

1 | 2025

VBio

Verband | Biologie, Biowissenschaften
& Biomedizin in Deutschland

BOTANIK
Problemfall
Schwefel

**VERHALTENS-
ÖKOLOGIE**
Konflikte zwischen
Geschwistern

ÖKOLOGIE
Stadtbäume
der Zukunft



BIOLOGIE

IN UNSERER ZEIT

Treiberameisen





Karl-Josef Dietz ist der amtierende Präsident des VBIO e. V., Wolfgang Nellen ist der Editor-in-Chief und Larissa Tetsch die Managing Editorin der *BiuZ*. Marga Radermacher gehört dem Editorial Board an und unterstützt die Managing Editorin in allen Belangen.

EDITORIAL

Der VBIO im 5. Jahr seiner Herausgeberschaft der *Biologie in unserer Zeit*

Liebe Leserinnen und Leser, liebe Mitglieder des VBIO, als 2019 der damalige Verlag Wiley ankündigte, die Produktion der *Biologie in unserer Zeit* zum Ende des Jahres 2020 einzustellen, war der VBIO vor eine herausfordernde und fundamentale Entscheidung gestellt: Beenden einer 50-jährigen Erfolgsgeschichte oder Fortführung im Eigenverlag? Das Ergebnis ist bekannt und eines unserer Hefte liegt vor Ihnen. Dieses Editorial nimmt das 5-jährige Jubiläum der Herausgeberschaft durch den VBIO zum Anlass zurückzusehen, die Entwicklung der *BiuZ* zu betrachten und Danke zu sagen. Dieses Editorial beschreibt den Prozess und den Aufwand, der hinter jedem *BiuZ*-Heft liegt.

Wen und was benötigt es, ein solches Projekt erfolgreich umzusetzen? Die schnell gegründete *BiuZ*-AG stellte sich dieser Aufgabe, fand Lösungen für drängende Fragen und setzt ihre Arbeit fort – bis heute – im Ständigen Ausschuss „Publikationswesen“ des VBIO. Einige von Ihnen werden eigene Erfahrungen mit der Herausgabe ei-

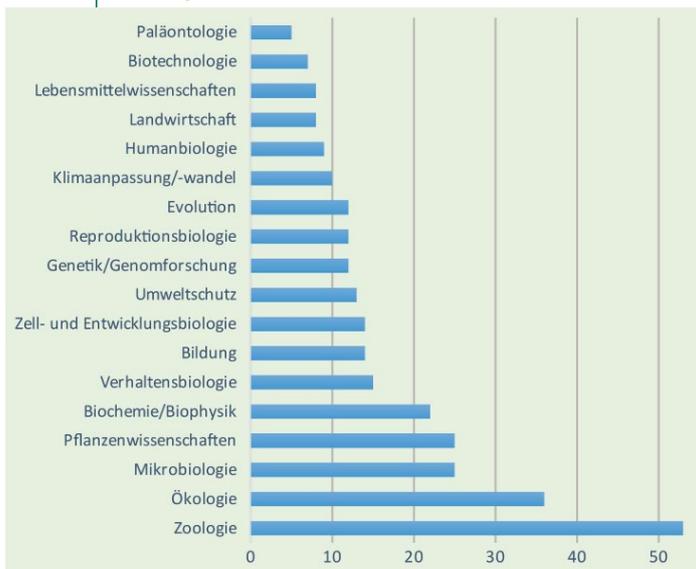
ner Zeitschrift haben. Seit 1/2021 steht hinter der *BiuZ* kein Riesenverlag mehr mit seinen etablierten Prozessen und Routinen, sondern vor allem ehrenamtliches Engagement. Wichtig bei der Umstellung auf die eigene Herausgeberschaft war uns – neben der notwendigen Qualität – Ihnen weiterhin den gleichen jährlichen Gesamtumfang wie zu Wileys Zeiten von insgesamt 400 Seiten zu bieten. Allerdings ist dieser Umfang auf vier Hefte und nicht mehr auf sechs Hefte aufgeteilt. Hauptgrund ist der teure Postversand. Der Versand ist der letzte Schritt im Publikationsprozess. Doch der Reihe nach.

Themen und Autoren/-innen: Am Anfang der Herausgabe einer *BiuZ* stehen ganz zentral die Autor/-innen, die uns ihre Artikel anbieten. Diesen gehört unser erster großer Dank. Es zeigen sich drei Wege: Eigeninitiative über (a) eine Voranfrage oder (b) direktes Einreichen bei Larissa Tetsch, unserer Managing Editorin, oder (c) Ansprache durch uns, die Mitglieder des *BiuZ*-Editorial Boards oder des VBIO. Abbildung 1 zeigt die beeindruckende Vielfalt der behandelten Themen. Spitzenreiter bei den seit 2021 publizierten Hauptartikeln ist die Gruppe der 53 Artikel mit zoologischem Bezug, gefolgt von ökologischen Themen und Artikeln zu mikrobiologischen oder pflanzenwissenschaftlichen Fragestellungen. Mit der erzielten thematischen Abdeckung sind wir sehr zufrieden. Wie sehen Sie das?

Editorial Board und Gutachter/-innen: Das Editorial Board, die Managing Editorin und einige VBIO-Verantwortliche treffen sich zweimal im Jahr zu einer Board-Sitzung im virtuellen Format oder in Präsenz, um die Entwicklung der *BiuZ* zu besprechen. Derzeit besteht das Board aus 14 Mitgliedern inkl. des Editor-in-Chief Wolfgang Nellen. Hinzu kommt die Managing Editorin, die die Arbeitsabläufe koordiniert, Artikel redigiert, für den Satz vorbereitet und für den Inhalt der Hefte verantwortlich ist. In diesen Sitzungen werden die thematische Abdeckung, aktuelle methodische und fachliche Fortschritte der Biologie, der Biowissenschaften und der Biomedizin sowie neue Reihen diskutiert. Die Manuskripte der Autor/-innen werden einem Begutachtungsprozess unterworfen, um die Passung und die inhaltliche Kohärenz zu optimieren. Der zweite große Dank geht somit an diese Gruppe hoch engagierter Editor/-innen und unsere Gutachter/-innen. Haben Sie neue Ideen für uns? Bitte wenden Sie sich an uns, wenn Sie Vorschläge zu Inhalt oder Struktur der *BiuZ* haben.

Setzen und Lektorieren der Artikel und Drucken des Hefts: Nach dem Satz der Artikel durch die Firma TypoDesign erfolgen mehrere Korrekturschleifen, bevor das Gesamtheft zusammengefügt wird. Leerflächen werden durch Kurzaufsätze und Informationsanzeigen in eigener Sache gefüllt. Gerne würden wir mehr be-

ABB. 1 | FACHLICHE ZUORDNUNG DER ZWISCHEN 1/2021 UND 1/2025 IN DER BIUZ ERSCHINENEN ARTIKEL



Jedem der erfassten 106 Hauptartikel wurden jeweils ca. drei Stichworte zugeordnet, die aufsummiert dargestellt sind, beispielsweise bei einem Artikel über Waldbäume „Ökologie“, „Pflanzenwissenschaften“ und „Klimawandel“. Themen mit weniger als fünf Nennungen wie Methoden und Wissenschaftspolitik sind nicht dargestellt.

zahlte Anzeigen schalten, um den finanziellen Druck auf den VBIO zu mindern. Leider ist das Einwerben von Anzeigen sehr schwierig. Unsere Editorin Marga Radermacher übernimmt seit Jahren nach der Korrekturrunde durch die Managing Editorin ehrenamtlich das Endlektorat. Dann liegt das druckfertige Heft vor, und die Datei geht an unsere Druckerei.

Online-Stellung und Versand: *Open Data* und *Open Science* sind zwei Desiderata an die Wissenschaft, um insbesondere durch öffentliche Mittel erzielte Forschungsdaten und wissenschaftliche Erkenntnisse frei verfügbar zu machen. Bibliotheken sind gehalten, Repositorien anzulegen, die kostenfrei Daten, Informationen und Artikel bereitstellen. So unterhalten mehrere Universitätsbibliotheken Veröffentlichungsangebote wie das *Open Journal System* OJS 3.4, das das BiuZ-Team über die Universität Bielefeld nutzt (<https://www.biejournals.de/>). Die Universität Bielefeld hostet die BiuZ online. Wir freuen uns sehr darüber, dass uns Sebastian Wolf von BieJournals bei Fragen so kompetent zur Seite steht. Abschließend bearbeitete Hauptartikel werden im *Early View* online gestellt. Das Gesamtheft erhält seine Imprimatur, wird in einer Auflage von i. d. R. 5000 Exemplaren gedruckt und versandt.

Zugriffszahlen: Das OJS erfasst die Artikelaufufe und die Anzahl heruntergeladener Dokumente inkl. des Gesamthefts. Die monatliche Zahl der Downloads (Abbildung 2) steigt erwartungsgemäß dadurch, dass die Zahl der verfügbaren Artikel im Archiv zunimmt. Der Anstieg ist allerdings überproportional, was zunehmendes Interesse an den Artikeln zeigt. Für alle Beteiligte und insbesondere für die Autor/-innen ist dies ein vielversprechender Trend, weil neben den gedruckten Heften auch die elektronischen Artikel interessierte Leser/-innen finden. Tabelle 1 zeigt die 10 Artikel, die am häufigsten heruntergeladen wurden. Das Heft 1/2021 zum Klimawandel war bisher am erfolgreichsten. Hier deutet sich allerdings Konkurrenz durch das Sonderheft CRISPR-Cas an.

Sonderheft CRISPR-Cas 2024: Wir sind sehr stolz darauf, dass es im vergangenen Jahr gelungen ist, ein Sonderheft herauszugeben – also ein 5. BiuZ-Heft. Das Schwerpunktprogramm 2141 der Deutschen Forschungsgemeinschaft zum Thema „*Much more than defence: the multiple functions and facets of CRISPR-Cas*“ hat als Teil der Öffentlichkeitsarbeit dieses Sonderheft ermöglicht. Schon jetzt zeigen die Zugriffszahlen, dass dieses Heft große Aufmerksamkeit auf sich zieht. Drei Personen haben zu dem Gelingen in besonderem Maße beigetragen: Unser Editor-in-Chief hatte die Idee, warb die Artikel ein und managte die Begutachtung aller Beiträge für das Sonderheft. Dann gingen diese in finale Bearbeitungsschlaufen an Larissa Tetsch und Marga Radermacher. Dieses Sonderheft hat binnen 20 Tagen mehr als die Hälfte der Komplettdownloads von unserem bisher erfolgreichsten Heft 1/2021 zum Klimawandel erzielt. Der Editor-in-Chief hat schon schmunzelnd angekündigt, dass er unter 10000 Downloads nicht zufrieden sein wird. Wir alle sind gespannt, aber sehr optimistisch, denn das Thema betrifft uns alle – individuell, gesellschaftlich und politisch.

Warum in der BiuZ publizieren und welche Entwicklungen zeichnen sich ab? Die BiuZ gibt Einblicke in das gesamte Spektrum der Biologie und hat dadurch im deutschsprachigen Raum ein Alleinstellungsmerkmal. Seit der Übernahme in den Eigenverlag erhalten wir Bewährtes und führen bedacht Änderungen herbei. So erzielen Artikel aus dem Bereich „Politik und Gesellschaft“ teilweise

ABB. 2 | MONATLICHER ONLINE-ZUGRIFF AUF DIE BIUZ-ARTIKEL IM OJS-REPOSITORY



TAB 1. DIE ZEHN NACHGEFRAGTESTEN ARTIKEL UNTER VBIO-HERAUSGEBERSCHAFT

Autoren	Kurztitel	Heft	Downloads
Schulze et al.	Klimaschutz mit Wald	1/2021	3275
Jahn et al.	Kieselalgen	2/2021	3003
Sander	Impfstoffe gegen SARS-CoV-2	1/2021	2903
Petrischak	Wie der Mensch das System Erde verändert	1/2021	2583
Wirth et al.	Naturschutz und Klimawandel im Leipziger Auwald	1/2021	2397
Dietz	Datenkrise der experimentellen Wissenschaften?	2/2022	1894
Kubetschek	Oberflächenplasmonenresonanzspektroskopie	1/2021	1745
Molenkamp	Symbiosen im Korallenriff	2/2021	1698
Fiebelkorn et al.	Fleisch(r)evolution	3/2022	1631
Kremer-Schillings	Teil 1: Warum ich keine Biodiversität mag	1/2024	1361

sehr große Aufmerksamkeit (Tabelle 1). Zukunftsorientiert beteiligen wir junge Menschen und deshalb gestalten Studierende seit 2022 das Editorial und Teile von „Politik und Gesellschaft“ im jeweiligen Heft 3. Diese Studierendenorientierung werden wir fortführen und haben jetzt erstmals die studentische Beteiligung an der BiuZ-Entwicklung als Mitglied im Editorial Board der BiuZ in einer Anzeige ausgeschrieben.

Die Autor/-innen erzielen mit ihren Artikeln eine Öffentlichkeitswirksamkeit, wie sie für zeitgemäße Wissenschaftskommunikation und in drittmittelgeförderten Forschungsvorhaben gefordert wird. Nach sechs Monaten werden die Artikel in *Open Access* geschaltet. Gegen Entrichtung einer kleinen Gebühr kann diese Embargofrist vorzeitig aufgehoben werden.

All die hier aufgezeigten Merkmale zeichnen die BiuZ aus. Haben Sie Interesse daran, einen Artikel in der BiuZ zu veröffentlichen? Dann senden Sie einfach eine Voranfrage. Wollen Sie für Ihre Forschung im deutschsprachigen Raum besondere Aufmerksamkeit erzielen, dann sprechen Sie uns auf ein Sonderheft an! Wir freuen uns darauf. Abschließend wollen wir uns bei allen Leser/-innen und Unterstützer/-innen herzlich bedanken.



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

Verlag:

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

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

Managing Editor:

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

Editorial Board:

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

Herstellung:

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

Anzeigenleitung:

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

Mitglieder- und Abo-Service:

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

Preise:

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

Geschäftsstellen des Verbandes:

Geschäftsstelle München

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

Geschäftsstelle Berlin

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

Satz:

TypoDesign Hecker GmbH, Leimen.

Druck und Bindung:

ColorDruck Solutions, Leimen.

© VBIO e.V., München, 2025.

Printed in the Federal Republic of Germany.

ISSN 0045-205 X

BIOLOGIE

1 | 2025 IN UNSERER ZEIT
www.biuz.de



Die beeindruckenden Jagdswärme der Treiberameisen faszinieren uns Menschen seit Langem. Das Titelbild zeigt eine Kolonne der Art *Eciton burchellii*, die von einem Raubzug zurückkehrt, „bewacht“ von einem Ameisen-Soldaten (rechts). Als Jäger zahlreicher Kleinstlebewesen spielen Treiberameisen eine Schlüsselrolle im Nahrungsnetz tropischer Regenwälder. Unser Autor Christoph von Beeren beleuchtet nicht nur die ökologische Bedeutung der Treiberameisen, sondern auch, wie ihre Präsenz die lokale Biodiversität fördert. Besonders faszinierend sind ihre zahlreichen „Schmarotzer“, vor allem kleine Insekten, die beeindruckende Anpassungen an das Leben mit den Treiberameisen entwickelt haben. Mehr dazu finden Sie auf S. 30.
Foto: D. Kronauer.

MELDUNGEN

6 Forschung & Entwicklung, Unternehmen, Preise & Auszeichnungen, Ausstellungen

POLITIK UND GESELLSCHAFT

11 Positionspapier: Deutschlands Chance auf eine nachhaltige Zukunft

13 Weiterentwicklung der Biuz: Machen Sie mit!

14 Zur Effektivität von Lehrkräftefortbildungen

16 Plädoyer für die Biologiegeschichte

19 Auf parlamentarischem Parkett: Künstliche Intelligenz und Biowissenschaften

TREFFPUNKT FORSCHUNG

20 Chloroplasten exportieren Proteine zum Abbau ins Cytosol

21 200. Geburtstag von Thomas Huxley

23 Die Mehlbeere – klimastabile Pionierbaumart

27 Spermienkonkurrenz und das Aussterben der Neandertaler

28 Der Tasmanische Teufel und sein teuflischer Krebs

29 Die mysteriöse Chinesische Guave – Segen oder Fluch der Natur

MAGAZIN

86 Bücher und Medien

92 Partner des Menschen: Das Rentier: Helfer in der Arktis

94 Außerschulische Lernorte: Museum am Schölerberg – Die Entwicklung des Lebens bis zu städtischen Zukunftsmodellen

96 Mikroben verstehen: Auch Mikroben altern

IM FOKUS

- 30** Gäste tropischer Treiberameisen
Christoph von Beeren
- 40** Stadtbäume für die übernächste Generation
Jürgen Bouillon
- 50** Konflikt und Kooperation in der Kernfamilie
Fritz Trillmich
- 58** Grüne Bioökonomie: Alleskönner Algen?
Christian Wilhelm

- 68** Problemfall Schwefel
David Kaufholdt, Elke Bloem, Henrik Hartmann,
Heinz Rennenberg, Robert Hänsch
- 78** Der Naturverlust hat jedes gesunde Maß überschritten
Katrin Böhning-Gaese, Friederike Bauer

40 Stadtbäume für die übernächste Generation



Foto: J. Bouillon

„Klimabäume“ sind im Gegensatz zu vielen einheimischen Baumarten gut an zu erwartende Klimaverhältnisse und an die Besonderheiten urbaner Standorte angepasst. Sie stehen allerdings im Verdacht, durch ungewollte und übermäßige Ausbreitung einheimische Baumarten zu verdrängen. Unser Autor plädiert für eine differenzierte Betrachtung.



Foto: D. Mock

50 Konflikt und Kooperation in der Kernfamilie

Viele Tiere wachsen gemeinsam mit Geschwistern auf. Da in einer gemeinsamen Umwelt Ressourcen geteilt werden müssen, entstehen dabei unweigerlich Konflikte. Daneben können Geschwister aber auch von Kooperation profitieren. Die verhaltensökologische Theorie bietet hier Erklärungsansätze.

58 Grüne Bioökonomie: Alleskönner Algen?

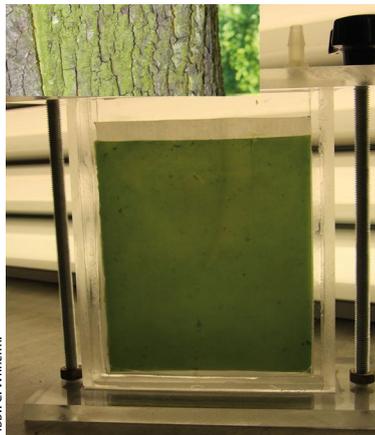


Abb.: C. Wilhelm

Die Bioökonomie hilft, Milliarden Menschen zu ernähren, vor Krankheiten zu schützen und mit Wasser und Rohstoffen zu versorgen. Ihr Erfolg hängt maßgeblich von der Effizienz der Photosynthese ab. Hier scheint die Nutzung von Algen besonders aussichtsreich. Doch wie realistisch sind die Erwartungen?

30 Gäste tropischer Treiberameisen



Foto: D. Krausauer

Während ihrer koordinierten Schwarmraubzüge überwältigen Treiberameisen eine Vielzahl von Beutetieren. Davon profitieren auch viele andere Regenwaldbewohner, die den Schwärmen folgen. Gemeinsam mit den Treiberameisen sind diese „Schmarotzer“ durch die Fragmentierung des Regenwalds bedroht.

68 Problemfall Schwefel



Foto: R. Hänsch

Schwefel ist ein essentielles Makroelement, das in zahlreichen biologischen Prozessen eine wichtige Rolle spielt. Waren unsere Wälder lange Zeit durch Schwefeldioxid in der Atmosphäre stark belastet, sehen sie sich derzeit einem zunehmendem Schwefelmangel gegenüber, der ebenso problematisch ist.



Foto: B. Gaese

78 Der Naturverlust hat jedes gesunde Maß überschritten

Wir stehen an einem Wendepunkt der Erdgeschichte: Die Hälfte aller Ökosysteme wurde bereits massiv verändert; eine von geschätzten acht Millionen Arten ist vom Aussterben bedroht. Unsere Autorinnen sind der Meinung, dass diese Tatsache noch nicht genug Aufmerksamkeit erhält und plädieren dafür, Biodiversität als gleichwertigen Teil der Nachhaltigkeitsdebatte anzuerkennen.

Rentiere schützen durch ihre Beweidung die Böden, beeinflussen den Kohlenstoffhaushalt und können die Vielfalt von Pflanzen und Tieren fördern.

Foto: Carsten W. Müller.



FORSCHUNG & ENTWICKLUNG

In den arktischen Permafrostböden sind immense Mengen an Kohlenstoff gespeichert – mehr als in der gesamten weltweiten Biomasse. Durch den Klimawandel taut dieser Permafrost, was zur Freisetzung von Kohlendioxid und Methan führt und einen Teufelskreis des Temperaturanstiegs in Gang setzt. **Hier spielen Rentiere eine Schlüsselrolle im Kampf gegen den Klimawandel** und für den Erhalt der Biodiversität: „Indem sie die Vegetation kurzhalten, verhindern sie die durch den Klimawandel hervorgerufene Verbuschung, welche die Isolation der Böden verstärkt“, erklärt Prof. Dr. Carsten Müller von der Technischen Universität Berlin. „Außerdem befreien sie an einigen Stellen mit ihren Hufen den Boden vom Schnee. Dadurch kann die Winterkälte besser in den Boden eindringen und das Auftauen des Permafrosts wird verlangsamt.“

Große Pflanzenfresser wie Rentiere, Moschusochsen oder Wisente schaffen durch ihre Bewegungen und ihre Beweidung ein Mosaik aus unterschiedlichen Landschaftstypen. Diese offenen Flächen bieten Lebensraum für zahlreiche Pflanzen- und Tierarten, die auf solche Bedingungen angewiesen sind. Ein Beispiel vor der Haustür ist Sielmanns Naturlandschaft in der Döberitzer Heide in Brandenburg, wo Wisente, Wildpferde und Rothirsche auf ehemaligen Truppenübungsflächen heute eine natürliche Beweidung ermöglichen. Erste Daten deuten darauf hin, dass das Beweiden durch Rentiere und andere Pflanzenfresser nicht nur die Vegetation beeinflusst, sondern auch Prozesse im Boden verändert. Der punktuelle Eintrag von Stickstoff über Dung und die natürliche Bodenbearbeitung durch Trittsflächen könnten sich positiv auf die langfristige Speicherung von Kohlenstoff im Boden auswirken oder zumindest helfen, die bestehende Speicherkapazität zu erhal-

ten. „Auch wenn noch nicht abschließend geklärt ist, wie groß dieser Effekt ist, zeigt sich, dass der Erhalt von stabilen, funktionalen Ökosystemen durch Huftiere ein Schlüssel sein könnte, um die Kohlenstofffreisetzung zu verringern“, sagt der Bodenkundler. „Unsere Daten zeigen, dass große Pflanzenfresser nicht nur für eine höhere Biodiversität sorgen, sondern auch stabilere Ökosysteme schaffen können“, so Carsten Müller weiter. „Sie fungieren quasi als Landschaftsgärtner.“

www.tu.berlin

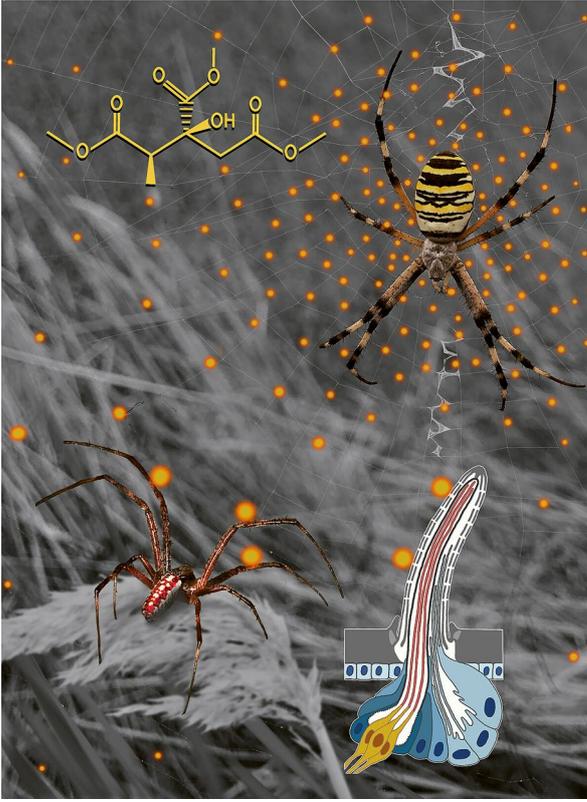
Ein internationales Forscherteam, darunter Dr. Eudald Mujal, Paläontologe am Naturkundemuseum Stuttgart, hat ein fossiles Tier beschrieben, das vor etwa 280 bis 270 Millionen Jahren auf dem heutigen Mallorca lebte und zu einer Gruppe von Säbelzahntieren gehörte. Es handelt sich um die **Fossilien des ältesten bekannten Gorgonopsiers der Erde**. Diese Tiergruppe gehörte zu den Therapsiden, der Entwicklungslinie, aus der später die ersten Säugetiere hervorgingen. Die ausgestorbenen Gorgonopsier lebten im Perm und waren Warmblüter wie die heutigen Säugetiere, legten aber im Gegensatz zu ihnen Eier. Als Fleischfresser waren sie auch die ersten Tiere, die Säbelzähne entwickelten. Ihr Aussehen ähnelte dem eines Hundes, allerdings ohne Ohren und Fell, und sie waren oft die Spitzenräuber im Ökosystem. Im Gegensatz zu den Reptilien, die sich ursprünglich mit gespreizten Beinen fortbewegten, waren die Beine der Gorgonopsier eher vertikal ausgerichtet, was das Laufen effizienter machte. Im Perm war Mallorca keine Insel, sondern Teil des Superkontinents Pangaea. Sie lag auf einem äquatorialen Breitengrad, auf dem heute Länder wie der Kongo oder Guinea liegen. Das Klima war monsunartig; Feucht- und Trockenzeiten wechselten sich ab. Der Fundort der Fossilien wurde als Überschwemmungsgebiet mit zeitweiligen Tümp-



Rekonstruktion des Aussehens eines Gorgonopsiers, wie er in einer Überschwemmungsebene des Perms auf Mallorca lebte. Abb.: Henry Sutherland Sharpe.

peln identifiziert, an denen Gorgonopsier und andere Tiere tranken. Trotz ihrer geringen Fläche sind die Balearen außergewöhnlich reich an Fossilien. „Unser Fund auf Mallorca zeigt, dass wir in Westeuropa und Nordafrika mit weiteren Funden aus dem Perm rechnen können, die unser Verständnis des damaligen Ökosystems erweitern werden“, so der Paläontologe Dr. Eudald Mujal. www.naturkundemuseum-bw.de

Der Geruchssinn oder Chemosensorik ist für das Überleben und den Fortpflanzungserfolg von Tieren von zentraler Bedeutung. Er hilft ihnen beispielsweise, Beute- oder Raubtiere zu erkennen oder Paarungspartner aufzuspüren. Bisher wurde hauptsächlich zur Chemosensorik bei Insekten geforscht, vor allem im Rahmen der Pheromonforschung zur Schädlingsbekämpfung. Über die chemosensorische Welt von Spinnen, die als die wichtigste Gruppe natürlicher Feinde von Insekten gelten, ist dagegen nur wenig bekannt. Das Team der Arbeitsgruppe Allgemeine und Systematische Zoologie am Zoologischen Institut und Museum der Universität Greifswald unter der Leitung von Prof. Dr. Gabriele Uhl wies nun mit Hilfe eines hochauflösenden Feldemissions-Rasterelektronenmikroskops Sensillen mit Poren in der Haarwand bei Männchen der Wespenspinne *Argio-*



Ein Männchen der Wespenspinne (*Argiope bruennichi*) nähert sich einem Weibchen, das seine Paarungsbereitschaft durch die Abgabe des Sexualpheromons (2R,3S)-Trimethylmethylcitrat (TMMC) signalisiert. Diese Moleküle sind durch helle Punkte gekennzeichnet. Grafik: Veronika Uhl.

pe bruennichi nach. Letztere ist eine der wenigen Spinnenarten, für die das Sexualpheromon bekannt ist, mit dem die Weibchen die Männchen anlocken. Ähnlich wie die Wandporen-Sensillen bei Insekten sind diese Haare innen mit Lymphe gefüllt, die wiederum Fortsätze von Neuronen enthält. Dr. Hong-Lei Wang von der Pheromongruppe der Universität Lund konnte bei den Sensillen eine deutliche und **konzentrationsabhängige neuronale Reaktion auf das Pheromon nachweisen**. In einer vergleichenden Untersuchung von 19 Spinnenarten wurden diese nur bei Männchen vorhandenen Sensillen bei den meisten, aber nicht bei allen Arten gefunden. Die Forschenden werden nun die Bedeutung des Geruchsinns bei Spinnengruppen mit und ohne diese Sensillen im Kontext von Partnerwahl, Beutefang und Fressfeindvermeidung vergleichen und

die morphologischen Unterschiede und die molekulare Ausstattung des Geruchsinns zwischen Insekten und Spinnen erforschen.

www.uni-greifswald.de

■ Bakterien werden ununterbrochen von Viren infiziert, sogenannten Phagen, die die Bakterien als Wirtszellen nutzen. Doch im Laufe der Evolution haben Bakterien eine Vielzahl von Strategien entwickelt, um sich vor diesen Attacken zu schützen. Viele dieser bakteriellen Immunitätssysteme sind schon lange bekannt. Prof. Dr. Marc Erhardt und Prof. Dr. Philipp Popp, beide vom Institut für Biologie der Humboldt-Universität zu Berlin, haben nun gemeinsam mit Forschenden aus Dänemark und Neuseeland und weiteren Kooperationspartnern die Struktur und Funktionsweise **eines neuartigen bakteriellen Abwehrsystems gegen Phagen entschlüsselt**. Es war ursprünglich 2018 von einer israelischen Forschungsgruppe entdeckt und nach Zorya, einer Figur in der slawischen Mythologie benannt worden.

Das Zorya-System erkennt Phagenangriffe und aktiviert eine frühzeitige und präzise Abwehr, die das Virus unschädlich macht, ohne dass die Wirtszelle abstirbt. Die Untersuchung des Zorya-Systems anhand modernster Methoden wie Kryoelektronen- und Fluoreszenzmikroskopie zeigt, dass es aus einem ein-

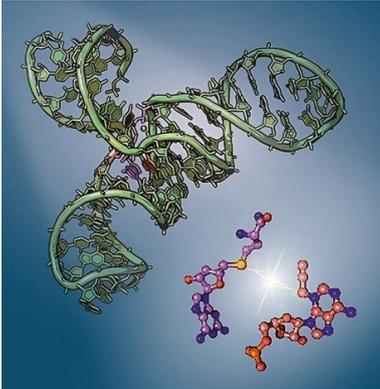
zigartigen molekularen Motor und mehreren spezialisierten Komponenten besteht. Dieser Motor erkennt frühzeitig Veränderungen in der Zellhülle, die durch eindringende Phagen verursacht werden, und löst eine Abfolge von Schutzreaktionen aus. Durch diesen bisher unbekanntem Mechanismus kann die Bakterienzelle die Phagen-DNA gezielt abbauen, so dass das Virus sich nicht in der Wirtszelle vermehren kann. Das ist bemerkenswert, denn in der Regel verhindern Bakterien die Vermehrung der Phagen, indem sie den Zelltod einleiten, sich also selbst „opfern“. Das Zorya-System könnte laut den Studienautoren als Grundlage für die Entwicklung innovativer Werkzeuge dienen, um gezielt genetisches Material zu manipulieren oder um neuartige Therapien gegen bakterielle Infektionen zu entwickeln.

www.bu-berlin.de

■ Katalytisch aktive RNA-Moleküle werden als „Ribozyme“ bezeichnet. Forschende um Claudia Höbartner vom Institut für Organische Chemie an der Universität Würzburg haben jetzt die 3D-Struktur eines solchen Ribozyms aufgedeckt. SAMURI, so der Name des RNA-Enzyms, ist in der Lage **andere RNA-Moleküle gezielt an einer bestimmten Stelle chemisch zu verändern** und so deren Funktion zu beeinflussen. Für die Modifikation einzelner



3-D-Modell des bakteriellen Viren-Abwehrsystems Zorya. Foto: Frederick J.O. Martin/ Universität Kopenhagen.



Das Ribozym SAMURI (Kristallstruktur in Grün) bietet den strukturellen Rahmen für die Katalyse der chemischen Reaktion zur Übertragung der RNA-Modifikation. Bild: Hsuan-Ai Chen/JMU.

RNA-Bausteine nutzt SAMURI das Hilfsmolekül S-Adenosylmethionin (SAM), das für viele Prozesse in der Zelle wichtig ist. Das Spannende: Auch einige in Bakterien entdeckte RNA-Moleküle können mit SAM wechselwirken – allerdings ohne dass sie weitere RNA modifizieren. Warum dies so ist, können die Forschenden dank der entschlüsselten Molekülstruktur von SAMURI nun besser beantworten. „Untersuchungen legen nahe, dass natürlich vorkommende SAM-bindende RNA auf frühere Ribozyme zurückgehen könnte, die im Laufe der Evolution ihre katalytischen Funktionen verloren haben“, so Höbartner. Erkenntnisse über die Struktur und Funktionsweise katalytischer RNA ist wichtig, um bestehende Ribozyme zu verbessern und neue zu entwickeln. Bedeutsam wären diese zum Beispiel für die Erforschung natürlicher RNA-Modifikationen – etwa um diese sichtbar zu machen, aber auch für deren Verwendung in therapeutischen RNAs.

www.uni-wuerzburg.de

UNTERNEHMEN

Aus dem Verhalten der Tiere können Menschen vieles lernen. Um diese Daten optimal auslesen zu können, hat das Münchner Startup Talos



GmbH wenige Zentimeter große Geräte entworfen, die mittels **Satelliten die Bewegungen und Umgebungen von Tieren verarbeiten**. Die Ziele: Bessere Voraussagen von Umweltkatastrophen und die genauere Überwachung bedrohter Arten. In der Landwirtschaft soll die optimale Versorgung der Tiere erleichtert sowie die Früherkennung von Krankheiten ermöglicht werden. Dafür erhält die Firma rund 124.000 Euro Förderung von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU).

Mit Hilfe eines per Halsband oder Geschirr zu befestigenden „IoT-Geräts“ (IoT = *Internet of Things*) werden Positions-, Bewegungs- und Biodaten der Tiere gesammelt. Talos-Gründer Gregor Langer erläutert: „Das Gerät speichert die Daten zunächst und leitet sie dann in regelmäßigen Abständen über einen Satelliten an uns weiter. Wir bündeln die Informationen und stellen sie unseren Kundinnen und Kunden zur Verarbeitung je nach Zweck des Trackings zur Verfügung.“ Pro Satellit könnten über 100.000 IoT-Geräte auf diese Weise kommunizieren. Die Geräte selbst sind laut Firmenangaben ohne Einschränkungen sowohl von großen als auch von kleinen Tieren tragbar. Ein renommierter Kunde wurde für die Pilotphase bereits gewonnen: das Max-Planck-Institut für Verhaltensbiologie.

www.dbu.de

PREISE & AUSZEICHNUNGEN

Das Immunsystem des Menschen besteht aus dem erworbenen und dem angeborenen Immunsystem. Während das erworbene Immunsystem durch spezifische Abwehrzellen ein langanhaltendes Immungedächtnis aufbaut, galt das angeborene Immunsystem bisher als schnell und kurzfristig reagierend. Dr. Timo Rückert aus der Gruppe von Chiara Romagnani vom Institut für Medizinische Immunologie der Charité – Universitätsmedizin Berlin und dem Deutschen Rheuma-Forschungszentrum (DRFZ) konnte jedoch zeigen, **dass auch das angeborene Immunsystem eine Art Immungedächtnis entwickeln kann**. Der Biologe und seine Kolleg/-innen entdeckten, dass bestimmte natürliche Killerzellen (NK-Zellen) auf das humane Cytomegalovirus (CMV) mit einer massiven Vermehrung reagieren. Diese spezialisierten Zellen be-



Wurde mit dem Pettenkofer-Preis 2024 geehrt: Dr. Timo Rückert von der Charité – Universitätsmedizin Berlin. Foto: Robert Haas.

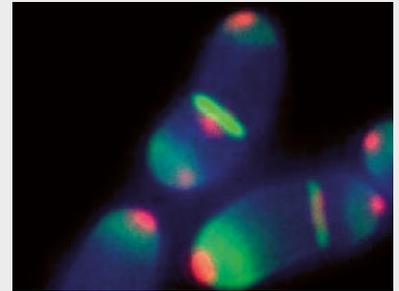
Die wenige Zentimeter großen Geräte der Talos GmbH können an unterschiedliche Tierarten angepasst werden wie hier an einen Flughund. Im Mittelpunkt des Trackings soll die Populationsüberwachung bedrohter Tierarten stehen, um vor Wilderei, aber auch vor Krankheitswellen zu schützen. Foto: Max-Planck-Institut für Verhaltensbiologie.

MIKROBE DES JAHRES 2025

Im Jahr 1956 suchten zwei japanische Forscher gezielt Bakterien, die den herzhaften Geschmack „umami“ produzieren. Diese Geschmackswahrnehmung wird durch Natriumglutamat, das natürlicherweise in reifen Tomaten, Parmesan und Schinken enthalten ist und als Würzmittel eingesetzt wird, über bestimmte Sinneszellen ausgelöst. Fündig wurden sie beim „Keulenbakterium“ *Corynebacterium glutamicum*, das natürlicherweise Glutamat ausscheidet. Heute produziert das Bakterium weltweit über 3,5 Millionen Tonnen Natriumglutamat jährlich – das entspricht einem Güterzug mit 50.000 Waggonen und einer Länge von über 850 Kilometern. Seit etwa 40 Jahren nutzen wissenschaftliche Institute und Unternehmen in Deutschland gentechnische Methoden und neue Ansätze der synthetischen Biologie, um neben Aminosäuren eine breite Palette weiterer Produkte mit der Mikrobe des Jahres herzustellen. Dazu gehören gesundheitsfördernde Naturstoffe, Antioxidantien und antimikrobielle Peptide.

Die Vereinigung für Allgemeine und Angewandte Mikrobiologie (VAAM e. V.) hat *C. glutamicum* aufgrund dieser Verdienst zur Mikrobe des Jahres 2025 gewählt. Die Keulenform verdanken die länglichen Corynebakterien einem ungleichmäßigen Wachstum der Zellwände: Während des Wachstums wird neues Zellwandmaterial zunächst bevorzugt an einem Ende der Zelle eingebaut. Während *C. glutamicum* ein harmloses Bodenbakterium ist, tötete sein pathogener Verwandter *C. diphtheriae*, der „Würgeengel der Kinder“, bis Ende des 19. Jahrhunderts jährlich etwa 50.000 Kinder deutschlandweit. Corynebakterien sind zudem verwandt mit *Mycobacterium tuberculosis*, dem Erreger der Lungentuberkulose, an der jährlich 1,5 Millionen Menschen weltweit sterben. Die Ähnlichkeiten beispielsweise im Zellwandaufbau können genutzt werden, um mit Hilfe der Mikrobe des Jahres Angriffspunkte für neue Medikamente zu identifizieren.

www.vaam.de



Zelluläre Organisation von *Corynebacterium glutamicum*. Das polare Gerüstprotein DivIVA verlagert die Zellwandsynthese zu den Zellpolen (DivIVA rot und Zellwandsynthese grün markiert, DNA blau). Aufnahme: Marc Bramkamp (CC BY 4.0).

halten ihre Abwehreigenschaften über Jahre hinweg und können erneut auf CMV reagieren. Damit konnte der Preisträger erstmals ein langfristiges, klonales Immungedächtnis im angeborenen Immunsystem nachweisen. Diese Erkenntnis könnte helfen, Immunreaktionen bei Infektionen, Impfungen und Autoimmunerkrankungen besser zu verstehen. Für seine Forschung zum klonalen Immungedächtnis im angeborenen Immunsystem wurde Timo Rückert nun mit dem Pettenkofer-Preis ausgezeichnet. Die Pettenkofer-Stiftung in München würdigt herausragende Wissenschaftler/-innen, die durch außergewöhnliche Leistungen in den Bereichen Hygiene, medizinische Mikrobiologie und medizinische Virologie überzeugen, mit einem Preisgeld von 5.000 EUR, das von der Firma Roche gesponsert wird.

www.drfg.de

AUSSTELLUNGEN

Die Sonderausstellung „Giganten der Urmeere“, die bis zum 07. September 2025 im Naturkundemuseum

Kassel im Ottoneum zu sehen ist, begibt sich auf eine Zeitreise in die ferne Vergangenheit der Erde: Faszinierende, große Geschöpfe, die wir nur von Versteinerungen kennen, bevölkern die Urmeere bereits im Erdaltertum, während an Land noch völlige Ödnis herrscht. Im Erdmittelalter beherrschen Saurier dann nicht nur die gesamte Erdoberfläche und den Luftraum, sondern auch die Meere. Die Vorfahren der Säugetiere sind zu dieser Zeit noch winzig klein und werden sich erst nach einer weltweiten Katastrophe entfalten. In der

Ausstellung gehen Besuchende auf eine Tauchfahrt in die Urmeere und begegnen dort den ausgestorbenen Meeresriesen vergangener Zeiten. Neben heimische Schwimmsaurier reihen sich langhalsige Paddel-echsen, Fischesaurier, Mosasaurier und die größte Schildkröte, die je existierte. Viele Bereiche für Kinder und interaktive Stationen machen diese Ausstellung zu einem kurzweiligen und informativen Erlebnis für alle.

www.kassel.de/einrichtungen/naturkundemuseum/



In den Meeren der Urzeit tummelten sich gefährliche Raubtiere wie dieser Meeressaurier. Illustration: Davide Bonadonna/Naturkundemuseum Kassel.

BIOÖKONOMIE

Positionspapier: Deutschlands Chance auf eine nachhaltige Zukunft

Die Bioökonomie liefert vielversprechende Lösungen, unsere Wirtschaft nachhaltiger zu gestalten und einer Vielzahl an Herausforderungen des 21. Jahrhunderts zu begegnen. Doch was verbirgt sich hinter diesem Konzept und wie steht es um die deutsche Bioökonomie? Und was wäre zu tun, um dieses Konzept breit zu verankern?

Unter der Bioökonomie versteht man im Wesentlichen die Nutzung biologischer Ressourcen und biotechnologischer Prinzipien und Prozesse zur Herstellung von Produkten und Dienstleistungen in verschiedenen Wirtschaftssektoren. Ein Ziel dieses Wirtschaftskonzepts ist vor allem, fossile Rohstoffe durch nachwachsende zu ersetzen sowie Wirtschaftskreisläufe und damit Wirtschaftswachstum nachhaltiger zu gestalten. Die Bandbreite der Produkte reicht dabei von Lebensmitteln über Chemiestoffe und Pharmaka bis hin zu neuen biobasierten Materialien. Ziel der Bioökonomie ist es zusätzlich, ökologische, wirtschaftliche und soziale Nachhaltigkeit miteinander zu verbinden. Auf der Website *bioökonomie.de* werden zahlreiche Beispiele für die Vielfalt der Bioökonomie anschaulich erläutert – etwa die biotechnologische Herstellung von Enzymen, die eine hohe Waschkraft bereits bei niedrigen Temperaturen ermöglichen, die Produktion von Fleisch- und Eialternativen oder das enzymatische Recycling von Polyester durch das französische Startup Carbios [1].

Chance Biorevolution

Der Klimawandel, die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen, die zunehmende Rohstoffknappheit und die Notwendigkeit, essenzielle gesellschaftliche Güter wie saubere Luft, hohe Wasserqualität und funktionierende Ökosysteme zu bewahren, erfordern eine Transformation der Wirtschaftsweise und der industriellen Produktion. Die Bioökonomie bietet dabei eine Chance, einige

dieser drängenden Herausforderungen des 21. Jahrhunderts anzugehen und nachhaltige Lösungen zu schaffen.

Global kann die Bioökonomie einen wesentlichen Beitrag zur Verlangsamung des Klimawandels leisten, indem sie den Übergang zu einer klimaneutralen Wirtschaft unterstützt. Gleichzeitig eröffnet sie Wege, um die wachsende Weltbevölkerung umweltschonend mit Nahrung und Rohstoffen zu versorgen. Durch ihr hohes Innovationspotenzial eröffnet die Bioökonomie neue Entwicklungsmöglichkeiten in diversen Wirtschaftszweigen wie der chemischen Industrie, der Gesundheitswirtschaft, der Lebensmittelproduktion sowie dem Bau-, Material- und Energiesektor.

Regional betrachtet birgt die Bioökonomie großes Potenzial für die wirtschaftliche Stärkung ländlicher Räume [2]. In Deutschland könnte beispielsweise die Weiterentwicklung biotechnologischer Verfahren sowie die Entwicklung innovativer, biobasierter Industrien als auch die Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe neue Wertschöpfungsketten schaffen und zur Transformation der Wirtschaft unter anderem durch „grünes Wachstum“ und die Schaffung neuer Arbeitsplätze in zukunftsfähigen Branchen beitragen.

Eine Schlüsselrolle in der Bioökonomie spielt die Biotechnologie. Ihre Verfahren finden Anwendung in allen Sektoren und ermöglichen biobasierte und bioinspirierte Lösungen sowie die Schließung von Stoffkreisläufen. Besonders die Chemie- und Pharmaindustrie werden durch den Einsatz biotechnologischer Produktionsverfahren und Therapien transformiert. Die bioökonomische Transformation wird globale Handels- und Wertschöpfungsketten verschiedener Wirtschaftssektoren, Industriestandorte und Arbeitsplätze beeinflussen. Sie liefert vielfältige Impulse, etwa durch neu einsetzbare Materialien (wie die biotechno-



ABB. 1 Biomanufacturing nutzt biologische Mechanismen zur nachhaltigen und effizienten Herstellung wertvoller Materialien und Moleküle für Medizin, Lebensmittel und Industrie, wobei es umweltfreundlicher ist als traditionelle Verfahren und die Entwicklung neuartiger Produkte ermöglicht. Foto: Rick Lawless über Wikimedia Commons.

logische Nutzung von CO₂ sowie Reststoffen), moderne Produktionsverfahren, Maschinen und Roboter. Der Maschinen- und Anlagenbau könnte hier eine zentrale Rolle als Treiber einiger dieser Entwicklungen spielen. Der Weg in ein solches nachhaltiges, Treibhausgas-neutrales Kreislaufwirtschaftssystem muss allerdings noch durch weitreichende Innovationen erschlossen werden.

Hürden der Transformation zur Bioökonomie

Trotz dieser vielversprechenden Potenziale ist die Umsetzung der Transformation mit erheblichen Herausforderungen verbunden. Dazu zählen das Erreichen eines Konsenses über die notwendigen politischen, regulatorischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in Deutschland, Europa und der Welt.

In Deutschland müssen hierzu bestehende Infrastrukturen und Produktionssysteme umgestellt werden, was mit hohen Investitionskosten verbunden ist. Die Wettbewerbsfähigkeit wird sich anhand der Kosten insbesondere im Vergleich zu Produkten auf der Basis von fossilen Rohstoffen zeigen, solange ethische, soziale und ökologische Kriterien nicht zu einem großräumigen Umdenken führen. Zudem

erfordert die Entwicklung neuer biobasierter Produkte und Prozesse intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeit sowie die Überwindung technologischer Barrieren [3].

Deutschlands Position in der Bioökonomie

Deutschland galt lange Zeit als Vorreiter in der Entwicklung, Förderung und Implementierung einer Bioökonomie. Es wurden früh nationale Strategien verabschiedet und in Forschung und Entwicklung biobasierter und biotechnologischer Technologien investiert. Ziel war es und sollte es weiterhin sein, in Deutschland ein nachhaltigeres, Treibhausgas-neutrales Wirtschaftssystem zu etablieren, das durch Innovationen in der Produktion und Nutzung biologischer und biotechnologischer Ressourcen global Maßstäbe setzt.

Doch in den letzten Jahren hat Deutschland erheblich an Boden verloren. Die USA und China investieren strategisch massiv mehr in biotechnologische Forschung, Infrastruktur, Startups und Scaleups und haben darüber hinaus deutlich günstigere regulatorische Rahmenbedingungen geschaffen. So haben diese beiden Staaten die Führung übernommen. In den USA sind Programme wie die „National Bio-

technology and Biomanufacturing“-Initiative Ausdruck dieser Ambitionen, während China mit Initiativen wie „Made in China 2025“, „Healthy China 2030“ und dem Fünfjahresplan für die Entwicklung der Bioökonomie ebenfalls gezielt auf eine starke biotechnologische Zukunft hinarbeitet.

Auch andere Länder wie Brasilien, die Niederlande oder Großbritannien verfolgen ambitionierte Bioökonomie-Programme. Diese Länder setzen unter anderem verstärkt auf Biotechnologie und synthetische Biologie, um effizientere Ressourcennutzung, neue Formen der Energiegewinnung und Durchbrüche in der medizinischen Versorgung und der Lebensmittelproduktion zu erzielen.

Die deutschen Bemühungen wirken im internationalen Vergleich fragmentierter und weniger ambitioniert. Es fehlen die wirtschaftliche Langzeitstrategie, die auskömmliche Finanzierung, der zügige Ausbau von Innovationssystemen und die förderlichen regulatorischen Rahmenbedingungen. Diese fundamentalen Versäumnisse verhindern, dass Deutschland seine einstige Vorreiterrolle behauptet.

Dringender Handlungsbedarf

Deutschland steht vor einer entscheidenden Weichenstellung. Die

POSITIONSPAPIER

Das Positionspapier „Nachhaltige Bioökonomie jetzt weiterentwickeln“ hebt die zentrale Bedeutung der Bioökonomie für eine nachhaltige und resiliente Wirtschaft in einer post-fossilen Ära in Deutschland hervor. Das Papier fordert, den Kontakt zu den globalen Innovationsführern nicht abreißen zu lassen. Zeitnah muss eine kluge und ambitionierte Bioökonomie-Strategie implementiert werden.

Zentral ist der Ausbau von Infrastrukturen für Scaleups, insbesondere durch Pilotanlagen und deutlich verbesserte Finanzierungsbedingungen. Ohne diese Maßnahmen droht Deutschland im internationalen Vergleich weiter zurückzufallen. Zudem ist es erforderlich, ein „Level Playing Field“ am Markt zu schaffen, indem Nachteile für bioökonomische Produkte, etwa durch ungeeignete Standards oder regulatorische Hürden, abgebaut werden, um fairen Wettbewerb mit fossilen Produkten zu ermöglichen. Die Förderung der Kreislaufwirtschaft durch die Nutzung biotechnologischer Verfahren spielt hierbei

eine wesentliche Rolle. Darüber hinaus soll die regionale und internationale Zusammenarbeit gestärkt werden, indem lokale Initiativen gefördert und die internationale Vernetzung ausgebaut werden. Schließlich ist der Ausbau von Bildungsangeboten zur Bioökonomie auf allen Ebenen notwendig.

Das Papier wird getragen von einem interdisziplinären Gremium ehemaliger Mitglieder der Bioökonomieräte (BÖR I-III) verschiedener Bundesregierungen, Vertreter/-innen der Bioökonomie-Länderinitiative sowie weiterer Bioökonomie-Expert/-innen. Sie fordern konkrete politische Maßnahmen zur Förderung der Bioökonomie als Schlüssel für Nachhaltigkeit und Wettbewerbsfähigkeit und plädieren für eine stärkere politische Unterstützung auf nationaler sowie internationaler Ebene. Der VBIO ist Unterstützer dieses Positionspapiers, das unter folgendem Link eingesehen werden kann: <https://bioeconomy-science-hub.uni-hohenheim.de/>

Bundestagswahl im Februar 2025 und die daraus resultierende politische Agenda bieten eine historische Chance, die Bioökonomie (wieder) als Schlüsselindustrie für eine nachhaltige Zukunft zu positionieren. Es bedarf eines klaren politischen Bekenntnisses zur Fokussierung auf die Bioökonomie, verbunden mit konkreten Maßnahmen: Dazu gehören die Etablierung eines förderlichen regulatorischen Rahmens, die Erhöhung der staatlichen Förderung sowie die Unterstützung von Forschung und Startups sowie Scaleups durch zielgerichtete und ambitionierte Programme.

Nur durch entschlossenes Handeln kann Deutschland wieder zu den Spitzenreitern der globalen Bioökonomie aufschließen. Die

einstige Vorreiterrolle Deutschlands zeigt, dass die Bioökonomie bereits starke Verbündete in Ministerien, Verwaltungen und Parlamenten hatte – und diese auch heute noch besitzt. Es ist nun an der Zeit, solchen Stimmen wieder mehr Gehör zu schenken. Es gilt, Innovationen zu fördern, Bildung und Wissenstransfer zu stärken und gleichzeitig international wettbewerbsfähige Rahmenbedingungen zu schaffen. Die Bioökonomie bietet die Chance, ökologische und wirtschaftliche Ziele in Einklang zu bringen – doch diese Chance muss jetzt durch mutige Entscheidungen ergriffen werden. Die Zeit drängt! Jetzt gilt es, die Weichen für eine biobasierte Zukunft zu stellen.

Literatur

- [1] <https://t1p.de/9erxn>
- [2] Communiqué of the Global Bioeconomy Summit (2024). One Planet – Sustainable Bioeconomy Solutions for Global Challenges.
- [3] Positionspapier der BIO Deutschland. Mit Biologie wirtschaften. <https://t1p.de/vqlza>

Johann Liebeton ist Business Developer beim Startup BioHalo in Kopenhagen. Er studierte Biologie an der TU Darmstadt und Bioentrepreneurship in Kopenhagen. Bei BioHalo arbeitet er an der Kommerzialisierung von biobasierten High-Performance-Materialien. Seit 2020 ist er Bioeconomy Youth Champion des International Advisory Council on Global Bioeconomy (IACGB) und Beirat beim VBIO e. V.

IN EIGENER SACHE

Weiterentwicklung der Biuz: Machen Sie mit!

Die Biuz hat sich laut bisheriger Rückmeldungen in den letzten Jahren bemerkenswert gut entwickelt – und so soll es mit Ihrer Hilfe weitergehen! Sie als Leser/-in haben daher ab sofort die Möglichkeit, uns jeweils ein kurzes Feedback zur aktuellen Ausgabe zu geben und Vorschläge zu machen. Bitte nutzen Sie dazu den QR-Code oder den Link, die Sie ab sofort in jedem Biuz-Heft finden.

Vor vier Jahren hat der VBIO die Herausgeberschaft der „Biologie in unserer Zeit“ (Biuz) vom Verlag Wiley übernommen. Seitdem erscheint die Biuz in Eigenregie des Verbandes. Mit der Umstellung waren einige Änderungen verbunden, wie beispielsweise das vierteljährliche Erscheinen der Einzelhefte mit jeweils erhöhter Zahl der Heftseiten. Neue Mitglieder wurden in das Editorial Board berufen und haben neue Sichtweisen eingebracht. Zum Jahresende 2024 konnte erstmals ein Sonderheft zum Thema CRISPR-Cas realisiert werden.

Die Biuz entwickelt sich sehr vielversprechend – so das Fazit des Editorial Boards, das sich im November 2024 zu seinem jährlichen Meeting getroffen hat. Damit sich die Biuz auch in Zukunft weiterentwickelt und den Interessen der Leser/-innen gerecht wird, sind wir auf Ihr Feedback angewiesen. Was gefällt Ihnen in der jeweiligen Ausgabe besonders gut? Welche Themen soll die Biuz zukünftig stärker aufgreifen? Wir können nicht versprechen, alle Wünsche zu erfüllen, sind aber umso gespannter auf Ihre Anmerkungen und Vorschläge.

Rückmeldung via Online-Tool

Um Ihnen das Feedback so einfach wie möglich zu machen, finden Sie ab sofort in jeder Ausgabe der Biuz einen QR-Code bzw. einen Link. Hierüber gelangen Sie zu einem kurzen Online-Fragebogen mit wenigen Fragen zur aktuellen Biuz, deren Beantwortung unter fünf Minuten dauern sollte.

Bitte nehmen Sie sich die Zeit; sie ist gut investiert und trägt dazu bei, die Biuz noch interessanter zu machen und neue Ideen aufzugreifen. Vielen Dank!

Hier geht es zur Umfrage:

https://survey.lamapoll.de/Biuz_Heft_1_25

oder



VORTRAGSREIHE FASZINATION BIOLOGIE

Zur Effektivität von Lehrkräftefortbildungen

In mehreren Beiträgen wurde in der Biuz über die vom VBIO initiierte Online-Vortragsreihe „Faszination Biologie“ berichtet. Die Vortragsreihe wurde als Fortbildungsangebot insbesondere auch für Lehrkräfte konzipiert. Dieser Beitrag ordnet die Vortragsreihe in den Stand der Forschung zu Lehrkräftefortbildungen ein und zieht ein Fazit.

In mehreren Beiträgen der *Biologie in unserer Zeit* wurde über die Vortragsreihe „Faszination Biologie“ berichtet [1–3]. Der Auslöser dieser vom VBIO initiierten Online-Vortragsreihe war die Veröffentlichung der neuen Bildungsstandards im Fach Biologie für die Allgemeine Hochschulreife [4] – also jenem Dokument, in welchem die Kultusministerkonferenz verbindliche Standards für alle Bundesländer vereinbart hat. Die neuen Bildungsstandards dienen als eine Orientierung für die Themenwahl der Vortragsreihe [1].

Monatlich findet eine moderierte Online-Veranstaltung statt, in der Wissenschaftler/-innen über ein biologisches Thema referieren, aber auch Einblicke in die eigene Arbeit geben. Die Teilnehmenden haben die Gelegenheit, Fragen zu stellen und an Diskussionen teilzunehmen. Im Anschluss werden Materialien zur Verfügung gestellt, die für den

Unterricht genutzt werden können oder dem eigenen Nachlesen dienen.

Zielgruppe der Vortragsreihe waren insbesondere Lehrkräfte, aber auch alle anderen an Biologie Interessierten. Das Ziel der Reihe ist es, über biologische Themen zu informieren, für Biologie zu begeistern und somit einen Beitrag zur naturwissenschaftlichen Grundbildung zu leisten. Ob und inwiefern diese „qualitativ hochwertige Fortbildungsveranstaltung“ [3] tatsächlich „einen Einfluss auf den Schulalltag“ [1] hat, war – neben anderen Punkten – Gegenstand einer Befragung der Teilnehmenden der Vortragsreihe im November/Dezember 2023.

Bei dieser Befragung [3] machten Lehrkräfte mit etwa 47 Prozent die größte Gruppe aus, gefolgt von Ruheständler/-innen (19%) und Wissenschaftler/-innen (16%). Das Angebot wird also vermutlich vor allem (aber nicht nur) von Lehrkräften genutzt. Die an der Befragung

teilnehmenden Lehrkräfte betonten insbesondere den Wert der Vortragsreihe für die eigene wissenschaftliche Fortbildung (91%). Sie gaben außerdem an, die Informationen und Materialien aus der Fortbildung als mündliche Lehrerinformation im Unterricht (76%) oder als Teil von Arbeitsblättern (43%) zu nutzen. Verbalbeurteilungen der Vortragsreihe fallen mit Adjektiven wie „optimal“ und „hervorragend“ sehr positiv aus. Aus Sicht der Organisator/-innen belegen die Befragungsergebnisse, dass der Besuch der Vortragsreihe die Unterrichtsqualität positiv beeinflusst [2]. Trotz dieser positiven Ergebnisse bleibt offen, inwiefern die Teilnahme an der Vortragsreihe tatsächlich einen Einfluss auf die Unterrichtsgestaltung und insbesondere den Lernerfolg der Schüler/-innen hat.

Forschung zu Lehrkräftefortbildungen

In der Forschung zu Lehrkräftefortbildungen werden typischerweise Effekte auf Ebene der Lehrkräfte (z. B. fachinhaltliches oder fachdidaktisches Wissen), der Unterrichtsgestaltung und der Schüler/-innen untersucht, um eine umfassende Aussage über die Effektivität einer Lehrkräftefortbildung zu treffen [5, 6]. Bei den dabei zum Einsatz kommenden Erhebungsinstrumenten wird häufig zwischen Selbstauskünften von Lehrkräften und objektiven Erhebungsinstrumenten unterschieden (z. B. Wissenstests oder Unterrichtsbeobachtungen). Instrumente zur Selbstauskunft sind oftmals einfacher zu entwickeln als objektive Tests und geben einen Einblick in die Sichtweise und Einschätzung der Befragten. Gleichzeitig wird die Aussagekraft von Selbstauskünften diskutiert, weil die Ergebnisse bspw. auf Grund von Urteilsverzerrungen (z. B. einer systematisch sehr wohlwollenden oder sehr kritischen Beurteilung des Einflusses einer Fortbildung auf die eigene Unterrichtsgestaltung) beeinflusst sein können [7, 8]. Auch das

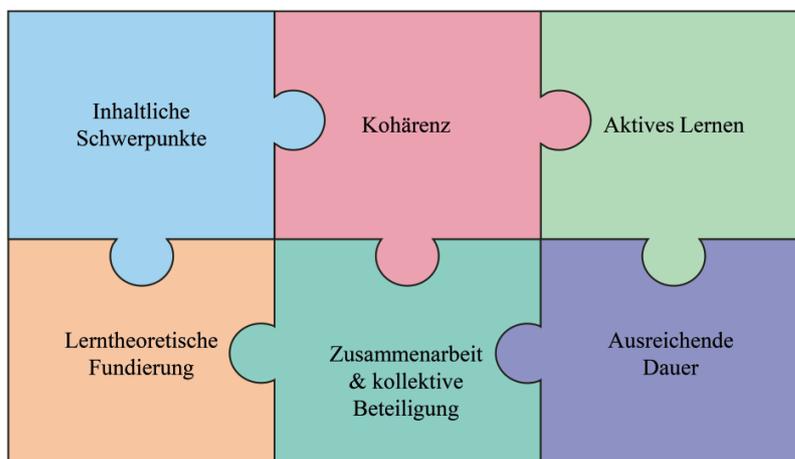


ABB. 1 Merkmale effektiver Lehrkräftefortbildungen nach [10]. Die Merkmale wirken zusammen und tragen zur Effektivität einer Lehrkräftefortbildung bei.

angewandte Studiendesign spielt für die Aussagekraft von Ergebnissen zur Effektivität einer Lehrkräftefortbildung eine Rolle. Hier gelten Studien, in denen vor, unmittelbar danach sowie einige Zeit nach der Fortbildung eine Erhebung vorgesehen ist, als besonders aussagekräftig [9].

In der Forschung konnten Merkmale identifiziert werden, welche die Effektivität einer Lehrkräftefortbildung positiv beeinflussen können [10]. Zu diesen gehören ein klarer *inhaltlicher Schwerpunkt* (effektive Lehrkräftefortbildungen haben einen klaren Schwerpunkt im Bereich des fachinhaltlichen oder fachdidaktischen Wissens), *Kohärenz* (effektive Lehrkräftefortbildungen sind inhaltlich auf die Lehrkräfte und die Lehrpläne abgestimmt), *aktives Lernen* (effektive Lehrkräftefortbildungen ermöglichen aktive Zusammenarbeit und Reflexion), eine *lerntheoretische Fundierung* (effektive Lehrkräftefortbildungen basieren auf wirksamen Lehr-/Lernmodellen), *Zusammenarbeit & kollektive Beteiligung* (effektive Lehrkräftefortbildungen schaffen Räume, in denen Lehrkräfte Ideen austauschen und beim Lernen zusammenarbeiten können), sowie die *Dauer* (effektive Lehrkräftefortbildungen bieten Lehrkräften ausreichend Zeit). Diese Merkmale wirken zusammen und stellen eine wichtige Grundlage dafür dar, dass die in einer Fortbildung transportierten Inhalte auf das Unterrichtshandeln und den Lernerfolg der Schüler/-innen wirken (Abbildung 1).

Einordnung der Gestaltung und Wirkung der Vortragsreihe

Die Online-Vortragsreihe „Faszination Biologie“ wurde von den Teilnehmenden generell positiv aufgenommen. Die meisten befragten Lehrkräfte gaben außerdem an, die Inhalte der Vortragsreihe für die eigene Fortbildung zu nutzen sowie – in geringerem Umfang – für verbale oder materiale Impulse für den eigenen Unterricht.

Darüber hinaus erlauben die oben skizzierten Befunde aus der Forschung zu Lehrkräftefortbildungen eine Einschätzung der Wirkung der Online-Vortragsreihe. Die eingesetzten Erhebungsinstrumente (Selbstauskünfte) sowie das Studiendesign (einmalige Befragung im Anschluss an den Besuch der Vortragsreihe) ermöglichen demnach eingeschränkte Aussagen über die tatsächliche Wirkung auf die Lehrkräfte, ihre Unterrichtsgestaltung und den Lernerfolg der Schüler/-innen. Die vorgenommene Teilnehmendenbefragung könnte erweitert werden, um den Einfluss der Teilnahme an der Vortragsreihe auf die „Qualität des Unterrichts“ [2] näher zu untersuchen.

Betrachtet man die oben skizzierten sechs Merkmale effektiver Lehrkräftefortbildungen, erfüllt die Vortragsreihe zwei davon: Es ist ein *inhaltlicher Schwerpunkt* (im Bereich Fachwissen) und eine *Kohärenz* (mit den Bildungsstandards im Fach Biologie für die Allgemeine Hochschulreife) gegeben. *Aktives Lernen* und *Zusammenarbeit & kollektive Beteiligung* auf der Basis *lerntheoretischer Modelle* über einen *längeren Zeitraum* fehlen bzw. sind eher schwach ausgeprägt.

Fazit

Studien haben zwar gezeigt, dass einmalige Lehrkräftefortbildungen durchaus kurzfristige Verbesserungen im Wissen und in den Fähigkeiten der Lehrkräfte bewirken können, sie haben jedoch oft keine langfristigen Auswirkungen auf das Unterrichtsverhalten oder die Leistungen der Schüler/-innen. Die Vortragsreihe des VBIO kann also effektiv sein, um das Bewusstsein für neue Konzepte zu schärfen oder um spezifische Fähigkeiten zu vermitteln. Insbesondere die Bereitschaft von Forschenden, einen Einblick in ihre Arbeit zu geben, ermöglicht eine zeitnahe Kommunikation von Forschungsergebnissen und damit Lehrkräften, sich inhaltlich gemäß dem aktuellen Stand fortzubilden.

Eine Erweiterung des Formats um ergänzende Angebote (z. B. die Bereitstellung von Unterrichtsmaterialien) könnte die teilnehmenden Lehrkräfte dabei unterstützen, die Inhalte der Vorträge für ihre Unterrichtspraxis besser nutzen zu können.

Die Zusammensetzung der an der Befragung Teilnehmenden (knapp 50 % Lehrkräfte) [2] deutet darauf hin, dass sich die Vortragsreihe von einer ursprünglich insbesondere für Lehrkräfte konzipierten Veranstaltung [3] in Richtung einer Vortragsreihe für die breite Öffentlichkeit wandelt (d. h. Wissenschaftskommunikation). Dies bestätigen auch aktuelle Zahlen zum Jahr 2024, nach denen an den acht Veranstaltungen 1482 Personen teilnahmen, wovon 536 Lehrkräfte waren (persönliche Mitteilung M. Radermacher). Unabhängig davon kann die Forschung zu Lehrkräftefortbildungen sowohl dabei helfen, Lehrkräftefortbildungen so zu gestalten, dass eine Wirkung auf den Unterricht wahrscheinlich ist, als auch die Wirkung gegebener Lehrkräftefortbildungen evidenzbasiert einzuschätzen. Hier stellt der VBIO als Dachverband mit Fachgesellschaften (u. a. auch die Fachsektion Didaktik der Biologie (FDdB) innerhalb des VBIO) und Landesverbänden sowie dem AK Schulbiologie ein wertvolles Forum dar, die relevanten Akteure zusammenzubringen und gemeinsam inhaltlich aktuelle und wirksame Lehrkräftefortbildungen zu entwickeln.

Literatur

- [1] M. Radermacher (2023). Faszination Biologie: Eine Reihe mit Vorträgen aus der Wissenschaft. *Biologie in unserer Zeit* 53(2), 114–116.
- [2] M. Radermacher (2024). „Faszination Biologie“: Online-Vortragsreihe des VBIO mit positiver Resonanz. *Biologie in unserer Zeit* 54(2), 111–113.
- [3] M. Radermacher, C. Roller (2024). Die Zukunft der schulischen Bildung im Fokus. *Biologie in unserer Zeit* 54(1), 11–13.
- [4] KMK (Hg.) (2020). *Bildungsstandards im Fach Biologie für die Allgemeine Hochschulreife*. Wolters Kluwer, Hürth.

- [5] L. M. Desimone (2009). Improving impact studies of teachers' professional development: Toward better conceptualizations and measures. *Educational Researcher* 38(3), 181–199.
- [6] R. Sannert, M. Krell (2023). A professional development program to foster science teachers' professional competence, enhance classroom practice, and improve student outcomes related to scientific reasoning. *Progress in Science Education* 6(2), 47–62.
- [7] H. Hill, Z. Mancenido, S. Loeb (2021). Effectiveness research for teacher education. EdWorkingPaper, 20–252. Annenberg Institute at Brown University, <https://doi.org/10.26300/zhhb-j781>
- [8] N. Döring, J. Bortz (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. Springer-Verlag, Berlin & Heidelberg.
- [9] J. König et al. (2023). Teacher education effectiveness as an emerging research paradigm: a synthesis of reviews of empirical studies published over three decades (1993–2023). *Journal of Curriculum Studies* 56(4), 371–391.
- [10] G. Roehrig (2024). Research on teacher professional development programs in science. In N. Lederman, D. Zeidler, J. Lederman (Hrsg.), *Handbook of Research on Science Education*, Routledge Verlag, London, 1197–1220.
- Moritz Krell und Richard Sannert, IPN – Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik, Kiel*

KORREKTUR ZU POLITIK UND GESELLSCHAFT, HEFT 4/24

Im Artikel „Zum 25. Mal Frühjahrschule der Fachsektion Didaktik der Biologie“ auf S. 317 von dem Autorenteam Maren Junker, Colin Peperkorn und Cornelia Averdunk wurde im redaktionellen Prozess versehentlich ein Satz gestrichen, der die Rolle der Leuphana Universität Lüneburg als Gastgeberin bei der Organisation und Durchführung der Veranstaltung würdigt. Die Redaktion bedauert dieses Versehen und möchte mit dieser Korrektur das Engagement der Leuphana Universität ausdrücklich betonen. In der Online-Version des Artikels wurde ein entsprechender Satz eingefügt. Wir danken für Ihr Verständnis!

FACHGRUPPEN

Plädoyer für die Biologiegeschichte

Bereits kurz nach der politischen Wende in den Jahren 1989/90 kam unter biologiehistorisch Interessierten die Idee auf, eine gemeinsame Interessenvertretung zu gründen [1]. Daraus entstand die Deutsche Gesellschaft für Geschichte und Theorie der Biologie (DGGTB).

Die Federführung bei der Gründung der DGGTB hatte die Grande Dame der deutschen Biologiegeschichte Ilse Jahn (1922–2010, Abbildung 1)



ABB. 1 Ilse Jahn im Jahr 2002, anlässlich der Verleihung der Ehrendoktorwürde durch ihre Heimatfakultät in der Aula der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Foto: Renate Opferman, Jena.

inne – mit ihren vielen Veröffentlichungen und auch grundlegenden Lehrwerken Wegbereiterin der Biologiegeschichtsschreibung [2–4]. Auch Ernst Mayr (1904–2005), der „Darwin des 20. Jahrhunderts“, brachte sich in diese Überlegungen ein, als er bemerkte: „Erstens sollte es das Anliegen der Biologiehistoriker sein, verstärkt die biologische Tradition des 19. Jahrhunderts, die zu einem beträchtlichen Anteil im deutschen Sprachraum stattgefunden hat, zu erschließen und ins historische Bewusstsein zu heben. Zweitens müssten die biologischen Wissenschaften in ihrer Brückenfunktion zwischen den Natur- und Geisteswissenschaften gesehen werden. Daraus erwachse ein spezifischer interdisziplinärer Auftrag an die Biologiehistoriker und -theoretiker zur Überwindung jener geistigen Spaltung, die ihren Ausdruck im geflügelten Wort von den ‚zwei Kulturen‘ gefunden hat. Drittens gelte

es, die immer noch von den sogenannten ‚exakten Wissenschaften‘ dominierte *philosophy of science* durch die Hereinnahme der Biologie auf eine neue Stufe der Reflexion zu heben und damit auf lange Sicht das herrschende Bild der Wissenschaften umzubauen“ [5].

So wurde zunächst unter Leitung von Erika Krauß (1935–2003, Abbildung 2) aus dem Ernst-Haeckel-Haus in Jena ein „Aufruf zur Gründung“ gedruckt und publiziert, dem dann einige Zeit später, am 29. Juni 1991, die Gründungsversammlung im Großen Hörsaal Zoologie in der Erbertstraße folgte. An dieser nahmen 67 Mitglieder teil und mit 60 Stimmen wurde Ilse Jahn zur ersten Vorsitzenden gewählt. Die Gründungsmitglieder kamen u. a. aus den Niederlanden, Frankreich, Liechtenstein, Österreich, der Schweiz, der Tschechoslowakei und den USA.

Höhepunkt der 1. Jahrestagung in Marburg (1992) war dann die Teilnahme von Ernst Mayr, der extra hierfür aus den USA anreiste. Im Juni 2001 kam es nochmals während der Berliner Tagung zu einem Wiedersehen, anlässlich seines Goldenen Doktorjubiläums (75 Jahre) an der Humboldt-Universität [6, 7] (Abbildung 3).

Vielfältige Aktivitäten

Die *Deutsche Gesellschaft für Geschichte und Theorie der Biologie e. V.* (DGGTB) verfolgt nunmehr seit ihrer Gründung das Ziel, die Erforschung und Vermittlung der Geschichte und Theorie der Biologie zu fördern. Mithilfe von Veranstaltungen und Publikationen möchte sie den wissenschaftlichen Austausch zwischen den Mitgliedern, Institutionen mit ähnlichen Themenschwerpunkten und jungen, interessierten Wissenschaftler/-innen ermöglichen und so das gesellschaftliche Bewusstsein für die wissenschaftshistorischen Grundlagen unseres heutigen Verständnisses von Biologie schärfen [8, 9].

Die Tagungs- und Publikations-tätigkeit der Gesellschaft verdeutlicht seither ihre kontinuierliche Arbeitsweise. So erschien im Jahr 1994 der erste Band des *Jahrbuches für Geschichte und Theorie der Biologie*, das seit 2005 unter dem Titel *Annals of the History and Philosophy of Biology* firmiert (Abbildung 4). Mittlerweile liegt hier der 27. Band beim Universitätsverlag Göttingen vor. Die Beiträge der interdisziplinären und internationalen Jahrestagungen wurden von 1993 bis 1995 zunächst noch im *Biologischen Zentralblatt* – einer internationalen Zeitschrift für Zellbiologie, Genetik, Evolution und theoretische Biologie – veröffentlicht, da die Gesellschaft in diesem Zeitraum noch kein eigenes Publikationsorgan besaß. Im Nachgang zur 6. Jahrestagung in Tübingen (1997) folgte dann 1998 der erste Band der *Verhandlungen zur Geschichte und Theorie der Biologie*, die sogenannten „roten Bände“. Mittlerweile wurde auch hier der 26. Band, der die Beiträge der 30. Jubiläumstagung „Biologie und Literatur“ (Jena) zusammenfasst, vorgelegt. Ab Band 27 wird diese Reihe dann beim Verlag Springer Spektrum erscheinen.

Am 11. September 1998 wurde schließlich noch das Biohistoricum in Neuburg a. d. Donau (als Forschungsarchiv für die Geschichte

der Biologie) durch die maßgebliche Initiative von Armin Geus gegründet und war über Jahre hinweg die „institutionelle Anlaufstelle“ für das Fach Biologiegeschichte [10, 11]. Seit Oktober 2008 ist das Biohistoricum eine zentrale Einrichtung des Zoologischen Forschungsmuseums Alexander Koenig (ZFMK) in Bonn, eines der großen naturgeschichtlichen Forschungsmuseen in Deutschland.

Seit 2009 verleiht zudem die Gesellschaft in Anerkennung für besondere Verdienste um die Biologiegeschichte oder eine herausragende wissenschaftliche Arbeit über ein biologiegeschichtliches Thema die *Caspar-Friedrich-Wolff-Medaille*. Neben einzelnen Personen können hier auch nationale oder internationale Arbeitsgruppen ausgezeichnet werden. Mit dem *Ilse-Jahn-Ehrenpreis* werden ferner seit 2022 Personen für langjährige Verdienste um die Gesellschaft sowie die Fächer Geschichte und Theorie der Biologie geehrt [12].

Leider haben aber – retrospektiv betrachtet – die meisten Initiativen der Gesellschaft für das Fach Biologiegeschichte in den letzten drei Jahrzehnten deutschlandweit und universitär keine Früchte getragen,



ABB. 2 Erika Krauß. Foto: Archiv Hoßfeld.

vielmehr steht zu befürchten, dass das Fach weiter ein Schattendasein fristen wird. Das erinnert auch an eine frühe Warnung von E. Mayr aus dem Jahr 1993: „Eine gründlich historisch-philosophische Analyse macht viel Arbeit, vor allem das sorgfältige Studium der Originalquellen. Ich habe in den USA gesehen, daß sich einige jüngere Leute einen bequemen Ausweg gesucht haben und stattdessen über die sozialen und politischen Aspekte der Wissenschaft geschrieben haben. Das gehört aber in den Bereich der Sozialwissenschaften und ist kein Beitrag zur Geschichte der Biologie. Geschichte



ABB. 3 Gruppenfoto vom 23. Juni 2001 in der Humboldt-Universität Berlin, anlässlich der 10. Jahrestagung der DGGTB (v. l. n. r. Armin Geus, Uwe Hoßfeld, Ernst Mayr, Luminita Göbbel, Thomas Junker, Nicolaas A. Rupke. Foto: Eve-Marie Engels, Tübingen.

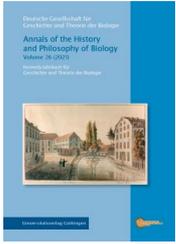


ABB. 4 Cover der Publikation „Annals of the History and Philosophy of Biology“. Foto: Universitätsverlag Göttingen.

der Biologie ist letzten Endes immer vor allem Ideengeschichte. Und da gibt es so viel zu tun, daß man nicht in die Sozialwissenschaften ausweichen sollte“ [13].

Aktuell gibt es in Deutschland – im Gegensatz zu anderen Ländern – für die Geschichte und Theorie der Biologie keine eigenen Lehrstühle oder Institute. Daher setzt sich die DGGTB in Zusammenarbeit mit gleichgesinnten Vereinigungen des In- und Auslandes insbesondere dafür ein, dass die Geschichte und Theorie der Biologie an allen deutschen Universitäten, an denen das Fach Biologie vertreten ist, als eigenständiges Arbeitsfeld in der biologischen Forschung und Lehre etabliert wird. Langfristig soll es keine biologische Fakultät geben, an der nicht die Möglichkeit geboten wird, Abschlussarbeiten auf den Gebieten der Geschichte und Theorie der Biologie anzufertigen und im Rahmen eines Forschungsprojekts an biologiehistorischen oder biologie-theoretischen Fragestellungen zu arbeiten.

Blick in die Zukunft

In den nächsten Jahren wird es vor allem darauf ankommen, in der Lehrerbildung Fuß zu fassen, Multiplikator/-innen sowie Unterstützer/-innen zu gewinnen. Nur so kann es gelingen, bereits bei jungen Menschen ein Bewusstsein dafür zu erzeugen, dass biologische Erkenntnisse und Denkweisen in unserer Gesellschaft – auch historisch gesehen – eine wichtige Rolle bei Entscheidungsprozessen spielen. In Fragen der Vermittlung geht es folglich darum, herauszustellen, dass Theoreme bspw. aus der Evolutionstheorie und Genetik unser Selbstverständnis und unser Weltbild nachhaltig beeinflusst(en) und sich heute mit ihrer Hilfe Elemente der uns umgebenden Welt in ihrer Komplexität erschließen und verstehen lassen [14]. Ferner trägt die Biologie vor dem historischen Hintergrund erheblich zur Entwicklung von Wertvorstellungen bei, geht über

die fachwissenschaftlichen Grenzen hinaus und knüpft Verbindungen zu anderen Natur-, Geistes- und Humanwissenschaften.

Daran anknüpfend reflektiert und diskutiert die Gesellschaft stets auch aktuelle Themen/Herausforderungen [15, 16] und ist gleichsam bestrebt, internationale Netzwerke weiter auszubauen, um einen permanenten Wissensaustausch zu fördern. Die nächste Jahrestagung findet daher vom 21. bis 22. Juni 2025 im Nationaltechnischen Museum in Prag zum Thema „Aristokratie und Naturwissenschaft“ statt. Die anstehende Veranstaltung lädt somit zu Vorträgen ein, die sich mit der Bedeutung adeliger Netzwerke, Schirmherrschaften und Sammlungen für die Wissensproduktion befassen und die Auswirkungen dieser Faktoren auf wissenschaftliche Debatten und Praktiken untersuchen. Mit der Rückkehr der DGGTB zum 1. Januar 2025 in den gesamtdeutschen Schoß des VBIO verbindet die Gesellschaft u. a. den Wunsch auf ein besseres Interagieren mit den anderen Fachdisziplinen/Fachgesellschaften, eine Erhöhung der Sichtbarkeit sowie eine größere Sensibilisierung für biohistorische und -theoretische Fragen.

Literatur

- [1] H.-J. Rheinberger (2024). Einige Reminiszenzen an die Frühzeit der DGGTB. Verhandlungen zur Geschichte und Theorie der Biologie, Bd. 26, S. 185–188.
- [2] I. Jahn (Hrsg.) (2000). Geschichte der Biologie. Theorien, Methoden, Institutionen, Kurzbiographien. 3. Aufl., Spektrum Akademischer Verlag, Berlin & Heidelberg.
- [3] K.-F. Wessel, J. Schulz, S. Hackethal (2000). Ein Leben für die Biologie(geschichte). Festschrift zum 75. Geburtstag von Ilse Jahn. Kleine-Verlag, Bielefeld.
- [4] J. Schulz (2024). Erinnerungen, Eindrücke und Kritiken eines langjährigen Mitgliedes: Ideen zur Gründung, Geschichte, Gegenwart und Zukunft der DGGTB. Verhandlungen zur Geschichte und Theorie der Biologie, Bd. 26, S. 197–203.
- [5] Mitteilungen der DGGTB vom November 1992, Nr. 4, S. 1.
- [6] E. Höxtermann, J. Kaasch, M. Kaasch (Hrsg.) (2002). Die Entstehung biologischer Disziplinen I (Verhandlungen zur Geschichte und Theorie der Biologie, Bd. 8). VWB-Verlag, Berlin.
- [7] U. Hoßfeld, T. Junker (Hrsg.) (2002). Die Entstehung biologischer Disziplinen II (Verhandlungen zur Geschichte und Theorie der Biologie, Bd. 9). VWB-Verlag, Berlin.
- [8] I. Jahn, H. Querner (1994). Die Deutsche Gesellschaft für Geschichte und Theorie der Biologie. Vorgeschichte, Aufgaben und Ziele. Jb. für Ge. u. Theorie Biol. 1, S. 5–19.
- [9] K. Wenig (2019). Biologiegeschichte im Umbruch. 25 Jahre Deutsche Gesellschaft für Geschichte und Theorie der Biologie e. V. (1991–2016). Verhandlungen zur Geschichte und Theorie der Biologie, Bd. 21, S. 35–52.
- [10] K. Schmidt-Loske, J. W. Wägele (eds.) (2011). Zehn Jahre Biohistoricum 1998–2008. Eine Festschrift. Basiliskens-Presse im Verlag Natur + Text, Rangsdorf.
- [11] A. Geus, E. Höxtermann (2023). Fünf- und zwanzig Jahre Biohistoricum 1998–2023. Eine Jubiläumsausgabe. Natur + Text, Rangsdorf.
- [12] U. Hoßfeld (2024). Laudatio für Ekkehard Höxtermann zur Verleihung des Ilse-Jahn-Ehrenpreises der DGGTB 2022. Verhandlungen zur Geschichte und Theorie der Biologie, Bd. 26, S. 205–208.
- [13] E. Mayr (1993). Begrüßungsansprache an die Teilnehmer der ersten Jahresversammlung der Deutschen Gesellschaft für Geschichte und Theorie der Biologie (Marburg, am 26. Juni 1992). Biologisches Zentralblatt 112 (2), S. 98–99.
- [14] K. Porges, S. Wogawa, M. Morkramer, U. Hoßfeld (Hrsg.) (2021). Biologie und Bildung (Verhandlungen zur Geschichte und Theorie der Biologie, Bd. 23). THK, Arnstadt.
- [15] M. Kaasch, J. Kaasch (2024). Seitenblicke – Subjektive Ansichten über die DGGTB und die Biologiegeschichte. Verhandlungen zur Geschichte und Theorie der Biologie, Bd. 26, S. 189–196.
- [16] K. Porges, J. Pittelkow, U. Hoßfeld (Hrsg.) (2024). Biologie im Zeitalter der digitalen (R)Evolution (Verhandlungen zur Geschichte und Theorie der Biologie, Bd. 25). THK, Arnstadt.

Weitere Informationen:

<https://t1p.de/9rcng> (Wikipedia)
<https://www.vbio.de/fachgesellschaften/dggtb>

*Uwe Hoßfeld, Karl Porges,
 Friedrich-Schiller-Universität Jena,
 uwe.bossfeld@uni-jena.de,
 karl.porges@uni-jena.de*

VBIO

Auf parlamentarischem Parkett: Künstliche Intelligenz und Biowissenschaften

„Künstliche Intelligenz (KI) in den Naturwissenschaften“ – unter diesem Motto luden die im Bündnis „Wissenschaft verbindet“ zusammengeschlossenen Gesellschaften aus Biologie, Chemie, Geowissenschaften, Mathematik und Physik am 3. Dezember 2024 zu einem gemeinsamen Parlamentarischen Abend. Etwa 40 Abgeordnete und ihre Referent/-innen informierten sich über die in Mathematik und Naturwissenschaften vorhandene Expertise zur Entwicklung, Nutzung und Bewertung von KI.

Veranstalter des gemeinsamen Parlamentarischen Abends waren neben dem Verband Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin (VBIO) die Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), der Dachverband der Geowissenschaften (DVGeo), die Deutsche Mathematiker-Vereinigung (DMV) und die Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG). Nach ähnlichen Veranstaltungen zu „Klima und Energie“ (2022) und „Nachhaltigkeit“ (2023) stand nun also das überaus vielfältige, mit Erwartungen und Sorgen gleichermaßen befrachtete Thema KI im Mittelpunkt.

Vielfältige Anwendungen

Die Fülle der Entwicklungen und Anwendungen in Mathematik und Naturwissenschaften spiegelte sich auch in den vorgestellten Projekten wider. So gewannen die Besucher/-innen beispielsweise einen Einblick in die Nutzung von KI bei der Vorhersage von Erdbeben oder dem Monitoring von Grundwasserständen. Auch im Bereich der Wirkstoffentwicklung machten verschiedene Projekte deutlich, wie sehr KI heute schon die Forschung voranbringt. Auch bei der Bestimmung und Erfassung von Pflanzenarten wird KI auf verschiedenen Skalen eingesetzt – bei der Fernerkundung per Satellit ebenso wie bei der „Naherkundung“ mit dem eigenen Handy.

Weitere Beiträge zum Parlamentarischen Abend setzten sich mit den Grenzen bei der Anwendung von KI auseinander: Macht die Anwendung von KI zukünftig wissenschaftliche Tierversuche überflüssig?

Wie trainiere ich KI-Anwendungen – zum Beispiel beim autonomen Fahren –, auf Unsicherheiten und Fehlerquellen bei der Vorhersage hinzuweisen? Und schließlich: „Was ist eigentlich ‚intelligent‘ an KI?“

KI – ein aktuelles Thema

Die Darstellung von Projekten und Einschätzungen aus den mathematisch-naturwissenschaftlichen Disziplinen und der Diskurs über gesellschaftliche, wissenschafts- und förderpolitische Konsequenzen von KI ist aktueller denn je: So hat die Bundesregierung nach eigener Aussage in den Haushaltsjahren 2022 und 2023 insgesamt 1,5 Milliarden Euro in KI investiert. Darüber hinaus trat zum 1. August 2024 die KI-Verordnung der Europäischen Union (*AI Act*) in Kraft, die sich in weltweit einmaliger Weise an die Regulierung von KI wagt. Die gesetzgeberische Umsetzung des *AI Acts* in Deutschland steht allerdings noch aus.

Individuelle Gespräche

Auf Frontalvorträge hatten die Veranstalter bewusst verzichtet. Stattdessen gab es an Stehtischen Exponate und Projektpräsentationen, die in Einzelgesprächen erläutert wurden. Je nach Interessen der Abgeordneten wurden unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt. Da an den Tischen Expert/-innen aus unterschiedlichen Disziplinen vertreten waren, ergaben sich zusätzlich spannende interdisziplinäre Dialoge.

Handlungsbedarfe ...

In den Gesprächen wurden auch Handlungsbedarfe für die Politik aufgezeigt – etwa zum Thema Forschungsförderung und Regulierung oder zur Effizienzsteigerung von Ressourcenmanagement. Der Zeitrahmen der Umsetzung und die Ausgestaltung der Entwicklungen blieben – wie bei Veranstaltungen dieser Art zwangsläufig – offen. Dies gilt umso mehr vor dem Hintergrund der politischen Übergangsphase, in der diese langfristig geplante Veranstaltung letztlich stattgefunden hat.

Das gemeinsame Auftreten der fünf Fachgesellschaften verdeutlichte darüber hinaus, dass es rund um das Thema KI neben spezifisch disziplinärer vor allem interdisziplinärer Denk- und Forschungsansätze bedarf.

Kerstin Elbing auf Basis eines Textes von Wissenschaft verbindet (T. Vogt)



ABB. 1 Für den VBIO nahmen am Parlamentarischen Abend teil: Thomas Korff, Markus Engstler, Jana Wäldchen und Bertram Weiß (v.l.n.r.). Foto: Elbing/VBIO.

PFLANZENPHYSIOLOGIE

Chloroplasten exportieren Proteine zum Abbau ins Cytosol

Die gängige Lehrmeinung ging davon aus, dass die Chloroplastenproteine im Zellorganell selbst abgebaut werden. Eine Studie konnte dies nun widerlegen: So finden sich im Chloroplasten Proteine, die mit Ubiquitin markiert sind, aus dem Chloroplasten heraustransportiert und im Cytosol durch das Proteasom abgebaut werden.

Chloroplasten, die typischen Organellen der Pflanzen, entstanden vor mehr als einer Milliarde von Jahren durch Aufnahme eines Cyanobakteriums durch eine Wirtszelle, die bereits einen Zellkern besaß. Während der Evolution haben die Chloroplasten ihre Eigenständigkeit verloren; ihre Entwicklung und Funktionalität steht weitgehend unter der Kontrolle des Zellkerns. Neben der Fotosynthese haben Chloroplasten eine Vielzahl für die Pflanzenzelle lebenswichtiger Aufgaben (Biosynthese von Lipiden, Aminosäuren u. a.) und ein entsprechend komplexes Repertoire von etwa 3000 Proteinen (Proteom). Das kleine Genom der Chloroplasten kodiert nur für etwa 80 Proteine, deren Synthese im Organell selbst stattfindet. Die meisten Proteine sind im Zellkern kodiert und werden als Vorstufenproteine an cytosolischen Ribosomen hergestellt. Der Import der Proteine erfolgt über ein Translokationssystem mit mehreren Untereinheiten in den beiden Hüllmembranen der Chloroplasten. Die Zusammensetzung des Chloroplastenproteoms sowie die Anzahl der einzelnen Proteine ändern sich im Verlauf der Pflanzenentwicklung sowie in Anpassung an veränderliche Umweltbedingungen.

Bisher dachte man, dass allein die bakteriellen Enzymsysteme die Menge der Chloroplastenproteine regulieren sowie für die Entfernung von schadhafte Chloroplastenproteinen zuständig sind. Paul Jarvis und seine Mitarbeiter an der Universität Oxford haben in den letzten Jahren aber mit überzeugenden For-

schungsansätzen gezeigt, dass das Proteasom im Cytosol am Abbau von Chloroplastenproteinen mitwirkt.

Das Proteasom ist ein großer Enzymkomplex, der alle Proteine abbaut, die mit dem Peptid Ubiquitin markiert sind. An der Übertragung von Ubiquitinresten auf Proteine sind in der Pflanzenzelle mehrere Hundert Ligasen beteiligt. Das System aus Ligasen und Proteasom wird als Ubiquitin-Proteasom-System (UPS) bezeichnet.

Ubiquitin-markierte Proteine im Chloroplasten

Zunächst hatten die Wissenschaftler nachgewiesen, dass Komponenten des Proteinimportapparates auf der Oberfläche der Chloroplasten nach Ubiquitylierung zum Abbau ins Proteasom gelangen [1]. Sie identif-

zierten in der Chloroplastenhülle die sogenannte SP1-Ligase, die den Ubiquitinrest auf Rezeptoren des Importapparates überträgt [1]. Mit diesem Befund zeigten die Wissenschaftler, dass die Zusammensetzung des Proteintranslokator-Komplexes nicht statisch ist, sondern entwicklungsabhängigen Änderungen unterliegt. Mutanten der Modellpflanze *Arabidopsis thaliana*, denen die SP1-Ligase fehlt, können nicht normal ergrünen [1]. Zehn Jahre später haben Jarvis und Mitarbeiter nun gezeigt, dass das UPS erstaunlicherweise auch Proteine, die im Chloroplasten vorkommen, abbaut [2]. Noch unerwarteter ist der Befund, dass mehr als 300 Proteine innerhalb der Chloroplasten mit Ubiquitin markiert sind. Darunter sind 24 Proteine des Fotosyntheseapparates, von denen sechs in den Chloroplasten selbst hergestellt werden [3]. Dieser Befund bedeutet, dass Fotosynthese und Produktivität der Pflanzen unter direkter Kontrolle des cytosolischen Proteinabbaus durch das UPS stehen.

Da Chloroplasten kein Proteasom besitzen, muss es offensichtlich ein Exportsystem für Chloroplastenproteine geben. Jarvis und Mitarbeiter identifizierten das Kanalprotein SP2 in der äußeren Hüllmembran der Chloroplasten und zeigten, dass

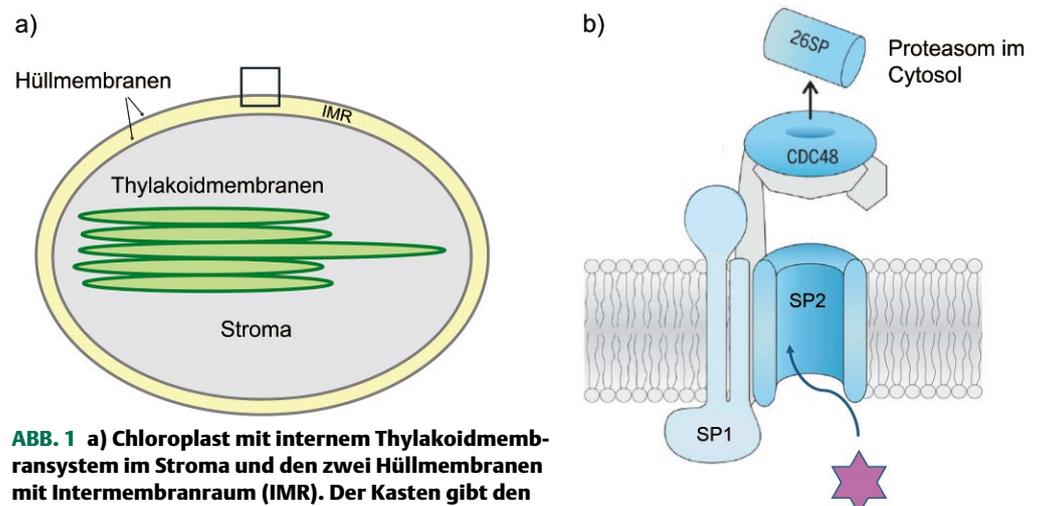


ABB. 1 a) Chloroplast mit internem Thylakoidmembransystem im Stroma und den zwei Hüllmembranen mit Intermembranraum (IMR). Der Kasten gibt den Bereich an, der in b) detailliert dargestellt ist. b) Ausschnitt der äußeren Hüllmembran mit dem Proteinexportsystem aus SP1, SP2 und CDC48 (Details siehe Text). 26SP = 26S-Proteasom. Abb.: Karin Krupinska, b) modifiziert nach [6] und [2].

die in allen höheren Zellen vorkommende cytosolische ATPase CDC48 durch Spaltung von ATP die nötige Energie für den Export der Proteine liefert. Unabhängig von der Gruppe in Oxford veröffentlichten im selben Jahr Forscher von drei Gruppen an der chinesischen Akademie der Wissenschaften in Peking, dass CDC48 für den Umbau des Chloroplastenproteoms und für die Stressresistenz von Pflanzen wichtig ist [4].

Im August dieses Jahres haben Jarvis und sein Mitarbeiter Na Li eine Arbeit zu einem weiteren Baustein des cytosolischen Apparates zum Abbau der Chloroplastenprote-

ine veröffentlicht. Sie identifizierten mit PUX10 ein Adaptorprotein, das CDC48 zur Chloroplastenoberfläche befördert [5]. Nun ist noch zu klären, wie es innerhalb der Chloroplasten zur Ubiquitinylierung von Proteinen kommt.

Literatur

- [1] Q. H. Ling et al. (2012). Chloroplast Biogenesis Is Regulated by Direct Action of the Ubiquitin-Proteasome System. *Science* 338, 655–659, <https://doi.org/10.1126/science.1225053>
- [2] Y. Sun, R. P. Jarvis (2023). Chloroplast Proteostasis: Import, Sorting, Ubiquitination, and Proteolysis. *Annual Review of Plant Biology* 74, 259–283, <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-070122-032532>
- [3] Y. Sun et al. (2022). Ubiquitin-based pathway acts inside chloroplasts to regulate photosynthesis. *Science Advances* 8, <https://doi.org/10.1126/sciadv.abq7352>
- [4] J. Li et al. (2022). The CDC48 complex mediates ubiquitin-dependent degradation of intra-chloroplast proteins in plants. *Cell Reports* 39, 110664.
- [5] P. Jarvis, N. Li (2024). Recruitment of Cdc48 to chloroplasts by a UBX-domain protein in chloroplast-associated protein degradation. *Nature Plants*, <https://doi.org/10.1038/s41477-024-01769-x>
- [6] Q. Ling et al. (2019). Ubiquitin-dependent chloroplast-associated protein degradation in plants. *Science* 363, 836.

Karin Krupinska,
Kiel

MENSCHEN

200. Geburtstag von Thomas Huxley

Der britische Biologe und Anatom Thomas Henry Huxley war ein enger Freund von Charles Darwin und leidenschaftlicher Verteidiger von dessen Theorie. Von dieser Aufgabe war er so besessen, dass er als „Darwins Bulldog“ (Darwins Kampfhund) bezeichnet wurde. Huxley nahm jedoch Darwins Gedanken nicht nur unkritisch auf, sondern zeigte auch einige ungeklärte Punkte auf und wies auf Probleme hin. Zum Beispiel folgte er Darwin nicht in der Annahme, dass Evolution ein langsamer, gradueller und kontinuierlicher Prozess sei. Stattdessen vermutete er, dass sich Lebewesen auch durch größere Sprünge weiterentwickelten. Heute gilt Huxley als einer der ersten Anhänger der Darwin'schen Evolutionstheorie, dessen Leistung darin bestand, diese durch unermüdliche Arbeit publik zu machen und für sie zu werben.



ABB. 1 Thomas Henry Huxley im Alter von 55 Jahren. Foto: Lock & Whitfield, 1880, gemeinfrei.

Thomas Henry Huxley (Abbildung 1) wurde am 4. Mai 1825 in Ealing bei London als siebentes von acht Kindern in bescheidenen Verhältnissen geboren. Als einzige Ausbildung absolvierte er die Schule in Ealing, wo sein Vater Mathematik unterrichtete, bis die Familie nach Coventry umzog. Trotz fehlender Schulbildung verschlang Huxley bereits in jungen Jahren wissenschaftliche, geschichtliche und philosophische Bücher und Schriften und brachte sich sogar autodidaktisch Deutsch bei.

Mit 15 Jahren begann er eine medizinische Lehre und erhielt dar-

aufhin ein Stipendium, das ihm ermöglichte, im *Charing Cross Hospital* zu studieren. Mit 21 Jahren bewarb er sich als Medizinischer Assistent auf dem Schiff *H. M. S. Rattlesnake*, das nach Australien und Neuguinea fuhr, und schilderte seine Eindrücke in einem Tagebuch lebendig und anschaulich [1]: „*I wonder if it is possible for the mind of man to conceive anything more degradingly offensive than the condition of us 150 men, shut up in this wooden box, being watered with hot water, as we are now ... It's too hot to sleep, and my sole amusement consists in*

watching the cockroaches, which are in a state of intense excitement and happiness.“ Trotz Schaben an Bord und kaum vorhandener wissenschaftlicher Einrichtung sammelte Huxley marine Wirbellose und untersuchte sie, wobei sein besonderes Interesse den Cnidaria, den Tunicata und den Cephalopoda galt. Auf dieser Reise traf er auch seine spätere Frau Henrietta Heathorn, in die er sich in Sydney verliebte. Als er im Oktober 1850 nach England zurückkehrte, hatten ihn seine Publikationen, die er von den Zwischenstationen nach Hause geschickt hatte, bereits zu einem bekannten Wissenschaftler gemacht, der Kontakte zu dem Geologen Charles Lyell, dem Botaniker Joseph Hooker, dem Philosophen Herbert Spencer und dem Biologen Charles Darwin unterhielt.

Zwar war eine Anstellung für Naturwissenschaftler zu damaliger Zeit nicht leicht zu erhalten – die meisten Biologen arbeiteten privat und nebenbei –, aber Huxley schaffte es: Er erhielt von der Navy ein Stipendium und schrieb populärwissenschaftliche Beiträge. Nach seinem Austritt aus der Navy im Jahre 1854 erhielt er eine Stelle als Lehrer an der *School of Mines* in London. Nun war der Zeitpunkt gekommen, seine Verlobte Henrietta Heathorn

aus Australien kommen zu lassen und 1855 zu heiraten.

Kokkolithen-Forschung

Obwohl weitgehend Autodidakt wurde Huxley zu einer Autorität in Anatomie und Paläontologie und war nach der Entdeckung des Archaeopteryx auch der erste, der propagierte, dass Vögel sich aus Dinosauriern entwickelt hatten. Mitte der 1850er Jahre beschrieb der Forscher das Vorkommen von Kalkschalen-bildenden Algen in ozeanischen Sedimenten, die vom Meeresboden ausgebagert wurden, und prägte dafür den Namen „Kokkolithen“. Die spätere Anerkennung ihres Vorkommens in weitgehend unverfestigten pelagischen Sedimenten und ähnlichen, stärker versteinerten Kalksteinen im Jura der Alpen führte dazu, dass Kokkolithen über weite Strecken der geologischen Zeit als wichtige gesteinsbildende Elemente galten, was sie auch heute noch sind.

Im Gegensatz zu Charles Darwin, der nach der Reise der Beagle nicht mehr ins Ausland reiste, unternahm Huxley mehrere Reisen nach Italien und in die Schweiz und ist 1893 als Gast im exklusiven Hotel Kursaal Maloja im Engadin verzeichnet. Er unternahm eine Reihe von Ausflügen zu Fuß und seine Anwesenheit galt als bedeutsam genug, um sie auf einer 1896 errichteten Granitsteintafel mit Inschrift festzuhalten, auf der er als „der berühmte Schriftsteller und Naturforscher“ beschrieben wird. Seine Streifzüge hatten ihn an Aufschlüssen von tektonisch eingelagerten echten ozeanischen Kalksedimenten aus der frühen Kreidezeit vorbeigeführt, die hier nachweislich ursprünglich Kokkolithen enthielten, die durch die alpine Metamorphose von Subgrünschiefer- zu Grünschieferfazies weitgehend zerstört worden waren. Insofern hatte Huxley annähernd echte ozeanische Sedimente erkennen können, die an Land freigelegt wurden, aber die Unähnlichkeit zwischen diesen Schweizer Alpenablagerungen und der brüchigen englischen Kreide

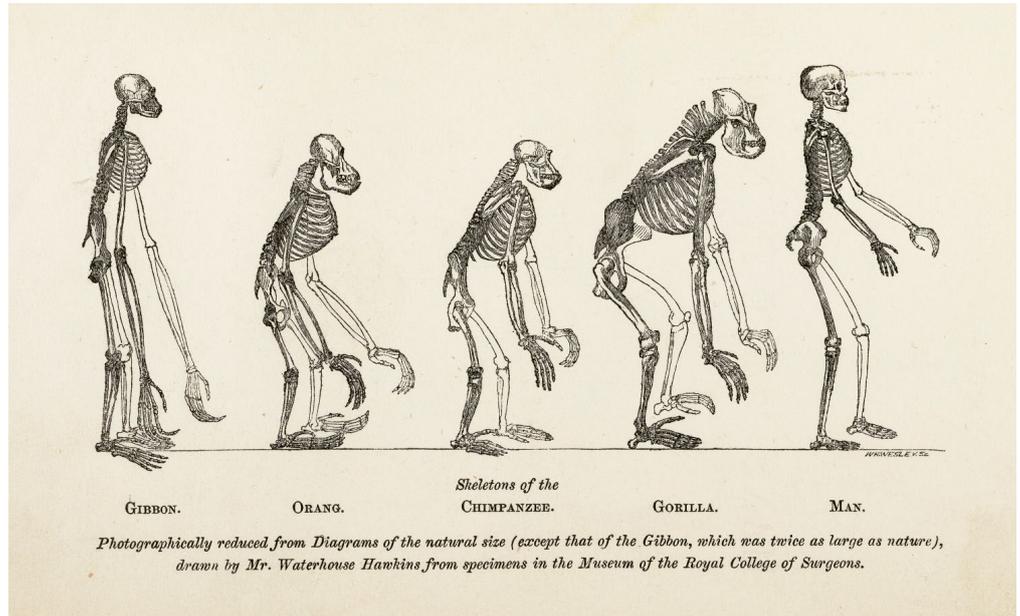


ABB.2 Ursprung für alle späteren Reihungen zum sogenannten *March of Progress* war diese Zeichnung von Gibbon, Orang-Utan, Schimpanse, Gorilla und Mensch in *Evidence as to Man's Place in Nature* (1863).

hatte offensichtlich dazu geführt, erstere nicht auf Kokkolithen hin zu untersuchen [2].

Affen und Menschen

Bekannt wurde Huxley vor allem durch eine Debatte im Juni 1860 bei einem Treffen der *British Association* in Oxford. Sein Gegenpart war Erzbischof Samuel Wilberforce, auch unter dem Spitznamen „Soapy Sam“ bekannt, der durch den bekannten Naturforscher Richard Owen („Entdecker der Dinosaurier“) unterstützt wurde. Während der Debatte versuchte Wilberforce, die Evolution lächerlich zu machen und fragte Huxley, ob er mütterlicherseits oder väterlicherseits von einem Affen abstamme. Es kam zu einem heftigen Schlagabtausch, der kontrovers überliefert wurde. Allgemeine Übereinstimmung findet sich in den Berichten jedoch darin, dass Huxley mehr Beachtung in dieser Debatte erhielt als seine Opponenten und dass er die Evolutionstheorie nach Darwin überzeugend als die bislang beste Erklärung für die Artenvielfalt darstellen konnte.

Huxleys berühmteste Schrift „*Evidence as to Man's Place in*

Nature“ wurde 1863 veröffentlicht (Abbildung 2). Nur fünf Jahre nach Erscheinen von Darwins Buch fasste er darin alles zusammen, was bekannt war über die Paläontologie und Ethologie von Primaten und vom Menschen. Damit war dies der erste Versuch, die Evolution explizit auch auf den Menschen anzuwenden. (Darwin selbst hatte es noch vermieden, in seinem Buch direkt darüber zu schreiben. Er machte diesbezüglich nur Andeutungen: „*Light will be thrown on the origin of Man*“).

Mit seiner Schrift provozierte Huxley wiederum Richard Owen, der die Meinung vertrat, dass sich im menschlichen Gehirn Teile finden würden, die nicht in Affenhirnen zu finden seien, dass also keinerlei Verwandtschaft noch Abstammungsverhältnisse zwischen Affen und Menschen beständen. Huxley konnte dies aber widerlegen: Das Gehirn von Affen und von Menschen ähnelt sich in allen anatomischen Details (Abbildung 3).

Die Huxley-Schicht, eine innere Zellschicht der Haarwurzelscheide, die er 1845 erstmals beschrieben hat, trägt ebenso seinen Namen wie

Zum Weiterlesen:



Wissenschaft und Kultur. Thomas Henry Huxley. Toppbook Wissen Band 76, 2023, 244 Seiten, 28 Euro, ISBN 978-3-7568-5127-0.



ABB. 3 Huxley konnte zeigen, dass sich das Gehirn von Menschen und Affen – hier ein männlicher Gorilla („Silberrücken“) stark ähnelt – Hinweis auf eine nahe Verwandtschaft und gemeinsame Abstammung.
Foto: W. Irsch.

die Huxley-Linie. Im Jahre 1868 prägte er diesen Begriff für die biogeografische Trennlinie zwischen asiatischer und australischer Flora und Fauna. Zudem schuf er in der zoologischen Systematik das Taxon der Knorpelfische (Chondrichthyes) innerhalb der Wirbeltiere (Vertebrata). 1869 gründete er gemein-

sam mit anderen Anhängern der Darwin'schen Lehre die Fachzeitschrift *Nature*.

Unermüdlicher Publizist

Seine Essays brachten ihm den Ruf ein, einer der größten Stilisten der englischen Sprache zu sein. Zu seinen Einfällen, um die Gedanken seines Freundes Darwin zu popularisieren, gehörte unter anderem die Einbindung von Dialoggeschichten, die eine auch einfachen Menschen verständliche Sprache benutzten [3].

Huxley starb auf seinem Anwesen „Hodeslea“ bei Eastbourne. Er ist der Vater von Leonard Huxley und Großvater dreier bekannter Brüder: des Biologen und UNESCO-Generalsekretärs Julian Huxley, des Schriftstellers Aldous Huxley sowie des Humanmediziners Andrew Fielding Huxley.

Der Brite gilt als Pionier, was die Erforschung von Wirbeltieren angeht. Er trug zur Entwicklung der

modernen Biologie bei. Zudem war Huxley ein bekannter Schriftsteller und Redner und trat für Bildung und Wissenschaft ein. Er war u. a. Mitglied der *Royal Society* und erhielt zahlreiche Auszeichnungen und Ehrungen für seine Arbeit. Sein Einfluss auf die Wissenschaft und Gesellschaft ist bis heute spürbar [4].

Literatur

- [1] J. Huxley (Herausgeber) (1935). Thomas Henry Huxley's Diary of the Voyage of H. M. S. Rattlesnake (Lond).
- [2] D. Bernoulli, H. C. Jenkyns (2023). Thomas Henry Huxley a stone tablet, coccoliths, and deep-sea sediments in the high Alps History of Earth Sciences. International Journal of Earth Sciences 112, 1661–1669.
- [3] L. Huxley (1903). Life and Letters of T. H. Huxley. Ausgaben 1–3 (Lond).
- [4] H.-P. Schmiedebach (2005). Huxley, Thomas Henry. In: Werner E. Gerabek u. a. (Hrsg.): Enzyklopädie Medizingeschichte. De Gruyter, Berlin/New York 2005, ISBN 3-11-015714-4, S. 646.

*Wilhelm Irsch,
Rebtingen-Siersburg*

ÖKOLOGIE

Die Mehlbeere – klimastabile Pionierbaumart

Das Kuratorium des Vereins „Baum des Jahres e. V.“ hatte als Nachfolger für die Moorbirke die Mehlbeere (*Sorbus aria*) zum Baum des Jahres 2024 gewählt. Nach Speierling (1994), Vogelbeere (1997) und Elsbeere (2011) war die Mehlbeere letztes Jahr die vierte heimische *Sorbus*-Art, die zum Baum des Jahres gewählt wurde.

Die Gattung *Sorbus* (Mehl- und Vogelbeeren) gehört innerhalb der Familie der Rosengewächse (*Rosaceae*) zur Unterfamilie der Apfelartigen (früher *Maloidea*, jetzt *Subtribus Pyrinae*). Kennzeichnend für diese Unterfamilie sind die verschieden großen, beerenähnlichen Apfelfrüchte.

Die Gattung ist in den gemäßigten Breiten auf der Nordhalbkugel verbreitet. Die Zahl ihrer Arten ist nicht genau bekannt, da neben den etwa 80 sich sexuell vermehrenden

diploiden Hauptarten viele Kleinarten vorkommen. Diese sind aufgrund von Arthybridisierungen und/oder Polyploidisierungen entstanden und pflanzen sich asexuell (apomiktisch) fort [1].

In Mitteleuropa kommen fünf Hauptarten vor: Mehlbeere (*Sorbus aria*), Vogelbeere (*Sorbus aucuparia*), Elsbeere (*Sorbus torminalis*), Zwerg-Mehlbeere (*Sorbus chamaemespilus*) und Speierling (*Sorbus domestica*), wobei der Speierling neuerdings in eine eigene Gattung

Cormus eingereiht wird, also *Cormus domestica* heißt.

Verbreitung und Vorkommen

Verbreitet ist die Mehlbeere in Westeuropa (Irland und England), Mitteleuropa, über Südeuropa (Spanien) und das Mittelmeergebiet (Nordafrika, Griechenland) bis nach Kleinasien. Im größten Teil Osteuropas fehlt sie. In Deutschland kommt die Mehlbeere v. a. in Thüringen, im Schwäbisch-Fränkischen Jura und in den Bayerischen Alpen vor. Sie ist eine kleine bis mittelgroße Baumart des Hügel- und Berglandes und bevorzugt warm-trockene Kalkböden [2] (Abbildung 1).

Blätter, Blüte und Frucht

Typisch und namensgebend ist die mehlweiße Unterseite ihrer ansonsten dunkelgrünen, eiförmigen und am Blattrand doppelt gesägten Blätter (Abbildung 2). Im Herbst färbt sich die Blattoberseite kurzzeitig gelb, später verbraunen die Blätter.



ABB. 1 Blühende Mehlebeere im nördlichen Frankenjura. Foto: Gregor Aas.

Die Mehlebeere blüht im Mai bis Juni und ihre ca. 1–1,5 cm großen Einzelblüten stehen in vielblütigen, endständigen Schirmrispen (Abbildung 3). Zur Blütezeit ist die Krone der Mehlebeere durch ihre zahlreichen creme-weißen Blütenstände überaus attraktiv anzuschauen. Die reichblütigen Doldenrispen der *Sorbus*-Arten besitzen offene, duftende Blüten, die reichlich Nektar absondern, der aber nur langrüsseligen Insekten wie Hummeln, Wildbienen, Honigbiene und Schwebfliegen zugänglich ist. Als gute Bienenweide aus der Gattung *Sorbus* gelten v. a. Mehlebeere und Vogelbeere.

Die mehligten, roten bis orangefarbenen Früchte sind Apfel Früchte mit 2–3 Samen, die aufgrund ihrer Größe und ihres Aussehens allgemein als „Beeren“ bezeichnet werden (Abbildung 4); sie erscheinen bis Oktober.

Mehlebeere und Vogelwelt

Es fällt auf, dass Singvogelarten, die kleiner als die Drosselarten sind, bei der Mehlebeere im Vergleich zur Eberesche fehlen oder viel seltener

auftreten, so z. B. Rotkehlchen, Garten- und Mönchsgrasmücke sowie Hausrotschwanz. Deutlicher wird dies im Vergleich mit den noch etwas größeren Früchten der Elsbeere. Das hängt mit dem durchschnittlichen Durchmesser der Früchte zusammen, der bei der Mehlebeere 11 mm und bei der Elsbeere 12 mm beträgt. Die Vogel„beeren“ dagegen sind im Durchschnitt nur 9 mm groß [3].

Bei den Vögeln sind die etwas kleineren Beeren der Vogelbeere also beliebter als die etwas größeren Früchte der Mehlebeere. Vogelbeeren werden auch von kleineren Singvögeln wie z. B. Rotkehlchen, Grasmücken und Hausrotschwanz im Ganzen verschluckt. Das können bei den etwas größeren Mehlebeeren- und Elsbeeren-Früchten nur noch die verschiedenen Drosselarten, z. B. Amsel, Sing-, Rot- und Misteldrossel [4, 5]. TURCEK [6] nennt 11 Vogelarten, die Mehlebeeren fressen (Auer-, Birk- und Haselhuhn, Mistel- und Singdrossel, Amsel, Gartengrasmücke, Seidenschwanz (Wintergast!), Star, Alpenkrähe, Alpendohle), und bei englischen Untersuchungen



ABB. 2 Die oberseits dunkelgrünen Blätter der Mehlebeere mit der typischen weißen Unterseite. Foto: Gregor Aas.



ABB. 3 Blüten der Mehlebeere. Foto: Gregor Aas.



ABB. 4 Die roten Früchte der Mehlebeere. Foto: Gregor Aas.

[7] wurden sogar 18 Vogelarten beim Verzehr von Mehlfbeeren beobachtet (Amsel, Sing-, Mistel-, Rot-, Wacholderdrossel, Rotkehlchen, Mönchsgrasmücke, Star, Aaskrähne, Eichelhäher, Elster, Ringeltaube, Gimpel, Grün-, Buch- und Bergfink, Kohl- und Blaumeise). Gerade für die Drosselarten sind Mehlfbeeren daher echte „Vogelnährgehölze“ (Abbildung 5). Außerdem sollte beachtet werden, dass die Mehlfbeerenfrüchte länger am Baum hängen bleiben als die Vogelbeeren und daher den Vogelarten länger als Nahrungsreserve zur Verfügung stehen können.

Für die Ausbreitung der Samenkerne der Mehlfbeere sind die Drosseln von großer Bedeutung, da sie die unverdauten Samen mit dem Kot wieder ausscheiden. Die Meisen- und Finkenarten als samenfressende Vögel sind dagegen nur am Samen selbst interessiert und tragen damit nicht zur Ausbreitung der Mehlfbeere bei. Neben den Früchten nehmen Auer-, Birk- und Haselhuhn gerade im Winter ebenfalls die Knospen der Mehlfbeere als Nahrung auf. Von den Säugetieren werden die Früchte der Mehlfbeere gerne von Haselmaus, Wald- und Gelbhalsmaus verzehrt (Abbildung 6). Herabgefallene Früchte können auch Dachschwein, Stein- und Edelmarmilbe (*Eriophyes arianus*), die neben der Mehlfbeere als namensgebender Art u. a. ebenfalls von Vogelbeere und Elsbeere bekannt ist.

der, Fuchs und Reh als Nahrung dienen.

Phytophage Insekten- und Milbenarten an der Mehlfbeere

Insgesamt wurden in Deutschland an der Gattung *Sorbus* 157 phytophage Insekten- und Milbenarten nachgewiesen. Davon sind 31 Arten auf die Pflanzengattung spezialisiert. Damit liegen die *Sorbus*-Arten (Mehl-, Vogel- und Elsbeere, Speierling) im Vergleich zu den anderen heimischen Gehölzen im letzten Drittel in Bezug auf die Besiedlung mit phytophagen Insekten- und Milbenarten, noch hinter Tanne (165/31), Esche (145/43) und Hainbuche (158/13) [8]. Diese geringere Anzahl phytophager Insekten an *Sorbus* kann aber auch auf eine unzureichende Erforschung der Insektenwelt an *Sorbus*-Arten zurückgehen [9].

Es gibt offenbar wenige Spezialisten unter den Wirbellosen, die nur auf der Mehlfbeere leben und nicht auch auf anderen *Sorbus*-Arten oder anderen baumartigen *Rosaceen*. Eine solche Art, die speziell nur auf der Mehlfbeere vorkommt, ist die Mehlfbeer-Blattlaus, *Dysaphis ariae*; sie ist zudem eine montan verbreitete Art. Ein Beispiel für eine Art, die auf verschiedenen *Sorbus*-Arten lebt, ist die Mehlfbeeren-Pockengall-

milbe (*Eriophyes arianus*), die neben der Mehlfbeere als namensgebender Art u. a. ebenfalls von Vogelbeere und Elsbeere bekannt ist.

Der Große Obstbaumsplintkäfer *Scolytus mali* kann *Sorbus*-Arten im Stammbereich befallen. Ganz vereinzelt kommt es auch zum Befall von *Sorbus*-Arten durch den Birnbaum-Prachtkäfer *Agrilus sinuatus*. Man kann davon ausgehen, dass diese Insektenarten außerdem die Mehlfbeere als Wirt nutzen können. Ähnliches gilt für den polyphagen Ringelspinner (*Malacosoma neustria*), dessen hübsch gefärbte Raupen früher gefürchtete Obstbaumschädlinge waren und die auch an der Elsbeere nachgewiesen werden konnten. An der Mehlfbeere tritt ebenfalls die Miniermotte *Phyllostonyx sorbi* auf, die außerdem an Els-, Vogel-, Oxelbeere und Breitblättrige Mehlfbeere vorkommt. Sie entwickelt zwei Generationen pro Jahr.

Sorbus-Kleinarten und Hybride

Ein wichtiger biologischer Aspekt bei der Mehlfbeere sind die Kleinarten bzw. Hybride mit Els- und Vogelbeere (z. B. Breitblättrige Mehlfbeere *Sorbus latifolia*), die gerade aus genetischer Sicht interessieren [10]. Angeblich ist die nur bei Forchheim aufgefundene Hohenesters-Mehlfbeere (*Sorbus hohensteri*) mit nur wenigen Exemplaren eine der seltensten Baumarten der Welt. Als weitere Besonderheit des nördlichen Frankenjuras kommt am Kordigast (ca. 550 m) zwischen Altenkunstadt und Weismain die Kordigast-Mehlfbeere (*Sorbus cordigastensis*) vor [11].

Im Fünf-Seen-Land zwischen Ammer- und Starnberger See liegt das einzige größere Vorkommen der Elsbeere in Bayern südlich der Donau. Dort wurde auch eine Hybride zwischen Els- und Mehlfbeere bestätigt [12].

Mehlfbeere im Bergwald

Bedeutung hat die Mehlfbeere besonders im Bergwald und bei der Schutzwaldsanierung. In den bayrischen Bergen kommt die Mehlf-



ABB. 5 Die Rotdrossel als Wintergast verzehrt neben den Ilex-Früchten (Bild) auch gerne die Früchte der Mehlfbeere. Foto: Hans-Martin Kochanek.



ABB. 6 Die Haselmaus nimmt Vogel- und Mehlbeeren ebenfalls gerne als Nahrung auf. Foto: Norbert Wimmer.

beere bis zu einer Höhe von 1600 m vor. Da sie außerdem auf Geröllstandorten wachsen kann und Verletzungen gut ausheilt, spielt sie gerade bei der Aufforstung von Sanierungsflächen eine nicht zu unterschätzende Rolle.

Wie auch die Vogelbeere kann die Mehlbeere im Bergwald und seinen Entwicklungsphasen unter bestimmten Bedingungen die einzige Laubbaumart sein, die in den oft Nadelholz-geprägten Beständen ein Mischungselement darstellt und dort die biologische Vielfalt erhöht.

Für den alpinen bayerischen Bergwald ist die Mehlbeere – mit einem Baumartenanteil von ca. vier Prozent – nach Buche, Bergahorn und Vogelbeere sogar die vierthäufigste Laubbaumart in der Waldverjüngung. Insgesamt wurden auf den ca. 200 Inventurflächen der Schutzwaldsanierung bei den jeweils letzten Aufnahmen der Bayerischen Landesanstalt für Wald- und Forstwissenschaft (LWF) ca. 10.000 Mehlbeeren in der Verjüngung erfasst. Darüber hinaus sind einige seltene und lokal sehr begrenzt vorkommende Mehlbeeren-Kleinarten und Hybride in den Alpen aus Artenschutzgründen besonders interessant [13].

Mehlbeere im urbanen Grün

Die Mehlbeere kann durch ihre Wärme- und Standortansprüche

auch als klimatolerante Baumart gelten und sollte wegen ihrer Bedeutung für die Vogelwelt und als Bienenweide sowohl in unseren Wäldern – vor allem im Bergwald, aber ebenso im urbanen Grün – stärker beachtet werden. Gerade in städtischen Anlagen ist die Mehlbeere durch ihre weißen Blüten, ihre roten Früchte, ihre dunkelgrünen Blätter mit kontrastierender weißer Unterseite und ihre gelbe Herbstfärbung auch eine ästhetisch ansprechende Baumart. Durch die unterseits behaarten Blätter gilt die Mehlbeere zudem als eine Baumart mit hohem Staubbindungs- und Lärminderungsvermögen [2]. Gerne wird in Städten aber auch die Schwedische Mehlbeere oder Oxelbeere (*Sorbus intermedia*) gepflanzt, da sie pflegeleicht ist und mit den vielen Stressfaktoren im städtischen Grün gut zurechtkommt. Die Schwedische Mehlbeere gilt als Hybrid zwischen Mehl-, Els- und Vogelbeere.

Fazit

Die Mehlbeere ist eine längerlebige Pionierbaumart mit hohem Lichtbedarf und bevorzugt trocken-warme Standorte, gerne auf Kalkgestein. Sie kommt in offeneren Waldbereichen, an Waldrändern, auf Störungsflächen und im Bergwald vor – vor allem auf Sonderstandor-

ten wie z. B. Geröll, Schuttkegeln oder auch Almen.

Da die Mehlbeere auch auf sonnigen und trockenen, oft flachgründigen Standorten wächst, kann sie die Baumartenpalette für einen gemischten und damit klimastabilen Wald der Zukunft bereichern. Ähnliches gilt für die Verwendung der Mehlbeere im urbanen Grün. Auch hier bereichert sie als ästhetisch ansprechende und klimastabile Baumart das Baumartenportfolio.

Literatur

- [1] G. Aas (2011). Die Elsbeere (*Sorbus torminalis*) – Biologie, Ökologie und Diversität, in: LWF-Wissen 67, „Beiträge zur Elsbeere“, S. 7–12.
- [2] A. Roloff (2024). Die Echte Mehlbeere – Baum des Jahres 2024. AFZ/Der Wald 4, 32–35.
- [3] O. Schmidt (2024). Die Mehlbeere und die Vogelwelt. Deutscher Waldbesitzer 1, 10–11.
- [4] R. Pfeifer (2017). Vögel und Beeren – Überblick über eine Vogel-Pflanze-Interaktion. Ornith. Anzeiger Bd. 56, 1–28.
- [5] R. Pfeifer, O. Schmidt (2023). Singvögel im Wald – Einblicke in eine erfolgreiche Lebensgemeinschaft. AULA-Verlag, 271 S.
- [6] F. Turcek (1961). Ökologische Beziehungen der Vögel und Gehölze. Bratislava, Reprint by Exlibris Publish, 330 S.
- [7] B. Snow, D. Snow (1988). Birds and Berries. T & AD POYSER, 288 S.
- [8] M. Brändle, R. Brandl (2001). Species richness of insects and mites on trees: expanding Southwood. Journal of Animal Ecology 70, 491–504.
- [9] M. Blaschke, H. Bußler (2014). Pilze und Insekten an der Elsbeere, in: LWF-Wissen 67, „Beiträge zur Elsbeere“, S. 22–23.
- [10] N. Meyer (2011). *Sorbus*-Vielfalt in Bayern, in: LWF-Wissen 67, „Beiträge zur Elsbeere“, S. 40–46.
- [11] G. Aas, M. Kohles (2011). Verbreitung, Häufigkeit und Verjüngung von *Sorbus cordigastensis* (Kordigast-Mehlbeere) in der nördlichen Frankenalb. Tuexenia 31, 59–71.
- [12] F. Keller et al. (2015). Hybriden zwischen Mehlbeere (*Sorbus aria*) und Elsbeere (*Sorbus torminalis*) im oberbayerischen Fünfseenland. Ber. d. Bay. Bot. Gesell. 85, 19–34.
- [13] N. Meyer, A. Zehm (2010). Mehlbeeren & Ebereschen der Alpen Gattung *Sorbus*. Merkblatt Artenschutz 35, Bay. Landesamt für Umweltschutz, 4 S.

Olaf Schmidt,
München

HUMANEVOLUTION

Spermienkonkurrenz und das Aussterben der Neandertaler

Ein (weiterer) Grund für das schnelle Verschwinden der Neandertaler könnte in Unterschieden bei der Spermienkonkurrenz zwischen Neandertalern und modernen Menschen liegen.

Neandertaler verschwanden erstaunlich schnell, nachdem anatomisch moderne Menschen ihr eurasisches Habitat besiedelten. Eine Vielzahl verschiedener Hypothesen wurde aufgestellt, um diesen Befund zu erklären. Aufgrund des Konkurrenz-Ausschluss-Prinzips hätten vermutlich nicht beide Arten langfristig im gleichen Gebiet leben können. Aber warum wurden die Neandertaler verdrängt?

Neandertaler waren keine primitiven Vormenschen: Sie hatten ein großes Gehirn, konnten sprechen, beherrschten das Feuer, hatten Werkzeuge und Schmuck [1]. Unterschiede im Stoffwechsel, in der Demographie oder bei der Nutzung von Feuer und domestizierten Hunden wurden als mögliche Ursachen ebenso diskutiert wie Krankheitserreger, Klima- und Vegetationsänderungen sowie ein Vulkanausbruch. Gesichert ist durch genetische Studien, dass sich Neandertaler und moderne Menschen vermischt haben. Daher geht man heute von Assimilation aus – heutige Europäer tragen demzufolge auch wenige Procente Neandertaler-Gene in ihrem Erbgut.

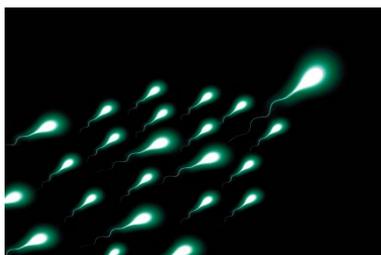


ABB. 1 Die Spermien des modernen Menschen hatten möglicherweise gegenüber denen des Neandertalers einen Vorteil. Abb.: Gerd Altmann über www.pixabay.com.

Kürzlich haben Li et al. [2] weitere Belege geliefert, dass eine abnehmende Neandertaler-Population im modernen Menschen aufgegangen ist. Sie schreiben unter anderem: „... *was ultimately being absorbed into the modern human gene pool*“. Dennoch ist die Schnelligkeit des Verschwindens der Neandertaler auffallend. Neuhäuser und Ruxton [3] argumentieren nun, dass Vorteile des modernen Menschen in der Spermienkonkurrenz von Bedeutung gewesen sein und zur Schnelligkeit der genetischen Assimilation beigetragen haben können. Neandertaler wie auch moderne Menschen im mittleren und späten Pleistozän waren vermutlich promiskuitiver und weniger monogam als heutige Populationen [4, 5]: *“mixing between Late Pleistocene hominin groups was common when they met”* [6]. Conde mi und Savatier [1] diskutieren eine mögliche sexuelle Gastfreundschaft bei den Neandertalern, wie man sie von einigen traditionellen Kulturen des modernen Menschen wie den Inuit kennt.

Einfluss der Gruppengröße

Hinzu kommt, dass die Gruppen moderner Menschen größer waren als die der Neandertaler [1, 7, 8]. Wenn sich zwei Gruppen der beiden Menschenarten begegneten, könnte daher alleine wegen der Gruppengröße für jede Frau (egal ob Neandertalerin oder moderne Frau) die Wahrscheinlichkeit für eine Paarung mit einem modernen Mann größer gewesen sein. Und je ausgeprägter die Promiskuität war, umso mehr Sexualpartner jeder Frau waren moderne Männer und keine

Neandertaler. Darüber hinaus ist die Spermienkonkurrenz (Abbildung 1), zumindest bei gleichem Paarungssystem, bei in größeren Gruppen lebenden Arten stärker. Dadurch sind die Hoden im Durchschnitt größer und auch weitere Anpassungen an intensive Spermienkonkurrenz wahrscheinlicher. Jede Anpassung an die größere sexuelle Konkurrenz bei modernen Menschen würde die Vorteile hinsichtlich der Spermienkonkurrenz noch verstärken. Es sei auch erwähnt, dass Neandertaler eher in patrilokalen Gruppen lebten [9]. Die Verwandtschaft zwischen den Männern reduziert dann die Intensität der Spermienkonkurrenz.

Daraus ergibt sich folgende Schlussfolgerung: Assimilation durch Vermischung kann das Verschwinden der Neandertaler verursacht haben und dieser Prozess kann durch Vorteile des modernen Menschen in der Spermienkonkurrenz deutlich beschleunigt worden sein. Dies konnten wir durch eigene Simulationen untermauern: In unseren Simulationen kann durch Berücksichtigung von unterschiedlichen Gruppengrößen und Spermienkonkurrenz die Anzahl der einwandernden modernen Menschen deutlich reduziert werden, ohne die Assimilation zu verlangsamen.

Vorteile in der Spermienkonkurrenz und andere Erklärungen schließen sich selbstverständlich nicht aus. Unter anderem könnte die Paarung eines Neandertaler-Mannes und einer modernen Frau zu sterilem Nachwuchs geführt haben [10]. Es ist also durchaus gut erklärbar, dass die Neandertaler so schnell von unserem Planeten verschwanden.

Literatur

- [1] S. Conde mi, F. Savatier (2020). *Der Neandertaler*, unser Bruder. C.H. Beck.
- [2] L. Li et al. (2024). Recurrent gene flow between Neanderthals and modern humans over the past 200,000 years. *Science* 385, eadi1768.
- [3] M. Neuhäuser, G.D. Ruxton (2024). Sperm competition: an additional cause

for the rapid demise of Neanderthals. *Science* 385 (eLetter), www.science.org/doi/10.1126/science.adi1768#elettersSection

- [4] E. Nelson et al. (2011). Digit ratios predict polygyny in early apes, *Ardipithecus*, Neanderthals and early modern humans but not in *Australopithecus*. *Proceedings of the Royal Society B* 278, 1556–1563.
- [5] I. Dupanloup et al. (2003). A recent shift from polygyny to monogamy in humans is suggested by the analysis of

worldwide Y-chromosome diversity.

- Journal of Molecular Evolution* 57, 85–97.
- [6] V. Slon et al. (2018). The genome of the offspring of a Neanderthal mother and a Denisovan father. *Nature* 561, 113–116.
- [7] J. Duveau et al. (2019). The composition of a Neanderthal social group revealed by the hominin footprints at Le Rozel (Normandy, France). *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116, 19409–19414.
- [8] J. P. Bocquet-Appel et al. (2013). Neanderthal demographic estimates. *Current Anthropology* 54, S202–S213.

- [9] C. Lalueza-Fox et al. (2011). Genetic evidence for patrilineal mating behaviour among Neanderthal groups. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108, 250–253.
- [10] F.L. Mendez et al. (2016). The divergence of Neanderthal and modern human Y chromosomes. *American Journal of Human Genetics* 98, 728–734.

Markus Neubäuser, Hochschule Koblenz, RheinAhrCampus Remagen

GENETIK

Der Tasmanische Teufel und sein teuflischer Krebs

Der Tasmanische Beutelteufel wird durch einen infektiösen Gesichtstumor vom Aussterben bedroht. Maximilian Stammnitz und Kollegen untersuchen die genetischen Ursachen für das invasive Zellwachstum. Dafür wurde Stammnitz im Dezember 2024 mit dem Elisabeth-Gateff-Preis der Gesellschaft für Genetik ausgezeichnet.

Der Tasmanische Beutelteufel (*Sarcophilus harrisi*) ist gewiss kein üblicher Modellorganismus wie Maus, Fadenwurm oder Fruchtfliege. Sein infektiöser Gesichtstumor (Abbildung 1) bedroht jedoch den Erhalt der Art – und macht den Tasmanischen Beutelteufel interessant für die Forschung. Maximilian Stammnitz und Kollegen (*Pembroke College*, Cambridge, England) haben in umfangreichen Arbeiten die genetischen Grundlagen des *devil facial tumour* (DFT) untersucht und konnten wesentliche Ursachen für das invasive Zellverhalten herausfinden. Dazu war die beispielhafte Kombination aus Feldarbeit, Molekularbiologie, Zellbiologie, Medizin und Genomik erforderlich.

Im Gegensatz zu vielen menschlichen Tumoren spielen – allem Anschein nach – Viren keine Rolle bei dieser Krebsentwicklung. Der Verlust eines β 2-Mikroglobulin-(B2M)-Gens, einer strukturellen Komponente des zentralen MHC-Proteinkomplexes zur Immunerkennung, und die epigenetische Herunterregulierung der zweiten Kopie erklären (teilweise), wie die durch Gesichtsbisse übertragenen Krebs-

zellen das Immunsystem umgehen. Der *platelet-derived growth factor receptor* (PDGFR) ist ein Proteinschalter auf der Zelloberfläche, der das Zellwachstum bei der Blutgefäßbildung und Wundheilung anregt. Das *PDGFR*-Gen liegt in den Tumorzellen in vielen Kopien vor und ist hyperaktiv – und zu viel des Guten führt zu unkontrolliertem Zellwachstum. In Zellkultur konnte das Wachstum der Tumorzellen durch Anti-*PDGFR*-Substanzen jedoch deutlich reduziert werden. Der Autor warnt allerdings vor zu viel Optimismus: Eine umfassende Chemotherapie des Tasmanischen Teufels stehe in weiter Ferne. Eine ausführliche Beschreibung der Arbeit ist auf <https://www.biowisskomm.de/2024/11/der-tasmanische-teufel-und-seine-teuflischen-krebszellen/> zu finden.

Maximilian Stammnitz (Abbildung 2) wurde am 03.12.2024 für seine hervorragende Promotionsarbeit von der Gesellschaft für Genetik mit dem mit 3000 Euro dotierten Elisabeth-Gateff-Preis 2024 ausgezeichnet. Er arbeitet heute als Postdoc am *Centre de Regulació Genòmica*, Barcelona (Spanien), und be-



ABB. 1 Dieser Tasmanische Beutelteufel ist durch einen Gesichtstumor im Ohrbereich gezeichnet. Alle Fotos: Maximilian R. Stammnitz, Transmissible Cancer Group (TCG), Cambridge.



ABB. 2 Elisabeth-Gateff-Preisträger Maximilian Stammnitz mit seinem „Forschungsobjekt“, dem Tasmanischen Beutelteufel.

schäftigt sich mit genetischen Hochdurchsatzmethoden zur Medizin- und Umweltforschung.

Literatur

- [1] M. R. Stammnitz et al. (2023). The evolution of two transmissible cancers in Tasmanian devils. *Science* 380, 283–293, <https://doi.org/10.1126/science.abq6453>

Wolfgang Nellen, Gesellschaft für Genetik (GfG)

ÖKOLOGIE

Die mysteriöse Chinesische Guave – Segen oder Fluch der Natur

Glatt wie Samt und leuchtend in einem tiefen Rot – Psidium cattleianum, auch bekannt als die Chinesische Guave, strahlt eine majestätische Aura aus. Die Früchte, die der Strauch trägt, sind klein, saftig, süß mit einem leicht säuerlichen Geschmack, der an eine Mischung aus Erdbeeren und Litschis erinnert.

Die Chinesische Guave, auch Erdbeer-Guave genannt (*Psidium cattleianum*), ist in tropischen Regionen weit verbreitet: Von der ostafrikanischen Insel Mauritius bis hin zu Hawaii gedeiht die Pflanze aus der Familie der Myrtengewächse prächtig. Auf Mauritius werden die Früchte roh verzehrt oder als der berühmte mauritische Salat *goyav d`sin*. Im Winter, wenn die Temperaturen auf Mauritius etwas kühler werden, hat dieser pikante Guaven-Salat die Herzen der Einheimischen im Sturm erobert. Er ist nicht nur lecker, sondern bringt auch ordentlich Feuer in die kalten Tage! Man kann die lokalen Verkäufer oft schon von Weitem hören, wenn sie hupend und rufend durch die Straßen ziehen. Ihr Ruf „*salat goyave d`siitiin*“ ist fast wie eine Einladung, sich einen Moment Zeit zu nehmen und diesen außergewöhnlichen Snack zu genießen. Der Salat besteht aus einer einfachen, aber köstlichen Mischung: Guave, frische rote Chilischoten, Salz, Zucker, Essig und manchmal ein Hauch von Tamarindenpaste. Die Magie passiert, wenn diese Zutaten in die Sonne gelegt werden, um für einige Stunden zu reifen. Die Sonne verleiht dem Salat seinen einzigartigen Geschmack, der süß, sauer und scharf zugleich ist – eine wahre Geschmacksexplosion! Wer auf der Insel unterwegs ist, wird die Verkäufer fast überall finden – vor Schulen, in den belebten Straßen der Städte oder an den Stränden. Also, wenn Sie das nächste Mal auf Mauritius sind, halten Sie die Augen und Ohren offen und

lassen Sie sich diesen besonderen Leckerbissen nicht entgehen.

Lecker und gesund

Die Chinesische Guave ist aber nicht nur köstlich, sondern bietet auch eine beeindruckende Palette an gesundheitlichen Vorteilen. Sie besitzt antioxidative Eigenschaften – vor allem durch einen hohen Vitamin C-Gehalt –, die freie Radikale bekämpfen und die Zellen schützen. Zudem zeigt sie antidiabetische Effekte, indem sie den Blutzuckerspiegel reguliert und die Insulinempfindlichkeit verbessert. Ihre antikanzerogene Wirkung können das Wachstum von Krebszellen hemmen, während die antimikrobiellen Eigenschaften helfen, schädliche Bakterien und Viren abzuwehren. Darüber hinaus reduzieren Inhaltsstoffe der Guave Entzündungen im Körper und haben eine verjüngende Wirkung, die der Hautalterung entgegenwirkt.

Eindringling im Paradies

Doch trotz dieser positiven Eigenschaften stellt das Myrtengewächs für die Insel Mauritius ein ernsthaftes Problem dar – sie wird dort als invasiver Schädling betrachtet. Die Chinesische Guave hat die bemerkenswerte Fähigkeit, sich schnell zu vermehren und große Teile des mauritischen Waldes zu überwuchern. Dieser tropische Inselstaat ist regelmäßig von Zyklonen betroffen, deren starke Winde dazu führen, dass viele einheimische Bäume entwurzelt und zerstört werden. Ein großes Problem entsteht, wenn die einheimischen Bäume einmal verloren sind: Sie können sich nur



ABB. 1 Früchte der Chinesischen Guave. Abb.: B. N. Imambocus.

schwer regenerieren, da die dichte Decke aus Guaven den Waldboden bedeckt und verhindert, dass neues Leben nachwächst.

Die Folge? Nur noch zwei Prozent des ursprünglichen Waldes auf Mauritius existieren heute. Die Chinesische Guave nimmt diesen geschwächten Wäldern den Raum, der für die Wiederherstellung der einheimischen Vegetation dringend benötigt wird.

Um die einheimischen Pflanzen auf Mauritius zu schützen, wurden deshalb Maßnahmen zur manuellen Entfernung der invasiven Pflanze eingeleitet. Diese Form der ökologischen Konservierung hat das Ziel, den natürlichen Lebensraum wiederherzustellen und die Vielfalt der Flora auf der Insel zu sichern. Doch diese Arbeit ist aufwendig und zeitintensiv.

Eine Lösung in Sicht?

Was wäre, wenn man die Guave in großen Mengen erntete, um sie sinnvoll zu nutzen, während man gleichzeitig die mauritischen Wälder von ihrer Dominanz befreit? Dieser doppelte Ansatz könnte dazu beitragen, die Ausbreitung der Pflanze einzudämmen, während ihre nützlichen Eigenschaften in der Nahrungsmittelproduktion und Medizin genutzt werden. Die Herausforderung bleibt, aber vielleicht könnte die Chinesische Guave vom Problem zur Ressource werden – eine kreative Lösung, die sowohl der Natur als auch den Menschen zugutekommt.

Literatur

- [1] F. B. V. Florens (2017). Long-term declines of native trees in an oceanic island's tropical forests invaded by alien plants. *Applied Vegetation Science* 20, 94–105, <https://doi.org/10.1111/avsc.12273>
- [2] E. dos Santos Pereira (2018). *Psidium cattleianum* fruits: A review on its composition and bioactivity. *Food Chemistry* 258, 95–103, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.024>

Bibi Nusreen Imambocus,
Bonn

Die vielfältige Welt der Schmarotzer

Gäste tropischer Treiberameisen

CHRISTOPH VON BEEREN

Treiberameisen sind bedeutende Jäger in tropischen Regenwäldern. Während ihrer koordinierten Raubzüge streifen viele Tausende Arbeiterinnen über den Boden, die Laubstreu oder das Kronendach der Regenwälder. Durch ihre schiere Anzahl überwältigen sie eine Vielzahl anderer Regenwaldbewohner, darunter Grillen, Spinnen, Schaben, Regenwürmer und vor allem auch andere Ameisen. Zweifelsohne spielen sie eine wesentliche Rolle im Nahrungsnetz der Tropen und werden daher oft auch als Schlüsselarten bezeichnet. Häufig wird dabei übersehen, dass Treiberameisen auch eine bedeutende Rolle für eine Vielzahl an Nutznießern spielen. So sind viele Hunderte Arten von der Existenz dieser besonderen Jäger abhängig, darunter einige Ameisenvögel und eine Schar von kleineren Schmarotzern. Über die Vielfalt und Schönheit dieser Schmarotzer werde ich in diesem Artikel berichten.

Seit langem faszinieren Treiberameisen uns Menschen, und zahlreiche Geschichten und Mythen ranken sich um diese bemerkenswerten Insekten [1]. In seinen Beobachtungen des Amazonasregenwaldes beschrieb Henry Walter Bates Treiberameisen wie folgt: "Wherever they move, the whole animal world is set in commotion, and every creature tries to get out of their way" [2]. Solch eine Beschreibung bezieht sich sicherlich auf in Schwärmen jagende Treiberameisen wie die wohl bekannteste neotropische Art *Eciton burchellii* (Abbildung 1). Diese weist ein breites Nahrungsspektrum auf [3]. Im Allgemeinen sind Treiberameisen jedoch keineswegs generalistische Allesfresser. Heute wissen wir, dass viele der über 400 Arten spezialisierte Räuber sind [4, 5]. Die meisten Arten jagen auch nicht in Schwärmen, sondern in einzelnen Kolonnen. Diese verzweigen sich und führen schließlich zu ihrer Beute, im Falle der neotropischen Treiberameisen vor allem zu den Nestern anderer Ameisen [1, 3]. Diese werden durch das Heer der anrückenden Treiber überfallen und ihrer Brut beraubt. Jede Treiberameisenart hat sich dabei auf die Jagd nach bestimmten Ameisenarten spezialisiert und diese Beutespektren unterscheiden sich weitgehend von denen anderer Treiberarten [4, 5]. Eine solch ausgeprägte Differenzierung der Beutetiere trägt sicherlich entscheidend dazu bei, dass bis zu 20 verschiedene Treiberameisenarten in einem Regenwaldgebiet koexistieren können.

Treiberameisen kommen weltweit vor allem in tropischen und subtropischen Gebieten vor [1]. Sie bilden keine monophyletische Gruppe, wobei die meisten Ver-

ABB. 1 | SCHWARMRAUBZUG DER TREIBERAMEISE *ECITON BURCHELLII*

Das temporäre Nest, das Biwak (1), besteht aus ineinander verhakten Arbeiterinnen. Von hier führt eine Ameisenstraße zur Schwarmfront (2) des Raubzuges, in welchem die Ameisen auch größere Gliederfüßer erbeuten, beispielsweise einen Grashüpfer (3). Einige Nutznieser begleiten die Raubzüge: Mehrere Ameisenvögel folgen dem Schwarm; zwei Individuen (4: *Gymnopathys bicolor*, 5: *Phaenostictus mcleannani*) haben flüchtende Gliederfüßer erbeutet; parasitoide Fliege der Gattung *Calodexia* in Lauerstellung (6); Kurzflügelkäfer der Gattung *Tetradonia* (7) zerlegen eine erbeutete Treiberameisenarbeiterin; Kurzflügelkäfer (8: *Ecitophya simulans*) mit Ameisenmimikry nehmen am Raubzug teil, um an der Beute der Treiberameisen zu naschen. Illustration: H. Haring.

treter jedoch der Ameisenunterfamilie Dorylinae angehören [1, 6]. Eine Ameise wird als Treiberameise bezeichnet, wenn sie bestimmte Verhaltensmerkmale aufweist. Die wichtigsten darunter sind die Massenjagd, das Nomadentum und die Vermehrung durch Kolonieteilung [1]. Im deutschen Sprachgebrauch werden Treiberameisen häufig auch als Wanderameisen oder Heeresameisen bezeichnet.

Die Schwarmraubzüge der wohl bekanntesten neotropischen Treiberameisenart, *Eciton burchellii*, sind ein spektakuläres Naturschauspiel (Abbildung 1, ②). Frühmorgens, kurz nach der Dämmerung, beginnt es. Noch sind die Arbeiterinnen mit ihren Beinen ineinander verhakht und bilden ein lebendes Nest aus Ameisenkörpern, das sogenannte Biwak (Abbildung 1, ①). Im Inneren sind die Brut und die Königin verborgen, geschützt durch Tausende wehrhafte Körper. Sobald die ersten Sonnenstrahlen durch das Walddickicht scheinen, beginnen die ersten Arbeiterinnen auf der Suche nach Futter über den Waldboden zu pirschen. Zunächst entsteht ein kleiner Schwarm, der nach und nach anwächst und sich immer weiter vom Biwak entfernt. Die Schwarmfront ist wie ein großer, lebendiger Teppich, bestehend aus Tausenden Ameisen. Dieser bewegt sich langsam durch den Regenwald fort. Er kann erstaunliche Ausmaße annehmen und

eine Fläche von 20 m × 2 m einnehmen [1]. Es sind so viele Ameisenbeinchen, die durch das Laub krabbeln, dass man sie sogar deutlich hören kann. Befindet man sich einige Meter vor der Schwarmfront, kann man all die aufgeschreckten Krabbeltiere beobachten, die vor den Ameisen

IN KÜRZE

- Treiberameisen sind **bedeutende Räuber** in tropischen Nahrungsnetzen.
- Eine Vielzahl verschiedenster Tiere sind Nutznieser der Treiberameisen, darunter Ameisenvögel und viele schmarotzende Gliederfüßer.
- Die Raubzüge, Müllhalden und Biwaks der Treiberameisen schaffen **verschiedene Mikrohabitate**, die von einer Vielzahl von Gliederfüßern besiedelt werden.
- Viele Gastarten sind wirtsspezifisch und weisen eine **Vielzahl an Anpassungen an das Leben mit den Ameisen** auf. Unter anderem ahmen viele Gäste den Kolonieduft nach.
- Die Zerstörung der Regenwälder führt zum **lokalen Aussterben der dort ansässigen Treiberameisen**, und mit ihnen sterben die wirtsspezifischen Gäste aus. Ein Schutz der Regenwälder ist daher unerlässlich, um diese wundervollen Kreaturen zu erhalten.

fliehen. Einige schaffen dies, andere nicht. Springt beispielsweise eine Heuschrecke in die falsche Richtung davon, so landet sie inmitten des Ameisenteppichs. Dort wird sie sogleich von einigen Treibern festgehalten, gestochen und letztlich in transportierbare Stücke zerlegt (Abbildung 2a). Durch diese Treibjagd erbeuten *Eciton burchellii*-Kolonien täglich eine große Menge an Futter, das sie nutzen, um ihre Energiereserven zu füllen, sowie um ihre Königin und vor allem ihre Brut zu füttern.

Die vielfältigen Nutznießer der Treiberameisen

Es kann einen Biologen nicht überraschen, dass die Raubzugaktivität und die damit verbundene Anreicherung an Futter auch eine große Anzahl von Nutznießern und Schmarotzern anlockt. Es herrscht geschäftiges Treiben an Treiberameisenschwärmen. Während der Schwarmraubzüge von *Eciton burchellii* kann man Ameisenvögel beobachten. Diese haben sich darauf spezialisiert, die Krabbeltiere zu erbeuten, die von den Treibern aufgeschreckt davonlaufen (Abbildung 1, ④ und ⑤) [3]. Von Vogelkundlern meist unbeachtet bleiben die Tausenden Fliegen, die

die Raubzüge ebenfalls begleiten [7]. Parasitoide Fliegen der Gattung *Calodexia* beispielsweise sind lebendgebärend und legen ihre Larven auf Schaben, die vor dem Ameisenschwarm fliehen (Abbildung 1, ⑥) [7]. Die Larven bohren sich umgehend ins Innere der Schaben, um diese bei lebendigem Leib zu verzehren und sich letztlich im Wirt zu verpuppen. Schmetterlinge sind optisch ansprechendere Besucher mit einem weniger „schändlichen“ Lebenszyklus. Sie saugen an den Hinterlassenschaften der Ameisenvögel, um sich lebenswichtige Mineralien zu sichern. Außerdem findet man einige Käfer, die entweder die Ameisen selbst oder Stücke ihrer Beute verzehren (Abbildung 1, ⑦).

Schwarmraubzüge sind jedoch nicht der einzige Lebensraum, der durch die Aktivität der Treiberameisen für andere Organismen entsteht [3, 7]. Futterreste, bestehend aus Insektenteilen mit Fleischresten, werden in Müllhalden nahe den Biwaks abgelegt (Abbildung 2b). Dort tummeln sich Aasfresser: Plündernde Ameisen und vor allem Maden und Larven sowie erwachsene Fliegen und Käfer laben sich an den Essensresten [7-9]. In der tropischen Forschungsstation La Selva in Costa Rica konnten wir kürz-

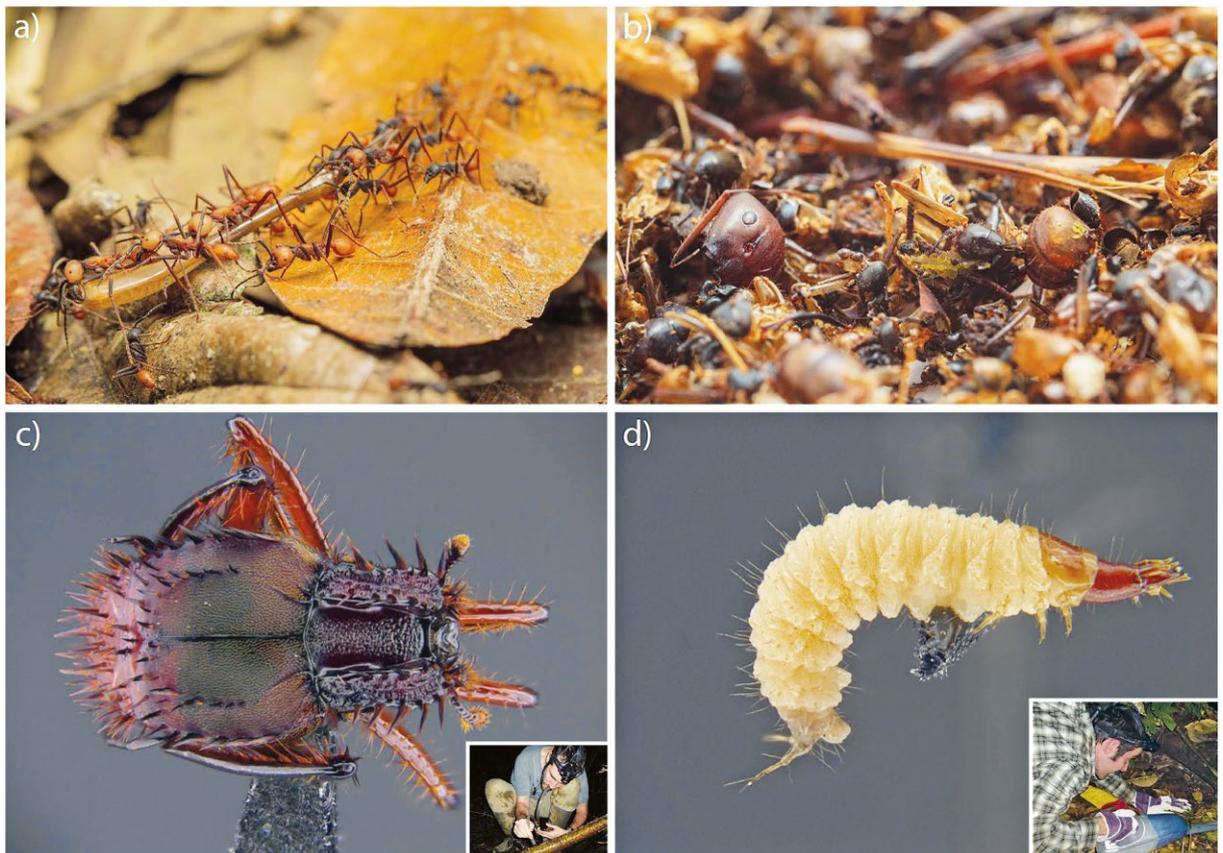


ABB. 2 Die Müllhalden der Treiberameisen dienen vielen Käfern als Futterquelle und Kinderstube. a) *Eciton burchellii*-Arbeiterinnen transportieren gemeinschaftlich das Bein einer Grille zum Biwak, wo es als Futter für die Larven und die Königin dient. b) Nahaufnahme einer Müllhalde von *Eciton burchellii* mit vielen zerlegten Körperteilen unterschiedlicher Gliederfüßer. c) Adulter Käfer und d) Larve des Stutzkäfers *Symphylister hamati*. Das erwachsene Tier wurde während eines Kolonieuzugs mit einem Saugrohr gefangen. Die Larve wurde in einer Müllhalde gefunden, welche mit einem Handstaubsauger gesammelt wurde. Fotos: a), b) D. Kronauer, c), d) C. von Beeren & S. Pohl.



lich erstaunliche 2705 Käferindividuen in einer einzigen Müllhalde entdecken [8]. Insgesamt wurden 91 Käferarten in 30 Müllhalden von *Eciton burchellii* gefunden. Die meisten dieser Käfer, hauptsächlich Kurzflügelkäfer (Familie Staphylinidae), sind generalistische Aasfresser der Laubstreu, die wohl eher zufällig auf die Müllhalden stoßen, möglicherweise angelockt vom Duft toter Gliederfüßer. Einige Arten treten jedoch regelmäßig in den Müllhalden auf, und eine Spezialisierung auf diese Nische ist wahrscheinlich.

Außerdem sind die Müllhalden der Treiberameisen eine Kinderstube für viele Käferarten (Abbildung 2d). Kurze mitochondriale DNA-Stücke erlaubten uns, die Larven von 22 Käferarten mit den adulten Tieren abzugleichen [8]. Diese DNA-Barcoding genannte Methode ist hilfreich, um Arten genetisch zu unterscheiden und verschiedene Entwicklungsphasen einer Art zuzuordnen. So konnten die Larven einiger spezialisierter Käfer, die aus Kolonienumzügen bekannt waren, in den Müllhalden gefunden werden. Diese Spezialisten haben es geschafft, als adulte Käfer in das Innere des Ameisenstaates, das Biwak, einzudringen. Über diese echten Gäste oder Myrmekophilen werde ich in den folgenden Abschnitten berichten.

Kolonieumzug – Blick auf die verborgenen „Untermieter“

Die faszinierendsten und ungewöhnlichsten Gäste der Treiberameisen sind jene, die sich mitten im Ameisengewimmel der Biwaks, im Herzen der Kolonien, niederlassen. Dort sind sie weitestgehend vor eigenen Fressfeinden und Parasiten geschützt. Einige ernähren sich vom täglich frisch eintreffenden, hochwertigen Futter der Treiberameisen, während andere die Brut der Treiberameisen selbst fressen [1, 3]. Nahezu alle „Untermieter“ bleiben zunächst den neugierigen Blicken des Naturforschers verborgen. Treiberameisen sind allerdings Nomaden, die regelmäßig in neue Jagdgründe umziehen. Während dieser nächtlichen Wanderungen ergibt sich für den neugierigen Beobachter die Gelegenheit, die Vielfalt und Schönheit dieser Gäste zu entdecken.

Stößt man in der Nacht auf einen Kolonieumzug, so sieht man gewöhnlicherweise eine Umzugskolonie. Diese besteht aus mehreren Reihen von Arbeiterinnen, die häufig die eigene Brut oder Beute tragen. Die Mehrheit der Arbeiterinnen läuft in Richtung des neuen Biwaks. Kolonieumzüge können viele Stunden andauern und mehr als 100 Meter lang sein. Daher ist es ratsam, etwas Zeit und am besten einen kleinen, faltbaren Campingstuhl mitzubringen, der im besten Fall nicht unter einem zusammenbricht. Ein Feldassistent erlitt dieses Schicksal gleich zweimal, so dass er nach einigen Stichen ins Gesäß zunächst etwas die Motivation verlor.

Diese kehrt gewöhnlich aber schnell zurück, denn es wird nicht lange dauern, bis man die ersten „Untermieter“ entdeckt. Käfer der Gattung *Vatesus* sind recht groß und funkeln im Licht der Stirnlampe auffällig rotbraun. Sie lau-

fen mitten im Strom der Ameisen, und auch ungeübte Augen entdecken diesen Eindringling sofort (Abbildung 3a). Meinen Kollegen Sebastian Pohl entzückte der Anblick dieser Käfer auch noch nach Wochen der Feldarbeit, was er lautstark allen Sammlern mit dem Ruf „*Vatesus*, *Vatesus*“ mitteilte. Auch ihre Gestalt, die an einen Pfeilschwanzkrebs erinnert, sticht heraus und ermöglicht es dem Beobachter, sie schnell zwischen den wuselnden Ameisen zu erkennen. Ihre ‚limuloide‘ Körperform (abgeleitet vom Gattungsnamen des Pfeilschwanzkrebses *Limulus*) bietet den Käfern Schutz vor gelegentlichen Angriffen der Treiberameisen [3]. Sie bekommen den Käfer nicht zu greifen, eine Erfahrung, die man selbst machen kann, wenn man versucht, den Käfer mit einer Pinzette zu fassen. Eine ganze Reihe nicht verwandter Gäste, wie beispielsweise ein goldgelb schimmernder Silberfisch, weist ebenfalls diese Körperform auf – ein Hinweis auf den adaptiven Wert dieses Merkmals [3].

Die Biologie von *Vatesus*-Käfern ist auf vielerlei Weise interessant. Unter anderem haben sie ihren eigenen Lebenszyklus mit dem Koloniezyklus der Treiberameisen synchronisiert [10]. Außerdem sind sie die einzigen bisher bekannten Gäste, bei denen nicht nur die adulten Tiere, sondern auch die Larven an den Umzügen teilnehmen (Abbildung 3b) [10]. Die Larven rennen zumeist dem Umzug hinterher. Es können von einigen wenigen bis zu hundert Larven dem Umzug folgen, was einen spektakulären Anblick bietet und auch zu Verwirrungen führen kann. Vor einigen Jahren hat mich ein Kollege aus den USA kontaktiert, um enthusiastisch über ein *crazy social beetle foot-race* zu berichten, welches er in Ecuador beobachtet hat. Er entdeckte voller Erstaunen eine Schar von Käferlarven, die zielgerichtet und kurz aufeinander folgend einem unsichtbaren Pfad am Regenwaldboden zu folgen schienen. Und tatsächlich, das taten sie. Es handelte sich um Larven von *Vatesus*-Käfern, und diese, zusammen mit einigen Buckelfliegen und anderen Kurzflügelkäfern, folgen der Pheromonspur der Ameisen (Abbildung 3b, d, f). Ohne Ameisen in Sichtweite muss dieses zielstrebige Verhalten der vielen kleinen rennenden „Würmchen“ am Boden tatsächlich etwas seltsam erscheinen.

Neben *Vatesus*-Käfern tummeln sich weitere Gäste im Umzugsgeschehen. Silberfische, weitere Kurzflügelkäfer und Buckelfliegen fallen auch dem ungeübten Beobachter ins Auge (Abbildung 3c–f). Andere Gäste hingegen bedürfen eines genaueren Blickes. Manche Kurzflügelkäfer ahmen die Gestalt und Färbung der Ameisen nach und sind daher im Umzugsgeschehen zunächst recht schwer zu entdecken (Abbildung 3e). Andere lassen sich von den Ameisen tragen. Sie sitzen entweder auf getragenen Larven oder Beute der Ameisen oder halten sich aktiv an den Arbeiterinnen fest.

Vor einigen Jahren hatte ich zusammen mit meinem Kollegen Daniel Kronauer das Glück, eine neue Käferart zu entdecken, die eine außergewöhnliche Methode nutzt, um sich zum neuen Biwak tragen zu lassen. Daniel entdeckte

am Ende des Umzugs eine Arbeiterin, die ein ungewöhnlich dunkles Hinterteil aufwies. Als wir diese einsammelten und von der Seite betrachteten, sah es gar so aus, als hätte die Ameise zwei Hinterteile (Abbildung 4a und b). Unsere Begeisterung war groß, als sich nach kurzem Schütteln des Gläschens eines der Hinterteile ablöste, plötzlich Beine und Antennen herausstreckte und selbst-

ständig im Glas herumspazierte. Wir hatten eine neue Stutzkäferart entdeckt, die ich später mit einem amerikanischen Kollegen zu Ehren des Entdeckers *Nymphister kronaueri* nannte [11]. Es sind diese besonderen Momente, die die teils anstrengende Arbeit als Feldbiologe im tropischen Regenwald so einzigartig und erfüllend gestalten.



ABB. 3 Eine große Diversität an Gästen folgt den Umzügen von Treiberameisen. Verschiedene Kurzflügelkäfer in einem Koloniewumzug der Treiberameise *Eciton hamatum* (Costa Rica): a) adulter *Vatesus*-Käfer und b) dessen Larve sowie c) der größte Vertreter der Kurzflügler, *Proxenobius borgmeieri*. d) Käfer der Gattung *Tetradonia* laufen dem Umzug hinterher, indem sie der Pheromonspur der Ameisen folgen. e) *Ecitophya simulans* (schwarzer Pfeil) im Umzug von *Eciton burchellii* (Peru). Dieser Käfer ahmt die Körperform und Farbe seiner Wirte nach. f) Eine Buckelfliege (weißer Pfeil) im Umzug von *Eciton vagans* (Belize). Fotos: a)-d) D. Kronauer, e) T. Komatsu, f) A. Wild.



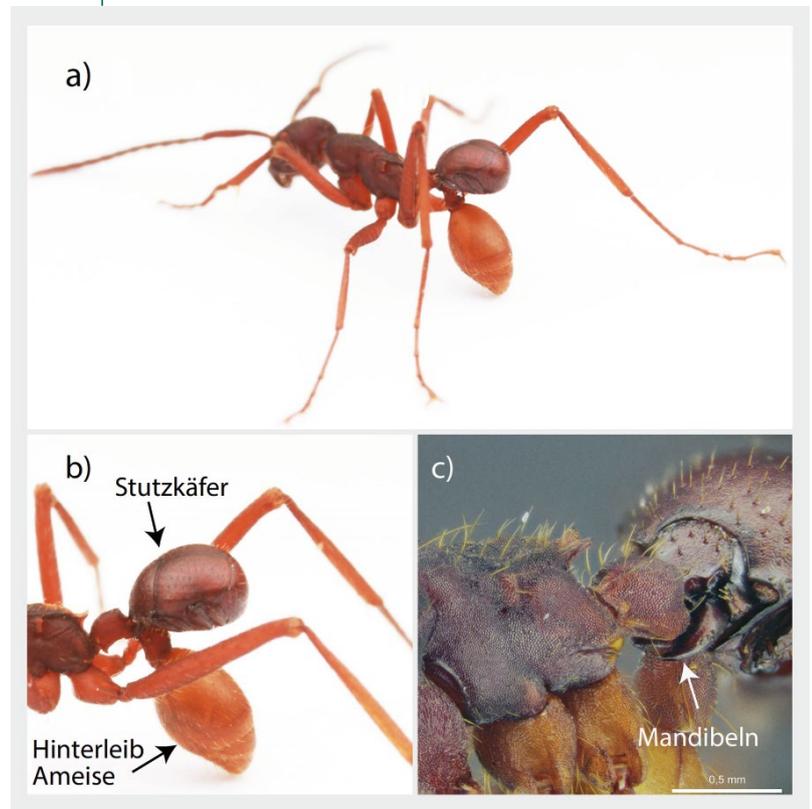
Vielfalt und Wirtsspezifität

Die Vielfalt der Gäste neotropischer Treiberameisen ist seit langem bekannt. Vom Ende des 19. Jahrhunderts bis Mitte des 20. Jahrhunderts wurden zahlreiche neue Arten beschrieben. Diese rein taxonomischen Arbeiten enthielten wenig bis keine Informationen über das Verhalten der Treiberameisengäste. Vor allem Carl Rettenmeyer ist es zu verdanken, dass die Biologie dieser bemerkenswerten Kreaturen in den Fokus der Wissenschaft geriet. Beginnend in den 1960er Jahren beschrieb er zusammen mit einigen Kollegen viele bisher unbekannt Anpassungen der Gäste an das Leben mit Treiberameisen [12]. Es waren letztlich seine Arbeiten, die Daniel Kronauer und mich motivierten, die Erforschung der Interaktionen der Gäste mit ihren Wirten wieder aufleben zu lassen.

Wir beschlossen, diese Untersuchungen im Regenwald der Biologischen Station La Selva in Costa Rica durchzuführen – einer der modernsten tropischen Feldstationen. Über mehrere Jahre hinweg sammelten wir Gäste aus den Umzügen der Treiberameisen. Dabei lag unser Fokus auf Treiberameisen der Gattung *Eciton*, da die Umzüge der sechs vorkommenden Arten recht leicht zu erkennen und zu besammeln sind. Wir stießen auf die erstaunliche Anzahl von 62 Gastarten in den Umzügen: 11 Buckelfliegenarten, 49 Käferarten sowie jeweils eine Silberfisch- und Tausendfüßerart [13]. Darunter befand sich eine Vielzahl neuer, wissenschaftlich unbeschriebener Arten. Die vielfältige Welt der Milben wurde hierbei nicht untersucht, und diese würde die Anzahl der Arten noch einmal deutlich erhöhen.

Viel mehr als die hohe Artenvielfalt überraschte mich die Vielfalt der Interaktionen der Gäste mit den Treibern. Das gesamte Spektrum der Wirtsspezifität wurde abgedeckt [13]. Wir fanden einige hochspezialisierte Arten, die nur bei einer Wirtsart vorkamen, wie den als Ameisenhintern getarnten Stutzkäfer. Auf der anderen Seite des Wirtsspektrums gab es vier Arten, die in Kolonien aller sechs Treiberarten vorkamen (Abbildung 5). Diese Generalisten gehörten phylogenetisch sehr unterschiedlichen Gruppen an: ein Silberfisch, eine Buckelfliege, ein Zwergkäfer und ein Kurzflügelkäfer. Was diese Arten jedoch dazu befähigt, generalistische Schmarotzer zu sein oder umgekehrt, was die Spezialisten an einen Wirt bindet, bleibt bisher weitestgehend ungewiss. Die Evolution der Wirtsspezialisierung bei Parasiten und Parasitoiden wird oft als ein Kompromiss betrachtet. Eine Spezialisierung auf eine einzige Wirtsart mag die Fitness eines Parasiten in Assoziation mit diesem speziellen Wirt erhöhen, aber dies geschieht häufig auf Kosten einer hohen Abhängigkeit. Die Mehrzahl der Gastarten bei Treiberameisen war hochgradig wirtsspezifisch (Abbildung 5), und viele von ihnen wiesen in der Tat erkennbare Anpassungen an das Leben mit den Treiberameisen auf. Neben den bereits genannten Käfern der Gattung *Vatesus* sind die wohl augenscheinlichsten Anpassungen diejenigen der Ameisennachahmer.

ABB. 4 | PHORETISCHER TRANSPORT BEIM KOLONIUMZUG

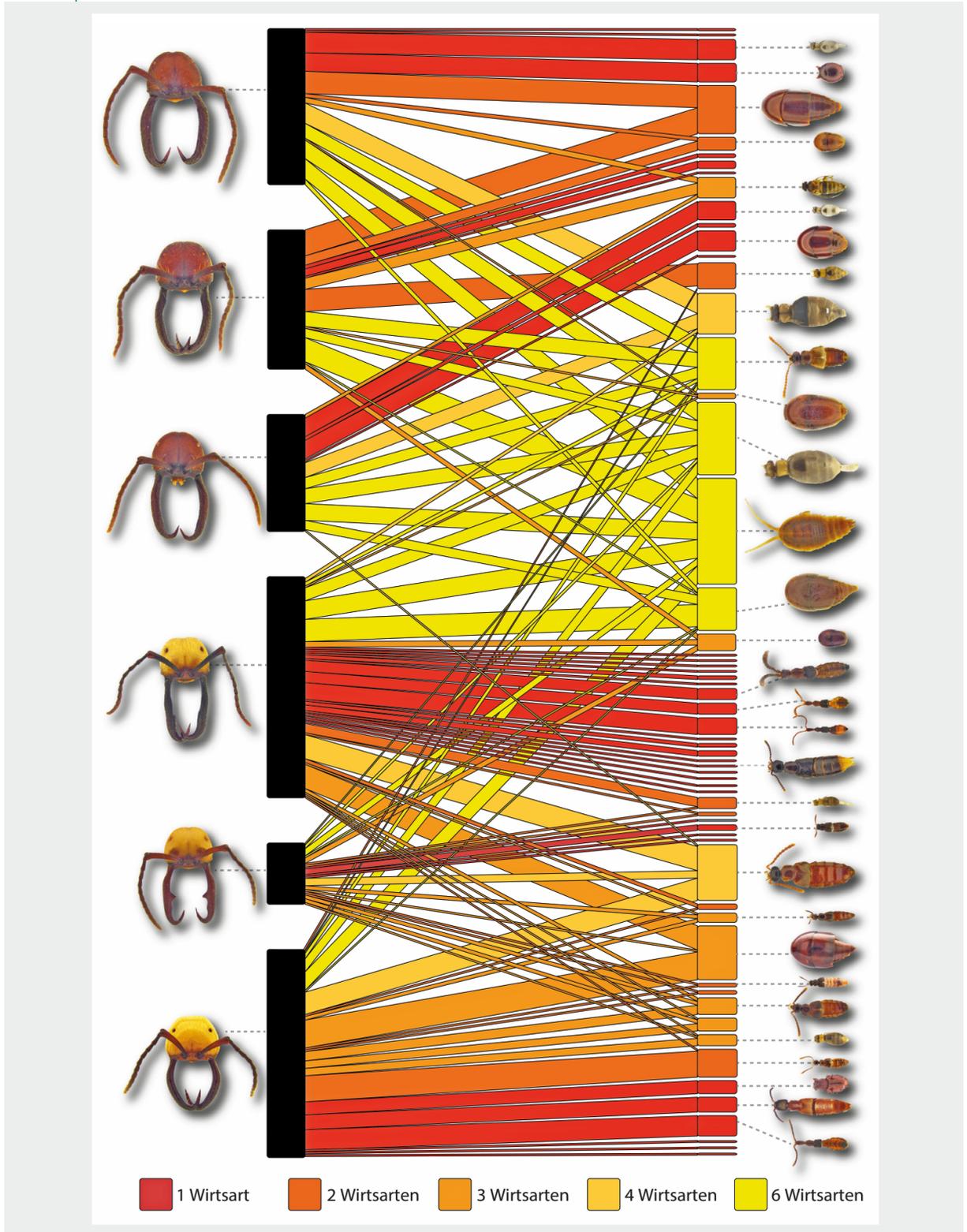


Stutzkäfer der Art *Nymphister kronaueri* lassen sich während der Koloniewmärsche von Arbeiterinnen ihrer Wirtsart *Eciton mexicanum* tragen. a, b) Aus seitlicher Ansicht sieht es so aus, als hätte die Ameise zwei Hinterteile. c) Die Nahaufnahme zeigt die kräftigen Mandibeln des Käfers, mit denen er sich an der Ameise festklammert. b, c) Beine und Antennen sind eingezogen, so dass der Käfer den Ameisen keine Angriffsfläche bietet. Fotos: a), b) D. Kronauer, c) C. von Beeren.

Die Codeknacker

Eine Gruppe von Kurzflügelkäfern ist vollständig in den Ameisenstaat integriert. Sie haben offenbar den ‚Code‘ geknackt, um friedlich mit ihren Wirten zusammenzuleben – ausgerechnet denjenigen Ameisen, die für ihre Aggressivität berüchtigt sind [14]. Diese Käfer verhalten sich wie Ameisen selbst. Sie suchen aktiv den Kontakt zu den Arbeiterinnen der Kolonien, putzen diese und werden sogar von ihnen geputzt. Manche Arten werden auch von den Ameisen während der Umzüge zu den neuen Nistplätzen getragen. Diese besonderen Schmarotzer ahmen die Körperform ihrer Ameisenwirte erstaunlich gut nach; sie haben eine myrmekoid (ameisenähnliche) Gestalt (Abbildung 1, ©; Abbildung 3e). Unüblich für sonstige Kurzflügelkäfer, aber typisch für Ameisen, besitzen myrmekoid Arten unter anderem eine Einschnürung zwischen Mittel- und Hinterleib, verlängerte Extremitäten, geknickte Fühler und eine Kutikularstruktur, die derjenigen der Ameisen ähnelt. Myrmekoid Käfer gibt es bei Treiberameisen in Südamerika, Afrika und Asien. Erstaunlicherweise hat sich die Annäherung der Körpergestalt an die einer Ameise mindestens zwölfmal unabhängig vonein-

ABB. 5 | VARIANZ IN DER WIRTSPEZIFITÄT



Interaktionsnetzwerk zwischen Treiberameisen und ihren Gästen: Schwarze Kästchen (links) repräsentieren die sechs *Eciton*-Arten, die im Forschungsgebiet vorkommen, dargestellt durch die Köpfe der Soldatenkaste. Bunte Kästchen (rechts) zeigen die Gastarten an, welche in Umzügen gesammelt wurden. Farben repräsentieren Unterschiede in der Anzahl der Wirtsarten. Verbindungslinien zwischen den Kästchen zeigen an, dass eine Gastart bei Umzügen der jeweiligen Wirtsart gefunden wurde. Je breiter die Linien, desto häufiger wurden die Gäste in unterschiedlichen Kolonien der jeweiligen Treiberart entdeckt. Fotos: C. von Beeren.



ander bei Kurzflügelkäfern entwickelt [15]. Diese Anpassung stellt daher ein wahrhaft erstaunliches Beispiel für konvergente Evolution dar.

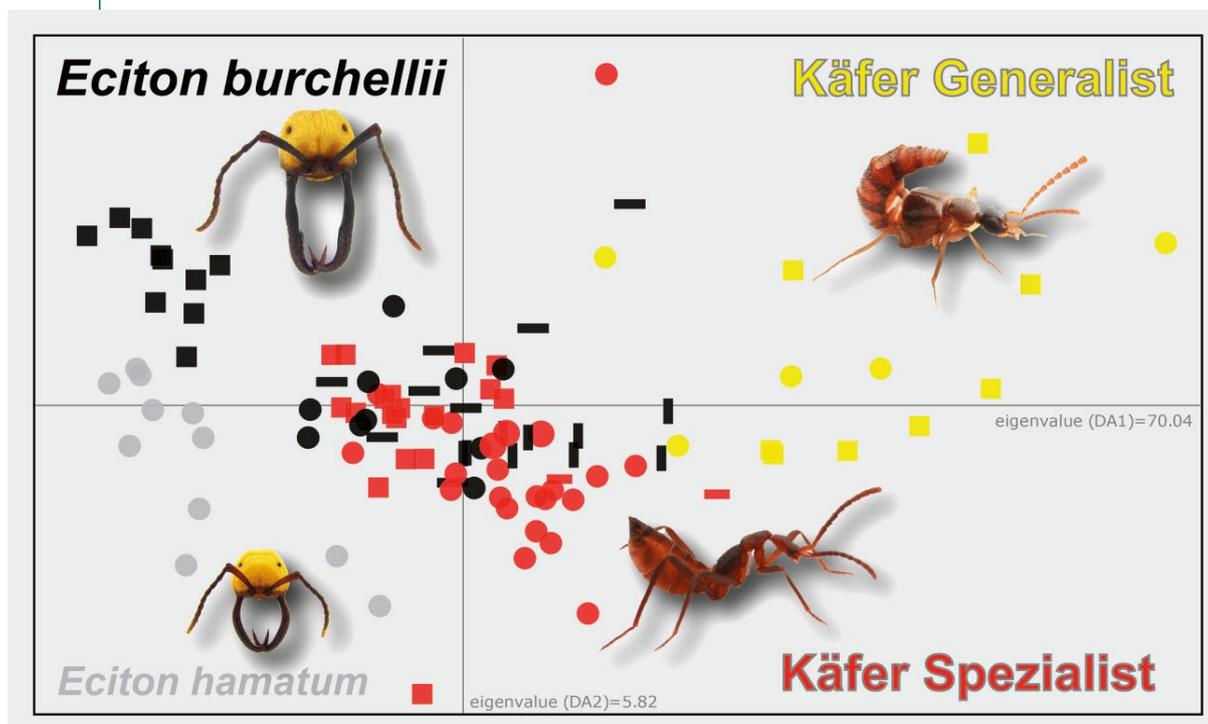
Neben der Nachahmung der Körperform ihrer Wirte und einigen Anpassungen im Verhalten, duften die myrmekoiden Käfer auch wie ihre Wirte (Abbildung 6). Durch den ständigen Körperkontakt und das intensive Putzen werden die Kohlenwasserstoffprofile der Ameisen auf die Käfer übertragen [14, 16]. Diese chemischen Profile dienen den Ameisen zur Erkennung von Nestgenossinnen sowie von Eindringlingen. Ein Käfer mit Ameisenprofil duftet folglich wie eine Nestgenossin. Dies kann zumindest teilweise das friedliche Verhalten der Ameisen gegenüber ihren Gästen erklären.

Nur welchen Vorteil erlangen die Käfer durch die myrmekoiden Körpergestalt? Einige Arten folgen den Ameisen auf ihren Raubzügen. Diese Myrmekoide ahmen zusätzlich die Färbung ihrer Wirte nach (Abbildung 3e). Treiberameisen sind so gut wie blind, und die Farbmimikry spielt für sie sicherlich keine Rolle. Es wird schon lange vermutet, dass die farbliche Nachahmung einen Fall von Bates'scher Mimikry darstellt. Die Käfer imitieren ein ungenießbares Vorbild, eine Treiberameise, und sind so vor optisch jagenden Fressfeinden wie den Ameisenvögeln geschützt. Allerdings – und nun wird es interes-

sant – unterscheiden sich sehr viele myrmekoide Käfer farblich von ihren Ameisenwirten. Oft sind diese mit Treiberameisen assoziiert, die ein kryptisches, unterirdisches Leben führen. Optisch jagende Räuber gibt es hier praktisch nicht.

Es ist noch ungeklärt, welchen selektiven Vorteil die Käfer durch die myrmekoiden Form erhalten. Die für mich einleuchtendste Hypothese ist, dass die myrmekoiden Körperform die haptische Inspektion ihrer Wirte täuscht. Ameisen betasten sich ständig gegenseitig mit ihren Antennen, und neben der Wahrnehmung des Geruchs ihres Gegenübers ist es durchaus vorstellbar, dass auch die Kutikularstruktur und/oder die Körperform wahrgenommen werden kann. Diese Hypothese ist schon recht alt und wurde bereits 1895 von Erich Wasmann als ‚taktile Mimikry‘ beschrieben und später zu seinen Ehren Wasmannsche Mimikry genannt. Lange geriet Wasmanns Hypothese in Vergessenheit, und viele Wissenschaftler konzentrierten sich auf die Erforschung der chemischen Mimikry, des Verhaltens und der Lauterzeugung von Ameisengästen. Jedoch hat eine kürzlich durchgeführte Studie erneut Aufmerksamkeit auf die Körperform von Ameisengästen gelenkt und Hinweise zugunsten von Wasmanns Hypothese geliefert [17]. Sie zeigt, dass eine Gruppe von sozial parasitären Ameisen ihren Wirtsameisen in Größe und

ABB. 6 | CHEMISCHE MIMIKRY VON WIRTSARBEITERINNEN



Ähnlichkeit der Kohlenwasserstoffprofile zwischen Treiberameisen und verschiedenen Gastarten (Diskriminanzanalyse der Hauptkomponenten). Jeder Punkt repräsentiert das chemische Profil eines Individuums für die beiden Treiberarten *E. burchellii* (schwarz) und *E. hamatum* (grau) sowie Wirtsspezialisten mit myrmekoider Körperform (rot; Käfer der Gattungen *Ecitophya* und *Ecitomorpha*) und Wirtsgeneralisten (Käfer der Gattung *Tetradonia*). Je näher die Punkte beieinander sind, desto ähnlicher sind die chemischen Profile. Verschiedene Symbole repräsentieren unterschiedliche Kasten bei Ameisen und unterschiedliche Arten bei Käfern. Für Details siehe [16]. Fotos: D. Kronauer und C. von Beeren.

Form unerwartet stark ähnelt. Dies legt nahe, dass neben olfaktorischen Hinweisen auch morphologische Hinweise eine Rolle bei der Überprüfung von Nestgenossinnen spielen könnten. Hier besteht sicherlich noch weiterer Forschungsbedarf.

Schutz tropischer Regenwälder

Zuletzt möchte ich nicht nur die Schönheit und Vielfalt der Gäste von Treiberameisen hervorheben, sondern vor allem auch auf ihren Bedrohungsstatus hinweisen. Wie so viele ihrer Mitbewohner in tropischen Regenwäldern sind auch diese bemerkenswerten Tiere durch menschliche Eingriffe in die Natur bedroht. Das Überleben vieler Treiberameisengäste hängt von der Anwesenheit der Wirtsameisen ab. Diese reagieren jedoch sehr empfindlich auf die Fragmentierung ihres Lebensraums, der Regenwälder [1, 18]. Das lokale Aussterben der Ameisen geht höchstwahrscheinlich Hand in Hand mit einer Aussterbekaskade zahlreicher Gastarten, einschließlich einiger Ameisenvögel und der hier näher vorgestellten Gliederfüßer-Fauna. Extinktionskaskaden sind zumeist besonders schwerwiegend bei Arten, die enge symbiotische Interaktionen bilden, bei denen mindestens eine Art vollständig von der Anwesenheit einer oder weniger anderer Arten abhängt. Wie hier gezeigt, sind viele der mit Treiberameisen assoziierten Gäste wirtsspezifisch. Diese Spezialisten stehen sicherlich vor hohen Aussterberisiken. Nur wenn wir unsere Bemühungen zum Schutz tropischer Regenwälder weiter verstärken, werden wir es zukünftigen Generationen ermöglichen, solch faszinierende Interaktionen wie die zwischen Treiberameisen und ihren Gästen selbst zu erleben.

Zusammenfassung

Als Spitzenprädatoren von Gliederfüßern spielen Treiberameisen eine bedeutende ökologische Rolle in tropischen Regenwäldern. Oft wird jedoch vergessen, dass sie außerdem die lokale Biodiversität fördern, da eine Vielzahl an nutznießenden Arten ihre Nähe sucht. Treiberameisenkolonien bieten Lebensräume für Hunderte von Arten, darunter Ameisenvögel, Müllhaldenbewohner und schmarotzende „Untermieter“ wie verschiedene Käfer-, Fliegen- und Silberfischarten. Viele dieser Besucher sind von der Existenz der Ameisen abhängig. Als nomadische Jäger benötigen Treiberameisen größere Jagdgebiete und sind daher durch die Zerstörung und Fragmentierung der Regenwälder vom lokalen Aussterben bedroht. Ihre Vielzahl an Nutznießern mit ihren wunderbaren Anpassungen an das Leben mit den Treibern ist daher ebenfalls gefährdet. Wenn wir diesen faszinierenden Mikrokosmos erhalten wollen, müssen wir unsere Anstrengungen zur Erhaltung tropischer Regenwälder erhöhen.

Summary

The diverse world of parasites – guests of tropical army ants

As top arthropod predators, army ants play a significant ecological role in tropical rainforests. However, it is often

forgotten that they also promote local biodiversity, as a variety of organisms benefit from their presence. Army ant colonies provide habitats for hundreds of species, including antbirds, inhabitants of garbage dumps, and parasitic “subtenants” such as various species of beetles, flies, and silverfish. Many of these visitors rely on the presence of the ants. As nomadic hunters, army ants require large hunting territories and are therefore threatened with local extinction by the destruction and fragmentation of rainforests. Therefore, their large number of benefiting species with their remarkable adaptations to living with the ants, is also at risk. If we want to preserve this fascinating microcosm, we must increase our efforts to conserve tropical rainforests.

Schlagworte:

Treiberameisen, Regenwald, Parasiten, Ameisengäste, Myrmekophile, tropische Vielfalt

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt den vielen Feldassistenten, die nicht müde wurden, Nacht für Nacht, Stunde um Stunde, Stich für Stich nach Gästen der Treiberameisen Ausschau zu halten. Außerdem danke ich den Fotografen Daniel Kronauer, Sebastian Pohl, Takashi Komatsu und Alexander Wild für die Erlaubnis zur Nutzung ihrer Bilder. Ein besonderer Dank gebührt Daniel Kronauer, der mich in die Welt neotropischer Treiberameisen einführte und mir bei allen Projekten unterstützend zur Seite stand. Letztlich danke ich den Mitarbeitern der La Selva Station in Costa Rica für ihre vielfältige und durchweg freundliche Unterstützung. Außerdem danke ich Helga und Sebastian Pohl für das Korrekturlesen und zwei anonymen Gutachtern für ihre Zeit und Mühe.

Literatur

- [1] D. J. C. Kronauer (2020). *Army Ants: Nature's Ultimate Social Hunters*. Harvard University Press, Cambridge.
- [2] H. W. Bates (1863). *The naturalist on the river Amazons*. J. M. Dent & Sons, Santa Barbara.
- [3] W. H. Jr Gotwald (1995). *Army ants: The biology of social predation*. Comstock Pub. Associates, Ithaca.
- [4] P. Hoenle et al. (2019). Species-level predation network uncovers high prey specificity in a Neotropical army ant community. *Molecular Ecology* 28, 2423–2440.
- [5] P. Hoenle et al. (2024). Hunting habits die hard: Conserved prey preferences in army ants across two distant neotropical rainforests. *Ecosphere* 15, e4812W.
- [6] M. L. Borowiec (2016). Generic revision of the ant subfamily Dorylinae (Hymenoptera, Formicidae). *ZooKeys* 608, 1–280.
- [7] Rettenmeyer et al. (2011). The largest animal association centered on one species: The army ant *Eciton burchellii* and its more than 300 associates. *Insectes Sociaux*, 58, 281–292.
- [8] C. von Beeren et al. (2023). Army ant middens: Home and nursery of a diverse beetle fauna. *Ecology & Evolution* 13, e10451.
- [9] K. Y. Robles López et al. (2023). One ant's trash is another ant's treasure: Army ant middens provide resources for diverse ant assemblages. *bioTropica*, 56, 58–70.
- [10] C. von Beeren et al. (2016). Cryptic diversity, high host specificity and reproductive synchronization in army ant-associated *Vatesus* beetles. *Molecular Ecology* 25, 990–1005.
- [11] C. von Beeren, A. K. Tishechkin (2017). *Nymphister kronaueri* von Beeren & Tishechkin sp. nov., an army ant-associated beetle species (Coleoptera: Histeridae: Haeteriinae) with an exceptional mechanism of phoresy. *BMC Zoology* 2: 3.



- [12] C. W. Rettenmeyer (1961). Arthropods associated with Neotropical army ants with a review of the behavior of these ants (Arthropoda; Formicidae: Dorylinae), PhD thesis, University of Kansas.
- [13] C. von Beeren et al. (2021). A remarkable legion of guests: Diversity and host specificity of army ant symbionts. *Molecular Ecology* 30, 5229–5246.
- [14] C. von Beeren et al. (2021). Multiple phenotypic traits as triggers of host attacks towards ant symbionts: body size, morphological gestalt, and chemical mimicry accuracy. *Frontiers in Zoology* 18, 46.
- [15] M. Maruyama, J. Parker (2017). Deep-time convergence in rove beetle symbionts of army ants. *Current Biology* 27, 920–926.
- [16] C. von Beeren et al. (2018). Chemical and behavioral integration of army ant-associated rove beetles – a comparison between specialists and generalists. *Frontiers in Zoology* 15, 8.
- [17] J. Parker, C. Rabeling (2020). Evolution: Shape-Shifting Social Parasites. *Current Biology* 30, R1036-R1061.
- [18] J. T. Longino, M. G. Branstetter (2024). Threats to Ant Diversity in Mesoamerica, in: *Insect Decline and Conservation in the Neotropics* (Hrsg.: J. L. León-Cortés, A. Córdoba-Aguilar). Springer, Cham, 251–262.

Verfasst von:



Nach seinem Biologiestudium an der Universität Heidelberg verfasste Christoph von Beeren eine Doktorarbeit über die Gäste asiatischer Treiberameisen an der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München. Anschließend verbrachte er drei Jahre als Postdoktorand an der Rockefeller University in New York. In dieser Zeit studierte er die Gäste neotropischer Treiberameisen. Von 2016 bis 2024 war er als Postdoktorand in der Arbeitsgruppe für ökologische Netzwerke an der Technischen Universität (TU) Darmstadt tätig, wo er seine Forschung zur Biologie von Treiberameisen und ihren Gästen fortsetzte. Seit 2024 ist er Biologie- und Chemielehrer an der Freien Waldorfschule Darmstadt.

Korrespondenz

Dr. Christoph von Beeren

E-Mail: cvonbeeren@gmail.com



Verband | Biologie, Biowissenschaften
& Biomedizin in Deutschland

Berufsfelder Biologie – hier gibt es den Überblick

Der VBIO hat 87 spannende Porträts von Biowissenschaftlerinnen und Biowissenschaftlern im Beruf zusammengestellt. Berufsfeldübersichten, Kontaktadressen, Tipps und Internet-Links ergänzen die „Perspektiven“.

Perspektiven – Berufsbilder von und für Biologen und Biowissenschaftler

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



Weitere Infos:

www.vbio.de/perspektiven

PERSPEKTIVEN BERUFSFELD BIOLOGIE





Stadtbäume erfüllen eine Reihe von Funktionen. Neben Kühlungseffekten durch Beschattung und Verdunstung sind es ökologische und ästhetische Funktionen. Mit ihrer Blüte, ihren Blättern und ihrer Borke erzeugen sie eine lebenswerte Atmosphäre. Klimabäume sind den Anforderungen der Klimaveränderungen oft besser gewachsen als bisher übliche Baumarten. Italienischer Ahorn (*Acer opalus*) in seiner prachtvollen Herbstfärbung ist eine der auffälligsten mitteleuropäischen Baumarten und eigentlich schon lange bekannt, wird aber viel zu selten angepflanzt.

Keine Angst vor Klimabäumen

Stadtbäume für die übernächste Generation

JÜRGEN BOUILLON

Klimabäume sind – im Gegensatz zu vielen einheimischen Baumarten – gut an zu erwartende Klimaverhältnisse und an die Besonderheiten urbaner Standorte angepasst. Sie stehen allerdings im Verdacht, durch ungewollte und übermäßige Ausbreitung einheimische Baumarten zu verdrängen. Aufgrund der geographischen Nähe wird Assisted Migration submediterranean Arten mittlerweile zunehmend akzeptiert. Aber reicht das schon für ein klimaresilientes Stadtgrün? Auch exotischere Baumarten sind zu empfehlen. Dieser Artikel ist ein Plädoyer für eine differenzierte Betrachtung.

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 48 erklärt.

Gerne wird in der Diskussion über klimaresilientes Stadtgrün auf gebietseigene Herkünfte ► einheimischer Arten hingewiesen. Aber sind vergangene Anpassungen an regionale Verhältnisse ein guter Indikator für einen Blick in die Zukunft? Und lassen sie sich auf den Sonderstandort Stadt übertragen? Möglicherweise werden die Anforderungen, die der Klimawandel voraussichtlich an Bäume stellen wird, unterschätzt. Es ist augenfällig, dass viele einheimische Baumarten seit Jahren leiden. Im Jahr 2023 hat es neben Birke (*Betula pendula*), Rotbuche (*Fagus sylvatica*) und Stiel-Eiche (*Quercus robur*) fast unbemerkt eine weitere Baumart getroffen. Trotz feuchtem Sommer wurde in vielen Regionen Deutschlands die Hainbuche (*Carpinus betulus*) stark geschwächt: Blätter vertrockneten, manche Bäume fruktifizierten übermäßig stark oder starben sogar vollständig. Und das war nicht das erste Mal: Bereits im Sommer 2010 konnte dieses Phänomen beobachtet werden (Abbildung 1). Ist das wirklich eine Auszeichnung für ein als Klimabaum ausgewiesenes Gehölz, wenn der Klimawandel erst begonnen hat?

Prognosen zum Klimawandel

Um die verschiedenen Klimaprognosen in Bezug auf die Gehölzverwendung einordnen zu können, ist es wichtig zu wissen, wofür wir Bäume in der Stadt pflanzen und ab wann und wie lange sie ihre Funktionen dort erfüllen sollen. Unstrittig ist sicher, dass Bäume besonders in Städten durch Schattenwirkung und Kühlung als Folge von Verdunstung dazu beitragen, das Leben dort lebenswerter zu gestalten. Weitere Ökosystemleistungen kommen hinzu. Ein Baum, den wir heute pflanzen, wird in 15 Jahren mit fachgerechter Pflege vom Jungbaum in die Reifephase übergehen. Er hat sein gewünschtes ▶ Lichtraumprofil erhalten und beginnt eine arttypische Krone auszubilden. Im Jahr 2100 würde unser jetzt gepflanzter Baum ungefähr 75 Jahre an seinem Standort stehen – für uns ein stattliches Alter, aber für den Baum noch lange nicht das Lebensende, wenn die Wachstumsbedingungen passen.

Ab dem Jahr 2040 beginnen die unterschiedlichen Klimawandelprognosen in Bezug auf den Strahlungsantrieb und damit auch die Temperaturerhöhungen merklich auseinanderzulaufen. Realistisch erscheinen heute Szenarien in einem Bereich, in dem die weltweiten Treibhausgasemissionen bis zur Mitte des Jahrhunderts auf dem heutigen Niveau stagnieren (SSP2-4.5) bis hin zu einer Verdoppelung der Emissionen bis zum Ende des Jahrhunderts (SSP3-7.0) [1, 2] (siehe auch Kasten „Klimaszenarien“). Landgebiete erwärmen sich derzeit um 50–100 Prozent stärker als der globale Mittelwert [3]. Es ist daher durchaus möglich, dass die Temperatur in Deutschland im Jahr 2100 um 3–4 Grad höher liegt als heute. Ist es daher nicht sinnvoll, auch für ein ungünstigeres Szenario vorzubeugen?

In Bezug auf die Niederschläge sehen die Veränderungen für Deutschland nicht ganz so gravierend aus. Selbst im fossilen Szenario (SSP4-8.5) sollen sich die Niederschläge bis zum Jahr 2100 eher leicht erhöhen, wobei sie im Sommer auf dem heutigen Niveau stagnieren sollen [4]. Selbst bei 20 Prozent geringeren Niederschlägen, wie sie in manchen Klimamodellen angenommen werden [5], kann sich das Klima in weiten Teilen Deutschlands – vielleicht mit Ausnahme der Küstengebiete – von einem kühlgemäßigten Ozeanklima hin zu einem immerfeuchten, subtropischen Klima entwickeln, wie wir es heute im südöstlichen Nordamerika oder in Norditalien antreffen. Bei weniger starken Veränderungen gemäß dem Szenario SSP2-4.5 ist nach wie vor ein gemäßigttes Ozeanklima – allerdings mit wärmerer, submediterranean Tönung – zu erwarten. Eine ausgeprägte Sommertrockenheit wird es aber voraussichtlich nicht geben. Das bedeutet keine Entwarnung, denn höhere Temperaturen führen zu höherer Verdunstung und damit zu mehr Stress für Bäume. Dürren in einzelnen Jahren können ebenfalls auftreten. Auf jeden Fall werden sich mit der Klimaerwärmung die Florenregionen verschieben.



ABB. 1 Säulen-Hainbuche (*Carpinus betulus* 'Fastigiata') vertrocknet an einem typischen städtischen Extremstandort.

IN KÜRZE

- **Bäume** stellen für das städtische Ökosystem **eine Reihe von Leistungen** – insbesondere Verschattung und Kühlung – bereit, geraten aber durch die Veränderungen des Klimawandels und stadtspezifische Standorteinschränkungen **zunehmend unter Stress**.
- Bereits in 75 Jahren könnten viele einheimische Baumarten den **Anforderungen von Hitze und mangelnder Wasserverfügbarkeit nicht mehr gewachsen sein**.
- **Natürliche Wanderungsbewegungen** von Gehölzen benötigen mehr Zeit, als uns zur Verfügung steht, so dass diese Entwicklung durch **gezielte Anpflanzung von submediterranen und subtropischen Arten** aus dem süd- und südosteuropäischen Raum vorweggenommen werden sollte (**Assisted Migration**).
- **Im voreiszeitlichen Klima** gab es auch im heutigen Mitteleuropa eine **höhere Biodiversität** als heute. Es bietet sich bei künftig ähnlichen Klimaverhältnissen an, im urbanen Kontext den **Artenreichtum Vorderasiens, Ostasiens oder Nordamerikas zu nutzen**, wo es durch die Eiszeiten keine oder nur **eine geringe Artenverarmung der Gehölzflora** gegeben hat.
- Bei geeigneten Standortbedingungen ist von einer **Etablierung und Ausbreitung häufiger gepflanzter, neuer Arten** auszugehen.

KLIMASZENARIEN

Nach dem 6. Sachstandsbericht (AR6 = Sixth Assessment Report) des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) bestehen Klimaszenarien aus zwei sich ergänzenden Komponenten: den Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), die mögliche zukünftige sozioökonomische Entwicklungen beschreiben und den Representative Concentration Pathways (RCPs), die mögliche Konzentrationspfade atmosphärischer Treibhausgase und damit mögliche zukünftige Entwicklungen des Klimas abbilden.

SSP1-2.6: Der 2-Grad-Weg. Eine international koordinierte Entwicklung, dem Pariser Abkommen folgend, ermöglicht durch aktiven Klimaschutz eine Beschränkung der globalen Erwärmung auf 2 Grad gegenüber dem vorindustriellen Zeitraum. Der Einsatz erneuerbarer Energien hat gesellschaftlich eine hohe Priorität und wird dementsprechend stark forciert. Die Treibhausgasemissionen werden bis zum Jahr 2030 massiv reduziert. Die Treibhausgaskonzentrationen nehmen bis zum Ende des Jahrhunderts allmählich ab. Ende des 21. Jahrhunderts gibt es keine anthropogen verursachten Treibhausgasemissionen mehr. Dieses wird u. a. durch aktive Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts erreicht.

SSP2-4.5: Der Mittelweg. Klimaschutz und wirtschaftliche Entwicklung, welche wie bisher auch auf dem Einsatz fossiler Rohstoffe beruht, halten sich die Waage. Das globale Bevölkerungswachstum ist moderat und schwächt sich in der zweiten Jahrhunderthälfte ab. Fossile Ressourcen werden weiterhin genutzt. Die Treibhausgasemissionen erreichen um 2040 ihren Höhepunkt und werden bis zum Ende des 21. Jahrhunderts um die Hälfte reduziert. Die Herausforderungen der Anpassung werden mit zunehmenden Auswirkungen des Klimawandels immer größer.

SSP3-7.0: Der konfliktreiche Weg. Eine Verstärkung des Nationalismus und regionale Konflikte führen zu einem hohen Rohstoff- und Energiebedarf, der größtenteils mit fossilen Energieträgern wie Kohle gedeckt wird. Die Bevölkerung in den armen Ländern wächst stark. Soziale Ungleichheiten nehmen zu. Die Treibhausgaskonzentrationen steigen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts weiter an. Die klimatischen Veränderungen sind umfangreich. In einigen Regionen kommt es zu starken Umweltzerstörungen, beispielsweise von Wäldern und anderen Ökosystemen. Dieses Szenario stellt große Herausforderungen an die Klimawandelanpassung.

SSP5-8.5: Der fossile Weg. Die soziale und ökonomische Entwicklung basiert auf der verstärkten Ausbeutung der fossilen Brennstoffressourcen mit einem energieintensiven Lebensstil weltweit. Die globale Wirtschaft wächst schnell. Das ist vor allem auf die Entwicklung in Industrie- und Schwellenländern zurückzuführen. Der Nutzung fossiler Brennstoffe wird eine hohe gesellschaftliche Akzeptanz entgegengebracht. Das führt zu einer starken Erhöhung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre. Der Anstieg der Treibhausgasemissionen hält bis zum Ende des 21. Jahrhunderts an. Die klimatischen Veränderungen sind sehr stark. Durch internationale Zusammenarbeit, die sich im Rahmen einer stark vernetzten Weltwirtschaft etabliert hat, erhalten jedoch die durch die Klimaänderung am stärksten betroffenen Länder Unterstützung.

Anforderungen im urbanen Raum

Durch den städtischen Wärmeineffekt kommt bereits jetzt in Großstädten eine weitere Temperaturerhöhung hinzu, die im Jahresmittel durchaus 1,5 Grad und mehr betragen kann. Die Stadtböden nehmen ebenfalls Einfluss auf die Bäume. Durch schnellen und hohen Oberflächenabfluss der Niederschläge und damit einhergehende geringere Verdunstung verschlechtern sich die Wachstumsbedingungen der Bäume zunehmend. Bautätigkeiten an unterirdischer Infrastruktur führen häufig zu mechanischen Beschädigungen. Gehölze für urbane Standorte, sogenannte Klimabäume, sollten deshalb folgende Resistenzen aufweisen:

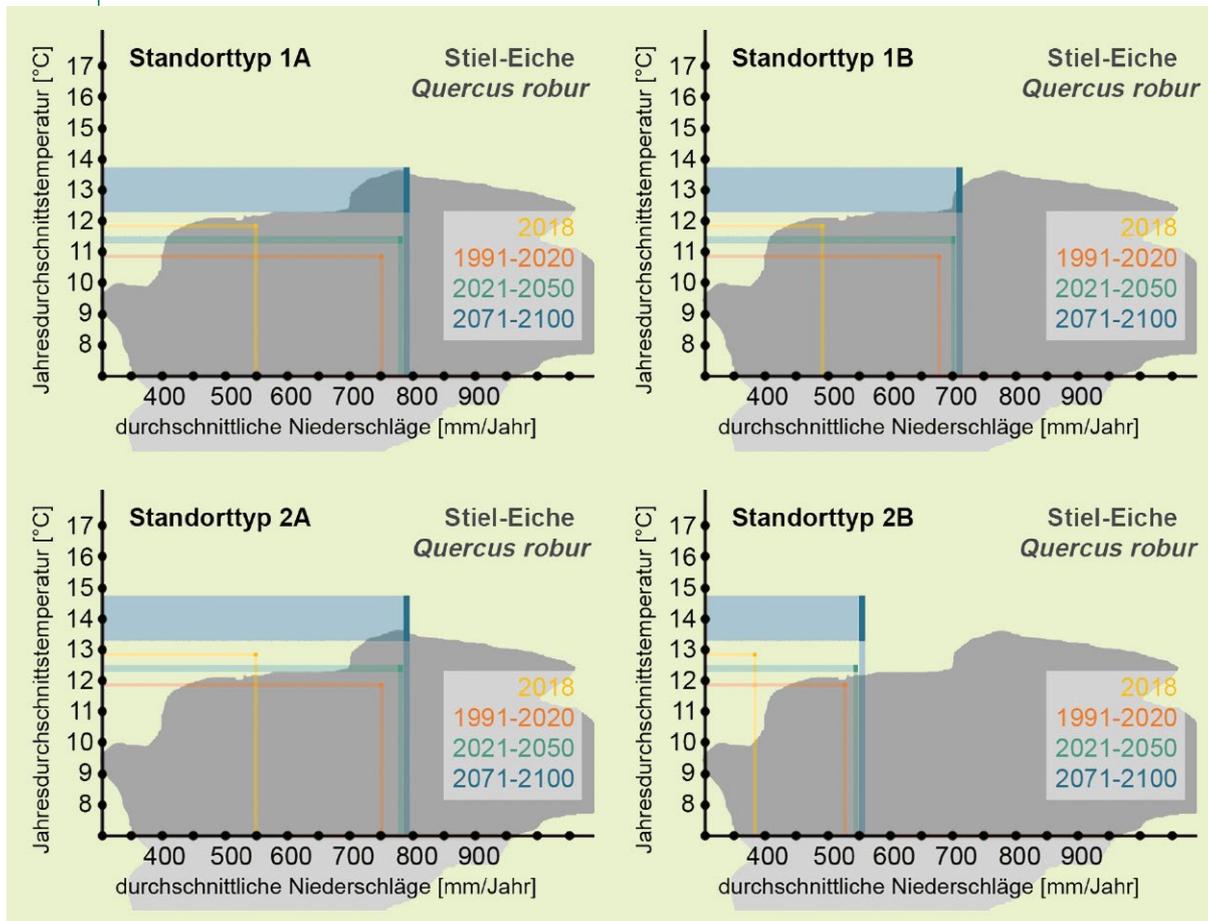
- Trockenheitsverträglichkeit im eingewachsenen Zustand,
- Hitzeverträglichkeit,
- Winterhärte gemäß Winterhärtezone,
- Verträglichkeit gegenüber hohen Nährstoffgehalten,
- Verträglichkeit von hohen pH-Werten,
- Toleranz gegenüber Bodenverdichtung und
- Störungstoleranz,
- möglichst geringe Astbrüchigkeit.

Weitere Anforderungen sind funktionaler (Kronenform, Schattenwirkung), ästhetischer (attraktive morphologische Eigenschaften wie Laubfärbung, Laubtextur, Blüte, Borke, ggf. Früchte) oder ökologischer Natur (Habitat und Nahrungsangebot für Insekten, Vögel, Säugetiere u. a.). Hinsichtlich Insektenfreundlichkeit sind Klimabäume im Übrigen nicht grundsätzlich schlechter als einheimische Bäume [6].

Standorte in Städten sind durchaus unterschiedlich. Neben dem Wärmeineffekt gibt es unter anderem auch Einschränkungen des Wurzelraums, die es dem Gehölz erschweren, sich mit Wasser und Nährstoffen zu versorgen. In einer Modellrechnung wurden vier Stadtstandorte für Münster differenziert und die derzeit häufigsten Stadtbäume mit deren klimatischen Ansprüchen (► Klimahüllen nach Kölling [7]) in Beziehung gesetzt. Demnach wären die Standortverhältnisse in einer Parkanlage am Rand von Münster ohne Einschränkungen gerade noch innerhalb der Klimahülle der Stiel-Eiche (*Quercus robur*), im Worst-Case-Szenario sogar überschritten. Je größer die Standortungunst, desto weiter entfernen sich die Bedingungen von der Klimahülle (Abbildung 2) [8]. Ohne zusätzliche unterstützende, gärtnerische Maßnahmen wird daher selbst *Quercus robur* in ferner Zukunft an innerstädtischen Straßen voraussichtlich nicht mehr verwendbar sein, im Gegensatz zur Flaum-Eiche (*Quercus pubescens*), deren Klimahülle alle betrachteten Veränderungen abdeckt [7]. Das ist ein weiterer Grund, sich intensiver mit dem Schwammstadtprinzip auseinanderzusetzen (siehe auch Kasten „Schwammstadt“) und neue, geeignetere Baumarten einzubringen.

Geeignete einheimische Baumarten

Im Hinblick auf den Klimawandel ist für urbane Räume eine Reihe in Deutschland einheimischer Arten geeignet.

ABB. 2 | KLIMAHÜLLE DER STIEL-EICHE (*QUERCUS ROBUR*)


Gezeigt wird die Übereinstimmung der Klimahülle (grau) der Stiel-Eiche (*Quercus robur*) mit den aktuellen Klimabedingungen (gelb und orange) und mit den Prognosen des Klimaszenarios SSP5-8.5 (grün und blau) an verschiedenen Standorttypen in Münster. 1A: geringe städtische Überwärmung, normales Wasserangebot, Parkanlage im Außenbereich; 1B: geringe Überwärmung, leicht eingeschränktes Wasserangebot, großzügiger Straßenstandort; 2A: mäßige bis starke Überwärmung, normales Wasserangebot, innerstädtische Grünfläche; 2B: mäßige bis starke Überwärmung, stark reduziertes Wasserangebot, zentrale Stadtplätze oder Straßen. Abb. nach [6].

Es sind insbesondere die Gehölze der Steppen- und Trockenwälder mit submediterrane Areal wie Feldahorn (*Acer campestre*), Französischer Ahorn (*Acer monspessulanum*), Italienischer Ahorn (*Acer opalus*, Aufmacherbild und Abbildung 3), Kornelkirsche (*Cornus mas*), Zerr-Eiche (*Quercus cerris*), Flaum-Eiche (*Quercus pubescens*), Mehlsbeere (*Sorbus aria*), Speierling (*Sorbus domestica*) oder Elsbeere (*Sorbus torminalis*).

Obwohl Städte bereits jetzt wärmer als ihr Umland sind, siedeln sich diese geeigneten Arten erstaunlicherweise innerstädtisch nicht oder nur selten spontan an. Es sind eher eingeführte Arten wie Eschen-Ahorn (*Acer negundo*), Götterbaum (*Ailanthus altissima*), Amerikanischer Zürgelbaum (*Celtis occidentalis*) oder Blauglockenbaum (*Paulownia tomentosa*), die sich erfolgreich dort ausbreiten können. Das hängt vermutlich mit ihrer höheren Störungstoleranz zusammen, eine Eigenschaft, die insbesondere Auwaldarten aufweisen. Auf der Suche nach geeigneten Bäumen für die zukünftigen Bedingungen ins-

besondere in den Städten können die Gehölze gemäß ihrer Herkunft schrittweise analysiert werden.

SCHWAMMSTADT

Schwammstadt (englisch Sponge City) ist ein neues Konzept der Stadtplanung, möglichst viel anfallendes Regen- bzw. Oberflächenwasser vor Ort aufzunehmen, zu speichern, zu nutzen oder zu versickern, anstatt es wie bisher so schnell wie möglich abzuleiten. Es reagiert damit auf die Herausforderungen des Klimawandels: Bereits jetzt ist abzusehen, dass längere Hitzeperioden und Starkregenereignisse aufeinanderfolgen. Es sollen Überflutungen bei Starkregenereignissen verringert oder sogar vermieden, das Stadtklima verbessert und die Gesundheit von Stadtbäumen sowie die Resilienz von gesamten Stadtökosystemen gefördert werden. Das zwischengespeicherte Wasser wird im Boden gereinigt oder versickert und durch die „Grüne Infrastruktur“ verdunstet, so dass die Städte gekühlt werden. Dazu zählen Dach- und Fassadenbegrünungen, Stadtbäume und Grünflächen. Durch die Verbindung von dezentralem Regenwassermanagement und den Leistungen der Pflanzen entsteht eine „Blau-Grüne Infrastruktur“. Vorreiterin des Schwammstadtprinzips ist die Stadt Kopenhagen. Erste Ansätze gibt es aber schon in deutschen Städten.



ABB. 3 Der Italienische Ahorn (*Acer opalus*) ist eine der frühesten Bienenweiden.

Genetische Varianz einheimischer Arten

Aufgrund der dargelegten, möglichen Klimaveränderungen können Baumarten aus ► autochthonen Herkünften kaum ernsthaft in Betracht gezogen werden, mögen sie auch an die heutigen Bedingungen besser angepasst sein. Dagegen sind in Mitteleuropa vorkommende Baumarten mit wärmeren Herkünften wie die Rotbuche (*Fagus sylvatica*) durchaus eine ernstzunehmende Alternative (beispielsweise Bäume aus den Orchideen-Buchenwäldern des fränkischen Kalkhügellandes oder aus Südosteuropa; dazu liefert die Forstgenetik eine Reihe von Hinweisen [z. B. 9]). Da *Fagus sylvatica* im Süden ihres Verbreitungsgebietes in höhere Lagen wechselt, ist allerdings davon auszugehen, dass ihre Plastizität Grenzen hat. Die noch weiter südlich und östlich vorkommende Orientalische Buche (*Fagus orientalis*) wird derzeit als mögliche Alternative angesehen. Zumindest sind Versuchsanbauten in Unterfranken und im Saarland nach eigener Beurteilung vielversprechend.



ABB. 4 Die Ungarische Eiche (*Quercus frainetto*) mit ausladender Krone, großen, interessant geformten Blättern und gelber Herbstfärbung ist eine Alternative zur Platane (*Platanus × hispanica*).

Auch lohnt sich ein Blick in Analogregionen. So haben Thurm et al. [10] festgestellt, dass *Fagus sylvatica* im Rhonetal bei Valence, einem 2 Grad wärmeren Gebiet im Vergleich zum Steigerwald, nur noch eine untergeordnete Rolle spielt. Bestimmend in den dortigen Wäldern sind Flaum-Eiche (*Quercus pubescens*), Wald-Kiefer (*Pinus sylvestris*), Esskastanie (*Castanea sativa*) und Stein-Eiche (*Quercus ilex*). In einer um 4 Grad wärmeren Analogregion nimmt der Anteil von *Quercus pubescens* und *Quercus ilex* sogar noch zu, der Anteil von *Castanea sativa* wieder ab. Es ist allerdings anzuzweifeln, dass diese großfrüchtigen Arten von alleine schnell genug nach Norden wandern werden. Folglich können im nächsten Schritt also weitere Baumarten submediterraner Gebiete, die ihr Areal über längere Zeiträume sowieso erweitern würden, in Betracht gezogen und bewusst angepflanzt werden (*Assisted Migration*).

Submediterrane und euxinisch-hyrkanische Arten

Südlich der Alpen führt die Topographie der Gebirge zu kleinräumigen und vielfältigen Übergängen von mediterraner über submediterrane zu mitteleuropäischer Flora. Auf den Inseln des Mittelmeeres gibt es analog zur submediterranen Stufe die supramediterrane Stufe. Frostverträgliche mediterrane Arten strahlen als Unterwuchs in submediterranen Wäldern, submediterrane Baumarten sind in mitteleuropäisch geprägten Buchenwäldern anzutreffen. Am Gardasee beispielsweise wird die submediterrane Stufe von Flaumeichen-Hopfenbuchenwäldern gebildet. Neben der Flaum-Eiche (*Quercus pubescens*) und der Hopfenbuche (*Ostrya carpinifolia*) ist dort die Blumen-Esche (*Fraxinus ornus*) häufig anzutreffen. Die Mehlbeere (*Sorbus aria*) wandert auch in die darüber liegende Stufe, während die mediterrane Stein-Eiche (*Quercus ilex*) zerstreut vorkommt, an extrem warmen und trockenen Südhängen aber durchaus schon den Aspekt bestimmen kann.

Ein Vertreter mit ost-submediterraner Verbreitung ist die Silber-Linde (*Tilia tomentosa*). Deren genetisches Potenzial ist bei uns bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Die meisten Bäume im Verbreitungsgebiet weisen gute Wuchseigenschaften auf. Typen ohne ► Zwieselbildung, wie bei den Sorten 'Brabant', 'Szeleste' oder 'Varsaviensis', sind daher eher die Regel und sollten der bei uns derzeit kultivierten „Art“ – es handelt sich ja meist nur um einen Klon – vorgezogen werden. Forstliches Saatgut von *Tilia tomentosa* ist in Deutschland jedenfalls schon zu beziehen.

Ein ähnliches Verbreitungsgebiet hat die Ungarische Eiche (*Quercus frainetto*, Abbildung 4), die sich im Projekt Stadtgrün 2021 der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau schon bewährt hat [11]. Im Südosten des Balkans treten erstmals auch Schwarzmeer-Arten (► euxinische Arten) hinzu, u. a. die Strandsha-Eiche (*Quercus bartwissiana*) im Strandsha-Gebirge an der bulgarisch-türkischen Grenze.

Viele Arten der euxinischen, kaukasischen und nordrikanischen (► hyrkanischen) Wälder waren vor und zwischen den Eiszeiten auch im mitteleuropäischen Raum verbreitet (siehe auch Kasten „Arktotertiäre Flora als Vorbild“). Aufgrund von unerfüllten klimatischen und ökologischen Ansprüchen haben sie es nicht geschafft, ihr Areal wieder weiter auszudehnen [12]. Die hyrkanischen Wälder wachsen in feucht-subtropischem Klima, zu dem sich unser Klima in Zukunft hin entwickeln könnte. Bekannte Baumarten sind Orientalische Buche (*Fagus orientalis*), Eisenholzbaum (*Parrotia persica*) oder Seidenakazie (*Albizia julibrissin*). Eine noch wenig bekannte Art mit sehr günstigen Eigenschaften ist die Persische Eiche (*Quercus macranthera*).

Trend zum immergrünen Wald

Mildere Winter, wie sie sich ja schon in den vergangenen 20 Jahren abzeichnen, führen bereits jetzt v. a. im Westen Deutschlands zur Ausbreitung wintergrüner und immergrüner Gehölze, derzeit vornehmlich Sträucher (► Laurophyllisierung): Mahonie (*Berberis aquifolium*, Syn. *Mabonia aquifolium*), Julianes Berberitze (*Berberis julianae*), Sommerflieder (*Buddleja davidii*), Kirschlorbeer (*Prunus laurocerasus*) und Portugiesische Lorbeerkirsche (*Prunus lusitanica*). Letztgenannte kann durchaus Baumhöhe erreichen. Im submediterranen Raum wartet eine Reihe von wintergrünen und immergrünen Bäumen darauf, als Stadtbäume entdeckt zu werden, u. a. die Mazedonische Eiche (*Quercus trojana*), die Aleppo-Eiche (*Quercus infectoria* subsp. *veneris*, Abbildung 5) oder der Syrische Ahorn (*Acer obtusifolium*). Zumindest aus gut sortierten Baumschulen ist die Spanische Eiche (*Quercus × crenata*, Syn. *Quercus × hispanica*) zu beziehen, eine Hybride aus der immergrünen, westmediterranen Kork-Eiche (*Quercus suber*) und der sommergrünen, südeuropäisch-kleinasiatischen Zerr-Eiche (*Quercus cerris*). Diese kommt im Verbreitungsgebiet der Elternarten auch in der Natur vor.

Überhaupt ist ein Blick auf die Zerreichenverwandtschaft (Untergattung *Cerris*) lohnend. Es gibt dort sommergrüne, wintergrüne und immergrüne Vertreter. Vorbehalten wegen Gefährdungen durch den Eichenprozessionsspinner (EPS), eine Schmetterlingsraupe mit giftigen Brennhaaren, können mittlerweile wirksame Bekämpfungs- und Vermeidungsstrategien entgegeng gehalten werden. Zwar ist der EPS durch die Klimaerwärmung in Ausbreitung begriffen, aber er tritt nicht in jedem Jahr massenhaft auf. Ein Verzicht auf die Verwendung von Eichen würde uns auf jeden Fall eines enormen Potenzials an Klimabäumen berauben. Ob Roteichen (Untergattung *Quercus*, Sektion *Lobatae*) resistenter gegen einen Befall mit dem EPS sind, muss noch überprüft werden. In dieser Sektion gibt es ebenfalls sommergrüne, wintergrüne (*Quercus rysophylla*) und immergrüne (*Quercus agrifolia*) Vertreter. Besonders interessant sind kalkverträgliche Arten mit ausgezeichneter Herbstfärbung, wenn sie auf eigener Wurzel gezogen sind (z. B. *Quercus shumardii*, *Quercus texana*).



ABB. 5 Die Aleppo-Eiche (*Quercus infectoria* subsp. *veneris*), ist ein wintergrüner Baum aus Zypern, der als Pollenspender eine ausgezeichnete Bienenweide darstellt.

ARKTOTERTIÄRE FLORA ALS VORBILD

Vor den Eiszeiten und in den Interglazialen herrschte im heutigen Mitteleuropa ein warm-gemäßigtes Klima, in dem ein artenreicher, ► nemoraler, sommergrüner Laubwald mit einem geringen Anteil immergrüner Gehölze des Lorbeerwaldes wuchs. Überreste davon finden sich heute vor allem in fossilen Ablagerungen des Miozäns und Pliozäns in der Arktis – daher wird sie auch als arktotertiäre Flora bezeichnet [16] – oder in Blättertonschichten in der Lausitz [17]. Diese Wälder waren sowohl reicher an Gehölzgattungen als auch reicher an Arten innerhalb der Gattungen. Gleiches trifft auch auf die krautige Flora zu. Die Flora Europas ist im Gegensatz zur Flora Nordamerikas oder Ostasiens, in denen es heute noch einen größeren Artenreichtum gibt, verarmt. In Mitteleuropa kommen nach Schroeder [18] heute 30 Gehölzgattungen vor. Zehn weitere Gattungen haben Refugialstandorte im südöstlichen Europa und Vorderasien gefunden wie Zürgelbaum (*Celtis*), Europäischer Amberbaum (*Liquidambar orientalis*), Platane (*Platanus orientalis*) oder Zerkove (*Zelkova*). 34 Gattungen sind in ganz Europa ausgestorben. Gründe dafür sind nicht – wie lange tradiert, aber leicht widerlegbar – geographische Barrieren wie Gebirge und Meere, sondern dass in Europa keine naheliegende Verschiebung der Vegetationszonen nach Süden stattgefunden hat: In Südeuropa herrschte ein von Gräsern, Beifuß (*Artemisia*) und Doldenblütlern (*Apiaceae*) dominiertes Wüstensteppenklimate vor [12, 19]. Es handelt sich bei den in weiten Teilen Europas ausgestorbenen Gehölzen vielmehr um anspruchsvolle Sippen, die in einem waldfeindlichen Klima keine Refugien finden konnten. Einerseits haben diese Sippen sehr hohe Ansprüche an Sommerwärme und –niederschläge, wie Magnolien (*Magnolia*) oder Tulpenbäume (*Liriodendron*), andererseits sind es Sippen mit komplexen Ansprüchen an ihren Standort, wie Hemlocktanne (*Tsuga*) [12], Mammutbaum (*Sequoia*) oder Sumpfyzypresse (*Taxodium*). Für diese Gehölze können in urbanen Räumen wieder geeignete Standorte geschaffen werden.

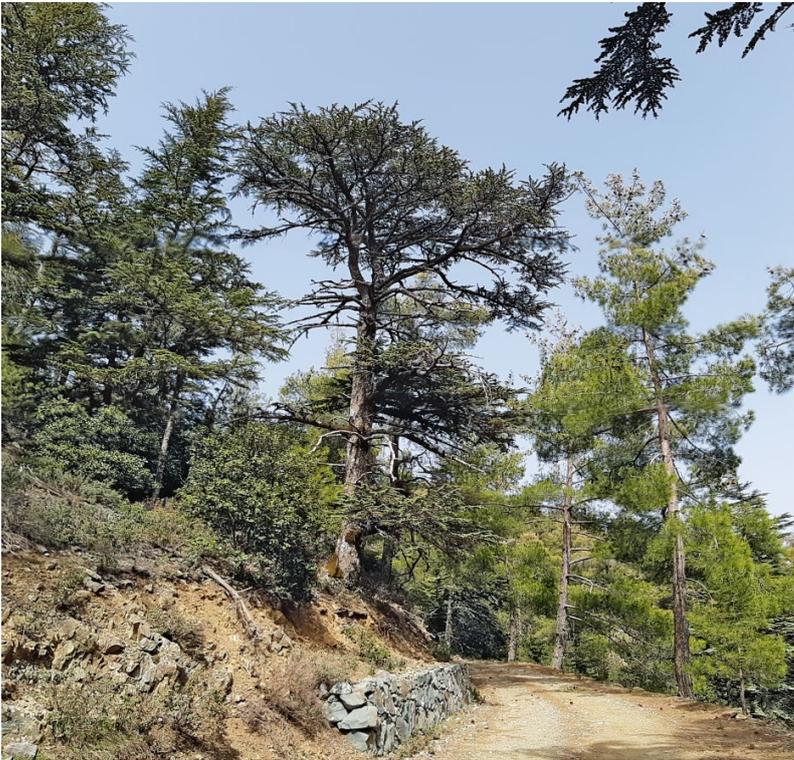


ABB. 6 Die Zypern-Zeder (*Cedrus brevifolia*) im Troodos-Gebirge (Zypern).

Nadelgehölze im Blick

Von immergrünen Laubgehölzen fällt der Sprung leicht zu den ohnehin meist immergrünen Nadelgehölzen. Vielleicht gerade weil diese in den vergangenen 40 Jahren eine immer geringere Rolle in der Landschaftsarchitektur gespielt haben, lohnt es sich, genauer hinzuschauen. Schon mit *Pinus sylvestris* lassen sich mediterrane „Atmosphären“ erzeugen. Aber besonders submediterrane Nadelgehölze entwickeln ausgeprägte Formcharaktere. Die



ABB. 7 Eine Amerikanische Esche (*Fraxinus americana*) in einer Fußgängerzone in Sofia (Bulgarien). Trotz maximaler Belastung ist dieser Baum vital und das Laub auch im Sommer gesund.

Stadtklimaverträglichkeit ist bei einigen Arten gegeben. So breitet sich beispielsweise die Griechische Tanne (*Abies cephalonica*) auf den Kalkfelsen des Botanischen Gartens Osnabrück problemlos aus. Ebenfalls sehr trockenheitsverträglich sind *Abies pinsapo* aus Spanien und *Abies concolor* aus Nordamerika.

Auch die Zedern verdienen eine Renaissance. Neben den bekannten, mächtigen Vertretern ist die zypriotische *Cedrus brevifolia* zu empfehlen (Abbildung 6). Sie besitzt die kürzesten Nadeln, die eine schöne graugrüne Farbe aufweisen und einen gefälligen, lockeren, nicht allzu ausladenden Wuchs. Eine vermehrte Verwendung würde zudem zum Erhalt der Art beitragen. Da der Klimawandel auch vor den mediterranen Inseln nicht Halt macht, wird sie von einigen, tiefer stehenden Kiefernarten bedrängt und müsste ihr Areal in der Höhe verschieben, was aus topographischen Gründen kaum noch möglich ist. Derartige ex-situ-Arterhaltungsmaßnahmen wurden in der Vergangenheit bereits beim Urweltmammutbaum (*Metasequoia glyptostroboides*) und der Wollemie (*Wollemia nobilis*) erfolgreich durchgeführt.

Die säulenförmigen Mittelmeer-Zypressen, *Cupressus sempervirens* var. *stricta*, gedeihen im Westen und Norden Deutschlands heute schon ganz gut. Im Süden und Osten Deutschlands sollte ein Versuch mit der graublauen *Cupressus arizonica* durchaus erfolgversprechend sein. Zwei Unterarten der Schwarz-Kiefer (*Pinus nigra* subsp. *laricio* und *Pinus nigra* subsp. *pallasiana*) weisen wunderschöne Borken auf und sind vermutlich auch etwas hitzeresistenter als die bei uns kultivierte *Pinus nigra* subsp. *nigra*. Sicher könnten auch baumförmig wachsende Wacholderarten noch einmal in Betracht gezogen werden.

Sortenwahl bei potenziell invasiven Arten

Auch potenziell invasive Arten können erwogen werden, wenn die Möglichkeit besteht, ihre Ausbreitung wirksam zu begrenzen. Insbesondere bei zweihäusigen Arten ist dies möglich: Werden ausschließlich männliche Klone verwendet, können sich keine Früchte entwickeln, die zu einer Verbreitung der Art beitragen. Dies wird schon lange für *Ginkgo biloba* gefordert, dessen weibliche Exemplare nach längerer Zeit mit schlecht riechenden „Früchten“ aufwarten. Allerdings erfordert diese Strategie eingehende Kenntnisse, da nicht alle zweihäusigen Arten strikt männlich oder weiblich sind und bei älteren Exemplaren auch wieder Einhäusigkeit auftreten kann.

Bei Baumarten mit etwas komplexeren Blütenverhältnissen fällt dies besonders ins Gewicht. Beispielsweise ist es bei den Gleditschien, die erste Ansätze zur Verwilderung zeigen [13], empfehlenswert, an Straßen dornenlose Sorten zu pflanzen. Sorten wie 'Shademaster' und 'Skyline' haben weder Dornen noch Früchte. Sollten diese nach einigen Jahren Früchte ansetzen, dürfte es sich in Wirklichkeit um eine fertile *Gleditsia triacanthos* var. *inermis* und damit um eine – durchaus nicht außergewöhnliche – Falschlieferung handeln.



ABB. 8 Japanische Zelkove (*Zelkova serrata*) im Herbstkleid.

Die beiden – im Vergleich zur einheimischen *Fraxinus excelsior* – trockenheitsverträglicheren amerikanischen Eschen, *Fraxinus americana* (Abbildung 7) und *Fraxinus pennsylvanica*, sind zweihäusig. *Fraxinus pennsylvanica* ist in vielen Auen von Elbe, Oder, Havel, Spree, Donau und Main bereits eingebürgert [14, 15]. Ist deren Ausbreitung nicht gewollt – es gibt unterschiedliche Ansichten dazu – ist die Verwendung von nicht fertilen, männlichen Sorten möglich. Beide Arten besitzen eine schöne Herbstfärbung zwischen gelb und rot. Besonders auffällig purpurrot ist die Sorte *Fraxinus americana* Autumn Purple ('Junginger').

Bekannte Klimabäume mit bereits erkennbarem Ausbreitungspotenzial

Ob ein Klimabaum sich ausbreitet oder wie der Götterbaum (*Ailanthus altissima*) ein invasiver Neophyt wird, hängt von vielen Faktoren ab. Ausschlaggebend sind vor allem die für die Samenreife und Keimung nötigen Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse. Bisher werden vom Bundesamt für Naturschutz (BfN) allerdings nur vier Prozent der Neophyten als invasiv eingeschätzt [15]. Außerdem können Neophyten Lücken besetzen, die zurückweichende einheimische Arten hinterlassen.

Einige Arten, die bisher in Deutschland nicht aufgefallen sind, besitzen durchaus Potenzial, sich zu etablieren. Die zu den Ulmengewächsen zählende Japanische Zelkove (*Zelkova serrata*, Abbildung 8) wird wegen ihrer schönen, breiten Krone, ihrem filigranen Laub und ihrer besonders leuchtend rot-orangen Herbstfärbung als Park-

baum verwendet. Auch die Borke ist im Alter lebhaft strukturiert. In einem aufgelassenen Arboretum in der Nähe von Lednice (Tschechien), in dem ein ganzer Bestand von *Zelkova serrata* gepflanzt wurde, keimen zur Freude der Prager Bonaigesellschaft tausende kleiner Sämlinge (Abbildung 9), die wieder zu Bäumen heranwachsen.

Neben den passenden Standortverhältnissen kann davon ausgegangen werden, dass eine genetische Variabilität die Fertilität der Art fördert. Werden also mehr Klimabäume in unterschiedlichen Genotypen gepflanzt, steigt die Wahrscheinlichkeit ihrer Etablierung und Ausbreitung.



ABB. 9 Bestand von *Zelkova serrata* bei Lednice (Tschechien) mit zahlreichen Sämlingen im Unterwuchs.

Zusammenfassung

Durch die Auswirkungen des Klimawandels – besonders durch höhere Temperaturen – geraten viele einheimische Baumarten innerhalb der nächsten 75 Jahre voraussichtlich an den Rand ihrer Existenzmöglichkeiten. Der Baumstandort in der Stadt stellt eine zusätzliche Herausforderung dar, der durch menschliche Aktivitäten negativ wie auch positiv beeinflusst werden kann. Besonders die Wasserverfügbarkeit kann durch gärtnerische Maßnahmen und intelligente Profilierung von Geländeoberflächen gefördert werden. Vegetation und Vegetationszonen werden sich verändern. Mit gebietseinheimischen Genotypen und natürlicher Migration hitzeverträglicher Arten alleine lassen sich die anstehenden Probleme nicht lösen. In der Stadt werden vitale Bäume benötigt, die zugleich Schatten und Kühlung spenden. Lösungsansätze sind die vielfältige Anpflanzung hitzeresistenter Genotypen einheimischer Arten, submediterraner Arten

aus Süd- und Südosteuropa (Assisted Migration) sowie klimatoleranter Arten von anderen Kontinenten. Es wird davon ausgegangen, dass sich diese Arten in Mitteleuropa etablieren werden. Das erweiterte Artenspektrum ist angesichts einer durch die Eiszeiten verarmten einheimischen Gehölzflora für urbane Räume erstrebenswert und gut!

Summary

City trees for the next but one generation

The effects of climate change – particularly heat – are likely to push many indigenous tree species to the edge of their existence within the next 75 years. Ecological conditions of urban sites represent an additional challenge for trees. Human activities can intensify, but also alleviate them. Tree maintenance measures and intelligent profiling of soil surfaces in particular can promote water availability. Vegetation and vegetation zones will change. The variance of

GLOSSAR

autochthon: bezeichnet Arten, die im aktuellen Verbreitungsgebiet (Areal) entstanden oder dort im Zuge von natürlichen Arealerweiterungen – ohne menschlichen Einfluss – eingewandert sind. Ein Synonym für autochthon ist indigen. Als gebietsfremd (**allochthon**) werden dagegen Archäophyten und Neophyten bezeichnet, die in ihrer Verbreitung auf den Menschen angewiesen waren oder sind. In der Praxis werden meist diejenigen Pflanzen als Archäophyten eingestuft, die überwiegend in menschengemachter oder vom Menschen veränderter Vegetation wachsen, von denen aber weder Standorte in der natürlichen Vegetation nachweisbar sind, noch eine Einwanderung später als 1492 (das sind dann Neophyten) nachweisbar ist. Die jeweilige Abgrenzung ist abhängig vom gewählten Bezugsraum (z. B. Herkunftsgebiet, politische Verwaltungseinheit, Florenregion etc.)

einheimisch/heimisch: ist ein mehrdeutiger Begriff. Er wird in diesem Artikel als ursprünglich in Mitteleuropa vorkommend verwendet. Im engen Sinne des BNatSchG wird darunter ein Vorkommen in einem (!) von sechs Vorkommensgebieten innerhalb der Grenzen der Bundesrepublik Deutschland verstanden. Der Heimatbegriff im pflanzengeografischen Sinne ist deutlich weiter zu fassen: Das durch ökologische und geographische Parameter abgegrenzte Areal einer Art erstreckt sich oft über große Gebiete. So ist die Stiel-Eiche (*Quercus robur*) – gerne auch „Deutsche Eiche“ genannt – in ganz Europa und Kleinasien bis Transkaukasien heimisch (siehe auch ► autochthon).

euxinisch: biogeographisch der Region westlich, südlich und östlich der Küste des Schwarzen Meeres (Pontus Euxinus) zugeordnet. Im Westen herrschen noch weitgehend submediterrane, im Süden am Nordabfall des Pontischen Gebirges in der Türkei und im Osten in der Kolchischen Tiefebene Georgiens dagegen immerfeucht subtropische Verhältnisse mit vielen immergrünen Arten (Laurophyllen) wie die Pontische Alpenrose (*Rhododendron ponticum*). Als biogeographisch **pontisch** wird dagegen nur die winterkalte, osteuropäische Steppenregion nördlich des Schwarzen Meeres bezeichnet.

hyrkanisch: bezeichnet die Region im Süden des Kaspischen Meeres, insbesondere die warmen und regenreichen, nördli-

chen Hänge des Elbursgebirges im Norden Irans.

Klimahüllen: Klimahüllen sind zweidimensionale Darstellungen der Häufigkeitsverteilung von Jahresdurchschnittstemperatur und Jahresniederschlagssumme für die Verbreitungsgebiete (Areale) von Baumarten. Die Klimahüllen geben eine erste Möglichkeit, das Klima innerhalb des natürlichen Verbreitungsgebiets einer Baumart mit dem gegenwärtigen und zukünftigen Klima in einem Bezugsraum zu vergleichen.

Laurophyllisierung: Veränderung der sommergrünen (nemoralen), mitteleuropäischen Vegetation durch die Ausbreitung großblättriger winter- und immergrüner Laubgehölze, insbesondere Sträucher und kleinere Bäume. An autochthonen Arten sind dies Efeu (*Hedera helix*) und Stechpalme (*Ilex aquifolium*). Unter den gebietsfremden (allochthonen) Arten fällt derzeit besonders der Kirschlorbeer (*Prunus laurocerasus*) auf. Dies ist eine natürliche Entwicklung, die durch warme und regenreiche Winter begünstigt wird. Im Falle der Ausbreitung der Hanfpalme (*Trachycarpus fortunei*) im Tessin kann dies zu ungewöhnlichen Waldbildern führen.

Lichttraumprofil: an Verkehrswegen von Ästen und Zweigen freizuhaltender Bereich, der sich aus dem Verkehrsraum und zusätzlichen Sicherheitsräumen zusammensetzt. Über Straßen beträgt es 4,5 m und über Fuß- und Radwegen 2,5 m.

nemorale Laubwald: als sommergrüner oder nemorale Laubwald wird die natürlich vorhandene Schlusswaldgesellschaft in humiden, kühl-gemäßigten, ozeanisch beeinflussten Klimaten bezeichnet. In Mitteleuropa wird er v. a. aus Buchen, Eichen, Ahornen, Ulmen, Linden, Eschen und Erlen gebildet. Auch die Strauchschicht ist weitgehend sommergrün.

Zwiesel: Gabelung in der Verzweigungsstruktur eines Baumes in zwei gleich starke Stämmlinge oder Äste, die u-förmig oder v-förmig ausgebildet sein kann. Treten Zwiesel im Kronenan-satz auf, wird darauf bei der Beurteilung der Verkehrssicherheit besonderes Augenmerk gelegt.

native genotypes and the natural migration of more heat-tolerant tree species alone will not solve our future problems. In cities, vital trees are necessary to provide shade and cooling. Possible solutions include the planting of diverse heat-resistant genotypes of indigenous species, of new, Sub-Mediterranean species from Southern and Southeastern Europe (assisted migration) and of climate-tolerant species from other continents. It is likely that these species will establish in the future. In view of the Central European woody flora that has been largely impoverished by the ice ages, a species-rich urban tree vegetation is desirable and good!

Schlagworte

Klimawandel, Stadtgrün, Pflanzenverwendung, Bäume, Ökosystemleistungen, Resilienz, Biodiversität, Dendrologie

Literatur

- [1] Umweltbundesamt (2023a). Sechster Sachstandsbericht des Weltklimarates IPCC, <https://t1p.de/qxs2l>
- [2] Umweltbundesamt (2023b). Empfehlungen für die Charakterisierung ausgewählter Klimaszenarien, <https://t1p.de/p2j65>
- [3] S. Rahmstorf (2020). Deutschland ist schon zwei Grad wärmer. Spektrum der Wissenschaft, <https://t1p.de/517q8>
- [4] European Environment Agency (2022). Projected change in annual (left) and summer (right) precipitation, 2071–2100, <https://t1p.de/80oos>
- [5] Helmholtz-Zentrum Geesthacht (2020). Norddeutscher Klimaatlas, <https://www.norddeutscher-klimaatlas.de/>.
- [6] Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (o. J.). Klimabäume – Bienenbäume der Zukunft? <https://t1p.de/lexd1>
- [7] C. Kölling (2007). Klimahüllen für 27 Waldbaumarten. AFZ – Der Wald 62, 23, 1242–1245.
- [8] E. Sadler (2022). Zukunftsbäume für Münster. Erarbeitung eines Baumentwicklungskonzeptes mit standortspezifischen Artenempfehlungen unter zukünftigen Klimabedingungen unter Berücksichtigung des Klimahüllenkonzeptes, <https://t1p.de/ybexs>
- [9] M. Liesebach et al. (2023). Ergebnisse aus dem Internationalen Buchenherkunftsversuch 1996/98 von den Versuchsflächen in Deutschland. Thünen Rep 105, 97–127.
- [10] E. A. Thurm et al. (2017). Anbauempfehlungen – von der Forstung in die Fläche. AFZ-Der Wald, 72, 22, 19–23.
- [11] P. Schönfeld (2019). „Klimabäume“ – welche Arten können in Zukunft gepflanzt werden? LWG aktuell, <https://t1p.de/jcm63>
- [12] F.-G. Schroeder (2002). Warum verarmte Europas Gehölzflora in der Eiszeit? Mitt. Dtsch. Dendrol. Ges. 87, 7–17.
- [13] Bochumer Botanischer Verein (2014). Beiträge zur Flora Nordrhein-Westfalens aus dem Jahr 2013. Jahrb. Bochumer Bot. Ver. 5, 130–163.
- [14] D. Zacharias, A. Breucker (2008). Die nordamerikanische Rot-Esche (*Fraxinus pennsylvanica* Marsh.) – zur Biologie eines in den Auenwäldern der Mittelbe eingebürgerten Neophyten. Braunschw. Geobot. Arb. 9, 499–529.
- [15] S. Nehring et al. (2013). Naturschutzfachliche Invasivitätsbewertungen für in Deutschland wild lebende gebietsfremde Gefäßpflanzen. BfN-Skripten 352.
- [16] O. Heer (1868). Flora fossilis arctica. Zürich: Schulthess/Wurster
- [17] U. und R. Striegler (2002). Die Miozäne Flora des Blättertons von Wischgrund (bei Lauchhammer, Brandenburg) und ihre landschaftsgärtnerische Rekonstruktion als Niederlausitzer Tertiärwald. Mitt. Dtsch. Dendrol. Ges. 87, 125–145.
- [18] F.-G. Schroeder (1998). Lehrbuch der Pflanzengeographie. Wiesbaden: Quelle & Meyer.
- [19] P. C. Tzedakis, K. D. Bennett (1995). Interglacial vegetation succession: A view from southern Europe. Quaternary Science Reviews 14 (10), 967–982. [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(95\)00042-9](https://doi.org/10.1016/0277-3791(95)00042-9)

Verfasst von:



Jürgen Bouillon, geb. 1969, hat an der Technischen Universität München (TUM) Weihenstephan Landschaftspflege mit Schwerpunkt Landschaftsarchitektur studiert und an der Universität Hannover promoviert. Er lehrt und forscht seit 2007 an der Hochschule Osnabrück in der Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur mit dem Fachgebiet Gehölzverwendung und Vegetationstechnik. Er ist Vizepräsident der Deutschen Dendrologischen Gesellschaft e. V. und dort Fachreferent für Parks, Gärten und städtisches Grün.

Korrespondenz

Prof. Dr. Jürgen Bouillon
Hochschule Osnabrück
Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur
Am Krümpel 31
49525 Osnabrück
Email: j.bouillon@hs-osnabrueck.de



Ihnen gefällt diese Ausgabe der *Biologie in unserer Zeit (BiuZ)*? Sie möchten die *BiuZ* regelmäßig lesen? Dann werden Sie Mitglied im VBIO, dem größten Dachverband für Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland. Unsere Mitglieder erhalten viermal im Jahr die *BiuZ* und darüber hinaus weitere Informationsangebote und Vergünstigungen. Werden Sie noch heute Mitglied im VBIO – wir freuen uns auf Sie!



Die Verhaltensökologie von Geschwisterbeziehungen

Konflikt und Kooperation in der Kernfamilie

FRITZ TRILLMICH



Ein Seebärenweibchen verteidigt ihr Neugeborenes gegen sein einjähriges Geschwister.

Viele Tiere wachsen gemeinsam mit Geschwistern auf und so erwarten wir, dass Geschwister als Umwelt in ihrer Entwicklung eine enorm wichtige Rolle spielen. Da in einer gemeinsamen Umwelt Ressourcen geteilt werden müssen, können trotz naher Verwandtschaft leicht Konflikte auftreten. Daher ist es nicht verwunderlich, dass es in Familien zu Streit kommt – und das nicht nur bei Tieren. Allerdings bietet das erzwungene Zusammensein Geschwistern auch Gelegenheit zur Kooperation. Hamiltons verhaltensökologische Theorie der sozialen Interaktion zwischen Verwandten bietet Erklärungen dafür, was darüber entscheidet, wie sich Geschwister zueinander verhalten.

Schon die Bibel berichtet, dass Kain seinen Bruder Abel erschlug. Märchen und auch die Historie sind voll von heftigen Streitigkeiten zwischen Geschwistern oder zwischen Eltern und Kindern, z. B. um das Erbe. Wieso treten solche Konflikte auf, wenn doch Kinder Fitnesssträger der Eltern sind und (Voll-)Geschwister im Mittel die Hälfte ihres Erbgutes gemeinsam haben (zur Erläuterung der soziobiologischen Grundlagen siehe Kasten „Hamiltons Erkenntnisse über die Bedeutung von Verwandtschaft“)? Sollte man dann nicht hohe Gemeinsamkeit der Fitnessinteressen und somit Kooperation erwarten? Allerdings nutzen Familienmitglieder dieselben Ressourcen, und Konkurrenz um limitierte Ressourcen ist eine wichtige Ursache vieler zwischenartlicher und innerartlicher Konflikte bei Tier und Mensch.

Bedingungen für das Auftreten von Konflikten

Gerade die Versorgung der Nachkommen belastet Eltern zeitlich und energetisch maximal. Überall können wir beobachten, dass Tiere (und Pflanzen) die Fortpflanzung saisonal einpassen, da nur bestimmte Jahreszeiten (für die

meisten Arten Frühling und Sommer) ausreichend Ressourcen bieten, um sich überhaupt in das aufwendige Unternehmen „Fortpflanzung“ stürzen zu können. Um welche Ressourcen geht es hier? Da geht es zum einen um einen sicheren Platz, an dem man Jungtiere aufziehen kann. Er sollte auch in der Nähe von Nahrungsquellen sein, mit denen ein Tier sich selbst und seine Jungen versorgen kann, und es dürfen nicht zu viele Artgenossen oder sonstige Konkurrenten dieselben Nahrungsquellen nutzen. Ist das alles vorhanden, gilt es immer noch, die Arbeit für die Aufzucht der Nachkommen zwischen den Eltern aufzuteilen (Abbildung 1). Bei Säugetieren geht das meist auf Kosten der Weibchen, da nur bei wenigen Arten wie etwa Wölfen und Bibern (und auch dem Menschen) die Männchen sich überhaupt an der Jungenaufzucht beteiligen.

Bei jenen Säugetieren, die immer nur ein Jungtier pro Wurf haben, gibt es noch eine andere Art der Geschwisterkonkurrenz. Zwischen aufeinander folgenden Würfen kann Konkurrenz auftreten, selbst ohne dass sich die Jungtiere begegnen: Da die Mütter hohen Aufwand für die Aufzucht eines Jungtieres oder eines Wurfes treiben, wirkt

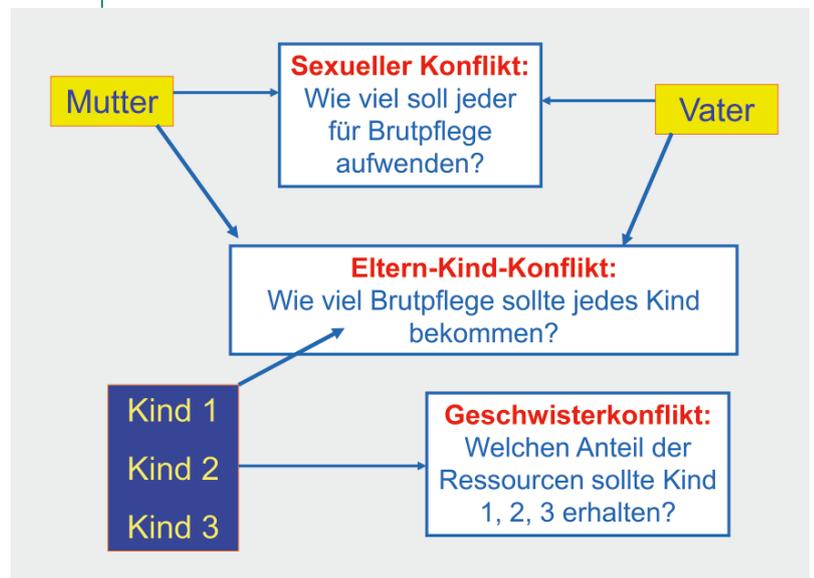
sich unter Umständen die Brutpflege für den einen Wurf oder in einem Jahr auf die Möglichkeit zur Aufzucht eines weiteren Wurfes oder eines Jungtieres im nächsten Jahr aus. So kann es z. B. bei knapper Nahrung dazu kommen, dass es einem Muttertier nicht möglich ist, nach einem Wurf genügend körperliche Reserven für die nächste Fortpflanzung aufzubauen. Dies kann zum Konflikt zwischen Mutter und Jungtier führen, etwa durch eine frühere Entwöhnung des Jungtieres [1]. Ich werde im Folgenden jedoch überwiegend Konflikte und Kooperation innerhalb einer Brut thematisieren.

Selektierende Faktoren, die das Konfliktpotenzial innerhalb einer Brut bestimmen, sind (1) die Anzahl der Nachkommen in einer Brut oder in einem Wurf, (2) die Nahrungsmenge, die Eltern ihren Jungen zur Verfügung stellen können, (3) Unterschiede in der Größe oder dem Alter der Jungtiere und (4) bei einigen Arten auch Merkmale, die als Waffen im Geschwisterkonflikt eingesetzt werden können (scharfe, spitze Schnäbel bei Vögeln oder Zähne bei Säugetieren). Wurf- oder Gelegegeschwister sitzen im selben Nest und müssen mit dem auskommen, was die Eltern an Nahrung anliefern. Das führt zur Konkurrenz, wenn die Eltern nicht beliebig viel Nahrung beschaffen oder sich zurückhalten, um eventuell noch eine zweite Brut im selben Jahr aufziehen zu können oder sich – insbesondere bei langlebigen Arten – für spätere Fortpflanzungszyklen zu schonen. Hier kann man also die Situation als ökologische Konkurrenz um eine begrenzte Ressource beschreiben und die Frage ist, inwieweit solche Konkurrenz durch die Verwandtschaft unter den Beteiligten abgemildert wird. Insofern müssen wir zum Verständnis der Interaktionen in einer Geschwistergruppe beides kennen – die Verwandtschaftsbeziehungen und die Konkurrenzsituation, um die Evolution des Verhaltens der Beteiligten zu verstehen [2].

Beispiele für Geschwisterkonkurrenz

Das Phänomen tödlicher Geschwisterkonkurrenz fiel zunächst an Adlern auf, die oft zwei Eier legen, aber immer nur ein Junges aufziehen. Gargett hat dies am Verreaux's Adler (Black Eagle; *Aquila verreauxii*), einer afrikanischen Art, detailliert untersucht [3]. Bei dieser Art hackt das zuerst geschlüpfte Jungtier mit seinem scharfen Schnabel sofort auf das etwa drei bis vier Tage später schlüpfende Geschwister ein und tötet es meist im Verlauf weniger Tage. Warum legen diese Adler dann nicht von vornherein nur ein Ei, wenn das Jungtier aus dem zweiten doch nicht überlebt? Beobachtungen an vielen Adlerhorsten haben gezeigt, dass es in etwa 20 Prozent der Fälle vorkommt, dass das erste Ei unbefruchtet ist oder der Embryo während der Entwicklung abstirbt. Gäbe es kein zweites Ei, wäre ein Jahr der Fortpflanzungszeit der Elternvögel verloren, da ein Nachgelege bei der langen Bebrütungszeit von Adlern im selben Jahr nicht möglich ist. Ein zweites Ei zu legen stellt also eine effektive Versicherung gegen einen völligen Ausfall der Fortpflanzung innerhalb eines Jahres dar.

ABB. 1 | DIE STRUKTUR VON KONFLIKTEN INNERHALB DER FAMILIE



Eine ähnliche, wenn auch nicht immer tödliche Konkurrenzsituation unter Jungtieren hat Douglas Mock am Silberreiherr (*Casmerodius albus*) und verwandten Reiherarten detailliert untersucht [4]. Hier legen die Eltern meist drei Eier, die im Abstand von wenigen Tagen schlüpfen. Dadurch bekommt das zuerst geschlüpfte Küken einen Vorsprung vor seinen Geschwistern: Es ist bereits gefüttert worden und entsprechend gewachsen, wenn seine Geschwister schlüpfen. Damit ist es größer und stärker und kann sich dem Elternvogel, der mit Futter zum Nest kommt, höher entgegenrecken als seine Geschwister. Das erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass es das Futter aus dem Schnabel des Elters direkt abnehmen kann, ohne dass die

IN KÜRZE

- Trotz enger Verwandtschaft treten (nicht nur) in Tierfamilien **Konflikte unter Geschwistern** häufig auf.
- Hamiltons soziobiologische Theorie der sozialen Interaktionen beschreibt die **genetischen Bedingungen** für das Auftreten von Konflikt und Kooperation.
- Die ökologischen Bedingungen der zwangsläufig **gemeinsamen Nutzung von limitierten Ressourcen**, die die Eltern zur Verfügung stellen können (Nahrung, Wärme etc.), sind selektierende Faktoren, die über die Art der Interaktion zwischen Geschwistern bestimmen.
- Elterntiere produzieren vielfach große Bruten, die sie nur unter besten Bedingungen großziehen könnten, und überlassen es der **Konkurrenz unter den Jungen**, die Jungtieranzahl an die herrschenden ökologischen Bedingungen anzupassen.
- In vielen Fällen verstehen wir heute die **Evolution hin zu genetisch bedingter tödlicher Konkurrenz oder Kooperation** unter den Jungtieren. Aber – wie überall in der Biologie – gibt es auch hier noch immer unverstandene Phänomene.



ABB. 2 Silberreiher-Nestlinge kämpfen miteinander während der Altvogel zuschaut, ohne einzugreifen. Foto: Douglas Mock.

jüngeren Geschwister das Futter im Schnabel des Elternvogels erreichen können. Obendrein kann es die kleineren Geschwister am Betteln hindern, indem es mit seinem spitzen Schnabel auf sie einsticht und sie dazu bringt, den Hals und Kopf einzuziehen, um nicht verletzt zu werden. Das schützt zwar, führt aber dazu, dass die jüngeren Geschwister kaum Gelegenheit haben, vom Elternvogel Futter zu erhalten und oft verhungern oder vor den Angriffen des älteren Geschwisters fliehend über den Nestrand fallen und dann außerhalb verhungern oder Räubern zum Opfer fallen. Mock hatte zunächst erwartet, dass die Elternvögel den Streit unter den Geschwistern verhindern, indem sie die Aggression des älteren Jungtieres unterbinden. Das könnte ein Elternvogel erreichen, indem er das ältere Jungtier ablenkt, das Futter direkt einem Jüngeren anbietet oder sich auf die Jungtiere setzt, um sie warm zu

halten. Zu seiner Überraschung taten die Altvögel aber nichts dergleichen, sondern standen nur wie unbeteiligt am Nestrand und schauten zu (Abbildung 2). Abhängig von der Nahrungssituation überlassen sie es den Jungvögeln, die Brutgröße auf die Verfügbarkeit von Nahrung anzupassen. Bringen die Altvögel sehr viel Nahrung, können die später geschlüpften Junge auch gefüttert werden, wenn ihr älteres Geschwister so satt ist, dass es weniger intensiv auf die kleineren Geschwister einhakt. Trotzdem hat sich herausgestellt, dass die älteren Geschwister auch bei bester künstlicher Nahrungsversorgung durch menschliche Zieheltern immer gegen die Jüngeren aggressiv bleiben.

Eine weitere Studie am Kanadareiherr (*Ardea herodias*) hat gezeigt, dass diese Aggressivität auch vom Nahrungstyp abhängt: Kanadareiherr in Texas füttern ihre Jungen mit großen Fischen, die sie auf den Nestboden auswürgen. Dort kann keines der Jungen die Nahrung direkt übernehmen, sondern sie müssen das Futter stückweise vom Nestboden aufnehmen. Hierbei kann das älteste Jungtier das Futter nicht effektiv monopolisieren und dementsprechend lohnt sich eine aggressive Verteidigung gegen die Geschwister weniger. Mock und Mitarbeiter [5] haben diese Hypothese dadurch getestet, dass sie Jungtiere von Kanadareiherrn durch Silberreiher haben aufziehen lassen und umgekehrt Junge von Silberreiher in Kanadareiherrnester gesetzt haben. In Silberreihernestern, zu denen die Eltern kleine Fische bringen, die sie direkt als Futterklumpen aus dem Schnabel verfüttern, werden auch die Jungen der Kanadareiherr aggressiv. Junge Silberreiher in Kanadareihernestern bleiben allerdings unverändert aggressiv gegen ihre Geschwister [5]. Hier hat sich also eine unbedingte Aggressivität evolviert.

Ohne die Hamiltons Theorie könnten wir ein so extremes Verhalten, wie es beim Wiedehopf auftritt, erst gar nicht verstehen. Hier legt das Weibchen ein Gelege von 4–6 Eiern. Es beginnt, das Gelege schon zu bebrüten, ehe alle Eier gelegt sind, so dass die Jungvögel zeitversetzt schlüpfen. Ist Nahrung während der Zeit der Eiablage sehr reichhaltig vorhanden (oder füttert ein Experimentator künstlich zu), legt das Weibchen mehr Eier. Die Jungen, die aus diesen zusätzlichen Eiern schlüpfen, haben kaum eine Chance groß zu werden. Erstens reicht die Nahrungsverfügbarkeit normalerweise nicht aus, um so viele Jungtiere zu füttern, und zweitens sind diese spät schlüpfenden Jungtiere so viel kleiner und schwächer als ihre früh geschlüpften Geschwister, dass sie häufig direkt von der Mutter an die älteren Geschwister verfüttert oder – wenn gleich selten – auch von der Mutter selbst kurz nach dem Schlupf verschluckt werden (siehe dazu die Videos unter <https://t1p.de/zvyik> und <https://t1p.de/n7kul>). Die spät geschlüpften Jungtiere stellen also entweder eine Versicherung dar für den Fall, dass aus einem der zuerst gelegten Eier kein Jungtier schlüpft, oder sie dienen als Reserve aus der nahrungsreichen Zeit der Eiablage, die dann hilft, die älteren Jungtiere durchzufüttern. Dass der Nutzen

dieses Verhaltens für die Eltern größer ist als die Kosten, zeigt sich daran, dass aus solchen Bruten mehr Junge ausfliegen als aus kleineren Bruten ohne „Reserveeier“ [6].

Eltern manipulieren die Konkurrenz

Forbes hat mit seiner Arbeitsgruppe über viele Jahre das Brutpflegeverhalten des Rotflügelstärlings (*Agelaius phoeniceus*) untersucht [7]. Bei diesem Vogel beteiligt sich das Männchen nicht an der Versorgung der Brut, da es mit der Verteidigung eines Territoriums, auf dem (möglichst mehrere) Weibchen ihr Nest bauen und brüten können, vollauf beschäftigt ist. Auch hier beginnen die Weibchen zu brüten, bevor das Gelege vollständig ist. Das führt dazu, dass einige Junge gleichzeitig schlüpfen (die Forbes als „Kernbrut“ definiert, Abbildung 3), weitere aber erst einen Tag später („marginale Brut“). Forbes konnte zeigen, dass die Jungvögel der Kernbrut meist gut überleben und ausfliegen, während bei Nahrungsmangel die Jungen der marginalen Brut als erstes verhungern. Hier zeigt sich, dass Elterntiere, die die Bedingungen zur Zeit der Jungenaufzucht nicht gut voraussagen können, sich in beide Richtungen absichern: Gibt es mehr Nahrung als im Mittel zu erwarten ist, können sie zusätzliche Junge der marginalen Brut aufziehen. Ist die Nahrung aber knapp, werden diese Jungen schnell in der Konkurrenz mit der Kernbrut zurückfallen und sterben, so dass dann eine verkleinerte Brut erfolgreich aufgezogen werden kann [8].



ABB. 3 Asynchrones Schlüpfen beim Rotflügelstärling. Zwei Jungvögel sind nahezu gleichzeitig am ersten Tag geschlüpft (Kernbrut), die Eier 3 und 4 (zum Zeitpunkt der Eiablage markiert) schlüpfen erst einen Tag später (marginale Brut). Foto: Scott Forbes.

Bei Tüpfelhyänen (*Crocuta crocuta*) in der Serengeti treten in etwa neun Prozent der Zweierwürfe tödliche Geschwisterkonflikte auf. Die Intensität solcher Geschwisterkonflikte (Abbildung 4) hängt davon ab [9], wie gut die



ABB. 4 Hyänenmutter säugt ihre Jungtiere. Das dominante Jungtier liegt antiparallel am Bauch der Mutter, während das subdominante seine Unterwürfigkeit durch leicht geöffnetes Maul und angelegte Ohren zeigt und von hinten zwischen den Beinen der Mutter hindurch versucht, an die Zitze zu gelangen. Foto: Marion L. East und Heribert Hofer.

HAMILTONS ERKENNTNISSE ÜBER DIE BEDEUTUNG VON VERWANDTSCHAFT

In getrenntgeschlechtlichen diploiden Arten, zu denen Vögel, Säugetiere und damit auch wir Menschen gehören, wird bei der Bildung der Keimzellen (Ei- und Spermienzellen) durch die Meiose jeweils nur die Hälfte des Erbgutes (ein zufällig verteilter Chromosomensatz) an die Nachkommen weitergegeben. Damit erben Kinder von Mutter und Vater je die Hälfte ihrer genetischen Ausstattung (wenn man von den Geschlechtschromosomen absieht). Demnach sind Kinder über die Mutter $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$ verwandt (da jedes Kind derselben Mutter die Hälfte seines Erbgutes – aber nicht notwendig dieselbe Hälfte – von der Mutter bekommen hat) und ebenso über den Vater. Geschwister sind damit im Mittel $\frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{1}{2}$ miteinander verwandt. Sie teilen also miteinander genau so viel genetisches Material wie mit Mutter oder Vater. Diese Verwandtschaft wird durch den Verwandtschaftskoeffizienten „r“ charakterisiert.

Da Darwin'sche Fitness über die Weitergabe von genetischem Material bestimmt wird, sollte also für Kinder die Selektion auf das Überleben ihrer Geschwister ($r = \frac{1}{2}$) ebenso stark sein wie die Selektion auf Eltern, für das Überleben ihrer Kinder zu sorgen (mit denen sie ja ebenfalls $r = \frac{1}{2}$ verwandt sind). Da jedes Individuum aber Träger eines je eigenen genetischen Materials ist, also mit sich selbst zu $r = 1$ verwandt ist, wird es seine eigene Fitness doppelt so hoch bewerten wie die eines Geschwisters, Kindes oder eines Elternteils. Damit kann es zu Konflikten kommen, wenn $r \cdot b - c < 0$, also die Kosten (c) einer Aktion gegenüber einem Verwandten gleich oder größer sind als der Nutzen (b) multipliziert mit dem Verwandtschaftskoeffizienten (r). Diese „Hamiltonsche Regel“ [18] hilft uns, altruistisches Verhalten gegenüber Verwandten ($r \cdot b - c \geq 0$), aber auch den Übergang zur Konkurrenz zu verstehen.

Nahrungsversorgung ist. Mütter greifen in die Geschwisterkämpfe ein und versuchen, entweder die Jungtiere zu trennen oder sie beißen eines oder beide Jungtiere sanft. Dabei versorgen Mütter im in der Serengeti gelegenen Naturschutzgebiet Masai Mara unterlegene Jungtiere anscheinend besonders, indem sie diese bevorzugt säugen oder sie wegtragen und getrennt säugen. Selten trennen sie ihre beiden Jungen dauerhaft, indem sie eines in eine andere Höhle bringen. All dies führt aber meist trotzdem zur Vernachlässigung des weggebrachten Jungtieres und schließlich zu seinem Tod [10].



ABB. 5 Ein Weibchen des Galapagos-Seebären säugt das einjährige Jungtier, während das Neugeborene vor ihr sitzt. Foto: Fritz Trillmich.

Die Nutzen-Kosten-Bilanz in dieser Konfliktsituation hängt von der Nahrungsverfügbarkeit ab: Wenn Jungtiere gut wachsen, weil sie reichlich Milch bekommen, gibt es kaum Todesfälle in Zweierwürfen – ein klarer Nutzen für die Mutter. Wohl deshalb sind Geschwisterkonflikte in der Population des Ngorongoro-Kraters zwanzigmal seltener als in der Serengeti [11]. Im Ngorongoro-Krater wachsen Zwillinge gleich gut wie Einzeljungtiere. Das hängt damit zusammen, dass Mütter nah am Bau in ihrem Territorium jagen können, denn die Beutedichte im Ngorongoro-Krater ist etwa 50mal höher als in der Serengeti. Aus diesem Grund kommen Mütter viel öfter zu ihren Jungen zurück als Mütter in der Serengeti, wo sie oft weit laufen müssen, um Beute zu finden, was bedeutet, dass die Kosten für die Aufzucht eines zusätzlichen Jungtieres sehr hoch sind. Dementsprechend gibt es viel mehr aggressive Konflikte zwischen Jungtieren in der Serengeti als im Ngorongoro-Krater, wo es keine Nachweise von Geschwistertötung gibt.

Geschwisterkonflikte können auch zwischen verschiedenen Alterskohorten auftreten. Die Pelzrobben (*Arctocephalus galapagoensis*) der Galapagos-Inseln am Äquator – auch Galapagos-Seebären genannt (Abbildung 5) – leben in einer sehr variablen, nur mäßig produktiven Umwelt. Obendrein bricht diese Produktivität etwa alle 4–7 Jahre stark ein, wenn ein El Niño zur Erwärmung des Meeres und dadurch zu weiter verringerter mariner Produktivität führt. Unter diesen Bedingungen haben Mütter größte Schwierigkeiten, ihre Jungtiere mit ausreichend Milch zu versorgen. Das führt zu stark verringertem Wachstum der Jungtiere. Nun müssen Jungtiere aber eine gewisse Größe erreichen, um zu guten Tauchern zu werden und sich selbst ernähren zu können. Trotzdem kommt es vor, dass ein Weibchen ein weiteres Jungtier gebiert, ehe das vorherige selbständig geworden ist (Abbildung 5). Dann kommt es zu heftiger Konkurrenz zwischen dem älteren und dem neugeborenen Jungen um

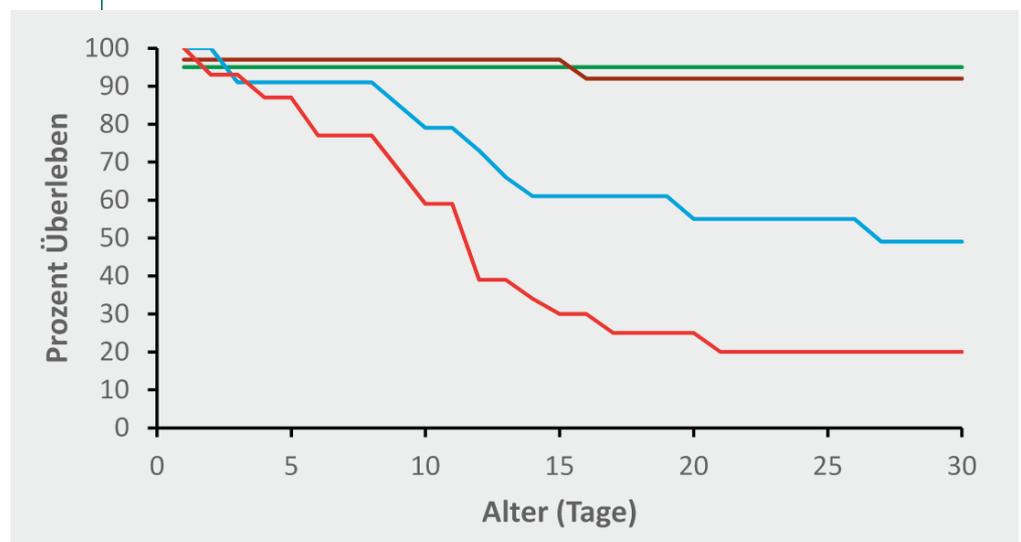
die Milch der Mutter. Da das Neugeborene kleiner, schwächer und weniger mobil ist als das einjährige Jungtier, hat es in der Konkurrenz um Zugang zur Milch der Mutter kaum eine Chance. Häufig verteidigt die Mutter das jüngere Kind gegen sein älteres Geschwister, indem sie das ältere abweist und manchmal sogar direkt beißt. Da das ältere Jungtier aber um die Ressource „Muttermilch“, die es für sein Überleben unbedingt benötigt, ausdauernd kämpft, lässt es sich meist nicht abweisen, sondern versucht immer wieder, an der Mutter zu trinken. Die Verteidigung des Neugeborenen durch die Mutter schiebt dann dessen Tod durch Unterernährung meist nur um wenige Tage oder Wochen auf [12] (Abbildung 6). Hier ist der Nutzen weiterer Versorgung durch die Mutter (sein eigenes Überleben) für das ältere Jungtier viel höher als die Fitnesskosten durch den Verlust des kleinen (Halb-)Geschwisters.

Gemeinsam sind Geschwister stark

Neben Konkurrenz tritt allerdings, wie theoretisch zu erwarten, auch oft Kooperation zwischen Geschwistern auf. Eltern passen ihren Aufwand für eine Brut an den Bedarf der Brut an. Kleine Bruten, die weniger Fitnessertrag bringen, werden dementsprechend weniger intensiv gefüttert. Mehrere Jungtiere sind dann eher in der Lage, die Eltern zu Höchstleistungen der Futterversorgung zu stimulieren. Sehr kleine Bruten werden deshalb manchmal – besonders am Beginn der Brutsaison – von den Eltern sogar aufgegeben, da eine gute Chance besteht, in einer Ersatzbrut mehr Jungtiere aufzuziehen.

Ausreichende Stimulation der Wirtseltern ist auch ein Problem des Kuckucks, der alle Wirtsjungen aus dem Nest wirft und nur aufgrund seines sehr großen Rachens und „übertrieben“ intensiven Bettelns die Pflegeeltern dazu bringen kann, ihn ausreichend zu füttern [13]. Nordamerikanische Kuhstärklinge, die bei über 100 Vogelarten parasitieren, sind toleranter [14]. Zwar werfen auch Kuhstärklinge oft ein Ei aus dem Wirtsnest, wenn sie ihr eigenes einschmuggeln, und auch die geschlüpften Jungvögel werfen regelmäßig einzelne der Wirtsjungen nach dem Schlüpfen aus dem Nest. Dennoch bleiben häufig Wirtsjungvögel am Leben (Abbildung 7) und fliegen gemeinsam mit den Parasiten aus. Hier lohnt sich Kooperation mit Nestgeschwistern, mit denen die jungen Kuhstärklinge ja nicht verwandt sind, weil eine größere Brut die Eltern zu vermehrtem Füttern stimuliert. Die jungen Kuhstärklinge wachsen in Nestern des Weißbauch-Phoebetryanns (*Sayornis phoebe*) am besten, wenn ein oder zwei Wirtsjunge

ABB. 6 | ÜBERLEBEN NEUGEBORENER GALAPAGOS-SEEBÄREN IM ERSTEN LEBENS MONAT



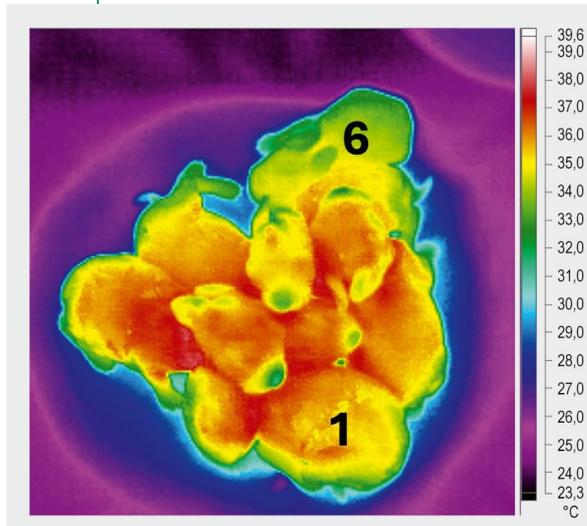
Gezeigt ist das Überleben ohne Geschwister (grüne Linie), mit einjährigem Geschwister in einem Jahr überdurchschnittlich kühler Meerestemperatur (braune Linie), in einem normalen Jahr (hellblaue Linie) und in einem warmen Jahr (rote Linie).

im Nest verbleiben und mit um Futter betteln. Allerdings drängen sich die Kuhstärklinge vor und erhalten so etwa 55 Prozent allen Futters, das die Eltern bringen, wenn sie mit zwei verbliebenen Wirtsjungen im Nest zusammen sind [14]. Begrenzte Kooperation durch gemeinsame Stimulation der Eltern kann also selbst für Stiefgeschwister durchaus entscheidend sein.



ABB. 7 Das parasitische Kuhstärkling-Junge ist bereits geschlüpft, das Wirtsjunge schlüpft gerade. Zwei Jungvögel im Nest stimulieren die Elternvögel zu höheren Fütterleistungen, als wenn der Parasit allein im Nest bettelte. Foto: Scott Forbes.

ABB. 8 | THERMOGRAFISCHE AUFNAHME EINES KANINCHENBAUS



Junge Kaninchen eines Wurfs drängen immer wieder in die Mitte des Jungtierklumpens, um sich warm zu halten. Das verbessert die Verdauung der Milch und maximiert dadurch auch das Wachstum bis zur Entwöhnung. Die Zahlen bezeichnen ein großes, warmes Jungtier (1) und ein kleines, kühles Jungtier an der Peripherie (6).

Abb.: A. Bautista and Y. Fernández.

Ebenso ist für das Überleben und schnelles Wachstum von jungen Kaninchen Kooperation wesentlich. Die Arbeitsgruppen von Hudson und Bautista [15, 16] haben das schön zeigen können. Kaninchenweibchen lassen ihre Jungtiere nach dem Wurf allein in der Höhle, die die Mutter zuvor gut mit ihrer Bauchwolle ausgepolstert hat, und kommen nur einmal am Tag vorbei, um die Jungtiere zu säugen. So müssen sich die Jungen von Geburt an selber warmhalten und schaffen das nur, wenn sie sich dicht beieinander halten und so gegenseitig wärmen (Abbildung 8). Dabei wühlen sich die außen Liegenden immer wieder nach innen und durch diesen Wechsel halten sich alle gegenseitig warm. Wer am längsten innen liegt (meist die Größeren), wächst am besten.

Es gibt aber auch – wie fast immer in der Biologie – unverständene Konfliktfälle. Ein extremes Beispiel bieten die Schopf-Pinguine (*Eudyptes* spp.). Hier legt das Weibchen zwei Eier, von denen das erste Ei deutlich kleiner ist als das zweite. Häufig werfen die Eltern das erstgelegte Ei aber bereits vor dem Schlüpfen aus dem Nest. Wenn das nicht geschieht, vernachlässigen sie das geschlüpfte kleine Junge immer, so dass es schnell umkommt [17]. Warum legen diese Arten ein Ei, das keine Chance bietet, zu einem selbständigen Jungtier zu werden? Möglicherweise sind diese Pinguine in der Evolution hin zu einem Einergelege und wir beobachten diesen Übergang. Eine wissenschaftlich überzeugende Erklärung für dieses Phänomen haben wir bisher jedenfalls nicht.

Eltern folgen also einer optimistischen Fortpflanzungsstrategie: Sie produzieren Gelege oder Würfe, die sie nur unter besten Nahrungsbedingungen aufziehen können. Sie überlassen es dann weitgehend den Jungtieren, die Brutgröße an die vorherrschenden ökologischen Bedingungen anzupassen. Das ist eine selektiv vorteilhafte Strategie, weil Eltern auf diese Weise mit geringem Aufwand zu einer Brutgröße kommen, die sie unter den gegebenen ökologischen Umständen erfolgreich aufziehen können. Der Streit zwischen den Geschwistern ist damit eine evolutive Anpassung an die Unvorhersagbarkeit der Nahrungssituation zum Zeitpunkt des höchsten Nahrungsbedarfs und wird durch die enge Verwandtschaft unter den Beteiligten nur geringfügig abgemildert. Andererseits ist Kooperation mit den Geschwistern z. B. durch gemeinsame Thermoregulation oder die Stimulation der Eltern zu Versorgungshöchstleistungen vorteilhaft und ermöglicht schnelles Wachstum bis zur Selbständigkeit sowie einen guten Start in das Leben unabhängig von den Eltern. Nur eine detaillierte Analyse der ökologischen Vor- und Nachteile der Brutgröße und der Interaktionen zwischen Nestgeschwistern führt im Zusammenhang mit der Dokumentation der unvorhersagbaren Variabilität im Nahrungsangebot der Umwelt zu einem Verständnis der selektiven Kräfte, die die Interaktionen in der Familie bestimmen.

Zusammenfassung

Überall finden wir in Familien Konkurrenz und Kooperation zwischen Geschwistern. Ökologische Faktoren (z. B. Nahrungsverfügbarkeit) selektieren darauf, ob Konkurrenz oder Kooperation überwiegen. Hamiltons Theorie zeigt, dass die Balance zwischen Kooperation und Konflikt von der genetischen Verwandtschaft innerhalb einer Brut mitbestimmt wird. Eltern produzieren oft „optimistische“ Brutgrößen, als ob reichlich Nahrung verfügbar wäre, und überlassen es der Konkurrenz innerhalb der Brut, die Jungtieranzahl an die herrschenden ökologischen Bedingungen anzupassen. An Beispielen von verschiedenen Vogel- und Säugetierarten wird deutlich, wie Geschwister um limitierte Ressourcen konkurrieren, die die Eltern bieten können (wie Nahrung oder Wärme). Das kann einerseits zu tödlichen Konflikten führen, andererseits können Jungtiere oft nur gemeinsam die Eltern zu Höchstleistungen in der Brutversorgung stimulieren. Deshalb lassen – anders als unser europäischer Kuckuck – manche parasitischen Vogelarten einige Wirtsjunge am Leben. Kooperation zwischen Geschwistern findet sich auch, wenn es darum geht, sich gegenseitig warmzuhalten, was für kleine Jungtiere überlebenswichtig ist. Um die Balance zwischen Kooperation und Konflikt oder das Vorherrschen einer dieser Interaktionsarten zu verstehen, muss man die ökologischen Gegebenheiten, die genetische Verwandtschaft innerhalb der Brut und die Fitnesskonsequenzen für alle Familienmitglieder verstehen.

Summary

Behavioural ecology and relationships between siblings

Competition and cooperation are ubiquitous among siblings in families. Ecological factors (e.g. the availability of food) drive selection and determine whether either competition or cooperation will prevail. The sociobiological theory shows that the balance between cooperation and competition is influenced by the genetic relatedness within a brood. Parents often produce “optimistic” brood sizes, as if plenty of food were available, and they leave it to competition within the brood to adapt the number of offspring to the prevailing ecological conditions. Examples from a variety of bird and mammal species demonstrate how siblings compete for limited resources which parents can offer them (like food or warmth). On the one hand, this can lead to deadly conflicts, on the other hand, young animals are only able to make their parents feed them sufficiently, if they do it together. Therefore – with the exception of the cuckoo – some parasitic bird species let a few host chicks live. Cooperation between siblings can be found, when it comes to keeping each other warm, which is vital for the survival of small young animals. In order to comprehend the balance between cooperation and conflict or the prevalence of one of these kinds of interactions, one has to understand the ecological conditions, the genetic relatedness within the brood, and the fitness consequences for all the family members.

Schlagworte

Verhaltensökologie, Soziobiologie, Konflikt, Kooperation, Eltern-Kind-Konflikt, Geschwister, Ressourcenkonkurrenz

Danksagung

Ich bedanke mich bei Barbara König für hilfreiche Hinweise zur klareren Darstellung. Many thanks to all the colleagues who generously provided pictures to illustrate the examples.

Literatur

- [1] R. L. Trivers (1974). Parent-offspring conflict. *Amer Zool* 14, 249–264.
- [2] D. W. Mock, G. A. Parker (1997). *The Evolution of Sibling Rivalry*. Oxford Univ Press. Oxford, UK.
- [3] V. Gargett (1990). *The black eagle*. Acorn Books, South Africa.
- [4] D. W. Mock (2004). *More than kin and less than kind*. The Belknap Press of Harvard Univ Press. Cambridge Mass., USA.
- [5] D. W. Mock et al. (1987). Flexibility in the development of heron sibling aggression: an intra-specific test of the prey-size hypothesis. *Anim Behav* 35, 1386–1393.
- [6] J. J. Soler et al. (2022). Avian sibling cannibalism: Hoopoe mothers regularly use their last hatched nestlings to feed older siblings. *Zool Res* 43, 265–274.
- [7] S. Forbes (2010). Family structure and variation in reproductive success in blackbirds. *Behav Ecol Sociobiol* 64, 475–483.
- [8] S. Forbes et al. (1997). Why parents play favourites. *Nature* 390, 351–352.
- [9] H. Hofer et al (2008). Siblicide in Serengeti spotted hyenas: a long-term study of maternal input and cub survival. *Behav Ecol Sociobiol* 62, 341–351.
- [10] P. P. White (2008). Maternal response to neonatal sibling conflict in the spotted hyena, *Crocuta crocuta*. *Behav Ecol Sociobiol* 62, 353–361. DOI. 10.1007/s00265-007-0422-2
- [11] B. Wachter et al. (2002). Low aggression levels and unbiased sex ratios in a prey rich environment: no evidence of siblicide in Ngorongoro spotted hyenas (*Crocuta crocuta*). *Behav Ecol Sociobiol* 52,348–356.
- [12] F. Trillmich, J. B. W. Wolf (2008). Parent-offspring and sibling conflict in Galápagos fur seals and sea lions. *Behav Ecol Sociobiol* 62, 363–375.
- [13] N. B. Davies (1989). *Cuckoo. Cheating by nature*. Bloomsbury.
- [14] R. M. Kilner et al. (2004). Brood parasitic cowbird nestlings use host young to procure resources. *Science* 305, 877–879.
- [15] V. Reyes-Meza et al. (2011). Possible contribution of position in the litter huddle to long-term differences in behavioural style in the domestic rabbit. *Physiol Behav* 104, 778–785.
- [16] J. A. Zepeda et al. (2019). Sibling differences in litter huddle position contribute to overall variation in weaning mass in a small mammal. *Behav Ecol Sociobiol* 73, 165.
- [17] C. C. St. Clair (1996). Multiple mechanisms of reversed hatching asynchrony in rockhopper penguins. *J Anim Ecol* 65, 485–494.
- [18] W. D. Hamilton (1964). The genetical evolution of social behavior. *I. J. Theor. Biol.* 7, 1–16.

Verfasst von:



Fritz Trillmich, 1966–1972 *Biologiestudium an der Universität Freiburg*, 1973–1976 *Promotionsarbeit am Max-Planck-Institut für Verhaltensphysiologie, Abt. Wickler, Seewiesen*. 1976 *Promotion an der Ludwig-Maximilians-Universität München* 1976. 1976–1978 *Max-Planck-Postdoc in Galapagos*, danach bis 1990 *wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Verhaltensphysiologie, Abt. Wickler*. 1982/83 *Gastwissenschaftler an der Scripps Institution San Diego, California*. Ab 1990 bis 2013 *Professor für Verhaltensforschung an der Universität Bielefeld*. Seit 2013 *im Ruhestand*.

Korrespondenz:

Prof. Dr. Fritz Trillmich
Verhaltensforschung
Universität Bielefeld
Konsequenz 45
33615 Bielefeld
E-Mail: fritz.trillmich@uni-bielefeld.de

Die Zukunft der Algenbiotechnologie - Chancen und Limitationen

Grüne Bioökonomie: Alleskönner Algen?

CHRISTIAN WILHELM

Reaktor im Labormaßstab. Die Algen wachsen in einem zweidimensionalen Biofilm, um möglichst gut belichtet werden zu können.



Die fruchtbaren Böden werden immer knapper, die Flächenkonkurrenz zwischen Teller und Tank ist groß. Können Mikroalgen durch ihre höhere Flächenproduktivität dieses Dilemma lösen? Liefern sie in Zukunft die Grundlage für Futterproteine, Kraftstoffe und Rohölersatz für die Chemie? Wie weit ist die Forschung und welche Perspektiven lassen sich erkennen? Ein Blick in die Biologie der Algen hilft.

Die Bioökonomie versteht sich als Teil einer umfassenden Antwort auf die globale Herausforderung auf einem von der Klimakatastrophe bedrohten Planeten, nachhaltig 8–10 Milliarden Menschen zu ernähren, gegen global verbreitete lebensbedrohende Krankheiten zu schützen und mit ausreichend Wasser und industriellen

Rohstoffen zu versorgen. Die Biotechnologie soll dafür die notwendigen Innovationen und Produkte liefern, die die Rohstoffe möglichst in einer Kreislaufwirtschaft führen, so dass die natürlichen Lebensräume nicht durch Abfälle und Umweltgifte geschädigt werden. Ein weiteres Ziel ist die Intensivierung der Prozesse, um möglichst wenig natürliche Ressourcen (Flächen, Wasser etc.) in Anspruch zu nehmen, damit ein optimaler Biodiversitätsschutz durch Erhalt der natürlichen Wildnis sichergestellt werden kann. Die in den letzten Jahren so erfolgreiche mikrobielle und industrielle Biotechnologie greift dabei immer auf biologisch mittels Photosynthese erzeugter Biomasse zurück. Daher steht in der grünen Bioökonomie die Optimierung des Pflanzen- und Waldbaus im Zentrum der Forschung, um möglichst effizient Biomasse zu erzeugen – auch unter den zukünftigen Bedingungen des Klimawandels mit Wetterextremen wie Überschwemmungen, Dürren und Hitzewellen. Neben der Optimierung der Kulturpflanzen werden auch in anderen autotrophen Produktionssystemen (Zellkulturen, Mikro- und Makroalgen), die sich mittels neuer genetischer Methoden (z. B. CRISPR/Cas) modifizieren lassen, große Zukunftschancen gesehen [1].

Potenzial von Mikroalgen

Daher ist es an der Zeit, am Beispiel der Mikroalgen eine wissenschaftliche Zwischenbilanz zu ziehen, wo die wissenschaftlichen Hürden für eine praktische Leistungssteigerung liegen und wie in Zukunft die Algenbiotechnologie als wertschöpfende Bioökonomie zu entwickeln ist. Die soliden Daten aus der Photosyntheseforschung der Mikroalgen bilden die Grundlage, um die realistischen Perspektiven der Bioökonomie als Ganzes zu betrachten. Ziel der Forschung ist dabei, das biologische „Potenzial“ in den neuen Zelllinien und Pflanzensorten möglichst vollständig zu nutzen [2]. Wie groß dieses Potenzial sein kann, wird durch den theoretisch möglichen und praktisch bisher erzielten Flächenertrag definiert. Besonders der Vergleich zwischen Ackerpflanzen und Algen wird oft herangezogen, um zu zeigen, dass Algen die besseren Energiepflanzen sein können. So wird der theoretische Ertrag von Mikroalgen pro Hektar (ha) und Jahr z. B. so berechnet, dass die Zahl der Photonen, die pro Jahr auf ein Hektar Fläche fällt

durch 10 geteilt wird, weil 10 Photonen ausreichen, um ein CO₂-Molekül zu assimilieren. Da trockene Algenbiomasse zu 50 Prozent aus Kohlenstoff besteht, ergibt sich, dass ca. 1430 Tonnen Biomasse pro Hektar und Jahr entstehen können (siehe Kasten „Berechnungsgrundlage für maximale Flächenerträge mittels Mikroalgen“).

Nicht ganz so hohe Flächenerträge von Mikroalgen werden z. B. von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe genannt. Diese wurden ermittelt, indem die von der Sonne eingestrahlte Energie pro m² (1200 kWh/m² Jahr oder 4320 MJ/m² Jahr) mit der optimalen Photonenkonversionseffizienz von 5 Prozent multipliziert und dann durch den Energiegehalt des Trockengewichts der Algenbiomasse dividiert wurde. So ergeben sich dann Flächenerträge von 100 Tonnen pro Hektar und Jahr in Deutschland [3]. Im Bereich der Produktion von Pflanzenölen als alternative Kraftstoffe publizierten Tandon et al. [4], dass mit Mikroalgen bis zu 300-mal mehr Öl pro Fläche produziert werden kann als mit Ölpflanzen. Im Vergleich dazu liegen die statistisch belegten Flächenerträge von Mais oder Weizen in der Praxis bei 8 Tonnen pro Hektar und Jahr, so dass geschlossen wird, dass Mikroalgen bis zu 150–200-mal mehr Biomasse pro Fläche produzieren als höhere Pflanzen [3]. Allerdings produzieren die wenigen industriell betriebenen Algenproduktionsanlagen zwischen 20–30 Tonnen pro Hektar und Jahr unter autotrophen Bedingungen und steigern ihre Produktivität durch die Zugabe von Zucker, der aus pflanzlicher Produktion stammt. Damit das theoretische Potenzial in Zukunft industriell erreicht werden kann, wird auf die Forschung gesetzt, die mittels neuer Gentechnik (CRISPR/Cas) und/oder Suche nach neuen leistungsfähigeren Algenarten oder genetischen Varianten so hohe Flächenerträge erzielt, dass die Bioökonomie einen substantiellen Teil des Rohöls ersetzen kann.

Potenziale zwischen Realität und Zahlenträumen

Zunächst ist kritisch festzustellen, dass die oben genannten Potenzialberechnungen von unrealistischen Voraussetzungen ausgehen. So ist z. B. nur ca. die Hälfte des einfallenden Lichts photosynthetisch nutzbar, so dass man den Spitzenwert durch zwei teilen muss, um nicht die Gesetze der Physik zu verletzen. Wenn die einfallenden Photonen einen photosynthetischen Wirkungsgrad von 5 Prozent haben sollen, muss man annehmen, dass während des ganzen Jahres genug grüne Zellen pro Fläche vorhanden sind, um das ganze Licht auch absorbieren zu können. Dafür müsste 365 Tage im Jahr aktive grüne Biomasse vorhanden sein. Da in unseren Breiten photosynthetisch aktive Zellen nur während der Vegetationsperiode vorhanden sind (etwa von März bis September), kann nur in dieser Zeit Licht überhaupt genutzt werden. Die restlichen 25 Prozent gehen unvermeidbar verloren. Während der Wachstumszeit geht die Wirksamkeit des Lichts zurück, sobald ungünstige Umweltbedingungen auftreten.

BERECHNUNGSGRUNDLAGE FÜR MAXIMALE FLÄCHENERTRÄGE MITTELS MIKROALGEN

Energieeinfall pro m ² /yr:	1000 kWh (250–2250 nm)
davon photosynthetisch aktiv:	490 kWh
1 kWh entspricht:	3,6 · 10 ⁶ Joule
durchschnittlicher Energiegehalt eines Photons im vollen Sonnenlicht:	ca. 1 eV
minimaler Photonenbedarf pro C:	10 Photonen
C-Gehalt pro Trockenbiomasse:	50%
Energieeinfall pro m ² :	490 · 3,6 · 10 ⁶ Joule = 1,76 · 10 ⁹ Joule
Das entspricht:	1,76 · 10 ⁹ / 1 · 10 ⁻¹⁹ eV = 1,76 · 10 ²⁸ eV

Das entspricht theoretisch 1,76 · 10²⁸ Photonen/m² yr (mit einem durchschnittlichen Energiegehalt aller Photonen). 1 Mol sind 6,02 · 10²³ Photonen und damit fallen 0,29 · 10⁵ mol Photonen auf einen m² im Jahr. Nimmt man jetzt 10 Photonen pro C an, können pro m²/yr 0,29 · 10⁴ C-Atome assimiliert werden. Rechnet man diesen Kohlenstoff in Gramm um, erhält man ca. 34,8 kg C. Da die Biomasse nur 50% Gewichtsprozent C enthält, sind das 69,6 kg Biomasse/m² yr. Da bei uns die Erträge auf ha bezogen werden, kommt man auf einen maximalen Ertrag pro ha von 696 Tonnen Biomasse.

Das sind bei Algenkulturen insbesondere: suboptimale Temperaturen (zu kalt im Frühjahr, zu heiß im Sommer), zu hohe Lichtintensitäten, Mangel an Nährstoffen wie CO₂ oder Stickstoff, suboptimaler pH-Wert und Infektionen. In all diesen Fällen nimmt die photosynthetische Quantenausbeute ab und vermindert die Produktivität. Im Freiland ist daher Stressanpassung unvermeidbar, notwendig und metabolisch kostspielig. Bei vollem Sonnenlicht nimmt daher ▶ Photoprotektion eine produktionsbestimmende Rolle ein [5]. Wie in Abbildung 1 dargestellt, nimmt die photosynthetische Nutzung des Lichts mit der Intensität ab und erreicht schon bei relativ geringen Lichtstärken die Sättigung.

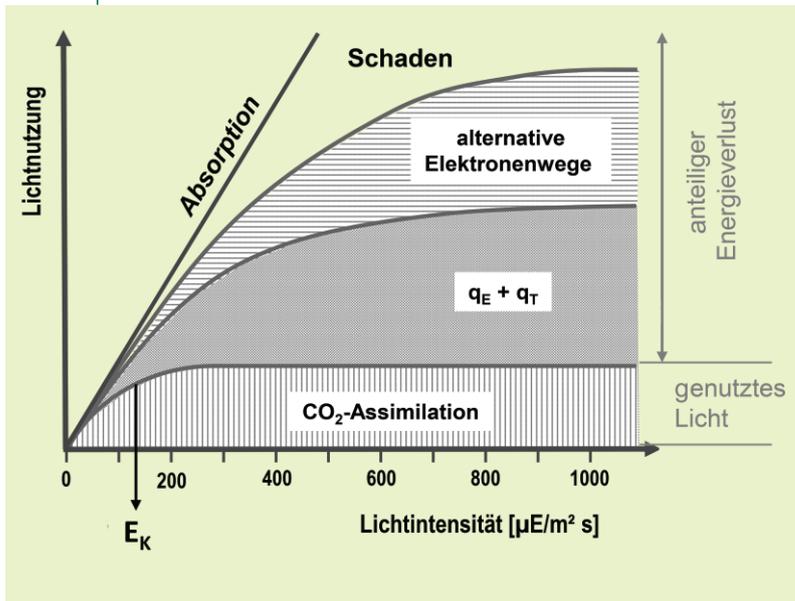
Die hohe photosynthetische Effizienz erzielt die Pflanze nur im Bereich der Lichtlimitierung. Bei Mikroalgen geht schon ab einer Lichtintensität von ca. 100–150 μ · mol · Pho-

IN KÜRZE

- Für die **bioökonomische Bewertung von auf Mikroalgen-basierenden Produkten** sind Energiebilanzen vom Photon bis in das Produkt ein unverzichtbares Instrument.
- Diese Bilanzen zeigen, dass Algen zwar theoretisch eine vielfach höhere Flächenproduktivität aufweisen, dass aber die **hohen energetischen Kosten** bei der Herstellung, Ernte und beim Abfallrecycling diese Vorteile in großen Teilen wieder aufheben.
- Übersehen werden auch die **hohen metabolischen Kosten** bei protein- und ölreichen Algen. Ihre Biomasse ist daher zu wertvoll, um daraus so wertarme Produkte wie Methan zu gewinnen.
- Aussichtsreich ist die Algenbiotechnologie, wenn sie in ein **ökologisches Gesamtkonzept** eingebunden ist, wo sie mit ihrem Beitrag hilft, die regionale Kreislaufwirtschaft zu optimieren.

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 66 erklärt.

ABB. 1 | LICHTNUTZUNG IN ABHÄNGIGKEIT VON DER LICHTINTENSITÄT



Gezeigt ist die Verteilung der absorbierten Energie auf Prozesse der Nutzung und der Dissipation bei unterschiedlicher Lichtexposition. q_E = Löschung der Fluoreszenz durch Wärmedissipation, q_T = Löschung der Fluoreszenz durch Energieweiterleitung an Photosystem I.

tonen/m²·sec die Quantenausbeute zurück. Bei vollem Sonnenlicht würden ohne Optimierungsstrategie der Zellen bis zu 90 Prozent der absorbierten Lichtenergie entweder über ► Wärmedissipation (nicht-photochemisches Quenching) oder über sogenannte alternative Elektronenwege verloren gehen. Dabei werden aus dem Wasser freigesetzte Elektronen nicht für die Reduktion von CO₂ eingesetzt, sondern gehen über alternative Verlustwege wie die ► Photorespiration oder die ► Mehlerreaktion verloren [6]. Diese Verlustwege sind aber physiologisch betrachtet ein Schutz. Nicht nur die Bildung von phototoxischen Sauerstoffradikalen wird verhindert, sondern auch notwendige metabolische Anpassungsreaktionen werden eingeleitet, die die Zelle unter den ungünstigen Umweltbedingungen überleben lassen. Dazu gehören z. B. Pigmentänderungen, die die Absorption des Lichts vermindern oder über die Dynamik von Lichtschutzpigmenten (► Xanthophyllzyklus) einen verbesserten Lichtschutz aufbauen. Bei höheren Pflanzen ist die Liste der durch Lichtstress induzierten Optimierungsprozesse der Umweltresi-

TAB 1. LICHTINTENSITÄTSVERTEILUNG DER SOLAREN STRAHLUNG AM 50. BREITENGRAD (NACH [7])

Gesamt PAR* im Jahr	5.493 W/m ²
PAR über 100 µE/m ² sec	4.587 W/m ²
Dauer der Intensität über 100 µE/m ² sec	3200 h
Dauer der Intensität unter 100 µE/m ² sec	1046 h
Dauer Dunkelzeit (Respiration)	4514 h

*PAR = engl. photosynthetically active radiation

lienz lang: Optimierung der Blattstellung, der Wasserverdunstung, Aufbau eines UV-Schutzes, zellinterner Oxidationsschutz und damit höhere Resistenz gegenüber Schädlingsattacken. Resilienz und Schutz verursachen metabolische Kosten, die durch eine verminderte Biomassebildung „bezahlt“ wird. Wie wichtig diese verlustreiche Lichtanpassung ist, erkennt man an der Lichtverteilung am realen Standort (Tabelle 1).

Man erkennt, dass der größte Teil des Lichts unter Bedingungen einfällt, bei der die Photosyntheseeffizienz gehemmt ist, und bei denen Zellen den Großteil der Zeit keine Photosynthese betreiben, sondern respirieren. Etwa 10–15 Prozent der Biomasse gehen durch die Atmung wieder verloren; unter Stress (Hitze, Nährstoffmangel) können die Atmungsverluste deutlich höher sein und bis zu 60 Prozent des Kohlenstoffumsatzes ausmachen [8]. Angesichts dieser zeitlichen Verteilung der einfallenden Lichtmenge ist es für die Pflanzen oder Algenkulturen sinnvoll, das Licht zu „verdünnen“, also auf eine größere Blattfläche oder auf mehr Zellen zu verteilen, was sich im sogenannten Blattflächenindex ausdrücken lässt. Die Fläche der Gesamtheit der Blätter ist zwischen 4–10-mal größer als die Projektionsfläche der Pflanze.

Bei Algen löst man das Problem, indem man die Algenreaktoren senkrecht stellt und die Biomassekonzentration so hoch wählt, dass bei einer entsprechenden Durchmischung der Suspension mittels Luft oder – in dünnen Algenschichten – durch eine laminare Strömung, die Zellen auch bei vollem Sonnenlicht nur so viel Licht absorbieren, dass sie nicht photoinhibiert werden [9]. Diese Strategie hat aber den Nachteil, dass bei schwachem Licht sehr schnell die Photosyntheseleistung nicht mehr ausreicht, um die Respirationsverluste zu kompensieren, so dass die Verluste zunehmen. In der Konsequenz führt dies dazu, dass während der Vegetationsperiode lange Zeiträume geringer Produktivität physiologisch unvermeidbar sind. Daher sind die theoretischen Potenziale aufgrund der suboptimalen Nutzung des realen Sonnenlichts nicht voll umfänglich erreichbar, können aber durch Gentechnik erweitert werden (siehe unten).

Energiebilanzen – metabolische Kosten

Unter angewandten Aspekten ist entscheidend, wie sich diese physiologischen Verluste quantitativ darstellen. Wagner et al. [10] haben diese Energiebilanz bei einer Diatomee (Kieselalge) und einer Grünalge erstellt und konnten zeigen, dass bei optimalen Lichtbedingungen ca. 12 Photonen pro Sauerstoffmolekül benötigt werden, was relativ nahe am theoretischen Optimum von 10 liegt. Setzt man die Zellen aber einem fluktuierenden oder ► sinuidalen Licht mit photoinhibierenden Lichtintensitäten aus, steigt der Photonenbedarf auf 20 an. Besonders interessant ist aber, dass sich dabei das Verhältnis von Elektronen, die in der Lichtreaktion gebildet werden und den Elektronen, die man in der Biomasse findet, drastisch ändert. Im fluktuierenden Licht werden noch 40 Prozent

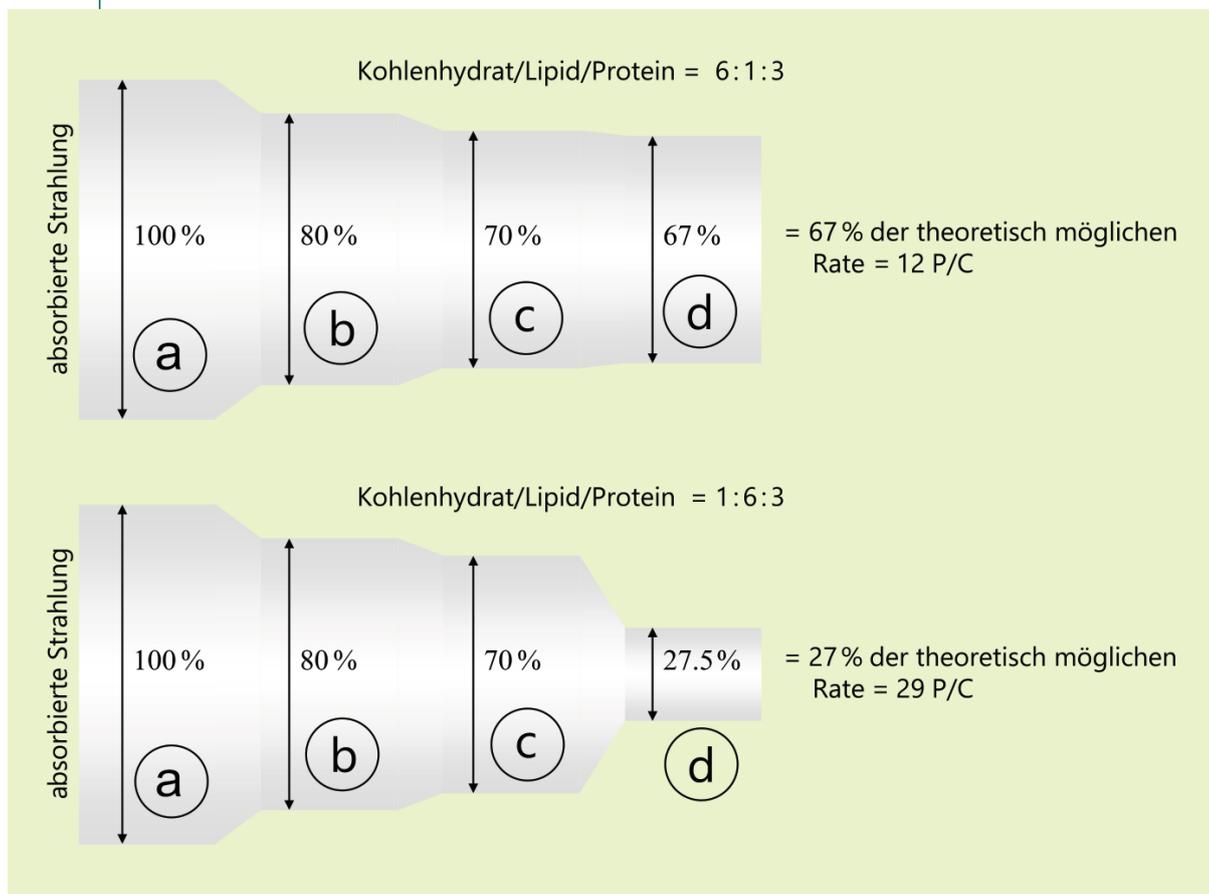
der photosynthetischen Elektronen in der geernteten Biomasse gefunden; im Sinuslicht mit einer langen Phase von Lichtüberschuss sind es nur noch 15 Prozent. Das zeigt, dass auf dem Weg vom Photon in die Biomasse unterschiedliche Regulationsprozesse auf der Ebene der Lichtreaktionen und der Biosynthese der biomassebildenden Makromoleküle stattfinden. So können die photosynthetisch gebildeten Zuckermoleküle zu Proteinen umgewandelt werden, was mit einem Zusatzbedarf von Elektronen einhergeht, da der Stickstoff aus Nitrat erst zu Ammonium reduziert werden muss und Aminosäuren im Durchschnitt stärker reduziert sind als Zuckermoleküle. Grob geschätzt sind für die Assimilation eines C-Atoms in einem Protein etwa 6–8 Elektronen erforderlich – also fast doppelt so viel wie bei der Assimilation eines C-Atoms in Stärke.

Da bei Algen Proteine selten als Speicherbausteine genutzt werden, ist ein hoher Proteingehalt der Zellen ein wichtiger Indikator für Zellen, die in Wachstum und nicht in Speicher investieren. Auch bei der Synthese von Lipiden ist der Bedarf an zusätzlichen Elektronen erhöht und

liegt bei durchschnittlich 6 Elektronen pro C-Atom. Da hohe Lipidgehalte und hohe Kohlenhydratgehalte (Stärke) auf Zellen hinweisen, die ihre Energie nicht in Wachstum, sondern in Speicherung lenken, kann die makromolekulare Zusammensetzung der Zellen einerseits einen Hinweis auf die Elektronennutzung und gleichzeitig auf den Reduktionsgrad der Biomasse geben. Je reduzierter die Biomasse ist, umso mehr Elektronen braucht man, um ein zusätzliches C-Atom in die Biomasse einzubauen. Neben dem Elektronenbedarf ist auch der metabolische Energiebedarf (ATP-Bedarf pro C-Atom in der Biomasse) unterschiedlich. Da bei Proteinen der Kohlenstoff über *de novo* synthetisierte Aminosäuren eingebunden wird, müssen hier neue Peptidbindungen geknüpft werden, was mit einem zusätzlichen ATP-Bedarf verbunden ist.

Mit Hilfe der ► FTIR-Spektroskopie (Fourier-Transform-Infrarotspektrometrie) lässt sich auch von sehr kleinen Substanzmengen die makromolekulare Zusammensetzung der Zellen messen [11]. Somit erhält man eine Art „Fingerprint“ für das physiologische Wachstumspotenzial der Zellen und gleichzeitig für die metabolischen Kosten

ABB. 2 | METABOLISCHE KOSTEN DER GEBILDETEN BIOMASSE



Gezeigt ist die Änderung des Elektronenbedarfs pro assimiliertem C-Atom bei unterschiedlicher Biomassezusammensetzung. Die Alge *Chlamydomonas* wurde dazu bei einer fast sättigenden Lichtintensität kultiviert, bei der noch keine Verluste durch Photoinhibition auftreten (Lichtsättigungspunkt I_k). Die unterschiedliche Biomassezusammensetzung wurde durch unterschiedliche Stickstoffversorgung erreicht. P/C = Photonen pro C-Atom.

der neu gebildeten Biomasse. In Abbildung 2 ist an zwei Beispielen gezeigt, wie ausgehend von den absorbierten Photonen (a) im Verlauf des Elektronentransports von Photosystem II (PSII, b), über die Dunkelreaktionen (c) bis zur Zellbiomasse (d) Elektronenverluste im Vergleich zum theoretischen Optimum auftreten. So liegt der Elektronenbedarf für ein C-Atom in der Biomasse bei 12, wenn kohlenhydratreiche Zellen unter optimalen Wachstumsbedingungen gebildet werden. Akkumulieren die Zellen aber Lipide, z. B. unter N-Mangel, steigt der Elektronenbedarf auf mehr als das Doppelte an (27 P/C).

Schnell wachsende Zellen haben einen geringen Anteil an Speicherstoffen wie Kohlenhydraten und Lipiden, aber einen hohen Anteil an Proteinen, da diese die Katalysatoren für das Wachstum sind. Damit entsteht für die Wertstoffproduktion mittels Algen ein Dilemma: Entweder die Algen wachsen schnell oder sie enthalten hohe Mengen an Speicherstoffen. Jebsen et al. [12] haben sogar zeigen können, dass die makromolekulare Zusammensetzung der Zellen ein zuverlässiger Indikator für das aktuelle Zellwachstum ist. Nimmt man alle diese physiologischen Regelungsmechanismen zusammen, so ergeben sich deutlich geringere Quantenausbeuten vom Photon bis in die Biomasse, wenn der eigentliche Wertstoff (z. B. in Biofuels) in den Speicherstoffen liegt. Das ist der Grund, warum in der experimentellen Praxis unter freilandnahen Bedingungen über die Produktionszeiträume gemittelt 50–100 Photonen pro Molekül Kohlenstoff benötigt werden, wenn man z. B. mittels Algen Öl produzieren will.

Bioengineering zur Verbesserung der Produktivität von Pflanzen und Algen

Das verbesserte Verständnis für die physiologischen Prozesse, die die Produktionseffizienz vermindern, hat zu einer Reihe von neuen Ideen geführt, wie man die photosynthetische Biomassebildung verbessern kann. Die Frage ist, in welchem Umfang die Verbesserungen sich dem theoretischen Ideal nähern können. Dies soll an zwei Beispielen gezeigt werden. Wie oben beschrieben, schalten Pflanzen bei Starklicht einen Lichtschutz ein, der die Quantenausbeute reduziert und die Energie des absorbierten Lichts als Wärmeverlust dissipiert. Diese verminderte Lichteffizienz dauert aber noch an, wenn der Lichtstress vorbei ist. Man kann daher die Produktion steigern, indem die Pflanze den Lichtschutz schneller abschaltet. So konnten verschiedene Autoren bei Tabak oder Sojapflanzen zeigen, dass transgene Pflanzen mit einer schnelleren Reaktivierung der Photosyntheseeffizienz bis zu 30 Prozent mehr Biomasse bzw. Erntegut produzieren [13, 14].

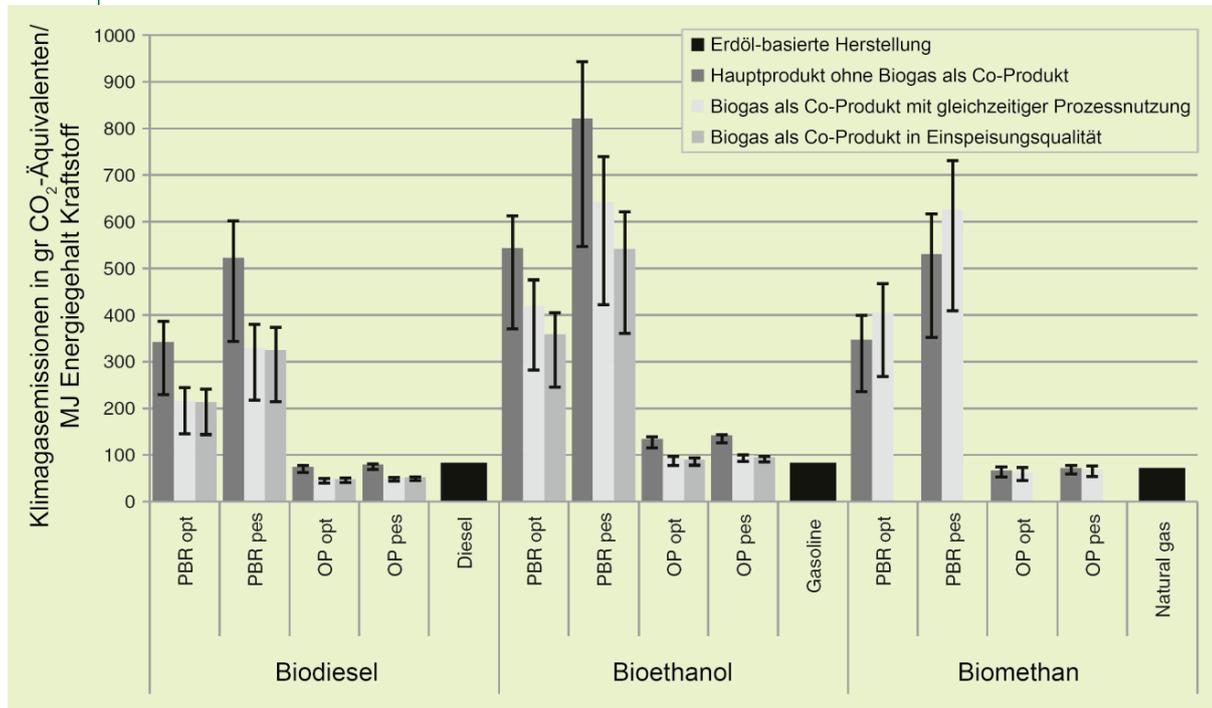
Bei Algen gelang es mit Hilfe von folgender Überlegung, die Biomasseproduktion zu steigern: Durch die hohe Absorption der photosynthetischen Pigmente in den Algenzellen kommt es zu einer starken Selbstbeschattung, so dass die Konzentration der Biomasse im Reaktor und damit die Volumenaktivität sehr eingeschränkt ist. Vermin-

dert man die Eigenbeschattung der Zellen durch eine Reduktion des Chlorophyllgehalts in den Zellen, kann man die Volumenaktivität und damit die Volumenproduktivität erhöhen. So konnten Beckmann et al. [15] durch eine Verkleinerung der Lichtsammelantennen eine Produktionssteigerung von 30 Prozent im Dauerlicht erreichen. Da sich dadurch allerdings auch die Volumenaktivität der Respiration erhöht, geht im natürlichen Licht mit Tag-Nacht-Rhythmen der Gewinn weitgehend verloren [16]. Zudem berichten de Mooij et al. [17], dass die Zellen mit verkleinerten Lichtantennen auch empfindlicher gegenüber der Lichthemmung werden, da die Antennenproteine bei Starklicht auch für die Photoprotektion funktionell erforderlich sind. Negi et al. [18] haben daher Zellen so verändert, dass sie im Starklicht ihre Antennen verkleinern und im Schwachlicht wieder vergrößern. Sie konnten zeigen, dass diese Varianten auch unter fluktuierendem Licht im Vergleich zur Kontrolle doppelt so viel Biomasse bilden können.

Bislang konnte aber bei Algen dieser Ansatz im industriellen Maßstab nicht umgesetzt werden. Selbst wenn es gelingt, durch die Reaktortechnologie die Produktionsbedingungen für die Algen zu optimieren, muss man in der Bilanz vom Photon bis zum Produkt die energetischen und ökologischen Betriebskosten berücksichtigen. Das sind neben dem Stromverbrauch für die Durchmischung, Ernte und Biomasseaufarbeitung auch die Sicherstellung der Nährstoffversorgung (CO₂, Stickstoff, Phosphor, Magnesium und Kalium). Dabei nehmen die Energiegewinne durch die Photosynthese dramatisch ab [19] und sind nur noch in lichtreichen Gegenden überhaupt positiv [20]. In diesen Ländern (Mittelmeerraum oder Wüsten) spielen dann aber die Verfügbarkeit von Wasser und die Kosten der Temperaturkontrolle eine limitierende Rolle [21]. Dabei sind noch nicht die Umweltbelastungen eingerechnet, die entstehen, wenn man die Algenanlagen so groß skaliert, dass der Maßstab z. B. für die Produktion von Biofuels erreicht wird. Bei der Quantifizierung der Energieeinträge und der ökologischen Bewertung – gemessen als Treibhausgasemission pro kg produziertem Algenprodukt (z. B. Biokerosin) – ergeben sich erhebliche Schwankungsbreiten. Diese Unsicherheiten gehen auf unterschiedliche Annahmen zurück, auf die man angewiesen ist, da Erfahrungen von Großanlagen nicht vorliegen. So hängen z. B. die Kosten und die ökologischen Bilanzen stark davon ab, wie hoch der Energie- und Wasserbedarf ist, um im Sommer die Zellen in den Reaktoren vor Überhitzung zu schützen.

Trotzdem gibt es in der Literatur eine Reihe von Arbeiten, die eine solche Bilanzierung zumindest auf der Ebene der Klimagasemissionen versucht haben. Die Studie von Weinberg et al. [22] zeigt dabei ein grundsätzliches Dilemma: Summiert man alle Klimagasemissionen aller notwendigen Produktionsteilschritte auf, zeigen mikroalgenbasierte Biofuels aus offenen Produktionsbecken eine deutlich bessere Bilanz als Algen aus Photobioreaktoren –

ABB. 3 | KLIMAGASEMISSIONEN DER VERSCHIEDENEN SYNTHESWEGE VON BIOFUELS MITTELS KONVENTIONELLER ALGENBIOTECHNOLOGIE



Die Klimagasemissionen sind ausgedrückt als CO₂-Äquivalente pro MJ Energiegehalt des mittels Algen synthetisierten Energieträgers. PBR opt: optimal operierender Photobioreaktor, PBR pes: PBR in realistischer Umgebung, OP: *open pond*, Diesel: Kraftstoff aus Erdöl gewonnen. Berücksichtigt wurden die CO₂-Minderung durch Photosynthese und die CO₂-Emission bei der Verbrennung. Die Fehlerbalken geben die Fehler an, die sich durch die Schätzbreite bei den zugrunde liegenden Annahmen ergeben. Als Produktionsstandort wurde Deutschland mit den klimatischen Bedingungen von Sachsen-Anhalt angenommen. Abb. aus [22].

unabhängig davon, ob man optimistische oder pessimistische Annahmen zugrunde legt. Diese Aussage gilt unabhängig davon, ob man Bioethanol, Biogas oder Biodiesel produziert (Abbildung 3). Aber selbst bei offenen Produktionsanlagen (*open ponds*) sind die GHG-Emissionen (GHG = *greenhouse gas*) nur geringfügig geringer als bei Erdöl; dabei sind aber die Flächenerträge von solchen offenen Flächen so gering, dass sie kaum höher liegen als bei Landpflanzen. Zudem sind die Wasserverluste und die Kontaminationsrisiken so hoch, dass dieses Verfahren in gemäßigten Breiten praktisch nicht anwendbar ist. Daraus kann man den Schluss ziehen, dass beim jetzigen Stand der Technik mittels Algenkulturen in unseren Breiten nicht die erforderlichen Mengen an Biofuels produziert werden können, ohne die Umwelt weiter zu belasten. Offene Algenproduktionsanlagen in sonnenreichen Regionen verlieren über die Verdunstung so viel Wasser, dass für 1 kg Biomasse die unakzeptable Menge von ca. 5 m³ Süßwasser erforderlich wären [23].

Zusammenfassend kann man feststellen, dass insbesondere die Durchmischung der Kulturen, das Nährstoffrecycling, die Ernte und die Extraktion der Wertstoffe so hohe energetische, ökologische und ökonomische Kosten verursachen, dass der Vorteil der erhöhten Produktivität

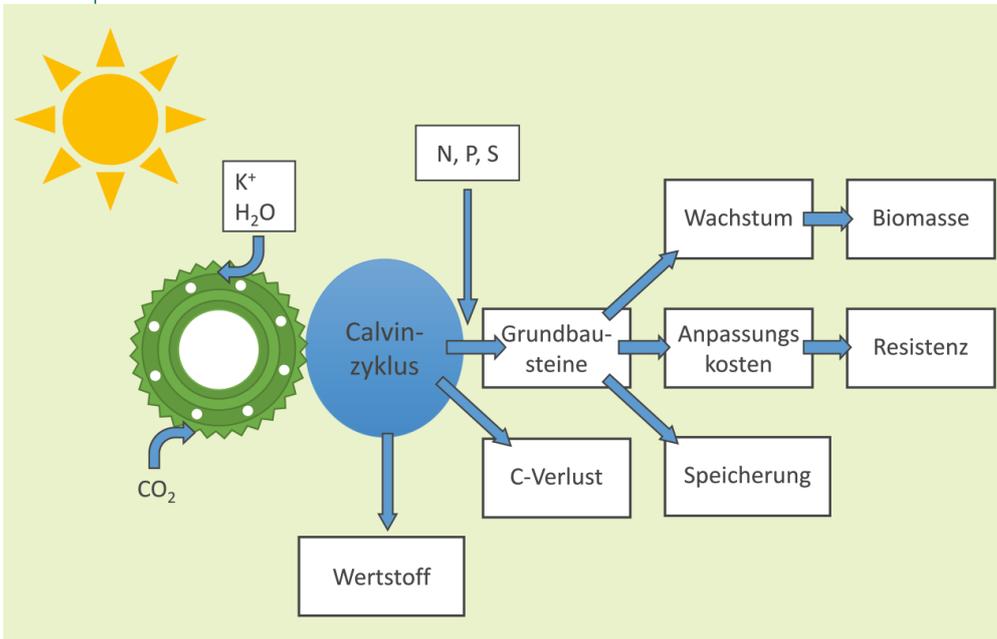
weitgehend aufgebraucht oder sogar überkompensiert wird. Die Lektion für die Bioökonomie lautet: Es reicht nicht, einen Teilschritt – z. B. den biologischen Prozessabschnitt – zu optimieren. Stattdessen muss die gesamte Wertschöpfungskette nachhaltiger und preiswerter sein als das bisherige Verfahren.

Produktherstellung ohne zusätzliche Biomasse: Das Konzept der Entkopplung

Daher wurde das Konzept der Entkopplung entwickelt. In diesem Konzept werden algenbürtige Produkte nicht aus vorkultivierter Biomasse erzeugt, sondern die Zellen nutzen die Photosynthese als Basisprozess, um die gewünschten Wertstoffe auszuschcheiden. Die gleiche Idee steht hinter dem Konzept der Ganzzellbiotransformation, bei dem die Reduktionskraft der Photosynthese genutzt wird, um wertarme Moleküle durch Biotransformation in hochwertige Chemiebausteine umzuwandeln. Der theoretische Hintergrund des Konzepts der Entkopplung ist in Abbildung 4 dargestellt [6].

Das Primärprodukt der Photosynthese, Zucker, kann für verschiedene Zwecke in der Zelle genutzt werden. Er kann in Stärke oder Öl umgewandelt und als C- und Energiespeicher bevorratet werden; diese Substanzen sind

ABB. 4 | KONZEPT DER ENTKOPPLUNG



Dargestellt ist das Kohlenstoffverteilungsmuster in Algenzellen vom Photon in verschiedene Produkte der Biomasse. Unter Entkopplung versteht man, dass nicht erst Biomasse gebildet wird, aus der nach der Ernte das Produkt extrahiert werden muss. Statt dass die Zellen den photosynthetisch gebildeten Kohlenstoff für das Wachstum verwenden, wird dieser in das gewünschte Produkt geleitet und dieses dann direkt ausgeschieden. Zu den Vorteilen dieses Konzepts siehe Text.

physiologisch inaktiv und ihre Akkumulation in der Zelle fördert nicht das Wachstum. Zweitens kann der Zucker in Abwehrstoffe investiert werden wie z. B. in Schutzproteine gegen toxische Sauerstoffradikale, niedermolekulare Antioxidantien oder Sekundärmetabolite, die der Pathogenabwehr dienen. Dieser Weg trägt ebenfalls nicht zum Wachstum bei. Nur der dritte Pfad, der Zucker zur Synthese von Strukturlipiden (etwa für Membranen), Proteinen oder Nukleinsäuren nutzt, dient dem Wachstum. Daher wachsen Zellen mit hohem Stärke- oder Ölgehalt langsam, und unter Stress wird auf Kosten des Wachstums die Abwehr gesteigert. Die Zelle wählt je nach Umweltbedingung die für sie günstigste Mischung der drei Nutzungsalternativen aus. Daher kann man die höchste Syntheseleistung der Zellen dann erwarten, wenn die Zelle gar nicht wächst und den photosynthetisch gewonnen Kohlenstoff ausscheidet und damit technischen Prozessen zur Verfügung stellt. Dieses Konzept der Entkopplung wurde mehrfach von verschiedenen Autoren als biologisch funktionsfähig nachgewiesen.

So konnten Hoschek et al. [24] zeigen, dass in transgenen Cyanobakterien die Hydroxylierung von Nonansäuremethylester vollständig aus photosynthesebürtigen Elektronen bewerkstelligt werden kann. Grund et al. [25] konnten zeigen, dass der zusätzliche Verbrauch von photosynthetischen Elektronen für die Synthese von biotechnologischen Produkten die Photosyntheseleistung steigern kann. Diese Daten zeigen, dass Produktsynthese mittels phototrophen Mikroorganismen durchaus unter

Entkopplung von Biomasse möglich ist. Einen anderen Ansatz haben Günther et al. [26] verfolgt, indem sie die Mikroalge *Chlamydomonas* durch Hemmung des Mechanismus zur Kohlenstoffkonzentrierung und durch ein geeignetes Verhältnis von CO_2/O_2 zu einer kontinuierlichen Exkretion von Glykolsäure veranlassen konnten. Glykolsäure ist ein wertvolles Produkt für die medizinische Technik und wird zurzeit chemisch durch die stark umwelttoxische Chlorchemie hergestellt. Taubert et al. [27] konnten dann das Produktionssystem auf Labormaßstab so verfeinern, dass die Zellen über Wochen ohne Wachstum kontinuierlich Glykolat ausscheiden, ohne an Photosyntheseleistung einzubüßen. Dabei werden im Medium bis zu 7 Gramm Glykolat pro L erreicht. Trotzdem bleibt die phototrophe Biotechnologie der Algen grundsätzlich einer physikalischen Limitation unterworfen: Die maximale Raum-Zeit-Ausbeute (Produkt pro Reaktorvolumen und

Zeit) ist nach oben physikalisch durch den Energiegehalt des natürlichen Lichts begrenzt. Letzterer beträgt je nach Breitengrad zwischen 70 und 270 W/m^2 und begrenzt damit für phototrophe Prozesse direkt die Flächenausbeuten. Biologisch ist das physikalisch erreichbare Optimum nicht erreichbar, weil natürliches Licht sich nicht biologisch unschädlich in der gleichen hohen Energiedichte einbringen lässt wie z. B. Glukose.

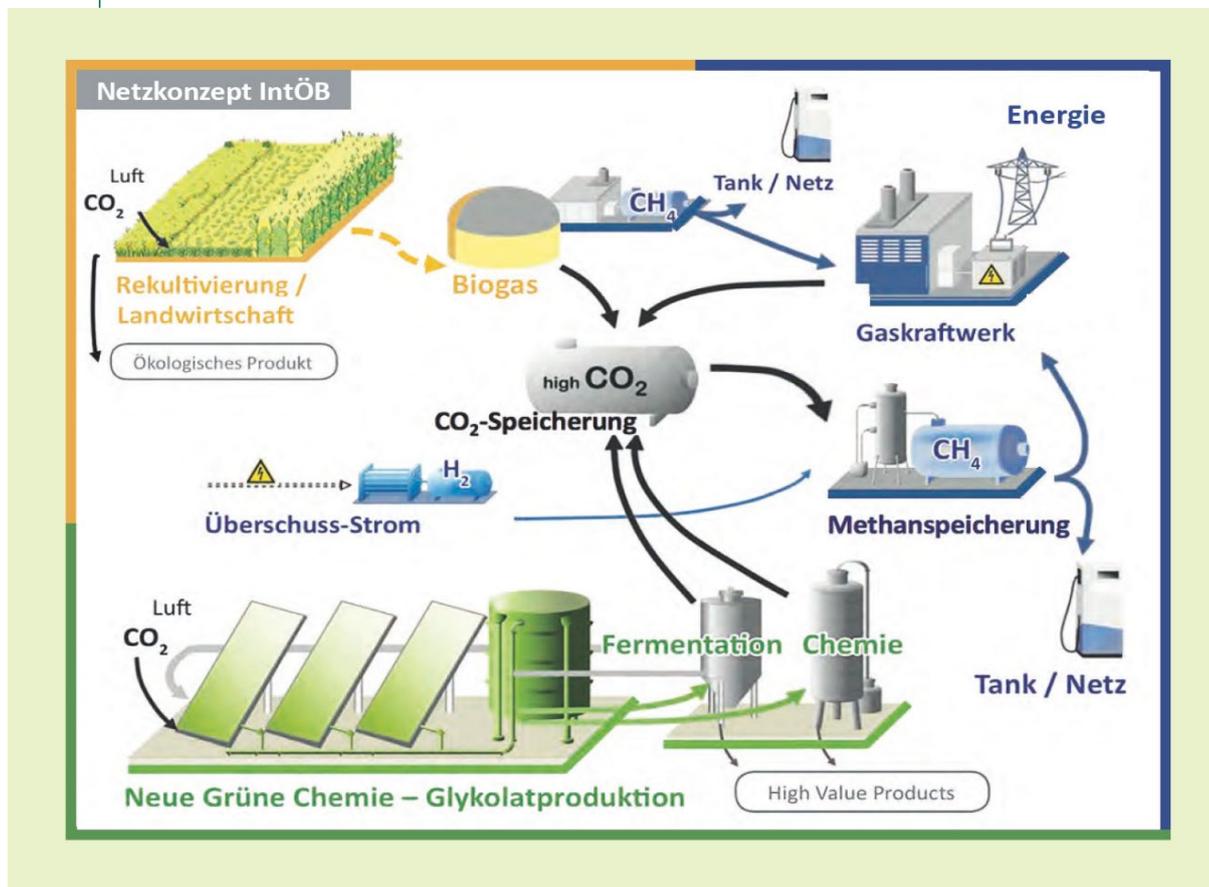
Schlussfolgerungen

Die biologischen Energiebilanzen zeigen sehr klar, dass mittels grüner Gentechnik die Flächenerträge zwar etwas gesteigert werden konnten, aber quantitativ nicht über dem Ertragsgewinn des klassischen Züchtens liegen. Ökonomisch relevanter als die Flächenerträge sind

- (1) die erzielbaren Effizienzen vom Licht bis in das Produkt,
- (2) die ökonomischen Produktionskosten pro Tonne Produkt (Investitionen, Betriebskosten, Recyclingkosten) und
- (3) die Nachhaltigkeit der Wertschöpfungskette (Flächenverbrauch, Emissionen an Schadstoffen).

Da die Herstellung organischen Kohlenstoffs aus CO_2 mit Hilfe der Photosynthese durch die geringe Energiedichte des Sonnenlichts mit einer hohen Inanspruchnahme von Flächen verbunden ist, sind die quantitativen Mengen biologisch erzeugten organischen Kohlenstoffs beschränkt. Eine hohe Flächeninanspruchnahme hat immer auch einen ökologischen Einfluss auf die Biodiversität, den lokalen

ABB. 5 | NETZKONZEPT INTEGRIERTE ÖKO-BIOÖKONOMIE



In diesem Konzept werden technische Prozesse (Strombereitstellung, Power-to-Gas-Kraftstoffe oder Gasspeicher) mit biologischen Prozessen in der Landwirtschaft (Biomassefermentation, Algenglykolat) miteinander verknüpft und zur Herstellung von Hochwertprodukten mit lokalen Energiemanagementsystemen so verknüpft, dass möglichst hohe Synergieeffekte erzielt werden. Diese Netzwerke werden regional der wirtschaftlichen Infrastruktur angepasst. Ziel ist die Vermeidung von CO₂-Emissionen und die Erhöhung der biologischen CO₂-Senken (Photosynthese und C-Bindung der Böden). Die bioökonomische Leistung des Netzwerkes besteht nicht nur in der Herstellung marktfähiger Produkte, sondern auch in der Verbesserung der Ökosystemleistungen und eines optimierten technischen C-Recyclings.

Wasserkreislauf und damit auf das regionale Klima. Daher gerät eine landschaftsverändernde Bioökonomie in Konflikt mit anderen sozialen Landnutzungskonzepten. So müsste z. B. eine Algenproduktionsanlage zur Herstellung von Biofuels nachweisen, dass sie weniger Land und Wasser verbraucht und weniger chemische Restsubstanzen wie z. B. Salze aus verbrauchten Nährlösungen freisetzt als eine Photovoltaik-(PV-)Anlage, mit deren Strom Wasserstoff gebildet wird, der dann zu Methanol chemisch umgesetzt wird.

Ohne überzeugende Argumente, dass der bioökonomische Ansatz klimafreundlicher und auch sozial nachhaltiger ist, werden sich in freien Gesellschaften keine demokratisch legitimierten Entscheidungen für eine bioökonomische Wertschöpfungskette herbeiführen lassen. Innovationen scheitern sehr oft an fehlender Akzeptanz in der betroffenen Region, und Entscheidungs- und Beteiligungsprozesse in Transformationsprojekten fokussieren häufig auf formale Kompetenzen und technologische Vor-

teile [28]. Dabei wird oft vergessen, wie stark informelle Elemente (z. B. Vertrauen) die gesellschaftliche Akzeptanz von neuen Technologien beeinflussen [29]. Daher werden in Zukunft besonders regionale, integrative Ansätze die Bioökonomie voranbringen können. Eine gute Zukunftsperspektive haben Techniken mit positiven Effekten auf die Klimaresilienz wie eine Kombination aus Agroforstsystemen mit senkrecht orientierten PV-Paneele, die den Wasserhaushalt positiv beeinflussen – beispielsweise dadurch, dass durch den Schattenfall die Bodentemperatur und damit die Verdunstung erniedrigt wird. Haben die Kulturen keinen hohen Lichtbedarf, können dadurch Grenzertragsflächen bei steigendem Dürrerisiko in der Produktion gehalten werden. Da in geschlossenen Algenbioreaktoren der Wasserverbrauch niedriger ist als auf landwirtschaftlichen Produktionsflächen, kann auf Teilflächen mit Algenreaktoren das verfügbare Wasser besser für die Kulturpflanzen genutzt werden. Dadurch können durch kleinräumige Differenzierung neue ökologische

Nischen für Wildpflanzen und Wildtiere geschaffen werden. Der integrative Ansatz erlaubt dann neben der landwirtschaftlichen Produktion zusätzliche Einnahmen durch Stromproduktion. Werden Algenkleinanlagen in Gebäuden mit künstlicher Belichtung zur Herstellung von Hochwertprodukten genutzt, können auch transgene Algen eingesetzt werden.

Ein weiterer Integrationsaspekt ist die Einbindung dieser Bioproduktionsverfahren in intelligente Stromnetze, wo eine fluktuierende Stromproduktion effektiv genutzt werden kann. So können in Zukunft integrierte Produktionsverbände entstehen, die in der Summe klimaresilient und produktionseffizient sind. Dafür sind allerdings staatliche Förderinstrumente nötig, die nicht einzelne Schritte

GLOSSAR

FTIR-Spektroskopie: Die Fourier-Transform-Infra-Rot-(FTIR)-Spektroskopie spiegelt in einer Probe die durch Infrarotstrahlung aktivierten Molekülschwingungen wider, die bei spezifischen Wellenlängen absorbiert werden, je nachdem mit welchem anderen Atom ein C-Atom in welcher Bindung verknüpft ist. Daraus lässt sich dann quantitativ die chemische Biomassestruktur ermitteln.

Mehlerreaktion: Photosystem I kann die Elektronen nicht nur zur Herstellung von Reduktionsäquivalenten (NADPH) nutzen, sondern auch wieder auf Sauerstoff übertragen. Das gebildete sehr toxische Superoxid anion wird dann in einer Entgiftungsreaktion wieder zu Wasser abgebaut. Dabei werden die in der Photosynthese gebildeten Elektronen wieder verbraucht und es entsteht eine Verlustreaktion.

Photoprotektion: Zellen müssen sich vor Licht schützen, wenn sie mehr Licht absorbieren als sie für die Photosynthese nutzen können. Um die Bildung von toxischen Sauerstoffradikalen zu vermeiden, übertragen sie die Anregungsenergie auf Carotinoide, die die Energie in schadhlose Wärme umwandeln

Photorespiration: Bei hoher Lichteinstrahlung, hoher Temperatur und Substratmangel (wenig CO₂) führt das CO₂-assimilierende Enzym (RubisCo) nicht mehr eine carboxylierende, sondern eine oxygenierende Reaktion durch. Als Folge davon entsteht kein weiterer Zucker aus der Photosynthese, sondern es wird giftiges Glykolat gebildet. In einem Kreislauf wird das Glykolat weiter oxidiert, und es entsteht wieder CO₂. Daher spricht man bei lichtabhängiger CO₂-Abgabe von Photorespiration.

Sinuidales Licht: Licht, das in seiner Intensität wie eine Sinuskurve schwankt.

Wärmedissipation: Chlorophyll kann die absorbierte Energie entweder für eine chemische Redoxreaktion verwenden, als Licht wieder abstrahlen (Fluoreszenz) oder als Wärme abgeben. Der Wärmeanteil wird als Wärmedissipation bezeichnet.

Xanthophyllzyklus: Xanthophylle sind Pigmente, die zu den Carotinoiden gehören. Sie können das absorbierte Licht an Chlorophylle weiterleiten und damit die Photosynthese im Schwachlicht optimieren oder im Starklicht in Wärme umwandeln. Das Hin- und Herschalten zwischen diesen beiden unterschiedlichen Funktionen erfolgt durch eine lichtabhängige, reversible Pigmentumwandlung.

der Produktionskette wie z. B. die biologische Prozessoptimierung zum Gegenstand haben, sondern ein regionales Transformationsprogramm entwickeln, testen und schließlich umsetzen. Der Erfolg besteht dann nicht mehr in der Entwicklung einzelner Produkte des „Bioengineerings“, sondern in der Originalität der regionalen Prozessintegration (Abbildung 5). Damit kann die Bioökonomie als Klammer zwischen verschiedenen wissenschaftlichen Teildisziplinen agieren und dazu beitragen, Produktionsbausteinen mit transgenen Zellen zu mehr öffentlicher Akzeptanz zu verhelfen. Es ist absehbar, dass ohne eine Strategie integrierter Gesamtkonzepte die Herausforderungen des Klimawandels für die Versorgung der Gesellschaft mit den ökologischen Serviceleistungen der Natur (Wasser, Hitzeschutz, Nährstoffrecycling, Infektionsschutz etc.) nicht gelöst werden können.

Zusammenfassung

Die Bioökonomie als ein überzeugendes Konzept für eine klimaneutrale C-basierte Kreislaufwirtschaft hängt von der Effizienz der Photosynthese ab, da alle biotechnologischen Prozesse auf natürlichen organischen Kohlenstoff zurückgehen. Die verbesserte biotechnologische Nutzung der Photosynthese gilt vor allem bei Algen als besonders aussichtsreich, da diese nicht auf Agrarflächen angewiesen sind und höhere Flächenerträge aufweisen. Der Artikel zeigt, welche Erwartungen realistisch sind und wo die physiologischen und technologischen Limitationen liegen. Dabei spielen Energiebilanzen eine zentrale Rolle. Je nachdem, ob man diese nur auf die Biomasseproduktion bezieht oder die ganze Wertschöpfungskette berücksichtigt, zeigen sich andere Systemgrenzen. Der inzwischen unvermeidbare Klimawandel stellt eine besondere Herausforderung dar, da nicht nur technische, sondern auch systemökologische Aspekte in den Vordergrund treten und die sozioethischen Entscheidungen in der Gesellschaft beeinflussen.

Summary

Green bioeconomy: Are algae all-rounders?

Bioeconomy is a convincing concept for a climate-neutral C-based circular economy and it depends on the efficiency of photosynthesis, as all biotechnological processes can be traced back to natural organic carbon. The improved biotechnological use of photosynthesis seems to be especially promising with regard to algae, as they do not need agricultural land and they have higher yields per unit area. The article shows which expectations are realistic and where physiological and technical limitations lie. In this context, energy balances play a central role. Different system boundaries will appear depending on whether biomass production is referred to or the whole value-added chain is taken into account. The now unavoidable climate change is a particular challenge, since not only technical, but also system-ecological aspects come to the fore and influence socio-ethical decisions in society.

Schlagworte

Algen, Bioökonomie, Energiebilanzen, Kreislaufwirtschaft, Stoffkreisläufe, Systemgrenzen

Literatur

- [1] BMBF (2010). Nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030 Wirtschaft. Unser Weg zu einer biobasierten Wirtschaft, <http://www.bmbf.de> oder <http://www.biotechnologie.de>
- [2] A. Kumar et al. (2010). Enhanced CO₂ fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions. *Trends in Biotechnology* 28, 371–380.
- [3] Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe, <https://www.energiepflanzen.info/pflanzen/algen.html>
- [4] P. Tandon et al. (2017). A promising approach to enhance microalgae productivity by exogenous supply of vitamins. *Microb Cell Fact* 16, 219.
- [5] G. M. Giacometti, T. Morosinotto (2013). Photoinhibition and Photoprotection in Plants, Algae, and Cyanobacteria. *Encyclopedia of Biological Chemistry*, 482–487.
- [6] C. Wilhelm, T. Jakob (2011). From photons to biomass and biofuels: evaluation of possible light-dependent biotechnological processes based on comparative energy balances. *Appl. Micro. Biotechnol.* 92, 909–919.
- [7] C. Wilhelm, D. Selmar (2011). Energy dissipation is an essential mechanism to sustain the viability of plants: The physiological limits of improved photosynthesis. *Journal of Plant Physiology* 168 (2), 79–87.
- [8] C. Wilhelm, T. Jakob (2013). Balancing the conversion efficiency from photon to biomass. In: C. Posten, W. Christian. *Microalgal Biotechnology: Potential and Production*, Berlin, Boston: De Gruyter, 39–59. <https://doi.org/10.1515/9783110225020>
- [9] A. C. Apel et al. (2017). Open thin-layer cascade reactors for saline microalgae production evaluated in a physically simulated Mediterranean summer climate. *Algal Research* 25, 381–390
- [10] H. Wagner et al. (2005). Balancing the energy flow from captured light to biomass under fluctuating light conditions. *New Phytol.* 169, 95–108
- [11] H. Wagner et al. (2010). The use of FTIR spectroscopy to assess quantitative changes in the biochemical composition of microalgae. *J. Biophotonics* 3, 57–566.
- [12] C. Jebens et al. (2012). The FTIR spectra as species-specific physiological fingerprints to assess the in-situ growth capacity. *Physiologia Plantarum* 146, 427–438.
- [13] J. Kromdijk et al. (2016). Improving photosynthesis and crop productivity by accelerating recovery from photoprotection. *Science* 354, 857–861. <https://doi.org/10.1126/science.aai8878>
- [14] A. P. Souza et al. (2022). Soybean photosynthesis and crop yield are improved by accelerating recovery from photoprotection. *Science* 377, 851–854. <https://doi.org/10.1126/science.adc9831>
- [15] J. Beckmann et al. (2009). Improvement of light to biomass conversion by de-regulation of light-harvesting protein translation in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Journal of biotechnology* 142, 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2009.02.015>
- [16] A. Schramm et al. (2016). The impact of the optical properties and respiration of algal cells with truncated antennae on biomass production under simulated outdoor conditions. *Current Biotechnology* 5 (2), 142–153.
- [17] T. de Mooij et al. (2015). Antenna size reduction as a strategy to increase biomass productivity: a great potential not yet realized. *J Appl. Phycol.* 27, 1063–1077.
- [18] S. Negi et al. (2020). Light regulation of light-harvesting antenna size substantially enhances photosynthetic efficiency and biomass yield in green algae. *The Plant Journal* 103, 584–603. <https://doi.org/10.1111/tpj.14751>
- [19] M. R. Tredici et al. (2015). Energy balance of algal biomass production in a 1-ha “Green Wall Panel” plant: How to produce algal biomass in a closed reactor achieving a high net energy ratio. *Appl. Energy* 154, 1103–1111. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.086>
- [20] E. Daneshvar et al. (2022). Biologically-mediated carbon capture and utilization by microalgae towards sustainable CO₂ biofixation and biomass valorization – A review. *Chemical Engineering Journal* 427, 130884.
- [21] E. G. Nwoba et al. (2020). Pilot-scale cooling microalgal closed photobioreactor for biomass production and electricity generation. *Algal Research* 45, 101731.
- [22] J. Weinberg et al. (2012). Biofuels from Microalgae – an environmental analysis. *Biomass Conversion and Biorefinery* 2, 179–194.
- [23] C. F. Murphy, D. T. Allen (2011). Energy-Water Nexus for Mass Cultivation of Algae. *Environ. Sci. Technol.* 45, 5861–5868. <https://doi.org/10.1021/es200109>
- [24] A. Hoschek et al. (2019). Stabilization and scale-up of photosynthesis-driven ω-hydroxylation of nonanoic acid methyl ester by two-liquid phase whole-cell biocatalysis. *Biotechnology and Bioengineering* 116, 1887–1900.
- [25] M. Grund et al. (2022). Heterologous Lactate Synthesis in *Synechocystis* sp. Strain PCC 6803 Causes a Growth Condition-Dependent Carbon Sink Effect. *Applied and Environmental Microbiology* 88, e0006322.
- [26] A. Günther et al. (2012). Methane production from glycolate excreting algae as a new concept in the production of biofuels. *Bioresource Technology* 121, 454–457.
- [27] A. Taubert et al. (2019). Glycolate from microalgae: an efficient carbon source for biotechnological applications. *Plant Biotechnology Journal* 17, 1538–1546. <https://doi.org/10.1111/pbi.13078>
- [28] M. Wolsink (2012). The research agenda on social acceptance of distributed generation in smart grids: renewable as common pool resources. In: *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 822–835.
- [29] A. Ceglaz (2017). Understanding the role of trust in power line development projects: Evidence from two case studies in Norway. In: *Energy Policy* 110, 570–580.

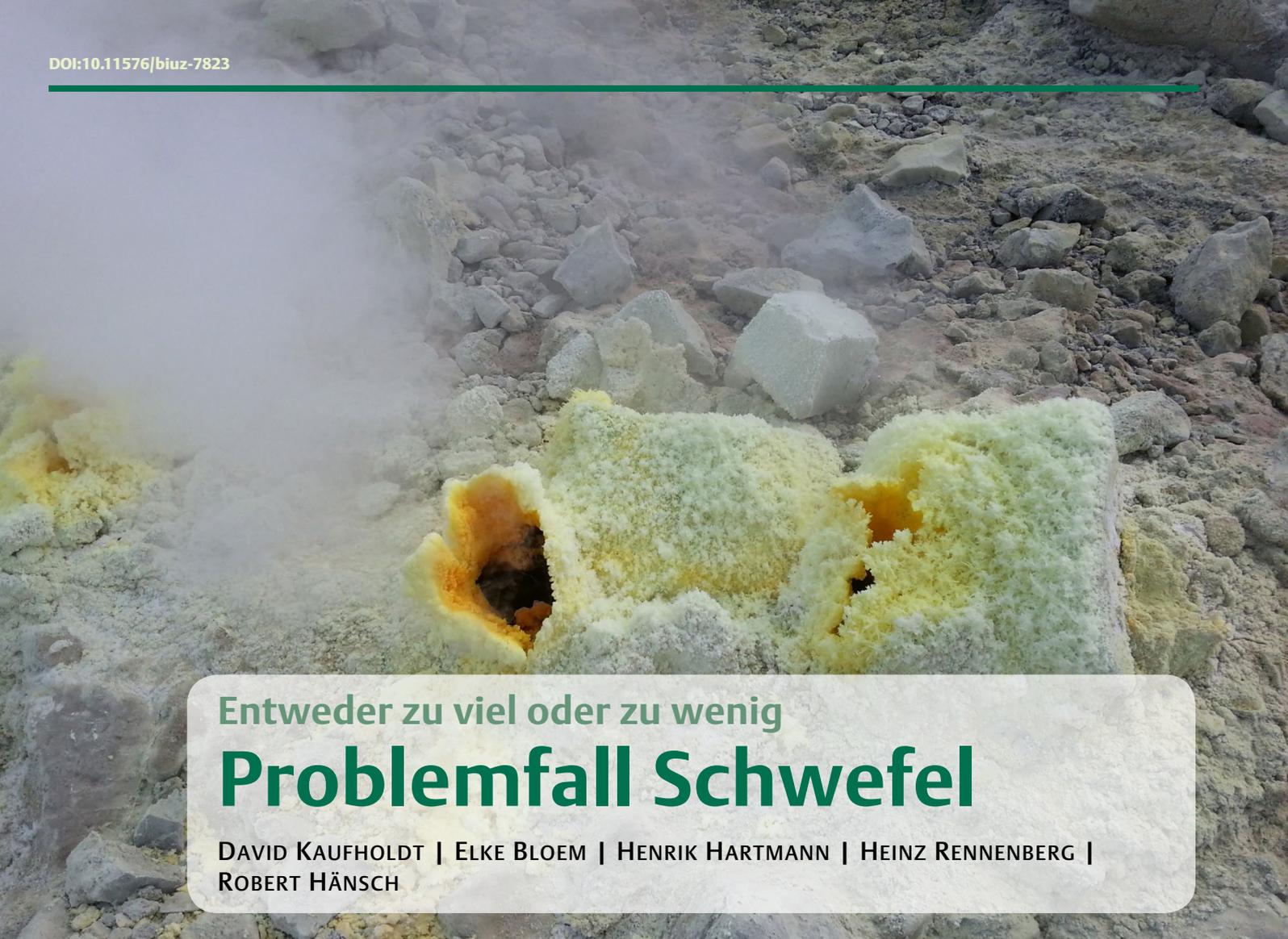
Verfasst von:



Christian Wilhelm, geb. 1953, hat an der Universität Mainz Biologie und Chemie studiert und in Mainz über die Photosynthese bei Mikroalgen promoviert. Seine Habilitation erhielt er für seine Arbeiten an Lichtantennenproteinen. Im Jahr 1995 wurde er auf den Lehrstuhl für Pflanzenphysiologie an der Universität Leipzig berufen. Er lehrte dort mit dem Schwerpunkt Algenphysiologie und Ökophysiologie der Pflanzen bis 2019 und wurde anschließend zum Seniorprofessor für Algenbiotechnologie berufen. Von 1999 bis 2019 war er Herausgeber des *Journals of Plant Physiology*, eines der traditionsreichsten Zeitschriften der Pflanzenkunde. Als Direktor des Sächsischen Instituts für Angewandte Biotechnologie war er an der Entwicklung einer Reihe von biotechnologischen Patenten beteiligt.

Korrespondenz:

Prof. Dr. Christian Wilhelm
Seniorprofessur für Algenbiotechnologie
Institut für Biologie
Universität Leipzig
Permoserstraße 15
04318 Leipzig
E-Mail: cwilhelm@rz.uni-leipzig.de



Entweder zu viel oder zu wenig Problemfall Schwefel

DAVID KAUFHOLDT | ELKE BLOEM | HENRIK HARTMANN | HEINZ RENNENBERG |
ROBERT HÄNSCH

Durch vulkanische Aktivität entstandene schwefelhaltige Mineralien auf der Liparischen Insel Vulcano (Italien).

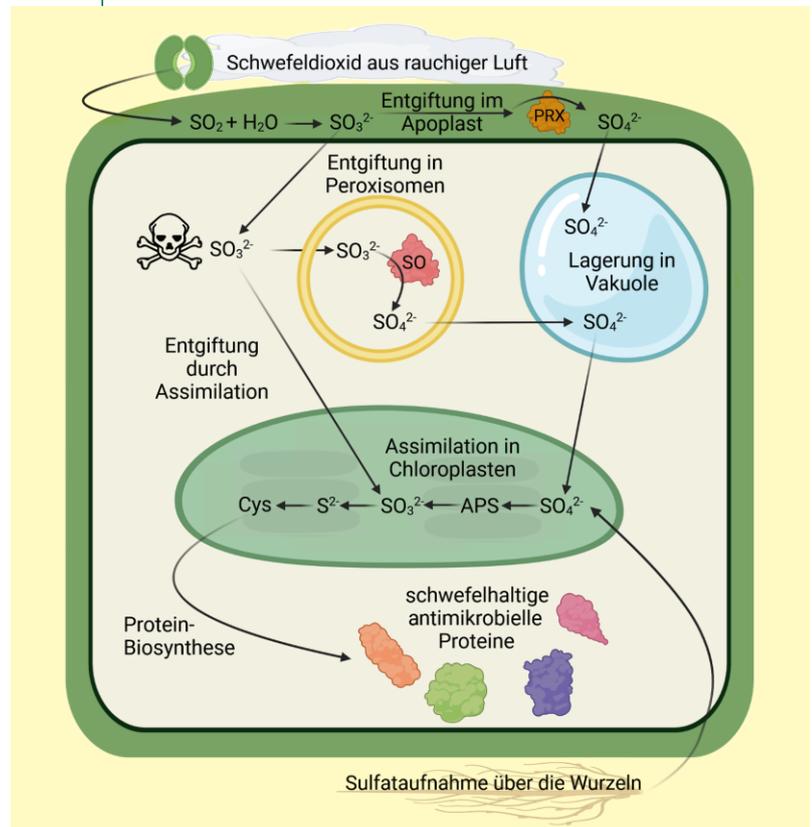
Waldökosysteme sind von zentraler Bedeutung für die Gesundheit des Planeten. In den letzten Jahrzehnten wurden unsere Wälder durch verschiedene vom Menschen freigesetzte Gase wie Schwefeldioxid (SO_2) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) erheblichen Belastungen ausgesetzt. In der Vergangenheit führte der durch SO_2 verursachte saure Regen zu einem massiven Waldsterben. Während dieses Problem heute weniger relevant ist, stellt der durch CO_2 ausgelöste Klimawandel nun die größte Bedrohung für unsere Wälder dar. Viele Waldgebiete zeigen mittlerweile deutliche Anzeichen von Stress wie etwa Befall durch Schädlinge und Krankheiten, Kronensterben und vertrocknete Blätter, was in einigen Regionen zu großflächigen Abholzungen führt. Diese Symptome gefährden die Rolle des Waldes im Erhalt der biologischen Vielfalt, der Kohlenstoffbindung und der Sauerstoffproduktion, und der Rückgang der Waldgesundheit hat globale Auswirkungen. In diesem Zusammenhang könnte Schwefel in Form von Sulfat als entscheidendes Nährelement für die Synthese von Abwehrstoffen, gegen Schädlinge und Krankheiten dazu beitragen, Wälder gegen verschiedene Stressfaktoren zu stärken. Allerdings sehen sich unsere Wälder derzeit einem zunehmenden Schwefelmangel gegenüber. Als Hauptverursacher dieser Krise tragen wir die Verantwortung, wirksame Lösungen zu entwickeln und umzusetzen, um weiteren Schaden zu begrenzen und die Waldgesundheit zu stabilisieren, bevor irreversible Kippunkte erreicht werden. Diese Veröffentlichung zeigt auf, wie sich Schwefel allmählich von einem Fluch zu einem potenziellen Segen für die Wälder wandelt.

Das wichtige Element Schwefel (S) ist in unserer lebenden und nicht-lebenden Umgebung omnipräsent. Mit ca. 0,5 Prozent Massenanteil an unserer Erde kommt Schwefel in verschiedenen Mineralien wie Gips (Calciumsulfat), Anhydrit oder Schwefelkies vor. Insbesondere durch vulkanische Aktivitäten wird Schwefel in gewaltigen Mengen in Form von Schwefeldioxid (SO_2) freigesetzt. SO_2 wird in den Wolken über eine Reaktion insbesondere mit Wasserstoffperoxid zu Sulfat oxidiert. Dieses bildet in der Atmosphäre Partikel, formiert als *cloud condensation nuclei*, und begünstigt damit die Bildung von Wolken. Diese Emissionen können damit zu kurzfristigen klimatischen Auswirkungen auf der gesamten Welt führen, insbesondere zu einem Abkühlungseffekt durch Reflexion des Sonnenlichts, wie nach dem Ausbruch des Tambora im Jahr 1815 berichtet wurde. 1816 wird deshalb auch als das „Jahr ohne Sommer“ bezeichnet (eindrucksvoll beschrieben von Wolfgang Behringer in „Tambora und das Jahr ohne Sommer: Wie ein Vulkan die Welt in die Krise stürzte“ ISBN-13978-3406676154). Durch die reduzierte Sonneneinstrahlung und dadurch gesunkenen Temperaturen kam es weltweit zu großen Hungersnöten.

Bei Pflanzen zählt Schwefel zu den essentiellen Makronährstoffen, die in relativ hohen Konzentrationen vorkommen und für deren metabolische Funktionen unersetzlich sind [1]. Schwefel findet sich in zahlreichen Verbindungen wieder wie den Aminosäuren Cystein und Methionin oder den Eisen-Schwefel-Clustern als bedeutsame Co-Faktoren von Proteinen. Schwefel ist somit ein wichtiger Bestandteil zahlreicher Proteine und von zentraler Bedeutung für die Aktivität von Enzymen. Aber auch verschiedene Vitamine (Biotin, Thiaminpyrophosphat) und zahlreiche sekundäre Pflanzenstoffe enthalten Schwefel [2]. Zu letzteren zählen u. a. die Glucosinolate und Cysteinsulfoxide (Alliin, Isoalliin, Methiin, Propiin). Diese Verbindungen tragen nicht nur zur pflanzlichen Abwehr von Schädlingen bei, sondern machen auch den Geschmack vieler Gemüse aus. Für den Menschen haben sie gesundheitsfördernde Eigenschaften wie antioxidative und entzündungshemmende Wirkungen, die auch mit der Krebsprävention in Verbindung stehen.

In der Regel wird Schwefel in Form von Sulfat von Pflanzen über spezifische Transporter durch die Wurzel aus dem Boden aufgenommen [3] und mit dem Transpirationsstrom im Xylem bis in die Blätter transportiert. Sekundär und in deutlich geringerem Maße können Pflanzen Schwefel auch in Form von Schwefeldioxid (SO_2), Carbonylsulfid (COS) und Schwefelwasserstoff (H_2S) über die Spaltöffnungen aus der Atmosphäre aufnehmen oder auch in Form von Nährsalzen, was man sich etwa bei der Blattapplikation von Bittersalz zunutze macht. In den Blattzellen angekommen wird das Sulfat reduziert und assimiliert. Dabei wird es in die Aminosäure Cystein umgesetzt; hierfür spielen Plastiden eine zentrale Rolle. Zuerst muss das reaktionsträge Sulfat über ATP aktiviert, nachfolgend in

ABB. 1 | SCHWFELEASSIMILATION UND SCHWFELENTGIFTUNG IN PFLANZEN



Pflanzen können schwefelhaltige Verbindungen sowohl aus dem Boden über die Wurzeln in Form von mineralischem Sulfat (SO_4^{2-}) als auch gasförmig durch die Spaltöffnungen in Form von Schwefeldioxid (SO_2) aufnehmen. Letzteres reagiert im Apoplasten jedoch mit Wasser zu Sulfid (SO_3^{2-}), welches zu toxischer Sulfitylose führen kann. Daher muss Sulfid entweder im Chloroplasten assimiliert werden oder durch die Sulfitoxidase (SO in Peroxisomen) bzw. die Peroxidase (PRX im Apoplast) entgiftet werden. Das entstandene Sulfat wird in der Vakuole gelagert, von wo aus es bei Bedarf dem Assimilationskreislauf in den Chloroplasten zugeführt werden kann. Sulfat wird dabei zunächst zu Adenosinphosphosulfat (APS) umgewandelt, bevor es weiter über Sulfid (S^{2-}) zu Cystein reduziert wird. Dieses steht anschließend der Proteinbiosynthese zur Verfügung, wo neben Proteinen zum Zellaufbau unter anderem schwefelhaltige antimikrobielle Proteine zur Stresstoleranz generiert werden.

IN KÜRZE

- Schwefel in Form von Schwefeldioxid aus anthropogenen Abgasen hat bis gegen Ende des 20. Jahrhunderts zum **Absterben von Wäldern** geführt.
- Der **Schwefelgehalt** der Umwelt hat in den letzten Jahrzehnten **abgenommen** – und damit auch die Verfügbarkeit von Schwefel für Pflanzen.
- Geringere Schwefelkonzentrationen führen nun bei verschiedenen Pflanzenarten zu **Schwefelmangel**, der in Wäldern aufgrund der längeren Entwicklungszeit **später auftritt** als bei Kulturpflanzen.
- Biotischer Stress kann bei Pflanzen durch die **Schwefel-induzierte Resistenz** gemindert werden. Bei Kulturpflanzen führt der **Einsatz von Schwefeldünger** zu einer Verringerung der stressbedingten Schwefelmangelsymptome.
- Dies soll in Zukunft auf Baumarten übertragen werden. Schwefel wird somit von einem Fluch zu einem **Segen für die Waldgesundheit**.

mehreren Schritten über Sulfit und Sulfid reduziert und schließlich in die Aminosäure Cystein eingebaut werden. Dafür wird ein nicht unerheblicher Anteil an photosynthetisch gewonnener Energie benötigt.

Ob die Schwefelassimilation letztlich in den Blättern oder in den Wurzeln erfolgt, hängt stark von den spezifischen Wachstumsbedingungen sowie der Lebensweise und den Bedürfnissen der Pflanze ab. In den Blättern kann die Reduktion und Assimilation von Schwefel vor allem in krautigen Pflanzen effizienter sein, da hier die direkte Nutzung photosynthetisch gewonnener Energie möglich ist. Gleichzeitig bietet die Schwefelassimilation in den Wurzeln den Vorteil, dass die entstehenden Aminosäuren unmittelbar für das Wurzelwachstum zur Verfügung stehen, ohne dass ein Transport über längere Strecken erforderlich ist. Dieser Prozess ist besonders bei Bäumen relevant, wenn das Blattwachstum frühzeitig in der Vegetationsperiode abgeschlossen ist. Bei Baumarten mit fortlaufender Blatentwicklung findet oft eine gleichzeitige Schwefelassimilation in Blättern und Wurzeln statt, um den unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden.

Wie bereits erwähnt können Pflanzen in begrenztem Maße auch SO_2 oder SH_2S über die Spaltöffnungen aufnehmen und der Assimilation in den Chloroplasten zuführen. In erhöhten Mengen sind SO_2 und H_2S jedoch giftig für pflanzliche Zellen. Der Schwellenwert zwischen nützlichem Nährstoff und gefährlichem Gift ist bei den unterschiedlichen Pflanzen sehr verschieden, liegt jedoch in jedem Fall im ppb-Bereich (ppb = *parts per billion*). Über Sulfitolyse, also das Aufbrechen von Disulfidbrücken durch die genannten Schwefelverbindungen, werden vor allem Proteine in ihrer Funktion gestört oder sogar vollständig denaturiert, was häufig zum Tod der Zelle oder des gesamten Organismus führt (Abbildung 1).



ABB. 2 Durch sauren Regen abgestorbene Fichten in den Höhenlagen des sächsischen Erzgebirges im Winter 1983/84. Foto: Falk Schott.

Schwefeldioxid und Waldsterben

Beginnend mit der Industrialisierung und bis Mitte der 1980er Jahren des letzten Jahrhunderts waren die Auswirkungen anthropogen verursachter Schwefeltoxizität europaweit zu beobachten: Schwerindustrie, Kohleverstromung und die Nutzung S-haltiger Kraftstoffe führten zu einem deutlichen Anstieg der SO_2 -Konzentration in der Troposphäre. Vor allem in den Höhenlagen der Mittelgebirge Deutschlands wie Harz, Erzgebirge oder Schwarzwald waren bedingt durch ungünstige Expositionslagen die Einträge von Schwefel in Waldböden besonders hoch. Das in der Atmosphäre enthaltene SO_2 löst sich in der Luftfeuchte und bildet dadurch schweflige Säure (H_2SO_3) beziehungsweise Schwefelsäure (H_2SO_4), welche zu einer starken Reduzierung des pH-Wertes der Luftfeuchte und somit der Niederschläge führte – allgemein bekannt als „saurer Regen“. Die Konsequenz war ein großflächiges Absterben insbesondere von Tannen und Fichten, begründet in der massiven Einwirkung des Sauren Regens auf die Bodenchemie und das daraus resultierende starke Ungleichgewicht in der Nährstoffversorgung [4]. Zudem wurde die Verzweigung des Feinwurzelsystems der Bäume durch die Versauerung des Bodens stark reduziert [5]. Abbildung 2 zeigt das Ausmaß der damaligen Schäden – aufgenommen im Winter 1983/84 in den Höhenlagen des sächsischen Erzgebirges. Die Bilder erinnern in ihrer Ausprägung an die aktuellen Waldschäden, die durch erhöhte Temperaturen und insbesondere Trockenstress der Bäume – bedingt durch die globale Klimaveränderung – verursacht und zusätzlich durch Schädlingsbefall u. a. mit dem Borkenkäfer begünstigt werden.

Unter ungünstigen Immissionswetterlagen kann die Konzentration des SO_2 in der Troposphäre auch für den Menschen gefährlich werden, wie *The Great Smog of London* („Smog“ ist eine Wortverschmelzung aus *smoke* = Rauchen und *fog* = Nebel) – auch als *days of toxic darkness* bekannt – dramatisch dokumentierte: Zwischen dem 5. und 9. Dezember 1952 verursachten gewaltige Mengen industrieller Abgase in Kombination mit ungünstigen Wetterbedingungen einen Smog bisher unbekanntes Ausmaßes und führten zum kompletten Stillstand aller Aktivitäten in dieser Metropole und zum Tod von bis zu 12.000 Menschen. Insbesondere SO_2 wird für die tödliche Tragödie verantwortlich gemacht. Bereits geringe Konzentrationen an SO_2 verursachen bei Menschen Atemwegsreizungen und Atembeschwerden und führen bei langfristiger Exposition zu chronischen Atemwegserkrankungen, verminderten Lungenfunktionen und einer Verschlechterung bestehender Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Hohe Konzentrationen können zudem akute Reaktionen wie starken Husten, Reaktionen des Immunsystems und Atemnot auslösen und schließlich zum Tode führen. Die Konzentrationen während der *days of toxic darkness* lagen zum Teil weit oberhalb der Geruchsschwelle des stechend riechenden Gases von 600 ppb und damit auch weit oberhalb der toxi-

schen Konzentration für dieses Schadgas. In der Luftgüte-Richtlinie von 2021 (WHO *global air quality guidelines* [6]) empfiehlt die Weltgesundheitsorganisation eine SO_2 -Konzentration von maximal 15 ppb im 24-Stunden-Mittel.

Bedingt durch industrielle Aktivitäten erleben wir auch aktuell immer noch regelmäßig einen deutlichen Anstieg der Luftverschmutzung durch SO_2 , vor allem im außereuropäischen Ausland bei extremen Wetterbedingungen. In der internationalen Presse werden dabei immer wieder Großstädte wie Bangkok oder Neu-Delhi genannt. In Europa wird im Zusammenhang mit urbaner Luftverschmutzung heute neben der Feinstaubbelastung eher auf Ozon und verschiedene gasförmige Stickstoffverbindungen hingewiesen.

Die Entdeckung der pflanzlichen Schwefel-entgiftung

Anders als Menschen und Tiere können sich sessile Pflanzen ungünstigen Bedingungen nicht entziehen und einfach „davonlaufen“. Sie müssen effiziente Abwehrmechanismen entwickeln, um Zeiten hoher Belastung zu überstehen. Eine erste und sehr schnelle Reaktion ist das Verhindern des Eindringens des SO_2 in das Blattgewebe. Zum einen hilft hier die teilweise stark ausgeprägte Wachsschicht – die Kutikula – auf der Oberfläche der Blätter, zum anderen erfolgt das Schließen der Spaltöffnungen (die Atemporen der Blätter) innerhalb weniger Minuten. Wie Blätter – insbesondere die Spaltöffnungen – SO_2 wahrnehmen und dieses Signal für Gefahr in eine aktive Reaktion umsetzen, ist nicht endgültig geklärt. Vermutet wird, dass Sulfat, das während der Entgiftung des SO_2 entsteht, eine entsprechende Signalkaskade unter Einbeziehung des Pflanzenhormons Abscisinsäure auslöst [7]. Mit dem Schließen der Spaltöffnungen ergibt sich aber für die Pflanzen ein großes Problem – sie benötigen den Gasaustausch durch die Spaltöffnungen für die Aufnahme von CO_2 und die Abgabe von O_2 im Zuge von Photosynthese und Transpiration. Ein „Luftanhalten“ ist also nur bei einer kurzfristigen SO_2 -Exposition sinnvoll wie bei einem Waldbrand. Um bei einer langfristigen Begasung, wie sie in der Nähe von Solfatoren (vulkanischen Ausgasungen, Abbildung 3) auftreten, nicht an „Atemnot“ oder „Durst und Hunger“ zu versterben, sind Pflanzen gezwungen, die Spaltöffnungen baldmöglichst wieder zu öffnen. Damit strömt dann aber SO_2 ungehindert in die Zellzwischenräume – die Interzellularen – ein.

SO_2 wird in der wässrigen Phase der Interzellularen sehr schnell in das äußerst reaktive und gefährliche Sulfid umgewandelt. Dieses ist, wie bereits erwähnt, für die Sulfidolyse verantwortlich. Geringe Mengen können unter Verbrauch von Energie aus der Photosynthese über eine gezielte Aufnahme in die Zellen und den schnellen Transport in die Chloroplasten in Sulfid und final in die Aminosäure Cystein überführt werden. Damit erspart sich die Zelle die Aufnahme, den Transport und die energieintensive Aktivierung von Sulfat.

Bereits 1944 wurde erstmals die Sulfitoxidation als aktiver Entgiftungsmechanismus von Sulfid in SO_2 -begaster Saatluzerne und Zuckerrübe beschrieben [8]. Neben verschiedenen, auch mit Chloroplasten assoziierten unspezifischen Reaktionen konnten aber erst mehrere Jahrzehnte später apoplastische Peroxidasen identifiziert werden, die in Verbindung mit Wasserstoffperoxid Sulfid zu Sulfat oxidieren [9]. Dafür wurde z. B. Waschflüssigkeit aus den Interzellularen extrahiert und enzymatisch auf die Anwesenheit von Peroxidasen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass insbesondere in Nadelbäumen die Aktivität dieser Enzymklasse bei Anwesenheit von Sulfid hochreguliert wurde. Es blieb aber unklar, ob dies eine spezifische Reaktion oder eine unspezifische Nebenreaktion dieser Enzyme ist und welches spezifische Enzym aus der großen Klasse der Peroxidasen verantwortlich zeichnet.

Bei Tieren ist bereits seit langem eine Sulfitoxidase bekannt und biochemisch und molekular gut charakterisiert. Dieses Enzym gehört zu den sogenannten Molybdoenzymen und ist damit ein Schwesterenzym der Nitratreduktase, die eine zentrale Rolle bei der Stickstoffassimilation der Pflanzen spielt. Diese Sulfitoxidase benötigt einen Molybdat-haltigen Cofaktor für die enzymatische Reaktion, also die Umsetzung von Sulfid zu Sulfat. 2002 ist es dann gelungen, eine Sulfitoxidase auch in Pflanzen nachzuweisen [10]. Dieses pflanzliche Enzym wurde in den Folgejahren mit allen zur Verfügung stehenden und modernsten analytischen Methoden untersucht. Anders als das tierische Pendant ist die pflanzliche Sulfitoxidase nicht in den Mitochondrien, sondern in Peroxisomen lokalisiert [11]; sie besitzt keinen eigenen Elektronenakzeptor in Form einer Häm-Domäne und nutzt ausschließlich Wasser und Sauerstoff in der enzymatischen Reaktion. Dabei entsteht Wasserstoffperoxid, das durch die Katalase in den Peroxisomen effizient verstoffwechselt werden kann [12]. In der Modellpflanze Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*) konnten Mutanten beschrieben werden, denen die pflanzliche Sulfitoxidase komplett fehlt. Diese Pflanzen waren unter Normalbedingungen nicht vom Wildtyp zu unterscheiden. Erst unter erhöhtem atmosphärischem SO_2 , das durch eine künstliche Begasung erzielt wurde, zeigten die Pflanzen eine phänotypische Ausprägung und starben nach einigen Tagen bis Wochen je nach applizierter Dosis und Pflanzenalter vollständig ab [13]. Bei Tieren und Menschen ist ein Fehlen der Sulfitoxidase bereits im Mutterleib oder kurz nach der Geburt tödlich.

Mit den pflanzlichen Knockout-(KO-)Mutanten der Sulfitoxidase konnte eine Vielzahl physiologischer Untersuchungen durchgeführt werden [14]: Durch Begasungsexperimente konnte die Bedeutung der SO_2 -Entgiftung und die Veränderung des S-Stoffwechsels auf Metabolitebene studiert werden. Die Regulation der Sulfitentgiftung wurde über die gezielte Analyse des Promotors und über Transkriptanalysen untersucht [13]. Dabei wurden zahlreiche Gene identifiziert, die spezifisch hoch- bzw. herunterreguliert werden können. Für die Ackerschmalwand

wurde eine Peroxidase identifiziert, die auf molekularer Ebene bei SO_2 -Begasung spezifisch reguliert wird. Zusätzlich wurde für das rekombinant aufgereinigte Enzym eine Sulfitoxidation nachgewiesen [15]. Die Experimente zeigten auch, dass eine Proteinklasse, die später als Defensine charakterisiert wurde, bei SO_2 -Begasung um den Faktor 200 auf mRNA-Ebene hochreguliert wurde. Diesen Defensinen scheint eine wichtige Funktion in der Speicherung von Schwefel sowie in der antimikrobiellen Abwehr von Pathogenen zuzukommen (siehe unten).

Erhöhte SO_2 -Konzentrationen an natürlichen Standorten

Besonders interessant ist die Untersuchung der Entgiftungsreaktion von Pflanzen an natürlichen Standorten mit dauerhaft erhöhten SO_2 -/ H_2S -Konzentrationen. Küstenbereiche unserer Weltmeere zeigen eine erhöhte S-Belastung in der Atmosphäre, die u. a. auf den hohen Sulfatgehalt des Meerwassers zurückzuführen ist, das als *sea spray* in die küstennahe Atmosphäre gelangt. Viele marine Algen und das Phytoplankton produzieren zudem eine schwefelhaltige Verbindung namens Dimethylsulfoniopropionat (DMSP). DMSP dient diesen Organismen unter anderem als Osmolyt, um den osmotischen Druck in ihren Zellen zu regulieren. Wenn DMSP abgebaut wird – beispielsweise durch die Zersetzung von totem Phytoplankton – entsteht Dimethylsulfid (DMS) als flüchtige Schwefelver-

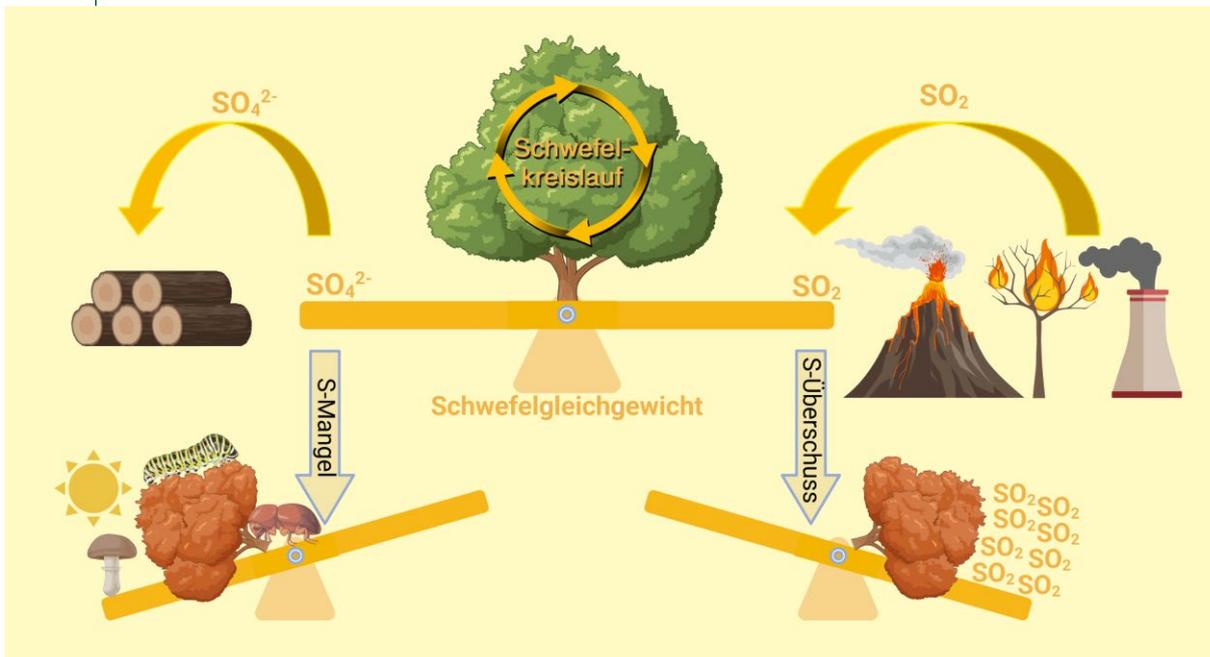
bindung. Der Abbau von DMS erfolgt über verschiedene Radikalreaktionen hauptsächlich zu Dimethylsulfoxid (DMSO) und Methansulfonsäure (MSA) sowie zu Schwefeldioxid (SO_2). Ein weiterer mikrobieller Abbauweg führt zur Produktion von Schwefelwasserstoff (H_2S). Schätzungen zufolge werden jährlich etwa 20–30 Millionen Tonnen Schwefel in Form von DMS aus den Ozeanen in die Atmosphäre freigesetzt – im Vergleich dazu liegen die anthropogen bedingten Schwefelemissionen aktuell und global bei etwa 50–100 Millionen Tonnen Schwefel pro Jahr. Auch einige Bodentypen wie die semisubhydrischen Salzmarschböden setzen im jahreszeitlichen Verlauf erhebliche Mengen an H_2S frei [16]. Daneben können vor allem im Bereich von Vulkanen oder seismisch aktiven Zonen, die durch das Vorkommen von Fumarolen oder Sulfataren gekennzeichnet sind, die Schwefelwerte in der Luft zum Teil erhebliche Konzentrationen annehmen. Schwefel wird dann häufig in Form des entströmenden Schwefelwasserstoffs (H_2S) mit dem typischen Geruch nach faulen Eiern wahrgenommen.

In Europa sind es vor allem Standorte in Italien (z. B. der Vesuv, der Ätna, die Phlāgräischen Felder in der Nähe von Neapel und die Liparischen Inseln, Abbildung 3) oder die Vulkane auf Island, die einen deutlichen S-Ausstoß aufweisen. Global sind die Vulkane Indonesiens oder auf dem südamerikanischen Kontinent interessante Untersuchungsstandorte. Probenahmen an solchen Standorten sind eine logistische Herausforderung, da sie den Einsatz von SO_2 -Messgeräten, Zentrifugen, Notstromaggregaten, Pflanzensammelbehältern und zahlreichem Kleinstequipment erfordern, um das Verhalten der Pflanzen vor Ort und die Reaktion des Materials dann im Labor zu studieren [17]. Untersuchungen auf der Insel Vulcano und auf den Phlāgräischen Feldern zeigten, dass die SO_2 -Entgiftung als ein komplexes Netzwerk einer Vielzahl von Reaktionen anzusehen ist, wobei die Assimilation durch Reduktion und die Entgiftung durch Oxidation und eine entsprechende Einlagerung der Zwischen- und Endprodukte (z. B. in der Vakuole) in einem besonderen Gleichgewicht zueinanderstehen.

Die globale Klimaveränderung bringt eine weitere Schwefelquelle in den Fokus solcher Untersuchungen. In den letzten Jahren wurden weltweit große Flächen durch Wald-, Busch- oder Moorbrände vernichtet, bei denen durch die entstehenden Rauchgase die SO_2 -Konzentration kurzfristig erheblich ansteigen kann und dann als stechend riechendes Gas auch für Menschen deutlich wahrnehmbar ist. Für Deutschland haben uns u. a. der Moorbrand in Meppen 2018 und der Waldbrand in Lübtheen 2019 die dramatischen Konsequenzen von Trockenstress und ansteigenden Temperaturen deutlich vor Augen geführt. Die durch den Wind transportierten Rauchgase waren teilweise noch über hunderte von Kilometern zu bemerken und haben damit auch Pflanzen über große Distanzen zu diesen Bränden beeinflusst. Die Untersuchung von Pflanzenproben bei diesen Ereignissen zeigte für die



ABB. 3 SO_2 -ausstoßende Sulfataren auf den Phlāgräischen Feldern bei Pozzuoli (Italien).

ABB. 4 | EINFLUSS VON SCHWEFEL AUF DIE VITALITÄT VON PFLANZEN


Das Schwefelgleichgewicht von Pflanzen ist entscheidend für ihre Vitalität. In einem intakten Ökosystem Wald befindet sich Schwefel in einem ständigen Kreislauf, so dass ausreichend Schwefel für ein gesundes Wachstum vorhanden ist. Wird dieses Gleichgewicht jedoch durch die Entnahme von Holz gestört, fehlt dem Ökosystem langfristig Schwefel, wodurch zuerst die schwefelintensive Stresstoleranz abnimmt. Pathogene und Herbivore können Bäume leichter schädigen und im Extremfall einen Wald sogar zum Absterben bringen. Aber auch ein Übermaß an Schwefelverbindungen durch Luftschadstoffe aus natürlichen oder anthropogenen Quellen bringt die Wälder aus dem Gleichgewicht und kann zum Absterben durch Sulfitolyse oder saurem Regen führen.

beiden nah verwandten Baumarten Buche und Eiche deutliche Unterschiede in der Reaktion auf das Schadgas. Eichen sind mit einer dauerhaft erhöhten Sulfitoxidaseaktivität offensichtlich vorbereitet auf den Stress einer erhöhten SO₂-Konzentration, während Buchen dagegen spontan und sehr schnell auf einen Anstieg reagieren [18].

Schwefelmangel in Europa

Die allgemeine Situation in Europa ist jedoch aktuell eine andere. Durch effiziente Rauchgasentschwefelungsanlagen, den Wechsel zu S-freien Kraftstoffen und viele weitere Maßnahmen zur Luftreinhaltung sind die Schwefelkonzentrationen in der Atmosphäre extrem niedrig geworden und zeigen in weiten Teilen Europas SO₂-Konzentrationen im unteren ppb-Bereich (0 bis 2 ppb). Nur an wenigen Tagen und besonders im Winter können bedingt durch die Nutzung von Holz oder Braunkohlebriketts in privaten Haus-Feuerungsanlagen SO₂-Werte von 10 bis 15 ppb gemessen werden. Für Deutschland hat das Umweltbundesamt von 1990 bis 2022 einen Rückgang der Schwefeldioxidemissionen von 5,5 auf nur 0,25 Millionen Tonnen (Mio. t) berechnet. Das sind ca. 95 Prozent weniger Schwefel in der Atmosphäre. Auf den ersten Blick klingt dies nach einem großartigen Erfolg menschlichen Handelns für unsere Natur.

Die Realität ist jedoch komplexer. In einem ungestörten Ökosystem werden Nährstoffe in einem dauerhaften Kreislauf gehalten, anders als in einer durch uns Menschen genutzten Umwelt (Abbildung 4). In der Landwirtschaft wird mindestens einmal pro Jahr ein Großteil der Biomasse aus diesem Kreislauf entnommen. Im Prinzip gilt dies ebenso für forstlich genutzte Wälder, auch wenn die Zeiträume für die Biomasseentnahme deutlich größer sind. Mit dieser Entnahme wird eine Vielzahl von Makro- und Mikroelementen aus dem natürlichen Kreislauf entfernt. Um die Fruchtbarkeit des Bodens langfristig zu erhalten, wird insbesondere in der Landwirtschaft dieses Missverhältnis schon seit langem über eine gezielte Düngung ausgeglichen. Dabei standen historisch betrachtet zunächst organische Dünger (z. B. Mist, Gülle, Kompost), heute dagegen primär künstliche Mineraldünger im Vordergrund, wobei insbesondere die Komponenten Stickstoff, Phosphor, Kalium, Calcium und Magnesium zugeführt werden. Ende der 1980er Jahre des letzten Jahrhunderts wurde zeitgleich mit Einführung der Rauchgasentschwefelung und weiterer Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität auf landwirtschaftlichen Flächen immer häufiger ein Mangel an Schwefel festgestellt – die kontinuierliche S-Zufuhr über die Atmosphäre existierte nicht mehr. Insbesondere für Pflanzen mit einem hohen S-Bedarf (z. B. bei Kreuzblütengewächsen wie

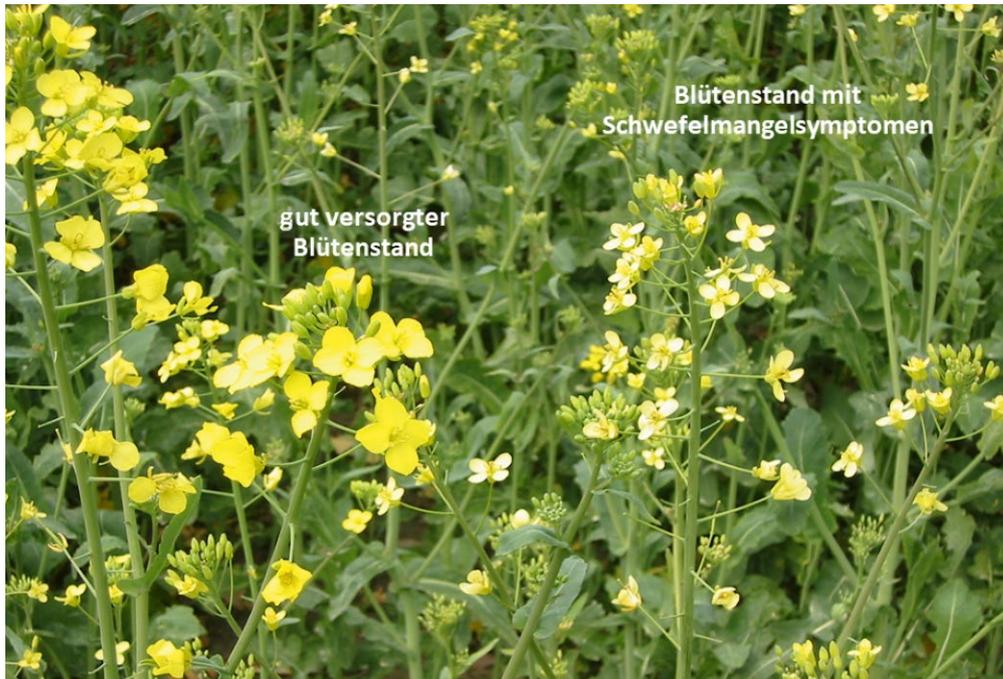


ABB. 5 Blütenstände von Rapspflanzen unterschiedlicher Schwefelversorgung. Foto: E. Bloem (JKI).

Raps) war der Mangel des Makronährstoffs deutlich sichtbar. Bei Raps hatten die Blüten dann nicht mehr die markante gelbe Farbe, sondern blieben deutlich heller (z. T. fast weiß, Abbildung 5) und kleiner. Diese Farbänderung war für Bienen ein fatales Signal – denn diese Blüten wurden vermutlich als bereits bestäubt erkannt und damit nicht mehr angefliegen, was zu Ernteverlusten führte [19].

Auch für die menschliche Ernährung hat dieses Thema eine besondere Relevanz, da es einen Zusammenhang zwischen Schwefelmangel und der Entstehung von Acrylamid in Lebensmitteln gibt [20]. Acrylamid ist eine potenziell krebserregende Verbindung, die sich bei der Zubereitung von stärkehaltigen Lebensmitteln bei hohen Temperaturen (über 120 °C) bildet, z. B. beim Backen, Braten oder Frittieren. Es entsteht durch die Maillard-Reaktion, bei der Zucker und Aminosäuren – insbesondere Asparagin – miteinander reagieren. Ein Mangel an Schwefel kann dazu führen, dass die Pflanze geringere Mengen der schwefelhaltigen Aminosäuren Cystein und Methionin produziert und stattdessen vermehrt nicht-schwefelhaltige Aminosäuren wie Asparagin ansammelt. Wenn nun Lebensmittel aus Pflanzen, die unter Schwefelmangel gelitten haben, erhitzt werden, ist die Konzentration von Asparagin höher. Dies führt dazu, dass bei der Maillard-Reaktion mehr Acrylamid gebildet wird. Daher kann Schwefelmangel in Pflanzen indirekt zu einer höheren Acrylamidbelastung in Lebensmitteln beitragen, was gesundheitlich bedenklich ist.

Heute ist die Zufuhr von Schwefel in der Landwirtschaft gängige Praxis: in Form von schnell wirkenden mineralischen Sulfatdüngern über den Boden oder durch den Einsatz von Bittersalzen und elementarem Schwefel über eine Blattdüngung bei akutem Mangel. Dabei geht es

nicht nur um die Blütenfarbe bei Raps. Die Bedeutung von Schwefel für die Pflanze ist viel größer. Zahlreiche mit der Pathogenabwehr oder Stressbewältigung in Verbindung stehende Moleküle enthalten den dafür essentiellen Schwefel [21]. Glucosinolate sind hochspezifische Abwehrmoleküle der Kreuzblütengewächse. Sie wirken gegen zahlreiche phytophage Insekten und verleihen diesen Gewächsen den typischen scharfen Geschmack. Ohne Schwefel gäbe es auch kein Glutathion (GSH), ein Tripeptid, das aus den drei Aminosäuren Glutaminsäure, Cystein und Glycin gebildet wird. GSH zählt zu den wichtigsten Antioxidantien und ist in allen Zellen in z. T. hohen Konzentrationen vorhanden. Pflanzliche Defensine (PDF) sind kleine aus 48 bis 54 Aminosäuren bestehende Proteine [22]. Die Besonderheit der PDFs ist ihr sehr hoher Cysteinanteil. In der

Regel bilden acht schwefelhaltige Aminosäuren vier Disulfidbrücken und verleihen dem Molekül eine globuläre und extrem stabile Struktur. Der Wirkmechanismus der PDFs ist mannigfaltig. Eine spezifische Reaktion der über 300 unterschiedlichen Defensine oder defensinartige Proteine bei *A. thaliana* auf unterschiedliche Stressoren wie Pilz- oder Bakterieninfektion, Trockenstress, Schwermetallvorkommen etc. zeigt die große Bedeutung dieser Moleküle. Dabei ist der Wirkmechanismus noch nicht vollständig verstanden. So wird z. B. diskutiert, dass die PDFs in den Membranen von Pilzen oder Bakterien durch gezielte Einlagerung die Bildung von Poren auslösen, die das Auslaufen der fremden Zelle und damit ein Absterben des Angreifers bewirken. Andere Defensine können Enzyme blockieren oder die Genregulation verändern.

Bereits Mitte der 1990er Jahre wurde die Bedeutung des Schwefels auf die Pflanzengesundheit im Bereich der Landwirtschaft umfassend untersucht und mit dem Akronym SiR für Schwefel-induzierte Resistenz beschrieben [23]. Mit dem Auftreten von Schwefelmangelsymptomen wurde zeitgleich auch ein zunehmender Befall mit pilzlichen Erregern festgestellt. So entwickelte Raps beispielsweise häufig die Weißfleckigkeit (*Pyrenopeziza brassicae*). Auch die Infektionsrate und Befallsstärke von Kartoffeln mit *Rhizoctonia solani* weist einen Zusammenhang mit der Schwefelversorgung auf [24]. In Gefäßversuchen konnte der Zusammenhang zwischen der Schwefelversorgung und Befallsstärke für viele verschiedene Kulturen und Pathosysteme nachgewiesen werden. Aber während eine gute Schwefelversorgung die Infektion unter kontrollierten Bedingungen im Gefäßversuch um bis zu 50 Pro-

zent zu verringern vermochte, wurde in Feldversuchen nur eine Effizienz zwischen 17–25 Prozent erzielt. Heute gibt es in der Landwirtschaft klare Düngeempfehlungen für Schwefel, die neben der Ertragswirkung dieser Funktion des Schwefels Rechnung tragen.

Schlussfolgerung und Ausblick auf aktuelle Forschungsprojekte

Nach vielen Jahrzehnten, in denen Schwefel durch die Wirkung des Sauren Regens im Wald als Fluch angesehen wurde, könnte man durch die Schwefel-induzierte Stärkung der Abwehrkräfte von Bäumen nun von einem Segen reden [25]. Die aktuellen Waldzustandsberichte zeichnen ein unerfreuliches Bild: Viele Baumarten zeigen starke Kronenverlichtungen und steigende Absterberaten – in vielen Fällen durch Krankheiten und Schadinsekten. Neben dem durch Hitze und Dürre entstehenden physiologischen Stress könnte hier auch der Einfluss von einem unausgewogenen S-Haushalt in Waldökosystemen eine Rolle spielen (Abbildung 6). Die zeitliche Verzögerung gegenüber landwirtschaftlicher Nutzpflanzen ist damit zu erklären, dass das Wachstum der Bäume deutlich langsamer ist und eine Entnahme von Biomasse in deutlich größeren Abständen erfolgt. Außerdem weisen die häufig sauren Waldböden eine Sulfatadsorption auf, die in gekalkten landwirtschaftlichen Böden kaum von Bedeutung ist. Adsorbiertes Sulfat kann in Waldböden langsam wieder freigesetzt werden – eine Schwefelnachlieferung, die wir in landwirtschaftlichen Böden selten haben. Die möglichen Auswirkungen der Biomasseentnahme sind letztlich jedoch die gleichen: Die Vitalität der Bäume verschlechtert sich zunehmend; die Anfälligkeit gegenüber biotischen und abiotischen Stressoren wird größer und kann bis zum Absterben von Bäumen führen. Die Problematik der Schwefel-induzierten Resistenz scheint somit auch in unseren einheimischen Forsten angekommen zu sein.

In natürlichen, vom Menschen unberührten Ökosystemen ist Schwefelmangel dagegen eher selten – abgestorbene Bäume verrotten an Ort und Stelle und geben sämtliche Nährstoffe für die nachfolgende Generation wieder frei. Damit stellt sich die Frage, ob eine gezielte Schwefelapplikation unseren heute bereits durch den globalen Klimawandel deutlich in Mitleidenschaft gezogenen Wäldern helfen könnte, das Schwefelgleichgewicht wieder herzustellen und somit eine Regeneration des natürlichen Zustandes zu erreichen. Diese Vorgehensweise ist auch mit den nachhaltigen PEFC-Waldstandards¹ vereinbar und kann damit die natürliche Toleranz bzw. Resistenz gegen diverse Stressoren wiederherstellen (Abbildung 4).

Prof. Axel Göttlein von der Technischen Universität München – Wissenschaftszentrum Weihenstephan – Fachgebiet für Waldernährung und Wasserhaushalt hat deshalb

¹ PEFC (Programme for Endorsement of Forest Certification Schemes) ist ein Programm für die Anerkennung von Forstzertifizierungssystemen, also eine Art weltweiter „Wald-TÜV“. Holz- und Papierprodukte mit dem PEFC-Siegel stammen aus ökologisch, ökonomisch und sozial nachhaltiger Waldbewirtschaftung.



ABB. 6 Abgestorbene Buchen im Jahr 2024 östlich von Braunschweig auf einem Boden mit geringer Schwefelverfügbarkeit.

bereits im Jahr 2020 über die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) Projektmittel eingeworben (Förderkennzeichen: 22026518), um über die Entwicklung der Schwefelversorgung in Deutschlands Wäldern zu forschen. Unter dem Akronym „S_im_Wald“ hat das Projekt zum Ziel, den Kenntnisstand zur baumartenspezifischen S-Verfügbarkeit und zum S-Kreislauf in Deutschlands Wäldern im Hinblick auf eine nährstoffnachhaltige Waldwirtschaft zu erweitern und zu verbessern. Aktuell wurde hierzu auch ein Verbundprojekt mit Arbeitsgruppen aus der Technischen Universität in Braunschweig, dem Julius-Kühn-Institut, den Niedersächsischen Landesforsten, einem lokalen Düngemittelhersteller und verschiedenen assoziierten Partnern mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die FNR etabliert (Förderkennzeichen: 2223NR016A-C), um die Verbesserung der Resilienz einheimischer Baumarten gegen Klimawandel- verursachten Stress durch Nutzung der Schwefel-induzierten Resistenz/Toleranz (SiRT) zu analysieren. Mit diesen Untersuchungen sollen die Schwefelkonzentrationen ermittelt werden, die eine bessere Gesundheit besonders von Buchen, Eichen und Kiefern – als wichtige Baumarten mitteleuropäischer Wälder – ermöglichen. Als zentrale Komponente der pflanzlichen Stressabwehr stehen dabei insbesondere auch die Funktion der oben genannten pflanzlichen Defensine und ihre Bedeutung für die Resilienz einheimischer Baumarten im Vordergrund der Arbeiten. Könnte die Forstwirtschaft aus entsprechenden wissenschaftlichen Untersuchungen eine praktische Anwendung ableiten? Zu hoffen ist es: Dem Wald geht es derzeit nicht gut, Schadinsekten und Krankheiten machen ihm zu schaffen und jede Hilfe täte ihm wohl.



Lese-Tipp:
Tambora und das Jahr ohne Sommer. Wie ein Vulkan die Welt in die Krise stürzte. Wolfgang, Behringer, dtv Verlag, München, 2018, 400 S., 24,95 Euro, ISBN 978-3-42334-937-6.

Zusammenfassung

Schwefel ist ein essentielles Makroelement, das in zahlreichen biologischen Prozessen eine wichtige Rolle spielt. Er ist als bioverfügbares Sulfat in Mineralien wie Gips vorhanden, wird aber ebenfalls gasförmig durch menschliche Aktivitäten, marine Organismen, Vulkanausbrüche oder Waldbrände in Form von Schwefeldioxid (SO_2) freigesetzt. Nachdem über viele Jahre hinweg bedingt durch die Nutzung fossiler Brennstoffe die SO_2 -Konzentration in auch für Pflanzen toxischen Bereichen lag und großflächig zu einem Waldsterben führte, sind heutige SO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre zumindest in Europa nahezu bei null. Der dadurch geringere Schwefeleintrag, bei gleichzeitigem Schweflexport durch Holzentnahme in bewirtschafteten Wäldern führt zu einer Mangelsituation und verringerten Resilienz einheimischer Bäume, da Schwefel für eine Vielzahl von Abwehrreaktionen gegen biotische Stressoren unerlässlich ist. In der Landwirtschaft ist Schwefelmangel mit seiner Auswirkung auf die Pflanzengesundheit bekannt und die Schwefeldüngung ist heutzutage gängige Praxis. Dieses Phänomen scheint nun auch in unseren Wäldern angekommen zu sein und viele Schadsymptome von Bäumen können möglicherweise auf eine nicht-ausreichende Schwefelzufuhr zurückgeführt werden. Aus diesem Grund werden Überlegungen diskutiert, auch hier gezielt Schwefelapplikationen zur Regeneration der natürlichen Schwefelversorgung zu nutzen. Deshalb könnte zukünftig analog zur Landwirtschaft die natürliche Resilienz unserer einheimischen Baumarten zumindest teilweise wiederhergestellt werden. Schwefel im Wald entwickelte sich somit in den letzten Jahrzehnten von einem Fluch zum Segen.

Summary

The problematic case sulphur – either too much or too little

Sulphur is an essential macro-element that plays an important role in numerous biological processes. It is present as bioavailable sulfate in minerals such as gypsum, but is also released in gaseous form by human activities, marine organisms, volcanic eruptions or forest fires in the form of sulphur dioxide (SO_2). For many years, the use of fossil fuels caused SO_2 concentrations that were even toxic to plants and led to a widespread forest dieback, while today's SO_2 concentrations in the atmosphere are almost zero, at least in Europe. Therefore, this reduced supply of sulphur and at the same time the export of sulphur because of timber harvesting in managed forests has led to a shortage situation and a reduced resilience of trees, as sulphur is essential for a variety of defence reactions against biotic stressors. In agriculture, the lack of sulphur and its impact on plant health is known and today sulphur fertilization is common practice. Apparently, this phenomenon has arrived in our forests as well and many damage symptoms of trees can possibly be traced back to an insufficient uptake of sulphur. That is why ideas are being discussed as to the use of systematic sulphur applications for the regeneration of the na-

tural supply of sulphur. Therefore, in analogy to agriculture, the natural resilience of our native trees could be restored in the future – at least partly. As a consequence, sulphur in the forest has turned from a curse to a blessing during the last decades.

Schlagworte:

Pflanzlicher Schwefelmetabolismus, Waldsterben, Schwefeldioxid, Sulfat, Stress, Schwefel-induzierte Resistenz

Literatur

- [1] R. Hell, H. Rennenberg (1998). The Plant Sulphur Cycle. Sulphur Agroecosystems (S. 135–173). Dordr. Springer Netherlands.
- [2] E. Bloem et al. (2012). Schwefel-Induzierte Resistenz: Ein Dünger, der Pflanzen gesund erhält. Landwirtschaft ohne Pflug (LOP) 3, 21–24.
- [3] T. Leustek, K. Saito (1999). Sulfate Transport and Assimilation in Plants. Plant Physiol. 120, 637–643, <https://doi.org/10.1104/pp.120.3.637>.
- [4] E.-D. Schulze (1989). Air Pollution and Forest Decline in a Spruce (*Picea abies*) Forest. Science 244, 776.
- [5] P. Schütt, E. B. Cowling (1985). Waldsterben, a General Decline of Forests in Central Europe: Symptoms, Development and Possible Causes. Plant Dis. 69, 548–558.
- [6] World Health Organization WHO Global Air Quality Guidelines (2021). Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. World Heal. Organ. 9789240034228, 1–360.
- [7] F. Malcheska et al. (2017). Drought-Enhanced Xylem Sap Sulfate Closes Stomata by Affecting ALMT12 and Guard Cell ABA Synthesis. Plant Physiol. 174, 798–814, <https://doi.org/10.1104/pp.16.01784>.
- [8] M. D. Thomas et al. (1936). Some Chemical Reactions of Sulphur Dioxide after Absorption by Alfalfa and Sugar Beets. Plant Physiol. 19(2), 212–226.
- [9] H. Pfanz (1991). The Possible Role of Apoplastic Peroxidases in Detoxifying the Air Pollutant Sulfur Dioxide. Mol. Physiol. Asp. Plant Peroxidases, 401–417.
- [10] T. Eilers et al. (2001). Identification and Biochemical Characterization of *Arabidopsis thaliana* Sulfite Oxidase: A New Player in Plant Sulfur Metabolism. J. Biol. Chem. 276, 46989–46994, <https://doi.org/10.1074/jbc.M108078200>.
- [11] K. Nowak et al. (2004). Peroxisomal Localization of Sulfite Oxidase Separates It from Chloroplast-Based Sulfur Assimilation. Plant Cell Physiol. 45, 1889–1894, <https://doi.org/10.1093/pcp/pch212>.
- [12] R. Hänsch et al. (2006). Plant Sulfite Oxidase as Novel Producer of H_2O_2 : Combination of Enzyme Catalysis with a Subsequent Non-Enzymatic Reaction Step. J. Biol. Chem. 281, 6884–6888, <https://doi.org/10.1074/jbc.M513054200>.
- [13] D. Hamisch et al. (2012). Impact of SO_2 on *Arabidopsis thaliana* Transcriptome in Wildtype and Sulfite Oxidase Knockout Plants Analyzed by RNA Deep Sequencing. New Phytol. 196, 1074–1085, <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04331.x>.
- [14] G. Brychkova et al. (2007). Sulfite Oxidase Protects Plants against Sulfur Dioxide Toxicity. Plant J. 50, 696–709, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3113X.2007.03080.x>.
- [15] C. K. Baillie et al. (2019). Apoplastic Peroxidases Enable an Additional Sulphite Detoxification Strategy and Act as First Line of Defence upon Exposure to Sulphur Containing Gas. Environ. Exp. Bot. 157, 140–150, <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.10.006>.
- [16] E. Bloem et al. (1995). Jahreszeitliche Schwefeldynamik semisubhydrischer Salzmarschen. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkd. 158, 251–256, <https://doi.org/10.1002/jpln.19951580307>.

- [17] C. K. Baillie et al. (2018). Surviving Volcanic Environments-Interaction of Soil Mineral Content and Plant Element Composition. *Front. Environ. Sci.* 6, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00052>.
- [18] J. N. Weber et al. (2021). Impact of Wildfires on SO₂ Detoxification Mechanisms in Leaves of Oak and Beech Trees. *Environ. Pollut.* 272, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116389>.
- [19] S. Haneklaus et al. (2005). Relationship between Sulfur Deficiency in Oilseed Rape (*Brassica napus* L.) and Its Attractiveness for Honeybees. *Landbauforsch. Völknerode, Spec. Issue* 283 37–43.
- [20] N. Muttucumaru et al. (2006). Formation of High Levels of Acrylamide during the Processing of Flour Derived from Sulfate-Deprived Wheat. *J. Agric. Food Chem.* 54, 8951–8955, <https://doi.org/10.1021/jf0623081>.
- [21] B. Du et al. (2024). Strategies of Plants to Overcome Abiotic and Biotic Stresses. *Biol. Rev.* 99, 1524–1536, <https://doi.org/10.1111/brv.13079>.
- [22] B. De Coninck et al. (2013). Modes of antifungal action and in planta functions of plant defensins and defensin-like peptides. *Fungal Biology Reviews* 26(4), 109–120.
- [23] E. Schnug et al. (1995). Sulfur Supply and Stress Resistance in Oilseed Rape. *Proc. 9th Int. Rapeseed Congr.* 1, 229–231, Cambridge.
- [24] H. Klikocka et al. (2005). Influence of Sulfur Fertilization on Infection of Potato Tubers with *Rhizoctonia solani* and *Streptomyces scabies*. *J. Plant Nutr.* 28, 819–833, <https://doi.org/10.1081/PLN-200055547>.
- [25] A. Göttlein et al. (2020). Schwefel – Vom Überschuss zum Mangel. *AFZ-DerWald*, 31–33.

Verfasst von:



Dr. David Kaufholdt ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Pflanzenbiologie der Technischen Universität Braunschweig. Er ist Koordinator des FNR-Verbundprojektes SiRT und arbeitet zu molekularen Stressmechanismen in Wäldern und der Rolle von Schwefel für das pflanzliche Immunsystem. Seine akademische Laufbahn begann mit einem Biologiestudium an der TU Braunschweig, wo er seinen Master mit dem Schwerpunkt Zellbiologie abschloss. An seine Promotion zum Thema „Molybdän-Cofaktor-Biosynthese-Netzwerk“ schloss er eine Habilitation unter Prof. Hänsch an, welche sich mit den Themenbereichen Molybdäntransport in Arabidopsis sowie mit der Rolle von Defensinen in der Stressantwort von Wäldern befasst.



PD Dr. Elke Bloem ist wissenschaftliche Direktorin am Julius Kühn-Institut (JKI) in Braunschweig, wo sie sich auf Pflanzenphysiologie und Pflanzenernährung spezialisiert hat. Sie studierte Biologie an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg und promovierte anschließend im Bereich Pflanzenernährung. Ihre Forschung konzentriert sich auf die Wechselwirkungen von Pflanzen mit ihrer Umwelt, insbesondere auf die Rolle von Schwefel in Pflanzenernährung und Pflanzenabwehrmechanismen. Sie war maßgeblich an der Erforschung der Schwefel-induzierten Resistenz (SiR) in Agrarpflanzen beteiligt. Am JKI leitet sie Forschungsprojekte, die darauf abzielen, die Widerstandsfähigkeit von Nutzpflanzen gegenüber Stressfaktoren wie Nährstoffmangel und Umweltveränderungen zu verbessern. Sie ist Arbeitsgruppenleiterin am Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde des JKI und seit 2022 Privatdozentin an der TU Braunschweig.



Prof. Dr. Henrik Hartmann ist seit 2022 Leiter des Instituts für Waldschutz am Julius Kühn-Institut (JKI) in Quedlinburg und erforscht die Auswirkungen von Schädlingen und Krankheiten auf Wälder, besonders in Zeiten des Klimawandels. Er studierte Forstwissenschaft und promovierte in Waldökologie an den kanadischen Universitäten von Neu-Braunschweig und Quebec. Von 2014 bis 2022 leitete er am Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena eine Forschungsgruppe, die Stressverhalten in Bäumen im Klimawandel untersuchte. Er ist zudem Professor für Waldschutz an der Georg-August-Universität Göttingen. Seine Forschung konzentriert sich auf das Wechselspiel von abiotischen und biotischen Faktoren auf die physiologischen Prozesse von Bäumen. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Kohlenstoffdynamik, insbesondere der für die Abwehr von Bäumen wichtigen Sekundärmetabolite. Zudem untersucht er, wie Eigenschaften von Wäldern – wie z. B. Struktur- und Artenvielfalt – zur Stärkung der Resilienz des Waldes im Klimawandel gefördert werden können.



Prof. Dr. Heinz Rennenberg war bis zu seiner Pensionierung 2017 Leiter der Professur für Baumphysiologie an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Aktuell leitet er das Center of Molecular Ecophysiology (CMEP) an der Southwest University in Chongqing (China). Er studierte Biologie an der Universität Köln, wo er auch promovierte. Seine Dissertation befasste sich mit den biochemischen Grundlagen der Synthese von Glutathion in Pflanzen, einem Peptid von zentraler Bedeutung für die Stressabwehr. Nach der Promotion absolvierte er einen Forschungsaufenthalt am Plant Research Laboratory der Michigan State University in East Lansing (USA). Anschließend habilitierte er sich in Köln, erlangte dort eine Assistenzprofessur und wechselte an das Fraunhofer Institut für Atmosphärische Umweltforschung in Garmisch-Partenkirchen (heute: Karlsruhe Institut für Technologie, Campus Alpin), bevor er in Freiburg eine Professur für Baumphysiologie annahm. Seine Forschung konzentriert sich auf die physiologischen und biochemischen Reaktionen von Bäumen und Waldökosystemen auf abiotische Stressfaktoren wie Schwermetallbelastung, Trockenheit und Nährstoffmangel. Besonders untersucht er die Rolle von Stickstoff- und Schwefelverbindungen im pflanzlichen Stoffwechsel unter Stressbedingungen sowie die Anpassungsmechanismen von Bäumen an Umweltveränderungen.



Prof. Dr. Robert Hänsch ist seit 2010 Professor für Pflanzenbiologie an der Technischen Universität Braunschweig und leitet die Arbeitsgruppe für Stressphysiologie und Bioimaging. Darüber hinaus ist er seit 2019 Gastprofessor am Center of Molecular Ecophysiology (CMEP) an der Southwest University in Chongqing (China). Sein akademischer Werdegang begann an der Universität Leipzig mit dem Studium der Biologie. Seine Dissertation befasste sich mit der In-situ-Elektrotransformation von *Hordeum vulgare*. Er habilitierte sich 2007 in Pflanzenbiologie und Zellbiologie mit dem Themenschwerpunkt Schwefelentgiftung in Pflanzen. Seine aktuelle Forschung konzentriert sich auf Lokalisations- und Interaktionsstudien via Bioimaging im Molybdänstoffwechsel sowie die physiologischen Reaktionen von Pflanzen (insbesondere Bäume) auf biotische und abiotische Stressfaktoren. Zudem engagiert er sich in zahlreichen akademischen Kommissionen und Verbänden, z. B. als Mitglied im Präsidium des VBIO.

Korrespondenz

Prof. Dr. Robert Hänsch
Institut für Pflanzenbiologie
TU Braunschweig
Humboldtstraße 1
38106 Braunschweig
E-Mail: r.haensch@tu-bs.de

Warum der Schwund an Biodiversität alle betrifft und wir doch zu wenig handeln

Der Naturverlust hat jedes gesunde Maß überschritten

KATRIN BÖHNING-GAESE | FRIEDERIKE BAUER

Morgenstimmung im Kakamega Forest, Kenia. Der Kakamega Forest ist einer der letzten Regenwälder in Ostafrika; er beherbergt eine außergewöhnliche Fauna und Flora und ist stark gefährdet. Foto: Nina Farwig.

Wir stehen an einem Wendepunkt der Erdgeschichte – und doch ignorieren wir ihn. Die Hälfte aller Ökosysteme wurde bereits massiv verändert; eine von geschätzten acht Millionen Arten ist vom Aussterben bedroht. Seit kurzem gibt es auf der Erde mehr vom Menschen hergestelltes Material als Biomasse, nämlich Stoffe wie Beton, Asphalt, Metall, Glas oder Plastik. Das Heimtückische daran ist: Der Prozess dieses Naturverlustes vollzieht sich schleichend; es ist mehr ein stilles Sterben. Nichtsdestotrotz handelt es sich um eine Verschiebung von großer Tragweite, die bisher nicht genug Aufmerksamkeit erlangt. Noch ist Biodiversität kein gleichwertiger Teil der Nachhaltigkeitsdebatte.

Dieser Artikel basiert auf folgendem Buch der beiden Autorinnen. 256 Seiten, 22,00 € ISBN 978-3-60898-669-3. Auch als E-Book erhältlich.



Bis vor rund dreißig Jahren zählten Indiens Geier zu den häufigsten Greifvögeln der Welt – und hatten über Jahrtausende hinweg die Funktion einer Art Gesundheitspolizei: Sie fraßen Aas, darunter auch verendete „heilige“ Kühe, die sich aus religiösen Gründen zahlreich auf Indiens Straßen finden. Dies änderte sich, als in den Neunzigerjahren das Schmerzmittel Diclofenac in der Tiermedizin populär wurde. Schon bald setzten es Milchbäuer/-innen und Halter/-innen von Zug- und Lastentieren ein, weil das Medikament sehr kostengünstig ist. Allerdings hat es auch einen fatalen Nebeneffekt: Es löst bei Geiern Nierenversagen aus und ist für sie so giftig wie Zyankali für den Menschen. Innerhalb von 15 Jahren sanken die Bestände dreier Geierarten in Indien um mehr als 95 Prozent. Infolgedessen wurden Kuhkadaver nicht mehr wie früher auf natürlichem Wege beseitigt.

Zugleich nahm die Zahl verwilderter Hunde zu, weil sie mehr Aas fressen konnten. Da Hunde auch Menschen beißen, kam es zu einem deutlichen Anstieg von Tollwutfällen. So hat der Rückgang der Geierpopulationen, der an sich schon beklagenswert wäre, wahrscheinlich auch noch den Tod von fast 50.000 Menschen verursacht. Das Beispiel zeigt, welche Wirkungen schon das Aussterben

ganz weniger Arten mit sich bringen kann. Und es zeigt auch, dass sich Effekte nicht im Vorhinein abschätzen lassen, weil so ein Verlust einer Art eine unvorhergesehene Kettenreaktion auslösen kann.

Kaskadierende Effekte

Noch ein weiteres Beispiel illustriert, wie ein Schaden den nächsten verursachen kann – die Seeotter: Deren Bestände sind im Pazifik innerhalb weniger Jahre deutlich geschrumpft, weil sie von Killerwalen gefressen werden. Dadurch wächst die Population der Seeigel; ihre Biomasse ist bereits um das Achtfache gestiegen, was sich wiederum verheerend auf Tangwälder auswirkt, weil Seeigel diese abweiden und sie dabei völlig zerstören können. Während die Stachelhäuter 1991 rund ein Prozent des Tangbestands abfraßen, waren es nur einige Jahre später bereits fast 48 Prozent. Dabei bilden Tang- oder Kelpwälder wichtige Lebensräume und Nischen für zahllose weitere Pflanzen und Tierarten. Sie gelten als Gegenstücke zu den Regenwäldern an Land und ähnlich wie diese als Hotspots der Artenvielfalt. Sie beherbergen zum Beispiel Algen, Moostierchen, Würmer, Muscheln, Schnecken, Anemonen, Krebse und diverse Fische, die ihre Kinderstube ausschließlich in Tangwäldern haben. Schon Charles Darwin notierte vor über hundert Jahren dazu: „Inmitten der Blätter des Riesentang leben zahlreiche Fische, die nirgendwo sonst Nahrung oder Schutz finden.“

Doch warum fressen Killerwale plötzlich Seeotter, obwohl wahrscheinlich Tausende von Jahren lang hier kein Räuber-Beute-Verhältnis bestand? Die wahrscheinlichste Erklärung ist der drastische Rückgang an Seelöwen und Robben, für die Seeotter plötzlich als Alternativnahrung erhalten mussten. Der Schwund an Robben wiederum hängt mit einem zunehmenden Mangel an Nahrung durch Überfischung und die Erwärmung des Meerwassers aufgrund des Klimawandels zusammen. So kommt eins zum anderen, ohne dass vorher klar gewesen wäre, wie genau sich das Beziehungsgeflecht durch menschlichen Einfluss wandelt und umgestaltet. Solche kaskadierenden Effekte auf Ökosysteme sind angesichts der komplexen Verflechtungen der vielen Arten zu erwarten – und trotzdem im Einzelnen selten vorhersehbar.

Eine fundamentale Umgestaltung der Natur

Wie bei den Geiern in Indien oder den Robben im Meer überformen wir Menschen zunehmend die natürlichen geologischen, ökologischen und atmosphärischen Prozesse auf der Erde – mit extremen Folgen für die Biodiversität und den Erhalt von Natur. Längst ist deshalb die Rede vom Anthropozän, dem Zeitalter der Menschen. Seit den 1950er Jahren erleben wir eine große Beschleunigung, die neben vielen positiven Veränderungen wie besserer medizinischer Versorgung und weniger Hunger auch mit zunehmendem Energieverbrauch, einem fortschreitenden Landnutzungswandel und mit einem Verlust an Biodiversität einhergegangen ist und einhergeht. Im Ergebnis gibt



ABB. 1 Der Katta (*Lemur catta*) ist eine stark gefährdete Art auf Madagaskar. Hauptbedrohung sind Brandrodung für Landwirtschaft und die Übernutzung der Wälder durch Holzkohlegewinnung. Foto: KfW-Bildarchiv / Jonas Wresch.

es dadurch höhere Temperaturen, die andauernde Abholzung von Wäldern und den Schwund an Arten. Dabei hängen alle drei Phänomene auch noch miteinander zusammen, verstärken sich gegenseitig – im Negativen wie im Positiven.

Inzwischen ist jede achte Art vom Aussterben bedroht (Abbildung 1). Tatsächlich liegt die Aussterberate heute mindestens 10- bis 100-mal höher als in den letzten 10 Millionen Jahren. Wir erleben gerade das 6. Massenaussterben der Erdgeschichte; das letzte fand vor gut 60 Mil-

NEUE SERIE „ARTENSCHWUND UND BIODIVERSITÄT“



Der derzeitige, weltweit beobachtbare Artenschwund und die Notwendigkeit, die Biodiversität als Grundlage für unser Leben zu bewahren, sind zu einer dringenden Aufgabe für Wissenschaft, Gesellschaft und Politik geworden. Die Zusammenhänge in der Natur sind meist so komplex und häufig unbekannt, dass die Folgen von Eingriffen und Änderungen oft nicht vorhersehbar sind. Die Serie Artenschwund und Biodiversität soll dazu beitragen, solche Zusammenhänge bekannt zu machen und ihren Einfluss zu verstehen. Die Beiträge befassen sich mit dem Beziehungsgeflecht zwischen Organismen in Ökosystemen, den Ursachen und der Abwendung des Verschwindens von Arten sowie der Bedeutung und Erhaltung der Biodiversität. Achten Sie in den Folgeheften auf das Schmetterlingssymbol.

IN KÜRZE

- Der **Schwund an Biodiversität** hat jedes gesunde Maß überschritten. Wir überformen die Natur in einem nie gekannten Maß.
- Das zieht eine Verschiebung von großer Tragweite nach sich – mit **ernsten und im Detail unübersehbaren Folgen**.
- Dieser Artikel beschreibt, welche Faktoren dafür verantwortlich sind, was jetzt zu tun wäre und warum Biodiversität zu einem **festen Teil der Nachhaltigkeitsdebatte** werden muss.



ABB. 2 Blühende Bergwiesen mit Orchideen sind Ökosysteme mit besonderen Anforderungen. Solche Lebensräume benötigen eine extensive Nutzung durch geringe Beweidung oder maximal zwei Mahden im Jahr; sie dürfen nicht gedüngt werden. Foto: Bernhard Gaese.

lionen Jahren mit dem Verschwinden der Dinosaurier statt. Allerdings hatten die fünf vorangegangenen Fälle natürliche Ursachen. Sie gingen auf Vulkanausbrüche oder Asteroiden-Einschläge zurück. Jetzt ist der Mensch der Grund für den Verlust. Tatsächlich beeinflussen wir als einzelne Art die Natur mit Folgen, die Tausende oder Millionen Jahre in die Zukunft reichen. Selbst wenn wir auf einen Schlag aussterben würden, wäre in Millionen Jahren anhand der Ablagerungsgeschichte der Erde noch erkennbar, dass hier ein außergewöhnliches Ereignis stattgefunden hat: eine fundamentale Umgestaltung der Natur.

Das große Sterben

Das Aussterben von Arten ist dabei der Endpunkt einer unheilvollen Entwicklung. Vorher sinken die Bestände – das geschah in der jüngeren Vergangenheit ganz massiv: In den letzten 50 Jahren sind mehr als zwei Drittel der erfassten Säugetiere, Amphibien, Reptilien, Fische und Vögel verschwunden. Betroffen sind davon nicht nur seltene Arten, sondern mittlerweile auch die häufigsten. In Deutschland zum Beispiel sind in ganzen Regionen sogar Feldlerche, Schwalben, Kiebitze, Rebhühner oder Stare gefährdet – Vögel, die noch vor einigen Jahrzehnten überall anzutreffen waren. Besonders dramatisch ist der Rückgang beim Kiebitz, seit 1980 um 93 Prozent, beim Rebhuhn um 91 Prozent und bei der Turteltaube um 89 Prozent.

Auch der Blick in die weitere Welt zeigt, wie groß das Problem durch diesen Rückgang der Bestände ist: Vom Aussterben bedroht sind nach Angaben der Weltnaturschutzunion (IUCN = *International Union for Conservation of Nature*) derzeit mehr als vierzig Prozent der Amphibienarten, fast vierzig Prozent aller Haie und Hai-Ver-

wandten, etwa ein Drittel der riffbildenden Korallen, der Nadelbäume, knapp ein Drittel der Krustentiere, etwa ein Fünftel der Reptilien und zwölf Prozent aller Vögel. Auch Insekten sind gefährdet, aber hierzu gibt es über Einzelartenkenntnisse hinaus weltweit noch kein klares Bild. Das Heimtückische daran ist: Dieser Prozess vollzieht sich schleichend und für uns nicht direkt spürbar. Anders als beim Klimawandel gibt es keine mess- oder vorhersehbaren Kipppunkte. Es ist mehr ein stilles Sterben, und zwar auf allen drei Ebenen, die Biodiversität ausmachen: bei der Vielfalt der Arten, der Vielfalt innerhalb der Arten und der Vielfalt der Ökosysteme (Abbildung 2).

Das Netz wird brüchig

Das Verschwinden von Arten ist nicht per se beunruhigend. Aussterben gehört zum Leben, auch zur Natur. Tiere und Pflanzen leben in einer sich ständig wandelnden Umwelt. Entweder sie passen sich an oder sie werden von besser angepassten Arten verdrängt. Insofern ist das Auftauchen und Verschwinden von Arten nichts Ungewöhnliches, sondern der Normalfall, und gehört seit jeher zum Lauf der Natur und der Evolution. Allerdings ist die Geschwindigkeit, mit der das gerade geschieht, atemberaubend. Sie bewegt sich außerhalb der langfristigen Beobachtungen und Messungen. Und es ist leider nicht vorhersehbar – siehe die Beispiele Geier und Seeotter –, wie stark und an welcher Stelle sich diese Veränderungen vollziehen. „Alles hängt mit allem zusammen“, lautete die grundlegende Erkenntnis des berühmten Naturforschers Alexander von Humboldt. Allerdings, so möchte man seine Sicht ergänzen, wissen wir zwar, dass alles mit allem zusammenhängt, aber häufig auch heute noch nicht wie – jedenfalls nicht im Einzelnen. Das Zusammenspiel der Natur ist erst in Ansätzen erforscht, deshalb bleiben Prognosen unsicher.

Man könnte daraus den zynischen Schluss ziehen, dass es auf eine Art mehr oder weniger nicht ankommt. Wozu die ganze Pracht? Was macht es schon, wenn beispielsweise die Regenwürmer verschwinden? Wozu braucht man sie überhaupt? Das war tatsächlich lange nicht vollkommen klar. Doch jetzt, da allein in Deutschland ein Drittel der Regenwurmarten auf der roten Liste der bedrohten Arten steht, stellt sich heraus, dass sie sehr wohl einen Nutzen haben: Durch das Graben von Tunnelsystemen lockern und durchlüften sie den Boden und sorgen so dafür, dass Pflanzen wachsen können. Zudem ist ihr Kot ein sehr guter Biodünger. Ihre Ausscheidungen enthalten rund sieben Mal mehr Nährstoffe als normale Gartenerde. Und das ist nur ein Beispiel von Millionen.

Noch lässt sich nicht beziffern, wie viele und welche Arten für das Überleben der Menschen nötig sind, aber es besteht kein Zweifel daran, dass viel gut ist. Denn die Fülle wirkt wie eine „Versicherung“: Versagt eine Art, etwa wegen Trockenheit, Niederschlägen oder neuen Krankheiten, übernimmt eine andere ihre Funktionen – gerade

in Zeiten zunehmender Erderwärmung eine essenzielle Form der Vorsorge und des Schutzes.

Zwar kann man Schlüsselarten benennen: In den Tropen zum Beispiel werden mehr als neunzig Prozent aller Baumarten von Wirbeltieren, im Wesentlichen von Vögeln ausgebreitet. Unter ihnen finden sich ein paar große mit riesigen Schnäbeln, etwa Tukane und Nashornvögel, die auch lange Distanzen fliegen können (Abbildung 3). Sie sind entscheidend als Samenausbreiter und gelten als „Gärtner des Waldes“. Das bedeutet im Umkehrschluss allerdings nicht, dass man scheinbar weniger wichtige Arten erübrigen könnte. Häufig kennen wir ihre Rollen nur nicht oder haben das Wechselspiel mit anderen Arten noch nicht genügend verstanden. Es könnte auch sein, dass sich eine heute unauffällige Art morgen als Schlüsselart und überlebenswichtig herausstellt, weil sie mit weniger Wasser existieren kann oder gegen Pilze besonders resistent ist. Deshalb wäre es fahrlässig, sich auf die Rettung von Top-Arten zu konzentrieren. Das Arche-Noah-Prinzip funktioniert hier leider nicht.

Fast alles kommt aus der Natur

Die Natur selbst wird auch mit weniger Vielfalt auskommen; sie verändert sich dann einfach, sieht anders aus, findet neue Formen des Zusammenwirkens. Die Fülle ist in erster Linie für uns Menschen und unser Überleben wichtig. So bildet die Natur nicht nur einen wichtigen, vielleicht sogar den wichtigsten Puffer gegen die Erderwärmung. Der Klimabeauftragte der Vereinigten Staaten, John Kerry, bezeichnet die Natur in diesem Zusammenhang sogar als die „beste Verteidigungslinie“, die wir haben. Die Natur versorgt uns auch mit fast allem, was wir für unsere Existenz benötigen: Das gilt für sauberes Trinkwasser genauso wie für unsere Nahrung, Kleidung sowie zahlreiche Baustoffe. Auch viele Medikamente haben ihren Ursprung in der Natur: allein drei Viertel aller Antibiotika und zwei Drittel aller Krebsmedikamente.

Zu diesen materiellen Leistungen, von denen wir ganz direkt profitieren, kommen wertvolle nicht-materielle: Die Natur bietet uns Erholung, Gesundheit, Schönheit, aber auch Heimat und Identität. Nicht zuletzt steigert sie unser Wohlbefinden. So hat man festgestellt, dass zehn Prozent mehr Vogelarten in einer Region genauso viel bringen für die Lebenszufriedenheit wie zehn Prozent mehr Einkommen. Das bedeutet: Nicht nur Geld macht glücklich.

All diese Leistungen kann die Natur aber am besten in Vielfalt erbringen. Denn die Biodiversität ist ihr Maschinenraum. Ganz ohne menschliches Zutun sorgt sie zum Beispiel für Bestäubung, Samenausbreitung, Regeneration von Wäldern, natürliche Schädlingsbekämpfung oder für fruchtbare Böden. Allerdings nur, wenn man sie lässt. Genau wie bei einem Fonds gilt auch hier der Portfolioeffekt: Je diverser, desto stabiler ist die Natur. Arten schaffen mit ihren Millionen Interaktionen ein Gewebe des Lebens; verlieren wir Arten, wird dieses Gewebe brüchiger. Ohne



ABB. 3 Trompeter-Nashornvogel (*Bycanistes bucinator*) beim Schlucken einer wilden Feige (a). Samenausbreitung durch Vögel spielt eine zentrale Rolle für die Regeneration von Bäumen und Büschen und für die Resilienz von Wäldern. Der Trompeter-Nashornvogel ist der größte fliegende Fruchtfresser (b) im südlichen Afrika und damit eine Schlüsselart für die Fernausbreitung selbst großer Samen und Früchte. Fotos: Carsten Braun.

Artenvielfalt in intakten Ökosystemen fehlen uns viele der Leistungen, die die Natur uns über lange Zeit ganz selbstverständlich zur Verfügung gestellt hat und auf die wir dringend angewiesen sind.

Landwirtschaft als Hauptursache

Doch was sind die Gründe für diese sich beschleunigende Entwicklung? Nach Angaben des Weltbiodiversitätsrats (IPBES = *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*) geht der Artenschwund vor allem auf eine veränderte Landnutzung, die Ausbeutung von Arten und den Verbrauch natürlicher Ressourcen, den Klimawandel, die Umweltverschmutzung und auf die Ausbreitung invasiver Arten zurück. Zusammen nennt man diese Gründe die Big 5.

Mit weitem Abstand ganz vorne steht dabei die Landwirtschaft. Allein zwischen 1963 und 2005 nahm die weltweite Anbaufläche um rund 270 Millionen Hektar zu; das entspricht etwa acht Mal der Fläche Deutschlands. Dieser



ABB. 4 Nur Getreide, Mais und Raps. Intensive Landnutzung mit Monokulturen, Verlust des Struktureichtums, intensiver Düngung sowie dem Einsatz von Pflanzenschutzmitteln führt zur Verarmung der Agrarlandschaft.

Foto: Bernhard Gaese.

Wandel in der Landnutzung findet vor allem in den Tropen statt, ausgerechnet dort, wo die Lebensräume mit der höchsten Artenvielfalt zu finden sind. Hier gehen natürliche Ökosysteme im Moment besonders stark verloren, hauptsächlich durch das Abholzen von Wäldern, für die Rinderhaltung oder den Anbau von Soja. Inzwischen sind rund 38 Prozent der terrestrischen Erdoberfläche landwirtschaftlicher Nutzung vorbehalten, auf etwa 29 Prozent stehen noch Wälder. Damit hat sich der Anteil an Boden, den wir für unsere Zwecke nutzen, immer mehr vergrößert, der Wald als wichtiges Ökosystem wurde Stück um Stück zurückgedrängt.

Zum Flächenfraß kommt ein Schwund der landwirtschaftlich genutzten Vielfalt, der Agrobiodiversität, hinzu: Mit zunehmender Modernisierung der Landwirtschaft, etwa seit dem 19. Jahrhundert, verminderte sich auch die Auswahl genutzter Sorten. Heutzutage spielen für die Ernährung der Weltbevölkerung weniger als 200 Arten weltweit eine Rolle. Und nur zwölf Pflanzen- und fünf Tierarten genügen, um rund drei Viertel des gesamten Nahrungsbedarfs der Weltbevölkerung abzudecken. Allein Reis, Mais und Weizen liefern fast sechzig Prozent der Kalorien und Proteine, die Menschen aus Pflanzen gewinnen (Abbildung 4). Die moderne Landwirtschaft gefährdet die Biodiversität mithin auf mehrfache Weise.

Während im Süden vor allem die Rodung der Wälder das Problem ist, geht der Verlust im Norden auf eine immer intensivere Nutzung der Agrarlandschaft zurück. Hier wurde die Landwirtschaft auf hohe Effizienz und Produktivität getrimmt. In Deutschland zum Beispiel ernährt eine Person heute mehr als 130 Menschen, im Jahr 1949 lag das Verhältnis noch bei eins zu zehn. Dies zeigt sehr deutlich, welchen Grad an Automatisierung und Beschleunigung wir in den vergangenen Jahrzehnten erreicht haben.

Dabei wurde und wird jeder potenziell schädliche Organismus mit großem Arsenal bekämpft. Was nicht der maximalen Steigerung des Ertrags diene, musste verschwinden; was potenziell schadet, wird vernichtet – mit Hilfe von Herbiziden, Fungiziden oder Insektiziden. In Deutschland wird seit den 1970er Jahren fast das gesamte Ackerland mit Pflanzenschutzmitteln bearbeitet. Auch wurde die bewirtschaftete Fläche vergrößert und für den Einsatz moderner Landmaschinen vereinheitlicht. Es handelte sich um eine regelrechte Industrialisierung der Landwirtschaft, bei der Baumreihen, Hecken, Gehölze, aber auch unbearbeitete Randstreifen oder Bachläufe der Optimierung zum Opfer fielen. Genau diese wären aber wichtig als Brutplätze, Nahrungsquellen und Rückzugsgebiete für diverse Arten.

Der Misere nicht hilflos ausgeliefert

Soweit die Bestandsaufnahme. Doch wir sind der Entwicklung nicht hilflos ausgeliefert, sondern können gegensteuern. Dafür gibt es einige zentrale Stellschrauben. Ein wesentlicher Ansatzpunkt ist der Umbau der Landwirtschaft in Richtung Ökolandbau, denn dort ist die Artenvielfalt im Schnitt um ein Drittel höher. Bisher sind weltweit erst 1,5 Prozent der Agrarflächen ökologisch bewirtschaftet (in Deutschland knapp zehn Prozent). Da besteht noch viel Potenzial! Allerdings, und das ist die Kehrseite, sinken dann auch die Erträge, in der Regel um etwa ein Viertel. Dafür braucht es einen Ausgleich. Und der kann nicht darin liegen, der Natur noch mehr Fläche für die Landwirtschaft zu entreißen, bei uns nicht, aber vor allem auch in den Tropen nicht.

Sondern dafür ist eine andere Art der Kompensation nötig, die außerhalb der Landwirtschaft liegt: Da wären erstens der Verlust von Lebensmitteln zu nennen, denn ein Drittel aller Nahrungsmittel wird nie gegessen. Allein in der EU werden pro Kopf und Jahr rechnerisch mehr als 170 Kilogramm Lebensmittel verschwendet. Das entspricht fast einem halben Kilogramm oder einer Packung Nudeln pro Tag. Noch eindrucksvoller in diesem Zusammenhang ist folgende Rechnung: In Deutschland landen etwa 18 Millionen Tonnen Lebensmittel jährlich auf dem Müll, zehn Millionen davon ließen sich nach Berechnungen des WWF (*World Wide Fund For Nature*; früher: *World Wide Fund*) relativ leicht „retten“. Für die Produktion dieser zehn Millionen Tonnen sind grob 2,6 Millionen Hektar oder fast 15 Prozent der gesamten Fläche nötig, die wir hierzulande für den Anbau von Lebensmitteln benötigen. Damit wäre ein wesentlicher Teil der geringeren Erträge im Ökolandbau schon wieder ersetzt.

Weniger Fleisch, mehr Pflanzen verzehren

Einen noch größeren Beitrag könnte ein verändertes Essverhalten erzielen. Nur etwa zehn Prozent der Energie werden im Mittel an die nächste Ebene der Nahrungskette weitergegeben, also von Pflanzen an Pflanzenfresser wie Hasen, Rehe, Kühe und Schafe und von Pflanzenfressern an Fleischfresser, also an Menschen, Luchse, Wölfe oder

Löwen. Das heißt, die jeweils nächste Ebene braucht entsprechend mehr Masse an Futter, was sich am Flächenverbrauch unterschiedlicher Produkte zeigt: Ein Kilogramm Rindfleisch braucht für die Produktion in Deutschland im Schnitt 32 Quadratmeter Fläche. Für Schweinefleisch sind es noch knapp 6; die Kartoffel benötigt dagegen nur 0,2 Quadratmeter Fläche pro Kilogramm. Dadurch ergibt sich folgendes Verhältnis: Für die Produktion eines Kilogramms Rindfleisch wird 160-mal mehr Fläche benötigt als für die eines Kilogramms Kartoffeln.

Kein Wunder, dass in Deutschland der größte Teil der Getreidefläche für den Anbau von Tierfutter verwendet wird – nämlich knapp sechzig Prozent, weitere 16 Prozent wandern in den Benzintank oder in die Industrie. Weltweit ist die Zahl sogar noch erschreckender: Auf mehr als siebenzig Prozent der globalen Ackerfläche wachsen Pflanzen, die an Tiere verfüttert werden. Die Landwirtschaft nimmt also insgesamt nicht nur zu viel Raum ein, sondern auf den Flächen bauen wir auch noch das Falsche an. Dem können wir – und zwar jede und jeder – durch eine Reduzierung des Fleischkonsums entgegenwirken. Einer Studie des britischen Magazins *Lancet* zufolge sollten wir den Verbrauch an tierischen Produkten auf zirka 100 Gramm sogenanntes rotes Fleisch plus zirka 200 Gramm Geflügel reduzieren – und zwar pro Woche. Damit ließen sich dann auch gleich noch ein Großteil an klimaschädlichen Emissionen und viel Wasser einsparen. Das wäre insgesamt gesünder und schützte die Umwelt. Damit wären wir wieder beim Sonntagsbraten unserer Großeltern.

30 Prozent Naturschutzgebiete weltweit

„Lass die Natur mal machen“, lautete vor nicht allzu langer Zeit die Anzeige einer großen Baumarktkette. So einfach das klingt und so lapidar der Spruch daherkommt, er ist wahr: Die Natur erholt sich, wenn wir ihr Raum geben. Das sieht jeder, der seinen Rasen einfach wachsen lässt. Deutlich wurde das auch in der Corona-Pandemie, als plötzlich wieder Delfine im Bosphorus schwammen, in der



ABB. 5 Der Kilimandscharo in Kenia ist der größte freistehende Berg der Welt. Er beherbergt eine außergewöhnliche Diversität von Lebensräumen; der Nationalpark deckt alle Flächen oberhalb 1800 Höhenmeter bis zum Gipfel auf knapp 6000 Höhenmeter ab. Foto: Bernhard Gaese.

Türkei legten Meeresschildkröten von Touristen ungestört ihre Eier im Sand ab, Mönchsrobben, eine bedrohte Seehundart, wurden wieder an Mittelmeerküsten gesichtet, in der Adria gab es Blauwale und in den Kanälen von Venedig konnte man deutlich mehr Fische sehen.

Dass sich die Natur regenerieren und Artenvielfalt erhalten bleiben kann, bestätigen auch zahlreiche wissenschaftliche Studien. Eine Untersuchung zeigte zum Beispiel, dass sich Schutzgebiete in acht tropischen Wäldern – über die Welt verteilt – positiv auf die Artenvielfalt von Vögeln auswirkten. Sie war in diesen Gebieten größer als außerhalb. Das galt vor allem für Waldvögel, endemische und bedrohte Arten, also genau jene, die für die weltweite Diversität unerlässlich sind. Beispiele aus Schutzgebieten im Südlichen Afrika zeigen zudem, dass sich



ABB. 6 Der Darß ist Teil einer Halbinsel in Mecklenburg-Vorpommern und steht über große Bereiche unter Naturschutz. a) Er ist natürlicher Küstendynamik unterworfen; an der einen Seite der Halbinsel findet Erosion statt, die Bäume kippen ins Meer, auf der anderen Seite werden Sandbänke angelagert, junge Dünen entstehen. b) Auf dem Darß rasten im Herbst Tausende von Kranichen auf dem Zug Richtung Südeuropa. Die einfliegenden Kraniche sind ein beeindruckendes Naturschauspiel. Fotos: Bernhard Gaese.

auch die Bestände von Säugetieren wie Nashörner oder Elefanten erholen, wenn sie nicht gejagt werden (Abbildung 5).

Deshalb ist der Ausbau von geschützter Fläche ein wesentliches Mittel gegen den Verlust von Biodiversität. Wirksam bewirtschaftete Schutzgebiete leisten zudem einen Beitrag zum Klimaschutz und zur Minderung von Zoonose-Risiken. Deshalb gilt als eines der größten Anliegen der internationalen Biodiversitätspolitik seit Ende 2022 das sogenannte „30×30-Ziel“. Demnach sollen bis zum Jahr 2030 weltweit 30 Prozent der Erdoberfläche unter Schutz stehen (Abbildung 6).

Dieses Ziel ist eines von 23 des *Global Biodiversity Frameworks* (GBF), auf den sich die Staatengemeinschaft vor knapp zwei Jahren in Montreal einigte. Mit ihm möchte die Weltgemeinschaft bis zur Mitte des Jahrhunderts wieder „im Einklang mit der Natur“ leben. Die Ziele stellen einen Durchbruch und einen Meilenstein dar, aber sie bilden nur den Rahmen, wie der Titel schon sagt. Jetzt kommt es auf die Umsetzung an. Bisher – um bei dem 30×30-Ziel zu bleiben – stehen weltweit erst rund 17 Prozent an Land und knapp acht Prozent im Meer unter Schutz. Das bedeutet, dass sich die geschützten Flächen an Land nahezu verdoppeln und im Meer fast vervierfachen müssten. Hier ist also noch viel zu tun.

Die Ziele von Montreal umsetzen

Das gilt auch für alle anderen 22 Ziele, zu denen gehört, bis 2030 das Risiko von Pestiziden und hochgefährlichen Chemikalien zu halbieren (Ziel 7), 30 Prozent des degradierten Landes wieder herzustellen (Ziel 2) und die Rate des Ansiedelns invasiver Arten auf die Hälfte zu bringen (Ziel 6). Bei der nächsten *Conference of the Parties* (COP 16), die im Oktober im kolumbianischen Cali stattgefunden hat, wurden die Ziele bestätigt. Außerdem wurde ein neues Gremium beschlossen, dem Vertreter/-innen von indigenen Gemeinschaften und Völkern angehören sollen, damit ihre Sicht stärker in die internationale Biodiversitätspolitik eingebracht wird. Die Entscheidung gilt als bahnbrechend. Weniger Fortschritte gab es bei den Nationalen Biodiversitätsstrategien, die die Mitgliedstaaten bis dahin entwickelt und vorgelegt haben sollten. Nur 19 Länder hatten sie bis zur Konferenz verabschiedet und veröffentlicht. Viele Diskussionen gab es auch um die Finanzen, die entscheidend für den Biodiversitätsschutz sind. Denn ein Großteil der reichen Artenvielfalt liegt in Ländern, die wenig Geld haben und dafür internationale Unterstützung benötigen. Dazu sollte in Cali ein neues internationales Finanzierungsinstrument ins Leben gerufen werden, über das bis zum Schluss kontrovers verhandelt wurde. Als es dann doch kurz vor Ende der Konferenz zur Abstimmung darüber kommen sollte, stellte sich heraus, dass nicht mehr genügend Staatenvertreter/-innen anwesend waren. Deshalb werden die Verhandlungen dazu Ende Februar 2025 in Rom fortgesetzt. Erst danach ist die COP 16 offiziell zu Ende. So ambitioniert die in Montreal formulierten

Ziele auch sind, so gut der *Global Biodiversity Framework* als politischer Rahmen dient, nützt er nichts, wenn er nur reines Versprechen bleibt. Deshalb kommt es jetzt auf die Beschlüsse von Rom und danach auf die Umsetzung an.

Mehr Aufmerksamkeit nötig

Um die für den Menschen lebensnotwendige Biodiversität zu erhalten, muss der Naturerhalt zu einem Primat aller politischen Entscheidungen werden. Das ist bisher nicht der Fall und scheint angesichts diverser akuter Konflikte sogar wieder weiter in den Hintergrund zu geraten. Biodiversität ist jedenfalls immer noch kein gleichwertiger Teil der Nachhaltigkeitsdebatte, weder politisch noch gesellschaftlich. Dabei haben Biodiversität und Klimapolitik ihren Ursprung im sogenannten Erdgipfel von Rio de Janeiro 1992. Damals wurden die Klimarahmenkonvention und die Konvention über biologische Vielfalt verabschiedet. Doch während sich die internationale Klimapolitik und das Mainstreaming der Beschlüsse in der Folge stetig weiterentwickelte, hinkt die Welt in Sachen Biodiversität weiterhin hinterher. Wer kennt schon die Aichi-Ziele, das Vorgänger-Zielpaket zum GBF? Wer weiß etwas mit dem Cartagena-Protokoll anzufangen?

Dabei ist aus wissenschaftlicher Seite längst klar, dass der Erhalt von Biodiversität sogar das entscheidendere und ernstere Thema ist – auch wenn nicht zu bestreiten ist, dass auch der Klimawandel inzwischen zunehmend existenzbedrohende Züge annimmt. Aber: Der Klimawandel entscheidet darüber, WIE wir leben, ob es bei uns beispielsweise heißer wird und wie wir damit zurechtkommen. Der Artenschwund entscheidet darüber, OB wir leben. OB wir überleben können. Zumal Wälder und Moore als natürliche CO₂-Speicher auch noch einen entscheidenden Beitrag zum Klimaschutz leisten können. Hier anzusetzen, lohnt sich auf jeden Fall: aus politisch-wirtschaftlicher, aus gesellschaftlicher und aus biologischer Sicht. Um möglichst viel Natur zu erhalten, schon weil immer unvorhersehbare kaskadierende Negativ-Effekte auftreten können, wie bei den Geiern in Indien oder den Seeottern im Pazifik. Vor diesem Hintergrund ist Biodiversität weit mehr als ein Sujet für Biologen – sie ist politisch und geht uns alle an.

Zusammenfassung

Biodiversität ist nicht nur für die Wissenschaft wichtig! Tatsächlich ist der Verlust an Natur eine größere Herausforderung als der Klimawandel. Letzteres entscheidet darüber, WIE wir leben, Ersteres, OB wir überleben. Und doch hat der Rückgang der biologischen Vielfalt noch nicht die nötige Aufmerksamkeit erhalten. Es handelt sich eher um eine stille Krise, verursacht durch die Landwirtschaft, aber nicht nur, und beflügelt durch unvorhersehbare Kaskadeneffekte. Die gute Nachricht ist: Der Trend lässt sich umkehren, wenn wir jetzt handeln.

Summary

The loss of nature has exceeded any healthy level

Biodiversity is not only important for science! In fact, the loss of nature is a more serious challenge than climate change. The latter decides HOW we live, the first WHETHER we survive. And yet the decline of biodiversity has not yet received the necessary attention. It is more of a silent crisis, caused by agriculture, but not only, and spurred by unforeseeable cascading effects. The good news is: The trend can be reversed if we take action now.

Schlagworte

Biodiversität, Artensterben, Natur, Ökosysteme, Geier, Seeotter, Regenwurm, Nachhaltigkeit, Agrobiodiversität, Industrialisierung der Landwirtschaft

Zum Weiterlesen:

- F. Bauer, K. Böhning-Gaese (2023). Vom Aussterben der Arten. Klett-Cotta.
- Convention on Biological Diversity & United Nations Environment Programme (19.12.2022). Kunming-Montreal Global biodiversity framework. CBD/COP/DEC/15/4. CBD, Montreal, Quebec.
- P. Dasgupta (2021). The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review. HM Treasury. <https://t1p.de/sb7iu>
- M. Glaubrecht (2021). Das Ende der Evolution. Der Mensch und die Vernichtung der Arten. Pantheon.
- W. Hachtel (01.03.1999, aufgerufen am 29.11. 2022). Killerwale dezimieren Seeotter. Spektrum. Dieser Zusammenhang wird durch neuere Quellen bestätigt.
- IPBES (2016). Summary for policymakers of the assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on pollinators, pollination and food production.
- IPBES (2019). Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. S. Diaz et al. (Herausgeber).
- J. Methorst et al. (2021). The importance of species diversity for human well-being in Europe. Ecological Economics 181, 106 917.
- Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften & Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (2020). Biodiversität und Management von Agrarlandschaften – Umfassendes Handeln ist jetzt wichtig. Halle (Saale), Germany.

- W. Steffen et al. (2015). The trajectory of the Anthropocene: the great acceleration. The Anthropocene Review 2(1), 81–98.
- United Nations Environment Programme (2021). Making Peace with Nature: A scientific blueprint to tackle the climate, biodiversity and pollution emergencies. UNEP, Nairobi, Kenya.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2020). Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration. WBGU.
- World Wide Fund For Nature (2022). Living Planet Report 2022 – Building a positive future in a volatile world.
- World Wide Fund For Nature (2022). Europe eats the world – How the EU's food production and consumption impact the planet. WWF European Policy Office, Brussels, Belgium.

Verfasst von:



Friederike Bauer arbeitet seit mehr als zehn Jahren als freie Journalistin, Autorin und Redenschreiberin mit einem Schwerpunkt auf Nachhaltigkeitsthemen sowie Außen- und Entwicklungspolitik. Ihr Handwerkzeug hat sie bei der Frankfurter Allgemeine Zeitung (FAZ) gelernt, wo sie nach einem Volontariat als Redakteurin, Korrespondentin und Kommentatorin tätig war. Ihr Buch „Vom Verschwinden der Arten“, das sie zusammen mit Katrin Böhning-Gaese geschrieben hat, ist 2023 mit dem Publikumspreis Wissensbuch des Jahres ausgezeichnet worden.



Katrin Böhning-Gaese erforscht den Einfluss von Landnutzung und Klimawandel auf die Biodiversität und die Rolle der Biodiversität für das Wohlergehen der Menschen. Sie ist die Wissenschaftliche Geschäftsführerin des Helmholtz Zentrums für Umweltforschung UFZ und Professorin an der Goethe-Universität, Mitglied der Leopoldina und des Rats für Nachhaltige Entwicklung. Für ihre Spitzenforschung, Politikberatung und Öffentlichkeitsarbeit wurde sie 2021 mit dem Umweltpreis der Deutschen Bundesstiftung Umwelt ausgezeichnet.

Korrespondenz:

Prof. Dr. Katrin Böhning-Gaese

E-Mail: katrin.boehning-gaese@ufz.de

Friederike Bauer

E-Mail: info@friederikebauer.de

MONIKA HASSEL VERLÄSST DAS EDITORIAL BOARD DER BIOLOGIE IN UNSERER ZEIT



Seit 2011 engagierte sich die Zoologin Prof. Dr. Monika Hassel im Kuratorium und dann ab 2021 im Editorial Board für die Ausgestaltung und Weiterentwicklung der Biuz. Als Invertebraten-Forscherin widmete sich Monika Hassel vor allem der Rolle hoch konservierter Signalsysteme wie der Fibroblasten-Wachstumsfaktor-Rezeptoren (FGFR = fibroblast growth factor receptor) bei Hydra. Analysen zur Funktion der FGFR in den typischen epithelialen Muskelzellen bei Formgebung und Bewegung standen im Mittelpunkt. Ihre zahlreichen Beiträge in der Biuz befassten sich u. a. mit historischen Aspekten der Evolutionsbiologie, den Signalwegen zur Steuerung der Körperachse und – was ihr immer am Herzen lag – einer pragmatischen Hochschulpolitik sowie der Förderung einer modernen Zoologie. Bis zu ihrer Pensionierung 2024 hatte Monika Hassel die Professur für Morphologie und Evolution der Invertebraten am Fachbereich Biologie der Philipps-Universität Marburg inne. Ende 2024 schied Monika Hassel aus dem Editorial Board der Biuz aus. Wir werden ihre Expertise sehr vermissen.

DATENLOGGING

Methodik im Vordergrund



„Tracking – der gläserne Vogel“ ist ein lebhaft geschriebenes 120 Seiten langes und reichlich bebildertes Buchlein über die Verfolgung der

Lebensweise einiger Vogelarten durch Datenlogger. Die Logger-Geräte ermöglichen es seit kaum mehr als einem halben Jahrhundert, den genauen Aufenthaltsort einzelner Tiere exakt zu verfolgen. Das Datenlogging revolutionierte die seit Ende des neunzehnten Jahrhunderts gängige Methode der Vogelzugforschung durch Beringung, deren Erfolge wegen der relativ geringen Wiederfundraten begrenzt waren.

Das Buch ist von dem Zoologen Stefan Garthe (2013–2018 Präsident der Deutschen Ornithologen-Gesellschaft) und der Biologin und Fachjournalistin Ulrike Kubetzki geschrieben. Der Titel des Buches erweckt ein bisschen den Eindruck, als würde man viel über die Ziele und Wanderungen der Zugvögel erfahren; das ist aber nicht der Fall. Das Buch ist von Meeresbiologen verfasst und beschränkt sich daher fast ausschließlich auf Meeresvögel; die Landvögel werden nur gelegentlich am Rande betrachtet. Auch erfährt man wenig über die Zugwege. Das Buch behandelt überwiegend das Vogeltracking, enthält aber auch viele seitenlange Meinungsäußerungen zum Natur- und Umweltschutz, zur Gründung der Naturschutzorganisationen, zu den Richtlinien, wie man eine seriöse Naturwissenschaft betreibt, zu den Prognosen über die Zunahme der Weltbevölkerung und zur Qualität der Bürgerwissenschaften (*Citizen Science*); man erfährt, dass der Wanderfalke der schnellste Vogel der Welt ist – Themen, die man eigent-

lich in einem Sachbuch über Vogeltracking durch Datenlogger nicht unbedingt erwartet. Das Buch ist sehr erzählerisch aufgebaut. Vielfach werden persönliche Erlebnisse beschrieben, wie z. B. die Überfahrt zur Tölpel-Brutstätte auf *Bass Rock* in Schottland und die Erlebnisse der Autoren beim Besuch der großen Basstölpel-Kolonie auf Bonaventura Island in Kanada. Da ist auch von Elchen, Bibern und Streifenhörnchen die Rede.

Das Kapitel 2 „Die Welt der Naturwissenschaften“ (9 Seiten) handelt über Sinn und Wert der Naturwissenschaften, wie man zu Erkenntnissen kommt und über Leitlinien und Ethik der wissenschaftlichen Praxis. Dieses Kapitel ist ein bisschen trivial und passt nicht so recht in ein Sachbuch über Methoden und Ergebnisse der Erforschung von Tierwanderungen.

Das Kapitel 3 berichtet über die Erfolgsgeschichte von neu gewonnenen Erkenntnissen, die mit Datenloggern an Seevögeln gewonnen wurden: Pinguin-Arten, Wanderalbatros, Heringsmöwe und Basstölpel. Alle Seevogel-Arten brüten an Land, so dass viel über ihr Brutverhalten und die Jungen-Aufzucht bekannt war, nicht aber über ihren Nahrungserwerb und die Wanderwege. Gemessen wurden: Körpertemperatur, Säuregehalt und Temperatur des Magens sowie Darmperistaltik, Tauchtiefe (Kaiserpinguine schaffen über 500 Meter) und Positionsbestimmungen über GPS-Datenlogger. Man erfährt sehr viel über die technische Funktion der Geräte, von welchen Firmen sie besorgt wurden, dass ihre Messgenauigkeit vom Wetter abhängig ist, dass sie durch eindringendes Salzwasser auch manchmal beschädigt wurden und dass die technische „Entwicklung rasant voranschreitet“. Nicht so viel erfährt man über die Messergebnisse: wohin die Vögel denn nun wandern und was sie fressen. Dazu bleiben viele Aussagen zu allgemein: „die Aktivität des Vogels im Tagesverlauf“ wurde analysiert, „der Einsatz der Geräte findet breite Anwendung in Themenfeldern wie

Physiologie, Verhaltensforschung oder Ökologie...“. Aber was kam dabei heraus?

Das gesamte Kapitel 4 ist der „Ethik und Moral“ gewidmet: Die Handhabung muss „möglichst schonend und artgerecht“ erfolgen. Der Leser erfährt, dass „Deutschland ein sehr strenges Tierschutzgesetz“ hat. Das lange Kapitel 5 (54 Seiten) ist überwiegend dem Basstölpel gewidmet, dem Hauptforschungsobjekt des Erstautors. Hier erfährt man, wo die Tölpel vom schottischen *Bass Rock* überwintern und wie Tölpel von Helgoland auf Nahrungsflüge gehen. Auch dieses Kapitel beginnt wieder mit allgemeinen Feststellungen, u. a. dass „die Grenzen des Wissens durch den technischen Fortschritt stetig erweitert werden.“

In diesem Kapitel werden zwei populäre Themen des Natur- und Umweltschutzes aufgegriffen und erfreulich ideologiefrei analysiert: (1) der über Bord geworfene Beifang aus den effizienten Fangnetzen der Fischereiflotten und (2) die Auswirkung der Offshore-Windparks auf hoher See auf die Vogelbestände. Sehr sachlich wird festgestellt, dass sich mittlerweile „viele Seevögel“ als Schiffsverfolger auf das Nahrungsangebot des Beifangs eingestellt haben, was zur starken Vermehrung einiger Arten geführt hat. Auch zum Problem der Offshore-Windparks (2) wird eine moderate Haltung eingenommen. Die Kollisionsgefahr ist gering, weil die Vögel die Windpark-Regionen umgehen, aber sie verlieren dadurch wertvolle Lebensräume, gerade die nahrungsreichen Flachwasserzonen, auf denen die Windparks errichtet werden. Auf Seite 85 werden fünf wissenschaftliche Fragen gestellt, die bei der Errichtung von Windparks beachtet werden sollten. Die Fragen werden aber nicht beantwortet. Der Leser erfährt, dass die Windparks „an möglichst optimalen Standorten gebaut werden“ sollten.

Alles in allem ist dies ein lesenswertes Buch, das einen Überblick über die modernen Methoden des

Vogeltrackings durch Datenlogging gibt und dazu ein ausführliches Literaturverzeichnis bietet. Wer aber etwas über die Wanderwege der Zugvögel erfahren möchte, für den ist es das falsche Buch.

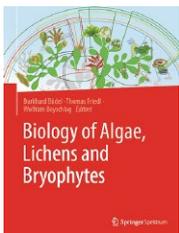
Werner Kunz, Grevenbroich

Tracking – Der gläserne Vogel.

Erkenntnisse, Berichte und Reportagen aus der Praxis. Stefan Garthe, Ulrike Kubetzki, Aula-Verlag Wiebelsheim, 2023, 120 S., 19,95 Euro, ISBN 978-3-89104-860-3.

BOTANIK

Die Neuen Kryptogamen



Soeben ist im Springer-Verlag ein modernes Handbuch über Cyanobakterien, Algen, Flechten und Moose erschienen. Elf

Autoren, alles führende Spezialisten auf ihrem Gebiet, haben sich sehr gut abgestimmt und ein Buch wie aus einem Guss geschaffen. Drei von ihnen übernahmen zusätzlich die Aufgabe als Herausgeber. Sie vereinen ihr Wissen und ihre Erfahrung in einem opulenten Werk über diese entwicklungs- und produktionsbiologisch so wichtigen Gruppen niederer Pflanzen.

Die Auswahl der Organismengruppen überrascht und geht auf neueste Erkenntnisse zurück. Die Autoren prägen dafür den Begriff der *new cryptogams*. Diese umfassen alle „nicht-vaskulären“ Organismen mit der Fähigkeit zu oxygener Photosynthese und permanenter hydropassiver Lebensweise, d. h. dass deren Zell- und Körperform sowie Funktion vom Wasser abhängig sind. Konsequenterweise gehören neben den Cyanobakterien und Algen auch die Flechten und Moose zu den Neuen Kryptoga-

men. Als Primärproduzenten existieren sie überall dort, wo genügend Wasser und Licht hinkommt. In ihren terrestrischen und aquatischen Habitaten produzieren sie mehr als die Hälfte des Sauerstoffs auf der Erde. Im Vergleich zu den Gefäßpflanzen (Farne, Nackt- und Bedecktsamer) stellen sie etwa 40 Prozent des Artenreichtums und mehr als 50 Prozent der Produktivität.

Schwerpunkte der Bearbeitungen zu den einzelnen Gruppen bilden Anatomie, Ontogenie, Systematik, Ökophysiologie und Bedeutung für das Netzwerk der Natur. Gebührend breiter Raum wird den Symbiosen gewidmet, ohne die es die Chloroplasten nicht gäbe. Deren Ursprung liegt in ältesten photosynthetischen Cyanobakterien, aus denen sich über primäre und sekundäre Endosymbiosen in primitiven Euzyten schließlich Plastiden in diversen Algengruppen entwickelten. Das Thema Symbiosen zieht sich wie ein roter Faden durch alle Organismengruppen.

Ein Überblick über die bearbeiteten Gruppen zeigt, wie alles miteinander vernetzt ist (*reticulate evolution*): Cyanobakterien als älteste phototrophische Organismen entwickelten die Photosynthese vor ca. 3 Milliarden Jahren und veränderten damit die Natur der Erde im Wasser und an Land nachhaltig. Sie drangen im Laufe der Evolution praktisch in alle Sphären der Erdkruste und Feuchthabitate vor und entwickelten eine außerordentliche Vielfalt in Form und Lebensweise. Durch Endosymbiose zwischen prokaryotischen Cyanobakterien und heterotrophen Euzyten als Wirt entstanden verschiedene unabhängige Algengruppen, die in ihrer Heterogenität und Diversität von keiner anderen Organismengruppe übertroffen werden. Die Evolution phototropher Eukaryoten ging vor 2–1,5 Milliarden Jahren vonstatten. Ergebnis dieses Prozesses der primären Endosymbiose waren die Linien der Archaeplastidae, die in Glaucophyta, Rhodophyta, Chloroplastida und Cercozoa aufspalteten. Weitere Evolutionsschritte fanden im

Zuge von sekundären Endosymbiosen statt, bei der die Linien der Heterokontophyta, Dinoflagellaten, einer weiteren Gruppe von Cercozoa, Euglenen, Haptista und Cryptista entstanden. Flechten gelten als Inkarnation von Symbiose zwischen Pilzen und Algen. Das Buch lenkt die Aufmerksamkeit darauf, dass es sich bei dieser Gruppe um *multispecies*-Symbiosen handelt: Als Mycobionten fungieren meistens mehrere Cyanophyceen und Algenarten. Hinzu kommen mit den Flechten assoziierte bakterielle Gemeinschaften. Früheste Landpflanzen werden durch die Bryophyten (Moospflanzen) gestellt, die sich wahrscheinlich aus den Charophyceae abgeleitet haben. Das Buchkapitel zeigt, wie sich die Bryologie von einer vorwiegend beschreibenden Wissenschaft zu einer mit immer mehr experimentellen Aspekten wandelt. Dies trägt der Bedeutung dieser Pflanzengruppe für viele Ökosystemprozesse Rechnung. Interaktionen der Moospflanzen mit ihrer belebten und unbelebten Umwelt sind bisher unterschätzt worden.

All diese hier nur kurz angeschnittenen Gruppen niederer Pflanzen werden ausführlich und mit vielen neuen Facetten im Buch dargestellt. Das großformatige Werk ist vom Verlag sehr gut ausgestattet worden. Es ist reich bebildert mit meist farbigen Fotos und – besonders hervorzuheben – mit hervorragenden Grafiken, viele von ihnen original produziert vom Grafiker F. Spindler und den jeweiligen Autoren.

Das Buch kann vorbehaltlos empfohlen werden und wird seinen Platz in Lehre und Forschung finden.

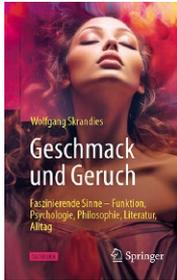
Lothar Krienitz, Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Berlin

Biology of Algae, Lichens and Bryophytes.

B. Büdel, T. Friedl, W. Beyschlag (Eds.), Springer Spektrum Berlin, Heidelberg, 2024, 662 S., 149,79 Euro, ISBN 978-3-662-65711-9.

SINNESPHYSIOLOGIE

Zugang für Laien



Organismen interagieren mit ihrer Umwelt – „physikalisch“, wenn wir sehen, hören und sprechen, „chemisch“, wenn wir riechen und schmecken. Phy-

sikalisch gelingt die Kommunikation auch über größere Distanzen, chemisch sind wir mehr ortsgebunden. Die physikalische Kommunikation ermöglicht u. a. die sprachliche Artikulation von Gedanken, allgemein von psychischen Zuständen. Die chemorezeptive Wahrnehmung hingegen erscheint oft als schwer verbalisierbar, man muss sie umschreiben: ein Duft wie von Lavendel, ein Gestank wie von faulen Eiern. So kam es zur Charakterisierung der physikalischen als den höheren, der chemischen als den niederen Sinnen. Warum diese Kategorisierung als veraltet gilt, kann man in dem angenehm leicht geschriebenen, aber gleichwohl profunden Buch von Wolfgang Skrandies, Professor für Physiologie an der Universität Gießen, nachlesen.

Wie der Untertitel anzeigt, geht es dem Autor nicht nur um die Anatomie und Physiologie des Riechens und Schmeckens, sondern auch um die Rolle der Chemorezeption im normalen Leben und in Bereichen wie der Philosophie und der Literatur. Für Nichtchemiker, Nichtbiologen und Nichtmediziner, deren Erinnerungen an die Chemiestunden in der Schule oft verblasst sind, bietet Skrandies einen ebenso informierenden wie anregenden Zugang zu einem Gebiet, das üblicherweise nur über Vorwissen verlangende Fachliteratur zugänglich ist.

In den beiden ersten Kapiteln gibt der Autor einen Überblick über die allgemeine Bedeutung von Geruch und Geschmack für unser

Leben. Gerüche vermitteln im wörtlichen Sinn die Atmosphäre einer Umgebung, lösen – oft in Kombination mit dem Geschmackssinn – Schutz- oder Lustreaktionen und gelegentlich auch Erinnerungen aus, und sie können Informationen über andere Menschen liefern.

Der Autor erweckt auf geschickte Weise beim Leser die Motivation, sich mit den im dritten, den wissenschaftlichen Kern des Buches bildenden Kapitel gelieferten anatomischen und physiologischen Details des Riechens und Schmeckens zu beschäftigen. Eine sehr gute Idee des Autors sind die in den Text eingeführten Anleitungen zu kleinen Experimenten, die die beschriebenen Sachverhalte direkt erfahrbar machen und die jeder Leser ohne weitere Hilfsmittel zuhause im Wohnzimmer durchführen kann.

Philosophische Betrachtungen zur Chemorezeption beziehen sich weniger auf die zugrundeliegenden physiologischen Mechanismen und mehr auf Einordnungen in abstrakte Kategorien wie höhere und niedere Sinne. Man kann die Anmerkungen des Autors zu diesem Thema als unterhaltsame Beispiele für Bizarreien des Geisteslebens lesen, aber ebenso als Kritik an einer von keiner Empirie gebremsten Hermeneutik. So assoziiert Kant den Geruchssinn mit Sittenverfall und Ausschweifung. Der Psychoanalytiker Sigmund Freud interpretiert das Phänomen des sich Schämens als das „Zurücktreten der Geruchsreize als Abwendung des Menschen von der Erde“ und darüber hinaus als Folge des „Entschlusses zum aufrechten Gang“, da beim aufrechten Gang die Genitalien „sichtbar und schutzbedürftig“ werden. So erscheint das Denkmögliche durch suggestive Formulierung als Tatsache.

Skrandies beschreibt die literarische Charakterisierung von Gerüchen beim Erinnern bzw. die Auslösung von Erinnerungen durch Gerüche („Proust-Effekt“ oder „Gerüche sind oft wie platzende Blasen

der Erinnerung aus der Tiefe der Zeiten“, H. v. Doderer), des Effekts des Körpergeruchs und der modernen Hygiene und allgemein des Geschmacks. Skrandies liefert einen Streifzug durch die Literatur, vom japanischen Haiku über Shakespeare zu Goethes Faust und Schillers faulenden Äpfeln, von Süskinds „Parfüm“ bis zu Sir Conan Doyles Empfehlungen an Kriminalisten.

In den letzten beiden Kapiteln geht der Autor auf eine Reihe von Aspekten der chemischen Sinne ein, u. a. liefert er eine kurze Geschichte der Entwicklung der Hygiene. Seine Schilderung der Rolle von Emotionen bei der Chemorezeption als Folge der Verbindung der entsprechenden Wahrnehmung mit verschiedenen Hirnarealen steht in wohlthuendem Kontrast zur gerade angesagten philosophischen Mode, die Unabhängigkeit des Bewusstseins vom Gehirn zu behaupten. Skrandies beschreibt die Bedeutung des Geruchs bei medizinischen Diagnosen ebenso wie die unterschätzte Rolle des Geruchs bei Stereotypen von „anderen“ Menschen – der angebliche Gestank des Feindes erleichtert die physische Vernichtung des Feindes und informiert über die in der Öffentlichkeit anscheinend kaum bekannte, 1988 konzipierte Definition der Maßeinheit Olf (wohl von lat. *olfactus* = das Riechen, der Geruch) für die Intensität von Gerüchen sowie über die Wirksamkeit von Pheromonen, u. a. bei der olfaktorischen, also nonverbalen Kommunikation über Unterschiede zwischen bestimmten genetischen Strukturen, die eine höhere Effizienz des Immunsystems des Nachwuchses implizieren können. Über das rein Wissenschaftliche hinaus bietet Skrandies eine Fülle von Beispielen zur Rolle der chemischen Sinne, vom Erkennen verdorbener Speisen über die lindernde Wirkung von Düften in der Heilkunde bis zum erhebenden Effekt von Düften bei religiösen Andachten.

Es ist dem Autor gelungen, die Falle trockener Aneinanderreihung

von Fakten zu vermeiden und die wissenschaftliche Betrachtung der Sinnesbereiche Schmecken und Riechen im Zusammenhang mit dem alltäglichem Leben, mit philosophischen Reflektionen und literarischen Beschreibungen kurzweilig, informativ und anregend darzustellen; für alle wissenschaftlich und kulturell Interessierten liefert sein Buch eine sehr empfehlenswerte Lektüre.

Uwe Mortensen, Münster

Geschmack und Geruch.

Faszinierende Sinne – Funktion, Psychologie, Philosophie, Literatur, Alltag. Wolfgang Skrandies, Springer, Berlin, 2024, 246 S., 19,99 Euro, ISBN 978-3-662-68747-5.

ÖKOLOGIE

Faszinierende Themenfülle



Der Wissenschaftsjournalist und Biologe Dr. Wilhelm Irsch hat sein neuestes Sachbuch „Meister der Anpassung“ genannt. Auf 227 Seiten

mit 14 Abbildungen beschreibt er beeindruckende Phänomene aus der belebten Natur, die zum einen die Anpassungsfähigkeit an widrige Umstände zeigen, aber auch auf eine mögliche technische Nutzung dieser biologischen Wirkprinzipien hinweisen sollen. Als Zielgruppe stehen damit biologisch interessierte Laien im Fokus. Jedes Kapitel hat eine thematische Klammer, die zwölfmal in der Tierwelt und zweimal in der Pflanzenwelt greift. Die einzelnen Kapitel sind thematisch voneinander weitgehend unabhängig und in sich wiederum vielschichtig. Das erste Kapitel beispielsweise handelt von Fledermäusen und Flughunden und

deckt dabei ein großes Themenspektrum von Winterruhe, Sozialverhalten, Sinnesleistungen bei der Jagd und schließlich Navigationsexperimenten ab. Weitere Kapitel beschäftigen sich mit Mäusen (Kapitel 3) oder Ameisen (Kapitel 7) oder fokussieren auf einzelne Sinne (z. B. Kapitel 9 und 10, Auditorik und Olfaktorik). Einige Kapitel schlagen sogar ganz große Bögen von Haien zu Salamandern (Kapitel 2). Nicht fehlen dürfen die Anpassungsleistungen, die Tiere durch die überbordende Präsenz des Menschen erbringen müssen, sei es im Ökosystem Stadt (Kapitel 11) oder durch die Lichtverschmutzung allerorten (Kapitel 12). Bei den Pflanzen zu guter Letzt geht es rau her, mit invasiven Arten zum einen (Kirschlorbeer, Kapitel 13) und karnivoren Arten zum anderen (Kapitel 14).

Thematisch deckt das Buch also große Bereiche ab und kann doch nie vollständig sein. Irsch schöpft aus rund 150 Literaturstellen neuesten Datums. Und doch würde man gerne mehr über die Anpassungen im Pflanzenreich lernen – gibt es darüber doch nur zwei Kapitel – und die faszinierende Welt der Pilze ist weitgehend ausgeklammert. Als Produzent von Vorlesungen vermisst man einen Bogen, der einen durch das Buch führt. Irsch setzt den Leser ohne einleitende Worte unmittelbar dem ersten Kapitel aus und man wandert von kürzeren zu längeren Beschreibungen und nähert sich dem jeweiligen Themenblock an. Jedes Kapitel ist aufs Neue eine kleine Welt für sich. Und auch in jedem Kapitel öffnen sich viele neue Türen, die die Vielfalt an Phänomenen selbst in einer einzelnen Gattung verdeutlichen.

In der Tat fordert Irsch den Leser auf, sich selbst auf die Suche zu machen, sich ablenken zu lassen und eigene Schwerpunkte beim Lesen zu setzen. Wie ein streunender Sammler ist man unterwegs, lässt sich treiben, um zu finden, ohne zu wissen, was man gesucht hat. Die Natur ist eben ungeordnet

und chaotisch, aber halt auch voller faszinierender Entdeckungen und definitiv ein Meister im Anpassen.

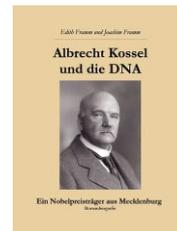
Tobias Seidl, Bionik-Institut, Westfälische Hochschule, Bocholt

Meister der Anpassung.

Die erstaunlichsten Überlebensstrategien der Tier- und Pflanzenwelt. Kuriose Erkenntnisse aus der Wissenschaft. Wilhelm Irsch, Oekom-Verlag, München, 2024, 258 S., 24 Euro, ISBN 978-3-98726-123-7.

BIOGRAFIE

Nobelpreisträger aus Mecklenburg



Die Eheleute Edith und Joachim Framm, die in medizinischen Berufen tätig waren und ihre Heimat Mecklenburg lieben, haben

in einem Buch, das sie als „Romanbiografie“ bezeichnen, die Geschichte erzählt, die „Albrecht Kossel und die DNA“ verbindet. Der 1853 in Rostock geborene Biochemiker Kossel ist 1927 in Heidelberg gestorben, hat also zu einer Zeit gelebt und gearbeitet, als die drei Buchstaben DNA noch nicht zum Wortschatz der Allgemeinheit gehörten und man Sätze wie die neulich im Radio zu hörende Behauptung eines jungen Mannes, „die Nachhaltigkeit ist in meiner DNA“, nicht einmal im Ansatz hätte verstehen können und schulterzuckend hätte vorbeirauschen lassen müssen. Die Abkürzung DNA erfasst die chemische Struktur der Erbsubstanz in den Zellen, und sie hat ihren wissenschaftlichen und medialen Siegeszug in den 1950er Jahren begonnen – wobei man genauer die Jahreszahl 1953 nennen kann, als das Duo aus James D. Watson und Francis Crick ein als Doppelhelix berühmt gewor-

denes Modell für die Gene vorgeschlagen hat, mit dessen Hilfe die moderne Molekularbiologie ihren unvergleichlichen Siegeszug antreten konnte.

Als Albrecht Kossel sich im 19. Jahrhundert mit dem Stoff, aus dem nach heutigem Wissen die Gene bestehen, zu beschäftigen begann, kümmerte sich nur eine Minderheit um die Chemie des Zellkerns, und selbst großen Forschern kam es unwahrscheinlich vor, dass ihre biochemischen Analysen eines Tages „das Geheimnis der Vererbung lüften“ würden, wie das Autorenduo seinen Helden Kossel träumen lässt. Es galt Fleiß und Disziplin an den Tag zu legen und so genau wie möglich zu bestimmen, welche Substanzen etwa in Hefezellen oder im Gänseblut auffindig zu machen waren, wobei sich Kossel bei seinen Analysen immer mehr auf den Stoff konzentrierte, der reichlich in Zellkernen vorhanden zu sein schien. Dieser wurde nach dem lateinischen *Nucleus* Nuclein genannt, woraus später Nuklein wurde. Kossel studierte und forschte in Rostock und Straßburg, und 1881 konnte er dort seine Habilitationsschrift mit dem Titel „Die Nucleine und ihre Spaltprodukte“ vorlegen, mit der die biochemische Erkundung der Erbsubstanz DNA allmählich die wissenschaftliche Richtung einschlug, die im 20. Jahrhundert Triumphe feiern, das öffentliche Interesse auslösen und zur Großforschung werden konnte.

Zu Kossels Lebzeiten ging es ruhiger als heute in den Forschungseinrichtungen zu, wobei man bei der Lektüre der Romanbiografie darüber staunen kann, wie unbeirrt Kossel und seine Lehrer – zum Beispiel der berühmte Felix Hoppe-Seyler – ihren Weg gehen und alles herauszufinden versuchen, was sich herausfinden lässt. Da will man nicht ein bestimmtes Ziel erreichen, sondern vor allem das Wissen erwerben, das mit den verfügbaren Instrumenten gewonnen werden kann, auch wenn die Öffentlichkeit kaum Notiz von Kossels heute als so wich-

tig erkannten Ergebnissen nimmt und der Forscher selbst in dem Moment, in dem er sein Ergebnis vor Augen hat, die Bedeutung nicht in vollem Umfang ermessen kann.

Die Romanbiografie über „Albrecht Kossel und die DNA“ führt vergnüglich und lesbar vor, wie die als Pioniere tätigen Forscher in der Überzeugung arbeiteten, dass ihre Wissenschaft der ganzen Welt gehört und sie sich weder für Geld noch für die Ehre plagten, sondern vor allem, weil die Arbeit ihnen Freude machte und ihre unersättliche Neugierde befriedigen konnte.

Bei solch einem Antrieb können bei ausreichender Qualität Ehrungen nicht ausbleiben, und als Kossel Professor in Heidelberg war, erreichte ihn am 24. Oktober 1910 ein Brief aus Stockholm. Ihm wurde der Nobelpreis für Medizin zuerkannt, weil durch seine Arbeiten „die Kenntnisse der Chemie der Zelle in herausragender Weise befördert wurden“, wie zu lesen war, bevor der Geldbetrag von 156.000 Mark genannt wurde, der mit zu der Auszeichnung gehörte.

Nach diesem Höhepunkt folgten bald unruhige Weltkriegsjahre, in denen Kossel sich weiter seinen biochemischen Forschungen widmen konnte, wie die Romanbiografie ausführt (die auch von seiner Ehe und seinen Kindern erzählt). Als der große Wissenschaftler starb, wurde er als Mensch gewürdigt, „dessen Güte und innere Ausgeglichenheit, dessen Wahrhaftigkeit und Pflichtgefühl schlechthin vollkommen waren.“ Seine wissenschaftliche Leistung verdankte sich seiner seelischen Kraft, wie gesagt wurde, und man wünschte sich heute, so etwas über zeitgenössische Biochemiker schreiben zu können.

Ernst Peter Fischer, Heidelberg

Albrecht Kossel und die DNA.

Ein Nobelpreisträger aus Mecklenburg. Edith und Joachim Framm, Edith Framm, Wismar, 2024, 175 S., 9,75 Euro, ISBN 978-3-94421-164-0.

ÖKOLOGIE

Tierische (Über-)lebenskünstler



Warum haben Maulwürfe sechs Finger und Eisfische weißes Blut? Warum erkranken Nacktmulle nicht an Krebs und war-

um kann ein Axolotl ein verlorenes Bein nachbauen, wir aber nicht? Russ Hodge erzählt 14 Geschichten über 14 „seltsame Tiere“ und wie ihre Seltsamkeiten in kleinen Schritten aufgeklärt oder zumindest besser verstanden wurden. Zugleich erzählt er sehr persönlich die Geschichten der Wissenschaftler, die oft auf verschlungenen Wegen – durch Begegnungen mit anderen Forschern und durch glückliche Zufälle – auf diese Forschungsgebiete gekommen sind. Dabei erfährt man viel über das „Ökosystem“ der Wissenschaft: die internationale Vernetzung von Forschergruppen, die meist auf persönlichen Kontakten beruhen und wie verschiedene Labore einzelne Mosaiksteinchen zum Verständnis beitragen. Vor allem scheint immer der Enthusiasmus durch, der Wissenschaftler in unwirtliche Gebiete wie die Arktis oder den Glutofen der Wüsten treibt, um die ungewöhnlichen Eigenschaften „seltsamer Tiere“ aufzuklären. Es sind spannende Geschichten über das Zusammenreffen besonderer Menschen und besonderer Tiere.

Die Wissenschaft kommt bei den Geschichten nicht zu kurz. Russ Hodge erklärt verständlich, aber auch anspruchsvoll, wie Physiologie, Genetik und Biochemie die Anpassung an ungewöhnliche Lebensräume und extreme Umweltbedingungen ermöglicht haben. Laien können manche Abschnitte einfach überlesen, wenn es etwas zu speziell wird. Die Geschichten bleiben trotzdem anregend und informativ.

Das Buch ist als Hard-Cover-Version mit den Illustrationen von Kat Menschik liebevoll gestaltet und ein schöner Kontrast zu den eher minimalistischen Taschenbüchern.

Die persönlichen Geschichten der Wissenschaftler und ihre Forschungsarbeiten machen das Buch interessant, könnten aber teilweise etwas besser verbunden werden. Das Buch wird nicht nur Biologie-Enthusiasten begeistern; es kann junge Menschen motivieren, tiefer in die Welt der Biowissenschaften einzusteigen und es kann jedermann an die Faszination der Biologie herañführen.

Wolfgang Nellen, Kassel

Lebenskünstler.

Von frostfesten Fischen, radioaktivitätsresistenten Bärtierchen und selbstheilenden Amphibien. Russ Hodge, Kat Menschik, Verlag Galiani, Berlin, 2024, 240 S., 42 Euro, ISBN 978-3-386971-309-0.

NATURFÜHRER

Symbiosen entdecken



Andreas Gigon ist ein ausgewiesener Pflanzenökologe und Naturschutzbiologe, der lange Zeit als Professor an der Eidgenössischen Technischen Hochschule

(ETH) Zürich gelehrt hat. Sein Koautor ist Biologe, der sich als Lehrer intensiv mit der Vermittlung ökologischer Sachverhalte beschäftigt hat. Von diesen Lehrerfahrungen profi-

tiert der vorliegende Feldführer, der dem interessierten Naturbeobachter helfen soll, das Zusammenleben von Pflanzen mit unterschiedlichen Tieren zu verstehen. In der Natur geht es nicht nur darum, dass Pflanzen als Nahrung für Pflanzenfresser (Herbivore), Pilze oder Bakterien dienen. Viele Pflanzen profitieren sogar von einem engen Zusammenleben mit Tieren. Solche Gemeinschaften werden als Symbiosen bezeichnet, die in diesem reich illustrierten Sachbuch behandelt werden. Zunächst geht es um die Abgrenzung der Symbiose, bei der beide Arten von der gegenseitigen Beziehung profitieren, von der, bei der nur eine Art profitiert, die andere aber keine Vor- oder Nachteile erfährt.

Eine wichtige und weitverbreitete Symbiose ist die Beziehung zwischen Blütenpflanzen und ihren Bestäubern, bei der die Blütenpflanzen über Blütenfarben und Geruchsstoffe spezifische Insekten anlocken und durch Nektar belohnen. Je nach Blütenaufbau und Blütenchemie wird hier zwischen den Bienen-, Hummel-, Falter-, Käfer- und Fliegenblumen unterschieden. Ebenso vielfältig sind die Anpassungen von Pflanzen, um Samen und Sporen durch Tiere verbreiten zu lassen. Hier geht es um Frugivore, die von reifen Früchten angelockt werden, diese fressen und die Samen später mit dem Kot ausscheiden, aber auch um Pflanzensamen mit nahrhaften Elaiosomen (Ölkörperchen), die von Ameisen eingesammelt und so verbreitet werden.

Symbiosen betreffen aber nicht nur Pflanze-Tier-Beziehungen, sondern auch Interaktionen mit Pilzen, Bakterien und Flechten. Mykorrhizen bilden ausgedehnte Myzelnetzwerke im Wurzelbereich von Pflanzen, über die Stickstoff- und Phosphorverbindungen den Wurzeln

zugeführt werden. Als Gegenleistung wird der Pilz von der Pflanze mit Kohlenhydraten aus der Photosynthese versorgt. Die Myzelnetzwerke – auch als *Wood Wide Web* bezeichnet – sind sehr ausgedehnt und können Wurzeln unterschiedlicher Pflanzen gleichzeitig verbinden. So können Botenstoffe zwischen individuellen Pflanzen ausgetauscht werden. Auch die symbiotische Stickstofffixierung bei Fabaceen durch Knöllchenbakterien in Wurzelknöllchen gilt als eine verbreitete Symbiose. Von evolutionärer Bedeutung ist die intime Dauersymbiose zwischen Pilz, Grünalgen und Bakterien, die wir taxonomisch als Flechten bezeichnen.

Die Hauptkapitel des Naturführers sind den zwischenartlichen Symbiosen gewidmet, die ein aufmerksamer Beobachter in verschiedenen Lebensräumen entdecken kann. Es geht um Spaziergänge in der Stadtnatur, im Wald, am Waldrand, auf Dünge-, Mager- und Feuchtwiesen, auf dem Acker, an Gewässern und im Hochgebirge. Hier finden sich beeindruckende Beispiele für die großartige Vielfalt an Wechselwirkungen, die unsere Natur immer noch aufweist. Der Feldführer hilft, die Augen zu öffnen. Er ist sehr kompetent geschrieben, informativ illustriert und didaktisch gut aufgebaut. Damit ist er eine Bereicherung und enthält spannende Informationen für jeden Biologen und Naturbeobachter.

Michael Wink, Heidelberg

Symbiosen beobachten.

Feldführer für unsere Wälder, Wiesen, Äcker, Seeufer und Stadtnatur. Andreas Gigon, Felix Stauffer, Haupt-Verlag, Bern, 2024, 207 S., 28 Euro, ISBN 978-3-258-08362-9.

PARTNER DES MENSCHEN

Das Rentier: Helfer in der Arktis

Diese Hirschart ist einer der wichtigsten Fleisch- und Pelzlieferanten sowie unersetzliches Zugtier für nordische Volksstämme und deshalb in der Kultur dieser Menschen fest verankert. Bei uns ist das Ren als Zugtier für den Schlitten des Weihnachtsmannes populär geworden, der natürlich am Nordpol wohnt.



ABB. 1 Ein eurasisches Rentier – das Geweih ist immer asymmetrisch. Foto: Alexandre Buisse über Wikipedia.

Das Rentier (*Rangifer tarandus*) ist bislang die einzige Hirschart, die vom Menschen als Nutztier gehalten wird – züchterische Ziele wurden bislang kaum verfolgt. Die in Nordamerika als Karibus bekannten Herdentiere sind weltweit ein fester Bestandteil vieler indigener Kulturen des hohen Nordens. Ohne die tierischen Helfer wäre das Über-

leben in den subarktischen Zonen deutlich mühsamer.

R. tarandus gehört zu den mittelgroßen Hirschen (Familie *Cervidae*) und bewohnt die baumarmen, kalten Flachlandregionen der Nordhalbkugel (v. a. Alaska, Kanada, Grönland, Skandinavien, Nordrussland). Je nach Verbreitungsgebiet schwankt die Größe. Die Schulterhöhe beträgt 90 bis 140 Zentimeter, das Gewicht 60 bis 300 Kilogramm. Im Gegensatz zu allen anderen Hirscharten tragen bei den Rentieren auch Weibchen ein Geweih. Bei beiden Geschlechtern ist dieses stangenförmig, verzweigt und typischerweise nach vorne gebogen (Abbildung 1). Die Formgebung der Geweihe ist unregelmäßig und bei jedem Individuum unterschiedlich, aber vor allem entscheidet es über die Stellung innerhalb der Herdenhierarchie. Außerhalb der Wandersaison (Abbildung 2) bilden sich Gruppen aus meist nicht mehr als 100 Tieren, die entweder nur aus er-

wachsenen Männchen – oder bei anderen Gruppen – nur aus Weibchen bestehen. Naht der arktische Winter, finden sich die Rentiere zu riesigen Herden von bis zu 100.000 Tieren zusammen. Die Herden unternehmen saisonale Wanderungen von bis zu 5.000 km. Danach zerfällt die Riesenherde wieder in kleine Gruppen. Die Hirsche sind meist reine Grasfresser, brauchen aber im Winter auch Moose, Pilze und sogenannte Rentierflechten. Wolf, Luchs, Vielfraß und Bär jagen zwar die arktischen Hirsche, erbeuten aber meist nur kranke Tiere, die nicht so schnell laufen können.

Während der Paarungszeit im Oktober versuchen dominante Männchen möglichst viele Weibchen in einem Harem um sich zu versammeln. Die Geburt der Kälber erfolgt im Mai bis Juni, wobei die Kälber meist schon nach einer Stunde in der Lage sind, der Herde zu folgen. Besondere Anpassungen an den schneereichen Lebensraum sind neben einem hellen Winterfell besonders spreizfähige Hufe mit zusätzlichen Afterklauen, die für eine verbesserte Trittsicherheit sorgen. Ihre Nase ist stark durchblutet und heizt die eingeatmete Luft in Sekundenschnelle hoch, damit die Lunge nicht auskühlt. Außerdem können die Kälber den Wärmeverlust durch eine verbesserte Wärme-



ABB. 2 Rentierherden können täglich 20 bis 60 km zurücklegen. Foto mit freundlicher Genehmigung von Ina Reinecke.

KLICKS IM SCHNEEGESTÖBER



Damit die Herde auch bei schlechter Sicht zusammenbleibt, haben Rentiere einen eingebauten, akustischen Peilsender: Bei jedem Schritt rutscht die Sehne des Fußes über einen Knöchelvorsprung und gibt ein schnalzendes Geräusch von sich. Foto: Zoo Wuppertal.

produktion ausgleichen, die im Vergleich zu anderen Säugern bis zu fünfmal effizienter sein soll. Rentiere werden im Schnitt 12 bis 15 Jahre alt.

Rückzug nach der Kaltzeit

Während der letzten Kaltzeit reichte das Verbreitungsgebiet der Rentiere auf dem nordamerikanischen Kontinent bis an die Grenzen Mexikos und in Europa bis zu den Pyrenäen. Im Laufe der anschließenden Warmzeit zogen sich die Herden wieder nach Norden zurück. Auf den britischen Inseln starben Rentiere vor knapp 10.000 Jahren aus. Aber 1952 wurde eine Gruppe von 29 Tieren in Zentralschottland ausgewildert, die mittlerweile zu einer Herde von 130 Tieren angewachsen ist.

Schon in der Altsteinzeit haben Menschen auf Rentiere Jagd gemacht und dies in Höhlenzeichnungen festgehalten. Aber erst vor 5.000 Jahren begann in Sibirien die Haltung der Rentiere, wobei sich der Mensch meistens der Lebensweise dieser Nutztiere anpasste und nur in geringem Maße züchtete. Um 1000 v. Chr. wurde die Rentierhaltung aus Sibirien kommend in Skandinavien eingeführt. Die Hirsche lieferten den Völkern des Nordens seit jeher viele Rohstoffe, die das Überleben in den kalten Klimaten ermöglichten: Fleisch, Pelze, Leder, Geweih und Knochen. Die Suche nach immer neuen Weidegründen förderte die nomadische Lebensweise, so dass Rentiere auch für den Transport genutzt wurden: Entweder direkt als Last- und Tragetiere oder indem man sie vor einen Schlitten spannte (Abbildung 3). Noch heute ist die Lebensweise nordischer Volksgruppen wie die der Samen in Lappland von Rentieren geprägt. Und wie heutzutage jedes Kind weiß, wird auch der Schlitten des Weihnachtsmannes von – flugfähigen – Rentieren gezogen (Abbildung 4).

Von den etwa 3 Millionen Rentieren in menschlicher Obhut leben



ABB. 3 Ein Rentier zieht einen traditionellen Holzschlitten in Lappland.

Foto: Pasja über Pixabay.



ABB. 4 In Kindergeschichten können Rentiere auch fliegen.

Grafik: www.pixabay.com.

drei Viertel in Sibirien. Noch heute gibt es Menschen, die einige Monate im Jahr als Nomaden mit ihren Herden in der extrem kalten, russischen Taiga umherziehen. Die Rentierwirtschaft wird z. B. beim Volksstamm der Nomi noch traditionell mit Zelten und Schlitten betrieben. Den Hirtenfamilien sind die Tiere individuell bekannt – und das bei bis zu 3.000 Herdenmitgliedern! So bewachen die Menschen eine Herde, die sich im Umkreis von 20 bis 40 km um das Lager bewegt. Im Unterschied zu den russischen Hirten nutzen die Samen Skandinaviens aber auch Motorschlitten und Hubschrauber, um große Herden zusammenzutreiben.

Klimawandel belastet Populationen

Rentiere sind nicht nur an niedrige Temperaturen angepasst, sondern sie vertragen milde Temperaturen ungleich schlechter. Neben einer unweigerlich ansteigenden Zahl von Stechmücken macht den Hirschen auch zu schaffen, dass anstelle von Schnee häufiger Regen fällt. Gefriert dieser auf der Schneedecke, kommen die Tiere nicht mehr an ihr Futter und müssen hungern.

Zukünftig wird sich wohl die Beziehung zwischen Mensch und Rentier verändern müssen. Unsere Fürsorgepflicht sollte den arktischen Helfern auf jeden Fall zugutekommen!

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

AUSSERSCHULISCHE LERNOORTE

Museum am Schölerberg – Die Entwicklung des Lebens bis zu städtischen Zukunftsmodellen

Nach einer ca. dreijährigen Bauzeit präsentiert sich das neu gestaltete Museum mit angegliedertem Planetarium in einer dem Zeitgeist angepassten Gestaltung. Dabei bilden „Evolution, Biodiversität, Klimawandel, Boden und Nutzung“ die Leitgedanken der einzelnen Ausstellungsebenen.

Auf ca. 1800 Quadratmetern haben die Besucher die Möglichkeit, mehr als 700 zeitgemäß gestaltete Exponate zu den fünf Ausstellungsbereichen Wasser, Wald, offenes Land, städtisches Leben und der neu

hinzugekommenen Astronomieabteilung zu erkunden. Dabei ist der als eindrucksvolles Diorama konzipierte Karbonwald mit seiner weltweit nur dreimal ausgestellten 308 Mio. Jahre alten Sigillariawurzel (Abbildung 1)

ein Zuschauer magnet mit Lokalkolorit. Evolutive Entwicklungen werden auch in den rekonstruierten, mittels *augmented reality* wiederentdeckten Urzeittieren und im 180-Grad-Kino erlebbar. Hinzu kommt ein Landschaftsschnitt des Osnabrücker Landes, ebenfalls durch die Dioramatechnik erlebbar gemacht.

Im Eingangsbereich durchwandert man zunächst einen Planetenweg (Abbildung 2) Richtung Planetarium im Untergeschoß. Dort geht es um aquatische Ökosysteme und ihre versteinerten Zeitzeugen (Abbildung 3). Viele Erkundungsmöglichkeiten bietet anschließend der begehbare Ausschnitt durch ein Modell-Waldökosystem (Abbildung 4) mit einigen charakteristi-



ABB. 1 Diarama eines Karbonwalds (a) mit einer versteinerten Sigillaria-wurzel (b). Alle Fotos: Christiane Högermann.



ABB. 2 Planetenweg im Eingangsbereich.



ABB. 3 Versteinerte Schätze aus aquatischen Ökosystemen.



ABB. 4 Begehbarer Ausschnitt eines Modell-Waldökosystems.

schen Tieren. Exponate und Simulationen aus dem Bereich „Stadtökologie“ stellen einen weiteren



ABB. 5 Simulation urbanen Lebens zum Thema „Verkehr und Mobilität“.

attraktiven Ausstellungsbereich dar, der wie alle Stationen auch viele „Arbeitsplätze“ für „Jung und Alt“, spannende, lehrreiche Simulationen und Mitmachmöglichkeiten bietet – hier zum Beispiel zum Thema „Verkehr und Mobilität“ (Abbildung 5). Der gesamte Rundgang ist angenehm geradlinig strukturiert und vollständig behindertengerecht zugänglich.

Dem Museumsgebäude ist ein Umweltbildungszentrum angegliedert. Sowohl hier als auch im Natur-

kundemuseum und Planetarium werden pädagogische Programme und regelmäßig Sonderveranstaltungen angeboten. Informationen rund um die drei Einrichtungen finden sich unter www.museum-am-schoelerberg.de und info@museum-am-schoelerberg.de.

*Christiane Högermann,
Osnabrück*

BIO-HIGHLIGHTS

Alles Banane ...



Foto: Darkkone über Wikipedia

Die Cavendish-Banane¹ ist vermutlich die beliebteste Frucht der Welt. Seit Jahren weiß man, dass sie wohl sehr bald wegen Infektion mit *Fusarium oxysporum* TR4 aussterben wird. Zurzeit können die Plantagen noch mit großen Mengen an Fungiziden halbwegs überleben. In Australien wurde jetzt mit QCAV-4 die erste gentechnisch modifizierte, TR4-resistente Cavendish zugelassen. Sie enthält das vollständige RGA2-Gen aus einer wilden Banane, das in der Cavendish-Banane nur in inaktivem Zustand vorliegt. In einer neuen Versuchsreihe wird zurzeit das inaktive RGA2-Gen mit Hilfe von CRISPR-Cas reaktiviert. Diese Variante würde in Australien nicht als gentechnisch verändert gelten; in Europa müssten beide Varianten als GVO (Gentechnisch veränderter Organismus) gekennzeichnet werden. <https://t1p.de/9w4z3>, <https://t1p.de/2wur2>, <https://t1p.de/4em7y> (Paywall)

¹ Mehr zu dieser Problematik finden Sie in unserem Beitrag „CRISPR-Cas für eine nachhaltigere Landwirtschaft“ im Biuz-Sonderheft „CRISPR-Cas - mehr als nur Verteidigung“, das kostenlos unter www.vbio.de/biuz-crispr zugänglich ist.

Roadkills

Die Universität Innsbruck hat eine ungewöhnliche Methode zum Monitoring der Biodiversität „erfunden“: Insektenreste werden von der Windschutzscheibe von Linienbussen abgekratzt, die DNA wird isoliert und das Metagenom des „Roadkills“ aufgenommen. Daraus können alle Insekten, die auf der Scheibe gelandet sind, identifiziert werden. Obwohl nur Fluginsekten erfasst werden, hat diese einfache Methode gewaltige Vorteile: Das arbeitsintensive Aufstellen und Beprobieren von Fallen entfällt, verschiedene Habitate entlang einer Buslinie (Stadtverkehr, Überlandverkehr etc.) können reproduzierbar zu verschiedenen Jahreszeiten untersucht werden und einen Langzeitüberblick über die Entwicklung von Insektenpopulationen liefern. <https://t1p.de/ftfwx>



Beim Insekten-Busmonitoring werden Hunderte Arten von Fluginsekten auffindig gemacht, darunter die Hainschwebfliege. Foto: Universität Innsbruck/Marjana Ljubisavljevic



MIKROBEN VERSTEHEN

Auch Mikroben altern

Nicht alle Mikroben, die aus einer Zellteilung hervorgehen, teilen sich erneut. In natürlichen Ökosystemen können sie stattdessen auch Teil der Nahrungskette werden, eine Phageninfektion erleiden und lysieren, durch Nährstoff- und Energiemangel eingehen oder einfach altern, dabei ihre Fitness einbüßen und schließlich sterben. Alterungsprozesse begleiten Prokaryoten seit der Entstehung der ersten Zellen – und führen neben der Teilung zum anderen natürlichen Ende eines individuellen Mikrobenlebens.

Wenn wir den Verlauf des Alterns betrachten, haben wir meist uns selbst oder größere Lebewesen im Blick. Letztlich altern jedoch die Zellen eines Organismus, indem ihre Leistungsfähigkeit abnimmt, was das Zusammenspiel zwischen ihnen, etwa in Geweben und Organen, beeinträchtigt. Alterungsprozesse werden deshalb auch an Zellkulturen und einzelligen Hefen (*Saccharomyces*) als Modellorganismen studiert [1], wobei der Eindruck entstehen kann, dass Alterung ein spezifisches Phänomen der Eukaryoten ist. Einschränkungen durch Leistungsrückgang (interne Ursachen) und Schädigung (externe Einflüsse) zellulärer und molekularer Funktionen, die sich mit zunehmendem Alter anhäufen, betreffen aber

grundsätzlich alle lebenden Zellen – auch Mikroorganismen [2]. Und diese hatten sich bereits in etwa 1,5 Milliarden Jahren Evolution mit den Folgen des Alterns und der Degeneration auseinandergesetzt, ehe aus Prokaryoten eukaryotische Zellen hervorgingen. Wie sieht Altern also bei Mikroben aus und wie gelingt es ihnen, ein mitunter sehr langes Leben zu führen [3]?

Altern Bakterien, die sich schon nach Minuten teilen?

Das Modellbakterium *E. coli* lieferte lange ein vermeintliches Beispiel für Zellen, die nicht altern. Die Mikroben leben im Labor nur 20 Minuten als Individuen, um sich dann jeweils symmetrisch in zwei gleiche Nachkommen zu teilen, die einen wieder-

kehrenden Lebensverlauf versprechen. Eine morphologisch symmetrische Teilung mündet aber keineswegs in identische Tochterzellen [2, 4]. So unterscheiden sich die beiden Zellpole des stäbchenförmigen Bakteriums in ihrem Alter; ein Pol entstand durch die vorangegangene Teilung neu, der andere ist mindestens um eine Teilungsperiode älter. Die ungleichen Historien der Zellpole führen im Laufe der weiteren Vermehrung zu einer heterogenen Altersstruktur in der Population (Abbildung 1) [4]. Sie äußert sich entsprechend im Status der Makromoleküle in und an der polaren Membran und Zellwand, da diese Moleküle während einer (kurzen) Generationszeit nicht oder nicht vollständig erneuert werden [5, 6]. Nach einigen Vermehrungszyklen bilden sich auf diese Weise unterschiedlich „gealterte“ Individuen, deren Fitness voneinander abweicht, was man auch experimentell beobachtet. Über neun Generationen verfolgte Individuen von *E. coli* zeigten bei Vergleichen, dass Zellen mit älteren Polen längere Generationszeiten, eine geringere Zelllänge, weniger Masse und eine höhere Sterbewahrscheinlichkeit aufweisen [4]. In einer weiteren Untersuchung

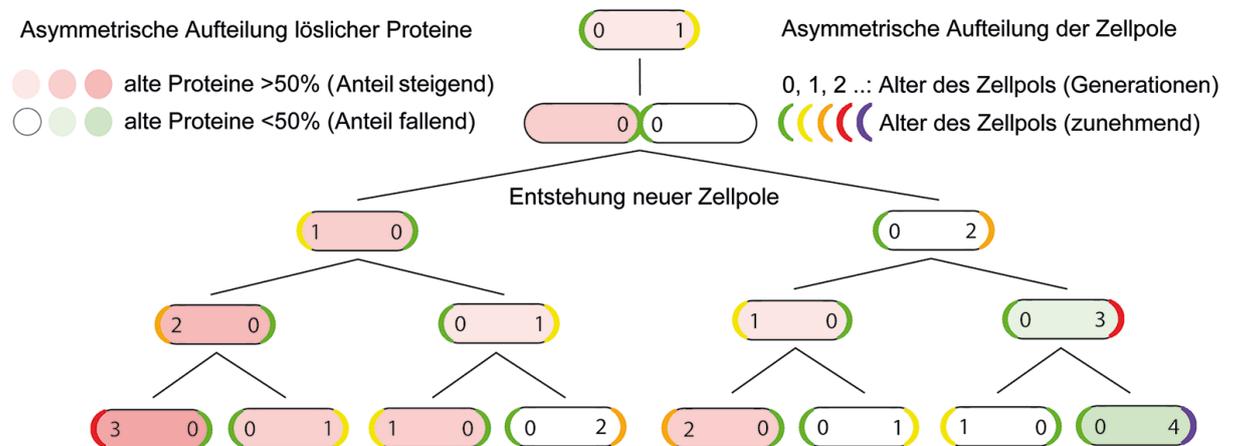


ABB. 1 Schematisches Beispiel für Alterungseffekte in teilungsaktiven Mikroben. Durch morphologisch symmetrische Teilungen entsteht eine asymmetrische Altersverteilung von Zellpolen und eine zufällige Ungleichverteilung von alten ererbten und während des Wachstums neu gebildeten (löslichen) Proteinen. Eine Population enthält immer ein Gemisch unterschiedlich gealterter Zellen mit entsprechend verschiedener Fitness, Teilungsrate und Überlebenswahrscheinlichkeit. Werden gealterte Makromoleküle asymmetrisch an die Nachfolgeneration weitergegeben, so kann in Teilen der Population ein Verjüngungseffekt entstehen (weiße und grüne Zellen). Die Alterskombination löslicher Proteine mit Zellpolen ist hier willkürlich gewählt. Darstellung in Anlehnung an [2, 4].

fand man, dass funktionslose (schadhafte) Proteine in Aggregaten (*inclusion bodies*) abgelagert werden und diese vor der Teilung bevorzugt in die Region des alten Zellpols segregieren. Solche Tochterzellen wiesen eine über 30 Prozent geringere Wachstumsrate auf und somit einen deutlichen Alterungseffekt. Umgekehrt wuchsen Tochterzellen mit jüngerem Pol und ohne geerbtem Proteinaggregat schneller als die Mutterzelle mit Einschlusskörper und profitierten von einem Verjüngungseffekt [6].

Ähnliches gilt für lösliche, nicht in Aggregaten entsorgte Makromoleküle. Jede Zelle enthält unmittelbar nach ihrer Entstehung alte Proteinkomplexe (teils mit zufällig erworbenen Fehlern), die sie während des Wachstums bis zu ihrer eigenen Teilung durch neu synthetisierte ergänzt und teilweise ersetzt. Ihre Tochterzellen erhalten dann jeweils ein Gemisch unterschiedlich alter Proteine, die aber nicht zwingend die exakt gleiche Altersverteilung aufweisen (Abbildung 1) [2, 7]. Dies gilt umso mehr für Mikroben mit sichtbar asymmetrischer Teilung wie bei *Caulobacter crescentus* [8], asymmetrischem polarem Wachstum bei Mycobakterien [9] oder Sprossung, die bei Planctomyceten vorkommt [2, 10]. In Mikroben manifestiert sich ein Alterungsprozess also im Laufe (kurzfristig) wiederholter, biochemisch asymmetrischer Teilun-

gen durch zufällig oder bevorzugt ungleiche Anhäufung schadhafter Zellbestandteile, die überwiegend aus dem Stoffwechsel- und Synthesegesehen der wachsenden Zellen herrühren (Aggregate) oder über den Teilungsprozess entstehen (Zellpole) [2]. Die betroffenen Individuen büßen mit zunehmendem „Alter“ an Leistungsfähigkeit ein und reduzieren die durchschnittliche Fitness der Population [7]. Die Verteilung nachteiliger Mutationen weicht davon ab, letztere werden strenger systematisch an die Nachfolgegenerationen vererbt.

Altern langlebige Mikroben?

Mikroben können Alterung durch aktiven Stoffwechsel und rasch aufeinanderfolgende Teilungen mit dabei entstehenden Fehlern deutlich hinauszögern, indem sie ihre Generationszeit ausdehnen [2]. Diese „Strategie“ verfolgen Mikroben notwendigerweise, die in nahrungs- und energielimitierten Ökosystemen leben und sich daran angepasst haben. Ihre Stoffwechselrate kann bis zu einem Faktor 10⁶ geringer ausfallen als die von Laborkulturen [11]. Während einzelne, durch externe Effekte erworbene Schädigungen von Makromolekülen während eines relativ kurzen Mikrobenlebens sich nicht drastisch bemerkbar machen müssen, sollten sie sich dagegen im Laufe lange währender Generationszeiten anhäufen und die Seneszenz

der Zellen fördern. Meist ist dann eine ganze Population betroffen wie etwa bei den langlebigen Organismen der tiefen marinen Sedimente [3]. Physikalisch-chemische Einflüsse durch ionisierende Strahlung, Molekülradikale, Hitze (und später Oxidationsstress) sowie interne biochemische Vorgänge wie Fehlfaltung und Ansammlung funktionsloser Proteine und Molekülfragmente wirkten bereits auf die Fitness von Mikroben, nachdem sie aus den ersten lebenden Systemen entstanden und später sich ändernden ökologischen Bedingungen ausgesetzt waren. Alle Zellen erfuhren von Anbeginn an den Selektionsdruck, die negative Wirkung molekularer Schäden abwenden zu müssen. Im Laufe der mikrobiellen Evolution entstanden verschiedenste Eigenschaften und enzymatische Reparatursysteme, die die Degeneration insbesondere von DNA und Proteinen vermindern oder beseitigen. Sie sind zu umfangreich, um sie hier ausführlicher betrachten zu können (Beispiele in Tabelle 1). Sie bewirken oder tragen zumindest entscheidend dazu bei, dass individuelle Mikroben in energie- und nährstofflimitierten Ökosystemen Jahre oder gar viele Jahrzehnte überdauern können und lebensfähig bleiben [3]. Gleichwohl kennt man heute keine Mikroorganismen, die nicht altern würden. Frühere Vermutungen, die dies Bakterien mit symmetrischer

TAB 1. MIKROBIELLE FUNKTIONEN UND SYSTEME ZUR ABWENDUNG VON ZELLSCHÄDEN

Eigenschaft / System	Funktion / Wirkung	Beispiele / Vorkommen
Dauerformen	inaktive Zustandsform ohne Stoffwechsel (Sporen)	Bacillaceae
Ruhezustand	minimaler Stoffwechsel, minimale Fehlfunktionen	im Tiefseesediment
lange Generationszeiten	Minimierung wachstums- und teilungsbedingter Fehler	im Tiefseesediment
Minizellen	vermehrungsunfähige Zellabschnürungen zur Entsorgung schadhafter oder toxischer Moleküle (Aggregate)	<i>E. coli</i>
Einschlusskörper	Entsorgung funktionsloser Proteinaggregate in alte Tochterzellen durch asymmetrische Teilung	<i>E. coli</i>
Oligo-/Polyploidie	mehrfache DNA-Kopien zur Reparaturfähigkeit multipler DNA-Brüche für langfristigen Genomerhalt	Haloarchaea
diverse Nukleasen	Reparatur verschiedener DNA-Schäden und Korrektur von Nukleotidaustauschen	verbreitet
Endoproteasen	Enzyme zum Abbau und Recycling fehlerhafter Proteine	verbreitet
Chaperone/ Chaperonine	Proteine zur Vermeidung von Proteinfehlfaltungen und Enzyme zur Korrektur fehlgefalteter Proteine	verbreitet
(enzymatische) Antioxidantien	Vermeidung und Reparatur von Molekülveränderungen	verbreitet

Teilung zugeschrieben [12], haben sich nicht bestätigt (siehe oben). Und es besteht offenbar kein evolutionärer Vorteil darin, Alterungsprozesse um den Preis beliebig großen Aufwands völlig zu verhindern [2]. Wenn Mikroben nicht ein Ende durch Eingang in die Nahrungskette, durch Phageninfektion, Verhungern, Hitze, Vergiftung, Antibiotika oder sonstige Vorkommnisse ereilt, sterben sie – mitunter erst in sehr hohem Alter – eines natürlichen Todes.

Harald Engelhardt, Martinsried

Literatur

- [1] A. Schulze et al. (2024). *Meth. Cell Biol.* 181, 87–108, <https://doi.org/10.1016/bs.mcb.2022.09.006>
- [2] R. Z. Moger-Reischer, J. T. Lennon (2019). *Nat. Rev. Microbiol.* 17, 679–690, <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0253-y>
- [3] H. Engelhardt (2024). *Biologie in unserer Zeit* 54, 394–395.
- [4] E. J. Stewart et al. (2005) *Plos Biol.* 3, <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0030045>
- [5] M. A. de Pedro et al. (1997). *J. Bacteriol.* 179, 2823–2834.
- [6] A. B. Lindner (2008), *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 105, 3076–3081, <https://doi.org/10.1073/pnas.0708931105>
- [7] L. Chao et al. (2016). *PLOS Comp. Biol.* 12, <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1004700>
- [8] M. Ackermann et al. (2003). *Science* 300, 1998, <https://doi.org/10.1126/science.1083532>
- [9] B. B. Aldridge et al. (2012). *Science* 335, 100–104, <https://doi.org/10.1126/science.1216166>
- [10] S. Wiegand et al. (2020). *Nat. Microbiol.* 5, 126–140, <https://doi.org/10.1038/s41564-019-0588-1>
- [11] T. M. Hoehler, B. B. Jørgensen (2013). *Nat. Rev. Microbiol.* 11, 83–94, <https://doi.org/10.1038/nrmicro2939>
- [12] T. Nyström (2002). *Curr. Opin. Microbiol.* 5, 596–601.

Bewerbung ist weiterhin möglich

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

Bewirb Dich als studentisches Mitglied im Editorial Board der BiuZ!

Was kommt auf Dich zu?

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

Deine Bewerbung

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



RÜCKBLICK

- 3/24 Ein Botschafter gegen Artensterben und für Forschungsbedarf
- 3/24 Über den Ursprung des Lebens
- 3/24 Unerwartete Vielfalt im Reproduktionsverhalten von *Calluna vulgaris*
- 3/24 Ätherische Öle in Lippenblütlern
- 3/24 Ein Co-Pädagoge auf vier Pfoten
- 4/24 Weiblich – männlich – divers: Ist es so einfach?
- 4/24 Geschlecht und Gender: Eine biologische Perspektive
- 4/24 Luft taugt nicht für Sperma
- 4/24 Die Fortpflanzungsbiologie der Froschlurche
- 4/24 So subtil, so potent, so omnipräsent
- 4/24 Experimente im Aufschwung

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

BiuZ 2/2025 erscheint im April 2025

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

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

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



IM NÄCHSTEN HEFT

Extremophile – Leben am Rand des Möglichen

Extremophile Lebewesen sind Meister der Anpassung und bewohnen Umgebungen, die hinsichtlich Temperatur, Druck, pH-Wert oder Salzkonzentration „extrem“ sind. Für die Astrobiologie sind diese Organismen von großer Bedeutung, da sie Hinweise darauf liefern, unter welchen Bedingungen Leben auch auf anderen Himmelskörpern existieren könnte.

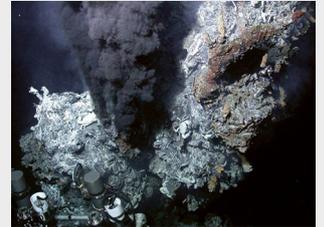


Foto: DLR / K. Beblo-Vranesevic.

Typisch Geier?

Das Bild des Geiers ist oft von Vorurteilen geprägt wie etwa der sprichwörtliche Ausdruck „Aasgeier“ eindrücklich belegt. Unser Artikel beleuchtet die Verwandtschaftsverhältnisse und das Verhalten dieser vielseitigen Greifvogelgruppe und stellt insbesondere die Frage, welche Merkmale als Anpassung an das Aasfressen entstanden sind.



Foto: M. Wink.

Chytridienpilze in der Polarregion

Chytridien sind einzellige Pilze mit vielfältiger Lebensweise als Saprobionten oder Parasiten. In den Polarregionen sind sie weit verbreitet. Durch die Infektion von Kieselalgen, die die Nahrungsbasis polarer, küstennaher Ökosysteme in diesen extremen Umgebungen bilden, kommt den Pilzen eine große ökologische Bedeutung zu.



Foto: Illic/Grossart.

Biowaffenkontrolle in den Lebenswissenschaften

Ein drastisches Beispiel für den Missbrauch von Erkenntnissen aus der biowissenschaftlichen Forschung ist die Entwicklung biologischer Waffen. In letzter Zeit ist auf nationaler und internationaler Ebene Bewegung in den Prozess der Biowaffenkontrolle gekommen. Lebenswissenschaftler/-innen spielen dabei eine zentrale Rolle.



Faszination Stereofotografie

Die stereoskopische (oder 3D-)Fotografie hat in den vergangenen Jahrzehnten zahlreiche Anwendungsfelder in verschiedenen biologischen Disziplinen gefunden. Dies liegt unter anderem daran, dass bereits durch einfache Aufnahmemethoden Bilder mit sehr guter Tiefenwirkung erzeugt werden können. Unser Beitrag stellt die Methodik anhand von Beispielen vor.

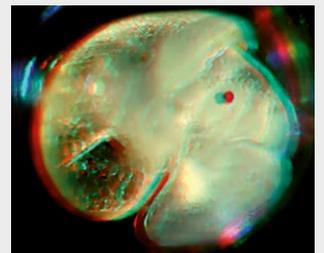


Abb.: R. Sturm.

Wir bitten um Verständnis dafür, dass angekündigte Artikel hin und wieder aus redaktionellen Gründen verschoben werden müssen.



Die Jobbörse

für **Biologen,**
Biomediziner &
Biowissenschaftler

Jetzt passende
Jobs finden



Keine Jobangebote
verpassen!

Online 
Karriere
messe
by jobvector

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

www.jobvector.de



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!

