a) Bei Bewegung phosphoryliert MLCK die regulatorische leichte Kette des Myosins (MLC) kurzzeitig, die MLC-Phosphatase (MLCP) dephosphoryliert pMLC20 und recycelt so das Protein; b) Verteilung des myonemalen (links) und des kortikalen (rechts) Aktin-Cytoskeletts; Morphogenese erfordert dynamische pMLC20- und F-Aktin-Interaktionen sowie flankierend an der Ablösestelle Steifigkeit des Gewebes (F-Aktin alleine). Dies wird über den Rho-Rock-Myosin II-Weg vermittelt, indem Rho die MLCP inhibiert. Fehlt die Dephosphorylierung der leichten regulatorischen Kette, resultiert ein hoher, stabiler Level pMLC20.

gleichzeitig inhibiert Rho die MLCP. Dies erzeugt ein stabil hohes Level an pMLC20 im kortikalen lateralen und apikalen Aktin-Cytoskelett, was die Zellform nachfolgend an der Einschnürungsstelle verändert (Abbildung 5b). Parallel sorgt F-Aktin in den seitlich davon sitzenden Zellen durch Stressfasern für eine Versteifung des Gewebes. Das Aktin-Cytoskelett reagiert hier dynamisch auf Signale, welche die Zellen über extrazelluläre Rezeptoren wie FGFR annehmen und über die beschriebene Signaltransduktionskaskade in das Zellinnere hinein übermitteln.

Damit wird deutlich, dass innerhalb der Epithelmuskelzellen eine klare Arbeitsteilung durch Kompartimentierung vorliegt: Im basalen Teil steuert MLCK, wahrscheinlich auf neuronale Signale hin, die Kontraktion der myonemalen Aktomyosin-Fasern und damit Bewegung. Unabhängig davon phosphoryliert MLCK im oberen (lateralen und apikalen) Teil der Zelle auf morphogenetische Signale hin die MLC und ermöglicht somit Morphogenese, bei der myonemale Aktomyosin-Interaktionen nicht involviert sind. Beide Prozesse werden unabhängig voneinander gesteuert.

Voraussetzung für eine differenzielle subzelluläre Steuerung ist eine strikte subzelluläre Kompartimentierung von Signalsystemen entlang der Längsachse der Epithelmuskelzellen. Wie sich so etwas erreichen lässt, ist zellbiologisches Wissen aus den 1990er Jahren, als Kai Simons am EMBL in Heidelberg die sogenannten *lipid rafts* (Lipidflöße) in der Zellmembran entdeckte [17]. Durch den lokalisierten Einbau von Rezeptoren und weiteren Komponenten eines Signalsystems in *lipid rafts* hält die Zellmembran verschiedene Module vor, die sofort einsatzbereit sind. Diese Komplexe kombinieren zum Beispiel Transmembranrezeptoren für Wachstumsfaktoren mit intrazellulären Gerüstproteinen und Kinasen. Nach Bindung des Signals am Rezeptor wird der Komplex ohne Zeitverzug aktiv, der Rezeptor phosphoryliert intrazellulär Proteine des Komplexes, wodurch neue Bindestellen generiert werden und löst damit lokale Reaktionen aus – wie zum Beispiel die lokale Ausbildung von Aktinstressfasern. *Lipid rafts* wurden bei *Hydra* nicht explizit nachgewiesen, sie existieren aber bei allen anderen darauf untersuchten Tieren. Es ist daher anzunehmen, dass sie auch bei der Morphogenese von *Hydra* eine Rolle spielen.

Zusammenfassung

Für uns ist es selbstverständlich, dass die Körperbewegung vielzelliger Tiere über spezialisierte Muskelzellen bewerkstelligt wird. Studien an heute lebenden Vertretern der ancestralen Tiergruppe Cnidaria (Nesseltiere) lassen allerdings vermuten, dass zu Beginn der Evolution von Tieren multifunktionelle Epithelmuskelzellen die Funktionen von Epithelzelle und Muskelzelle kombinierten. Beim Süßwasserpolyphen *Hydra* sichern innerhalb der nur einlagigen ecto- und endodermalen Epithelien kontraktile, basal verlaufende Fortsätze (Myoneme) von Epithelmuskelzellen die Beweglichkeit des Körpers. Wie in „echter“ Muskulatur vermitteln Aktomyosin-Filamente die Kontraktion. Epithelmuskelzellen steuern zusätzlich auch die Gestaltbildung (Morphogenese), bei der beispielsweise Tentakel als isolierte Strukturen aus der Körpersäule hervortreten. Die Gewebeform ändert sich dabei lokal durch die Änderung der Form einzelner Epithelmuskelzellen, indem Aktomyosin-Interaktionen im Zellkortex stattfinden. Die Doppelfunktion von Aktomyosin bei Körperbewegung und Morphogenese wird durch die Kompartimentierung von Signalsystemen getrennt kontrolliert – entweder werden dynamische Aktomyosin-Interaktionen in Myonemen oder im Zellkortex induziert.

Summary

Multitasking in the ancestral epitheliomuscular cell

For us, it seems natural that motility is brought about by specialized muscle cells in the body of multicellular animals. Studies in extant members of the evolutionary ancestral taxon Cnidaria, however, suggest a different scenario during early evolution with multifunctional epitheliomuscular cells of the body surface combining both the function of an epithelial cell as well as that one of a muscular cell. Within the single-cell layered ecto- and endodermal epithelia of the freshwater polyp *Hydra*, contractile, basally-running elongations (myonemes) of epitheliomuscular cells ensure body movement. And like “true” muscles these cells use actomyosin filaments (myonemes) for contraction. Additionally, epitheliomuscular cells control morphogenesis when e. g. tentacles sprout from the body column as isolated structures. In this case, actomyosin interactions take place within the cell cortex thus changing the shape of the tissue locally due to changes in the shape of single epitheliomuscular cells. Cell and tissue shape changes depend on the activation of actomyosin interactions within the cortical actin cytoskeleton which is located right below the cell membrane. The double function of actomyosin in body movement and morphogenesis is controlled separately – via the compartmentalization of signaling systems inducing dynamic actomyosin-II interactions either in myonemes or in the cell cortex.

Schlagnworte:

Epithelmuskelzelle, Evolution, Cytoskelett, Morphogenese, Zellkompartimentierung

Literatur

- [1] S. M. Jahnel et al. (2014). Development and epithelial organisation of muscle cells in the sea anemone *Nematostella vectensis*. *Frontiers in Zoology* 11, 44.
- [2] R. Aufschnaiter et al. (2011). In vivo imaging of basement membrane movement: ECM patterning shapes *Hydra* polyps. *Journal of Cell Science* 124, 4027–4038. <https://doi.org/10.1242/jcs.087239>
- [3] P. R. Steinmetz et al. (2012). Independent evolution of striated muscles in cnidarians and bilaterians. *Nature* 487, 231–234. <https://doi.org/10.1038/nature11180>
- [4] C. Dupre, R. Yuste (2017). Non-overlapping neural networks in *Hydra vulgaris*. *Curr Biol.* 27(8), 1085–1097. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.02.049>
- [5] J. R. Szymanski, R. Yuste (2019) Mapping the Whole-Body Muscle Activity of *Hydra vulgaris*, *Current Biology* 29, 1807–1817. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.05.012>
- [6] T. Takahashi et al. (2003). Identification of a new member of the GLWamide peptide family: physiological activity and cellular localization in cnidarian polyps. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B* 135, 309–324.
- [7] R. Aufschnaiter et al., (2017). Apical and basal epitheliomuscular F-actin dynamics during *Hydra* bud evagination. *Biol Open.* 15, 1137–1148. <https://doi.org/10.1242/bio.022723>
- [8] I. Philipp et al. (2009). Wnt/ β -Catenin and noncanonical Wnt signaling interact in tissue evagination in the simple eumetazoan *Hydra*. *PNAS* 106, 114290–114295.
- [9] O. Holz et al. (2017). Bud detachment in *Hydra* requires activation of FGFR and a Rho – ROCK - myosin II signaling pathway to ensure formation of a basal constriction. *Dev Dyn.* 246, 502–516. <https://doi.org/10.1002/dvdy.24508>
- [10] S. A. H. Hoffmeister-Ullerich (2001). The foot formation stimulating peptide pedibin is also involved in patterning of the head in *Hydra*. *Mechanisms of Development* 106, 37–45.
- [11] B. Galliot (2013). Injury-induced asymmetric cell death as a driving force for head regeneration in *Hydra*. *Dev Genes Evol* 223, 39–52; <https://doi.org/10.1007/s00427-012-0411-y>
- [12] A. Tursch et al. (2022). Injury-induced MAPK activation triggers body axis formation in *Hydra* by default Wnt signaling. *PNAS* 119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2204122119>
- [13] A. Prexl A et al. (2011) The putative Notch ligand HyJagged is a transmembrane protein present in all cell types of adult *Hydra* and upregulated at the boundary between bud and parent. *BMC Cell Biol.* 12, 38. <https://doi.org/10.1186/1471-2121-12-38>
- [14] O. Holz et al. (2020). Alternative pathways control actomyosin contractility in epitheliomuscle cells during morphogenesis and body contraction. *Dev. Biol.* 463, 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2020.04.001>
- [15] C. Hasse et al. (2014). FGFR-ERK signaling is an essential component of tissue separation. *Developmental Biology* 395, 154–166. <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2014.08.010>
- [16] S. Munder et al. (2010). Notch signalling defines critical boundary during budding in *Hydra*. *Developmental Biology* 344, 331–345.
- [17] K. Simons, J. L. Sampaio (2011). Membrane Organization and lipid rafts. *Cold Spring Harb. Perspect. Biol.* 3:a004697.

Verfasst von:



Oliver Holz, geb. 1988, † 2023, hat in Marburg Biologie studiert und in Zoologie über den Mechanismus der Knospenablösung und die Funktion der Epithelmuskelzellen bei *Hydra* promoviert. Er starb viel zu früh.



Monika Hassel, geb. 1958, lehrt und forscht als Professorin für Morphologie und Evolution der Wirbellosen in Marburg. Sie unterrichtet Funktionsmorphologie, Molekulare Methoden und Marine Entwicklungsbiologie. Ihr Forschungsschwerpunkt liegt auf der Evolution des FGFR-Signalsystems am Modell *Hydra*. Sie ist Mitautorin des deutsch-englischen Lehrbuchs Müller/Hassel/Grealy, Entwicklungs- und Reproduktionsbiologie.

Korrespondenz

Prof. Dr. Monika Hassel
Philipps Universität
Molekulare Zoologie
Karl-von-Frisch-Str. 8
35032 Marburg
E-Mail: hassel@biologie.uni-marburg.de

Projektstandort :metabolon



- | | | |
|--|--|--|
| 1 Besucherparkplatz | 10 Pumptrack (Fahrradstrecke) | 18.1 Waage |
| 2 Bergisches Energiekompetenzzentrum | 11 Recyclingachse | 18.2 Vergärungs- und Kompostierungsanlage |
| 3 Ausstellung „Von linear zu zirkulär“ | 12 Aussichtsplattform „Kegelspitze“ | 18.3 Restmüllumschlag |
| 4 zdi-Schülerlabor | 13 Doppelrutsche | 18.4 Kleinanliefer-Stelle |
| 5 Forschungshalle I | 14 Energielehrpfad | 18.5 Kompostplatz |
| 6 Forschungshalle II | 15 Skybolon | 18.6 Rostaschenaufbereitung |
| 7 Forschungshalle III | 16 Außerschulischer Lernort (Abfall/Recycling) | 19 Demonstrationsbauten „Zirkuläres Bauen“ |
| 8 Forschungshalle IV | 17 Außerschulischer Lernort (Holz/Ressourcen) | ••• Natürlicher Kreislauf |
| 9 Forschungshalle V | 18 aktives Entsorgungszentrum | (Wanderwege; Mountainbike-Strecke) |

ABB. 1 Luftbild-
aufnahme
vom Standort
:metabolon.
Foto: BAV.

Außerschulisches Lernen am Forschungs- und Innovationsstandort :metabolon

Wissenschaft, die Wissen schafft

ANNETTE GÖDDERTZ | MARGA RADERMACHER

Unmittelbar vor den Toren Kölns entstand auf der ehemaligen Zentraldeponie Leppe im Oberbergischen Lindlar der Forschungs- und Innovationsstandort :metabolon (Abbildung 1). Wo früher Müll deponiert wurde, konnte im Rahmen der EU-Strukturförde-

rung eine authentische Lehr- und Lernlandschaft entstehen. Träger des Projektes sind der Oberbergische und der Rheinisch-Bergische Kreis sowie der Bergische Abfallwirtschaftsverband (BAV).

:metabolon ist ein Kunstbegriff, der dem altgriechischen Wort für Stoffumwandlung Metabolismus entliehen ist. Im Jahr 2011 wurde im Zuge der Regionale 2010 die ehemals nicht zugängliche Deponie für das Fachpublikum und die breite Öffentlichkeit geöffnet. Der entstan-

dene authentische Lernort mit seiner umfassenden Vermittlungs- und Forschungsinfrastruktur ist sowohl lokal, regional als auch international ein Referenzort für den Wissenstransfer im Bereich zirkuläre Wertschöpfung und die Erhaltung der natürlichen Rohstoffe. Das übergeord-

nete Ziel ist es, Forschungsergebnisse zielgruppengerecht an die breite Öffentlichkeit zu bringen, um so faktenbasiert für dieses zukunftsrelevante Thema zu sensibilisieren und ein Problembewusstsein zu schaffen.

Lernen darf auch Spaß machen – nachhaltige Freizeitangebote

Ein breites Freizeitangebot, das sich entlang der spezifischen Topografie der Deponie entfaltet, bietet allen Besucher/-innen ein spannendes Vermittlungserlebnis. Auf informative und gleichzeitig unterhaltsame Weise wird der hochkomplexe Sachverhalt „Abfall“ direkt erlebbar gemacht. Schon gleich beim Betreten des 45 Hektar großen Areals lässt die aus Abfall zusammengesetzte Mauer (Abbildung 2) die Vorbeigehenden innehalten und eine Wiederbegegnung mit einer erschreckenden Vielfalt von Weggeworfenem erleben. Eine interaktive Ausstellung zum Thema der zirkulären Wertschöpfung, das Energiekompetenzzentrum und der Energielehrpfad sowie die Recyclingachse, die mit 360 Stufen auf den Gipfel der Deponie hoch oben über dem Bergischen Land führt (Abbildung 3), sind nur einige der lehrreichen Attraktionen. Vom Gipfel geht es dann auf der 110 Meter langen Doppelrutsche wieder hinunter. Rechts und links des Weges sind immer wieder thematische Sichtachsen eingebaut, die die großen Verwertungsanlagen der Deponie erläutern. Zusätzlich säumen die Treppe unzählige Mülltonnen. Die Neugier der Besucher/-innen wird geweckt, da in einigen der Tonnen Informationstafeln zu umweltrelevanten Themen wie etwa „Mülltrennung“ und „Recycling“ angebracht sind. Beim Öffnen der Deckel werden diese einsehbar; in knapper übersichtlicher Form werden Informationen zusammengefasst und eindrucksvolle Bilder sind in die Texte eingefügt. Unter anderem kann nachgelesen werden, wie unsere Vorfahren mit ihren Ressourcen – z. B. Kleidung – umgingen, bevor sie schließlich nach Durchlaufen vieler anderer Verwendungszwecke als Müll entsorgt wurden. Beim Passieren einer Tonne wird sogar eine Stimme hörbar, informiert die Besucher/-innen appellierend und mahnend über die Thematik des Elektroschrotts.



ABB. 2 Kleine Forscherinnen und Forscher vor der Müllmauer, einer künstlerischen Darstellung eingelagerten Abfalls. Foto: BAV.



ABB. 3 Lernort mit Ausblick und Blick auf die :metabolon-Treppe. Der Weg an die „Kegelspitze“ wird von Mülltonnen eingerahmt, die mit audio-visuellen Lehrelementen versehen sind. Foto: BAV.

IN KÜRZE

- Die **ehemalige Zentraldeponie** Leppa im Oberbergischen Lindlar ist heute der **Forschungs- und Innovationsstandort :metabolon**.
- :metabolon ist mit seiner umfassenden Vermittlungs- und Forschungsinfrastruktur ein **Referenzort für den Wissenstransfer im Bereich zirkuläre Wertschöpfung und Erhaltung der natürlichen Rohstoffe**.
- Der **authentische außerschulische Lernort** wendet sich an die breite Öffentlichkeit mit einem großen **informativen Freizeitangebot** und bietet **Lern-Module für Kita-Kinder und alle Schulformen** an.
- Ein besonders eindrucksvolles Beispiel für das **Zusammenwirken von Forschung und Wissenstransfer** gelang mit der TH Köln und :metabolon beim Thema **„Vermeidung von Mikroplastik“** mit der Entwicklung eines **Bildungskoffers** für den Unterricht differenziert nach **Primarstufe** und den **Sekundarstufen I und II**.

ABB. 4 | ZIRKULÄRES WIRTSCHAFTSSYSTEM.

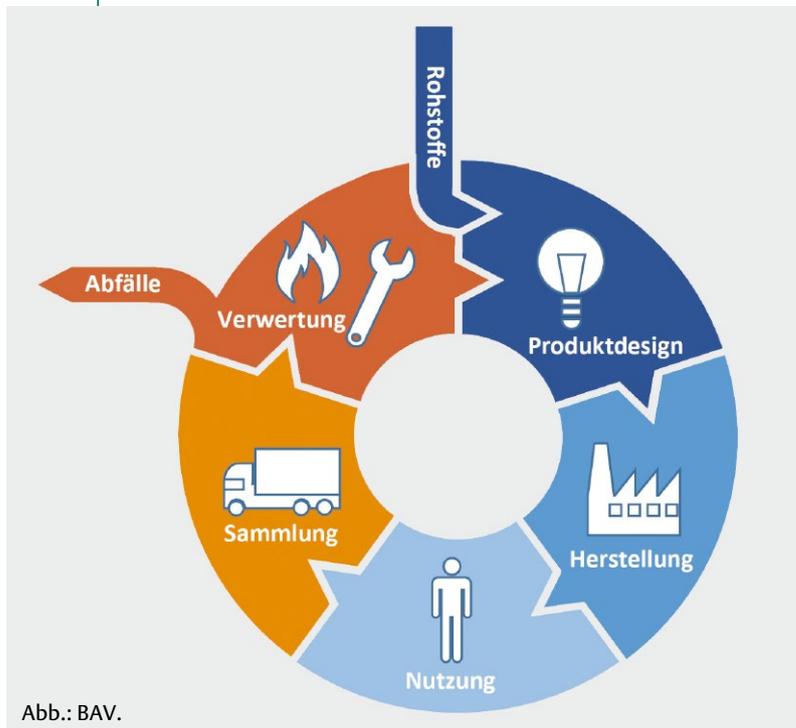


Abb.: BAV.

Der Standort :metabolon hat sich seit seiner Öffnung mehr und mehr als Musterbeispiel für einen nachhaltigen, Wissen vermittelnden Tourismus profiliert. Für die kritische Leserin bzw. den kritischen Leser mag der Eindruck von Entertainment entstehen. Tatsache ist, dass hier auf :metabolon das Kommunikationsprinzip des „Infotainments“ mit großer Expertise auf hohem Niveau umgesetzt wird: Fundierte, umfassende Sachinformation (*information*) und Unterhaltung (*entertainment*) werden eng verknüpft, um so viele Zielgruppen zu erreichen. Differenziert, anschaulich und gut nachvollziehbar erschließt sich die Problematik „Abfall“ mit all seinen Konsequenzen, die niemand vor Augen hat, wenn er oder sie etwas wegwirft. Gleichzeitig wird die Begrenztheit von Ressourcen bewusst gemacht, da wissenschaftliche Fakten überzeugend dokumentieren, dass gehandelt werden muss.

Forschung und Wissenstransfer – Hand in Hand

Gemeinsam mit der Technischen Hochschule (TH) Köln wurde das :metabolon-Institut eigens für die Forschung zur Schonung und Substituierung der endlichen, natürlichen Rohstoffe 2017 gegründet. Sieben Jahre zuvor wurde der Standort auf der ehemaligen Zentraldeponie Leppe auch als Lehr- und Forschungszentrum der TH Köln eingeweiht [1]. Im Fokus der Aktivitäten steht die gesamtheitliche Betrachtung aktueller Fragestellungen zur Entwicklung des momentan vorherrschenden linearen Wirtschaftssystems hin zu einem zirkulären, in dem nahezu alle Ressourcen im Kreislauf geführt werden können (Abbildung 4).

Mittlerweile ist der Standort Sitz zahlreicher Professor/-innen, deren wissenschaftlicher Mitarbeiter/-innen und Studierender. Die Erfahrung beim Zusammenwirken der agierenden Einzelakteure aus den Bereichen Wirtschaft, Wissenschaft und Wissensvermittlung zeigt immer deutlicher, dass es solcher zusammenführenden Konzentrationspunkte dringend bedarf und wenn ein solcher Konzentrationspunkt darüber hinaus noch ein aktiver Wirtschaftsstandort im Bereich der Kreislaufwirtschaft ist, ist dies besonders vorteilhaft. Ein sektorenübergreifendes und interdisziplinäres Arbeiten ist bei der Transformationsanforderung an die gesamte Gesellschaft unerlässlich. Am Standort :metabolon (Abbildung 5) forschen und entwickeln Fachleute aus verschiedensten Bereichen wie



ABB. 5 Forschungshallen mit wissenschaftlicher Infrastruktur. Studierende an den Forschungsanlagen. Fotos: Costa Belibasakis / BAV.

ab. Während der Pandemie konnten deshalb Kurse online stattfinden oder die Lehrkräfte suchten sich gezielt Material für ihren Unterricht aus. Aber auch über die Zeiten der Pandemie hinaus stellte sich die Lernplattform als sinnvolle Ergänzung zu bestehenden Strukturen heraus: Oft erlaubt der Schulalltag beispielsweise nicht, einen ganzen Vormittag außerhalb der Schule zu verbringen. Inhalte, Aufgaben und Materialien bieten auch die Möglichkeit, den Besuch am Lernort vor- und nachzubereiten, Inhalte im Selbststudium zu wiederholen sowie vertiefende Informationen und Aufgaben zu bearbeiten. Sorgfältig achtet das pädagogische :metabolon-Team darauf, dass alle Online-Angebote die Kernlehrpläne/Bildungspläne relevanter Schulfächer im Blick haben.

Teil der Lösung sein – Vermittlung von Selbstwirksamkeit

:metabolon greift Umweltthemen mit der Zielsetzung „Selbstwirksamkeit“ auf und gibt Wissen aus der Forschung und Wissenschaft weiter, so dass auf dieser Basis Handlungsoptionen erörtert und entwickelt werden können. Leitlinien sind dabei die Vermittlung wichtiger Prinzipien wie *reduce* (weniger Abfall erzeugen), *reuse* (mehrfach und länger verwenden), *recycle* (was Neues draus machen) sowie *redesign* (neu denken und anders machen). Auch andere R's werden thematisiert wie z. B. *repurpose* (für einen anderen Zweck verwenden) oder *rethink* (noch einmal darüber nachdenken). So wird eine umwelt- und naturverträgliche Teilhabe im Sinne der Nachhaltigkeit auf :metabolon systematisch und umfassend gefördert, so dass – mit diesem Wissen ausgerüstet – in Entscheidungsfindungsprozessen vor dem Hintergrund von Werten und Normen bewertet werden kann. So sind z. B. spezielle, vertiefende Themenlinien beim Thema stoffliche und energetische Nutzung von regiona-

lem Waldholz (Abbildung 8), Erzeugung von Wasserstoff aus Abfall – durch beispielsweise thermochemische Verfahren – und dessen Nutzung in einer Antriebsbrennstoffzelle sowie das Recycling von Baustoffen erarbeitet worden. Die Einordnung dieser Themen in globale Zusammenhänge wie der Problematik des Klimawandels stellt hierbei eine querschnittende Themenlinie dar. Zudem wird großen Wert auf die Entwicklung und Betonung der Selbstwirksamkeit gelegt. Kinder und Jugendliche sowie Erwachsene sollen durch die Lernortmodule in die Lage versetzt werden, selbst Teil der Lösung der Problematik rund um die Nutzung der endlichen Ressourcen zu werden.

Forschungsergebnisse finden direkt den Weg in Bildung

Ein besonders eindrucksvolles Beispiel für das Zusammenwirken von Forschung und Wissenstransfer gelang mit der TH Köln und :metabolon beim Thema „Vermeidung von Mikroplastik“. In einer Pressemitteilung vom 3. August 2021 [4] heißt es: Um mehr über das Ausmaß von Plastikeintrag in Gewässer zu erfahren, „hat die TH Köln im Rahmen des Verbundvorhabens „Mikroplastik in Binnengewässern (MicBin) – Untersuchung und Modellierung des Eintrags und Verbleibs im Donaugebiet als Grundlage für Maßnahmenplanungen“ das Sickerwasser der Deponie Leppel beprobt.“ Das Ziel: „Die Ergebnisse des Teilprojekts sollen dabei unterstützen, Handlungsoptionen und Lösungsansätze zur Reduktion des Eintrags von Kunststoffen in die Umwelt zu formulieren.“

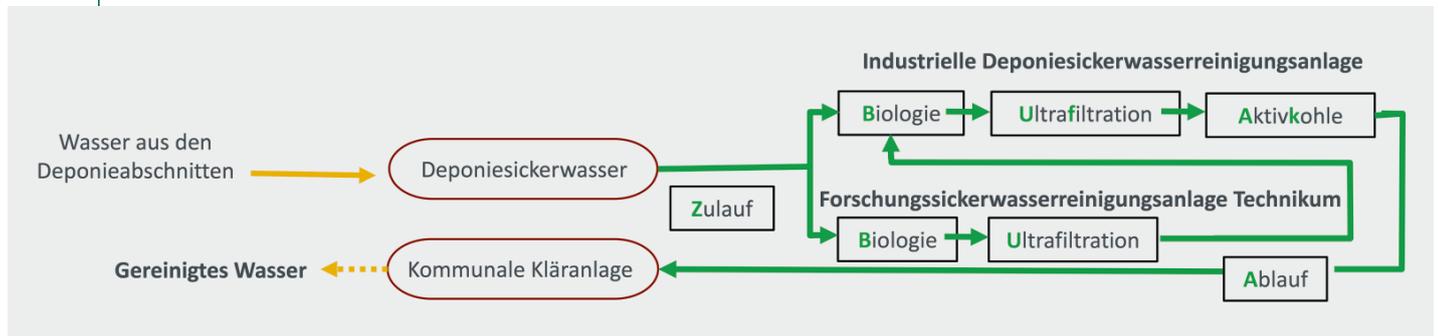
„Die Untersuchung von Mikroplastik stellt eine große Herausforderung dar, weil bisher keine standardisierten Methoden zur Probennahme, Aufbereitung und Analyse existieren“, sagt Prof. Dr. Astrid Rehorek vom :metabolon-Institut der TH Köln. „Ziel von MicBin war es daher zunächst, Methoden und Instrumente zu entwickeln und zu optimieren. Mit Hilfe dieser konnten wir Feldmessungen durchführen, um mehr über Mikroplastik in Gewässern herauszufinden und Maßnahmen abzuleiten, mit denen sich die Belastung mindern lässt.“

Astrid Rehorek ist Chemikerin und Fachwissenschaftlerin für Pathobiochemie an der TH Köln [5]. Ihre Arbeitsgruppe erforscht mit innovativer Prozessanalytik und Prozessanalysetechnik (PRA&PAT) neben anthropogenen Stoffen in der Deponieforschung die Optimierung der Deponiesickerwasserbehandlung am Standort :metabolon (www.metabolon.de). Dieser Deponiestandort mit enger Verzahnung zwischen Abfallwirtschaft (Bergischer Abfallwirtschaftsverband (BAV)) und Forschung (TH Köln und weitere Partner) wurde zu einem Lehr- und Forschungsstandort mit dem Forschungsziel des Schließens von Stoffkreisläufen ausgebaut. Astrid Rehorek war Gründungsdekanin der Fakultät für Angewandte Naturwissenschaften und Geschäftsführende Direktorin des Forschungsinstitutes STEPs (*Sustainable Technologies and Computational Services for Environmental and Production Processes*). Sie ist jetzt im Direktorium des Graduiertenzentrums NRW



ABB. 8 Holz als Rohstoff. Hier ist der Name Programm: Schülerinnen und Schüler zu Besuch im Holzhaus. Foto: BAV.

ABB. 9 | DEPONIESICKERWASSERREINIGUNG



Gezeigt ist ein vereinfachtes Schema zur Deponiesickerwasserreinigung an der Leppe-Deponie Lindlar. Dargestellt sind die „Industrielle Deponiewasserreinigungsanlage“ und die „Forschungssickerwasserreinigungsanlage Technikum“, welche Forschungszwecken dient. Das Besondere ist, dass beide Anlagen mit der gleichen Biomasse und dem gleichen Sickerwasser betrieben werden. Das gereinigte Wasser wird anschließend der kommunalen Kläranlage zugeführt, hierbei spricht man von einer indirekten Einleitung. Grafische Darstellung: Astrid Rehorek, Grafik und Text angepasst und freigegeben von BAV, 26.9.23.

für die Forschungsabteilung „Ressourcen und Nachhaltigkeit“ aktiv.

Ein wissenschaftlicher Auftrag

Zur gezielten Bewältigung der oben genannten Herausforderung mit Blick auf zuverlässige Methoden zur Untersuchung des Mikroplastik-Eintrags erhielt Melinda Zirek (Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Angewandte Naturwissenschaften, Campus Rheinbach, Studiengang Naturwissenschaftliche Forensik) für ihre Bachelorarbeit das Thema „Etablierung einer kontaminationsfreien Probenaufbereitungsmethode zur Erfassung von Mikroplastik in Deponiesickerwasser“ [6] von Astrid Rehorek. „Diese Thesis“ – so heißt es in der Zusammenfassung zu Beginn der Bachelorarbeit – „befasst sich mit Ergebnissen der Probennahme und Analyse von Mikroplastik in Deponiesickerwasser der Deponie „Leppe“ in Lindlar. Im Rahmen dieser Studie wurde Deponiesickerwasser auf die Polymere PP (Polypropylen), PS (Polystyrol) und PE (Polyethylen) mit einer Größen-Obergrenze von 100 µm und einer Untergrenze von 10 µm getestet. [...] Die Analyse des Deponiesickerwassers selbst ergab, dass alle Proben positiv auf Mikroplastik getestet wurden.“

Später wird erklärt, dass die Ursache für das Vorhandensein von Mikroplastikpartikeln darin liegt, dass Wasser durch den abgelagerten Müll der Deponie läuft und dabei Mikroplastikpartikel aufgenommen werden, welche sich im Laufe der Ablagerungszeit zersetzt haben und in kleinere Partikel zerfallen sind. Genau hier setzen Untersuchungen verschiedener Stufen der Aufbereitungsanlage (Abbildung 9) an, die das Sickerwasser vor der Einleitung in die kommunale Kläranlage passiert und geben Aufschluss über den Weg und Verbleib des Mikroplastiks aus der Deponie. Über die hocheffiziente Ultrafiltrationsanlage auf der Leppe-Deponie werden etwaige Verunreinigungen aus dem Deponiesickerwasser herausgefiltert, bevor die vorgeschriebene Einleitung in die kommunale Kläranlage erfolgt.

Schülerversuche mit der Forscher-AG der Städtischen Realschule Gummersbach-Steinberg

Dieser Befund, dass Deponiesickerwasser grundsätzlich vor der weiteren Behandlung mit Mikroplastik belastet sein kann, bewegte die Beteiligten zu einem nächsten Schritt: Sie nahmen Kontakt zum pädagogischen Mitarbeiter des außerschulischen Lernorts (Schülerlabor :metabolon), Marc Härtkorn, auf und eine effiziente und gewinnbringende Zusammenarbeit zwischen Forschung und Bildung begann. Das schulische Netzwerk von :metabolon nutzend nahm Marc Härtkorn Kontakt mit einer Realschule der Region auf. Ein erster Schritt in die Öffentlichkeit erfolgte im Rahmen „Der Deutschen Aktionstage der Nachhaltigkeit¹ 2019“ am 04.06.2019. In dem von den Verantwortlichen gemeinsam verfassten Kurzbericht zur Veranstaltung heißt es: „Zum Thema „Nachhaltigkeit“ fanden im Rahmen des Forschungsprojektes MicBin, das sich mit Quellen und Senken von Mikroplastik in Binnengewässern beschäftigt, am Dienstag, den 04.06.2019, Schülerversuche mit der Forscher-AG der Städtischen Realschule Gummersbach-Steinberg in den Räumlichkeiten des MINT-Labors am Standort :metabolon in Lindlar (Abbildung 10) statt. Ziel der Versuche war es, den Schüler/-innen zu verdeutlichen, bewusst und nachhaltig mit Plastik umzugehen, auch wenn es aus unserem Alltag kaum mehr wegzudenken ist. Neben den Vorteilen, die Kunststoffe bieten, können sie auch zu Nachteilen führen, die innerhalb der einzelnen Versuche deutlich gemacht und thematisiert wurden.“

Marc Härtkorn, der für die Verstetigung der :metabolon-Lernortmodule zuständig ist, schildert die damalige Vor-

¹ Der Rat für Nachhaltige Entwicklung (RNE) hat die Deutschen Aktionstage Nachhaltigkeit (DAN) anlässlich der Weltkonferenz der Vereinten Nationen über nachhaltige Entwicklung (Rio+20) im Jahr 2012 ins Leben gerufen (<https://www.nachhaltigkeitsrat.de/projekte/deutsche-aktionstagenachhaltigkeit/>)



ABB. 10 Schülerversuche mit der Forscher-AG der Städtischen Realschule Gummersbach-Steinberg in den Räumlichkeiten des MINT-Labors am Standort :metabolon in Lindlar. Fotos: BAV.

gehensweise: „Um den Schüler/-innen ein möglichst umfassendes Bild zu den Chancen und Risiken von Kunststoffen und Mikroplastik im Speziellen zu ermöglichen, wurden an Hand verschiedener Modell-Versuche relevante Aspekte der Nutzung und deren Auswirkungen auf die Umwelt untersucht: Den Einstieg bildeten verschiedene Quellen von Mikroplastik mit Fokus auf Kosmetika. Hierfür wurden kleine Proben verschiedener neuer und älterer Kosmetika mit Peeling-Effekt in Teefilter umgefüllt und mit fließendem Wasser gespült, bis nur noch festes Filtrat übrigblieb. Dieses wurde nach dem Trocknen des Filters mittels Fön per Spatel in Petrischalen übertragen und unter Zuhilfenahme einer Lupe untersucht. Mit den vorhandenen Analysemethoden konnte nicht abschließend nachgewiesen werden, ob es sich bei den festen Partikeln um Mikroplastik handelt. Im Hinblick auf die noch nicht abschließend geklärte Fragestellung, welche Auswirkungen die Aufnahme von Mikroplastik auf den menschlichen Körper hat, herrschte Einigkeit diese vorsorglich so weit als möglich zu minimieren und stattdessen besonders in Produkten, die in direkten Kontakt mit unseren Körpern kommen, besser auf alternative Peeling-Partikel zu setzen.

Neben primärem Mikroplastik (z. B. aus Kosmetika) finden Einträge in die Natur auch in Form sekundären Mikroplastiks als Folge des Zerfalls größerer Plastikpartikel (Makroplastik) statt. Dieses Mikroplastik gelangt über ver-

schiedene Wege häufig in natürliche Gewässer. Neben den im Alltag weit verbreiteten Kunststoffen Polyethylen und Polystyrol wurden auch Sand (mineralische Partikel) und Speiseöl (Biofilm) genutzt, um das Zusammenspiel der Materialien in natürlichen Gewässern zu simulieren. So wurde das Schwimm- und Sinkverhalten in Süß- sowie Salzwasser beobachtet und dokumentiert. Die Schüler/-innen erkannten, dass sich die Kunststoffe in verschiedenen Wassermischungen auf Grund ihrer Dichte unterschiedlich verhalten und vereinzelt Partikel sich an den Biofilm anlagern. Dies sind Erkenntnisse, die sich auf Recyclingprozesse übertragen lassen und z. T. auch im Bereich Kunststoffrecycling zur Trennung verschiedener Kunststoffe genutzt werden.

Zu betonen, dass Kunststoffe aber nicht *per se* nur negative Eigenschaften und Folgen mit sich bringen, war für die Lernbegleitung von elementarer Bedeutung. In einigen Fällen existieren keine plastikfreien Alternativen mit gleichwertiger Leistungsfähigkeit. Hinzu kommt, dass Kunststoffe unseren Alltag erheblich erleichtern können. Die Schüler/-innen konnten dies an einem alltagsnahen Beispiel kennenlernen. Superabsorber (*superabsorbent polymers*, SAP) werden unter anderem in Windeln verwendet und sorgen dort für die sichere Aufnahme von Wasser ohne die Gefahr des Auslaufens. Am Beispiel von Polyacrylamid als einem möglichen Superabsorber wurde beobachtet, wie sich dieser unter Zugabe von Wasser verhält und z. B. mit Watte bei Zugabe gleicher Wassermenge verglichen. Während die Watte die Wassermenge nicht aufnehmen konnte, blieb der Superabsorber äußerlich trocken und konnte sogar noch weitere Flüssigkeit aufnehmen.“

Joint Venture – :metabolon, Rotary und VBIO

2018 gab es eine symbolträchtige Aktion des Rotary Clubs (RC) Amsterdam: „End Plastic Soup Now“-Teilnehmer/-innen befreien die Amsterdamer Grachten von Plastikmüll. Schnell weitete sich dieser Aufruf weltweit aus und ist inzwischen eine starke rotarische Bewegung, die auch bestimmte Clubs, die dazu bereit sind, besonders in die Pflicht nimmt. Monika Lichtinghagen-Wirths, seit 2003 Geschäftsführerin des BAV, leitet das Projekt :metabolon und ist wie Marga Radermacher Mitglied im RC Wipperfürth-Lindlar/Romerike Berge. Beide waren sich schnell einig, sich bei diesem Thema einzubringen und zu engagieren. So unterzeichnete im September 2020 Clubpräsidentin Marga Radermacher einen Kooperationsvertrag; der RC Wipperfürth-Lindlar/Romerike Berge wurde damit *Ambassador Club* und verpflichtete sich dazu, zur Vermeidung und Bekämpfung von Mikroplastik in unserer Umwelt in besonderer Weise beizutragen. Durch eine bereits bestehende Kooperation des Lernortes :metabolon mit dem Rotary Club war die Zielsetzung „Bildung“ schnell gesetzt und Marga Radermacher war überzeugt: „Das Projekt, das von holländischen Clubs 2018 begonnen wurde, wollen wir in unserer Region implementieren. Gemein-

sam mit dem außerschulischen Lernort :metabolon haben wir einen starken Partner an unserer Seite und über das Netzwerk :metbolon können wir die Reichweite der rotarischen Aktion *EndPlasticSoup* deutlich erhöhen.“

Es folgte die konsequente Weiterentwicklung der am außerschulischen Lernort :metabolon angebotenen Module, die mit der wissenschaftlichen Arbeit von Melinda Zirek (siehe oben) ihren Anfang genommen hatte. Zusammen mit dem pädagogischen :metabolon-Team und Marga Radermacher als ehemalige Fachdezernentin für Biologie sowie Monika Lichtinghagen-Wirths, Projektleiterin :metabolon, wurden die bestehenden Angebote in ein neues Format, den Bildungskoffer, überführt. Weitere Unterstützung kam von der Chemedidaktik der Universität Osnabrück und dem Verband für Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin (VBIO). Der Bildungskoffer wurde eigens für die Nutzung in der Schule entwickelt und setzt sich mit den Themen Plastik und Mikroplastik in der Umwelt auseinander. Er fußt auf den mit der TH Köln und dem Lernortteam :metabolon entwickelten Inhalten und auf im Schülerlabor durchgeführten Experimenten.

Da der Umweltschutz und somit die Wiederherstellung bzw. der Erhalt intakter Ökosysteme eines der zentralen Themen des rotarischen Handelns darstellt, passte die Thematik perfekt in das Angebot am außerschulischen Lernort :metabolon und ebenfalls in den Unterricht an Schulen. Bei der Entwicklung des Bildungskoffers wurde darauf geachtet darzustellen, dass Plastik nicht grundsätzlich schlecht ist, sondern zu großen Fortschritten in verschiedenen Lebens- und Wirtschaftsbereichen führte. Die Betrachtung liegt vielmehr auf dem übermäßigen Einsatz und der nicht ordnungsgemäßen Entsorgung von sogenanntem Alltags- und Einwegplastik, die Mensch und Umwelt schaden.

Drei verschiedene Bildungskoffer – Warum und was ist das Besondere?

Wie oben schon beschrieben, begleiten uns Kunststoffe in allen Lebenslagen und sind bei vielen wichtigen Produkten nicht wegzudenken – sie erleichtern unseren Alltag in vielerlei Hinsicht. Sie können vielfältig eingesetzt werden und haben zu großen Fortschritten in verschiedenen Lebens- und Wirtschaftsbereichen geführt. Ihre Verwendung ist jedoch insbesondere in den letzten Jahren beinahe ins Unermessliche gestiegen. Nicht ordnungsgemäß entsorgt, befinden sie sich überall in unserer Umwelt und stellen für die Natur und alle Lebewesen eine große Gefahr dar. Im schlimmsten Fall können sie am Ende der Nutzung als Mikroplastik Mensch und Umwelt in erheblichem Maße schaden. Mit dem Bildungskoffer, d. h. den Bildungskoffern, möchte der RC Wipperfürth-Lindlar/Romerike Berge zusammen mit dem außerschulischen Lernort :metabolon, die Mission von *Rotary International* unterstützen und als *EndPasticSoup-Ambassador Club* regional und darüber hinaus – national und auch international – Aufklärungsarbeit, d. h. Bildungsarbeit, zum The-

ma „Plastik und Mikroplastik in der Umwelt“ leisten. Mit Experimenten und dazugehörigen Materialien sowie mit Aufgabenmaterial und Lösungen sowie bereitgestelltem Hintergrundwissen sollen Schüler/-innen einen Einblick in dieses große Themenfeld „Plastik“ erlangen. Die Lehrkräfte können ihren Unterricht vollständig mit den zu den jeweiligen Koffern gehörenden Verlaufsplänen und Materialien gestalten oder auch einzelne Module bzw. Experimente aus den auf Unterrichtszeiten abgestimmten Verlaufsplänen herausnehmen.

Bei der Erstellung der Verlaufspläne wurde eine Vielzahl von für Lehrkräfte wichtige Aspekte berücksichtigt. Dabei ist die Angabe von geschätztem Zeitaufwand einer, aber den Entwicklern war vor allem eine nachvollziehbare Didaktisierung und die Nennung von empfehlenswerten Methoden für die Vermittlung fachlicher Inhalte sehr wichtig. So finden sich neben Vorschlägen zu möglichen didaktischen Leitfragen auch didaktisch-methodische Erläuterungen und Hinweise auf Material, Medien und Methoden. Bei der Erstellung aller Unterrichtsverläufe wurde gezielt darauf geachtet, was die Lehrkräfte laut ministerieller Vorgabe fachlich-inhaltlich tatsächlich – also ohnehin – unterrichten müssen. Zusätzliche Zeit gibt es kaum im Schulalltag – deshalb wurde geschaut, wo das große Umweltthema „Plastikvermüllung und Folgen“ ein geeigneter Kontext ist, um vorgeschriebene fachliche Inhalte kompetenzorientiert zu vermitteln.

Über den Bildungskoffer (Abbildung 11) sollen alle Altersstufen schulischer Bildung erreicht werden. *Awareness* muss ganz früh erzeugt werden. Deshalb wurden adressaten- und bildungsplangemäß drei verschiedene Bildungskoffer entwickelt. Der derzeit gültige Lehrplan für die Primarstufe des Landes Nordrhein-Westfalen im Sachunterricht bildet die Grundlage für die Unterrichtsmaterialien des Grundschulkoffers (Primarstufe). Auf dieser Basis lassen sich die Inhalte problemlos auf alle Bundesländer übertragen und anwenden. Die Unterrichtsmaterialien für den Mittleren Schulabschluss (Sekundarstufe I) und für die Allgemeine Hochschulreife (Sekundarstufe II)



ABB. 11 Der Bildungskoffer. Foto: BAV.

TAB 1. ZENTRALE FACHLICHE INHALTE FÜR DIE FÄCHER BIOLOGIE UND CHEMIE

Primarstufe*	Leben in der Medien- und Konsumgesellschaft / Körper und gesunde Lebensführung / Tiere, Pflanzen, Lebensräume / Stoffe, ihre Umwandlung und Kreisläufe / Energie und Ressourcen
Biologie Sekundarstufen I und II**	Nahrungskette / Nahrungsnetz / Akkumulation von Stoffen in Lebewesen entlang der Nahrungskette / Stoffkreislauf / Ökosysteme / Wirkung von anthropogenen Faktoren / Störungen innerhalb eines Ökosystems / Interdependenzen zwischen Ökosystemen / Populationsökologie / Umweltverschmutzung / Biotopschutz / Naturschutz / Nachhaltigkeit / Biodiversität
Chemie Sekundarstufen I und II**	Stoffe / Strukturen / Eigenschaften / natürliche und synthetische Stoffe / Kunststoffe / aktuelle Technologien / chemische Produkte / moderne Werkstoffe / Rohstoffgewinnung und -verarbeitung / Recycling / Wertstoffkreisläufe / ökonomische und ökologische Aspekte

*Orientierung derzeit gültiger Lehrplan für den Sachkundeunterricht in NRW (01.07.2021)

**Orientierung derzeit gültige Bildungsstandards für die Sekundarstufe I (16.12.2004) und II (18.06.2020)

wurden vor dem Hintergrund der derzeit gültigen und bundesweit geltenden Bildungsstandards sowohl für das Fach Biologie als auch Chemie entwickelt.

Zentrale von den Bildungsplänen (siehe oben) vorgeschriebene fachliche Inhalte für die Fächer Biologie und Chemie (Tabelle 1) können mithilfe der Bildungskoffer auf die Lebensrealität, d. h. auf einen lebensnahen Kontext, übertragen werden. Operatoren-gesteuert werden Arbeitsaufträge formuliert, so dass auch hier die Lehrkräfte mit Blick auf die zu erfüllenden sprachlichen Standards unterstützt werden. Alle Koffer sind so ausgestattet (Tabelle 2), dass in vier Kleingruppen gearbeitet werden kann. In den ausgearbeiteten Unterrichtsverläufen wird zudem in den jeweiligen Unterrichtsabschnitten immer die bildungsstandardkonforme Passung zu Kompetenzen aufgezeigt, die die Schüler/-innen zu bestimmten Abschnitten ihres Schullebens in den Bereichen Sachkompetenz, Erkenntnisgewinnungs-, Kommunikations- und Bewertungskompetenz erwerben sollen. So gewinnen die Schüler/-innen wichtige Grundlagen für die Entwicklung eines kritischen Konsumverhaltens und eines gesundheitsbewussten und umweltverträglichen Handelns sowohl in individueller als auch in gesellschaftlicher Verantwortung.

Bildungskoffer – Zugang zu den Materialien

Mit dem Erhalt eines Bildungskoffers ist der Zugang zu allen für ihn notwendigen Materialien zur Durchführung der Experimente und Aufgaben verbunden. Für den Zugriff auf die Lehrmaterialien und verschiedene Zusatzin-

formationen muss lediglich das pädagogische :metabolon-Team per E-Mail (eps@metabolon.de) kontaktiert werden, so dass bei vorliegender Berechtigung ein Zugang für das E-Learning :metabolon erstellt werden kann. Von dieser Lernplattform können alle Unterlagen zu den Bildungskoffern ganz einfach heruntergeladen werden. Aktualisierungen oder Ergänzungen der Materialien werden ebenso hier hochgeladen und stehen so direkt zur Verfügung. Der Vorteil dieser elektronischen Verfügbarkeit hat sich schon bewährt: So kann schnell nachgesteuert werden, wenn Links nicht mehr funktionieren, neue Zusatzinformationen zum Thema zur Verfügung stehen oder – wie gerade in NRW geschehen – ein neuer Kernlehrplan – hier für die Oberstufe – in Kraft tritt. Während für alle Bundesländer die Bildungsstandards für die Unterrichtsverläufe zu Grunde gelegt wurden, gibt es vom außerschulischen Lernort :metabolon auch NRW-spezifische Vorschläge für die Unterrichtsarbeit, um den ortsnahen Schulen, die mit dem außerschulischen Lernort :metabolon eng verbunden sind, einen besonderen Service zu bieten.

Fortbildungsangebote

Im Rahmen des hier dargelegten Projektes gibt es auch ein flankierendes Fortbildungsangebot für Lehrkräfte und zwar von :metabolon selbst, aber auch von der Universität Osnabrück. Die Fortbildungsangebote vermitteln die Inhalte der Koffer in Form von Workshops praxisnah. Nachfragen zu den Bildungskoffern (eps@metabolon.de) können jederzeit gestellt werden. Auch Hinweise und An-

TAB 2. INHALT DER BILDUNGSKOFFER

Lehr- und Lernmaterialien

Verlaufspläne, Arbeitsblätter, Experimentieranleitungen, Lösungen und Hintergrundwissen zur Nutzung und Anpassung an individuelle Bedürfnisse

Materialien für die Durchführung der Experimente*

Primarstufe	Sekundarstufe I	Sekundarstufe II
– Mikroplastik in Kleidung – Das Windelwunder	– Dichtegradient – die Schwimmprobe – Mikroplastik in Kosmetikprodukten	– Dichtegradient – die Schwimmprobe – Mikroplastik in Kosmetikprodukten – Herstellung von Kunststofffasern

Weitere Materialien

- 22 kleinere Memory-Karten mit Plastikalternativen zu bisher gebräuchlichen Alltagsartikeln
- 10 Bildaufnahmen zur Plastikvermüllung im DIN-A4-Format

* Jeder der drei Bildungskoffer ist so ausgestattet, dass in vier parallelen Kleingruppen gearbeitet werden kann.

regungen sowie gute Quellen zur Erweiterung der eingestellten Hintergrundinformationen werden gerne entgegengenommen.

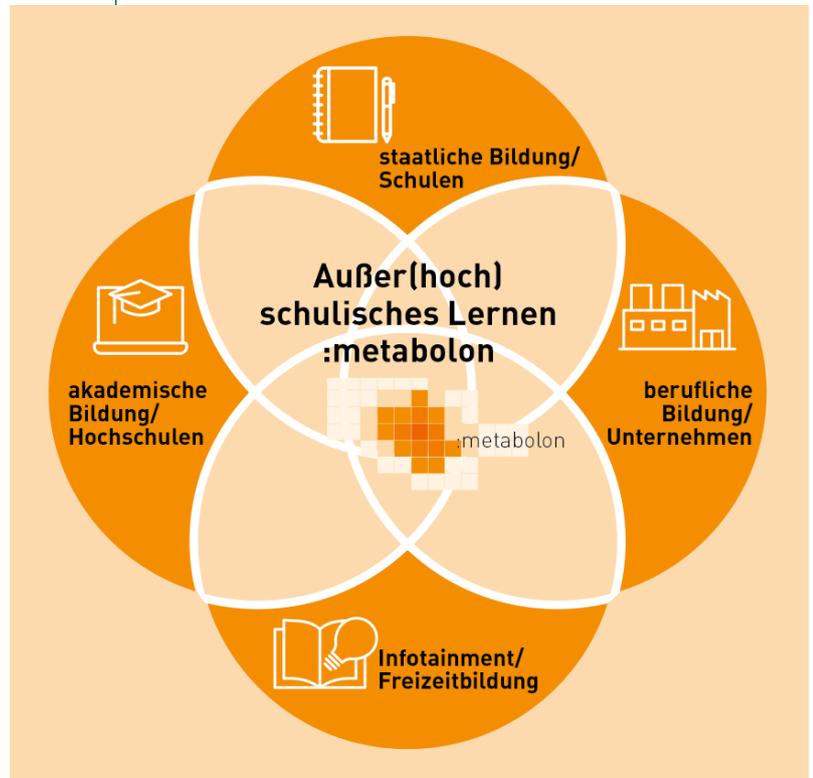
:metablon – Gelenkstelle für sektorenübergreifende Bildung

Die Entwicklung der Bildungskoffer ist nur ein Beispiel für die Arbeit des außerschulischen Lernorts :metablon. Es zeigt in besonders beeindruckender Weise, wie wirksam die räumliche Zusammenarbeit von Forschung und Wissenstransfer sich entfalten kann. Wichtig ist hierbei eine gewinnbringende, konstruktive Kommunikation in Richtung der verschiedenen Akteure und eine gute Projektmoderation und Koordination. Im Rahmen des Projekts MicBin (siehe oben), das mit EU-Mitteln gefördert wird, hatte Astrid Rehorek mit :metablon einen äußerst vorteilhaften Forschungsstandort mit einem Netzwerk an gewinnbringenden Partnern aus Forschung, Bildung und Wirtschaft – ideale Voraussetzungen, um mithilfe vorhandener technischer Voraussetzungen zukunftsorientiert zumindest Teillösungen (vgl. z. B. Bachelor-Arbeit von Melinda Zirek) zur Begrenzung von Umweltschäden beizutragen.

Umweltfragen werden immer drängender, sind gar nicht (mehr) so einfach lösbar, da sie äußerst komplex sind. Ökologisch gesehen sind sie immer auf verschiedenen Systemebenen zu betrachten. Unsere Gesellschaft steht mit Blick auf eine zu sichernde Zukunft auf unserem Planeten Erde, der mit seinen Ressourcen begrenzt ist, vor vielen Fragen. Lösungen müssen gefunden werden und stellen damit Entscheidungsträger vor erhebliche Herausforderungen mit Blick auf soziale Verträglichkeit und wirtschaftliche Folgen/Auswirkungen. Lösungen müssen mit verschiedenen Akteuren angegangen werden: Während die Ökolog/-innen zusammen mit Biolog/-innen aus anderen Disziplinen auf verschiedenen Systemebenen forschen müssen, müssen deren Ergebnisse Eingang finden in konkrete Maßnahmen. Dazu müssen wiederum verschiedene Systemebenen bzw. Sektoren unserer Gesellschaft eingeschaltet werden und in ihren Bereichen verantwortungsvoll agieren, wie es am Beispiel :metablon gezeigt wird.

Forschungsergebnisse werden auf :metablon als öffentliches Gut betrachtet und werden transparent gemacht. Dadurch werden andere mit in die Verantwortung genommen, die aus Unkenntnis bisher keinen Handlungsdruck sahen/sehen. Die oben erwähnte Transformation der Gesellschaft, die zudem seit 2016 mit den 17 Sustainable Goals (SDGs) konfrontiert ist, kann nur mit vielen Akteuren vorangetrieben werden und geht vor allem über Bildung. :metablon als außerschulischer Lernort geht diesen Weg konsequent und greift ein/nimmt teil an Bildung und zwar in all ihren Ausprägungsformen in unserer Gesellschaft (Abbildung 12). :metablon hat längst erkannt, dass Bildung ein zentral wichtiges Instrument ist; sie ist der Schlüssel überhaupt, um möglichst viele zu er-

ABB. 12 | SEKTORENÜBERGREIFENDER WISSENSTRANSFER



Für den sektorenübergreifenden Wissenstransfer in unserer Gesellschaft bilden idealerweise alle Bereiche des Bildungssystems/der Bildungssystemik miteinander Relationen und Schnittstellen. Beim außerschulischen Lernen auf :metablon wird dies konsequent umgesetzt und referenziert auch auf lebenslanges Lernen. Grafik: BAV.

reichen, sie verstehen/begreifen zu machen, dass nachhaltige Entwicklung ein zentraler Ansatz ist, die endlichen Ressourcen der Erde für zukünftige Generationen zu schützen.

Zusammenfassung

Unmittelbar vor den Toren Kölns entstand auf der ehemaligen Zentraldeponie Leppe im Oberbergischen Lindlar der Forschungs- und Innovationsstandort :metablon. Im Rahmen der EU-Strukturförderung konnte hier eine authentische Lehr- und Lernlandschaft entstehen. Träger des Projektes sind der Oberbergische und der Rheinisch-Bergische Kreis sowie der Bergische Abfallwirtschaftsverband (BAV). Mit seiner umfassenden Vermittlungs- und Forschungsinfrastruktur ist :metablon sowohl lokal, regional als auch international ein Referenzort für den Wissenstransfer im Bereich zirkuläre Wertschöpfung und die Erhaltung der natürlichen Rohstoffe. Das übergeordnete Ziel ist es, Forschungsergebnisse zielgruppengerecht an die breite Öffentlichkeit zu bringen, um so faktenbasiert für dieses zukunftsrelevante Thema zu sensibilisieren und Problembewusstsein zu schaffen. Der außerschulische Lernort :metablon hält für jede Altersstufe – von Angeboten für Kita-Kinder und Schüler/-innen aller Schulformen über die Studien- und Be-

ruforientierung bis hin zur Erwachsenenbildung – etwas vor. Am Beispiel der Entwicklung eines Bildungskoffers zum Thema „Plastik und Mikroplastik in der Umwelt“ wird zu dem gezeigt, wie Forschungsergebnisse direkt Eingang in Bildung fanden.

Summary

Extracurricular learning at :metabolon, a location of research and innovation

In the immediate vicinity of Cologne, in the Oberbergischer Kreis, a district in the state of North Rhine-Westphalia, the project :metabolon converted the former central Leppe landfill into a site of research and innovation. Supported by the European Regional Development Fund, an authentic site of education and learning could develop. The Oberbergischer and the Rheinisch-Bergischer Kreis as well as the Bergischer Abfallverband (BAV) are responsible for the project management. Due to its unique infrastructure with regard to research and knowledge transfer :metabolon has developed into a local, regional as well as international reference site of circular economy (circular value creation) and resource protection. The main goal is to communicate research results in a comprehensible way to the public. Based on facts, :metabolon sensitizes to topics of future relevance and creates awareness. The extracurricular place of learning offers a wide range of services, tools and events to choose from. There is something for all age groups. :metabolon addresses preschool children as well as schoolchildren from all the different types of schools. It further offers orientation to career and university studies and it provides adult education. Furthermore, the development of an educational kit on the topic of “Plastic and microplastic in the environment” is described illustrating how research results have directly found their way into education.

Schlagworte

Plastik in der Umwelt, Mikroplastik, Forschung, Wirtschaft, Bildung, Bildungskoffer

Danksagung

Ein herzlicher Dank gebührt Frau Prof. Astrid Rehorek, die uns so umfassend und freundlich unterstützt hat. Ebenso möchten wir uns bei allen Unterstützer/-innen aus dem BAV-Team – insbesondere Herrn Dr. Pascal Beese-Vasbender (Leiter Technik BAV) – und bei Herrn Marc Härtkorn, dem pädagogischen Mitarbeiter des außerschulischen Lernorts :metabolon, bedanken.

Literatur

- [1] https://www.th-koeln.de/hochschule/einweihung-des-lehr--und-forschungszentrums-metabolon_44439.php
- [2] <https://www.bavweb.de/-metabolon/AuBerschulischer-Lernort/>
- [3] [https://www.bavweb.de/-metabolon/AuBerschulischer-Lernort/e-learning-metabolon-/](https://www.bavweb.de/-metabolon/AuBerschulischer-Lernort/e-learning-metabolon/)
- [4] https://www.th-koeln.de/mam/downloads/deutsch/hochschule/aktuell/pm/2021/pm_63_micbin.pdf
- [5] <https://www.bavweb.de/-metabolon/Forschung/Forschungsgemeinschaft/Prof-Rehorek/>
- [6] Melinda Zirek. „Etablierung einer kontaminationsfreien Probenaufbereitungsmethode zur Erfassung von Mikroplastik in Deponiesickerwasser“. Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Angewandte Naturwissenschaften, Campus Rheinbach, Studiengang Naturwissenschaftliche Forensik. 2019

Verfasst von:



Annette Göddertz war für die EU in Brüssel, für das Land NRW sowie private und öffentliche Institutionen zu den Themen Wirtschaft und Wissenschaft, Wissenstransfer, Corporate Social Responsibility sowie Kulturmanagement und -journalismus tätig. Auf das Außenwirtschaftsstudium folgte die langjährige Selbstständigkeit und Mitwirkung bei drei Strukturförderprogrammen des Landes NRW (Regionalen) sowie längere berufliche Aufenthalte im europäischen Ausland. Seit 2012 verantwortet sie die Kommunikation beim Bergischen Abfallwirtschaftsverband (BAV) und systematisierte das außerschulische Lernen und den Wissenstransfer am Standort :metabolon.



Marga Radermacher studierte Biologie und Englisch an der Universität Köln und schloss mit dem Staatsexamen in beiden Fächern ab. Die zweite Staatsprüfung legte sie am Staatlichen Bezirksseminar Düsseldorf I für das Lehramt am Gymnasium ab. Nach mehreren Jahren als Lehrkraft ging sie in die Schulleitung und schließlich wechselte sie als Fachdezernentin für Biologie und Ernährungslehre in die Bezirksregierung Köln; sie nahm auch im Auftrag des Schulministeriums NRW landesweite Aufgaben wahr. Sie ist stellvertretende Vorsitzende des Landesverbandes NRW im VBIO und seit 2018 Sprecherin aller Landesverbände im VBIO und damit Mitglied im Präsidium des VBIO.

Korrespondenz:

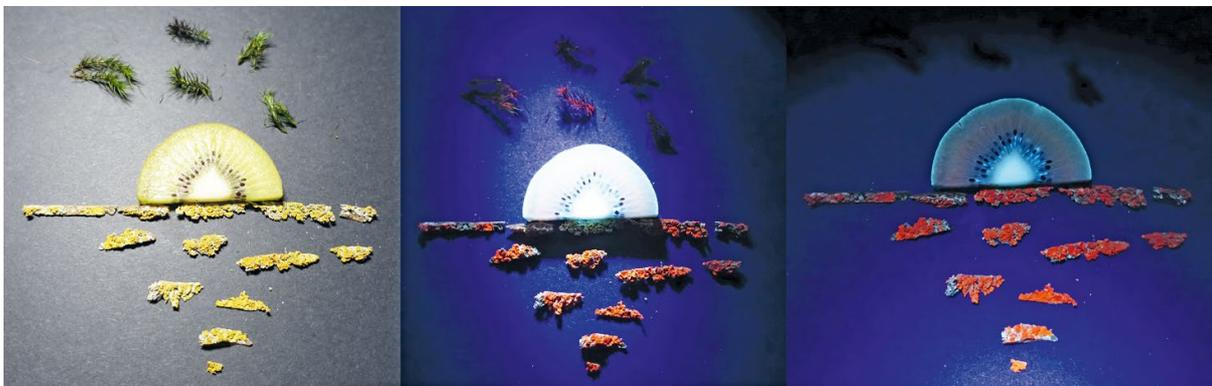
Annette Göddertz
Bergischer Abfallwirtschaftsverband (BAV)
Braunwerth 1–3
51766 Engelskirchen
E-Mail: agd@bavmail.de

Frau LRSD' a.D. Marga Radermacher
Fledermausweg 1
51519 Odenthal
E-Mail: radermhmbat@t-online.de

Faszinierende Fluoreszenzeffekte im Gemüsebeet, im Wald und am Meer

Mit UV-Licht der Natur auf der Spur

ANDREAS KORN-MÜLLER



Man nehme eine UV-Taschenlampe und leuchte damit im Dunkeln im Garten, im Gemüsebeet, im Wald oder am Strand herum. Die Natur bietet ein farbenfrohes Fluoreszenzspektakel und lässt dadurch tiefere Einblicke zu. Der Spaßfaktor kommt aber auch nicht zu kurz.

Im Schein einer einfachen UV-Taschenlampe erstrahlt die Natur in farbenfrohem Fluoreszenzleuchten und macht scheinbar Unsichtbares für unser Auge sichtbar. Bestrahlt man Flora und Fauna mit UV-A-Licht (siehe dazu Kasten „Das elektromagnetische Spektrum“), erlebt man an manchen Orten ein spektakuläres Leuchten. Für die Experimente in diesem Beitrag wurde eine UV-Taschenlampe mit einer Wellenlänge von 365 nm (UV-A) der Marke Alonefire X901UV eingesetzt (ca. 35 €, via USB aufladbar). Bei Versuchen in Innenräumen wurde der Raum verdunkelt, im Freien die Dunkelheit abgewartet. Um die Fluoreszenzeffekte sehen zu können, muss es aber nicht immer stockdunkel sein, auch bei Dämmerung lassen sich viele Leuchterscheinungen gut erkennen.

Was ist Fluoreszenz?

Unter Fluoreszenz versteht man die Emission von Licht, die nur so lange anhält, wie die fluoreszierenden Moleküle durch Lichtabsorption angeregt werden. Mit Hilfe von

Licht nehmen Elektronen eines fluoreszenzfähigen Moleküls Energie auf und werden vom Grundzustand (S_0) in extrem kurzer Zeit von 10^{-13} Sekunden in einen angeregten ▶ Singulett-Zustand (S_2) befördert. Innerhalb von 10^{-11} Sekunden kommt es über ▶ strahlungslose Schwingungsrelaxation und ▶ thermische Äquilibration durch Molekülstöße zu einer Abgabe von Energie in Form von Wärme an die Umgebung. Durch diese *internal conversion* fällt das angeregte Molekül schließlich auf den energieärmsten angeregten Singulettzustand S_1 . Von dort wird der verbleibende Rest der Anregungsenergie beim Übergang von S_1 auf den Grundzustand S_0 in Form von sichtbarem Licht innerhalb von 10^{-8} Sekunden abgestrahlt und als Fluoreszenz bezeichnet [1]. Durch den Energieverlust ist Fluoreszenzlicht im Vergleich zum kurzwelligeren Anregungslicht in den langwelligeren Bereich verschoben – in unserem Beispiel vom für das menschliche Auge unsichtbaren UV-Licht in den Bereich des sichtbaren Lichts. Die Fluoreszenz tritt nur bei gleichzeitiger Beleuchtung auf und ist demnach eine zeitgleiche Lichtemission bei Bestrahlung mit Licht.

Mit Abbildung 1 wird versucht, Schüler/-innen der Unterstufe die Fluoreszenz auf anschauliche, comichafte Weise zu verdeutlichen. Die mündliche Erläuterung zur Abbildung würde beispielsweise so lauten: „Ein mutiges, grünes Elektron klettert mit viel Energie bis auf das 10-m-Brett eines Sprungturms. Dort herrscht aber ein zu großes Gedränge und zu viel Geschubse; zudem traut es sich nicht so recht aus dieser Höhe zu springen. Das Elektron steigt

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 386 erklärt.

DAS ELEKTROMAGNETISCHE SPEKTRUM

Ultraviolettes (UV)-Licht ist kurzwelliger und damit sehr viel energiereicher als blaues, grünes oder rotes Licht. Das weiße Licht, das wir sehen und das sich aus den Spektralfarben Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau und Violett zusammensetzt, erstreckt sich über einen Wellenlängenbereich von etwa 750 nm bis rund 380 nm (siehe Abbildung). UV-Licht wird in drei Kategorien unterteilt: UV-A-Strahlung reicht von 380 bis 315 nm, UV-B-Licht von 315 bis 280 nm. UV-C-Strahlung (280–100 nm) ist noch energiereicher als UV-A- und UV-B-Strahlung, wird aber komplett von der Atmosphäre absorbiert [32]. Grafik: Melvin Müller.

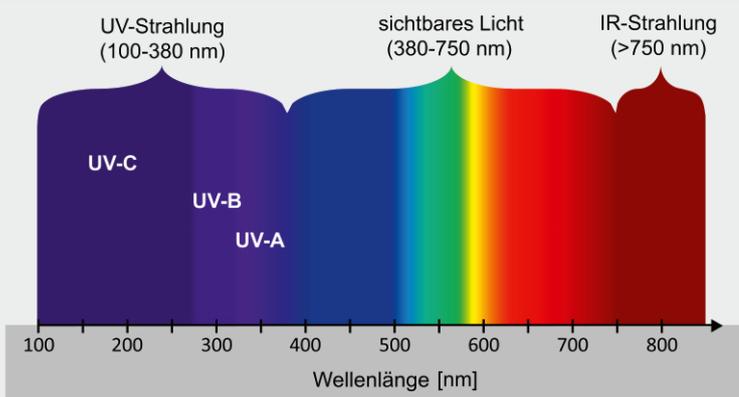
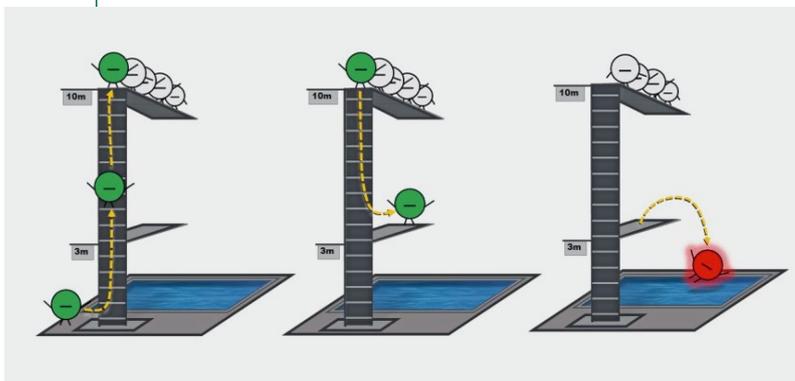


ABB. 1 | ENERGIESTUFENDIAGRAMM DER FLUORESZENZ



Mit Hilfe des anschaulichen Analogiemodells wird die Fluoreszenz auch für Schüler/-innen verständlich. Grafik: Melvin Müller.

IN KÜRZE

- Mit Hilfe einer einfachen UV-Taschenlampe kann man eine **Vielzahl an Fluoreszenzphänomenen** in der Natur beobachten.
- Abendliche **Exkursionen mit UV-Lampen** eröffnen eine neue Sicht auf Flora und Fauna.
- **Farbenprächtiges Leuchten** entdeckt man bei **Gemüse, Obst, Pilzen und Flechten**.
- Am Strand von Nord- und Ostsee fluoreszieren diverse **Meeresalgen, Krabbenpanzer und Muscheln**.

die Leiter wieder herunter bis zum 3-m-Brett und verliert dadurch etwas an Höhenenergie. Das 3-m-Brett hat eine angenehme Höhe und das Elektron springt von dort ins Becken. Mit einem Freudenschrei und hochrotem Kopf gibt es seine übrig gebliebene Energie ab. Wir sehen quasi die „Lichtspritzer“ eines ins Wasser gesprungenen Elektrons.“

Die rote Fluoreszenz des Chlorophylls

Weißes Licht aus einer LED-Lampe oder der Smartphone-Leuchte erzeugt in einer (alkoholischen) Chlorophylllösung eine auffällige rote Fluoreszenz [2, 3]. Bei Einsatz eines Blaufilters kommt dieser Effekt noch deutlicher zur Geltung, weil das gesamte Licht aus kurzwelligem und damit energiereicherem Licht besteht. Zusätzlich wird die Wahrnehmung der Fluoreszenz verbessert. Besonders spektakulär erscheint die rote Fluoreszenz in einem Rund- oder Erlenmeyerkolben mit großer Flüssigkeitsoberfläche (Abbildung 2) [4, 5].

Durch Absorption von Licht gelangen Elektronen im Photosyntheseapparat vom Grundzustand in den angeregten Zustand. Normalerweise nehmen die in der Chloroplastenmembran verankerten Photosynthesesubstanzen diese Elektronen auf und leiten sie kaskadenartig weiter [6]. Dabei werden etwa 80 Prozent der absorbierten Lichtenergie photochemisch genutzt; 19,5 Prozent werden als Wärme an die Umgebung abgegeben und 0,5 Prozent gehen als Fluoreszenzlicht verloren [3]. Da die Chlorophylllösung jedoch keine Chloroplasten enthält oder diese nur zerstört (vom Ethanol denaturiert) vorliegen, funktioniert dieser Prozess hier nicht. Die Elektronen verlieren innerhalb von Picosekunden strahlungslos bis zu 97,5 Prozent der Energie als Wärme und gelangen dann vom angeregten Zustand in den Grundzustand [1]. Dabei geben sie die verbleibenden 2,5 Prozent ihrer Energie als langwelligeres Licht in Form einer roten Fluoreszenz mit einem Emissionsmaximum von 685 nm an die Umgebung ab [2, 3] (siehe dazu auch Kasten „Die Farben des Chlorophylls“). Ein mit weißem oder blauem Licht bestrahltes grünes Blatt, eine Wiese oder grünes Gemüse fluoreszieren zwar auch, die Fluoreszenz macht jedoch nur 0,5 Prozent des eingestrahnten Lichts aus und ist für unser Auge nicht sichtbar oder wahrnehmbar.

Grünpflanzen im UV-Licht

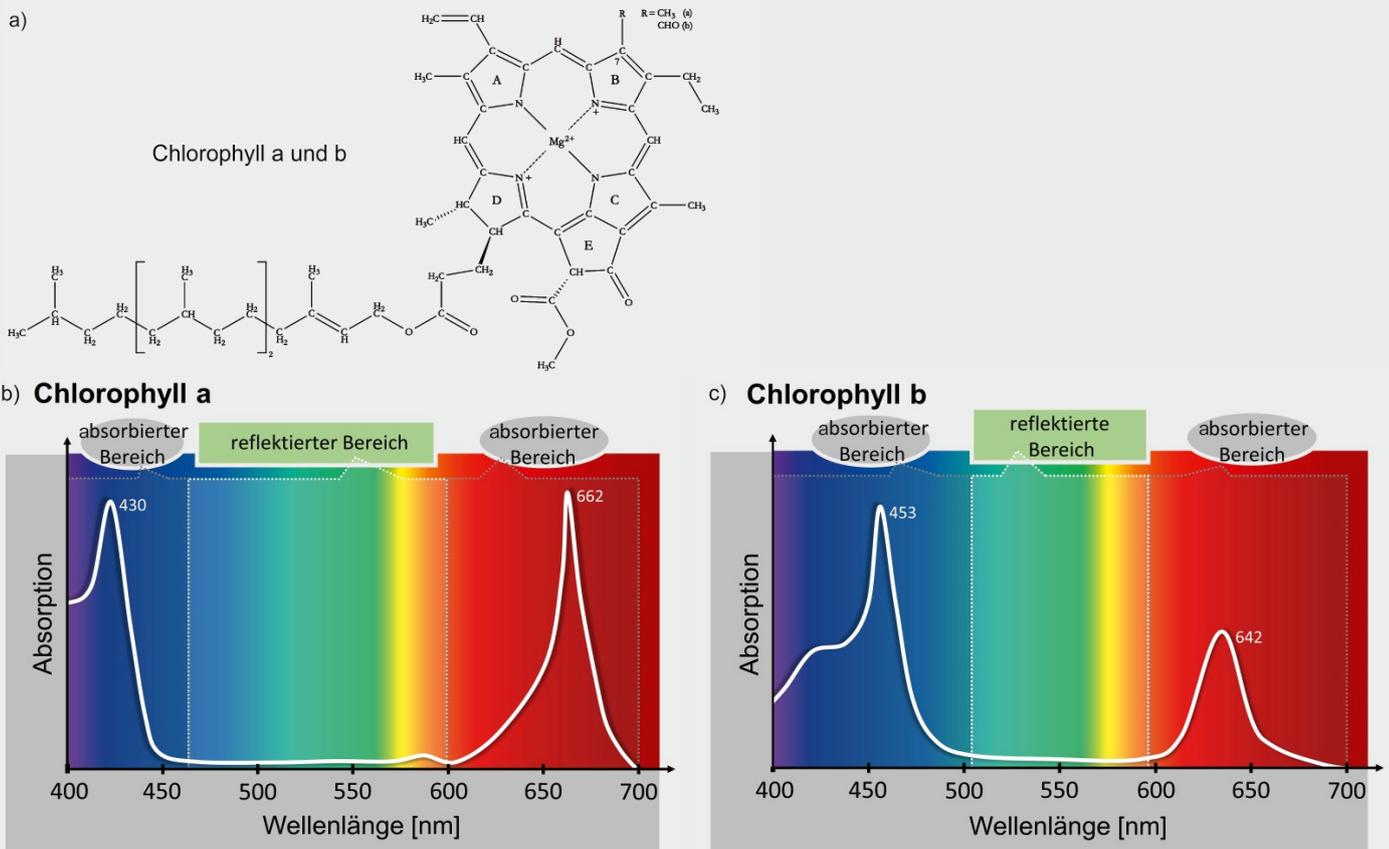
Beleuchtet man nun eine Pflanze mit reinem UV-Licht, erhält sie ein „Zuviel“ an Licht mit kurzer Wellenlänge. Diese „Überdosis“ an Lichtenergie wird die bestrahlte Pflanze durch Abstrahlung von rotem Licht, sprich Fluoreszenzbildung der Chlorophyllpigmente, schnell und unkompliziert wieder los. Das rote Leuchten beruht auf der roten Fluoreszenz des grünen Farbstoffs Chlorophyll. Weißes und blaues Licht sind zu schwach, um die für unser Auge sichtbare Fluoreszenz zu erzeugen. Aber UV-A-Licht der Wellenlänge 365 nm ist energiereich genug, um die Chlorophyllmoleküle anzuregen und sie so zur roten Lichtabstrahlung zu „zwingen“.

DIE FARBEN DES CHLOROPHYLLS

Von den bisher sechs bekannten Chlorophyllvarianten a-f kommen im grünen Pflanzenfarbstoff im Wesentlichen Chlorophyll a und b vor [6] (Abbildung a). Der Begriff Chlorophyll stammt aus dem Griechischen und bedeutet grün (chloros) und Blatt (phylon). Aufgrund seines besonderen Molekülaufbaus ist Chlorophyll ein effizienter Photorezeptor („Lichtaufnehmer“) und gehört zu den effektivsten und stärksten organischen Lichtsammelverbindungen [6].

Chlorophyll a und b absorbieren kein Licht im grünen Bereich, sondern reflektieren es, so dass wir ihre Farbe als grün wahrnehmen. Chlorophyll a (Abbildung b) hat Absorptionsmaxima bei 430 nm (blau) und 662 nm (rot), Chlorophyll b (Abbildung c) bei 453 nm (blau) und 642 nm (rot)

(1 nm = 1 Nanometer = 10^{-9} m = 1 Millionstel Millimeter). Die resultierende Blattfarbe erscheint dadurch bei Chlorophyll a grünblau und bei Chlorophyll b gelbgrün. In einer Studie aus dem Jahr 2015 wurde isoliertes Chlorophyll a und b unabhängig vom Lösungsmittel mit Laseranregung im Vakuum gemessen [33]. Das Ergebnis: Die Absorptionsmaxima sind um 15 bis 60 nm ins kurzwelligere Spektrum verschoben – bei Chlorophyll a liegen sie bei 372 nm beziehungsweise 642 nm und bei Chlorophyll b bei 392 nm beziehungsweise 626 nm. Isoliertes Chlorophyll – ohne die zelluläre Umgebung der Photosyntheseproteine und außerhalb der Hülle (Membran) der Chloroplasten – erscheint demnach bläulichgrün. Die Blätter und Gräser würden wir tatsächlich blauer als gewohnt wahrnehmen. Grafiken: Melvin Müller.



Die rote Chlorophyllfluoreszenz von Nutzpflanzen wird übrigens auch zur Bestimmung des „Gesundheitszustands“ der betreffenden Pflanze verwendet [7]. Mit diesem seit Jahrzehnten bekannten Phänomen lassen sich Stressfaktoren wie Nahrungsmangel, Hitze, Wassermangel oder Schädlingsbefall indirekt messen [8, 9]. Je schlechter es einer Pflanze geht, desto weniger Lichtenergie kann sie in chemische Energie umwandeln und desto heller leuchtet die Fluoreszenz. Heutzutage werden die Fluoreszenzspektren von Masten oder Flugzeugen aus aufgenommen [10]. Zukünftig soll ein Fluoreszenzsatellit der ESA hochaufgelöste Fluoreszenzkarten liefern, um beispielsweise Ernteausfälle oder die globale Vegetation im Klimawandel zu erforschen [11, 12].

Experimente im Grünen und mit Grünem

Falls man tagsüber schöne Moosflächen im Wald oder in einem Park entdeckt, dann sollte man sich diese Stellen gut merken. Bei Dämmerung oder Dunkelheit kommt man zurück an den Fundort und lässt das Moos in herrlichem Rot leuchten. Abbildung 3 zeigt ein Sternmoos-Kissen im Schwarzwald. In Abbildung 4 ist eine Zucchini sowie deren Querschnitt als willkürliches Beispiel von grünem Gemüse im UV-Licht zu sehen. Auch bei Gurken oder Salatblättern tritt die Chlorophyllfluoreszenz auf.

Bei einer grünen Paprika verhält es sich jedoch ganz anders. Die Beschaffenheit der äußeren Schale (Exocarp) einer Paprika ist recht hart und glatt. Das merkt man auch beim Verspeisen von Paprikaspalten, weshalb manche

Genießer ihre Paprikaschoten schälen. Das UV-Licht kann nicht durch die Schale eindringen und wird lediglich reflektiert. Es kommt zu keinem Fluoreszenzleuchten. Die



ABB. 2 Chlorophylllösung im Rundkolben mit weißem Licht (links) und mit blauem Licht (rechts) bestrahlt. Die Lösung fluoresziert intensiv rot. Fotos: A. Korn-Müller.

innen liegenden Zellen können dagegen vom Licht durchdrungen und das darin enthaltene Chlorophyll zur Fluoreszenz angeregt werden. Diesen Umstand kann man für einen kreativ-gruseligen Spaß für Halloween nutzen – und zwar ohne einen riesigen, schweren Kürbis, sondern mit einer handlichen und schmackhaften grünen Paprika: Mit Hilfe einer Hautcurette schabt man eine Halloween-Fratze in die Oberfläche der Paprika, indem man die äußere Schale der grünen Schote bis zum Fruchtfleisch abträgt. Der scharfe Ring der Curette ist dafür sehr gut geeignet. Im UV-Licht leuchtet das Geschnittene blutrot während die „unbehandelte“ Paprika in fahlem graublau erscheint (Abbildung 5). Halloween kann kommen! Anschließend kann man die Vitamin-C-reiche Gruselschote als gesunden Gemüsesnack auch noch verzehren.

Probieren Sie andere Gemüsesorten und Grünpflanzen aus! Allerdings fluoreszieren nicht alle grünen Blätter gleich stark. Es gibt deutliche Unterschiede. Während u. a. Salatblätter, Gurken und Zucchini intensiv rot leuchten, zeigen beispielsweise Tulpenblätter, manche Gräser und Nadelbäume nur eine schwachrote Fluoreszenz. Bei einem beleuchteten Efeu-, Kirschlorbeer-, Salbei- oder Ilexblatt ist mit bloßem Auge so gut wie keine rote Fluoreszenz erkennbar. Das liegt an der unterschiedlichen Beschaffenheit und dem Aufbau der Blätter.



ABB. 3 Schwanenhals-Sternmoos (*Mnium hornum*) im Schwarzwald bestrahlt mit weißem Licht (links) und mit UV-Licht (rechts). Fotos: A. Korn-Müller.

Pilze und Gliederfüßer im UV-Licht

In der Natur gibt es mit einer UV-Lampe viel zu entdecken und zu bestaunen – man sieht die Natur wortwörtlich in einem anderen Licht. Moose, Pilze, Insekten und vieles mehr stechen leuchtend hervor. Die Fruchtkörper mancher Pilze zeigen Fluoreszenzerscheinung, allerdings tritt sie weder bei Champignons oder Steinpilzen noch bei Maronen oder Fliegenpilzen auf. Folgende Pilzarten fluoreszieren dagegen wunderschön: Der Grünblättrige Schwefelkopf (*Hypholoma fasciculare*, Abbildung 6a), der Gemeine Schwefelporling (*Laetiporus sulphureus*, Abbildung 6b) sowie der Rosa Rettich-Helmling (*Mycena rosea*, Abbildung 6c).

Der Grünblättrige Schwefelkopf enthält Hypholomine und Fasciculine, die im UV-Licht grün fluoreszieren [13]. Hypholomin A und B sind gelbliche Pigmente [14],

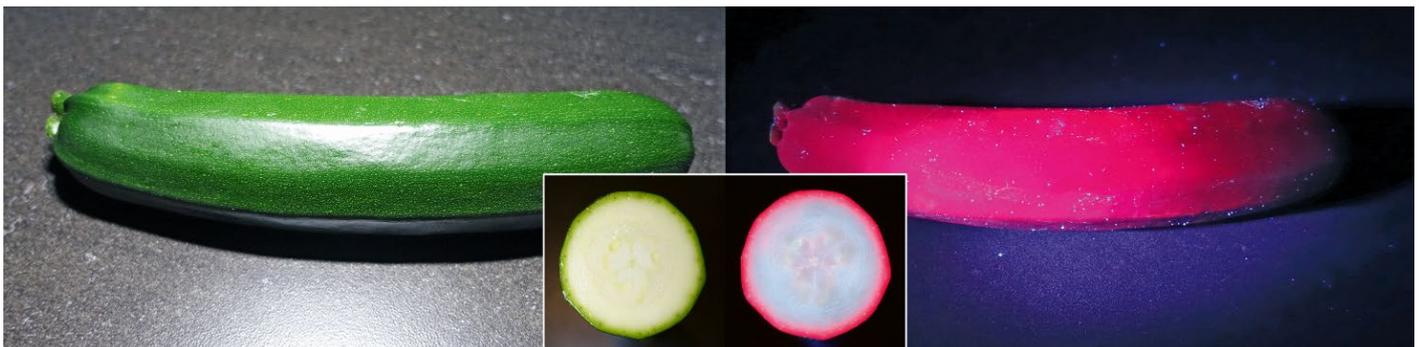


ABB. 4 Eine Zucchini und deren Querschnitt (Inset) bestrahlt mit weißem Licht (links) und mit UV-Licht (rechts). Fotos: A. Korn-Müller.

Fasciculin A und B weisen bis auf eine zusätzliche HC=CH-Doppelbindung die identische Molekülstruktur auf wie die Hypholomine A und B [15]. Die fluoreszenzfähigen Pigmente des Gemeinen Schwefelporlings beruhen auf ähnlichen Strukturen wie die der Schwefelköpfe. Das schönste und atemberaubendste Leuchten zeigt aber der Rosa Rettich-Helmling. Sobald das UV-Licht den Hut im Dunkeln bestrahlt, leuchtet der Pilz in Azurblau auf, als ob er von innen beleuchtet wäre (Abbildung 6c): wie eine angeknipste Lampe mit einem blau schimmernden Schirm. Herrlich! Welche Inhaltsstoffe die wunderschöne blaue Fluoreszenz auslösen, ist bisher nicht bekannt. Es könnte sich um Russopterin und Russulumazin handeln, zwei Pteridin-Derivate [16]. In anderen Pilzarten ist diese Substanzklasse für blaue und gelbgrüne Fluoreszenzeffekte verantwortlich [13]. Die Vielfalt an Inhaltsstoffen ist bei Pilzen enorm und die meisten von ihnen warten noch auf ihre Entdeckung und Strukturaufklärung. Welche Substanzen dabei auch im UV-Licht leuchten, bleibt ebenfalls noch zu entschlüsseln. Einen Einblick in den Molekülreichtum und die Komplexität der Pilzpigmente bietet die Fachliteratur [17].

Auch Kellersasseln (*Porcellio scaber*) leuchten in einem gespenstisch wirkenden blauweißen Licht, wenn sie kurz mit der Lampe angestrahlt werden (Abbildung 7). Verantwortlich dafür ist das Chitin ihres Exoskeletts – ein Polymer aus Acetylglucosamin, das im Aufbau der Cellulose ähnelt, aber deutlich härter und stabiler ist. Es strahlt blaues Licht mit einer Wellenlänge von 440 nm ab.

Fluoreszierende Flechten

Flechten sind eine Lebensgemeinschaft aus zwei Organismen: einem Pilz (Mykobiont) und einer Grünalge (Photobiont, manchmal auch Cyanobakterien) [18]. Mit etwas Glück und Suchen findet man auf Ästen und Baumstämmen die Gewöhnliche Gelbflechte (*Xanthoria parietina*, Abbildung 8a). Sie gedeiht auf nährstoffreichen Rinden und aufgrund der heutzutage guten und SO₂-reduzierten Luft sogar an Straßen- und Parkbäumen, aber auch auf Steinen oder Gartentoren. Der Flechtenpilz enthält den gelben Farbstoff Parietin, ein Anthrachinon-Abkömmling, welcher der Gelbflechte ihr Aussehen und ihren Namen verleiht. Bei Bestrahlung mit UV-Licht fluoresziert Parietin in einem spektakulären Orangerot mit einem Emissionsmaximum bei 610 nm [19, 20]. In der oberen Flechtenschicht eingebettete Grünalgen enthalten natürlicherweise Chlorophyll, so dass es bei UV-Bestrahlung zusätzlich zur roten Fluoreszenz kommt. Allerdings ist diese so schwach, dass sie von der starken Fluoreszenz des Parietins schlicht und ergreifend überstrahlt wird.

Auch die Pigmente der Schwefelflechten fluoreszieren bei UV-Bestrahlung. Schwefelflechten gehören zu den Krustenflechten, sind leuchtendgelb und haben eine feinkörnige, wasserabweisende (hydrophobe) Oberfläche. Sie gedeihen nur in sehr reiner Luftumgebung auf großen Silikat- oder Sandsteinfelsen in feuchten Tälern

wie dem Elbsandsteingebirge. Es existieren vor allem zwei Arten von Schwefelflechten: Die Fels-Schwefelflechte (*Chrysothrix chlorina*) und die Gelbfrüchtige Schwefelflechte (*Psilolechia lucida*) [18]. Letztere ist eher grüngelb und enthält den Farbstoff Rhizocarpsäure [21], während die Fels-Schwefelflechte durch ihr (giftiges) Pigment Vulpinsäure leuchtendgelb hervorsteicht. Sowohl Rhizocarpsäure als auch Vulpinsäure gehören zur Gruppe der Pulvinsäure-Farbstoffe (Lacton-Pigmente), die im Bereich von 550–570 nm fluoreszieren [22].



ABB. 5 „Grusel-Paprika“ mit eingeschnittener Fratze bestrahlt mit weißem Licht (links) und mit UV-Licht (rechts). Fotos: A. Korn-Müller.



ABB. 6 Fluoreszierende Pilze. a) Gemeiner Schwefelporling (*Laetiporus sulphureus*) an einer Eiche in einem Park, b) Grünblättriger Schwefelkopf (*Hypholoma fasciculare*) im Schwarzwald, c) Rosa Rettich-Helmling (*Mycena rosea*) im Schwarzwald. Jeweils links beleuchtet mit weißem Licht und rechts mit UV-Licht. Fotos: A. Korn-Müller.



ABB. 7 Kellerasseln (*Porcellio scaber*) auf der Hausmauer beleuchtet mit UV-Licht. Fotos: A. Korn-Müller.

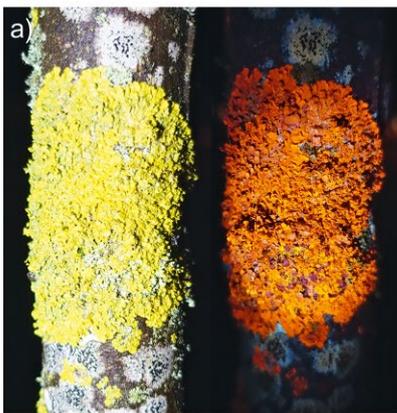


ABB. 8 Fluoreszenz bei Flechten. **a)** Gewöhnliche Gelbflechte (*Xanthoria parietina*) an einem Baum am Straßenrand, **b)** regennasse Gelbfrüchtige Schwefelflechte (*Psilolechia lucida*) auf einer Felspalte im Elbsandsteingebirge, **c)** regennasse Fels-Schwefelflechte (*Chrysothrix chlorina*) auf einem Felsen im Kirnitzschtal im Elbsandsteingebirge. Die Wassertropfen in Abb. c formen sich zu Kügelchen aufgrund des Lotus-Effekts der hydrophoben Flechtenoberfläche. Jeweils links beleuchtet mit weißem Licht und rechts mit UV-Licht. Fotos: A. Korn-Müller.



Abbildung 8b zeigt eine Gelbfrüchtige Schwefelflechte an einem Felsen der Bastei im Elbsandsteingebirge, Abbildung 8c eine Fels-Schwefelflechte im Kirnitzschtal im Elbsandsteingebirge. Das Chlorophyll im sattgrünen Moos in Abbildung 8b fluoresziert blutrot, während das gelbgrüne Pigment Rhizocarpsäure der Schwefelflechte orange leuchtet. Die Wassertropfen auf der hydrophoben Oberfläche erkennt man im UV-Licht aufgrund der bläulichen Reflexion sehr viel besser als im weißen Licht. Aufgrund des Lotuseffekts haben sich die Wassertropfen zu Kugeln geformt. In Abbildung 8c fluoresziert die gelbe Vulpinsäure in Braunorange.

Farbspektakel am Strand

Falls Sie im Urlaub an die Nord- oder Ostsee fahren, kann ich Ihnen empfehlen, eine UV-Lampe mitzunehmen. Was bei einem Nachspaziergang am Strand aussieht wie unscheinbarer Schlamm, entpuppt sich im UV-Licht als farbenprächtiges Schauspiel (Abbildung 9), und graue Krebspanzer mutieren zu einem leuchtenden Kunstwerk der Natur (Abbildung 10). Die folgenden Aufnahmen stammen von der belgischen Nordsee und der deutschen Ostsee.

Auf den Sandbänken der Nordsee stößt man bei Ebbe auf grünbräunlichen Algenschlamm, der bei UV-Bestrahlung spektakulär aufleuchtet. Die winzigen Meeresalgen, die sich im Schlamm der Sandbank angesammelt haben, enthalten Chlorophyll, das im UV-Licht intensiv rot fluoresziert. Bei dem Stück Seetang in Abbildung 9a, das grell orange leuchtet, handelt es sich um Zuckertang, eine Braunalge (*Saccharina latissima*) [23]. Braunalgen enthalten neben Chlorophyll das dunkelrote bis dunkelbraune Farbpigment Fucoxanthin, ein Carotinoid der Gruppe der Xanthophylle [24]. Es ist ein Lichtsammelmolekül, absorbiert Licht im grünen Wellenlängenbereich und macht somit die Photosynthese unter Wasser, wo naturgemäß weniger Sonnenlicht gelangt, effizienter. Im UV-Licht fluoresziert Fucoxanthin mit einer Wellenlänge von etwa 630 nm in leuchtendem Rotorange [24].

Beim Herumleuchten mit der weißen LED-Lampe auf einer Sandbank bin ich auf eine rotviolettfarbene Alge gestoßen (Abbildung 9b). Im UV-Licht fluoreszierte dieses Stück Tang in schönem Orange. Was mich aber am meisten erstaunt hat, ist das plötzliche Sichtbarwerden anderer Algen, die ich im weißen Licht überhaupt nicht wahrgenommen habe. Erst durch die UV-Bestrahlung entpuppte sich die graue Schlammputze als farbenfrohe Ansammlung vieler filigraner Strukturen: Seemoos (*Sertularia cupressina*), auch Zypressenmoos genannt, ist weder Moos oder Alge noch Tang, sondern ein zu den Hydrozoen gehörendes Nesseltier [25]. Dieses buschige Meerestier besteht aus einer Körperhülle aus Chitin mit vielen mehrfach gegabelten Chitinseitenästchen, die sich spiralförmig um den Stamm winden. Am Ende dieser Ästchen sitzen winzige Tentakelkugeln und fangen mit ihren Nesselfäden tierisches und pflanzliches Plankton ein. Normalerweise sitzt das Zypressenmoos fest ver-

ankert auf dem Meeresboden, doch die Schleppnetze der Krabbenfischer reißen es ab und die Meeresströmung befördert es an den Spülsaum. Aufgrund ihrer blassbeigen oder grauen Farbe liegen die Nesseltiere oft unscheinbar im Watt, doch das UV-Licht macht sie als blaue „Palmenwedel“ sichtbar. Beim rotviolettten Stück Tang handelt es sich vermutlich um den Roten Eichtang (*Phycodrys rubens*/*Phyllophora rubens*) [26]. Diese Rotalge enthält ihrem Namen entsprechend rote Pigmente aus der Klasse der Phycobiline, die mit einer Wellenlänge von etwa 585 nm – also orange – fluoreszieren wie beispielsweise das Phycoerythrin [27]. Die kleinen grünen „Fetzen“ stammen von der Gemeinen Darmalge (*Ulva intestinalis*), deren Chlorophyll die typische rote Fluoreszenz zeigt. Im Angespül bin ich zudem auf die Wurmlblättrige Wattalge (*Gracilaria vermiculophylla*) gestoßen, die zu den Rotalgen zählt und deren Farbpigmente ebenfalls aus der Klasse der Phycobiline stammen [28]. Bei UV-Bestrahlung fluoreszieren sie in leuchtend schönem Gelborange mit einer Wellenlänge von etwa 585 nm (Abbildung 9c). Abbildung 9d zeigt einen Algenmix aus einer Braunalge (Palmentang, *Laminaria hyperborea*), einer Rotalge (Roter Eichtang, *Phycodrys rubens*/*Phyllophora rubens*), zwei Grünalgenarten (Meersalat, *Ulva lactuca* und Gemeine Darmalge, *Ulva intestinalis*) sowie das Seemoos (*Sertularia cupressina*).

Am Spülsaum der Sandbänke findet man immer wieder abgeworfene, angespülte Rückenpanzer von Krebsen (Krabben), die im UV-Licht himmelblau fluoreszieren. Abbildung 10 zeigt ein Exemplar, das ich bei einem abendlichen Spaziergang entdeckt habe. Es handelt sich um den Rückenpanzer einer Schwimmkrabbe (*Portunus bolsatus*) [29]. Der Panzer (Cuticula) besteht hauptsächlich aus dem Polysaccharid Chitin (20–30%), dem Strukturprotein Arthropodin bzw. Sklerotin (30–40%) und Kalk (CaCO_3 , 30–50%). Aus dieser „Zementmischung“ entstehen Fasern, die sich in- und übereinander zu extrem harten Platten schichten [30]. Der blaue Leuchteffekt beruht auf dem Vorhandensein von Chitin, das Fluoreszenzlicht mit einer Wellenlänge von etwa 440 nm, sprich blauem Licht, abstrahlt [31]. Allerdings habe ich festgestellt, dass nicht alle gefundenen Krebspanzer im UV-Licht geleuchtet haben. Vermutlich war der Anteil an Chitin in diesen Panzern zu gering.

Die Natur hat neben den hier aufgeführten Beispielen viele weitere Fluoreszenzphänomene zu bieten. Etliche Insekten, Spinnen und Kellerasseln fluoreszieren aufgrund ihrer Chitin-Cuticula. Mineralien wie der Hyalit, der Fluorit und der Calcit leuchten im UV-Licht grün, rosarot bzw. blau. Braune Eier fluoreszieren blutrot und Wasserlinsen erscheinen rotviolett. Eine abendliche UV-Exkursion in den Garten, in einen Park oder Wald oder eine UV-Nachtwanderung am (Urlaubs)Strand lohnt sich – trotz unserer Scheu vor Dunkelheit – auf jeden Fall und ich kann sie nur empfehlen.



ABB. 9 Fluoreszenz bei Meeresalgen. a) Neben den Meeresalgen in Rot leuchtet auf einer Sandbank ein Stück Zuckertang (*Saccharina latissima*) in grellem Orange auf. b) Unscheinbarer Schlamm wird unter UV-Licht bunt: Filigranes Seemoos (*Sertularia cupressina*) fluoresziert blau, ein Stück Rotalge (*Phyllophora rubens*) leuchtet orange und kleinere Fetzen der Gemeinen Darmalge (*Ulva intestinalis*) erscheinen in kräftigem Rot. c) Die Wurmlblättrige Wattalge (*Gracilaria vermiculophylla*) strahlt in schönem Gelborange. d) Algenmix aus Palmentang (*Laminaria hyperborea*), Roter Eichtang (*Phycodrys rubens*/*Phyllophora rubens*), Meersalat (*Ulva lactuca*), Gemeine Darmalge (*Ulva intestinalis*) und Zypressenmoos (*Sertularia cupressina*). Jeweils links beleuchtet mit weißem Licht und rechts mit UV-Licht. Fotos: A. Korn-Müller.

ABB. 10 Durch Häutung abgeworfener Rückenpanzer einer Schwimmkrabbe (*Portunus holsatus*), beleuchtet mit weißem Licht (links) und mit UV-Licht (rechts).
Fotos: A. Korn-Müller.



Zusammenfassung

Mit einer einfachen UV-Taschenlampe kommt man erstaunlichen und beeindruckenden Fluoreszenzphänomenen in der Natur auf die Spur. Neben dem rot fluoreszierenden Chlorophyll in Gemüse, Obst, Pflanzen und Grünalgen stößt man bei Beleuchtung von Rot- und Braunalgen, Panzern von Krebsen, Pilzen und Flechten auf einen farbenfrohen Fluoreszenzmix aus Gelb, Orange, Grün und Blau.

Summary

Tracing nature with the help of UV light

With a simple UV torch (BE)/flashlight (AE) you can discover amazing and impressive fluorescence phenomena in nature. Apart from the red fluorescent chlorophyll in vegetables, fruits, plants and green algae, you come across a colourful mix of yellow, orange, green and blue fluorescence when red and brown algae, crab shells, fungi and lichens are illuminated.

GLOSSAR

Singulett-Zustand: Alle organischen Moleküle wie beispielsweise Kohlenhydrate, Fette, Proteine und Duftstoffe enthalten stets eine gerade Anzahl von Elektronen. Das liegt daran, dass jede Atom-Atom-Bindung über zwei Elektronen vermittelt wird, der sogenannten Elektronenpaarbindung (bei einer Doppelbindung sind es vier, bei einer Dreifachbindung sind es sechs Elektronen). Die gepaarten Elektronen einer Bindung besitzen einen antiparallelen (gegenläufigen) Spin. Unter dem Spin versteht man den Drall (Drehbewegung/Drehimpuls) eines Elektrons. Dieser Spin kann (quantenmechanisch gesehen) genau zwei Werte annehmen: links herum oder rechts herum. Ist die Drehbewegung der beiden Elektronen gegenläufig, so bezeichnet man diesen Zustand als Singulett (S). Das rührt daher, dass solche Moleküle mit einem Magnetfeld nicht reagieren; sie bleiben „Singles“. Im Gegensatz dazu gibt es neben den angeregten Singulett-Zuständen (S1 und S2) auch angeregte Moleküle mit gleichläufigem (parallelem) Spin. Diese befinden sich im so genannten Triplett-Zustand (T), weil sie mit einem Magnetfeld wechselwirken und sich dreifach aufspalten. Bei der Phosphoreszenz spielt dieser Effekt eine wichtige Rolle.

Strahlungslose Schwingungsrelaxation: Regt man ein Molekül mit UV-Licht an, so wird es durch Energieaufnahme in ein höheres Energieniveau katapultiert. In diesem angeregten Zustand schwingt das Molekül hin und her und kann mit anderen Molekülen zusammenstoßen. Dabei gibt es seine Energie an das gestoßene Molekül ab – wie bei zwei aufeinander prallenden Billardkugeln. Dieser Vorgang wird als Schwingungsrelaxation bezeichnet. Relaxation meint Entspannung/Erschlaffung, sprich hier den allmählichen Übergang vom hoch angeregten in einen weniger angeregten Zustand. Da bei diesem Vorgang keine Strahlung entsteht, spricht man von einem strahlungslosen Ablauf.

Thermische Äquilibration: Ein durch UV-Licht angeregtes Molekül kann seine Energie auch als Wärme an die Umgebung abgeben. Dieser Abgleich von angeregter und „abgeregter“ Energie wird als Äquilibration (auch Equilibration) bezeichnet.

Danksagung

Mein Dank gilt Herrn Melvin Müller für die Erstellung der Grafiken und der zusammengeführten Fotos.

Schlagworte:

Fluoreszenz, UV-Licht, Chlorophyll, Farbpigmente, Naturbeobachtung

Literatur

- [1] E. Breitmaier, G. Jung (2012). Organische Chemie, 7. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, S. 570–572.
- [2] G. H. Krause, E. Weis (1991). Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 42, 313–349.
- [3] H. R. Bolhar-Nordenkamp et al. (1989). Die Bestimmung der Photosynthesekapazität über die Chlorophyllfluoreszenz als Maß für die Stressbelastung von Bäumen. *Phyton (Austria)* 29, 119–135.
- [4] A. Korn-Müller (2022). Warum Gras nicht rot leuchtet. *Nachr. Chem.* 70, 18–21.
- [5] L. Urry et al. (2019). *Campbell Biologie*. 11., aktualisierte Aufl., Pearson Verlag Deutschland, Hallbergmoos, S. 260–261.
- [6] J. M. Berg et al. (2018). *Stryer Biochemie*. 8. Aufl., Springer Spektrum Verlag, Heidelberg, S. 661–685.
- [7] K. Smorenburg et al. (2002). Remote sensing of solar induced fluorescence of vegetation, *Proceed. Internat. Symposium on Remote Sensing*. Toulouse, France, 178–190.
- [8] H. K. Lichtenthaler, U. Rinderle (1988). The Role of Chlorophyll Fluorescence in The Detection of Stress Conditions in Plants. *Crit. Rev. Anal. Chem.* 19, S29–S85.
- [9] W. J. S. Downton et al. (1981). Chlorophyll A fluorescence transient as an indicator of water potential of leaves. *Plant Sci. Lett.* 20, 191–194.
- [10] <https://www.sueddeutsche.de/wissen/biologie-da-leuchtet-was-1.4660438> (Stand: 01.08.2023)
- [11] Y. Sun et al. (2017). OCO-2 advances photosynthesis observation from space via solar-induced chlorophyll fluorescence. *Science* 358, 189–194.
- [12] https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/FLEX/New_satellite_to_measure_plant_health (Stand: 01.08.2023)
- [13] D. Weiß, H. Brandl (2013). Fluoreszenzfarbstoffe in der Natur, Teil 1+2. *Chem. Unserer Zeit* 47, S. 50–54 und S. 122–131.
- [14] <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-08-02625?linkSource=TIB> (Stand: 01.08.2023)
- [15] <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-06-00255?searchterm=fasciculine&context=search> (Stand: 01.08.2023)
- [16] <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-18-02123?searchterm=russupteridine&context=search> (Stand: 01.08.2023)
- [17] J. Velisek, K. Cejpek (2011). Pigments of Higher Fungi: A Review. *Czech J. Food Sci.* 29, 87–102.
- [18] V. Wirth, U. Kirschbaum (2017). *Flechten einfach bestimmen*. 2., aktualisierte Aufl., Quelle & Meyer Verlag, Wiebelsheim.
- [19] K. A. Solhaug, Y. Gauslaa (1996). Parietin, a photoprotective secondary product of the lichen *Xanthoria parietina*. *Oecologia* 108, 412–418.
- [20] B. Fernández-Marín et al. (2018). Can Parietin Transfer Energy Radiatively to Photosynthetic Pigments? *Molecules* 23, 1741–1748.
- [21] S. Huneck et al. (1992). Zur Chemie einiger Strauch- und Krustenflechten aus der Türkei, *Herzogia*, 9, 173–179.
- [22] É. Pradayrol et al. (2023). Bioinspired Synthesis of Pulvinic Acids Including Xerocomic Acid and Fluorescence Properties of Bis-lactone Intermediates, *Eur. J. Org. Chem.* 26, e202201152 (1–8).
- [23] R. Reinicke (2011). *Funde am Ostseestrand*. 2. Aufl., Demmler Verlag, Ribnitz-Damgarten, S. 43.

- [24] T. Katoh et al. (1991). Fluorescence properties of the allenic carotenoid fucoxanthin: Implication for energy transfer in photosynthetic pigment systems. *Photosynth. Res.* 27, 221–226.
- [25] <https://www.schutzstation-wattenmeer.de/wissen/tiere/nesseltiere/seemoos/> (Stand: 01.08.2023)
- [26] G. Quedens (2013). *Strand und Wattenmeer*. 10., überarbeitete Aufl., BLV Buchverlag, München, S. 36–37.
- [27] C. C. van der Weij-De Wit et al. (2006). How Energy Funnels from the Phycoerythrin Antenna Complex to Photosystem I and II in Cryptophyte *Rhodomonas CS24* Cells. *J. Phys. Chem. B* 110, 25066–25073.
- [28] W. Rüdiger (1979). Struktur und Spektraleigenschaft von Phycobilinen und Biliproteiden, *Ber. Deutsch. Bot. Ges.* 92, 413–426.
- [29] G. Quedens (2013). *Strand und Wattenmeer*. 10., überarbeitete Aufl., BLV Buchverlag, München, S. 64.
- [30] V. Storch, U. Welsch (2012). *Kurzes Lehrbuch der Zoologie*. 8., neu bearbeitete Aufl., Springer Spektrum Verlag, Berlin Heidelberg, S. 87–88.
- [31] M. D. Rabasovic et al. (2015). Nonlinear microscopy of chitin and chitinous structures: a case study of two cave-dwelling insects. *J. Biomed. Opt.* 20, 016010-1–016010-10.
- [32] C.-D. Schönwiese (2020). *Klimatologie*, 5., überarbeitete und aktualisierte Aufl., Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, S. 29 und 276.
- [33] B. F. Milne et al. (2015). Unraveling the Intrinsic Color of Chlorophyll. *Angew. Chem. Int. Ed.* 54, 2198–2201.

Verfasst von:



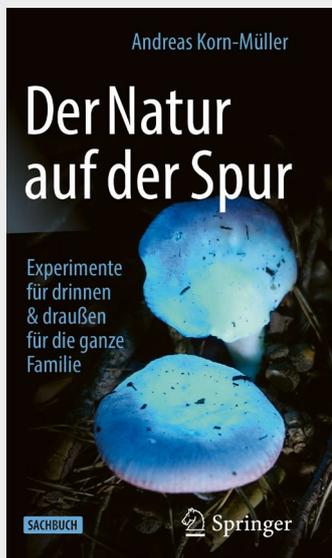
Andreas Korn-Müller studierte in Tübingen Chemie und promovierte 1994 am MPI für Biochemie in Martinsried. Nach einer zweijährigen Post-Doc-Forschung im HIV-Hochsicherheitslabor der LMU München arbeitet er seit 1997 freiberuflich auf dem Gebiet der „Wissenschaftsvermittlung“. Neben diversen Ausstellungen an Museen hat Dr. Korn-Müller bisher acht verschiedene Wissenschafts-Shows entwickelt, die er unter dem Künstlernamen „Magic Andy“ weltweit vor allem auf Science Festivals für Jung und Alt erfolgreich aufführt. Bisher hat er vier (Kinder-) Sachbücher geschrieben.

Korrespondenz

Dr. Andreas Korn-Müller
science comedy
Winterbergstr. 6c
01277 Dresden
E-Mail: show@science-comedy.com



springer.com



A. Korn-Müller
Der Natur auf der Spur
Experimente für drinnen & draußen
für die ganze Familie
2023. 254 S. 194 Abb., 122 Abb. in
Farbe. Mit Online-Extras. Brosch.
€ (D) 17,99 | € (A) 18,49 | CHF 20.00
978-3-662-67397-3
€ 12,99 | CHF 16,00
978-3-662-67398-0 (eBook)

Das Buch

In diesem Buch erfahren Sie und Ihre Kinder mit einfachen Experimenten die erstaunliche Wunderwelt der Natur. Was steckt hinter dem Lotus-Effekt? Mit Kohlrabi-Blättern kriegen Sie es raus. Fleischfressende Pflanzen mit Gummibärchen füttern? Geht! Aber warum? Bestimmen Sie die Luftgüte Ihrer Umgebung, eines Parks oder Waldes mit dem selbst gebastelten Flechtenraster. Schnell werden Sie zum Experten der wunderbaren und nützlichen Flechten. Unsichtbare Mikroorganismen eines Sees werden mit einem Laserpointer als tierisches Gewimmel sichtbar – ganz ohne Mikroskop! Die „dunkle“ Seite der Natur entdecken Sie mit einer einfachen UV-Taschenlampe und lassen Gemüse, Pflanzen, Moose, Pilze, Algen, Krebse und Muscheln in bunten Farben leuchten. Eine rot leuchtende Grusel-Paprika zu Halloween? Ja! Eine erforschende Nachtwanderung am Strand? Hurra! Großer Experimentier-Spaß für Drinnen und Draußen für die ganze Familie. Das Buch ist der ideale Begleiter auf Wanderungen und Urlaubsreisen – damit kommen Sie der Natur ein Stückchen näher. Mit zahlreichen Farbfotos, vielen anschaulichen Grafiken und 14 spektakulären Videos. Also: Ab in die Natur!

Hier direkt bestellen:



oder

Springer Nature Customer Service Center GmbH,
Tiergartenstraße 15 / 69121 Heidelberg
Tel +49 (0)6221 / 345-0 | Fax +49 (0)6221 / 345-4229
customerservice@springernature.com

NACHHALTIGKEIT



Ins Handeln kommen

Das kabarettistisch aufgemachte Vorwort mit bezeichnenderweise Eckart von Hirschhausen im Arztkittel als jemandem, dem die „Gesundheit der Erde“ in Wort und Tat am Herzen liegt, lässt schon ahnen, dass es hier nicht um die übliche, mahnende Lektüre zum besorgniserregenden Zustand der Erde geht – einem drohenden Endzeitszenario, wenn wir nicht umgehend unser ausbeuterisches (Konsum-) Verhalten ändern – sondern dass hier der Leser bei seinen persönlichen Möglichkeiten und Grenzen zum Erhalt der Nachhaltigkeit, dem „größten Abenteuer unserer Zeit“, abgeholt wird. Sofort fällt die ungewöhnliche grafische Aufmachung auf – bunt wie die Natur selbst. Durch diese Reizüberflutung wird bereits ein Spannungsbogen aufgebaut: großzügig gestaltete farbenfrohe Karikaturen, Farbfotos, Schemata, Textseiten mit und ohne Datenmaterial und auch einige Überraschungseffekte. Dieser „optische Fußabdruck“ ist ein passendes Vehikel zum Transport der Botschaften aus den einzelnen Reise-Essays durch die Evolution der Nachhaltigkeit, aufgelockert durch ein Reisetagebuch, das dem Leser das Gefühl des Dabeiseins und der Identifikation ermöglicht. Aktuelles Datenmaterial und die allgegenwärtigen planetaren Grenzen zeigen den Ist-Zustand auf. Dass die Begrenztheit unserer Ressourcen kein neues Menschheitsproblem ist, belegt z. B. der „markige Spruch“ des Ökonomen Niko Paech von 1960: „Es geht nie um Verzicht, sondern um die Rückgabe einer Beute, die wir uns durch ökologische Plünderung angeeignet haben.“ (S. 71). Unterthemen sind die Farbe Grün in der Natur, wirtschaftliche Interventionsmöglichkeiten, Artenrückgang, Stadt- und Waldökologie, Baubiologie, Klimaschutz und als Clou: die potenzielle Rolle der Musik zur Befriedung des Planeten. Eine Reise lebt von ihren



Etappenzielen, hier als Aufruf mit Handlungsorientierung, diese in kleinen Schritten mit eigenverantwortlichem Handeln anzutreten: Mut zur Veränderung auf der Basis von Daten, Fakten und auch mal einer gesunden Portion Humor und Satire.

Christiane Högermann, Osnabrück

Als ich mich auf den Weg machte, die Erde zu retten.

Eine Reise in die Nachhaltigkeit. Eckart von Hirschhausen, Martin Häusler, Scorpio Verlag, München, 2023, 240 S., 38,00 Euro, ISBN 978-3-95803-530-0

PRIMATENFORSCHUNG

Leben in Gefangenschaft

Die afrikanischen Menschenaffen Gorilla, Schimpanse und Bonobo stehen uns Menschen evolutionär sehr nahe. Wir alle haben einen gemeinsamen afrikanischen Vorfahren, der vor rund 9 Millionen Jahren lebte. Unser Wissen über die Menschenaffen ist relativ rezent; die Erkundung der Menschenaffen begann im Wesentlichen im 19. Jahrhundert, als Afrika von Forschungsreisenden intensiver erkundet wurde. Bald danach kamen die ersten Menschenaffen in europäische Zoos, wo sie bis heute eine besondere Attraktion darstellen. Bis vor wenigen Jahrzehnten wurden die Menschenaffen aus der Natur entnommen; dazu wurden in der Regel die Affenmütter mit einem Jungtier erlegt und das verwaiste Jungtier unter oftmals erbärmlichen Umständen an die Zoos in Europa überführt. Viele Jungtiere überlebten diese Strapazen nicht. Die Verantwortlichen in den Zoos haben jedoch bald eingesehen, dass die Entnahme aus der Natur nicht zu verantworten ist und haben weltweit erfolgreiche Nachzuchten der Menschenaffen vorgenommen, so dass heute meist nur noch Tiere aus Nachzuchten gehalten werden.

Der Gorilla Fritz, der vermutlich 1963 in Kamerun geboren wurde, kam 1966 als Wildfang nach Deutschland in den Münchener Zoo Hellabrunn. Die freie Wissenschaftsjournalistin Jenny von Sperber hat die Lebensgeschichte von Fritz im Detail erforscht und mit vielen Zooleuten darüber gesprochen. Fritz lebte bis 1970 in Hellabrunn und wurde dann in den Nürnberger Zoo verschickt, da der dortige Silberrücken-Gorilla gestorben war und man einen Ersatz benötigte. Fritz wurde Vater von sechs Kindern, deren Nachkommen heute in vielen Ländern der Welt leben und ist damit Gründer einer der größten Gorillafamilien, die heute in Zoos leben. Als Fritz in Nürnberg keine Nachkommen mehr bekam, entlieh man ihn kurzzeitig an die Zoos in Berlin und Dvur Králové. Als es auch dort mit dem Nachwuchs nicht mehr klappte, kam Fritz zurück nach Nürnberg, wo er 2018 im Alter von 55 Jahren verstarb.

Jenny von Sperber berichtet nicht nur empathisch vom Leben des Gorilla-Mannes Fritz und seinen Nachkommen, sondern beschreibt, wie Gorillas früher in Afrika gejagt und wie sie anfänglich in Zoologischen Gärten wenig artgerecht gehalten wurden. Das Buch behandelt die grundsätzliche Problematik der Haltung von Menschenaffen in Gefangenschaft und den Erhaltungszuchtprogrammen, wie sie heute durchgeführt werden. Man lernt sehr viel über das Leben der Gorillas aber auch über die Welt der Zoologischen Gärten und der Tierpfleger und Zoodirektoren.

Jenny von Sperber hat ein informatives Sachbuch vorgelegt, das gut zu lesen ist und den Leser auffordert, über die Problematik der Haltung von Menschenaffen in Gefangenschaft nachzudenken.

Michael Wink, Heidelberg

Fritz, der Gorilla.

Biografie eines faszinierenden Menschenaffen. Jenny von Sperber, Hirzel-Verlag, Stuttgart, 2022, 226 S., 20,00 Euro, ISBN 978-3-7776-2969-8.

ORNITHOLOGIE

Kaleidoskop wechselseitiger Beziehungen



Zunächst mag man beim Anblick des Buches an eines der vielen Bestimmungsbücher denken, die der Markt inzwischen so her-

gibt. Doch schon der Untertitel macht skeptisch und lässt vermuten, wo es lang geht. Und in der Tat nähern sich die Autoren sehr vorsichtig ihrem Thema. Die drei einleitenden Kapitel zur Begrifflichkeit – „Was ist ein Waldvogel?“, „Was zeichnet Wälder aus ökologischer Sicht aus?“, „Waldvogel und Mensch“ – dienen der Klärung der Begrifflichkeiten, bevor es in *medias res* geht. In den weiteren Kapiteln wird das Verhältnis der „Objekte“ – es geht um Singvögel im Wald und ihre vielseitigen Beziehungen – synökologisch bzw. autökologisch beleuchtet, zum Wald als Ganzes, zu den Bäumen im Einzelnen sowie die Art und Weise, wie sie miteinander in Beziehung stehen: „Singvögel und Wälder“, „Singvögel und Bäume“, „Singvögel unter sich“. Ein letztes Kapitel versucht schließlich, „Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft“ miteinander in Einklang zu bringen.

An dieser Stelle könnte man nun die rationale Betrachtung abschließen und zur Würdigung des Gesamtwertes kommen. Da würde man dem Anliegen der Autoren jedoch nicht gerecht werden. Sie „wollen neugierig machen auf die Vielfalt der Wechselbeziehungen in der Natur“ und vorab gesagt: Das ist ihnen, zumindest was den Lebensraum Wald angeht, gelungen und natürlich auch für deren auffällige Bewohner.

In dem Buch spürt man die Begeisterung für die Passeriformes, die Sperlingsvögel mit ihren weltweit 6200 Arten, die fast 60 Prozent aller derzeit lebenden Vogelarten ausmachen. Die Erfolgsmodelle der Evolution besiedeln auch heute noch alle Landlebensräume der Erde, von den Küsten bis ins Hochgebirge, Wälder und Wüsten, die Zentren der Großstädte und abgelegene Inseln bis hin zu Galapagos, wie das Beispiel des Kleingrundfinks *Geospiza fuliginosa* von der Insel San Christobal belegt. Dabei sind Wälder ein wichtiger, wenn auch längst nicht der wichtigste Lebensraum für Vögel: Immerhin ist die Mehrzahl der etwa 10.000 Vogelarten auf der Erde mehr oder weniger an Wälder gebunden. Am Beispiel von 55 Arten mitteleuropäischer Vögel, die in wesentlichen Teilen ihres Lebenszyklus eine Bindung an Baumbestände aufweisen, werden die engen Beziehungen der Vogelwelt zu ihrer unmittelbaren Umwelt dargestellt. Die Ausführungen ergänzen Fragen der Kulturgeschichte und des Wandels der Einstellungen zu den Gefiederten, die durch historische Aufnahmen belegt werden. Wer weiß denn schon, dass in Bad Bergzabern um 1900 mit Blasrohren Jagd auf Bergfinken gemacht wurde („Böhämmerjagd“), der Vogelfang im Salzkammergut und die Finkenmanöver im Harz 2010 bzw. 2014 in die UNESCO-Liste des immateriellen Kulturerbes aufgenommen wurden und selbst der botanische Artname für die Eberesche *Sorbus aucuparia* sich aus „au“ (avis = Vogel) und „cuparia“ (capere = fangen) zusammensetzt.

Den vielfältigen Wechselbeziehungen entsprechend ist auch der Inhalt aufbereitet. Kurzcharakteristiken im „Steckbrief“-Format für Vögel und Gehölze lockern die Darstellung auf, ohne sie zu überfrachten. Wissenschaftliche Begrifflichkeiten wie „Ringspezies“ und „Endemismus“ sind ebenso wie Verfahren, etwa die „Analyse stabi-

ler Isotope“, als Stichwortkästchen eingestreut. Hinweise „Zum Weiterlesen“ machen auf interessante Quellen und übersichtliche Darstellungen aufmerksam, z. B. was die Verteilung von Neststandorten, bevorzugte Nahrungsregionen, aber auch den Entwicklungszyklus der Mistel angeht. Sie alle machen die Textausführungen anschaulich, nicht zu vergessen die zahlreichen Abbildungen, mit denen nicht gespart wurde.

Alles in allem handelt es sich um ein vielseitiges Werk, das für jede Altersgruppe etwas zu bieten hat und der Ornithologie als der *Scientia amabilis* so manchen Neuzugang bescheren dürfte. Es ist jedoch bedauerlich, dass das „Geschwisterpaar“ Orpheus- und Gelbspötter immer nur gestreift wurde. Im „Zukunftskapitel“ hätte es Gelegenheit gegeben, näher auf die Arealausweitung einzugehen und aufzuzeigen, dass Wechselbeziehungen zwischen Arten und Arealausweitungen nichts Statisches sind, sondern ein Prozess *in progress*. Aber dennoch, *summa summarum* ist das Buch ein interessantes aktuelles Kaleidoskop, das aufzeigt, dass neben Spechten, Auerhuhn und Co. auch die Passeriformes nicht unwesentlich das Betriebssystem des Waldes am Laufen halten. In der Tat sind Vögel mehr als nur „ein Haken auf der Beobachtungsliste und Wälder nicht nur ein Standort für Bäume“. Wer möchte da widersprechen?

Wilhelm Irsch, Reblingen-Siersburg

Singvögel im Wald.

Einblicke in eine erfolgreiche Lebensgemeinschaft. Robert Pfeifer und Olaf Schmidt, Aula-Verlag, Wiesbaden, 2023, 272 S., 24,95 Euro, ISBN 978-3-89104-854-2.

ORNITHOLOGIE

Vogelfreund werden



Wer gerne durch Gärten und Parks spaziert, wird immer wieder gefiederten Besuchern begegnen, die durch ihren typischen Gesang oder ihr Feder-

kleid auffallen. Und so stellt sich bei der wiederholten Begegnung die Frage, mit wem man es zu tun hat. Was für Laien ein kurzweiliges Hobby ist, kann der Wissenschaft wertvolle Informationen zu Verbreitung und Vogelzug liefern. Vogelsichtungen durch Privatleute erhalten so einen hohen Stellenwert.

Der Bestimmungsführer von Anita Schäffler macht es Einsteigern leicht. Nach einer kurzen Einführung zu den verschiedenen Lebensräumen der heimischen Vogelwelt werden 30 Vogelarten vorgestellt, denen man bei uns häufig begegnet oder die – wie der Kuckuck – einfach zu bestimmen sind. Jeder Art ist eine Doppelseite gewidmet: Ein kurzer Text beschreibt die typischen Kennzeichen zu Aussehen sowie Lebensweise und erklärt Besonderheiten des Verhaltens (z. B. Gesang und Flug). Kleine Piktogramme zur Färbung sowie Hinweise zu Beobachtungssituationen und zu ähnlichen Arten helfen schnell bei der Artdiagnose. Das gelingt auch Dank der vielen schöne Portraitfotos. Bereichert wird der handliche Band im Taschenformat durch kleine doppelseitige Einschübe zu Vogelfarben, -fütterung, -zug, -schutz, -stimmen und -verhalten.

Der vorliegende Band vermittelt Neulingen die Freude an der Vogelbeobachtung: Jung und Alt werden schnell die Standardarten in der Nähe menschlicher Behausungen erkennen, egal ob Rotkehlchen,

Stockente oder Mäusebussard. Zum Schluss wird der Leser nochmal motiviert, seine Beobachtungen an Vogelkundler weiterzugeben, damit die Tiere besser geschützt werden können. Denn jeder schützt am liebsten das, was er kennt!

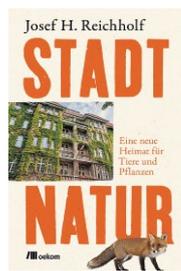
Pascal Eitner, Maisach

Vogelbestimmung für Einsteiger.

30 Arten einfach erkennen. Anita Schäffler, Verlag Quelle & Meyer, Wiebelsheim, 2020, 104 S., 9,95 Euro, ISBN 978-3-49401-813-3

STADTÖKOLOGIE

Neue Lebensräume



Tier- und Pflanzenwelt unserer Ortschaften und Städte rücken immer häufiger in den Fokus der Biologen, Ökologen und Naturschützer. Während man einen

massiven Rückgang der Biodiversität im Bereich der intensiv genutzten Agrarlandschaft feststellen kann, sieht die Situation im Ökosystem Stadt deutlich besser aus. Insbesondere Ortschaften und Städte mit Gärten und Parkanlagen entwickeln sich immer mehr als Rückzugsorte für Tiere und Pflanzen, die früher im Agrarland oder in Forsten zuhause waren. Das Ökosystem Stadt liefert für viele Tierarten ausreichend Nahrung und Lebensraum. Voraussetzung ist jedoch, dass sich diese Arten an das neue Umfeld anpassen können. Das können erstaunlich viele Arten, wenn auch nicht alle – vor allem die Spezialisten nicht.

Die Untersuchung der Urbanisierung wird immer aktueller und viele Forschungsprojekte, u. a. auch Citizen-Science-Projekte, erforschen die Biologie und Ökologie der Tiere

und Pflanzen in Städten. Diesem hochaktuellen Thema ist das Sachbuch von Prof. Dr. Josef Reichholf gewidmet, der bereits schon früher ein Buch zu diesem Thema veröffentlicht hat. Reichholf ist ein wohlbekannter Biologe und Sachbuchautor, dem es gelingt, komplexe Themen kurz und verständlich für ein breiteres Publikum aufzubereiten.

Die „Stadtnatur“ ist in fünf Kapitel unterteilt. Kapitel 1 führt leicht verständlich in die Thematik der Urbanisierung ein, während man in Kapitel 2 Einzelheiten zu den gut untersuchten Stadtbewohnern erhält wie Stadtvögel, Säugetiere, Schmetterlinge und Pflanzen. In Kapitel 3 versucht Reichholf zu begründen, warum das Ökosystem Stadt einen neuen Lebensraum für viele Organismen bietet. Themen umfassen den Strukturreichtum der Städte und den damit verbunden Randliniennoteffekt, Abwesenheit von Verfolgung und Nahrungsverfügbarkeit (u. a. durch Fütterung). Städte weisen jedoch auch Gefahren für viele Arten auf, beispielsweise das Risiko, überfahren zu werden oder gegen Scheiben zu fliegen. Aber auch Hauskatzen, Hunde und direkte Verfolgung können die Biodiversität in Ortschaften reduzieren. In Kapitel 5 erfolgt eine Bewertung der Urbanisierung, die Reichholf als besonders positiv hervorhebt, da sie seiner Meinung nach zeigt, dass Mensch und Natur eine gemeinsame Zukunft haben. Josef Reichholf hat mit diesem gut lesbaren und kompetenten Sachbuch eine wichtige kurze Einführung in die Stadtökologie vorgelegt, die hoffentlich viele Leserinnen und Leser finden wird.

Michael Wink, Heidelberg

Stadtnatur.

Eine neue Heimat für Tiere und Pflanzen. Josef Reichholf, Oekom-Verlag, München, 2023, 172 S., 24,00 Euro, ISBN 978-3-98726-053-3.

AUSSERSCHULISCHE LERNOORTE

Bildung für die Zukunft im *Future Space*

„Lernen und Erkunden – für die Zukunft, für alle“ ist das Motto, mit dem der *Future Space* seit Juni 2022 mitten in der Kasseler Innenstadt Kindern, Jugendlichen, Lehrkräften und allen interessierten Bürger/-innen einen Ort bietet, um sich naturwissenschaftlich, aber auch mathematisch-philosophisch zu bilden und auszutauschen. Angeboten werden Unterrichtseinheiten für ganze Schulklassen von der Grundschule bis zum Abitur, Lerninseln mit kleinen Experimenten zum Erkunden, Angebote für Gruppen, Vortragsreihen und viel Raum, um zusammenzukommen und gemeinsam zu lernen, zu entspannen und zu diskutieren.

Was macht gute Bildung aus? Dieser Frage widmete sich das Gründerteam vor gut drei Jahren, als der *Future Space* noch eine Vision für einen Ort des „besseren Lernens“ war. Das *Future Space*-Team bestehend aus Lehrkräften, Wissenschaftlichen Mitarbeiter/-innen, Studierenden, Schüler/-innen und Unternehmer/-innen gelangte immer mehr zur Überzeugung, dass die selbstbestimmte und selbstständige Erforschung und Erkundung der Welt ein essenzieller Bestandteil von guter Bildung ist. Die Lernenden müssen sich mit unserer Welt und mit allem, was darin enthalten ist, in Beziehung setzen. Wenn sie in der Lage sind, sich Wissen eigenständig anzueignen und selbstständig Zusammenhänge verstehen können, dann sind sie auch dazu befähigt, die Welt um sich herum mitzugestalten.

Unser heutiges Bildungssystem ist eines der besten, das wir je hatten. Und doch geht es besser. Unsere Lehrer/-innen in den Schulen leisten jeden Tag Großartiges, dabei wollen wir sie unterstützen und das vor allem dort, wo sie an Grenzen stoßen. Mit Blick in die Zukunft stehen Schulen und Unternehmen vor neuen Herausforderungen: Viele Jobs, die wir jetzt noch gar nicht kennen können, werden in den nächsten Jahrzehnten entstehen. Unser Bildungssystem muss sich hier anpassen, um die Herausforderungen meistern zu können. Hierfür

hat das *Future Space*-Team ein Bildungskonzept entwickelt, das auf fünf Säulen aufgebaut ist:

Autonomie – Jugendliche können sich eigenständig und selbstbestimmt den Unterrichtsstoff aneignen.

Soziale Eingebundenheit – Menschen lernen gemeinsam und unterstützen sich dabei gegenseitig.

Kompetenzen – Die Lernenden lernen eigenständig Probleme zu lösen und erleben sich dabei kompetent.

Einbindung von Lehrpersonen und Schulen – Wir arbeiten gemeinsam mit Lehrkräften und Schulen

BESUCHERINFORMATION

Future Space
Wilhelmsstraße 2
34117 Kassel

Öffnungszeiten:
Mo – Fr: 10:00 – 18:00 Uhr,
Lerngruppen nach Voranmeldung ab
8:00 Uhr
Sa, So, Feiertage: 14:00 – 18:00 Uhr,
Zusätzliche Sonderveranstaltungen

www.futurespace.org
Tel: +49 561 499 44 745
E-Mail: info@futurespace.org
Alle Angebote sind kostenlos.

und ergänzen auf diese Weise ihre Arbeit.

Gesamtgesellschaftliche Teilhabe – Die Weiterbildung muss nicht nach der Schule enden. Der *Future Space* ist ein Ort, an dem Menschen jeden Alters gemeinsam lernen und sich vernetzen.

Der *Future Space* (Abbildung 1) bietet sozusagen eine „Wissens-Tankstelle“ für alle Bildungshungrigen von 6 bis 99, die sich gerne mit Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik (MINT) beschäftigen – wobei wir MINT viel lieber als *Mut, Innovation, Neugier* und *Tatendrang* gelesen sehen.

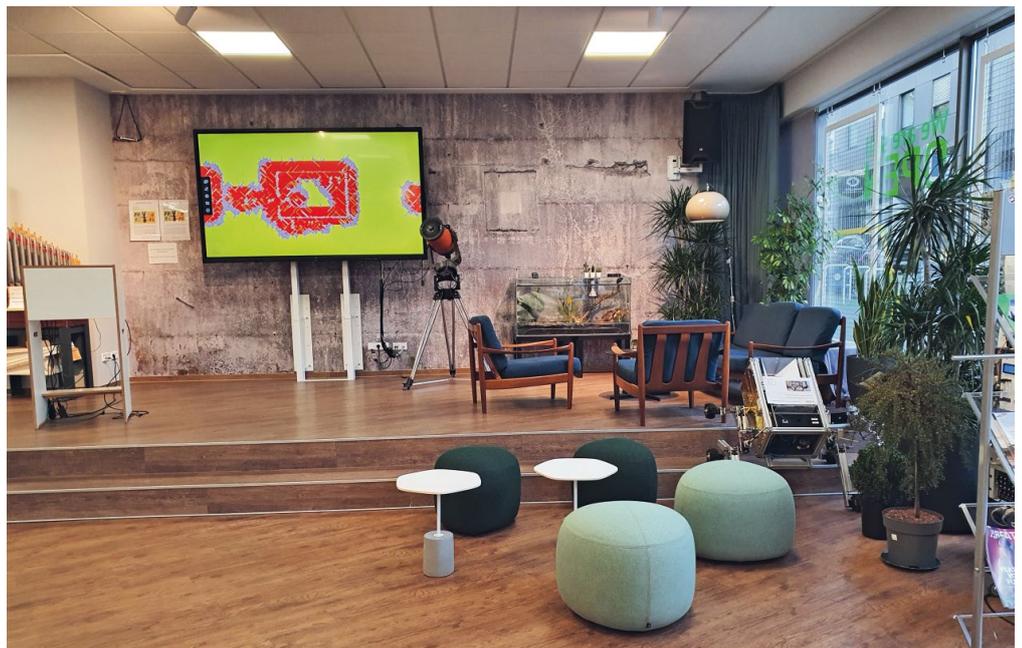


ABB. 1 Lernen und diskutieren in netter Atmosphäre: ein Teil der Lounge.

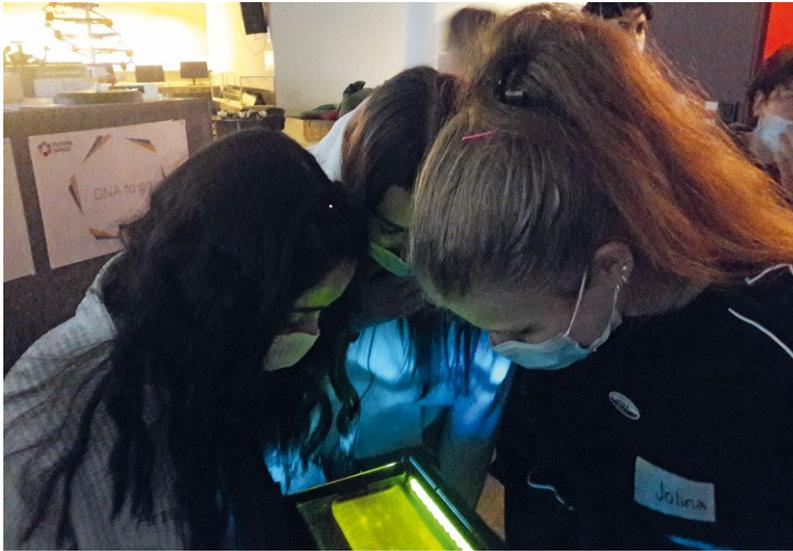


ABB. 2 Methodisch anspruchsvolle Experimentierkurse für Schulklassen.

Ein fulminanter Start

Begonnen haben wir im Juni 2022 gleich mit einem sehr großen Programmpaket: „100 Tage MINT“. Während der Laufzeit der dokumenta 15 haben wir in Kassel täglich ein unterschiedliches MINT-Angebot gemacht, das im Bereich Biologie von Mitmachaktionen wie „DNA to go“, „Gene, die man sehen kann“, „Wie viele bin ich? Unser Mikrobiom“, „Zuckerknacker – Enzyme in Aktion“ bis hin zum „Leben im Wassertropfen“ reichten. Zusätzlich gab es Vorträge von Professorinnen und

Professoren der Universität Kassel, die hier ihre Forschungsschwerpunkte einer breiten Öffentlichkeit zugänglich machen konnten. Spannend und hochaktuell war auch der interaktive Vortrag „Wir CRISPRn uns durch die Apokalypse“ von Prof. W. Nellen zusammen mit Dr. Carlo Klein. Gleich in den ersten Wochen wurden wir überrannt von Grundschulklassen, die sich mit der Frage beschäftigten „Wo kommt unser Trinkwasser her?“

Besonders stolz sind wir auch darauf, dass es uns gelungen ist, in



ABB. 3 Vater und Sohn an einer Lernstation.

den Sommerferien ein zweiwöchiges Sommercamp durchzuführen, an dem auch zahlreiche ukrainische Kinder und Jugendliche teilgenommen haben. Mittlerweile bieten wir mit finanzieller Unterstützung der Wintershall Dea AG wöchentlich einen *Internationalen Nachmittag* an, an dem vor allem ukrainische, aber auch Kinder und Jugendliche anderer Nationalität teilnehmen.

Was ist alles möglich im Future Space?

Im *Future Space* ist der Vormittag vor allem für Schulklassen reserviert (Abbildung 2), die zu verschiedenen Themen aus dem Bereich Biologie, Physik, Mathematik und Informatik gemeinsam mit ihren Lehrkräften gemäß unseres Bildungskonzeptes experimentelle Kurse und Unterrichtseinheiten durchführen. Das ständig erweiterte Biologieangebot für Schulklassen ist auf der *Future Space*-Homepage (www.futurespace.org) abrufbar. Schulklassen der Oberstufe kommen z. B. sehr gerne, um ihren eigenen genetischen Fingerabdruck zu erstellen. Die Schülerinnen und Schüler extrahieren ihre DNA, führen eine Polymerasekettenreaktion (PCR) durch und analysieren ihre PCR-Produkte in der Agarosegelelektrophorese. Das sind alles Methoden, die im Curriculum der Oberstufe vorgesehen sind, aber aufgrund der Komplexität des Experimentes und der limitierten technischen Möglichkeiten von den Schulen meistens alleine nicht gestemmt werden können.

Am Nachmittag und den Wochenenden ist der *Future Space* für alle Menschen geöffnet, vor allem auch für die „Laufkundschaft“ hier mitten in der Stadt. Willkommene Gäste sind dabei auch Eltern und Großeltern mit Kindern und Enkeln (Abbildung 3), die einmal spontan reinschauen – dabei lernen meist nicht nur die Kinder etwas!

An verschiedenen Lerninseln (Abbildung 4) können sich die jungen und älteren Besucher/-innen



ABB. 4 Eigenständiges Lernen an Lerninseln.

mit verschiedenen Themenfeldern aus dem MINT-Bereich beschäftigen. So können sie eine der zahlreichen Recherche-Stationen nutzen oder einfach nur einen Kaffee trinken und in unserer kleinen Bibliothek stöbern.

Sehr beliebt ist auch die Beobachtung der Achatschnecken (Familie: Achatinidae; Stamm: Mollusca) im Terrarium. Ergänzend gibt es ein Lernangebot, welches das Eintauchen in die Welt der Mollusken erlaubt. Erstaunlich zu sehen, wie der physische Kontakt mit den Tieren so manche Besucherin bzw. manchen Besucher entschleunigt. Dem inneren Aufbau der Tiere kann man mittels eines Modells zum Auseinandernehmen oder einer *Augmented Reality*-(AR)-Visualisierung auf die Spur kommen. So kann das mehrkanalige Lernen seine Wirkung entfalten.

Allgemein ermöglichen eine gute Labor- und Medienausstattung sowie die Begleitung auf Augenhöhe das Vertiefen der Erkenntnisse; unterstützt wird dies durch ein cooles Designkonzept und die Besonderheit der Exkursion an einen außerschulischen Lernort.

Wer macht den Future Space möglich?

Der *Future Space* ist eine gemeinnützige Gesellschaft zur Förderung

von Bildung und Stärkung eigener Fähigkeiten und Talente. Unter der Leitung von Klaus-Peter Haupt, inspiriert von Gesellschafter und Sponsor Lukasz Gadowski (Team Global) und dem Schülerforschungszentrum Nordhessen (SFN) Kassel entstand ein neuartiges Projekt, in dem Forschung und Wissenschaft lebendig und anschaulich werden – und das eine langfristige Perspektive ermöglicht.

Eine Expansion des Projekts ist angedacht; so kann und soll der Kasseler *Future Space* als Blaupause für andere bundesweite Einrichtungen dienen. Zudem wurden bereits internationale Kooperationen – mit Ecuador und China – eingegangen, um die Idee des besonderen Lernorts zu exportieren.

Zum Schluss

Der *Future Space* ist ein Ort, der Raum schenkt für Ideen, zum Experimentieren, Lernen, Recherchieren und zum Wohlfühlen. Ein gemütlicher Ort, an dem man sich Wissen aneignen und über sich hinauswachsen kann und an dem man ganz einfach gerne ist.

Dr. Heike Ziegler,
Cornelia Kramm-Rettberg,
Klaus-Peter Haupt
Future Space, Kassel

NACHRUF AUF KLAUS-PETER HAUPT

Ein Leben für die Bildung ist zu Ende gegangen. Seine Ideen aber bleiben und wachsen.

Im Alter von 69 Jahren ist Klaus-Peter Haupt am 8. Mai 2023 plötzlich verstorben. Sein Herz schlug für den Kosmos und doch hatte er auch alles Irdische im Blick. Er war für viele Menschen Mentor, Vorbild und Anlaufstelle für Rat und Wissenserwerb. Ihm war es wichtig, Jugendliche zu hören, zu unterstützen und zu fördern. Durch sein Wirken hat er unzählige Menschen geprägt und auf ihrem Lebensweg begleitet. Mit dem Schülerforschungszentrum Nordhessen (SFN) und dem Future Space hat er zwei außergewöhnliche Orte geschaffen, die seinem Wunsch entsprechend, über seinen Tod hinaus bestehen bleiben.

*„Meine Art zu unterrichten unterscheidet sich von anderen – ich bin nur Coach.“
Klaus-Peter Haupt*

Klaus-Peter Haupt war bis zu seinem letzten Tag als Geschäftsführer des Future Space tätig. Dieser Aufgabe widmete er sich nach seiner beruflichen Laufbahn als Physiklehrer, Ausbilder des Studienseminars für Gymnasien in Kassel und Leiter des SFN. Darüber hinaus engagierte er sich ehrenamtlich als hessischer Botschafter für „Jugend forscht“, Mitglied des Kuratoriums von Lernort Labor (LeLa), als Vorsitzender des Astronomischen Arbeitskreises Kassel (AAK) e. V. und des Fördervereins des SFN.



Copyright Foto: Heiko Jacob.

MIKROBEN VERSTEHEN

Die weltweit häufigsten Mikroben

Die weit verbreitete, häufigste Mikrobe unserer Erde wurde erst vor etwa zwanzig Jahren beschrieben. Zunächst kannte man nur typische Sequenzen ihrer rRNA, ehe es gelang, die Zellen auch im Labor zu kultivieren. *Candidatus Pelagibacter ubique* ist als marines Bakterium in allen Ozeanen anzutreffen. Bis dahin galt das Cyanobakterium *Prochlorococcus marinus* als individuenreichste Art; sie bleibt nur wenig hinter *Pelagibacter* zurück. Welche Rolle die dominierenden Mikroben im marinen Ökosystem und im globalen Stoffkreislauf einnehmen, ist eine aktuelle Frage.

Was gilt in der Mikrobiologie als häufig? Optimierte Stämme erreichen unter günstigsten Bedingungen 10^{10} bis 10^{11} Zellen pro Milliliter; in Fermentern mit 100 000 Litern würden demnach bis zu 10^{19} Bakterien schwimmen. *Candidatus Pelagibacter ubique* (im Folgenden *Pb. ubique*) erreicht im meist oligotrophen Meerwasser nur eine Dichte von $0,3 \cdot 10^6$ bis $3,5 \cdot 10^6$ Zellen/ml,

stellt damit aber rund jede vierte Zelle aller einzelligen Organismen in der Umgebung [1]. Dies bedeutet eine Gesamtzahl von mehr als 10^{28} Individuen. *Prochlorococcus marinus* (*Pc. marinus*) kommt mit über 10^5 Zellen/ml in tropischen und subtropischen Meeren vor und wird auf eine Population von etwa 10^{27} Zellen geschätzt [2]. (Die Zahl aller Mikroben unserer Erde liegt bei $5 \cdot 10^{30}$). Die unvorstellbare Menge der Zellen und ihre relativ hohen Konzentrationen lassen eine besondere Bedeutung der beiden Organismen im Ökosystem Meer erahnen. Was wissen wir darüber?

Klein und lange übersehen

Obwohl beide Bakterien so häufig sind, wurden sie lange übersehen. Das lag auch an ihrer Größe: Sie gehören mit ca. $0,5 \mu\text{m}$ Durchmesser (*Pc. marinus*) und $0,25 \mu\text{m}$ Dicke und $\leq 1 \mu\text{m}$ Länge (*Pb. ubique*) zu den kleinen, im Lichtmikroskop schwer erkennbaren Mikroben (Abbildung 1). Sie ordnen sich dabei gut in das exponentielle Skalengesetz ein, wonach Größe und Häufigkeit auch von Organismen des Planktons in einem indirekten Verhältnis zueinander stehen [3].

Ihre Genome sind auffällig klein. Mit ca. 1700 (*Pc. marinus*) und 1350 Genen (*Pb. ubique*) gehören sie zu den frei lebenden Organismen mit den am stärksten reduzierten Genomen (*E. coli* enthält >4000 Gene). Den Druck zur Rationalisierung führt man auf die nährstoffarme Umgebung zurück. In der Folge ließ

die Optimierung des Stoffwechsels die Arten zu dominierenden Organismen werden [4]. So begünstigt das hohe Oberflächen/Volumen-Verhältnis die Lichtabsorption und Transportvorgänge bei Nährstoffarmut. Eine begrenzte Genausstattung führt aber immer zur größeren Abhängigkeit von konstanten Verhältnissen und zu Interaktionen mit begleitenden Organismen.

Prochlorococcus

Das Cyanobakterium wurde 1979 neben anderen chroococcoiden marinen Zellen entdeckt und 1992 beschrieben [5]. Es fiel auf, dass *Pc. marinus* keine für Cyanobakterien typischen Phycobilisomen enthält, sondern die akzessorischen Chlorophylle mit den photosynthetischen Reaktionszentren in peripher geschichtete Membranen inseriert (Abbildung 1). Die vor etwa 150 Millionen Jahren erfolgte Neuerung unterscheidet *Pc. marinus* von den nahe verwandten kleinzelligen Synchococccen, die ebenfalls in den Meeren verbreitet sind, und verlieh der Art eine Anpassungsfähigkeit der Lichtabsorption und Effizienz der Photosynthese, die jene aller photosynthetischen Zellen übertrifft [4].

Das Genus *Prochlorococcus* umfasst bislang nur eine Art mit den Unterarten *Pc. marinus* ssp. *marinus* und ssp. *pastoris*, die sich an geringe Lichtstärken (*low light*, LL) bzw. hohe (*high light*, HL) angepasst haben. Stammvarianten (*clades*) untergliedern die LL- und HL-Gruppen weiter, so dass *Pc. marinus* von der lichtdurchfluteten Oberfläche bis zu schwach illuminierten tiefen Wasserschichten effizient Photosynthese betreiben kann und auch mit den Stoffgradienten zurechtkommt. Die genetische Anpassung wird also nicht durch die Anhäufung mehrerer Genvarianten in einer Zelle erreicht, sondern durch Stammvarianten innerhalb der Population. Das Kerngenom besteht aus etwa 1000 Genen, die in allen *Prochlorococcus*-Zellen vorkommen, während sich die übrigen, flexiblen Gene zwischen den



ABB. 1 Die häufigsten Mikroben. a) *Prochlorococcus marinus* mit Schichten von Photosynthesemembranen an der Zelloberfläche. b) *Pelagibacter ubique* (SAR11) mit Phagen. a) Ausschnitt eines kolorierten elektronenmikroskopischen Schnitts von L. Thompson und N. Watson gemäß CC 0 via Wikimedia Commons. b) Kolorierte elektronenmikroskopische Aufnahme von Morris et al. aus [12] gemäß CC 4.0 international license.

Stämmen in Zahl und Eigenschaft unterscheiden. Bis 2015 fand man über 13.000 verschiedene Gene in 140 Genomen und erwartete nach Hochrechnungen 85.000 Gene im Pangenom (Sammlung aller Gene in der Gesamtpopulation einer Art) [4]. Horizontaler Gentransfer zwischen (auch artfremden) Zellen spielt bei dieser Adaptationsform eine besondere Rolle. Ändert sich das ökologische Umfeld, so verschieben sich die Anteile der Stammvarianten. Durch die Klimaerwärmung erwartet man besonders die Zunahme einer der HL-Gruppen.

Prochlorococcus als häufigstes photosynthetisch aktives Bakterium fixiert rechnerisch etwa vier Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr, so viel wie weltweit Pflanzen auf Anbauflächen [4]. *Pc. marinus* gibt davon verschiedene C-Verbindungen (u. a. Glycolat) an die Umgebung und damit an begleitende heterotrophe Organismen ab. Eine besondere Form des Transfers von Produkten und Proteinen sind dabei gefüllte Vesikel, die sich an andere Organismen heften. *Prochlorococcus* produziert bis zu 40 Prozent der gelösten C-Verbindungen im oligotrophen Gewässer und ernährt mit dem Recycling pro- und eukaryotische Mikroorganismen. Im Gegenzug profitiert das Cyanobakterium von Arten, die reaktiven Sauerstoff neutralisieren, denn *Pc. marinus* fehlen die Enzyme zur Reduktion des oxidativen Stresses [4].

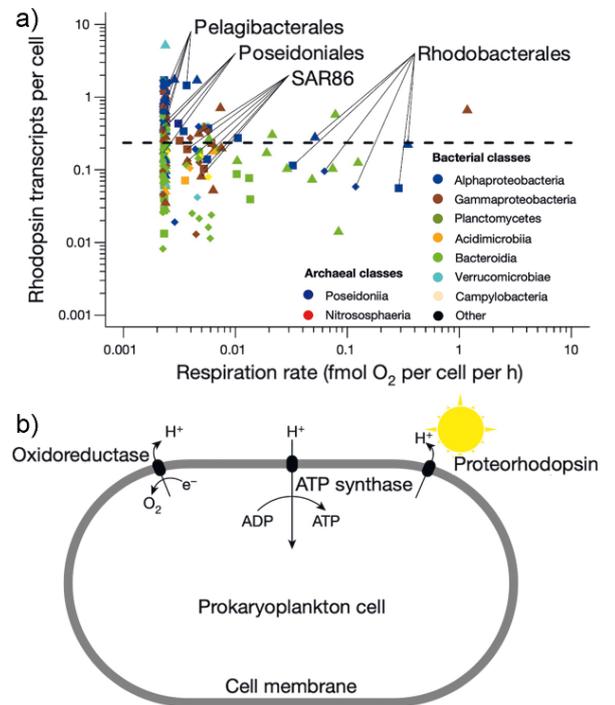
Pelagibacter

Pb. ubique (man kennt inzwischen einige Gattungen und Arten und erfasst das Pangenom) gehört zur 1990 aus der Sargassosee isolierten Gruppe von rRNA-Proben, den SAR11-Organismen. Sie werden zu den heterotrophen Mikroben gerechnet und sind phylogenetisch unter den *alpha*-Proteobakterien, nahe den (parasitisch lebenden) Rickettsien verortet [6, 7]. Zunächst hielt man sie für extrem kleine Zellen (0,12 bis 0,2 μm , siehe oben), was wohl auf die Präparation

zurückgeht und einem voluminösen periplasmatischen Raum geschuldet ist. Dieser und das immer noch große Oberflächen/Volumen-Verhältnis begünstigt die Stoffaufnahme. Wobei die Transportsysteme eine derart hohe Affinität zu ihren Substraten entwickelten, dass sie ohne ATP-Beteiligung effizient arbeiten [8]. Das ist möglich, wenn separate, sehr affine Bindeproteine in höherer Konzentration vorliegen als die zu bindenden Moleküle und Transporter [9]. *Pelagibacter* nutzt flüchtige C-Verbindungen des marinen Planktons, insbesondere der Diatomeen (Methanol, Formaldehyd, Aceton, Isoprene u. a.), die (sonst) als Klimagase in die Atmosphäre entweichen. Die Bakterien könnten dadurch einen wichtigen Klimafaktor der Meere darstellen [10, 11].

Neuere Studien liefern Hinweise darauf, dass *Pelagibacter* und Verwandte ihre Stoffwechselenergie nicht ausschließlich aus organischen Quellen beziehen, da sie eine auffällig niedrige Respirationsrate zeigen. Sie nutzen C-Quellen eher zur Biosynthese (Vermehrung) und dabei Licht als Energiequelle. Die Organismen betreiben keine klassische Photosynthese (sie fixieren kein CO_2), besitzen aber das Kanalprotein Proteorhodopsin, das mithilfe absorbierter Photonen H^+ über die Membran transferiert und damit die ATP-Synthase energetisiert [13] (Abbildung 2).

Es ist offensichtlich, dass *Pc. marinus* und *Pb. ubique* zusammen mit den Bakterien der SAR11-Gruppe schon allein aufgrund ihrer Häufigkeit eine signifikante Rolle im marinen (und globalen) Kohlenstoffkreislauf spielen. Das genaue Ausmaß ist noch schwer einzuschätzen, zumal die mannigfachen Interaktionen und Abhängigkeiten mit und von anderen Organismen erst anfänglich untersucht werden. So ist es noch unklar, wie weit die beiden häufigsten Besiedler der Ozeane ökologisch verbunden sind. Und was die Erwärmung der Meere für die vielfach verzahnte Welt der



Mikroorganismen und ihrer Stoffkreisläufe bedeutet, ist und bleibt ein komplexes Problem für das Verständnis des riesigen Ökosystems.

Harald Engelhardt, Martinsried

Literatur

- [1] R. M. Morris et al. (2002). Nature 420, <https://doi.org/10.1038/nature01240>
- [2] J. B. West (2022). Physiol. Rep. 10, <https://doi.org/10.14814/phy2.15214>
- [3] V. Gjoni, D. S. Glazier (2020). Biology 9, <https://doi.org/10.3390/biology9030042>
- [4] S. J. Biller et al. (2015). Nat. Rev. Microbiol. 13, 13–27.
- [5] S. W. Chisholm et al. (1992). Arch. Microbiol. 157, 297–300.
- [6] M. S. Rappé et al. (2022). Nature 418, 630–633.
- [7] K. Georgiades et al. (2011). Plos One 6, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0024857>
- [8] X. Zhao et al. (2017). Appl. Environ. Microbiol. 83, <https://doi.org/10.1128/AEM.02807-16>
- [9] E. Bosdriesz et al. (2015). FEBS J. 282, 2394–2407, <https://doi.org/10.1111/febs.13289>
- [10] E. R. Morre et al. (2019). Environ. Microbiol. 22, 1720–1733.
- [11] E. R. Moore et al. (2022). Environ. Microbiol. 24, 212–222.
- [12] H. Hickey (2020). <https://www.futurity.org/virus-in-dna-oceans-2377122-2/>
- [13] J. H. Munson-McGee et al. (2022). Nature 612, 764–770.

ABB. 2 Energiequellen des häufigsten Bakteriums der Ozeane. a) *Pelagibacter ubique* und Verwandte der Pelagibacteriales zeigen eine geringe Atmungsrate, aber einen relativ hohen Gehalt an Proteorhodopsin. Das weist darauf hin, dass die Bakterien nicht ausschließlich chemoheterotroph leben. b) Schematische Darstellung der Energiequellen für die ATP-Synthase in Zellen von *Pelagibacter*. Adaptiert aus [13] gemäß CC 4 international license.

PARTNER DES MENSCHEN

Die Korkeiche: bedrohte Nutzpflanze des Mittelmeerraums

Die Gattung der Eiche (*Quercus*) ist in Deutschland wohl jedem bekannt. Die deutsche Eiche hat einen gewissen Ruf erlangt, der dem Rang einer Nationalpflanze nahe kommt. Die im Mittelmeerraum verbreitete Korkeiche ist bei uns vielleicht weniger bekannt, aber ihre Produkte sind im Alltag gegenwärtig.

Weltweit ist die Familie der Buchengewächse (Fagaceae), zu der auch die Eichenarten zählen, eher auf den mittleren Breiten der Nordhalbkugel anzutreffen. Einige Arten kommen aber auch in den tropischen und subtropischen Regionen vor (südl. Verbreitungsgebiete von *Quercus* sind Panama und Costa Rica; Beispiele: *Quercus oleoides*, *Q. copeyensis*, *Q. costaricensis*). Weiter im Süden trifft man auf die Südbuche (Gattung *Nothofagus*), die ebenfalls zur Familie der Fagaceae gehört und folglich eng mit der Gattung *Quercus* verwandt ist. In den Mittelmeerlandern existiert ein recht umfassendes Spektrum an Eichen: Steineiche (*Quercus ilex*), Ungarische Eiche (*Q. frainetto*), Libanoneiche (*Q. libani*), Spanische Eiche

(*Q. x hispanica*, Pyrenäeneiche (*Q. pyrenaica*), Mazedonische Eiche (*Q. trojana*), Flaumeiche (*Q. pubescens*), Zerreiche (*Q. cerris*), Kermeseiche (*Q. coccifera*), Korkeiche (*Q. suber*) sowie einige Unterarten.

Schon von den Römern genutzt

Die Korkeiche (*Q. suber*) ist vorwiegend eine Bewohnerin des westlichen Mittelmeerbeckens. In Südportugal, Südwestspanien, Nordafrika, in Marokko, im Maurengelände und dem Esterel (franz. Riviera) liegt das Hauptverbreitungsgebiet. Das Küstengebiet mit einem jährlichen Niederschlagsminimum von 550 mm wird von ihr bevorzugt. Die eiförmigen, ledrigen Blätter sind meist gering gezähnt (Abbildung 1a); die Ausbildung der speziellen Korkrinde

ABB. 1 In Deutschland kann die nicht winterharte Korkeiche in Kübeln gehalten werden. Ihre eiförmigen, ledrigen Blätter sind meist gering gezähnt. Charakteristisch ist die dicke, knorrige Korkrinde. Foto: Ulrich Rösemann.

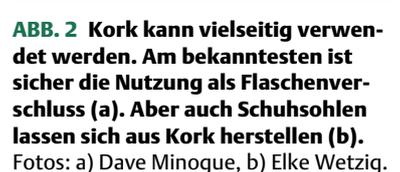
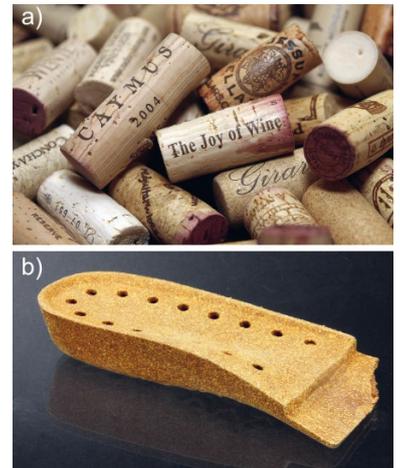


ABB. 2 Kork kann vielseitig verwendet werden. Am bekanntesten ist sicher die Nutzung als Flaschenverschluss (a). Aber auch Schuhsohlen lassen sich aus Kork herstellen (b). Fotos: a) Dave Minogue, b) Elke Wetzig.

verleiht ihr ein bizarres Aussehen (Abbildung 1b). Die Korkeiche soll schon ca. 60 Millionen Jahre existieren. Ihre ausgeprägte Rinde macht sie widerstandsfähig gegen Feuer, Hitze, Kälte und Verletzungen. So ist die Korkeiche an heiße Sommermonate und häufige Waldbrände angepasst.

In unseren Breiten ist die Korkeiche nicht winterhart, aber als Kübelpflanze hat sie Einzug in die Wintergärten gehalten.

Schon Plinius berichtete, dass die Römer den Kork zur Herstellung von Bojen und Sohlen für Frauenschuhe benutzten sowie als Schwimmer der Fischernetze. Die Nutzung reicht heute vom Flaschenkorken über das Fußbett in Schuhen (Abbildung 2) bis hin zur Tapete und zum Bodenbelag. Ebenso wurde aus der Asche von verbranntem Kork ein schwarzes Farbpigment gewonnen. Die Korkabfälle werden zum Gerben und als Polsterung von Möbeln verwendet. In der Medizin ist Kork ebenfalls vertreten, beispielsweise als orthopädische Schuheinlagen.

In einem Alter von 15–20 Jahren beginnt man bei den Korkeichen mit der Schälung. Dabei darf niemals die lebensnotwendige Bast- und Rindenschicht, die den Saftstrom leitet,



ABB. 3 Schälung von Korkrinde in Aracena, Huelva in Südspanien. Foto: Cazalla Montijano, Juan Carlos (Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico).

verletzt werden. In Frankreich wird diese Bearbeitung *demasclage* genannt. Der erste gewonnene Kork ist noch sehr spröde und wird daher in den Gerbereien verwendet. Die zweite Ernte erzielt weicheren glatteren Kork. Je nach angestrebter Plattenstärke des Korks wird bis zur nächsten Schälung unterschiedlich lange gewartet. Pro Baum können bis zu 200 kg Kork erzielt werden. Geschält werden im Allgemeinen nur die Stämme – und zwar bis zur zweieinhalbfachen Höhe ihres Umfangs; bei älteren Exemplaren unter Umständen auch die stärkeren Äste. Die Arbeit wird im Sommer vorgenommen. Mit Spezialäxten werden jeweils zwei Schnitte rings um den Stamm geführt, dann werden Längsschnitte gezogen und mit Hilfe eines Werkzeugstieles die Korkplatten abgehoben (Abbildung 3). Durch das Beschweren der Korkplatten mit Steinen geht deren natürliche Krümmung verloren. Bis zur Weiterverarbeitung und zum Versand muss der Kork noch trocknen. Alle 9 bis 12 Jahre kann eine Korkeiche erneut beerntet werden. Die geschälten Stämme bieten einen ungewöhnlichen Anblick. Der nackte, seiner Korksicht beraubte Stamm zeigt zunächst eine rosagelbe Farbe, die später einem Rotbraun weicht (Abbildung 4).



ABB. 4 Eine „beerntete“ Korkeiche mit dem nackten, rotbraunen Stamm. Foto: Javier García Diz.

Die Korkeichenbestände schrumpfen

Ein Problem für die Korkgewinnung stellt der Flächenverbrauch der wachsenden Städte und der expandierenden Agrarwirtschaft dar. Der Grund und Boden ist so begehrt, dass es nur noch wenige Nachpflanzungen an Korkeichen gibt. Zudem vergeht bis zur ersten Ernte eine lange Kulturzeit. Daher werden heute überwiegend schnellwachsende Eukalyptusbäume gepflanzt. Für den Wasserhaushalt der Böden und für die Tierwelt sind die fehlenden Eichen eine Katastrophe, denn sie speichern das Wasser und vermindern somit Erosionen. Die Korkeichenwälder der Sierra Morena nördlich von Sevilla beherbergen eine Vielzahl an Vogelarten und die größte Population des stark bedrohten spanischen Luchses. Dieser wird auch Pardel-Luchs genannt, da seine eng stehenden Fellflecken an einen Leoparden erinnern.

Heute noch werden Bienenkörbe, Bojen, Rettungsringe, Angel- und Netzschwimmer, Dichtungsmaterial, Bodenbeläge, Tapeten, Dämmstoff, Pinnwände und natürlich Flaschenverschlüsse aus Kork hergestellt. Ob der Kellermeister Pater Dom Pérignon wirklich der Erste war, der einen Korken auf eine Weinflasche steckte, ist nicht

gesichert überliefert. In Ephesus wurde eine Amphore (aus dem 1. Jahrhundert v. Chr.) mit Wein gefunden, die mit einem Korkstopfen verschlossen war. Im 13. Jahrhundert gab es in Portugal Gesetze, die die Korkeichen schützten. Auch Mönche machten sich die isolierenden Eigenschaften des Korks zu Nutze, indem sie ihre Zellen im Kloster damit auskleideten. Auf jeden Fall begann mit der Entwicklung der Glasindustrie im 17. Jahrhundert der Siegeszug der Flaschenkorken.

Heute werden in Portugal und Spanien auf etwa 1 Million Hektar Korkeichen entrindet. Sie liefern 300.000 Tonnen Kork pro Jahr, was etwa 75 Prozent der Weltproduktion ausmacht. In den 1960er Jahren kam es zur Krise in der Korkwirtschaft. Gründe für die Misere waren das begrenzte Rohstoffangebot und besonders die zurückgehende Nachfrage. Hauptursache dafür war das Aufkommen vermeintlich billigerer Kunststoffe, die Kork vom Markt verdrängten. Heute ersetzt Styropor Kork in Rettungsringen, Schwimmern, Bojen und als Dämmstoff. Im Hausbau werden Mineralfasern oder Polyurethan-Platten eingesetzt. Der veraltete technische Standard der Korkindustrie und das schlechte oder sogar fehlende Marketing verschärften die Krise. Um dem Preisverfall entgegen zu wirken, versuchte man die Korkernte zu erhöhen, was eine Übernutzung der Korkeichen und somit eine Schädigung der Bäume zur Folge hatte. Lange Zeit unterblieb die kostenintensive Neuanpflanzung von Korkeichen. Außerdem verschwanden viele Korkeichenbestände durch Bauprojekte und Abholzung für Eukalyptusforste und Agrarflächen. Man kann trotzdem Hoffnung für die Zukunft des Naturproduktes haben, da in jüngerer Vergangenheit auch die Industrie (Automobile, Luftfahrt) den Kork als Material entdeckte.

Ulrich Rösemann, Osnabrück



MANAGEMENT-FALLSTRICKE, TEIL 18

Maslows Hammer: Das Gesetz des Instruments

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?

Nun war es also offiziell. Der alte Rabe Emilio bekam feierlich seine Urkunde zum klügsten Tier des Planeten überreicht. Er platzte fast vor Stolz und kam aus seinen vielen Verbeugungen gar nicht mehr heraus. Die Menge tobte. Der Applaus hallte wie Musik in seinen Ohren. Viele Tiere wollten von ihm lernen. „Das Geheimnis ist, die Dinge loslassen zu können“, riet er seinen Coachees. „Schaut her!“, demonstrierte er seine altbewährte Methode. Er nahm eine Nuss und zeigte sie herum. Es war eine große, pralle Nuss mit dicker Schale. Dann nahm er sie in seinen Schnabel, flog hoch in die Lüfte und ließ sie fallen. Beim Aufprall zerplatzte sie und die köstliche Füllung kam zum Vorschein. Die Tiere strömten zu der Nuss und ließen es sich schmecken. „Das Zauberwort heißt loslassen“, wiederholte der Rabe. Das leuchtete jedem ein. Zustimmunges Murren erfüllte den Platz. Der Tierrat war begeistert von der Methodik und beschloss, dass sich ab sofort alle Tiere in der bewährten Methodik fortbilden sollten.

Das Eichhörnchen setzte das Gelernte am schnellsten um. Fliegen konnte es nicht, aber dafür hervorragend klettern. Flink sprang es Äste empor und warf seine gesammelten Vorräte aus der Höhe direkt in die Vorratskammer. Sensationell. Früchte und Nüsse waren in mundgerechte Stücke geteilt. Es ersparte sich umständliches Knabbern. Das bedeutete, es arbeitete viel schneller und effektiver! Das sprach sich herum. Alle wollten schneller und effektiver sein. Auch der Tierrat war

der Meinung, dass alle Potenzial hatten, schneller und effektiver zu arbeiten, und unterstützte die Strategie daher geschlossen. Die große Eiche an der kleinen Lichtung war seitdem stark frequentiert. Die Methode des „Loslassens“ etablierte sich so stark, dass selbst kletterunerfahrene Tiere nun auf die neue Methodik aufmerksam wurden. Für sie wurde in Gemeinschaftsarbeit eine kleine Holzleiter errichtet. Jeder sollte die Lehren des alten Raben nutzen. Außerdem war dem Tierrat die allgemeine Effizienzsteigerung sehr wichtig. Man wollte das Jahresende doppelt so effizient abschließen wie das Jahr zuvor. Keiner sollte ausgeschlossen werden. Hasen, Füchse, Rehe – sie alle wurden vom Raben auf die Spitze des Baumes geschickt, um die Methodik zu erlernen. Auch wenn es für manche unbequem war – der Rabe behielt recht: Durch die „Loslass-Methode“ kamen sie alle in Minutenschnelle an die größten Leckereien. Die Methode war adaptierbar. Wer keine Nüsse mochte, warf Orangen, Pinienzapfen oder Kastanien. Die Methode war auch skalierbar. Man konnte statt einzelner Elemente auch ganze Gebinde hinunterfallen lassen.

Eines Tages besuchte der große Elefant die alte Eiche. Er hatte ein paar Wassermelonen, seine Leibspeise, dabei. Auch er hatte schon viel vom Raben Emilio gehört und wollte sich in der neuen Methodik weiterbilden. Die Holzkonstruktion sah ihm allerdings etwas wackelig aus. Der Tierrat unterstützte den Elefanten in seinem Vorhaben. Auch

er sollte seiner Herde von der effektiven und wohlprobierten Methodik aus erster Hand berichten können.

Sie spannten den Dickhäuter mittels eines großen Tischtuchs fest und hievten ihn über einen Flaschenzug in die Höhe. Von dort aus ließ er seine Wassermelonen fallen. Und es funktionierte! Mundfertige Stücke lagen köstlich aufgereiht am Boden. Der Elefant bedankte sich für die Hilfe und versprach, die Methode ab jetzt selbst anzuwenden. Klar, es schien auf den ersten Blick irgendwie irrsinnig, einen Elefant zum Fliegen zu bewegen. Und es war etwas umständlicher, als einfach auf die Melonen zu treten. Bei den großen Erfolgen des Raben wollte er aber nicht als altmodisch gelten. Denn auch er wusste, dass man um weiterzukommen auch einfach einmal loslassen können muss.



**Und die Moral von der Geschichte:
Als Allheilmittel taugt Dein
Werkzeug nicht, auch wenn da-
raus Deine grandiose Erfahrung
spricht.**

*Ihre Andrea Hauk,
andreabauk@gmx.de*

FAKTENBOX

Als Experten können wir alle großartige Dinge, die uns schon in vielen Situationen halfen, unsere ganz eigenen Probleme zu lösen. Wir haben begriffen, dass eine bestimmte Verhaltensweise oder eine bestimmte Methode uns zum Ziel bringt. Es ist also nicht verwunderlich, dass unser Fachgebiet, dem wir so viel Zeit widmen, uns stark in unserem Handeln beeinflusst. Mit Vorliebe entscheiden wir uns also für Vorgehensweisen, die auch schon in der Vergangenheit zum Erfolg geführt haben. Hier unterliegen wir jedoch einem Denkfehler. Nur weil wir mit einem Werkzeug (oder einer Vorgehensweise) gut vertraut sind, heißt das noch lange nicht, dass das Werkzeug für alle möglichen Situationen geeignet ist. Der Aderlass in der Medizin ist ein prominentes Beispiel hierfür. Auch heutzutage gibt es Methoden, die als Allheilmittel gehypt werden, wie z. B. Scrum im Projektmanagement. Sicher erzielt man damit prima Erfolge, aber für alles und jeden macht es eben doch nicht immer Sinn. Der Psychologe Abraham Maslow fasste dies bereits 1966 treffend zusammen: „Ich glaube, es ist verlockend, wenn das einzige Werkzeug, das man hat, ein Hammer ist, alles zu behandeln, als ob es ein Nagel wäre“. Vielleicht sollten wir also den Mut besitzen, unser Werkzeug abhängig vom Problem anstatt abhängig von unserer Vorliebe auszuwählen. Dann klappt's vielleicht auch mit der Effizienzsteigerung.

RÜCKBLICK

- 2/23 Ökosystemfunktionen im Südpolarmeer
 2/23 Gasvesikel und ihr Einsatz in der Biomedizin
 2/23 Funktionale Kleptoplastie in Meeresnacktschnecken
 2/23 Virtuelle digitale Lichtmikroskopie in der Lehre
 2/23 Vom biologischen Vorbild zum 3D-Universum
 2/23 Draußenschulbewegung in Deutschland
 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

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 1/2024 erscheint im Februar 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

Die Rückkehr der Wölfe

Der Wolf ist einer der umstrittensten Beutegreifer, dem bei uns Gefühle von vollkommener Ablehnung bis hin zu begeisterter Akzeptanz entgegen gebracht werden. 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.



Foto: KLICKfaszination

Molekulare Phylogenetik

Neue Labortechniken, leistungsfähige Computer und Algorithmen ermöglichen es, in Genomen Ereignisse ihrer Evolution zu identifizieren und Stammbäume zu rekonstruieren. Dadurch musste oft die traditionelle Klassifikation der Tiere revidiert werden. Trotz dieser beeindruckenden Erfolge der molekularen Phylogenetik besteht weiterer Forschungsbedarf, um häufige Fehlerquellen zu eliminieren.

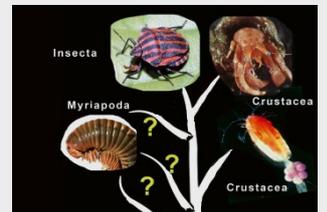


Abb.: W. Wägele, T. Wesener.

Überleben durch Teamwork

Ameisenpflanzen 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 oder sich noch selber verteidigen, ist Gegenstand laufender Studien.



Foto: A. Müller, A. Mithöfer.

Schwerpunkt: Karl von Frisch und der Schwänzeltanz der Bienen

Die Bedeutung des Schwänzeltanzes

Der Schwänzeltanz ist eine der wichtigsten Entdeckungen der Verhaltensbiologie im vorigen Jahrhundert. Die Interpretation durch Karl von Frisch konnte mit neuen Methoden in den letzten 20 Jahren weitgehend bestätigt werden. Neuste Ergebnisse zeigen nun, dass die Botschaft des Schwänzeltanzes für die nachlaufenden Bienen sogar noch bedeutender ist als zuvor gedacht.



Foto: Randolf Menzel.

Die „Sprache“ der Bienen

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



Foto: Ingo Arndt.



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!

