

3 | 2022

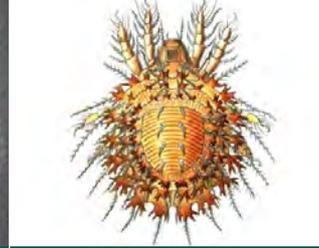
VBio

Verband | Biologie, Biowissenschaften
& Biomedizin in Deutschland

MYKOLOGIE
Lebensbedrohliche
Pilzinfektionen

**BODEN-
ORGANISMEN**
Hornmilben

ÖKOLOGIE
Chemodiversität
bei Pflanzen



BIOLOGIE

IN UNSERER ZEIT

Fleischproduktion 2.0



Studierende gestalten die BIUZ

Liebe Leserinnen und Leser, liebe Mitglieder des VBIO, liebe Studienanfängerinnen und Studienanfänger, diese Ausgabe der BIUZ ist besonders. Nicht nur weil sie mit Blick auf den Anfang des Wintersemesters und damit den Studienstart tausender neuer Studierender der Biowissenschaften zusammengestellt wurde, sondern weil sowohl die Artikel zu Politik & Gesellschaft als auch dieses Editorial fast ausschließlich von Studierenden verfasst wurden. Die Idee ist es, besonders Studienanfänger/-innen zu erreichen, aber natürlich auch alle, die mit Interesse die Biologie in unserer Zeit lesen. Vielleicht werden sich einige von Ihnen dadurch an ihre Studienzeit zurückerinnern oder sich einfach auch für die ausgesuchten Themen interessieren. Aber vor allem wollen wir Ihnen eine studentische Perspektive näherbringen. Wir hoffen natürlich, dass Ihnen der Fokus des Heftes zusagt, und freuen uns jetzt schon auf Ihre Rückmeldungen.

Vor allem zum Abschluss des Studiums stellt sich fast allen Studierenden eine Frage, auf die sie im Studium selten vorbereitet werden: Welche Berufsmöglichkeiten hat man in den Biowissenschaften jetzt eigentlich? Damit sich diese Frage aber nicht erst mit dem Erhalt der Abschlussurkunde stellt, wollen wir ein paar Berufswege aufzeigen. Und wie so oft zeigt sich: Die Biologie ist sehr vielfältig. Wir möchten hier auch zeigen, dass man als Studierender keine Angst haben muss, Personen, die bereits mitten im Leben stehen, anzusprechen und nach dem Werdegang zu fragen – schließlich haben die Netzwerke der jungen Generation an der Pandemie und den zahlreichen Videokonferenzen gelitten. Da die Pandemie sich aber (zumindest aktuell) politisch dem Ende zuneigt, möchten wir die Chance ergreifen, Möglichkeiten aufzuzeigen, wie man neben dem Studium aktiv und kreativ werden kann. Hierzu haben wir drei verschiedene Artikel vorbereitet, die möglichst viele Studienanfänger/-innen dazu inspirieren sollen „über den Tellerrand hinauszublicken“.

Für alle (ehemaligen) Studierenden, die sich jetzt denken: „Für Diplom bzw. Staatsexamen waren umfangreiche Orientierungsmöglichkeiten im Studium noch selbstverständlich, aber Bachelor-Master-Studiengänge sind dafür zu verschult.“ – Ja, das mag in vielen Fällen so sein, aber das liegt doch vor allem an der Umsetzung des Systems und diese Aufgabe lag und liegt bei den Fakultäten. Wenn sich also Hochschulmitglieder etwas mehr Begeisterung ihrer Studierenden für nicht prüfungsrelevante Inhalte wünschen, dann könnte es ein sinnvoller Schritt sein, über mehr Freiräume im Studium nachzudenken. Einzig Lehramtsstudiengänge müssen sehr klar vorgegebene Richtlinien der Ministerien erfüllen und sind in der jetzigen Form leider wenig flexibel. Aber vielleicht ändern sich die Rahmenbedingungen dafür ja auch wieder.



Sebastian Neufeld ist seit Anfang seines Studiums in der Fachschaft Biologie Freiburg aktiv und wurde vor 2 Jahren als studentisches Mitglied in das Präsidium des VBIO gewählt. Zusammen mit Arian Abbasi, Sebastian Deiber, Mick Gottemeier und Asta Perl gehört er zum studentischen BiUZ-Team, das vielfältige Artikel zu dieser Ausgabe beitragen durfte.

In dem Beitrag zu iGEM nutzen wir diesen Wettbewerb, um die Vorteile von Praxiserfahrung neben dem Studium an einem konkreten Beispiel aufzuzeigen. Dazu gehören aber natürlich auch HiWi-Jobs, Labor- und Freilandpraktika sowie außeruniversitäre Tätigkeiten in diesen Bereichen. Der Artikel zum studentischen Engagement ist gewollt persönlich und etwas informeller geschrieben, um Studierende direkt anzusprechen – damit der Funke überspringen kann.

Im Bereich der Wissenschaftskommunikation wünschen wir uns einen stärkeren Fokus auf Studierende als riesige Gruppe mit (noch) größtenteils ungenutztem Potenzial. Mehr dezentrale Wissenschaftskommunikation könnte in Anbetracht der vielfältigen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts unserer Gesellschaft mehr Orientierung, Verständnis und Stabilität geben. Selbst Menschen, die durch die etablierten Kanäle nicht erreicht werden können, sitzen bei einer Familienfeier vielleicht neben einer Person, die Biologie studiert (hat). Dadurch eröffnen sich Möglichkeiten und Multiplikatoren, die der Wissenschaftskommunikation selbst mit einem Vielfachen der jetzigen (finanziellen) Unterstützung verschlossen bleiben. Aber gleichzeitig sind diese Situationen für vor allem junge Studierende potenziell unangenehm bis einschüchternd, da man im Bekanntenkreis gegen Halbwissen oder Desinteresse ohne Übung schlecht ankommt. Und genau deswegen wünschen wir uns eine stärkere Förderung unserer Kompetenzen in verschiedenen Formen von Wissenschaftskommunikation im Studium, um gut vorbereitet zu sein, um uns zu trauen, die Diskussion zu suchen und für unser Fach eintreten zu können. Damit könnten wir einen Beitrag für Verständnis und Anerkennung der Wissenschaft in der Gesellschaft leisten. Insbesondere sollte man sich aber auch der Bedeutung der Lehrkräfte und damit der Lehrkräftebildung für die Gesamtbildung unserer Gesellschaft bewusst sein. Mit diesem Beitrag wollen wir auf konkrete Möglichkeiten, Erfahrungen zu sammeln, eingehen, da hier nicht nur der eigene Kompetenzzugewinn im Mittelpunkt steht, sondern die Öffentlichkeit direkt profitiert.

Gute Lehre ist die Voraussetzung für ein gutes Studium und kann auch darüber entscheiden, in welche Fachrichtung sich Studierende langfristig entwickeln. Da die Zeit von Lehrenden oft sehr begrenzt ist – man hat ja schließlich nicht nur Lehre, sondern auch noch Forschung, Administration und Betreuung zu leisten – gibt es selten genügend Zeit, sich zusätzlich zur laufenden Lehre noch komplett neue Konzepte oder Module auszudenken. Um auf Projekte aufmerksam zu machen, die das trotzdem versuchen, gibt es Lehrpreise. Diese werden von verschiedenen Instanzen vergeben – manchmal von Fachschaften, oft auf Ebene der Universität oder des Landes, wobei die letzteren nicht Biologie-spezifisch sind. Ein – aus VBIO-Sicht – besonderer Lehrpreis ist der „Ars legendi-Fakultätenpreis für Mathematik und Naturwissenschaften“, der deutschlandweit für herausragende und innovative Lehre vergeben wird. Lehr-

preise dienen nicht nur dazu, das Engagement der Lehrenden zu ehren, sondern auch um öffentlich aufzuzeigen, was in der Lehre möglich ist und besonders gut ankommt. Vielleicht finden Sie ja in der diesjährigen oder einer der letzten Preisverleihungen ein Lehrkonzept, das Sie selbst inspiriert?

Wir wünschen Ihnen viel Spaß beim Lesen unserer Beiträge und bedanken uns beim VBIO für das Vertrauen, dieses Heft so aktiv mitgestalten zu dürfen! Auch bei Ihnen bedanken wir uns

fürs Lesen und freuen uns auf ein konstruktives Feedback. Und wenn Ihnen die Artikel genau so viel Spaß gemacht haben wie uns, wird das Heft zum Studieneinstieg nächstes Jahr vielleicht auch wieder viele studentische Beiträge beinhalten.

Ihr



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 schenken Ihnen den Mitgliedsbeitrag für 2022.

Wir freuen uns auf Sie!



Gute Gründe, dem VBIO beizutreten:

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



www.vbio.de



**GEMEINSAM FÜR DIE
BIOWISSENSCHAFTEN**

Jetzt beitreten!



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

Verlag:

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

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

Managing Editor:

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

Editorial Board:

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

Herstellung:

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

Anzeigenleitung:

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

Mitglieder- und Abo-Service:

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

Preise:

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

Geschäftsstellen des Verbandes:**Geschäftsstelle München**

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

Geschäftsstelle Berlin

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

Satz:

TypoDesign Hecker GmbH, Leimen.

Druck und Bindung:

ColorDruck Solutions GmbH, Leimen.

© VBIO e.V., München, 2022.

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

BIOLOGIE

3 | 2022 IN UNSERER ZEIT
www.biuz.de



Unser Titelthema wirft einen Blick auf die Zukunft der Fleischherstellung. In der modernen Produktionshalle zur Kultivierung von Fleisch lädt das US-amerikanische Unternehmen Upside Foods Interessierte ein, einen Blick hinter die Kulissen ihrer Produktion zu werfen. Damit wird einer der relevantesten Hürden auf dem Weg zur Etablierung am Markt begegnet: der Verbraucherakzeptanz. Mehr über die Entstehung dieser neuen Branche der „Zellulären Landwirtschaft“ erfahren Sie in unserer Titelgeschichte von Florian Fiebelkorn, die auf Seite 248 beginnt.

Foto: Upside Foods.

MELDUNGEN

206 Forschung & Entwicklung, Standorte, Digitale Welt, Preise, Ausstellung

POLITIK UND GESELLSCHAFT

- 211 „Role Models“ in der Biologie
- 214 Praxiserfahrung im Studium
- 216 Studentisches Engagement
- 218 Wissenschaftskommunikation: Studierende als Multiplikatoren
- 220 Das Biologiestudium aus unterschiedlichen Perspektiven
- 222 Können Förderprogramme schaden?
- 224 The *Master Biology Entry Programme* gewinnt den *Ars legendi*-Fakultätenpreis Biologie
- 225 KBF wieder in Präsenz unterwegs für die Biologie

TREFFPUNKT FORSCHUNG

- 227 Begrenzter Spielraum der Evolution – Mutationen im Genom weniger zufällig als gedacht
- 228 Rekordverdächtige Innervierung des Elefantenrüssels
- 229 Angst vor Spinnen: Fürchten wir uns eigentlich vor Skorpionen?
- 231 Ein winziger Krebs mit hohen Stiefeln
- 232 Wissenschaftliche Erkenntnis gegen Mythen und Ideologien
- 235 Step by Step – ein Bestimmungsschlüssel der häufigsten Insektenordnungen für Einsteiger
- 238 Von der Schule in den Weltraum – Experimente mit dem P51™-Fluoreszenz-Viewer

MAGAZIN

- 292 Bücher und Medien
- 295 Außerschulische Lernorte: MS Wissenschaft – das schwimmende Wissenschaftsmuseum
- 296 Partner des Menschen: Der Esel (*Equus asinus*)
- 298 Kolumne: Die Bestätigungsverzerrung: Wie wir stets unsere Erwartungen erfüllen

IM FOKUS

241 Chemische Diversität bei Pflanzen – wozu?

Caroline Müller

248 Fleisch(r)evolution

Florian Fiebelkorn | Jacqueline Dupont | Lena Szczepanski | Nadine Filko

262 Hornmilben – die unscheinbare Vielfalt aus dem Boden

Katja Wehner | Michael Heethoff

268 Lebensbedrohliche Pilzinfektionen

Franziska Schmidt | Thorsten Heinekamp | Axel A. Brakhage

278 Nichtgenetische Vererbung

Denis Meuthen

285 Per Vogel, Wind und Seilschaft

Stefan Bosch | Peter Lurz

248 Fleisch(r)evolution

Die Produktion von Fleisch trägt wesentlich zu Klimawandel und Biodiversitätsverlust bei. Einen Ausweg könnte kultiviertes Fleisch bieten. Verschiedene Aspekte dieses nachhaltigen und ethisch unbedenklichen Lebensmittels beleuchtet unser Artikel.



Foto: www.pikabay.com

268 Lebensbedrohliche Pilzinfektionen

Invasive Pilzinfektionen töten weltweit jährlich mehr als 1,5 Millionen Menschen und gelten inzwischen als globale infektiologische Herausforderung. Ein Grund hierfür ist, dass diese Pilze Strategien entwickelt haben, um das menschliche Immunsystem zu unterlaufen.



262 Hornmilben – die unscheinbare Vielfalt aus dem Boden

Trotz ihrer vermeintlichen Unscheinbarkeit besitzen Hornmilben eine Reihe faszinierender Eigenschaften. So besitzen sie ein ganzes Arsenal an Abwehrmethoden gegen Fressfeinde und haben im Laufe der Evolution zum Teil sogar die Männchen abgeschafft.

241 Chemische Diversität bei Pflanzen – wozu?



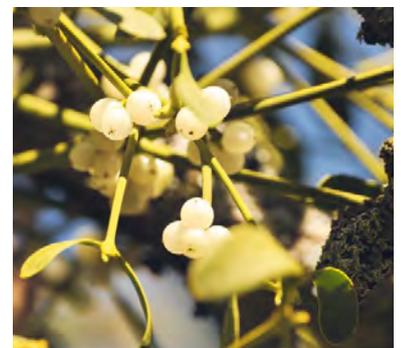
In einigen Pflanzenarten unterscheiden sich Individuen deutlich in der Zusammensetzung ihrer Sekundärmetaboliten. Welchen Nutzen dies in einer sich verändernden Umwelt haben könnte und warum Chemodiversität auch in der Landwirtschaft mehr Beachtung finden sollte, diskutiert unser Artikel.

278 Nichtgenetische Vererbung

Zunehmend wird klar, dass Organismen folgende Generationen über den Zustand der Umwelt informieren können, ohne die Basensequenz der DNA zu verändern. Dies ermöglicht ihren Nachkommen Anpassungen an veränderte Umwelten in Zeiträumen, die für eine genetische Evolution zu kurz sind.



285 Per Vogel, Wind und Seilschaft



Die parasitische Weißbeerige Mistel breitet sich in jüngster Zeit in einigen Regionen Europas stark aus – meist zu Lasten ihrer Wirtsbäume. Unser Beitrag stellt die unterschiedlichen Ausbreitungsstrategien der Mistel vor.

Auf dem superhydrophoben Biofilm des Cyanobakteriums *Hassallia byssoidea* bleiben Wassertropfen kugelförmig stehen und transportieren die Zellfäden zur Verbreitung weiter. Foto: Wilhelm Barthlott (Universität Bonn).



FORSCHUNG & ENTWICKLUNG

Wassertropfen perlen auf Oberflächen ab, reinigen dabei die Oberfläche und reduzieren den Befall mit Pilzsporen. Diese Selbstreinigung, den Lotuseffekt, nutzen auch Cyanobakterien (*Hassallia byssoidea*), die ersten Lebewesen an Land, um sich vor Wasserfilmen und Konkurrenten zu schützen. Das berichtet ein Forschungsteam um die Biologen Prof. Dr. Wilhelm Barthlott von der Universität Bonn und Prof. Dr. Eberhard Fischer von der Universität in Koblenz im Journal „Frontiers in Plant Science“. Auf dem extrem wasserabweisenden Biofilm des Cyanobakteriums *Hassallia byssoidea* bleiben Wassertropfen kugelförmig stehen und transportieren die Zellfäden zur Verbreitung weiter. Pflanzen und andere Organismen haben seit fast einer halben Milliarde Jahre Strukturen und Mechanismen zur Besiedlung von Land entwickelt. In diesem Kontext dienen ihre Oberflächen, die entscheidenden physikalischen Schnittstellen mit der Umwelt, hauptsächlich als Barrieren gegen Wasserverluste. Die Forscher zeigen an einem extrem wasserabweisenden Biofilm des austrocknungstoleranten Cyanobakteriums *Hassallia byssoidea*, dass der Ursprung der Superhydrophobie jedoch viel älter ist als bisher angenommen. Er könnte auf die Zeit vor rund ein bis zwei Milliarden Jahren zurückgehen. Das vielzellige Bakterium bildet algenartige Fäden aus, die Wasser optimal abstoßen und Wasserfilme verhindern. An den abrollenden Wassertropfen **bleiben kurze Zellfäden hängen und sorgen für die Verbreitung des Organismus über eine Art Tröpfcheninfektion**, die man als „Splash Dispersal“ bezeichnet. So überflutet, wird der Bakterienrasen nach etwa einem Tag benetzbar und wächst unter Wasser weiter. Wieder ausgetrocknet, ist er erneut wasserabweisend für das Leben an Land. Die Wissenschaftler vermuten, dass die extreme Wasser-

abstoßung, die Superhydrophobie, und der damit verbundene Lotuseffekt ein zusätzlicher Faktor für den Übergang der Algen vom Wasser zum Land vor etwa 400 Millionen Jahren war. „Die Superhydrophobie verbessert den Gasaustausch an Land und schließt aquatische Konkurrenten in Wasserfilmen aus“, so das Forschungsteam.

www.uni-koblenz-landau.de

■ Bislang wurde angenommen, dass Hühner vor bis zu 10.000 Jahren in China oder Südostasien domestiziert wurden und schon vor über 7.000 Jahren in Europa vorkamen. Zwei neue Studien, an denen Forscher um Prof. Joris Peters von der Staatssammlung für Paläoanatomie München (SNSB-SPM) beteiligt waren, zeigen nun, dass diese Annahme falsch ist. Die treibende Kraft hinter der Domestikation von Hühnern dürfte die Einführung des Trockenreisbaus in Südostasien gewesen sein, wo ihr wilder Vorfahre, das rote Dschungelhuhn, lebte. Der Reisanbau wirkte wie ein Magnet, der die wilden Dschungelhühner aus den Wäldern in menschliche Siedlungen lockte – **offenbar**

der Katalysator für eine engere Beziehung zwischen Mensch und Dschungelhuhn, aus der schließlich das Haushuhn hervorging. Der Domestizierungsprozess wird um 1.500 v. Chr. auf der südostasiatischen Halbinsel nachweisbar. Die Forschungen deuten darauf hin, dass die Hühner zunächst durch Asien und erst im frühen ersten Jahrtausend vor Chr. über die von den frühen griechischen, etruskischen und phönizischen Seehändlern genutzten Routen in den Mittelmeerraum transportiert wurden. In Europa haben die Menschen Hühner zunächst verehrt und im Allgemeinen nicht als Nahrungsmittel betrachtet. Erst später während der Römerzeit wurden Hühner und Eier auch als Nahrungsmittel populär. In Britannien zum Beispiel verzehrten die Menschen Hühner erst ab dem dritten Jahrhundert nach Christus regelmäßig, vor allem in städtischen und militärischen Siedlungsplätzen. <https://spm.snsb.de>

■ Ein Forscherteam des Max-Planck-Instituts für Kolloid- und Grenzflächenforschung (MPIKG) und der McGill Universität in Kanada hat die



Haushuhn (*Gallus gallus domesticus*). Foto: Markus Unsöld (SNSB – Zoologische Staatssammlung München).



Nahaufnahme von Mistelbeeren, die klebrigen Samen beinhalten. Foto: Nils Horbelt (MPI für Kolloid- und Grenzflächenforschung).

starken Klebeeigenschaften der Weißbeerigen Mistel (*Viscum album*) untersucht. „Misteln wachsen überall in großer Zahl, sie sind biologisch abbaubar und erneuerbar“, sagt Peter Fratzl, Direktor der Abteilung Biomaterialien am MPI und ergänzt: „Erstmals wird nun untersucht, wie man die hervorragenden Klebeeigenschaften für potenziell medizinische oder technische Verwendungen nutzbar machen kann.“ Jede Mistelbeere kann einen bis zu zwei Meter langen klebrigen Faden, das sogenannte Viscin produzieren – einen natürlichen Celluloseklebstoff. Damit können die Samen der halbparasitären Pflanze an ihren Wirtspflanzen haften. Das Forschungsteam entdeckte, dass Viscinfasern durch einfache Verarbeitung im nassen Zustand zu dünnen Filmen gedehnt beziehungsweise zu 3D-Strukturen zusammengefügt werden können. **Dieser natürliche Superkleber könnte möglicherweise Anwendung als Wundverschlussmittel finden**, zudem haftet er auch an Metallen, Glas und Kunststoffen. Spannend ist auch die Tatsache, dass die Klebeeigenschaften unter feuchten Bedingungen vollständig reversibel sind. In einem nächsten Schritt wird nun die Chemie hinter diesem quellfähigen, extrem klebrigen Material untersucht, um den Klebprozess in ei-

nem zweiten Schritt imitieren zu können.

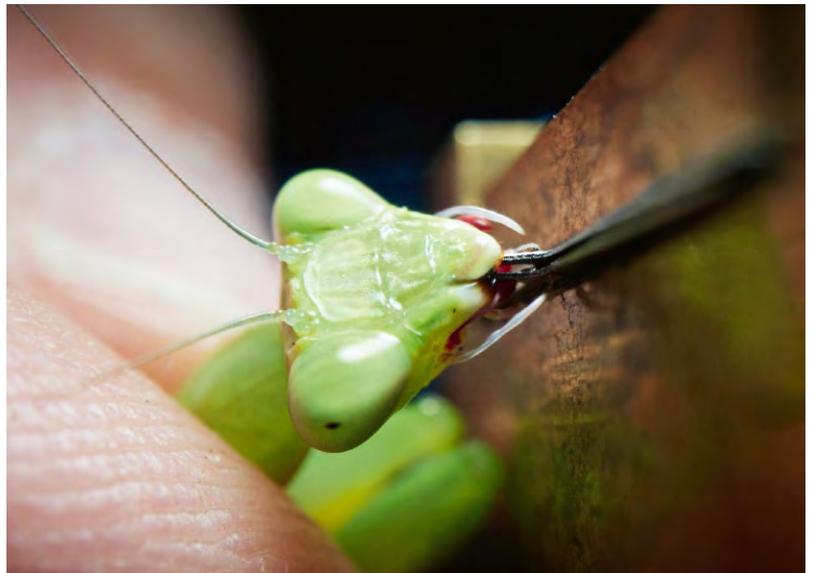
www.mpikg.mpg.de

■
Wie stark können Insekten zubeißen? Wer über einen kräftigen Kauapparat verfügt, kann härtere Nahrung zerkleinern und auch besser im Kampf gegen Feinde bestehen. Biologen der Universität Bonn stellen nun ein mobiles System (forceX) zur Messung der Beißkräfte von kleinen Tieren einschließlich der Auswertungssoftware (forceR) vor. Damit wird es möglich nachzuvollziehen, **wie Beißkräfte, zum Beispiel von Insekten, in Abhängigkeit von der Umwelt evolvierten.** Die Messung erfolgt, indem die Insekten auf zwei Metallplättchen beißen, die den Druck auf einen Piezokristall übertragen. Der Kristall erzeugt kraftabhängig eine Spannung, die über einen Verstärker auf einen Laptop übertragen wird. „Wie stark Insekten zubeißen können, dazu liegen kaum Daten vor“, berichtet Peter Rühr, Doktorand am Institut für Evolutionsbiologie und Ökologie der Universität Bonn. „Nicht für jedes Insekt ist es vorteilhaft, stark zubeißen zu können, da hohe Beißkräfte auch mit höheren energetischen Kosten für das Tier einher-

gehen“, sagt Rühr. Die Beißkraft kann etwa davon abhängen, welche Nahrung ein Insekt zu sich nimmt oder ob es die Kiefer zur Verteidigung braucht. Für die Veröffentlichung in „Methods in Ecology and Evolution“ haben die Forscher die Genauigkeit des Systems bestimmt: Hierfür beschwerten sie das bewegliche Metallplättchen mit unterschiedlichen Gewichten von einem Gramm bis fast einem Kilogramm. Insgesamt 1.600 Wiederholungen zeigen, dass die Abweichung zwischen den Messungen maximal 2,2 Prozent beträgt. „Das ist sehr exakt“, sagt Rühr. Mit dem System lassen sich etwa auch die Kräfte von Skorpions- oder Krebschere messen.

www.uni-bonn.de

■
Ein Forschungsteam um Dr. Sebastian Hess vom Institut für Zoologie der Universität zu Köln hat herausgefunden, dass der algenfressende Einzeller *Orciraptor agilis* die Zellwände seiner Beute mittels Enzymen zerstört, die die kohlenhydrathaltigen Komponenten dort auflösen. Das Geißeltierchen *Orciraptor* ist ein sogenannter „Protoplastenfresser“ und ernährt sich ausschließlich von dem Zellinhalt toter Algen.



Eine Gottesanbeterin beißt auf die Metallplättchen des Sensors. Foto: Volker Lannert (Universität Bonn).



Das Geißeltierchen *Orciraptor* frisst abgestorbene Algen. Foto: Universität Köln.

Dazu muss es zunächst die zellulosehaltige Zellwand der Beute durchdringen. In diesem Stadium produziert *Orciraptor* vermehrt ein Enzym, welches aufgrund seiner Gensequenz und der prognostizierten 3D-Struktur pflanzliche Cellulose spalten sollte. Bis dato waren die molekularen Grundlagen der Interaktion von Protoplastenfressern mit den Zellwänden ihrer Beutezellen vollkommen unklar. *Orciraptor* enthält außerdem eine Reihe unerwarteter Proteine wie zum Beispiel Chitin-Bindeproteine, eine Chitin-Synthase und mehrere

Chitinasen. Wozu das zellwandlose Geißeltierchen Chitin oder ähnliche Biopolymere benötigt, ist noch vollkommen unklar. Enzyme, die widerstandsfähige Biopolymere wie Cellulose und Chitin zersetzen, **sind auch von großer technologischer und industrieller Bedeutung.** Den Forscher/-innen zufolge ist es an der Zeit, dass sich die moderne Biologie wieder verstärkt der Vielfalt von Nicht-Modellorganismen zuwendet. „Die Daten unserer Studie an *Orciraptor* machen deutlich, wie fruchtbar zukünftige molekulare Analysen an noch wenig bekannten Einzellern sein werden“, sagt Dr. Hess.

www.uni-koeln.de

STANDORTE

Eine Kooperation der Firma Sartorius, der Stadt Göttingen und der Heinz Sielmann Stiftung hat eine neue, 16 Hektar große, zu beiden Seiten der Leine nahe des Göttinger Kiessees liegende Biotop-Landschaft entstehen lassen. Sartorius hat die Investition für die Schaffung des Biotops in Höhe von mehr als einer Million Euro übernommen. Die Flä-

che für das Biotop hat die Stadt Göttingen gestellt, die auch zukünftige Pflegemaßnahmen übernimmt. Die von der Heinz Sielmann Stiftung koordinierten Baumaßnahmen auf dem zuvor intensiv genutzten Ackerland ermöglichten, **dass sich dort ein Auenwald mit Erlen, Weiden und Pappeln entwickeln kann.**

Als Rückzugsraum für Insekten und Amphibien gibt es mehrere temporäre Flachwassertümpel und einen Weiher. Mittelfristig sollen sich Teile des Biotops auf natürliche Weise weitgehend selbstständig entwickeln, andere dagegen durch eine extensive landwirtschaftliche Beweidung als Grünland gepflegt werden. Für die Besuchenden wurden eine Beobachtungsplattform und ein Holzsteg errichtet. Zudem informieren fünf Tafeln über die Leine, ihre Auenbereiche und die Biotop-Landschaft. Erfreulich ist, dass sich in dem noch jungen Biotop bereits Paare von Flussregenpfeifern und Rebhühnern, deren Populationen in Niedersachsen rückläufig sind, angesiedelt haben.

www.sartorius.com

DIGITALE WELT

Moore stehen im Mittelpunkt einer Podcast-Serie des Bayreuther Zentrums für Ökologie und Umweltforschung (BayCEER) an der Universität Bayreuth. Dort wird seit vier Jahren im Rahmen des Bayerischen Klimaforschungsnetzwerks im Projekt „AquaKlif - Einfluss multipler Stressoren auf Fließgewässer im Klimawandel“ die Frage gestellt: Was können wir tun, um die Folgen des Klimawandels auf Bäche abzu-



Das neue Biotop am Göttinger Kiessee grünt und gedeiht. Foto: Sartorius 2022.



PREISE



Preisträger Anthony Hyman

Foto: Körber-Stiftung / Friedrun Reinhold.

Der Körber-Preis für die Europäische Wissenschaft 2022 geht an den britischen **Zellbiologen Anthony Hyman**. Der mit einer

Million dotierte Körber-Preis zählt zu den weltweit höchstdotierten Forschungspreisen und zeichnet seit 1985 jedes Jahr innovative Forschungsansätze mit hohem Anwendungspotenzial in den *Physical* oder den *Life Sciences* in Europa aus. Hyman und sein Team entdeckten 2009 – bei Studien an einzelligen Embryonen eines Fadenwurms – einen völlig neuen Zustand biologischer Materie: In der Zellflüssigkeit können sich örtlich Proteine in hoher Konzentration ansammeln. Diese „Kondensate“ ähneln winzigen Tropfen. Sie bilden sich dynamisch, teils in Sekundenschnelle, und werden meist auch schnell wieder abgebaut. Bei – oft altersbedingten – Störungen des Abbaus können sich in betroffe-

nen Zellen toxische Stoffe ablagern, die neurodegenerative Krankheiten wie ALS oder Alzheimer auslösen. Hyman ist überzeugt, „dass das zellbiologische Verständnis der Kondensatbildung einen wichtigen Einfluss auf die künftige Medikamentenentwicklung haben wird“. Deshalb ist er Mitgründer der Bostoner/Dresdener Firma Dewpoint Therapeutics, die unter anderem die Wirkung von Medikamenten auf Kondensate erforscht. Vordringlich arbeitet sie daran, die Bildung krankheitsauslösender Ablagerungen mit geeigneten Arzneien zu verhindern. Der Körber-Preis wird am 2. September 2022 im Großen Festsaal des Hamburger Rathauses überreicht.

<https://koerber-stiftung.de>

mildern? Ein wichtiger Schritt ist hierbei **der Schutz der Moore in den Quellgebieten der Mittelgebirge**. Zwei junge Wissenschaftlerinnen, die am Lehrstuhl für Hydrologie im BayCEER in Niedermoorgebieten forschen, haben mit Fachleuten darüber gesprochen. Herausgekommen ist der Podcast „Moorminuten“.

www.bayceer.uni-bayreuth.de/moorminuten/

AUSSTELLUNG

Du kannst sie nicht sehen, aber sie sind hier. Sie sind auf Dir. In Dir. Du besitzt mehr als hunderttausend Milliarden von ihnen. Sie sind dabei, wenn Du isst, atmest, küsst. Sie sind überall. Auf Deinen Händen. In Deinem Bauch. Sie mischen überall mit. Sie formen unsere Welt: was Du riechst, was Du schmeckst, ob Du krank wirst oder wieder gesund. Sie können uns retten oder zerstören: Mikroben, die kleinsten

und mächtigsten Organismen auf unserem Planeten. Wir wissen wenig von ihnen, aber es gibt so viel zu erfahren. Wenn Ihr genau hinschaut, entfaltet sich vor Euch eine ganz neue Welt. Nach einem Besuch im **Mikrobenzoo Micropia**, einer Abteilung des zoologischen Garten Artis **mitten im Zentrum**

von Amsterdam, betrachtet Ihr Euch selbst und die Welt für immer mit anderen Augen. Findet heraus, wie viele Mikroben auf Eurem Körper leben, was wir ihnen zu verdanken haben und was wir von ihnen lernen können.

www.micropia.nl



Wand mit Petrischalen, die verschiedene Mikroorganismen enthalten.

Foto: Maarten van der Wal (Micropia).

STUDIERENDE IM VBIO

„Role Models“ in der Biologie

Wohl jede Biologiestudentin bzw. jeder Biologiestudent hat schon einmal eine gewisse Orientierungslosigkeit während des Grundstudiums erlebt. Fragen wie „Was will und kann ich mit meinem Studium später machen?“ oder „Kann ich damit überhaupt genug verdienen?“, kennen wir selber zu gut. Daher haben wir einige erfolgreiche Biologen/-innen aus verschiedenen Branchen zu ihrem Werdegang und Studium befragt. Wir wollen hiermit einige der vielen möglichen Karrierewege nach dem Biologiestudium vorstellen und einen kleinen Überblick über die Möglichkeiten geben. Zu den im Folgenden vorgestellten Werdegängen kommen natürlich noch viele weitere Karrierewege hinzu wie z. B. im Wissenschaftsjournalismus oder im Umwelt- und Naturschutz.

Melanie Brinkmann**Universität – Virologie**

Foto: Moritz Kuestner

Frau Prof. Dr. Brinkmann ist eine der einflussreichsten Virologinnen Deutschlands und studierte Biologie an der Georg-August-

Universität Göttingen und der Humboldt-Universität Berlin. Während ihrer Promotion am Institut für Virologie der Medizinischen Hochschule Hannover untersuchte sie, wie das Tumorstadium Kaposi-Sarkom-assoziiertes Herpesvirus (KSHV) seinen Wirt manipuliert. Im Anschluss arbeitete sie als Postdoc am *Whitehead Institute for Biomedical Research*, das ans MIT in Cambridge angegliedert ist. Seit 12 Jahren ist sie nun Arbeitsgruppenleiterin am Helmholtz Zentrum für Infektionsforschung in Braunschweig und forscht dort zur viralen Immunmodulation. An der TU Braunschweig ist sie zudem seit 2018 Professorin für Genetik.

Woran forschen/arbeiten Sie aktuell?

Wir erforschen die Interaktion zwischen Viren und der frühen Immunantwort des Wirtes. Viren können ja nicht alleine existieren und brauchen immer einen Wirt, um sich zu vervielfältigen – dieser Wirt kann ein Bakterium, Pflanze, Tier oder

Mensch sein. Dafür nutzen Viren unsere Werkzeuge, beuten uns regelrecht aus. Der Wirt kann sich zwar zur Wehr setzen, aber auch da haben Viren sich einiges einfallen lassen, um unsere Schutzmauern zu durchbrechen – deshalb sind sie leider so erfolgreich. Wie genau dieses Zusammenspiel zwischen Infektion, Abwehr und viraler Modulation dieser Abwehr funktioniert, ist Kernthema meiner Arbeitsgruppe. Unsere Arbeit hat uns schon sehr wichtige Erkenntnisse über die Funktionsweise unseres Immunsystems gebracht.

Wie kamen Sie dazu, in dieser Position/in diesem Feld tätig zu werden?

Über Umwege kam ich dazu – ich wollte eigentlich Wissenschaftsjournalistin werden. Dann hat mich das Biologiestudium – vor allem die Virologie, Mikrobiologie, Immunologie und Biochemie – so fasziniert, dass ich mich komplett der Wissenschaft verschrieben habe. Ich habe ein Diplom in Biologie und habe dann am Institut für Virologie in Hannover meine Doktorarbeit gemacht. Als Postdoktorandin in Boston in den USA habe ich mich auf die Wirtsabwehr nach Virusinfektion fokussiert. Und seit 12 Jahren bin ich als Arbeitsgruppenleiterin in der virologischen Forschung tätig. Ein anderer Weg in die Virologie ist ein Medizinstudium und eine Facharzt Ausbildung. Naturwissen-

schaftler/-innen aus dem Bereich der Biowissenschaften und Veterinärmediziner/-innen können sich auch zur Fachvirologin bzw. zum Fachvirologen weiterbilden; über die Gesellschaft für Virologie kann man ein Zertifikat für medizinische Virologie und Infektionsepidemiologie erlangen. Es führen viele Wege in das spannende Feld der Virologie; ich freue mich über jede/jeden, die/der zu uns kommt!

Wie empfinden Sie rückblickend Ihre Studienzeit?

Der Anfang war hart – aber auch das war wichtig. Da habe ich gelernt, mich durchzukämpfen, mich mit Kommilitonen/-innen zusammenzutun und gemeinsam zu lernen, das konnte ich aus der Schulzeit nicht in dem Ausmaß. Zum Glück wusste ich schnell, was ich nicht wollte (Botanik, Ökologie) und dass mich die Molekularbiologie, Mikrobiologie und Virologie faszinierten; so konnte ich früh einen Fokus setzen. Ich habe an zwei Standorten studiert, Göttingen und Berlin, war während des Hauptstudiums für ein halbes Jahr in London am *Imperial College* – das war großartig. Und ich hatte das Glück, Persönlichkeiten in dieser Zeit zu begegnen, die mich stark geprägt haben und mir geholfen haben, den für mich richtigen Weg zu finden.

Welchen Tätigkeiten sind Sie neben Ihrem Studium nachgegangen?

Zu Beginn des Studiums war ich journalistisch tätig – ich habe zum Beispiel in den Semesterferien ein Praktikum bei GEO in Hamburg gemacht und habe außerdem für die Lokalzeitung in meiner Heimatstadt Artikel geschrieben. Während meiner Zeit in Berlin habe ich eine Stelle als Hilfwissenschaftlerin gehabt – sonst hätte ich mir das halbe Jahr in London auch nicht leisten können. Oder wollten Sie jetzt wissen, was ich an Hobbies habe (lacht)? Kann ich gerne sagen: Rennrad fahren!

Haben Sie rückblickend Tipps oder Ratschläge für Studierende?

Was mir sehr geholfen hat und immer noch hilft – gerade auch während der Pandemie – ist offene Augen und Ohren für andere Fächer zu haben; wir müssen multi- und interdisziplinär zusammenarbeiten, sonst können wir den großen komplexen Herausforderungen nicht optimal begegnen. Ich habe mittlerweile ein großes Netzwerk und ich profitiere wissenschaftlich und persönlich immens davon. Diese Offenheit und Verknüpfung mit anderen Menschen ist so wichtig. Man darf nie den Mut verlieren – man braucht ihn, um in der Wissenschaft zu bestehen, muss sich durchsetzen, muss aber auch für konstruktive Kritik immer offen bleiben. Und man muss auch die Größe haben und sagen können: Hier war ich auf dem Holzweg.

Wie würden Sie die Vereinbarkeit von Beruf und Familie in Ihrem Bereich einschätzen?

Haben Sie Tipps, wie es funktionieren kann?

Da kann ich nur ganz ehrlich sagen: Es ist nicht einfach. Ohne die Unterstützung meines Mannes wäre das so auch nicht möglich gewesen. Wir teilen uns alles fifty-fifty, nur so geht es, und wir bekommen es gut hin. Aber meinen Perfektionismus, den ich früher hatte, den musste ich aufgeben. Aber wie sagt Mike Ryan von der WHO so schön: „Perfection is the enemy of the good.“ In der Pandemie war es sehr schwierig, Beruf und Familie unter einen Hut zu bekommen, alle Bedürfnisse abzudecken. Ich bin froh, dass das Schlimmste vorbei ist, das hat viel Kraft gekostet.

Harald Dinter

Wirtschaft – Molekularbiologie
Herr Dr. Dinter ist promovierter Biochemiker und Biotechnologe und sammelte zudem in Programmen der Harvard Business School und des California Institute of Technology umfassende Erfahrungen im



Bereich Management. Er arbeitete lange als Arbeitsgruppenleiter in der Forschung und Entwicklung von pharmazeutischen Wirkstoffen in Biotech- und Pharmaunternehmen in Deutschland und den USA. Von 2014 bis 2018 war Dr. Dinter *Senior Vice President (SVP)* und *Head of Biologics and Drug Discovery* bei der Bayer Pharma AG. Dort war er für die globale Forschung und Entwicklung von Biologika wie z. B. Antikörper verantwortlich. Seit 2018 widmet sich Dr. Dinter der strategischen Beratung von Unternehmen, Start-Ups und Forschungseinrichtungen.

Woran forschten/arbeiteten Sie?

Im Fokus meiner Arbeit stand immer die Entdeckung und Entwicklung neuer Wirkstoffe für die Behandlung von schweren Erkrankungen wie Multiple Sklerose oder Krebs. Zuerst werden Signaltransduktionsketten oder Stoffwechselwege identifiziert, die für die Entwicklung der Krankheit entscheidend sind. Dann müssen darin geeignete Targets, also Zielstrukturen, identifiziert werden, die man mit einem Wirkstoff entweder blockieren oder aktivieren kann, je nachdem was zur Therapie der Krankheit notwendig ist. In Zusammenarbeit mit Chemiker/-innen müssen dann kleine Moleküle entwickelt werden, die dann ganz spezifisch an diesen Targets die geeignete Wirkung erzielen. Alternativ können für einige Targets von Molekularbiolog/-innen auch entsprechende Antikörper generiert werden. Wenn man das geschafft hat, müssen Methoden entwickelt werden, mit denen der Wirkstoff in großem Maßstab für die klinische Testung produziert werden kann. Die vielen Herausforderungen bei der Entdeckung und Entwicklung neuer Wirkstoffe werden in Projektteams mit verschiedenen Spezialist/-

innen gelöst. Ich fand die Diskussionen in den Projektteams immer sehr spannend und ich habe dabei viel aus den anderen Bereichen gelernt.

Wie kamen Sie dazu, in dieser Position/in diesem Feld tätig zu werden? Gibt es Fortbildungen oder Fächer, die Sie an Ihrem Feld interessierten Studierenden empfehlen würden?

Über die Biologie bin ich zum Studium der Biochemie und Biotechnologie gekommen. Gleichzeitig liebe ich es, Probleme zu lösen, und möchte mit meinem Handeln Menschen helfen. Diese drei Dinge kann ich in der Forschung und Entwicklung neuer therapeutischer Wirkstoffe zusammenbringen und das hat mich motiviert und mir erlaubt, Energie und Enthusiasmus in meine Arbeit einzubringen.

Die Methoden im Bereich *artificial intelligence* (AI) entwickeln sich schnell weiter und ermöglichen es, diese Technologie bei immer komplexeren Fragestellungen in verschiedensten Bereichen anzuwenden. Die Methoden zum *gene editing*, also der gezielten Änderung des Genoms, z. B. durch die CRISPR/Cas-Technologie, werden verfeinert und werden breite Anwendung u. a. bei der Verbesserung von Saatgut (Resistenz gegen Trockenheit, bessere Erträge ohne Düngemittel) als auch in der synthetischen Biologie (Herstellung von Rohstoffen aus Abfallprodukten) finden. Ich denke, dass Studierende sich mit diesen beiden Themen, also *artificial intelligence* und *gene editing*, vertraut machen sollten, um zu sehen, ob bzw. wie diese Technologien ihnen bei der Arbeit helfen können.

Wie empfinden Sie rückblickend Ihre Studienzeit?

Schön und wertvoll! Schön, weil aus den Bekanntschaften, die sich während des Studiums ergaben, langjährige, gute Freundschaften entstanden sind. Wertvoll, weil uns Dinge ge-

lehrt wurden, die wir damals als wenig spannend, nicht wichtig oder einfach als nervig empfunden hatten, aber mir Jahre später im Berufsleben sehr weitergeholfen haben. Da muss ich so mancher Professorin bzw. manchem Professor im Nachhinein für ihren/seinen Weitblick danken.

Welchen Tätigkeiten sind Sie neben Ihrem Studium nachgegangen?

Natürlich musste ich – wie viele andere auch – nebenher etwas Geld verdienen, um den Lebensunterhalt bestreiten zu können. Meistens waren das einfache Jobs, die keine Ausbildung benötigten. Ich denke, dass ich aufgrund dieser Erfahrungen eine Wertschätzung für solche Arbeiten bzw. für diejenigen, die sie ausführen, entwickelt habe. Ein paar Jobs im Labor waren aber auch dabei. Dort habe ich das Arbeiten im Labor und die Routine der Laborarbeit gelernt, was mir später bei meiner eigenen Forschung sehr hilfreich war.

Haben Sie rückblickend Tipps oder Ratschläge für Studierende?

Es gibt immer wieder Tage, an denen die Arbeit oder das Studium besonders viel Spaß macht oder aber wo es frustrierend und demotivierend ist. Es ist wichtig, sich an solchen Tagen die Zeit zu nehmen und sich zu fragen: Was macht mir an diesem Tag Freude? Oder: Warum bin ich heute frustriert/demotiviert? Wenn man so öfter in sich hineinhört, wird man feststellen, welche Arbeit und Inhalte einen motivieren und Freude bereiten. Liebe ich es allein und ungestört ein Problem zu lösen oder ist es spannender im Team zu arbeiten? Motiviert es mich, mein Wissen an Andere weiterzugeben, oder möchte ich meine Kenntnisse lieber praktisch anwenden? Jeder hat seine eigenen Bedürfnisse und Vorlieben. Diese zu erkennen und bei der Wahl der Arbeitsstelle zu berücksichtigen, hilft langfristig erfolgreich und zufrieden zu sein.

Wie würden Sie die Vereinbarkeit von Beruf und Familie in Ihrem Bereich einschätzen? Haben Sie Tipps, wie es funktionieren kann?

Im Gegensatz zu vielen anderen Ländern wird in Deutschland die Dauer der täglichen Anwesenheit am Arbeitsplatz, sei es im Büro oder Labor, immer noch als Zeichen des Engagements und Motivation der Mitarbeiterin bzw. des Mitarbeiters gesehen. Wir sind also Zeit- und nicht Output-fokussiert. Durch den durch die Corona-Pandemie ausgelösten Zwang zum Homeoffice und die damit gesammelten Erfahrungen beginnt sich dieser Fokus zu verschieben. Auch hat die nächste Generation von Manager/-innen eine andere Sichtweise auf die sogenannte Work-Life-Balance. Da verändert sich also etwas, aber wie jede Kulturänderung wird es Jahre dauern. Letztendlich muss jeder für sich selbst entscheiden, wieviel Zeit und Energie er/sie in welche Aktivitäten einbringen will und sollte dies auch dem/der Vorgesetzten mitteilen.

Nilofar Badra-Azar Bundesministerium für Gesundheit (BMG)



Frau Dr. Nilofar Badra-Azar ist eine promovierte Bioinformatikerin mit iranischen Wurzeln. Ihren Bachelor in Bioinformatik und ihren Master in Systembiologie hat sie an der Universität Bielefeld abgeschlossen, bevor es 2014 für ihre Promotion zu molekularen Tumoranalysen nach Berlin an die Freie Universität ging. Berlin sollte es auch bleiben; so ging es anschließend 2018 zuerst in die Industrie und den relativ neuen Bereich der personalisierten Medizin, bevor sie 2021 in der Abteilung für Digitalisierung und Innovation beim Bundesministerium für Gesundheit tätig wurde. Als Referentin im Referat „Grundsatzfragen neue Technologien und Datennutzung“ ist sie im

Team von Nick Schneider mit zuständig für die deutsche Umsetzung des Europäischen Gesundheitsdatenraums.

Woran arbeiten Sie aktuell?

Ich bin als Referentin im Bundesministerium für Gesundheit (BMG) tätig und habe dabei thematisch einen Fokus darauf, Gesundheitsdaten für die Forschung datenschutzkonform verfügbar zu machen und im besten Fall diese auch miteinander zu verknüpfen.

Wie kamen Sie dazu, in dieser Position/in diesem Feld tätig zu werden?

Ich habe durch meine Promotion und meine darauffolgenden Arbeiten viel in der Forschung gearbeitet, was sehr spannend war. Aber ich wusste, es ist nicht etwas, was ich mein Leben lang machen möchte. Nach Gesprächen mit Freund/-innen und Kolleg/-innen habe ich das erste Mal gehört, dass man in Bundesministerien mit einem naturwissenschaftlichen Abschluss arbeiten kann. Da ich selbst zu personalisierter Medizin und Krebs geforscht habe, lag das Bundesministerium für Gesundheit nah. Aufgrund meines Bioinformatik-Backgrounds und meiner Überzeugung, dass die medizinische Versorgung durch neue Methoden, Anwendungen mit KI und personalisierter Medizin deutlich verbessert werden kann, bin ich sehr froh in der Abteilung für Digitalisierung und Innovation als Referentin arbeiten zu dürfen.

Wie empfinden Sie rückblickend Ihre Studienzeit?

Das ist zweigeteilt: Auf der einen Seite erinnere ich mich an die super spannende Zeit, das erste Mal mit Forschung in Kontakt zu kommen und auch kreativ zu überlegen, was man wie machen könnte, aber auch an die sehr schwierige Zeit mit Klausuren, Prüfungen, Arbeitsblättern, Noten und den frontalen Unterricht. Ich hätte mir gewünscht, mehr Raum für mich zu haben, und

für die Fächer, die ich spannend fand.

Welchen Tätigkeiten sind Sie neben Ihrem Studium nachgegangen?

Ich habe einen Workshop im teutolab-robotik gehalten, wo ich Schüler/-innen die Robotik nähergebracht habe, und ab Ende des Bachelors war ich auch Tutorin.

Haben Sie rückblickend Tipps oder Ratschläge für Studierende?

Nehmt euch mehr Zeit; es ist gar nicht schlimm ein/zwei Jahre länger zu studieren oder sich zwischen Bachelor und Master etwas Auszeit zu nehmen. Ich hätte mir gewünscht, dass ich mehr hinterfragt hätte, was ich in meiner beruflichen Zukunft genau machen will.

Wie würden Sie die Vereinbarkeit von Beruf und Familie in Ihrem Bereich einschätzen? Haben Sie Tipps, wie es funktionieren kann?

Als Mutter von einem 3-jährigen Sohn finde ich den Sprung in die Verwaltung sehr angenehm, und das BMG (und insbesondere mein Referat) sind sehr familienfreundlich. Zudem ist der Job sehr Homeoffice-freundlich, das vereinfacht auch einiges. Es ist kein richtiger Tipp, aber ich würde immer vorschlagen, offen zu kommunizieren und zusammen im Team eine Lösung zu finden.

Outlook

Falls ihr euch noch weiter informieren wollt, gibt es eine Vielzahl wei-

terer Karrierewege und persönlicher Einblicke in der Broschüre „Perspektiven“ (<https://www.vbio.de/publicationen/berufsbilder-perspektiven>) des VBIO. Zudem gibt es auch regelmäßige Berufsfeld-Informationen, welche online vom VBIO in Zusammenarbeit mit der Bundesfachschaftentagung (BuFaTa) Biologie abgehalten werden (<https://www.master-bio.de>)

Arian Abbasi,
Universitätsklinikum Düsseldorf,
Klinik für Kardiologie,
Pneumologie und Angiologie

Asta Perl,
TU Braunschweig,
Fachgruppe Biologie

DOI:10.11576/biuz-5747



ABB. 1 iGEM-Logo

STUDIERENDE IM VBIO

Praxiserfahrung im Studium

Die international Genetically Engineered Machine competition (iGEM) ist eine interessante Möglichkeit schon früh im Studium praktische Forschungserfahrung zu sammeln.

Zu Beginn des Biologiestudiums wird der primäre Teil der Veranstaltungen als Vorlesungen zur Theorievermittlung durchgeführt. Die zunächst im Grundstudium zu absolvierenden Praktika geben zwar einen ersten Eindruck in die Laborarbeit, jedoch ist dieser aufgrund verschiedener Faktoren häufig nicht besonders repräsentativ. Die große Anzahl an Studierenden, deren Unkenntnis über Laborabläufe in den ersten Semestern sowie die teure und teils komplexe Laborausstattung, welche in der Regel nur widerwillig Studienanfänger/-innen anvertraut wird, sind Gründe, warum Laborpraktika im ersten Semester teilweise mehr aus Zusehen als aus selbstständiger Durchführung bestehen.

Souveränität bei der Durchführung praktischer Arbeiten ist jedoch

für das weitere Studium, den späteren Beruf oder die akademische Karriere eine essenzielle Fähigkeit, welche nur durch ständige Wiederholungen generiert werden kann. Je früher angefangen wird, eigenständig Laborarbeiten durchzuführen, desto schneller wird Souveränität bei diesen erreicht. Eine gute Möglichkeit für Studierende unterschiedlicher Semester, praktische Erfahrungen zu sammeln, wird im Folgenden dargestellt.

iGEM (*international Genetically Engineered Machine*, Abbildung 1) ist eine gemeinnützige Organisation, die sich seit 2003 mit der Förderung synthetischer Biologie, der Ausbildung und der Entwicklung einer offenen, kooperativen Gemeinschaft beschäftigt. Mit ihrem internationalen Wettbewerb, bei dem über einen Zeitraum von etwa einem Jahr

ein Forschungsprojekt von Studierenden unter der Aufsicht graduierter Personen (i.d.R. Postdocs oder Professor/-innen) an der eigenen Hochschule entwickelt wird, fördert iGEM Studierende verschiedener Fachrichtungen (siehe unten). Das Projekt stellt häufig einen Ansatz für eine Lösung aktueller globaler Probleme dar wie z. B. Ressourcenknappheit oder Umweltzerstörung. Die Finalist/-innen aus 2020 entwickelten unter anderem eine neue Testmethode für den Nachweis von Gensequenzen, um für zukünftige Pandemien besser vorbereitet zu sein (Team Leiden mit „Rapidemic“, Abbildung 2). Ein weiteres Team, das Team Vilnius aus Litauen mit „FlavoFlow“, verbesserte die Detektion von Flavobakterien-Infektionen in Aquakulturen, welche ein großes Problem in der industriellen Fischzucht darstellen.

Die erreichten Ergebnisse sind *Open Source*, d. h. sie müssen der Öffentlichkeit und der akademischen Nutzung zugänglich gemacht werden und können (mit Ausnahme von Patentanträgen) nicht kommerzialisiert werden. Es spielt dabei

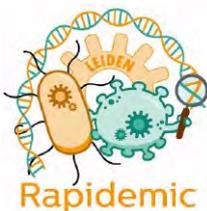


ABB. 2 Logo des Gewinner-Teams 2020 des besten Wikis

keine Rolle, ob sich die Studierenden im Hauptfach mit Biologie, Biochemie, Chemie, Informatik oder anderen Naturwissenschaften beschäftigen. Ebenso können sich Studierende aller Semester bewerben und Teil eines iGEM-Teams werden, was aufgrund interdisziplinärer Aufgaben durchaus sinnvoll ist. Studierende in höheren Semestern oder konsekutiven Studiengängen können die Rolle von Berater/-innen einnehmen, um das Team im Allgemeinen anzuleiten und ihre Expertise einzubringen.

Die Kriterien für den Wettbewerb sind vielfältig und beinhalten neben fachlicher Forschung und praktischer Laborarbeit eine Reihe weiterer Kategorien. Ebenso wichtig ist beispielweise die Kommunikation mit Menschen außerhalb akademischer Einrichtungen: So arbeiten iGEM-Gruppen oft mit Unternehmen, Museen oder Schulen zusammen, um Aufmerksamkeit zu generieren und ggf. Spendengelder für die Finanzierung ihrer Forschung zu sammeln. Zu diesem Zweck spielt es ebenfalls eine Rolle, das Forschungsprojekt in lokalen und regionalen Nachrichten möglichst wirksam zu publizieren.

Die Betreuung von Kanälen in den sozialen Medien sowie die Vernetzung und der Austausch mit anderen iGEM-Gruppen sind weitere Aspekte, die in den Wettbewerb einfließen. Die Forschungsergebnisse werden auf einer selbstständig zu gestaltenden Internetseite präsentiert, wobei ein Großteil der Darstellungsformen frei wählbar ist. Ein Beispiel ist unter <https://2020.igem.org/Team:Leiden> zu sehen.

Je nach Bundesland und Hochschule sind die Bedingungen und die Unterstützung für die Teilnahme am Wettbewerb deutlich unterschiedlich ausgeprägt. In den meisten Fällen wird ein Teil der investierten Zeit in Creditpoints (CP) angerechnet und kann im weitesten Sinne als Lehrveranstaltung gezählt werden; ebenso bieten Hochschulen die Teilnahme am Projekt als inte-

grierte Abschlussarbeit an. Für die Bereitstellung von Räumlichkeiten wie Laboren und Seminarräumen ist man teilweise auf die Kulanz betreuender Dozent/-innen oder die Hochschule angewiesen. Das Gleiche gilt für die Finanzierung: So ist es nicht selten, dass Kooperationen, Werbeaktionen oder Sponsoring genutzt werden, um den von der Hochschule bereitgestellten Etat aufzustocken.

Der zu investierende Zeitaufwand ist, abhängig von Gruppengröße und Erwartungshaltung, häufig enorm, so dass nicht selten eine Klausur verschoben oder das gesamte Studium um ein Semester verlängert werden muss. Dies scheint auf den ersten Blick ein hoher Preis für die Anrechnung von einigen CP und das Erleben praktischer Arbeitsabläufe, jedoch fördert die Teilnahme an iGEM-Projekten nicht nur die eigenen fachlichen Fähigkeiten, sondern öffnet Türen zu Professor/-innen, Dozent/-innen sowie vielen weiteren Kontakten an der Hochschule und erweitert so das eigene Netzwerk erheblich.

Bei der Suche nach z. B. Abschlussarbeiten, Studierendenjobs oder Praktika hat man so häufig den Vorteil, schon verschiedene Institute und ihre Leiter/-innen zu kennen. Das Erwähnen einer iGEM-Teilnahme kann ebenfalls weiterhelfen, da so deutlich wird, dass praktische Erfahrungen bereits vorhanden sind. Durch die Arbeit mit verschiedenen Organisationen ergeben sich häufig Kontakte und Möglichkeiten, um auch außerhalb der Hochschule in Vereinen oder Unternehmen aktiv zu werden. Nicht selten bleiben Teilnehmer/-innen einer iGEM-Hochschulgruppe mehrere Jahre bei dieser und durchlaufen so die verschiedenen Stadien von Anfänger/-innen zu graduierten Berater/-innen. Die Teilnahme an iGEM lohnt sich dementsprechend für Studienanfänger/-innen aber ebenso für Studierende, die schon einige Jahre an der Hochschule sind.

Der Wettbewerb

Generell ist es möglich, Wissen und Fähigkeiten an den verschiedensten Stellen einzubringen. Eine große Diversität innerhalb eines iGEM-Teams ist häufig von Vorteil, da so die vielfältigen Aufgaben gut verteilt werden können. Die Arbeit des gesamten Wettbewerbs bereitet grundlegend auf Tätigkeiten im akademischen Leben vor. iGEM bietet demnach eine besondere Möglichkeit, sich in verschiedenen Bereichen weiterzuentwickeln und auf spätere Aufgabenfelder vorzubereiten.

Zum Abschluss reisen die besten Teams der Universitäten zum Finale des Wettbewerbs und präsentieren dort zusammen mit Teams aus der gesamten Welt ihre Ergebnisse. In den vorherigen Jahren fand das Finale in Boston statt, dieses Jahr voraussichtlich in Paris. Die Präsentationen der Hochschulgruppen im Finale des Wettbewerbs finden als eine gelockerte Version eines Forschungskongresses statt. Die dort gewünschten Formate gehören spätestens ab der Promotion zum wissenschaftlichen Alltag, um eigene Ergebnisse zu präsentieren und den fachlichen Austausch voranzubringen. Der Ablauf besteht, ähnlich zu dem von Forschungskongressen, aus der Vorbereitung eines Vortrags, welcher das Thema sowie die erreichten Ergebnisse zusammenfasst. Ein ebenso großer Teil besteht aus der Gestaltung eines Posters mit Forschungsergebnissen, welches dann ähnlich wie auf einer großen Messe den vorbeilaufenden Interessierten präsentiert wird.

Da iGEM *competition* ein Wettbewerb US-amerikanischen Ursprungs mit teils jüngerer Zielgruppe ist, gibt es einige Unterschiede zu Forschungskongressen, wie sie auf dem europäischen Kontinent abgehalten werden. Die fachlichen Ergebnisse stehen zwar primär im Vordergrund, jedoch spielt die Präsentation und Darstellung eine große Rolle. Während in Europa (und vor allem in Deutschland) eine sachliche, nicht emotionale, nahezu mo-

notone Vortragsform präferiert und geschätzt wird, gilt in den USA teils das exakte Gegenteil. Das Publikum erwartet viel mehr eine gute Geschichte mit ausgefeiltem Spannungsbogen, in welche die erarbeiteten Ergebnisse gut eingebunden werden. Es gilt dementsprechend zu beachten, sich nicht ausschließlich auf die Erstellung von Daten zu fokussieren.

Ob die Teilnahme an einem iGEM-Wettbewerb für das eigene Studium als sinnvoll erachtet werden kann, ist nur individuell zu beantworten. Neben den eigenen Vor-

aussetzungen spielen die der Hochschule eine große Rolle, z. B. die Bereitschaft zur Finanzierung und Anrechnung von Leistungen. Auch die Studienrichtung und der Zeitpunkt im Studium sind zu beachten sowie die Lebensumstände und das Umfeld. So sollte man sich eine Teilnahme aufgrund der hohen Arbeitsbelastung und des entsprechenden Drucks gut überlegen. Generell lässt sich sagen, dass eine Teilnahme in früheren Semestern bzw. im Grundstudium für Teilnehmende einen schnelleren und bedeutenderen Fortschritt bedeutet als für Teilneh-

mende, die weiter fortgeschritten sind im Studium. Da jedoch auch hier verschiedene Perspektiven und Fähigkeiten eingebracht werden können, lässt sich nur schwer pauschalisieren.

Auf der Internetseite des Wettbewerbs (<https://igem.org>) finden sich weitere umfassende Informationen sowie ein Archiv mit vergangenen iGEM-Projekten.

Mick Gottenmeier, Düsseldorf

DOI:10.11576/biuz-5748

STUDIERENDE IM VBIO

Studentisches Engagement

Wie Engagement Studierender helfen kann, sich besser zurechtzufinden, und einen Mehrwert für die gesamte Fakultät bietet.

Fachschaft...

Für Studienanfänger/-innen bedeutet Fachschaft oft „Erstwoche“, Ratschläge und Altklausuren – und im Laufe des Studiums ändert sich das für viele Studierende „außerhalb“ der Fachschaft nur unwesentlich. Wobei, je nach Bundesland, alle Studierenden Teil der Fachschaft sind – die Frage ist eigentlich nur, ob man seine Chance nutzt!

Für die Fakultäten ist die Fachschaft im besten Fall genauso positiv präsent, wenn auch in anderem Kontext: unter anderem als Veranstaltungsorganisation, Stimmungsfühler oder Ansprechpartner. Aber auch die persönlichen „Vorteile“ von studentischem Engagement im Allgemeinen und Fachschaften im Speziellen können sich sehen lassen!



ABB. 1 Fachschaftslogos 2019

Studieneinstieg

Für viele Studienanfänger/-innen bedeutet das Studium erstmal eine Neuorientierung. Viele verschlägt es in eine neue Stadt; alle müssen sich nach dem gewohnten Umfeld der Schulzeit an die neue Situation gewöhnen. Während man früher in der Schule sein musste, kann man sich jetzt zumindest bei Vorlesungen die Frage stellen: „Ist mir das zwei Stunden weniger Schlaf wert?“ Auch die Menge an Literaturvorschlägen wirkt oft erschlagend: Während in der Schule noch ein Buch pro Fach gereicht hat, schlagen die Dozierenden jetzt eine Vielzahl von Büchern vor. Braucht man die denn tatsächlich alle – und wenn ja – woher soll man denn jetzt noch Geld dafür haben?

Bei Fragen wie diesen könnt ihr natürlich eure Kommiliton/-innen fragen, allerdings wissen die oft genauso wenig. Aber gab es da nicht eine Gruppe von Studierenden höherer Semester, die euch erst letzte Woche angeboten hatten, bei Fragen zu helfen?

Abgesehen davon freuen sich viele Studierende einfach über die

Möglichkeit mitzuorganisieren oder neue Leute kennenzulernen. Es gibt viele Wege in bzw. an die Fachschaft zu geraten. Und auch wenn „die Fachschaft“ von außen betrachtet wie eine komplett eingespielte Gruppe wirkt, bei der sich alle kennen, und ihr als „Erstis“ Angst habt, keinen Anschluss zu finden – allen in der Fachschaft ging es doch schon einmal genauso. Traut euch einfach!

Aktive Fachschaft = gesunder Fachbereich?

Aber was macht die Fachschaft jetzt eigentlich, außer „Erstis“ den Einstieg ins Studium zu erleichtern und Bier zu trinken? Darauf gibt es erstmal keine universelle Antwort, da jede Fachschaft ihre eigenen Schwerpunkte, Veranstaltungen und Philosophien hat. Allerdings kümmerst sie sich oft um soziale Aktivitäten im Fachbereich (Spieleabende, Grillen, Partys) und um den direkten Kontakt zu Dozierenden (Gespräche mit neuen Professor/-innen oder den aktiven Diskurs im Problemfall, damit sich einzelne Studierende nicht allein gelassen fühlen). Und dann gibt es natürlich noch die Hochschulpolitik wie etwa Gremienarbeit. Ziel dabei ist es, immer die Interessen möglichst aller Studierenden zu vertreten und auf langfristige Änderungen hinzuwirken – zum

Beispiel sinnvollere Klausurzeiträume. Der Fachbereich will den Studierenden ja nichts Böses; manchmal fehlt es nur an der Perspektive der anderen Seite. Alles zusammengekommen kann man durch aktive Fachschaftsarbeit einen großartigen Einblick in seinen Fachbereich bekommen und langfristig auf Augenhöhe mit den Dozierenden diskutieren. Nebenbei – was man dabei zum Beispiel auch lernt: Nicht alle Dozierenden sind „Profis“, wobei das wiederum nichts über die Qualität der Lehre aussagt – aber das könnte ein eigenes Thema sein.

Fachschafts-ARBEIT

Also alles Friede, Freude, Eierkuchen? Im besten Fall allemal, aber so einfach ist es natürlich nie. Der Kontakt zu Dozierenden muss gepflegt werden, Diskussionsmöglichkeiten müssen eingefordert werden und das Mitspracherecht basiert nicht auf einer Mehrheit der eigenen Stimmen (also in Gremien), sondern auf der Verständlichkeit der Argumente. Studierendenvertretung muss gelernt sein, ist nicht selbstverständlich und kostet Zeit und Energie. Manche Fachschaften haben sich über Jahre hinweg eine Art „kollektiven“ Status erarbeitet, der den Einstieg für neue Mitglieder stark vereinfacht. Andere Fachschaften sind eingeschlafen, nicht existent oder kennen ihre Möglichkeiten leider nicht. Aber ehrlich: Mit z. B. drei Personen aus dem dritten Semester lässt sich die Vielzahl an möglichen Fachschaftsaufgaben nur eingeschränkt erledigen! Gleichzeitig bieten solche Zustände aber auch eine wunderbare Möglichkeit, sich selbst zu engagieren und eine neue Generation mitaufzubauen. Und neben den ganzen semesterbegleitenden Studien- und Prüfungsleistungen ist ein längerfristiges Ziel im Studium ja auch identitätsstiftend. Abgesehen davon wird sich der Fachbereich immer über eine aktive Fachschaft als Anlaufstelle für Studierende und über die Organisation der Einführungs-/Orientierungswochen freuen.

Persönlichkeitsentwicklung

Vor allem der letzte Absatz sollte zeigen, dass man in der Fachschaft nicht nur herumsitzt und Däumchen dreht, sondern eine Vielzahl von Projekten starten kann, Diskussionsfähigkeiten benötigt und eigenständiges Arbeiten gefragt ist. Aber keine Sorge, das lässt sich alles lernen. Ihr habt das Studium angefangen, um euch weiterzuentwickeln und euch auf euer späteres Leben vorzubereiten und dazu gehören auch Kompetenzen über das reine Fachwissen hinaus. Über die Jahre lernt man bei Projekten (z. B. Ersti-Wochen) Teams zu führen, vorausschauend zu planen und im besten Fall mit den anderen Mitgliedern des Fachbereichs zu kooperieren. Und auf einmal ist der beeindruckende Zellbiologie-Dozierende aus der Einführungsvorlesung nicht mehr Prof. Dr. Mustermensch, sondern jemand, der sich freut, mit euch die Studienanfänger/-innen zu begrüßen.

Auch der Kontakt zu Studierenden höherer Semester kann euch mehr Perspektiven bieten. Wonach sollte man seine Wahlmodule wählen, welche sind empfehlenswert und worauf soll man bei der Bachelorarbeit achten? Kaum hat man die Hälfte dieser Fragen selbst verstanden, sind schon die nächsten „Erstis“ da, und man wird auf einmal all das gefragt und bemerkt, wie man sich im Studium und seinem Fachbereich zurechtgefunden hat.

Ein kleiner indirekter Werbeblock: Bei den virtuellen Berufsinformationsabenden des VBIO und der BuFaTa Biologie (siehe unten) haben über die letzten zwei Jahre knapp 50 Berufstätige aus den Biowissenschaften ihren Werdegang vorgestellt. Dabei ist ein Thema immer wieder aufgekommen: Das Studium für sich genommen ist keine herausstechende Qualifikation, sondern einfach die Voraussetzung für viele Möglichkeiten. Euren Abschluss werden am Ende tausende Personen pro Jahr ebenfalls erhalten, allerdings gibt es weit weniger Bewerbungen mit Organisations-, Füh-

rungs- und/oder Gremienerfahrung. Und dabei wurde die Fachschaftsarbeit oft als überzeugendes Beispiel genannt!

Freundschaften

Und weil alles nicht nur Arbeit und Berufsorientierung ist: Fachschaft kann unglaublich viel Spaß machen! Die Erfahrung eine Veranstaltung zu organisieren, zu sehen, wie es (größtenteils) funktioniert und andere Studierende davon profitieren, kann eine gute Motivation sein. Aber der eigentlich schönste Aspekt sind die langjährigen Freundschaften, die sich durch gemeinsame Aktionen entwickeln. Regelmäßig im Fachschaftsbüro zu sitzen, auch mal zusammen zu lernen, noch spontan abends an den See oder in die Kneipe zu gehen, aber auch komplett fertig nach einem „Ersti“-Wochenende Pizza zu bestellen und im Fachschaftsbüro auf der Couch einzuschlafen, kann wirklich gute Freundschaften schmieden.

Darüber hinaus?

Ihr findet die Idee mit der Fachschaft ja cool und so, würdet aber auch gerne mal andere Leute als „Bio-Studis“ aus eurer Stadt kennenlernen – Stichwort „Bubble“? Auch dafür kann eine Fachschaft großartige Möglichkeiten bieten! Ihr habt nicht nur lokal die Möglichkeit, auch mal in die allgemeine Studierendenvertretung einzutauchen (sei es ASTa, StuRa, StuPa, o. ä.), sondern auch bundesweit aktiv zu werden. Bei eurer Studierendenvertretung vor Ort werdet ihr vor allem Fachschaftsmitglieder anderer Fachbereiche kennenlernen, und der Austausch verschiedener Fachkulturen ist unglaublich spannend. Außerdem gibt es eine Vielzahl überregionaler Möglichkeiten.

BuFaTa Biologie

Die schon erwähnte BuFaTa (Bundesfachschaftentagung) Biologie ist genau das, was der Name vermuten lässt: Ein Treffen von biowissenschaftlichen Fachschaften aus ganz

ABB. 2 Logo der BuFaTa



Deutschland. Hierbei treffen sich jedes Semester um die 100 Biologie-Fachschaffler/-innen. Es wird viel über Fachschaftsarbeit diskutiert, Ideen ausgetauscht und man lernt, was am eigenen Fachbereich alles großartig ist oder doch weniger überzeugt. Dabei hat man auch vier Tage Zeit neue Freundschaften zu knüpfen – und wolltet ihr nicht schon immer mal in einer anderen Stadt jemanden kennen, der/die euch beim nächsten Besuch eine Couch und Stadtführung anbietet?

Falls eure Fachschaft über die Corona-Zeit vergessen hat, was und wer die BuFaTa so ist, schaut doch auf unserer Homepage <https://www.bufata-bio.de/> vorbei!

VBIO

Natürlich gibt es dann auch noch den VBIO als Möglichkeit des (über-) regionalen Engagements. Während alle bisherigen Möglichkeiten sehr auf die Zeit als Studierende(r) ausgerichtet waren, kann man sich im VBIO in jedem Lebensabschnitt engagieren. Der große Vorteil daran ist, dass man so auch Personen aus anderen Lebensbereichen kennenlernt: Berufstätige Biolog/-innen in der Industrie oder

Freiberufler/-innen, Dozierende, Lehrkräfte, Promovierende u. v. m. Dabei kann man sich nicht nur für die Biowissenschaften im gesamtgesellschaftlichen Kontext einsetzen, sondern findet – vor allem als noch junger Mensch – möglicherweise sogar eine Art Mentor/-in oder einfach „nur“ spannende Diskussionsmöglichkeiten. Und während die Fachschaftsarbeit, so schön die Zeit sein kann, irgendwann ein unweigerliches Ablaufdatum hat, ist man beim VBIO definitiv immer willkommen!

Sebastian Neufeld, Freiburg

DOI:10.11576/biuz-5749

STUDIERENDE IM VBIO

Wissenschaftskommunikation: Studierende als Multiplikatoren

Wissenschaftskommunikation muss nicht ausschließlich Sache von Medien und PR-Abteilungen sein. Ein Porträt dreier Studierender, die sich nicht scheuen, ihre Expertise mit der Öffentlichkeit zu teilen.

Die Gesellschaft profitiert von starken Kommunikationskanälen zwischen Wissenschaft und Öffentlichkeit. Je mehr Verständnis und Akzeptanz für Grundlagenforschung, technische Innovation und evidenzbasierte Medizin vorhanden sind,

desto eher sind wir in der Lage, zukünftige Herausforderungen zu meistern. Heute wird Wissenschaftskommunikation über eine Palette verschiedener Kanäle betrieben – von klassischen Medien über YouTube bis hin zu Kinderuniversitäten und Aktionstagen. Die Akteur/-innen sind meist Wissenschaftler/-innen, Journalist/-innen, und PR-Mitarbeiter/-innen einschlägiger Institutionen. In einer Bevölkerungsgruppe steckt jedoch besonderes Potenzial, aktiv Vermittlerrollen zu übernehmen: die der Studierenden. Es gibt viele Bühnen, große und kleine, auf denen Studierende als Multiplikator/-innen der Wissenschaftskommunikation brillieren können. Ich habe Erfahrungsberichte von aktiven und ehemaligen Studierenden der Biowissenschaften eingeholt, die den Schritt auf eine solche Bühne gewagt haben.



ABB. 1 Eine Studentin unterstützt eine junge Besucherin beim Präparieren von *Arabidopsis*-Embryonen bei der Langen Nacht der Forschung.

„Lange Nacht der Forschung“

Die „Lange Nacht der Forschung“ ist ein österreichweites Event, bei dem Wissenschaftler/-innen ihre Arbeit der Öffentlichkeit präsentieren (Abbildung 1). Die Forschenden treffen an Infoständen auf interessierte Besucher/-innen und laden zu Vorträgen, Diskussionen, Führungen oder Mitmach-Stationen ein, an denen Experimente „live“ gezeigt werden. Ähnliche Veranstaltungen gibt es auch in vielen Städten Deutschlands und der Schweiz. Auch **Nora Wittmann** wirkte dieses Jahr mit. Nora studiert Biologie im Bachelor in Wien und arbeitet am Gregor-Mendel-Institut. Gemeinsam mit einer Kollegin entwarf Nora ein Info-Poster über die Mendelschen Regeln und die molekularen Grundlagen der Genetik. Ziel des Infostandes war außerdem, die Bedeutung molekularer Pflanzenwissenschaften zu vermitteln.

Sebastian Deiber: *Was motiviert dich dazu, dein Wissen mit der Öffentlichkeit zu teilen?*

Nora: Ich finde es wichtig, dass Forschende an Outreach-Aktivitäten teilnehmen, da dieser Weg manchmal der einzige ist, dass Menschen auf eine „verdauliche“ Weise mehr über Wissenschaft erfahren können.

Dies erlaubt, eventuell vorhandene Missverständnisse aufzuklären.

Sebastian: Zur „Langen Nacht der Forschung“: *Kannst du von einem besonders eindrücklichen Gespräch berichten?*

Nora: Eine interessante Frage war, ob und wie Pflanzen kommunizieren. Das finde ich sehr komplex zu beantworten. Es ist interessant zu hören, dass Menschen außerhalb der Forschung sich für eben jene Themen interessieren, die Wissenschaftler/-innen selbst umtreiben.

Sebastian: *Was nimmst du persönlich von dem Event mit?*

Nora: Bei solchen Veranstaltungen trifft man Menschen verschiedener Altersgruppen mit unterschiedlichem Wissensstand. Mit ihnen zu sprechen hilft dabei, die eigene Forschung aus einer ganz anderen Perspektive zu sehen. Deshalb glaube ich, dass Outreach-Events sowohl der Öffentlichkeit als auch den Forschenden nützlich sind. Übrigens fand ich es großartig, dass wir am Stand mit verschiedenen Ausbildungsniveaus vertreten waren – also vom *Bachelor of Science*-(B.Sc.)-Studierenden bis hin zu Postdocs. Schön, dass wir Studierende nicht ausgeschlossen werden und wir zeigen können, dass wir zu solchen Veranstaltungen auch etwas beitragen können.

Mitmachlabor

In einem Mitmachlabor können Interessierte unter Anleitung selbst Experimente durchführen. Moderne wissenschaftliche Methoden werden damit in der Praxis greifbar. **Magdalena Teufl** arbeitet neben ihrem Masterstudium der Molekularen Medizin als Tutorin am Vienna Open Lab, einem molekularbiologischen Mitmachlabor in Wien.

Sebastian: *Was sind deine Aufgaben im Vienna Open Lab?*

Magdalena: Sie sind breit gefächert: Da es Kurse für alle möglichen Altersklassen gibt, sind auch die Inhalte sehr divers. Es kommt vor, dass ich an einem Tag zuerst in einem Kurs für Kinder im Alter von

fünf bis sieben Jahren das Prinzip eines Feuerlöschers erkläre und ihnen dann auch die Möglichkeit gebe, einen zu basteln. Zwei Stunden später wiederum erläutere ich für Erwachsene die Methoden der PCR, der Gelelektrophorese und des Restriktionsenzymverdau und führe diese Versuche gemeinsam mit den Besucher/-innen durch. Ich versuche, alle Teilnehmer/-innen so auf den praktischen Teil vorzubereiten, dass sie diesen so selbstständig wie möglich durchführen können.

Sebastian: *Was bereitet dir Freude daran, einer breiten Zielgruppe Wissenschaft näherzubringen?*

Magdalena: Es gibt viele Personen in meinem Bekanntenkreis, die kein Basiswissen haben, wie Wissenschaft überhaupt funktioniert. Für viele ist Wissenschaft wie Magie, etwas, das unbegreifbar und undurchschaubar ist. Ich möchte unseren Besucher/-innen mitgeben, dass Wissenschaft durchaus wie Magie ist, allerdings aufgrund der schier unendlichen Möglichkeiten, die man hat, sie zu nutzen. Auch möchte ich ihnen weitergeben, dass es sehr wohl Regeln gibt, die man befolgen muss, um zu belastbaren, neuen Erkenntnissen zu kommen. Ich freue mich jedes Mal am Ende eines Kurses, wenn jemand zu mir kommt und mir erzählt, dass es wider Erwarten viel Spaß gemacht hat, molekularbiologische Methoden selbst auszuprobieren.

Sebastian: *Was bringt es dir persönlich, Tutorin im Vienna Open Lab zu sein?*

Magdalena: Mein Auftreten beim Erklären wissenschaftlicher Inhalte ist viel selbstbewusster geworden. Beim Erklären der Kursinhalte habe ich das Gefühl, dass ich sie für jeden verständlich weitergeben kann. Besonders bei Gruppen, die im Anschluss noch weiterführende Fragen stellen, freue ich mich riesig, denn das zeigt, dass ich das Interesse einzelner geweckt und bei dem einen oder anderen vielleicht sogar ein Feuer entfacht habe.



ABB. 2 von links nach rechts: Nora Wittmann, Magdalena Teufl, Robert Künast.

Science Café

Robert Künast ist derzeit wissenschaftlicher Projektmanager am Lehrstuhl für Terrestrische Ökologie der TU München und forscht unter anderem an sogenannten Eh da-Flächen [1]. Bereits als Student nutzte er die Gelegenheit, im Rahmen der öffentlichen Vortragsreihe „Kasseler Science Café – Serious Fun“, über sein Herzensthema zu sprechen [2]. Pub-Science-Events sind heute international verbreitet und verfolgen die Idee, in entspannter Atmosphäre und bei einem Getränk einem wissenschaftlichen Vortrag zu lauschen und anschließend zu diskutieren.

Sebastian: *Wie kam es zu deinem Auftritt im Kasseler Science Café?*

Robert: Ich hatte selbst schon ähnliche Formate als Zuhörer besucht. Leider ist mir bisweilen aufgefallen, dass viele Wissenschaftler/-innen vor einem Laienpublikum daran scheitern, zu erklären, warum ihre Forschung über die rein akademische Welt hinaus relevant und besonders ist. Ich wollte versuchen, das besser zu machen. Also habe ich mich beim Science Café gemeldet, um ein Thema, das mir sehr am Herzen liegt, so zu präsentieren, dass man hinterher nicht anders kann als zu denken: „Was für eine spannende, wichtige Sache!“ Ich hielt das für eine gute Übung für meine wissenschaftliche Karriere.

Sebastian: *Worum ging es in deinem Vortrag und warum hast du dieses Thema gewählt?*

Robert: Eh da-Flächen sind offene Flächen im Siedlungsbereich und in Agrarlandschaften, die aber keine ausgewiesene landwirtschaftliche

oder naturkundliche Funktion haben. Das sind zum Beispiel Bahntrassen, Verkehrsinseln oder kommunale Grünflächen. Da diese Flächen „eh da“ sind, aber eben keine wirtschaftliche Funktion haben, eignen sie sich hervorragend zur ökologischen Aufwertung, ohne dass es zu Konflikten mit städteplanerischen oder landwirtschaftlichen Zielen kommt. Zum Beispiel kann man auf einer Verkehrsinsel die Mahdtermine so legen, dass Blüte und Ausbreitung heimischer Blütenpflanzen ermöglicht werden. Das fördert die lokale biologische Vielfalt, zum Beispiel von blütenbesuchenden Insekten. Mit dem Aufwerten von Eh da-Flächen kann jede Gemeinde und potenziell jede/r Bürger/-in aktiv einen Beitrag zur Förderung der Biodiversität „vor der Haustür“ leisten. Aber noch ist das Konzept nicht so bekannt, wie es sein könnte.

Sebastian: Welche Wege verfolgst du noch, um die Relevanz

von Eh da-Flächen einer breiteren Öffentlichkeit zu präsentieren?

Robert: Zum einen durfte ich 2020 als Masterstudent das *World Biodiversity Forum* in Davos besuchen und habe mich gemeldet, um einen Vortrag zu halten [3]. Ich wollte helfen, Eh da-Flächen und ihre Relevanz international bekannter zu machen. Zum anderen möchte ich mitwirken, an einem Standort in Thüringen Lehrpfade an beispielhaften Eh da-Flächen anzulegen, um der Bevölkerung das Konzept näherzubringen. Ich denke, die Bemühungen lohnen sich. Das enorme Potenzial von Eh da-Flächen ist immer mehr Kommunen in Deutschland bewusst, und der Begriff ist viel bekannter geworden.

Die drei Beispiele zeigen, dass Studierende einen wesentlichen Beitrag zur Wissenschaftskommunikation leisten können. Sie sind Expert/-innen, die oftmals mehr auf „Augenhöhe“ mit dem Publikum

agieren als hochdekorierte Wissenschaftler/-innen. Im Gespräch mit ihnen habe ich gelernt, dass die Studierenden selbst von öffentlichen Auftritten profitieren: Sie lernen zielgruppengerechtes Vermitteln komplexer Themen und die Selbstsicherheit, dies vor größerem Publikum zu tun. Das Engagement von Nora, Magdalena und Robert beeindruckt. Mögen sie inspirieren und Nachahmer/-innen finden!

Literatur

- [1] C. Künast et al., (2019). Die Eh da-Initiative. *Biuz* 49/1, 28-38. <https://doi.org/10.1002/biuz.201910665>
- [2] <https://www.youtube5.com/watch?v=o2gxJgXem4w>
- [3] R. Künast (2020). Concept and Ecological Potential of Eh da-Areas. Towards greater biodiversity in agricultural landscapes and settlement areas. *World Biodiversity Forum* 2020. Davos, 25.02.2020.

Sebastian Deiber, Wien

DOI:10.11576/biuz-5750



ABB. 1 Prof. Dr. Dieter Heineke, Dekanatsreferent der Universität Göttingen.

STUDIERENDE IM VBIO

Das Biologiestudium aus unterschiedlichen Perspektiven

Wir haben Dieter Heineke, den Dekanatsreferenten und langjährigen Studiendekan der Biologie der Universität Göttingen, zum Studium befragt und seine Aussagen aus unserer Studierendenperspektive kommentiert. Dabei nehmen wir jeweils Bezug auf seinen Text und das übergeordnete Thema seiner Ausführungen.

Was erwartet mich in einem Biologiestudium?

In der Schule ist Biologie unter den naturwissenschaftlichen Fächern das am häufigsten gewählte. Es gilt im Vergleich mit den anderen Fächern als relativ leicht zugänglich. Diese Wahrnehmung führt dazu, dass viele an der Natur und Umwelt Interessierte Biologie als Studienfach wählen. Bei der Suche nach der richtigen Universität stellt sich schnell heraus, dass zwar viele Standorte einen Bachelor-Studiengang mit dem Na-

men „Biologie“ anbieten, man aber auch eine große Zahl spezialisierter Angebote findet. Um die Suche nach dem passenden Studiengang zu erleichtern, hat der VBIO (Verband Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland e. V.) zwei umfangreiche Datenbanken aufgebaut: www.bachelor-bio.de und www.master-bio.de.

Studierende:

Mit Biologie habt ihr euch auf jeden Fall für ein spannendes Studium entschieden! Auch wenn ihr

vielleicht schon genau wisst, warum ihr Biologie studiert bzw. studieren wollt: Zur Spezialisierung ist noch früh genug Zeit und ein breites Grundverständnis hilft immer. Und wenn ihr euch noch nicht sicher seid: Dann habt ihr genug Chancen eure Richtung zu finden. Selbst im Master gibt es noch breite Studiengänge, die eine weitere Orientierung erlauben, wenn ihr euer Spezialgebiet noch nicht gefunden habt.

Was ist Biologie?

Die Biologie ist die Wissenschaft der Lebewesen und aller lebender Systeme. Sie bildet mit den Agrar- und Forstwissenschaften sowie der Medizin den Fachbereich der Lebenswissenschaften und kann als Grundlage für diese verstanden werden. Entsprechend deckt sie ein sehr breites Spektrum ab: beginnend auf der Ebene von Atomen über Makromoleküle wie Kohlenhydrate und Proteine, die Grundlage sind für Zellen,

Organellen und ganze Organismen. Einzelne Individuen bilden Populationen, durch Interaktionen untereinander Lebensgemeinschaften und im Zusammenspiel mit weiteren Faktoren wie z. B. Klima, ganze Ökosysteme. Das Verständnis für die Vielzahl dieser Organisationsebenen und deren gegenseitige Abhängigkeiten bildet die Grundlage für einen vertieften Zugang zu dem, was die Biologie ausmacht.

Studierende:

Am Anfang des Studiums fallen die Zusammenhänge und Gemeinsamkeiten zwischen den unterschiedlichen Ebenen vielleicht noch nicht direkt auf. Aber mit der Zeit werdet ihr wiederkehrende Prinzipien erkennen – Einstülpungen zur Oberflächenvergrößerung gibt es schon bei einzelnen Molekülen, aber auch bei Darmzotten. Aufteilung auf verschiedene Reaktionsräume zur präzisen Kontrolle der Umgebung ermöglicht effiziente Prozesse in Vesikeln und Zellorganellen genauso wie in den Organen unseres Körpers, aber auch in riesigen biotechnologischen Industriekomplexen. Ihr werdet diese Prinzipien also in der Welt um euch herum erkennen und nicht nur in der Vorlesung.

Naturwissenschaftliche Grundausbildung

Für die Beschreibung dieser Vielfalt ist der Erwerb einer Vielzahl von naturwissenschaftlichen Grundlagen unverzichtbar. Die Mathematik und Statistik (*Anmerkung der Studierenden: Im Gegensatz zur Schule wird zwischen diesen an Hochschulen – zurecht – unterschieden.*) sowie Chemie und Physik liefern die Werkzeuge zur Analyse sowie Beschreibung biologischer Vorgänge und stellen Modelle bereit, die zum Verständnis von Struktur und Funktion biologischer Phänomene genutzt werden können. Daher finden sich in allen biologischen Studiengängen im ersten Studienabschnitt Lehrveranstaltungen aus diesen Fächern. Für einige Studierende stellen diese

Fächer echte Herausforderungen dar, besonders wenn sie in der Schule nicht bis zur Hochschulreife belegt wurden.

Studierende:

Viele Studierende der Biologie sind am Anfang erst einmal verwirrt bis überfordert vom großen Anteil der naturwissenschaftlichen Grundlagen. Auf dem Studiengang steht „Biologie“, aber dann muss man mehr Veranstaltungen in Mathematik, Chemie und Physik als Biologie belegen (zumindest oft am Studienanfang). Das mag im ersten Moment vielleicht die Motivation zum Biologiestudium trüben, aber diese Grundlagen werden euch durch das restliche Studium begleiten. Ihr müsst vermutlich keine partielle Integration aus dem Stegreif können, aber diese „Hilfswissenschaften“ ermöglichen euch ein besseres Verständnis biologischer Prozesse. Einige Studierende brechen ihr Studium wegen der Belastung durch diese Fächer leider ab und nicht alle werden diesen Teil ihres Studiums schätzen. Ihr müsst sie allerdings als Teil der Biologie akzeptieren und solltet verstehen, dass sie euch nützen. Alle biologischen Phänomene und Prozesse bauen auf naturwissenschaftlichen und mathematischen Prinzipien auf und wer sie versteht, muss an anderen Stellen nicht Auswendiglernen, sondern wird es sich herleiten können.

Biologie ist auch ein Handwerk

Wie in allen Fächern wird theoretisches Wissen in Vorlesungen vermittelt. Aufbauend auf den ersten Semestern folgen in der Regel kleinere Lehrveranstaltungen, die die in den Einführungsvorlesungen vorgestellten Inhalte vertiefen. Neben diesen theoretischen Veranstaltungen, die häufig durch Seminare und Übungen ergänzt werden, sind auch praktische Übungen zu absolvieren. Dies können Arbeiten mit dem Mikroskop sein, die den Einblick in die Gewebestrukturen ermöglichen,

aber auch biochemische oder mikrobiologische Experimente mit bspw. Bakterien und Viren. Je nach Studiengang finden praktische Arbeiten auch in der freien Natur statt. Auf Exkursionen kann man Pflanzen und Tiere in ihren natürlichen Habitaten kennenlernen oder deren Verhalten beobachten. Die so gesammelten theoretischen und praktischen Erfahrungen münden am Ende des Bachelor-Studiengangs in einer ersten eigenständigen wissenschaftlichen Abschlussarbeit. Diese soll zeigen, dass man das erworbene Wissen auf eine konkrete Fragestellung anwenden kann.

Studierende:

Der „Stundenplan“ ist in der sogenannten Vorlesungszeit recht voll, lässt aber auch Zeit für das „Selbststudium“ – also Zeit, in der ihr Übungsblätter bearbeitet, Lehrbücher lest, euch auf Praktika vorbereitet oder die Vorlesungen nachbereiten könnt. Dabei gibt es verschiedene Lerntypen und nur weil eure Kommilitonen alle auf eine bestimmte Lernstrategie schwören, muss das für euch nicht gelten. Manche Studierende verbringen den Großteil ihrer Zeit in der Bibliothek, manche schreiben in Vorlesungen alles mit, manche gar nichts. Es gibt kein richtig oder falsch, nur für euch persönlich (un-)geeignete Lernstrategien. Auch die Anwesenheitspflicht, wie ihr sie aus der Schule kanntet, gibt es meistens nur noch für praktische Veranstaltungen. Aber die Praxisanteile will man sowieso nicht verpassen. Am Anfang seid ihr dabei oft in großen Gruppen und macht einfache Versuche wie lichtmikroskopische Aufnahmen, Lösungen pipettieren oder Pflanzen sammeln, aber mit fortschreitendem Studium werden die praktischen Tätigkeiten forschungsnaher – und damit spannender! Noch eine Begriffserklärung: Die vorlesungsfreie Zeit ist kein Urlaub, sondern oft vollgepackt mit Praktika, Klausuren und nachzubolendem Selbst-

studium, das man im Semester durch soziale Anlässe, Ausflüge oder auch Arbeit ersetzt hat.

Was mache ich mit einem abgeschlossenen Biologiestudium?

Der Arbeitsmarkt ist so vielfältig wie die Biologie selbst. Die im Studium erworbenen Fähigkeiten, Prozesse systematisch zu verstehen und aus dem Speziellen auf das Allgemeine schließen zu können, qualifizieren für viele Berufsfelder, auch außerhalb der Biowissenschaften. So ist die Arbeit in Behörden, Schulen, Universitäten, Verlagen, der pharmazeutischen Industrie oder etwa auch in Saatgutunternehmen möglich – genauso wie in Naturschutzverbänden, Tierparks oder botanischen Gärten. Einige Beispiele beruflicher Karrieren findet man in der vom VBIO herausgegebenen Broschüre „Perspektiven – Berufsbilder von und für Biologen und Biowissenschaftler“.

Es ist sehr zu empfehlen, dass man sich bereits vor sowie im Studium mit der Frage eines möglichen Berufsfeldes befasst und die bestehenden Angebote nutzt, neben dem eigentlichen Fachwissen zusätzliche allgemeine Qualifikationen zu erwerben. In vielen Universitäten besteht die Möglichkeit, sich durch gezielte

Auswahl von Angeboten aus einem Katalog von Schlüsselqualifikationsmodulen ein individuelles Profil zu geben. Dringend zu empfehlen ist der Erwerb von fachbezogenen englischen Sprachkenntnissen. Weitere nützliche Elemente können Angebote zu rechtlichen Grundlagen des Faches, wissenschaftlichem Schreiben und Publizieren oder freiwillige externe Praktika in den für die angestrebte Tätigkeit geeigneten Unternehmen sein.

Studierende:

Auf diese Frage geben wir in dieser BIUZ-Ausgabe noch an anderen Stellen ein, allerdings kann man sagen: Tätigkeiten neben dem Studium zahlen sich immer aus. Nicht nur, um Fähigkeiten und Qualifikationen über das Fachwissen hinaus zu erwerben, sondern auch um mögliche Arbeitsbereiche kennenzulernen. Denn je nach Berufswunsch muss es in der Biologie nicht immer die Promotion sein, auch wenn das oft suggeriert wird.

Auch der genannte Erwerb englischer Sprachkenntnisse ist äußerst hilfreich, persönlich wie beruflich. Wissenschaftliche Publikationen sind grundsätzlich in Englisch abgefasst und Forschungsgruppen haben häufig internationale Mitglieder. Die Möglichkeit eines Aus-

landssemesters bietet sich mittlerweile eigentlich in jedem Studiengang. Trotz Kosten und potenzieller Studienzzeitverlängerung lohnt es sich aus unserer Erfahrung diese Chance wahrzunehmen!

Abschließende Bemerkungen

Ein Biologiestudium bietet vielfältige Spezialisierungsmöglichkeiten und ermöglicht individuelle Studienprofile. Es trägt zur Persönlichkeitsbildung bei und qualifiziert für eine Vielzahl von Aufgaben.

Studierende:

Bei all den wichtigen Aspekten, die ihr beachten sollt, den potenziell anstrengenden Veranstaltungen und möglicherweise erfolglosen Prüfungsversuchen, vergesst nicht: Habt Spaß am Studium, habt Spaß am Fach, nutzt eure Möglichkeiten und schaut über den Tellerrand. Für Spezialisierung ist früh genug Zeit, und die Biologie hat auch in Bereichen, an die ihr bisher bestimmt noch nicht gedacht habt, viel zu bieten.

Viel Erfolg!

Prof. Dr. Dieter Heineke, Dekanatsreferent, Universität Göttingen, studentisches Team der BIUZ, siehe Editorial

DOI:10.11576/biuz-5751

WISSENSCHAFTLICHE KARRIERE

Können Förderprogramme schaden?

Die Einwerbung von Forschungsgeldern, Stipendien und Preisen ist ein wichtiger Bestandteil einer erfolgreichen wissenschaftlichen Karriere. Doch wann lohnt es sich, wie viel Zeit in welche Ausschreibung zu investieren? Gerade für Wissenschaftler/-innen am Anfang ihrer Karriere ist dies schwer zu beurteilen. Hier kommentieren Ulrike Endesfelder, Fabian Schmidt, Martin Dresler, Robert Kretschmer und Eva Buddeberg ihre aktuelle Veröffentlichung und erklären, warum manche Förderprogramme der Wissenschaft eher schaden als nützen.

Das Fokusthema dieser Ausgabe der Biologie in unserer Zeit ist die wissenschaftliche Karriere und richtet sich insbesondere an Wissenschaft-

ler/-innen in frühen Karrierestadien. In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage, was eine erfolgreiche akademische Karriere ausmacht und

wie sie im heutigen System „gemessen“ wird.

Viele unterschiedliche Faktoren tragen dazu bei, ob ein individueller Karriereweg erfolgreich ist. Unstrittig ist jedoch, dass der Erfolg jeder Karrierephase in recht kurzer Zeit sichtbar sein sollte, um die einzelnen Karrierestufen, z. B. von der Promotion über den Postdoc zur Gruppenleitung, möglichst reibungslos zu durchlaufen. Die „bestmögliche Nutzung“ der begrenzten Zeit in diesen befristeten Positionen, von denen aus man sich auf die nächsthöhere Stufe bewirbt, ist daher ein zentraler Dreh- und Angelpunkt im heutigen

System (die wichtige Debatte über eine Reform dieses Systems klammern wir hier bewusst aus).

Ein wesentliches Bewertungskriterium für wissenschaftlichen Erfolg ist die erfolgreiche Einwerbung von Fördermitteln. Das Portfolio ist breit gefächert und reicht von kleinen Reisestipendien über einzelne Promotionsprojekte bis hin zu großen Projektanträgen, die eine ganze Forschergruppe mit mehreren Millionen Euro über mehrere Jahre finanzieren können. Manche Fördermittel können sehr flexibel eingesetzt werden, andere dienen ausschließlich der Finanzierung von z. B. Personal oder Geräten. Manche richten sich an eine kleine Zielgruppe („Promovierende in den Neurowissenschaften“), andere sind sehr breit ausgeschrieben („Wissenschaftler mit innovativen Projektideen“).

Anfang dieses Jahres haben wir, ein Autorenteam aus aktuellen und ehemaligen Mitgliedern der Jungen Akademie, einen kritischen Blick auf die Ausgestaltung von Förderprogrammen veröffentlicht und nüchtern festgestellt, dass nicht alle heutigen Förderprogramme mit ihrem investierten Geld automatisch dem Wissenschaftssystem nützen [1]. Im schlimmsten Fall haben Förderprogramme sogar das Potenzial, dem Wissenschaftssystem systematisch zu schaden: Je niedriger der Förderbetrag und die Förderquote eines bestimmten Förderprogramms, desto schneller entsteht eine negative Gesamtbilanz, bei der die Kosten für die von den Antragsteller/-innen investierte Zeit die insgesamt ausgeschütteten Mittel deutlich übersteigen. Ein anschauliches Beispiel: Ein fiktiver Forschungspreis wird thematisch breit für die Selbstbewerbung ausgeschrieben und erreicht damit eine sehr hohe Zahl von Bewerber/-innen. Er wird aber nur an einen Preisträger bzw. eine Preisträgerin vergeben. Ist das Antragsverfahren zusätzlich umfangreich und die Fördersumme gering, verschärft sich die Bilanz schnell und die Förderli-

nie entzieht dem Gesamtsystem deutlich mehr Geld als sie ausschüttet: Die Kosten, die durch die Arbeitszeit aller Antragsteller/-innen und Bewertungsgremien entstehen, übersteigen die Höhe des Forschungspreises um ein Vielfaches.

Diese Überlegung wirft sofort die Frage auf, welche Förderanträge man selbst mit welchem maximalen Zeitaufwand schreiben sollte. Schnell wird übersehen, dass die eigene Arbeitszeit eine Ressource ist, mit der man sorgsam umgehen muss. Sie ist gerade für Wissenschaftler/-innen auf befristeten Stellen am Anfang ihrer Karriere sehr klar begrenzt. Sie werden regelmäßig und in Abständen von nur wenigen Jahren in ihrer „Gesamtleistung“ evaluiert (insbesondere auch im Zuge der Bewerbungen auf die nächsthöhere Position). Auf <http://funding.com> haben wir ein kleines Tool bereitgestellt, mit dem man über Förderhöhe, Förderquote und geschätzten eigenen Zeitaufwand verschiedene Fördermöglichkeiten finanziell einschätzen und bewerten kann. Dabei handelt es sich natürlich nur um eine rein finanzielle Einordnung; zusätzliche Faktoren – wie das Prestige einer erfolgreichen Einwerbung oder ein möglicher Mangel an Alternativen – können dazu führen, dass ein Förderprogramm mit einer insgesamt negativen Bilanz trotzdem eine erwägenswerte Option ist. Unserer Meinung nach ist es jedoch sehr wichtig, dass diese Überlegung bewusst erfolgt – sowohl für die Entscheidungsträger bei der Gestaltung neuer oder umstrukturierter Förderprogramme als auch für jede(n) einzelne(n) (potenziellen) Antragssteller/-in. Gerade zu Beginn einer Karriere sind die Feinheiten des Systems oft unklar und die Überlegung, dass es insgesamt lohnender sein könnte, explizit keinen Antrag zu schreiben und die dadurch gewonnene Zeit anders zu nutzen, erscheint zunächst kontraintuitiv, zumal die erfolgreiche Einwerbung

von Fördermitteln in Evaluationen und Bewerbungen sehr stark honoriert wird. Dennoch mag eine Förderquote von nur fünf Prozent bei nennenswertem Antragsaufwand ein gutes Argument sein, es (noch) nicht zu versuchen.

Ein paar abschließende Worte: Zu Beginn einer akademischen Karriere sind reine Kosten-Nutzen-Analysen von Drittmittelanträgen schwierig, da über den rein finanziellen Erwartungswert des Antrags hinaus womöglich Alles-oder-Nichts-Entscheidungen der weiteren Karriere eine Rolle spielen. Es ist unmöglich, im Voraus eine ideale Strategie und ein perfektes Timing für z. B. eine Postdoc-Phase zu planen – dies ist ein komplexes Unterfangen mit vielen Querverbindungen. Und ein Gefühl dafür zu bekommen, wie man welche Option gewichtet und wann man welche Ziele im Laufe von drei Postdoc-Jahren (und den Übergängen) am besten angeht, ist ohne viel Erfahrung schwierig. Die zentrale Botschaft an dieser Stelle ist daher der einfache Hinweis, dass in der Tat einige der heutigen Möglichkeiten, Fördermittel zu erhalten, leider eine zweifelhafte Nutzung der eigenen Arbeitszeit darstellen, und dass eine bewusste Kosten-Nutzen-Analyse daher angemessen und hilfreich ist.

Prof. Dr. Ulrike Endesfelder, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn,

Dr. Fabian Schmidt, Max-Planck-Institut für Astrophysik, Garching,

Prof. Dr. Martin Dresler, Radboud University Medical Center, Nijmegen,

Prof. Dr. Robert Kretschmer, Friedrich Schiller Universität, Jena,

Dr. Eva Buddeberg, Goethe Universität, Frankfurt

Literatur

- [1] M. Dresler et al. (2022). Why many funding schemes harm rather than support research. *Nature Human Behaviour*, 6, 607–608.

DOI:10.11576/biuz-5752



AUS DEM VBIO

The Master Biology Entry Programme gewinnt den Ars legendi-Fakultätenpreis Biologie

Dagmar Hann und Daniela Meilinger von der Fakultät für Biologie der Ludwig-Maximilians-Universität München erhalten den diesjährigen Ars legendi-Fakultätenpreis Mathematik und Naturwissenschaften in der Kategorie Biologie. Die Preisträgerinnen haben ein umfassendes modulares Einführungsprogramm für Einsteigerinnen und Einsteiger internationaler biowissenschaftlicher Masterstudiengängen entwickelt. Die Angebote des The Master Biology Entry Programme tragen dazu bei, die internationalen Studierenden, die in Hinblick auf Theorie und Praxis recht unterschiedliche Qualifikationen mitbringen, auf einen vergleichbaren Wissensstand zu bringen.

Der *Ars legendi*-Fakultätenpreis Mathematik und Naturwissenschaften zeichnet herausragende, innovative und beispielgebende Leistungen in der Hochschullehre aus. Er wird jährlich gemeinsam vom VBIO, dem Stifterverband, der Gesellschaft Deutscher Chemiker, der Deutschen Mathematiker-Vereinigung und der Deutschen Physikalischen Gesellschaft vergeben. Der mit 5.000 Euro dotierte Preis in der Kategorie Biologie wurde Ende Mai an Dagmar Hann und Daniela Meilinger von der Fakul-

tät für Biologie der Ludwig-Maximilians-Universität München für das von ihnen etablierte *The Master Biology Entry Programme* vergeben.

Die beiden Preisträgerinnen wenden sich mit diesem Erstsemester-Programm an die jährlich etwa 150 Einsteigerinnen und Einsteiger in die internationalen molekularbiologischen Masterstudiengänge der Fakultät für Biologie. Diese Studierenden sind in Hinblick auf theoretische und praktische Kenntnisse sehr heterogen. Zudem fehlt insbesondere Studierenden aus dem Ausland anfangs oft die Orientierung und soziale Einbettung. Dagmar Hann und Daniela Meilinger holen die Studierenden in dieser Situation mit vielfältigen Angeboten ab, schaffen Orientierung, regen zum Lernen und Weiterdenken an und fördern das soziale Miteinander. Das Angebot trägt dazu bei, die Studierenden auf einen theoretisch und praktisch vergleichbaren Wissensstand zu bringen.

Das Einführungsprogramm besteht aus vier Modulen: Das Modul „*Master Welcome Event*“ dient der Orientierung und dem Kennenlernen und findet bereits vor Semesterbeginn mit Unterstützung von Studierenden aus höheren Semestern statt. Hinzu kommen die Pflichtkurse „*Computational Biology*“ und „*Lab Methods*“, die inhaltlich und zeitlich eng miteinander verzahnt sind. Ein

weiteres Modul, die Vorlesung „*Methods in Molecular Biology*“ begleitet, unterstützt und vertieft die Kurse inhaltlich und bereitet zudem auf nachfolgende Kurse vor.

Die beiden Pflichtkurse sowie die Vorlesung decken einen Großteil der gängigen molekularbiologischen Methoden ab, die in fast allen biologischen Fachdisziplinen Anwendung finden. Der „*Lab Methods*“-Kurs greift dabei vier verschiedene Modellsysteme und Organismen auf und besteht aus einem umfassenden Versuch, welcher mit der Klonierung eines Proteins beginnt und anschließend dessen Funktion und Lokalisierung untersucht. Auch im „*Computational Biology*“-Kurs werden verschiedene Programme und Analysen unterrichtet, welche zu den Grundkenntnissen nahezu aller biologischer Fachgebiete gehören. Beide Kurse werden mithilfe von Lehrenden aus unterschiedlichen Fachbereichen umgesetzt. Die gemeinsame Durchführung und Expertise der einzelnen Fachbereiche bieten Gewähr für die Interdisziplinarität.

Innerhalb des *Master Biology Entry Programme* werden verschiedene Lernumgebungen und Formate wie Plenum, Einzel-, Team- und Gruppenarbeit geschaffen. Dabei kommt eine Vielzahl didaktischer Methoden zum Einsatz, die aufeinander abgestimmt sind und sich am AVIVA-Schema orientieren. Dabei werden die Studierenden durch kurze Teaser oder Erwartungsabfragen ausgerichtet (A), durch Quiz-Fragen das Vorwissen (V) abgefragt, durch interaktive Videos und bereitgestellte Materialien informiert (I), durch Quiz-Fragen, Übungsaufgaben und Gruppenarbeiten das Gelernte verarbeitet (V) sowie das Erlernete durch Lernzielkontrollen und ausführliches Feedback ausgewertet (A).

Die Preisträgerinnen verwenden dabei einen bunten Instrumentenmix, der neben den bekannten Zoom-Funktionen unter anderem auch einen Comic-Clip-Designer, eigene Videos und verschiedene



ABB. 1 Die Preisträgerinnen des *Ars legendi*-Fakultätenpreises 2022 in der Kategorie Biologie: Dagmar Hann (links) und Daniela Meilinger. Foto: Uwe Dettmar.

Moodle-basierte Formate wie interaktive Videos, Skripte, Foren, Chats, Quiz-Fragen und Übungsaufgaben zur Lernzielkontrolle umfasst. Ein Padcaster liefert Aufzeichnungen von Laborversuchen mit eingebauten Fehlern, die zum „Trouble Shooting“ herausfordern.

Die Preisträgerinnen überzeugten die Jury des *Ars legendi*-Fakul-

tätenpreises nicht zuletzt durch die Vielzahl der klug aufeinander abgestimmten und miteinander verzahnten Instrumente, mit denen es nicht nur in hervorragender Weise gelingt, heterogenes Vorwissen der Erstsemester anzugleichen, sondern zugleich auch Orientierung jenseits der Fachinhalte zu liefern. Die Jury erkennt darin ein beispielgebendes

Lehrkonzept, das auch an anderen Fachbereichen aufgegriffen werden könnte. Weitere Informationen zum *Master Biology Entry Programme* finden Sie unter <https://t1p.de/i9bbs>

Kerstin Elbing, VBIO

DOI:10.11576/biuz-5753

AUS DEM VBIO

KBF wieder in Präsenz unterwegs für die Biologie

Am 10. Juni 2022 fand die jährliche Plenartagung der Konferenz Biologischer Fachbereiche (KBF, <https://www.kbf.bio>) in langersehnter Präsenz in Braunschweig statt. Im Rahmen der Konferenz wurde auch die Auszeichnung Science Hero an die Virologin Melanie Brinkmann verliehen, die als Professorin für Genetik an der TU Braunschweig forscht.

Unter dem Dach der KBF vereinigen sich die deutschlandweit vertretenen Biologischen Fachbereiche von insgesamt 60 universitären Standorten. Diese Fachbereichstage – es gibt ebensolche für Chemie, Geowissenschaften, Mathematik, Pharmazie, Physik etc., um nur einige aus dem Bereich MINT zu nennen – sehen sich als bundesweite Interessenvertretung der entsprechenden Fächer im Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultätentag (MNFT, <https://www.mnft.de>) und pflegen eine intensive interuniversitäre Diskussion im Fachbereich. Zentrale Themen auf der diesjährigen Tagung waren u. a. die Digitalisierung in der Lehre inklusive eines umfassenden Erfahrungsaustauschs im Umgang mit der Corona-Pandemie an den Mitgliedsuniversitäten, die Konsequenzen aus dem Ukraine-Krieg und die Unterstützung geflüchteter Studierender, die Neugestaltung des Wissenschaftszeitvertragsgesetzes sowie die Umsetzung des Nagoya-Protokolls – auch vor dem Hintergrund der Nutzung Digi-

taler Sequenz-Informationen (DSI). Neben den genannten tagesaktuellen Themen beschäftigt sich jede Plenartagung mit grundsätzlichen Fragen zur Fachlichkeit in der biologischen Ausbildung. Damit stehen der bekannte „Fachkanon der Biologie“, der Umgang mit (Re-)Akkreditierungen in den Fächern und die Verbindung zu den Berufs- und Interessenverbänden immer auf der Tagesordnung. Gerade dabei ist die enge Abstimmung mit dem VBIO von großer Bedeutung, dem schon dadurch Rechnung getragen wird, dass der Geschäftsführer der Geschäftsstelle München, Dr. Carsten Roller, bei jeder Plenartagung als Gast anwesend ist.

Die Verbindung zur Dachorganisation – dem MNFT – zeigt sich sowohl personell als auch durch die zeitliche und örtliche Nähe der Sitzungen. So ist Prof. Robert Hänsch, Mitglied des VBIO-Präsidiums, designierter Sprecher des MNFT. Der Sprecher der KBF, PD Dr. Alois Palmethofer, sowie das Beiratsmitglied Prof. Sigrun Korsching sind beide

auch Mitglied im Beirat des MNFT. Die Mitgliederversammlung des MNFT fand am Samstag, den 11. Juni in den gleichen Räumen des Braunschweiger Zentrums für Systembiologie (BRICS) statt wie die KBF. Nach deren Sitzung findet traditionell die feierliche Auftaktveranstaltung des MNFT mit einem öffentlichen Festvortrag oder einer Podiumsdiskussion zu fachpolitischen Themen statt. Die Präsidentin der Technischen Universität Braunschweig, Frau Professorin Angela Ittel, begrüßte die angereisten Delegierten, und der bekannte Wissenschaftsjournalist Dr. Jan-Martin Wiarda (<https://www.jmwiarda.de/>) sprach in einem Impulsvortrag über die aktuelle Zeitenwende. In der anschließenden Podiumsdiskussion, moderiert von Prof. Andreas Terfort, Sprecher des MNFT, diskutierten die Professor/-innen Melanie Brinkmann, Volker Bach und Stefan Stillow mit dem Auditorium über die Konsequenzen der aktuellen Entwicklungen auf die universitäre Lehre und Forschung.

Science Hero-Preis für Melanie Brinkmann

Im Rahmen dieser Festveranstaltung wurde nun zum vierten Mal der von der KBF vergebene Preis *Science Hero* verliehen. Ausgezeichnet werden damit Personen und Organisationen, die Probleme im Bereich der Biowissenschaften durch gute Lehre und kreative Forschung aufgezeigt oder gelöst haben. Bisherige Preisträger waren Prof. Axel Brennicke



ABB. 1 Prof. Melanie Brinkmann mit dem Sprecher der KBF, PD Dr. Alois Palmetshofer (rechts), und Prof. Dietrich Nies (links). Foto: Dr. Beate Volke.

(Universität Ulm) für seine „Ansichten eines Profs“ im Laborjournal und Prof. Reinhard Paulsen (KIT) als Gründungsmitglied der KBF und immer noch aktives Mitglied im KBF-Beirat. Der Entomologische Verein Krefeld erhielt den Preis 2019 in Frankfurt am Main für seine langjährigen und ehrenamtlichen Untersuchungen auf dem Gebiet des Massensterbens von Insekten und dem damit einhergehenden Verlust an Biodiversität – eine zentrale Information, die unsere Gesellschaft in vielen Bereichen zu einem Umdenken bewegt hat.

Der Preis ist eine Bronzestatue des berühmten Hallenser Bildhauers Bernd Göbel. Sie stellt auf zeitgenössische und künstlerische Art eine die Weisheit symbolisierende Eule dar, gefangen im Netz des Paragraphenschungels.

In diesem Jahr ging der Preis an die Braunschweiger Virologin Melanie Brinkmann. Sie ist Professorin am Institut für Genetik an der Technischen Universität Braunschweig und leitet am Helmholtz-Zentrum für Infektionsforschung (HZI) die Forschungsgruppe „Virale Immunmodulation“. Brinkmann erhielt den *Science Hero*-Preis stellvertretend für die zahlreichen Kolleg/-innen, die als Expert/-innen in der Coronapandemie Gesellschaft und Politik mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben und immer noch stehen, und dabei nicht nur Lob und Dank erhielten, sondern vielfach auch Anfeindungen erleben mussten und müssen.

In seiner Laudatio beschreibt Robert Hänsch die Kollegin in ihrem wissenschaftlichen Werdegang und den zahlreichen Stationen beginnend mit ihrem Studium in Göttingen, London und Berlin, ihrer Promotion an der Medizinischen Hochschule Hannover, ihren Aufenthalten als Gastwissenschaftlerin an den Universitäten in Liverpool und Oxford und ihrer Postdoktorandenzeit am berühmten *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) bis zu ihrer Ankunft in Braunschweig – zuerst am HZI und nach ihrer Berufung an der TU Braunschweig. Unter Kolleg/-innen ist ihre exzellente Forschung bekannt, und unter den Braunschweiger Studierenden ist ihre Lehre in den zahlreichen Modulen besonders beliebt. Dabei wurde ihre wissenschaftliche Arbeit als Virologin bereits mehrfach ausgezeichnet, so z. B. mit dem Promotionspreis der Medizinischen Hochschule Hannover, dem Robert-Koch-Postdoktorandenpreis der Robert-Koch-Stiftung und dem Science Award der *Signal Transduction Society*. Während der Pandemie war und ist Melanie Brinkmann regelmäßig in Radio, Zeitung und Fernsehen als Expertin zu hören, lesen und sehen. Bekannt sind ihre zahlreichen Auftritte bei Anne Will, Maybrit Illner und Markus Lanz oder ihre erklärenden Worte im ZDF-Magazin *Royale* bei Jan Böhmermann und vieles mehr. Frühzeitig wurde Brinkmann in den Krisenstab der Bundesregierung berufen und ist aktuell stellvertretende Vorsitzende des Expertenrats des Bundeskanzleramts. „Und Melanie gibt es nun auch zu kaufen“ wird in der Laudatio berichtet. In einem auf zahlreichen Internetplattformen angebotenen Hörbuch stellt sich die Virologin den Fragen von Kindern „Ist Corona pink?: Ein Virus verändert die Welt“. Damit ist sie DAS Gesicht für Wissenschaftskommunikation und Wissenstransfer – eine Thematik, der wir uns gerade als Hochschule viel mehr stellen müssen.

Und dies war letztlich maßgebend für die Entscheidung der KBF, Melanie Brinkmann mit dem *Science Hero* zu ehren. „Sie macht also das, was ein Wissenschaftler, eine Wissenschaftlerin machen sollte: Mit dem Wissen in die Öffentlichkeit gehen, die Politik beraten – gewissenhaft, neutral und sachlich. Und genau dies hast Du, liebe Melanie, in brillanter Weise getan. Unsere Preisentscheidung fiel deshalb, einfach gesagt, zwangsnötig auf dich: Du bist unser *Science Hero* in 2022.“, war das Resümee der Laudatio.

Auf der Urkunde zum Preis, unterschrieben vom Sprecher der KBF PD Dr. Alois Palmetshofer und dem stellvertretenden Sprecher Prof. Dietrich Nies, ist vermerkt: „Mit der Preisverleihung an Frau Prof. Dr. Melanie M. Brinkmann würdigt die KBF die Authentizität, mit der Frau Prof. Brinkmann während einer pandemischen Krise wissenschaftliches Denken und sachliche Datenanalyse in die breite Öffentlichkeit getragen hat. Damit hat sie gerade in einer Zeit der Verschwörungserzählungen in unnachahmlicher Weise dem eigentlichen Finanzier der Grundlagenforschung die Wichtigkeit von Wissenschaft und Forschung verdeutlicht.“

Die Laudatio endete mit optimistischen und hoffnungsvollen Worten: „Wir alle hoffen sehr, Corona doch irgendwann hinter uns zu lassen. Und dann wünschen wir Dir, liebe Melanie, wieder etwas Entspannung, ein paar weniger Talkshows und damit dann wieder mehr Zeit für Deine gute Lehre und Deine kreative Forschung, ganz im Sinne der Motivation des *Science Hero*-Preises. Und ganz persönlich noch dazu: Natürlich dann auch mehr Zeit für deine liebe Familie und guten Freunde.“

*Robert Hänsch, Alois Palmetshofer
und Carsten Roller*

DOI:10.11576/biuz-5754

GENOMFORSCHUNG

Begrenzter Spielraum der Evolution – Mutationen im Genom weniger zufällig als gedacht

Lange wurde angenommen, dass Mutationen im Erbgut zufällig entstehen und die natürliche Selektion in den nachfolgenden Generationen Mutationen an einigen Stellen des Genoms toleriert, während sie Individuen mit Mutationen in essentiellen Genen ausmerzt. Eine aktuelle Studie in der Modellpflanze *Arabidopsis thaliana* zeigt, dass Gene, die funktionell wichtig sind, weniger häufig mutieren und dass dies mit epigenetischen Faktoren korreliert.

In Zeiten der Delta- und Omikron-Varianten von Sars-CoV-2 sind Mutationen und ihr Schicksal omnipräsent. Mutationen, also Veränderungen im Erbgut, treten spontan als Folge von Schäden an der DNA auf, falls diese nicht korrekt repariert werden. Die Darwin'sche Theorie zur Anpassung von Organismen an ihren Lebensraum gründet auf der Annahme zufällig auftretender Mutationen. In den nachfolgenden Generationen unterliegen diese einer natürlichen Auslese und bleiben entweder erhalten oder gehen verloren, wenn sie das Überleben verhindern oder die Fitness reduzieren. 1943 veröffentlichten Salvador Luria, ein italienisch-amerikanischer Mikrobiologe, und Max Delbrück, ein deutsch-amerikanischer Biophysiker, das „Luria-Delbrück-Experiment“: In einer Population von Bakterien trat spontane Resistenz gegenüber Bakteriophagen gleichermaßen häufig auf, egal ob die Bakterien in Gegenwart oder in Abwesenheit der Bakteriophagen gezüchtet worden waren. Daraus schlossen Luria und Delbrück, dass die Mutationen ungerichtet sein müssen [1]. Dafür erhielten sie 1969 zusammen mit Alfred Day Hershey den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin.

Inzwischen weiß man, dass verschiedene Faktoren für unterschiedliche Häufigkeiten von Mutationen in unterschiedlichen Bereichen des Genoms sorgen können [2–4]. Ein Team um J. Grey Monroe von der *University of California* (UC) Davis

und Detlef Weigel vom Max-Planck-Institut für Biologie in Tübingen hat dies weiter untersucht [5].

Epigenetische Faktoren beeinflussen die Mutationshäufigkeit

Ihre Arbeiten führten die Forscher an der Modellpflanze *Arabidopsis thaliana* (Ackerschmalwand) durch, deren Genom mit etwa 135 Megabasenpaaren deutlich kleiner ist als beispielsweise das Genom der Maus mit etwa 2500 Megabasenpaaren. Sogenannte Mutationsakkumulationslinien von *Arabidopsis* wurden unter Bedingungen angezogen, bei denen es ihnen an nichts mangelte. So konnten auch solche Individuen wachsen, die ansonsten nicht überlebt hätten, so dass diese Mutationen verschwunden gewesen wären, bevor sie hätten detektiert werden können. In den Genomsequenzen untersuchte das Team einen möglichen Zusammenhang von Mutationen und

epigenetischen Signaturen. Darunter versteht man chemische Modifikationen an der DNA oder den Histonproteinen, um die die DNA-Doppelhelix gewickelt ist und die die Aktivität der Gene unabhängig von der Sequenz des Erbguts beeinflussen. Dabei wurden in häufiger mutierten Abschnitten des Genoms mehr Methylierungen von Cytosin zu 5-Methylcytosin beobachtet. Dieses kann spontan zu Thymin deaminiert werden und somit zu C-T-Transitionen führen. Ferner war die Mutationsrate in Bereichen höher, in denen die DNA z. B. für Transkriptionsfaktoren zugänglich gemacht worden war; es ist bekannt, dass dort die Reparatur von DNA-Schäden weniger effizient ist [6]. Umgekehrt korrelierte eine geringere Mutationsrate mit Modifikationen der Histone, die eine Reparatur von Schäden an der DNA begünstigen.

Eine Berechnung der Mutationshäufigkeit in Abhängigkeit von den epigenetischen Eigenschaften der DNA legte die Vermutung nahe, dass in Genen eine geringere Mutationsrate zu erwarten ist als in den anderen Bereichen des Genoms. Eine Überprüfung in weiteren Mutationsakkumulationslinien ergab, dass die beobachteten Mutationsraten tatsächlich mit den Vorhersagen aus den epigenetischen Modifikationen korrelierten. Die Häufigkeit von Mutationen war in Genen um 58 Prozent geringer als in benachbarten intergenischen Regionen. Dies korreliert mit einer geringeren Anzahl an Polymor-

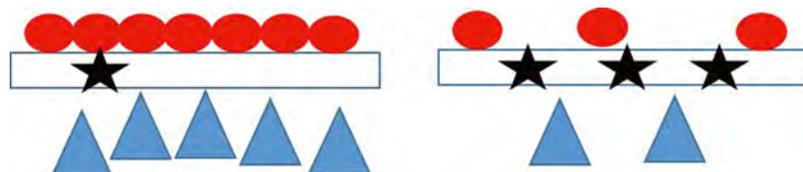


ABB. 1 Schematische Darstellung der Mutationsrate in Genen. Links: In essentiellen Genen wie konstitutiv exprimierten Genen für basale Zellfunktionen wird eine geringe Häufigkeit an Mutationen (schwarzer Stern) beobachtet, die mit einem höheren Auftreten an epigenetischen Faktoren (rote Kreise) und Faktoren für DNA-Reparatur (blaue Dreiecke) in diesen Bereichen korrelieren. Rechts: In nicht essentiellen Genen, wie solchen, die auf Umweltfaktoren reagieren, wird eine höhere Mutationshäufigkeit beobachtet, die mit einem geringeren Auftreten an epigenetischen Faktoren und Faktoren für DNA-Reparatur in diesen Bereichen korrelieren. Modifiziert nach [5].

phismen, also Variationen der DNA-Sequenz innerhalb einer Spezies, und Berechnungen ergaben tatsächlich, dass Veränderungen der Gene eher durch die Regionen-abhängige Mutationshäufigkeit als durch Selektion erklärt werden können.

Die wichtigsten Gene weisen eine reduzierte Mutationshäufigkeit auf

Eine offensichtliche Frage ist, ob Gene, deren Aktivität die Pflanze seltener braucht, gleichermaßen von Mutationen betroffen sind. Tatsächlich ergab eine solche Analyse, dass essenzielle Gene eine geringere Mutationsrate aufwiesen als Gene, die als Reaktion auf verschiedene Umweltsignale angeschaltet werden. An den essenziellen Genen, bei denen es weniger Freiheiten für Veränderungen gibt, sind epigenetische Faktoren angereichert, die zu einer geringen Mutationsrate beitragen (Abbildung 1). Die Pflanze schützt also kritische Gene dadurch, dass sie Mu-

tationen sofort durch Reparatur beseitigt und diese Aufgabe nicht der Selektion überlässt. Dies trägt dazu bei, dass sich für das Überleben und die zentralen Funktionen der Pflanze wichtige Gene im Laufe der Evolution langsamer verändern, während Gene für weniger zentrale Funktionen mehr Spielraum zur Selektion verbesserter Varianten erhalten.

Für eine mögliche Anwendung dieser Befunde muss nun untersucht werden, wie weit verbreitet die Strategie ist, kritische Gene durch epigenetische Modifikation gegen Mutationen abzuschirmen. Bei Nutzpflanzen könnte man Gene identifizieren, bei denen Mutationen bevorzugt auftreten und die damit für die Züchtung von Sorten mit bestimmten Eigenschaften geeignet sein könnten [7]. Beim Menschen könnten sich möglicherweise Ansätze entwickeln lassen, Gene vor Mutationen zu schützen, die zu Krankheiten führen würden.

Literatur

- [1] S. E. Luria, M. Delbrück (1943). Mutations of Bacteria from Virus Sensitivity to Virus Resistance. *Genetics* 28, 491–511.
- [2] S. Ossowski et al. (2010). The Rate and Molecular Spectrum of Spontaneous Mutations in *Arabidopsis thaliana*. *Science* 327, 92–94.
- [3] X. Chen et al. (2012). Nucleosomes suppress spontaneous mutations base-specifically in eukaryotes. *Science* 335, 1235–1238.
- [4] F. Li et al. (2013). The histone mark H3K36me3 regulates human DNA mismatch repair through its interaction with MutSa. *Cell* 153, 590–600.
- [5] J. G. Monroe et al. (2022). Mutation bias reflects natural selection in *Arabidopsis thaliana*. *Nature* 602, 101–105.
- [6] R. Sabarinathan et al. (2016). Nucleotide excision repair is impaired by binding of transcription factors to DNA. *Nature* 532, 264–267.
- [7] <https://tuebingen.mpg.de/detail/einschritt-voraus-wie-pflanzen-gefahrliche-mutationen-vermeiden/>

Dorothee Staiger,
RNA Biologie und Molekulare
Physiologie, Fakultät für Biologie,
Universität Bielefeld,
Dorothee.staiger@uni-bielefeld.de

ZOOLOGIE

Rekordverdächtige Innervierung des Elefantenrüssels

Die großzügige Ausstattung des Elefantenrüssels mit sensorischen Nerven ist bemerkenswert. Ein Vergleich mit der Innervierung von Auge und Ohr wirft neues Licht auf die Bedeutung des Tastsinns.

Der Rüssel der Elefanten, entstanden durch Verwachsen der Nase mit der Oberlippe, ist ein Multifunktionsorgan: Die an seinem Ende sitzenden Nasenlöcher sind in Atmung und Geruchssinn involviert. Eine fingerförmige Ausstülpung beim asiatischen Elefant bzw. zwei beim indischen dienen zum Greifen, z. B. um Nahrung zum Mund zu führen (Abbildung 1). Mit dem schlauchförmigen Lumen saugen die Elefanten beim Trinken Wasser an, um es zum Mund zu führen, oder auch Schlamm und Staub, um sie zum Schutz vor Ungeziefer auf dem Rücken zu verteilen. Das

bekanntere Trompeten dient der Kommunikation. Nicht zuletzt fällt auf, dass Elefanten auch in freier Wildbahn mit dem Rüssel ständig ihre Umgebung berühren, vermutlich um sie abzutasten. Allerdings gibt es zum Tastsinn der Elefanten und seiner Bedeutung bislang nur wenige Verhaltensstudien im Gegensatz zum nachweislich exzellenten Gehör. Immerhin wurde gezeigt, dass Elefanten mit dem Rüssel kleinste Unterschiede auf der Struktur von Oberflächen ertasten können, selbst wenn diese in einem Kasten verborgen und deshalb

optisch nicht wahrnehmbar sind [1].

Eine neue Sichtweise auf die Bedeutung des Tastsinns eröffnen jetzt Forscher aus Berlin und Leipzig mit histologischen Befunden zum Trigemini-Nerv [2], der beim Elefanten unter anderem für die Innervierung des Rüssels zuständig ist. Zur Erinnerung: Der Trigemini-Nerv ist der fünfte Hirnnerv und innerviert bekanntlich das Gesicht. Seine sensorischen Fasern werden im Trigemininalganglion verschaltet und teilen sich unmittelbar danach in drei Äste auf, den Augennast (*Nervus ophthalmicus*), den Oberkieferast (*Nervus maxillaris*) und den Unterkieferast (*Nervus mandibularis*), daher sein Name (lat. Trigemini = Drilling). Der rein sensorische Oberkieferast innerviert mit zahlreichen Verzweigungen hauptsächlich die Haut der Gesichtspartie zwischen Unterlid und Oberlippe. Sein Endast, der *Nervus infraorbitalis*,

versorgt das Unterlid des Auges und die Nasenflügel bzw. bei Nagetieren die Schnurrhaare und beim Elefanten den Rüssel.

Jede Menge Superlative

Das Forscherteam präparierte die durch ihre enorme Größe auffallenden Trigeminalganglien von drei Asiatischen Elefanten und fünf Afrikanischen Waldelefanten, die in Zoos eines natürlichen Todes gestorben oder wegen ihres Gesundheitszustands eingeschlafert worden waren. Von den drei Trigeminus-Ästen war der zum Oberkiefer führende bei weitem der stärkste. Im Fall eines ausgewachsenen Asiatischen Elefanten erreichte sein Durchmesser mit 2 cm mehr als die Hälfte des Rückenmarks. Auch die Neuronen des Ganglions waren ungewöhnlich groß. Der Durchmesser ihres Somas betrug bei einem asiatischen Elefantenbaby durchschnittlich 53 μm , bei einer Spannweite von 20 bis 120 μm ; war also wesentlich größer als bei Ratten (durchschnittlich 35 μm , Spannweite 15 bis 68 μm). Die Axone derjenigen Ganglienzellen, die über den *Nervus infraorbitalis* ohne weitere Verschaltung zum Rüssel führen, sind mit bis zu 2,1 m nicht nur besonders lang, sondern auch ungewöhnlich stark im

Durchmesser: knapp 9 μm bei Elefantenbabys und reichlich 12 μm bei ausgewachsenen Elefanten. Auch ihre Anzahl, die anhand histologischer Schnitte auf ca. 400.000 geschätzt wurde, ist rekordverdächtig.

Entsprechendes gilt für die Gliazellen, die innerhalb von Ganglien die Neuronen versorgen, die so genannten Satellitenzellen. Deren Anzahl steigt mit der Größe der Neuronen. Mit durchschnittlich 232 Satellitenzellen pro Neuron werden die Neuronen im Trigeminalganglion ausgewachsener Elefanten von mehr als zehnfach so viel Gliazellen unterstützt wie bei der Ratte (ca. 18 Satellitenzellen pro Neuron).

Um diese Befunde einzuordnen, verglichen die Forscher den *Nervus infraorbitalis* mit anderen sensorischen Nerven von Sinnesorganen. Sein Durchmesser erwies sich als fast vierfach größer als der des Sehnerv (*Nervus opticus*) bzw. fast sechsfach größer als der des Hör- und Gleichgewichtsnerv (*Nervus vestibulocochlearis*). Demnach ist die beachtliche Dimension des *Nervus infraorbitalis* nicht allein mit der Größe des Elefanten zu erklären. Bemerkenswert ist weiterhin, dass der *Nervus infraorbitalis* des Elefanten fast so viele Axone enthält wie der Sehnerv. Bei



ABB. 1 Afrikanischer Elefant beim Greifen von Nahrung – nur ein Beispiel der vielfältigen Funktionen des Rüssels. Foto: Lena Kaufmann (Humboldt-Universität Berlin).

der Ratte und beim Schwein, die beide für einen ausgeprägten Tastsinn bekannt sind, enthält der *Nervus infraorbitalis* dagegen mehr als dreifach bzw. siebenfach weniger Axone als der Sehnerv. Demnach könnte dem Tastsinn des Elefanten eine wesentlich größere Bedeutung zukommen als bislang angenommen.

Literatur

- [1] G. Dehnhardt, C. Friese, N. Sachser (1997). *Z. Säugetierkd* 62, 37–39.
- [2] L. Purkart et al. (2022.) *Curr. Biol.* 32, 904–910.e3.

Annette Hille-Rebfield, Stuttgart

PSYCHOLOGIE

Angst vor Spinnen: Fürchten wir uns eigentlich vor Skorpionen?

Furcht und Ekel spielen in der Evolution eine wichtige Rolle. Wer sich vor gefährlichen Tieren fürchtet oder vor verdorbenen Speisen ekelt, wird heikle Situationen eher überleben und kann seine Gene an die Nachkommen weitergeben. Wie aber ist zu erklären, dass Angst und Ekel vor Spinnen häufig sind, obwohl unsere Vorfahren im Lauf der Evolution kaum mit wirklich gefährlichen Vertretern dieser Tiergruppe konfrontiert waren?

Pfui Spinne! Warum sind Furcht und Ekel vor Spinnen so weit verbreitet? Weshalb tritt die extreme Variante davon, die Arachnophobie, bei bis zu sechs Prozent der Bevölkerung auf?

Eine Theorie besagt: Wenn Spinnen für unsere Vorfahren eine reale Gefahr bedeuteten, dann hätte eine schnelle Furchtreaktion einen Überlebensvorteil bedeutet. Durch na-

türliche Selektion wären diese Furcht oder zumindest das rasche assoziative Erlernen der Furcht schließlich genetisch verankert worden.

Allerdings ist die überwiegende Mehrheit der Spinnen harmlos (Abbildung 1). Bisse durch Spinnen sind relativ selten, tödliche Folgen extrem rar. Übertragungen von Parasiten durch diese Tiere auf den Menschen sind nicht nachgewiesen und nach neusten Studien müssen von den knapp 50.000 aktuell bekannten Arten lediglich etwa 0,5 Prozent als potenziell für den Menschen gefährlich betrachtet werden. Davon jedoch kommen nur sehr wenige und zudem nicht die lebensbedrohlichsten Vertreter in Afrika vor, wo mutmaß-



ABB. 1 Obwohl beispielsweise in Deutschland keine gefährlich giftigen Spinnen leben, sind Furcht und Ekel vor diesen Tieren auch hierzulande weit verbreitet. Alle Fotos: K. Kunz.

ABB. 2 Lernte der Mensch im Verlauf seiner Entwicklungsgeschichte, sich vor Skorpionen zu fürchten, und übertrug diese Furcht dann auch auf andere Spinnentiere?



lich die Entwicklung des Menschen ihren Lauf nahm. Das Gros der Arten, die über wirklich potente Gifte verfügen, lebt in Australien und Südamerika – diese beiden Kontinente wurden aber als Letzte vom Menschen besiedelt.

Bei einer weiteren Ordnung der Spinnentiere allerdings verhält sich die Sache völlig anders: Stiche einer großen Zahl der Skorpionarten sind sehr schmerzhaft und bei etlichen potenziell gefährlich für den Menschen: Jährlich sind etwa anderthalb Million Stiche und etwa 2.600 bis 3.000 Todesfälle weltweit zu beklagen. Zudem kommen gefährliche Skorpione auch in Afrika sowie im Mittleren Osten vor. Kontakt zu diesen Tieren dürfte somit bei unseren

ABB. 3 Je größer das Tier, desto stärker fielen die Reaktionen der Versuchsteilnehmer aus.



ABB. 4 Offenbar sehen die meisten Menschen sämtliche Spinnentiere als eine Einheit an und übertragen ihre Gefühle beispielsweise Spinnen gegenüber auch auf andere Spinnentiere wie diese Geißelspinne.

frühen Vorfahren eine alltägliche Erfahrung gewesen sein, zumal etliche Arten auch vom Menschen geschaffene Strukturen bewohnen. Zwar ist das Erscheinungsbild von Skorpionen unverwechselbar, es teilt jedoch viele Merkmale der Spinnen. Lernten die frühen Menschen also evolutiv in Wirklichkeit, sich vor Skorpionen (Abbildung 2) zu fürchten, und übertrugen diese Angst dann auf die im Großen und Ganzen harmlosen Spinnen?

Dieser Frage ging nun ein tschechisches Team nach [1]. Rund 330 erwachsene Menschen europäischer Herkunft im Alter von 18 bis 79 Jahren wurden dazu mit insgesamt 62 Arten von Gliederfüßern (Arthropoda) konfrontiert und gebeten, auf einer Skala anzugeben, wie stark sie sich vor den lebend in transparenten Boxen präsentierten Tieren fürchteten, ekelten oder wie schön sie die Arthropoden fanden.

Unter den Tieren waren 15 Spinnenarten, zehn Skorpionarten sowie als weitere Vertreter der Spinnentiere fünf Arten Geißelspinnen, Geißelskorpione und Walzenspinnen. Weitere Tiere waren Schaben, Gespenstschrecken, Heuschrecken, Gottesanbeterinnen, Wanzen, Ohrwürmer, Tausendfüßer, Krabben und Käfer. Die Spinnen waren überwiegend Vogelspinnen (zwölf Arten), jedoch war auch jeweils ein Vertreter der Kreuzspinnen, der Kleinen Winkelspinnen sowie der Riesenkraabenspinnen darunter – somit waren die Spinnen überwiegend durch für die Ordnung außergewöhnlich große bis mittelgroße Arten repräsentiert, was die Antworten der Teilnehmer beeinflusst haben könnte (Abbildung 3). Generell waren nur Tiere über 3 cm Körperlänge vertreten, da die Forscher davon ausgingen, dass kleinere Exemplare von den Probanden schwierig zu beobachten gewesen wären.

Spinnentiere werden „über einen Kamm geschoren“

In puncto „Furcht“ erzielten Spinnentiere die höchsten Werte, gefolgt

von Tausendfüßern. Insekten sowie Krebse nahmen das untere Ende der Skala ein. Beim Aspekt „Ekel“ lagen die Tausendfüßer noch vor Spinnen und den sonstigen Arachniden mit Ausnahme der Skorpione, die hier zusammen mit Schaben und anderen hemimetabolen Insekten einen mittleren Platz einnahmen, während Käfer und Krebse auch hier am Schluss rangierten. Als besonders schön empfanden die Teilnehmer Käfer, Krabben und andere hemimetabole Insekten, dann folgten die Spinnentiere und am Ende die Tausendfüßer und Schaben. Je größer ein Tier war, desto stärker fielen die Reaktionen der Teilnehmer aus, gleich ob Furcht, Ekel oder Bewunderung der Schönheit.

In Bezug auf die Fragestellung fällt besonders auf, dass gegenüber sämtlichen Spinnentieren – unabhängig von der jeweiligen Ordnung! – „Furcht“ und „Ekel“ die dominierenden Emotionen waren. Hier lag auch die größte Distanz zwischen Spinnentieren und Insekten bzw. Krebstieren. Dies legt den Schluss nahe, dass sämtliche Spinnentiere als eine Einheit bewertet werden, die sich von anderen Gruppen der Gliedertiere fundamental unterscheidet (Abbildung 4). Die Wissenschaftler folgern, dass die Furcht vor Spinnen in einer generellen Furcht vor Spinnentieren eingebettet ist, wobei hier die Skorpione diejenige Tiergruppe stellen, die dieses Gefühl am stärksten rechtfertigt und somit sozusagen das „Urmodell“ gewesen sein könnte – denn aus evolutiver Sicht ergibt nur diese Richtung der Übertragung von Furcht von einer Spinnentiergruppe auf andere Sinn.

Literatur

- [1] D. Frynta et al. (2021). Emotions triggered by live arthropods shed light on spider phobia. *Scientific Reports* 11: 22268, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01325-z>

Kriton Kunz, Speyer

WIE KAMEN DIE TIER- UND PFLANZENARTEN ZU IHREN NAMEN?

Ein winziger Krebs mit hohen Stiefeln

Im Grunde ist die Beschreibung einer biologischen Art eine ernsthafte Aufgabe, die zum Beispiel in den „Rules of Zoological Nomenclature“ mehr oder weniger streng festgeschrieben ist. Laut dem leitenden Paläontologen Robert Fortey vom „Natural History Museum“ in London eine der „langweiligsten Bettlektüren“, die er sich „vorstellen kann“. Dessen ungeachtet beschreibt er in seinem Buch „Trilobiten!“ mit hintergründigem britischem Humor einige Kniffe, wie man in die vordergründige Tristesse der Taxonomie vergnügliche Epitheta einbringen kann – natürlich ohne Linnes' Inspiration ins Lächerliche zu ziehen. Hinter manch einem gräzisierten oder lateinisierten Epitheton verbergen sich die Namen von Angeboteten, Liebschaften, Rockmusikern, Schauspielern oder Schriftstellern.

„Als ich am Abend, nach einem langen Probenstag, diese bis dahin unbekannte Krebspezies unter meinem Mikroskop hatte, fielen mir sofort die mächtig vergrößerten Gnathopoden ins Auge. Augenblicklich kam mir das Bild von Elton John in seinen Plateaustiefeln aus der Rockoper *Tommy* in den Sinn.“ Somit lag die Wahl des Epithetons, der bis dato unbeschriebenen Art für den Meeresbiologen James Darwin Thomas auf der Hand. Zumal ihn die Musik von Elton John schon immer durch eintönige Stunden in seinem Labor des *Halmos College* für Naturwissenschaften und Ozeanographie begleitet hatte. Also gab er dem acht Millimeter langen Krebschen mit den hohen Stiefeln den Namen *Leucothoë eltoni* (Abbildung 1). „Vielleicht ist die Namensgebung für einen ausländischen Sir nicht standesgemäß, aber ich mag den Gedanken, dass Sir Elton John in die zoologische Nomenklatur eingegangen ist.“ Anschließend ist das Interview mit dem Redakteur von SciNews für Thomas beendet: „Bitte entschuldigen Sie mich jetzt. Ich habe gerade bemerkt, dass mein MP3-Spieler kaum genügend Titel von Elton John abgespeichert hat.“

Die weiße Göttin Elton

Die weiße Göttin *Leucothoë* wurde vom Sonnengott Apollon lüsternt begehrt, und einer düsteren Überlieferung nach am westlichsten Ende

der Welt vergewaltigt. Womöglich war dieses infame Verbrechen der Anlass für die Namensgebung der Flohkrebse aus der Gattung *Leucothoë* – angesichts der zweiten und dritten Thorakopoden, die bei männlichen Tieren zu beachtlichen Gnathopoden (Kieferfüßen) heranwachsen, mit denen sie die Weibchen für mehrere Tage zwischen Praecopula und Spermienabgabe umklammern. Während der Kopulation bugsiert das Männchen sein Spermium in das Marsupium des Weibchens, wo sich die befruchteten Eier ohne freies Larvenstadium zu zwergenhaften Amphipoden entwickeln.

Die ursprüngliche Heimat der „weißen Göttin Elton“ sind die Küstengewässer des Südchinesischen Meers zwischen den Philippinen, Malaysia und Indonesien. Dort logiert *Leucothoë eltoni* als Kommensale in der Leibeshöhle von sessilen Tunicaten der Gattungen *Hermania* und *Polycarpa* oder in Bivalvieren wie *Pteria penguin*. Doch als Lebensraum scheint *Leucothoë eltoni* auch Schwämme, die den stählernen Rümpfen von Schiffen anhaften, nicht zu verschmähen. Verborgen in solchen Spongien überquerten die Winzlinge als blinde Passagiere des schwimmenden Trockendocks „USS Machinist“ die Datumsgrenze. Mit dem Abzug der U. S. Navy von den Philippinen im Jahr 1991 begann ihr Einzug in Hawaii.

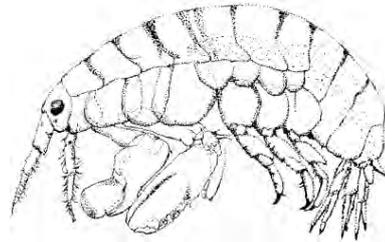


ABB. 1 Der Krebs mit den hohen Stiefeln. Zeichnung: Thomas Volker Müller.

Invasive Art

Zuerst wurde *Leucothoë eltoni* in Pearl Harbour auf Oahu gesichtet, von da aus wurden die unauffälligen Amphipoden von der US Marine nach Maui und selbst ins japanische Okinawa verschleppt. Den endgültigen Nachweis, dass *Leucothoë eltoni* tatsächlich eine Wanderung über knapp 80 Längen- und 30 Breitengrade gelungen ist, erbrachte die Arbeitsgruppe um White et al. mit Hilfe von 18S rDNA- und mtDNA-Analysen.

Seitdem wird *Leucothoë eltoni* in pazifischen Gewässern als invasive Art eingestuft. Bislang ist nur wenig über die ökologischen Auswirkungen bekannt, doch genau darin sieht die Forschungsgruppe um White eine vielversprechende Möglichkeit, die Dynamik von Invasoren zu studieren und angemessene Maßnahmen in die Wege zu leiten. Zur Ehrenrettung des kleinen Krebses mit den hohen Stiefeln bemerkt Thomas, dass „trotz ihrer winzigen Größe Crustaceen wie *Leucothoë eltoni* entscheidende Informationen über das Wohl von Riffen liefern könnten.“

Zum Weiterlesen

- H.-B. Heller (2011). „Deaf, dumb and blind“ und die Befreiung im Geiste der Pop Art. – Kieler Beiträge zur Filmmusikforschung 7, 55-64.
- J. D. Thomas (2015). *Leucothoë eltoni* sp. n., a new species of commensal leucothoid amphipod from coral reefs in Raja Ampat, Indonesia (Crustacea, Amphipoda). – ZooKeys, 518, 51-66.
- K. N. White, K. Duval, T. Kevin (k. A.): Anthropogenic range extension of *Leucothoë eltoni*, THOMAS, 2015 (Crustacea: Amphipoda: Leucothoidae).
<http://www.sci-news.com/biology/science-leucothoë-eltoni-amphipod-elton-john-03177.html>, aufgerufen am 16.05.2021.

Thomas Volker Müller,
Stuttgart

BUCHBESPRECHUNG

Wissenschaftliche Erkenntnis gegen Mythen und Ideologien

Wissenschaft unterliegt anderen Denkgesetzen als der Glaube. Ideologien sind Weltanschauungen, die vorgeben, für das Leben und die Welt die richtige Lösung zu haben. Die Wissenschaft dagegen räumt ein, Vieles bis heute nicht verstanden zu haben und dass das, was sie lehrt, auch falsch sein könnte. Das wissenschaftliche Denken unterscheidet sich von Mythen und Ideologien durch die Überprüfbarkeit. Der Siegeszug der Wissenschaft ist darauf zurückzuführen, dass durch ihre Denkgesetze Resultate gewonnen werden, die Voraussagen in die Zukunft erlauben, die dann tatsächlich auch eintreffen. Das haben bisher kein Mythos und keine Religion geschafft.

Ein Rückblick in die abendländische Geschichte zeigt spätestens seit Kopernikus (1473–1543) einen fortwährenden Kampf zwischen zwei Weltbildern, worin der Weg zur Erkenntnis mit unterschiedlichen Denkansätzen gesucht wird und in denen sich die Erkenntnis auf unterschiedliche Quellen beruft. Der im Mittelalter dominierende Weg zum Erkennen der Welt basierte auf überlieferten Schriften, deren Inhalte und Anweisungen befolgt wurden. Viele dieser Inhalte beruhten auf Mythen, vorgegebenen Zielen, Ideologien und Wertungen. Die Streitkultur bestand hauptsächlich in der Auslegung und Interpretation der im Prinzip nicht angezweifelten Texte.

Nur ansatzweise (und im Konflikt mit dem Glauben an die Allmacht Gottes) wurde im Mittelalter ein anderer Weg beschritten, Erkenntnisfortschritt zu gewinnen, z. B. durch Wilhelm von Ockham (1288–1347), bekannt durch „Ockhams Rasiermesser“. Hier beruhte die Erklärung der Welt nicht prioritär auf niedergeschriebenen Texten, sondern auf nachvollziehbaren empirischen Wahrnehmungen von Vorgängen in der Natur und der Verarbeitung der Beobachtungen durch Theoriebildung nach rationalen Denkgesetzen. Dieser zweite Weg zum Erkennen der Welt ist vor mehr als zweieinhalb Jahrtausenden von den altgriechischen Naturphilosophen entwickelt worden, dann aber bis ins fünfzehnte Jahrhundert in den westlichen Kulturen fast verlorengegangen. Erst indi-

sche und arabische Gelehrte haben das Wissen der Antike gerettet und ins Abendland zurückgebracht. Erst vor fünfhundert Jahren hat der Rationalismus den Stillstand der wissenschaftlichen Erkenntnis in den finsternen Jahrhunderten des Mittelalters abgelöst und das rationale Denken zum Erwerb und zur Begründung von Wissen gegen heftige Widerstände wieder als vorrangig eingestuft. Von nun an haben die naturwissenschaftlichen Erkenntnisse besonders in der Physik und Biologie das durch Ideologien und Mythen geprägte Weltbild verändert, von Galilei über Kepler bis hin zu Darwin.

Das wissenschaftliche Denken hat etwas Faszinierendes an sich; es muss aber richtig verstanden werden. Dazu verhilft ein sehr deutlich geschriebenes Buch des Physikers und Philosophen Carlo Rovelli: „Die Wirklichkeit, die nicht so ist, wie sie scheint“. Rovelli bezieht eine unmissverständliche Stellung zum wissenschaftlichen Denken, das allein die Rätsel der Welt lösen kann. Die folgenden Ausführungen geben wesentliche Züge aus dem Buch von Rovelli wieder.

Gegensatz zwischen Wissenschaft und Ideologie

Die Natur wird nicht durch Geister und Götter enträtselt, die die Welt erschufen, indem sie in Abgründe bliesen und „Fiat lux“ sagten. Ungelöste Fragen der Natur werden nicht durch Mythen erklärt. Letztere erweisen sich meistens als falsch, wenn sie

überprüft werden. Sagen, Märchen und Mythen haben eine ästhetische und vor allem eine psychologische Bedeutsamkeit, sind aber keine wissenschaftlichen Erkenntnisse. Nichtwissenschaftliches Denken kann erbaulich sein, erklärt aber im Grunde nichts. Wissenschaftliches Denken dagegen sucht das, was wir wahrnehmen, zu erklären, von den Planetenbewegungen bis zur Verursachung von Krankheiten. Wissenschaftliches Denken lehrt uns, dass nicht das richtig ist, was uns gefühlsmäßig oder moralisch guttut, sondern das, was überprüfbar ist und damit Erkenntnisfortschritt bringt.

Der rationale Erkenntnisgewinn hat einen unschlagbaren Vorteil, denn mit seinen Beobachtungsmethoden und Denkgesetzen können die gewonnenen Resultate nachgeprüft werden, im Gegensatz zu Erkenntnissen, die sich auf tradierte Quellen stützen. Hier gibt es außer den Quellentexten keine Möglichkeit zu überprüfen, ob die dort zu findenden Behauptungen richtig oder falsch sind. **Mit den durch wissenschaftliche Methoden und Denkgesetzen gewonnenen Resultaten kann man Voraussagen über Ereignisse machen, die dann tatsächlich auch eintreffen.** Das hat bisher keine Ideologie geschafft. Das haben keine „Heiligen Bücher“ geschafft, sondern nur die durch Beobachtung gewonnenen Gesetze.

Am Anfang mehrerer Artikel von Einstein heißt es: „Es scheint mir...“. So auch Faraday, Newton oder Darwin. Aber kein Heilsverkünder oder Prophet hat je gesagt: „Es scheint mir...“. Im Gegensatz zu den „Heiligen Büchern“ bezieht das wissenschaftliche Denken seine Kraft aus dem klaren Bewusstsein über das eigene Nichtwissen und die potenzielle Widerlegbarkeit des Wissens [1]. Neue Beobachtungen können die bisherige Erkenntnis des Wissenschaftlers jederzeit widerlegen und dann die Partie entscheiden. Falls die Vorhersagen nicht eintreffen, dann sind auch die Erkenntnisse falsch. Eine Theorie ohne empirische Bestä-

tigungen hat ihre Prüfungen noch nicht abgelegt. Das war dem Abendland 1500 Jahre lang nicht klar. Mit mehr wissenschaftlichem Denken hätten wir nicht die geistige Katastrophe des Mittelalters erlebt.

Der Gegensatz zwischen Wissenschaft und Ideologie ist, dass der Wissenschaftler (von Sokrates bis Einstein) immer sagt: „Ich bin nicht sicher“; also das klare Bewusstsein über das eigene Nichtwissen. Man muss dem Wissen misstrauen, das unsere Väter zusammengetragen haben. Überprüfbare Vorhersagen sind scharfe Waffen, mit denen wir erkennen, was wahr ist. Die überprüfbare wissenschaftliche Erkenntnis schafft Vertrauen, dass das, was jederzeit kontrolliert werden kann, auch richtig ist. Weltbilder, die auf Ideologien beruhen, verlangen dagegen Autoritätsgläubigkeit. **Wir brauchen Vertrauenswürdigkeit, keine Gewissheit!** Das bedeutet auch, dass wir uns nicht auf ein absolutes Vorsorgeprinzip stützen können:

„Wenn wir nicht mit absoluter Sicherheit ausschließen können, dass dies und das eintritt, dann dürfen wir dies und das nicht machen.“ Eine 100-prozentige Gewissheit wäre nur gegeben, wenn die Natur von Autoritäten regiert würde. Man sollte erwarten, dass sich das rationale Denken seit dem Zeitalter des Rationalismus gegenüber ideologischen Weltbildern nun endlich durchgesetzt hat. Das ist aber nicht der Fall.

Mythische Vorstellungen werden durchaus auch heute noch gern angenommen, und da spannt sich der Bogen von der Astrophysik bis zur Biologie. Es wird bereitwillig geglaubt, dass die Entstehung und Zukunft der Welt von geheimen Mächten gesteuert wird und dass die Evolution des Lebens sich an einem vorgegebenen Ziel orientiert. Aber mythische Verheißungen sind meistens falsch; sie werden jedoch als faszinierend empfunden, auch wenn sie im Konflikt mit der rationalen Erkenntnis stehen. Sie gehören ins Reich der Sagen und Märchen und erweisen sich als falsch, wenn sie

überprüft werden. Es sind keine Wahrheiten, sondern ästhetische und vor allem psychologische Bedeutsamkeiten.

Bis heute finden mythische Überzeugungen begeisterten Zulauf, sei es in der Schöpfungsgeschichte oder in der Vorstellung beseelter Bäume im Naturschutz [2]. Eingriffe in den Wald werden von vielen Menschen *per se* als falsch bezeichnet, keineswegs nur in den Fällen, wo sie die Biodiversität zerstören, sondern weil hier ein „heiliges Gut“ berührt wird [3]. Mythische Vorstellungen bringen den Vorteil mit sich, dass sie einfach verständlich und erbaulich sind und daher so leicht geglaubt werden. Bäumen Gefühlempfindungen und Nächstenliebe zu unterstellen, ist eine faszinierende Fantasie [2]; nur leider konnte das noch nie mit wissenschaftlichen Argumenten nachgewiesen werden.

Ideologien verleiten nicht nur dazu, falsche Wahrheiten anzunehmen, sie beinhalten auch die Gefahr, dass ihre Anhänger sich ins Lager der Gerechten eingliedern. Wissenschaftliche Erkenntnisse werden dann als „nicht rechtschaffen“ empfunden, als „unerwünscht“ bezeichnet und sollten nicht mehr öffentlich bekannt gemacht werden, weil sie die Ethik und Moral gefährden. Insofern kann die „aufrechte“ Gesinnung zum Feind der wissenschaftlichen Erkenntnis werden. Wissenschaft vertritt jedoch keine Moral oder Gesinnung; sie versucht durch Theorie und Empirie der Wahrheit Schritt für Schritt näher zu kommen.

Falsch verstandene Realität

Wir dürfen das, was das wissenschaftliche Denken erkennt und womit es die Natur reproduzierbar beschreibt, nicht so verstehen, dass alle Gegenstände und Begriffe der Wissenschaft mit „Realität“ gleichzusetzen wären. Als „real“ kann man die konkreten Objekte verstehen, die wir in der Natur wahrnehmen; aber Gruppen und Klassen, mit denen z. B. der Biologe die Biodiversität beschreibt,

oder Gleichungen, mit denen der Physiker Gesetzmäßigkeiten in der Natur aufdeckt, sind eher als instrumentale Mittel zu verstehen, mit denen wir die Natur beschreiben können, als dass es sich um reale Dinge handelt.

Was sind Taxa in der Biologie? Taxa sind Gruppierungen der biologisch vielfältigen Organismen, wobei wahlweise nach Gemeinsamkeiten bzw. Unterschieden in den Merkmalen, nach dem Verwandtschaftsgrad oder nach dem reproduktiven Zusammenhalt der Individuen gruppiert werden kann [4]. Biologische Taxa sind keine real in der Natur existierenden Dinge, die man empirisch wahrnehmen kann, also sehen, hören oder fühlen kann. Die Kohlmeise als Individuum existiert real, aber nicht das Taxon Kohlmeise. Die Faktoren, die die Individuen einer taxonomischen Gruppe miteinander verbinden bzw. zwei Arten voneinander trennen, sind real, aber die Gruppe selbst ist ein abstrakter Begriff. Insofern ist die Aussage „Rassen sind nicht real“ [5] eine triviale Aussage, weil kein Taxon real ist.

Was sind Gleichungen in der Physik? **Gültige Gleichungen sind Instrumente, mit denen die Natur widerspruchsfrei beschrieben werden kann.** Gleichungen existieren nicht als reale Dinge in der Natur, aber sie treffen die Realität. Mit Gleichungen in der Physik kann man taugliche Vorhersagen machen. Falsche Gleichungen sind Gleichungen, die sich in der Anwendung und der Voraussage von Ereignissen als untauglich erweisen. Einstein fand die „richtigen“ Gleichungen, nachdem er vorher immer viele „falsche“ Gleichungen präsentierte. **„Richtig“ und „falsch“ ist nicht dasselbe wie „real“ und „nicht real“.** Gleichungen sind die Sprache, mit der man die Realität konkret darstellen kann. Das Eine ist, wie die Welt IST; das Andere ist, wie wir die Welt abbilden. Eine Gleichung wird schrittweise umso „richtiger“, je „tauglicher“ sie ist, um Vorhersagen zu machen.



Die Wirklichkeit, die nicht so ist, wie sie scheint.

Eine Reise in die Welt der Quantengravitation. C. Rovelli, Rowohlt, Hamburg, 2016, 320 S., 24,00 Euro, ISBN 978-3-498-05806-7.

Aber trotz der Nicht-Realität sind mathematische Gleichungen, Formeln in der Chemie und Taxa in der Biologie keine „Erfindungen“, sondern „Entdeckungen“ [6]. Wir ziehen sozusagen mit unserem Geist die Gemeinsamkeiten aus der Fülle der variierenden Dinge heraus. Das sind in der Biologie z. B. die Taxa und in der Physik die Gleichungen, mit denen die Natur beschrieben wird. Das Problem der Realität abstrakter Gruppenbegriffe ist ein uraltes, von Platon bis über den mittelalterlichen Universalienstreit führendes Problem der Philosophie [7]. Immer wieder wurde versucht, Gruppen in der Natur für reale Dinge zu halten. Platon hielt die mit unseren Sinnen wahrgenommenen Dinge für etwas Unwichtiges, weil Variierendes und Vorübergehendes, während demgegenüber die abstrakten Begriffe das wahrhaft Dauerhafte und damit die Wirklichkeit waren. Nach Platon führen die abstrakten Begriffe ein vom Menschen unabhängiges Leben, deren Gesetze es zu entdecken gilt. Im Gegensatz zur platonischen idealen Welt hielt der Mathematiker Hilbert die gesamte Mathematik für einen Formalismus: „Eine Aussage ist wahr, wenn sie sich aus vorher festgelegten Axiomen ableiten lässt“ [8].

Wir brauchen Zahlen und Gleichungen, um Fortschritte und Vorhersagen im Alltag und in der Wissenschaft machen zu können, genauso wie wir Taxa brauchen, um die biologische Vielfalt zu beschreiben, und niemand würde sagen: „Zahlen gibt es nicht“, obwohl Zahlen in der Natur nicht als Dinge empirisch wahrzunehmen sind. Man kann im Garten drei Kohlmeisen sehen, aber man sieht keine „drei“. Neben der Welt der real existierenden Dinge gibt es also sozusagen noch eine zweite Welt: die Welt der abstrakten Begriffe, mit denen die Natur erkannt und beschrieben werden kann. Es ist die Welt der abstrakten Theorien, die ein „Eigenleben“ führt [9]. Diese Welt ist nicht „erfunden“, sondern „entdeckt“.

Die abstrakten Begriffe sind nicht real; aber sie sind auch keine menschlichen Erfindungen. Denn der abstrakte Formalismus (in der Mathematik wie in der Taxonomie) ist kein beabsichtigtes menschliches Konstrukt, sondern beruht auf Entdeckungen, die wir in der Natur machen, um damit die Natur zu beschreiben und Ereignisse vorherzusagen, die dann tatsächlich eintreffen. Die meisten Wissenschaftler gehen davon aus, dass sie in einer Welt leben, die sie nicht selbst gemacht haben.

Das Erstaunliche ist, dass es die Mathematik sogar möglich macht, in solche Bereiche vorzudringen und dort die Welt zu beschreiben und die Zukunft vorauszusagen, wo unsere sinnliche Wahrnehmung und unser intuitives Vorstellungsvermögen versagen. Geschwindigkeit kann keine Eigenschaft eines Dings sein; denn Geschwindigkeit lässt sich nur relativ zum Ort eines anderen Dings definieren. Gewicht ist keine Eigenschaft eines Dings. Für Energie und Masse gibt es nur einen einzigen Erhaltungssatz: Energie und Masse verschmelzen zu einer Einheit. Raum und Zeit verschmelzen zu einer Einheit. Das Alles beschreibt Rovelli in seinem Buch „Die Wirklichkeit ist nicht so, wie sie scheint“.

Unser rationales wissenschaftliches Denken ist in der Lage, seine Gewohnheiten zu verändern. Der antike Denker Demokrit und Newton hatten noch angenommen, dass es einen leeren Raum gibt, indem sich die Dinge befinden und bewegen. Aber Newton wurde gequält von der Vorstellung, dass da nichts im Raum ist, womit die Erde den Mond anzieht. Aber wenn zwischen zwei Dingen nichts ist, dann ist dort nichts. Der Mond wird sozusagen von der Erde angezogen, wie ein Hund von einer Wurst angezogen wird. Gravitation hat keine Pole, die man vertauschen kann, und man kann sich gegen Gravitation nicht abschirmen wie gegen elektrische und magnetische Felder. Die Gravi-

tation ist eine Fernwirkung über ein Nichts, und das kann es nicht geben. Die Lösung war 1915 die Allgemeine Relativitätstheorie, die die Gravitation durch die Krümmung des Raumes ersetzte und den Raum anders definierte, als bisher angenommen.

Wissenschaftliches Denken lehrt uns, die Welt mit tauglichen Begriffen zu beschreiben. Wissenschaft funktioniert deshalb, weil wir feststellen, ob wir mit unseren Hypothesen, Gleichungen etc. richtig oder falsch liegen. Die Anwendung der Mathematik auf die Erkenntnis der Natur bildete die Grundlage der abendländischen Wissenschaft. Die Mathematik ist nicht die Natur; aber mit Hilfe der Mathematik kann man die Natur enträtseln. Das hat bisher keine Ideologie geschaffen, sondern nur die durch Beobachtung gewonnenen Gesetze, die Vorhersagen ermöglichen.

Literatur

- [1] K. Popper (2000). Vermutungen und Widerlegungen. Das Wachstum der wissenschaftlichen Erkenntnis. Unveränd. Ausg. in 1 Bd. Tübingen: Mohr Siebeck.
- [2] P. Wohlleben (2020). Das geheime Leben der Bäume. Was sie fühlen, wie sie kommunizieren – die Entdeckung einer verborgenen Welt. München: Wilhelm Heyne Verlag.
- [3] W. Kunz (2021). Waldschutz versus Artenschutz - Buchkritik. In: Biologie in unserer Zeit 51 (4), S. 7–8.
- [4] T. A. C. Reydon, W. Kunz (2019). Species as natural entities, instrumental units and ranked taxa: new perspectives on the grouping and ranking problems. In: Biological Journal of the Linnean Society 126, S. 623–636.
- [5] S. Richter, T. Göpel (2021). Rasse ohne Realität. In: Biologie in unserer Zeit 51 (2), S. 179–188.
- [6] E. Oeser, M. Bonet (1988). Das Realismusproblem. Wiener Studien zur Wissenschaftstheorie, Band 2. Wien: Edition S Verlag der Österreichischen Staatsdruckerei.
- [7] J. H. Loewe (1876). Der Kampf zwischen dem Realismus und Nominalismus im Mittelalter – sein Ursprung und sein Verlauf. Prag: Commission bei Kosmack & Neugebauer.
- [8] D. Hilbert (1928). Die Grundlagen der Mathematik. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- [9] K. Popper (1935). Logik der Forschung – Zur Erkenntnistheorie der modernen Naturwissenschaft. Wien: Spiegel-Verlag.

Werner Kunz, Düsseldorf

SYSTEMATIK

Step by Step – ein Bestimmungsschlüssel der häufigsten Insektenordnungen für Einsteiger

Die Bestimmung von Insekten stellt so manchen Einsteiger aufgrund der enormen morphologischen Vielfalt dieser Gruppe vor große Herausforderungen. Um taxonomischen Einsteigern eine sichere Orientierung in der Insektenvielfalt zu ermöglichen, wird im Folgenden ein Bestimmungsschlüssel der in Deutschland am häufigsten vorkommenden Insektenordnungen vorgestellt.

Innerhalb von 20 Jahren ist die Zahl der Artenkennerinnen und Artenkenner in Deutschland um 21 Prozent zurückgegangen [1]. Als besonders problematisch wird die Tatsache angesehen, dass nur 7,6 Prozent der momentan aktiven Artenkennerinnen und Artenkenner unter 30 Jahre alt sind. Es existiert also ein großes Nachwuchsproblem in der klassischen Taxonomie [1].

Zum potenziellen taxonomischen Nachwuchs zählen in der Insektenbestimmung aus der Lernenden-Perspektive insbesondere Schülerinnen und Schüler, Studierende und grundsätzlich alle Personen, die sich von der Arten- und Formenvielfalt der Insekten, beispielsweise inspiriert durch den heimischen Garten, angezogen fühlen. In der zoologischen Ausbildung an Universitäten haben sich sowohl dichotome Bestimmungsschlüssel [2, 3] als auch hierarchisch aufgebaute Bestimmungshilfen etabliert [4]. Die Bestimmung der 33 in Mitteleuropa vorkommenden Insektenordnungen erstreckt sich in den drei genannten Bestimmungsbüchern über mehrere Seiten. Dabei werden die unterschiedlichen Metamorphose-Stadien der Insektenordnungen berücksichtigt, so dass die Bestimmungsschritte sowohl zu den Imagines aller Insekten als auch zu den Nymphen oder Larven ausgewählter Taxa führen.

Den Einstieg in die Bestimmung begleiten

Das genaue Betrachten und bewusste Wahrnehmen der morphologischen

Formenvielfalt sowie die entsprechenden Kenntnisse zur äußeren Morphologie sind Grundvoraussetzungen für jeden erfolgreichen Bestimmungsprozess und der korrekten Anwendung der zuvor erwähnten Bestimmungswerke. Daher besteht die Notwendigkeit, diese Fähigkeiten von Beginn an zu schulen.

Eine generelle Herausforderung für Laien in der Nutzung fachlicher Bestimmungsliteratur besteht darin, die Übersicht während des Bestimmungsprozesses beim Blättern der Seiten wie auch der Zuordnung des Fachvokabulars, welches zudem häufig abgekürzt wird, zu wahren. Hier gilt es, Überforderungen der Lernenden zu vermeiden, um im schlimmsten Fall Frustration und abnehmendem Interesse entgegenzuwirken. Deswegen sollte die Nutzung der fachlichen Bestimmungsliteratur einerseits fundiert geschult und andererseits aber auch didaktisch sinnvoll angebahnt werden.

Schritt für Schritt Insekten bestimmen

Die gezielte und vertiefende Bestimmung bestimmter Insektengruppen – in Deutschland gibt es über 33.000 Arten [3] – setzt eine sichere Bestimmung der verschiedenen Insektenordnungen voraus. Gerade auf niederschwelliger Ebene erscheint es sinnvoll, potenziellen Einsteigern neben einem phänomenorientierten Zugang über vielfältige Originalbelegungen ebenso unterschiedliche

methodische Zugänge in bestimmte taxonomische Gruppen aufzuzeigen. Diesen Zugang bietet der folgende Bestimmungsschlüssel für Insektenordnungen (Abbildung 1). Dieser adressiert insbesondere Einsteiger in der Insektenbestimmung und stellt eine Art Bindeglied zur etablierten und notwendigen Bestimmungsliteratur dar. Ziel des Schlüssels ist es, interessierten Laien die Orientierung in der taxonomischen Vielfalt der Insekten zu erleichtern und gleichzeitig das genaue Hinsehen und bewusste Erfassen der morphologischen Formenvielfalt anzubahnen. Der Bestimmungsschlüssel gliedert sich in seinem strukturellen wie auch inhaltlichen Aufbau nach den folgenden Kriterien:

- eine hierarchische Bestimmung mit Stichwörtern und ihren jeweiligen Antworten auf einer Seite zusammengefasst (erstellt u. a. nach [2–4]),
- Erklärungen von wissenschaftlichen Fachbegriffen in Klammern direkt im Bestimmungsweg,
- Erwähnung sowohl der deutschen als auch der wissenschaftlichen Bezeichnungen,
- Erleichterung der Entscheidungsfindung durch direkt verankerte Zeichnungen während des Bestimmungsprozesses (erstellt u. a. in Orientierung an [4]),
- Erleichterung der Orientierung während des Bestimmungsprozesses durch farbliche Abgrenzungen von drei Hauptgruppen (eingeteilt gemäß der Flügelgestalt).

Insgesamt finden sich in dem Bestimmungsschlüssel 25 Insektenordnungen wieder. Einzelne davon teilen sich während des Bestimmungsprozesses in weitere Untergruppen auf (z. B. Schnabelkerfen mit Wanzen, Zikaden und Pflanzenläusen). Zudem werden in Abhängigkeit der morphologischen Erscheinungsbilder auch ausgewählte Larven- oder Nymphenstadien der Insekten aufgezeigt. Der Bestimmungsschlüssel ist als Lernposter (Din A0/1) im Seminar-/ Klassenraum oder als Bestimmungshilfe im Freiland einsetzbar (Din A3).

Literatur

- [1] K. Frobels, H. Schlumprecht, H. (2016). Erosion der Artenkenner. Ergebnisse einer Befragung und notwendige Reaktionen. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 48 (4), 105–113.
- [2] B. Klausnitzer. (Hg.) (2011). *Stresemann – Exkursionsfauna von Deutschland, Band 2: Wirbellose: Insekten*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- [3] M. Schaefer (2017). *Brohmer. Fauna von Deutschland*. Quelle & Meyer Verlag, Wiebelsheim.
- [4] G. Köhler (Hg.) (2015). *Müller/Bährmann. Bestimmung wirbelloser Tiere: Bildtafeln für zoologische Bestimmungsübungen und Exkursionen*. Springer Spektrum Verlag, Heidelberg.

Simon Clausen und Ronja Seeling,
Europa-Universität Flensburg

EXPERIMENT

Von der Schule in den Weltraum – Experimente mit dem P51™-Fluoreszenz-Viewer

Fast 70 Jahre nachdem von Rosalind Franklin und ihrem Doktoranden Raymond Gosling das berühmte Foto 51, die Röntgenstruktur der DNA, aufgenommen wurde, umkreist nun „P51“ die Erde. Seit 2021 können Astronauten den P51™-Viewer der Firma miniPCR® auf der Internationalen Raumstation ISS nutzen (Abbildung 1), um fluoreszierende Biomoleküle sichtbar zu machen. Nun soll das kleine Gerät auch Einzug in deutsche Klassenzimmer halten. Was können diese kleinen Schachteln?



ABB. 1 P51™-Viewer in der Copula der ISS. Foto: miniPCR®.

Watson und Crick nutzten 1953 das Foto 51, die Röntgenaufnahme der DNA, um die Doppelhelixstruktur der DNA abzuleiten. In der Schule (Abbildung 2) soll nun der P51™-Viewer genutzt werden, um u. a. das „Zentrale Dogma der Molekularbiologie“ (Abbildung 3) zu vermitteln. Auf sehr dünner Datengrundlage formulierte Crick nur vier Jahre nach der Entdeckung der DNA-Struktur sein Rahmenmodell. Der Begriff „Zentrales Dogma“ sollte nicht implizieren, dass dieses Modell kritiklos akzeptiert werden sollte, sondern betonen, dass diese Idee fundamental für das Verständnis von Leben und Vererbung ist. Im Nachhinein gestand Crick, dass er schlichtweg nicht wusste, was das Wort „Dogma“ bedeutete. Er verwendete es als Schlagwort, um die

Bedeutung als zentrale Hypothese zu betonen. Sie besagt, dass die DNA für RNA kodiert und diese wiederum für Proteine. Einen Weg zurück – vom Protein zur DNA – gibt es hingegen nicht. Das Bahnbrechende dieser Aussage war, dass sie die Entdeckung von Molekülen vorhersagte, die für die Übersetzung von DNA in Proteine verantwortlich sind. Obwohl noch immer neue Erkenntnisse über den genetischen Informationsfluss und seine Regulierung gewonnen werden, bleibt das „Zentrale Dogma“ in seiner Kernaussage bestehen.

Das Experimentier-Kit „Zentrales Dogma“ macht den genetischen Informationsfluss sichtbar. Der Prozess der Transkription von DNA zum Protein kann in Echtzeit beobachtet werden. Von der eingesetzten DNA

wird eine grün fluoreszierende mRNA abgelesen, die dann in ein rot fluoreszierendes Protein (RFP) übersetzt wird (Abbildung 4). Der Nachweis erfolgt simpel: Leuchtet es nach 15 Minuten grün, ist die mRNA entstanden und zeigt, dass die Abschrift (Transkription) stattgefunden hat. Leuchtet es am nächsten Tag rot, belegt dies die Übersetzung (Translation) in das rot fluoreszierende Protein. Zur Synthese der Proteine und der mRNA wird ein zellfreies BioBits®-System verwendet. Die BioBits® enthalten alle zellulären Komponenten wie RNA-Polymerase für die Transkription sowie Ribosomen und tRNAs für die Translation. Die als Bausteine zur Bildung von mRNA und Proteinen benötigten Ribonucleotide, Aminosäuren und ATP als Energiequelle sind auch bereits enthalten. So lässt sich mit jeder beliebigen kodierenden DNA ein Protein erzeugen, sobald man sie in das zellfreie System einbringt. Ein farbig fluoreszierendes Protein herzustellen, ist relativ einfach: In der Natur gibt es etliche Gene, die für bunt leuchtende Proteine kodieren. Etwas schwieriger ist es hingegen, eine mRNA zum Leuchten zu bringen. MiniPCR® verwendet hierfür ein Aptamer (Abbildung 5), das an die Sequenz des RFP-Gens angebaut wurde. Es trägt auch den Namen Brokkoli-Aptamer auf Grund des später entstehenden grünen Leuchtens. Dieser Bereich kodiert – nach Überschreibung in RNA – nicht für Aminosäuren, sondern bildet eine dreidimensionale Struktur, indem sich die Brokkoli-Units (eingekreiste Sequenz) der mRNA zu einem Doppelstrang falten. Diese Struktur bindet ganz spezifisch an den Chromophor (Abbildung 6) und umschließt ihn. Der grün fluoreszierende Chromophor ist im zellfreien System enthalten. Der Trick: Der Chromophor leuchtet erst dann grün, wenn er an das Aptamer gebunden hat und dadurch in die aktive, farbige Form gebracht wird. Der Rest der mRNA, die für das rot fluoreszierende Protein kodiert, wird davon nicht beeinträchtigt.

Um das „Zentrale Dogma“ zu untersuchen, setzen die Schüler/-innen vier Experimente an:

- Der erste Ansatz ist eine Negativkontrolle, bei der Wasser anstelle der DNA verwendet wird.
- Der zweite Ansatz stellt eine Referenzreaktion dar, bei der die DNA wie beschrieben erst zur grün leuchtenden mRNA und dann zu einem rot leuchtenden Protein umgesetzt wird.
- Der dritte Ansatz enthält die gleiche DNA, jedoch wird hier das Antibiotikum Kanamycin hinzugegeben, welches die Funktion der Ribosomen und damit die Translation hemmt.
- Der vierte Ansatz enthält eine andere DNA-Probe.

Vor dem Hintergrund ihres Vorwissens über die Struktur und Regulation eines Gens und seiner Expression sollen die Schüler/-innen die beobachtbaren Reaktionen erklären.

Einblicke in Laborarbeit

Das Experimentier-Kit „Zentrales Dogma“ ist didaktisch sehr gut aufgearbeitet. Das Lehrerhandbuch bereitet jede Phase des Unterrichts gut vor und leitet die Lehrperson durch die einzelnen Schritte der Vorbereitung. In einer PowerPoint-Präsentation wird jeder Arbeitsschritt visualisiert. Das Schülerhandbuch bereitet die Schüler/-innen auf die Durchführung des Praktikums vor und führt sie durch jeden einzelnen Schritt. So können sie mithilfe vorbereiteter Beobachtungstabellen jeweils ihre Vorhersage formulieren. Auf diese Weise gelingt die Auswertung des Versuches zuverlässig. Die Erklärung der Beobachtungen wird durch Tabellen zur Formulierung von Behauptung, Beweis und Argumentation ergebnisorientiert geführt. Vom Schwierigkeitsgrad her unterschied-

liche, spezifische, differenzierte Erläuterungen und Tipps ermöglichen auch schwachen Schüler/-innen die Auswertung, und durch das vorbereitende Arbeitsmaterial in Form von Konzeptkarten werden Schülerfragen bereits im Vorfeld geklärt. Außerdem gibt es für leistungsstarke Schüler/-innen weiterführende Fragen. Das Experiment ist kleinschrittig beschrieben; Vorgehensweise und Anleitung ähneln einem Kochrezept. Die Arbeitsaufträge sind nicht offen formuliert und bieten wenig Spielraum davon abzuweichen. Diese didaktische Reduzierung ist für Oberstufenschüler/-innen jedoch vertretbar.

Durch das Praktikum bekommen die Lernenden einen Einblick in die Arbeitsweisen in einem Labor. Hierfür sind keine teuren Geräte nötig und die Lehrpersonen können das Experiment mit vertretbarem Zeitaufwand für einen dreistündigen Kurs vorbereiten. Die Reaktionen sind so stabil, dass die Kontrolle auch eine Woche später erfolgen kann. Das Kit ist von der Anwendung her sehr einfach und die „molekularen Fabriken“ verzeihen auch so manchen kleinen Fehler. Die Lagerung ist bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis zu sechs Monate und im Kühlschrank bis zu drei Monate möglich.

Ein großer Kritikpunkt an diesem Kit ist sein Black-Box-Charakter. Die Schüler/-innen sehen zwar die unterschiedlichen Fluoreszenzen, doch um zu verstehen, was in den Reaktionsgefäßen passiert, ist viel Abstraktion erforderlich. Eine sorgfältige Einführung ist nötig, um verständlich zu machen, was da passiert. Zu diesem Zweck können neben dem bereits beschriebenen Material des Schüler- und Lehrerhandbuchs und der PowerPoint-Präsentation auch die guten Erklärvideos auf der Webseite von miniPCR® genutzt werden.



ABB. 2 P51™-Viewer im Einsatz in der Schule. Foto: Sarah Block.

Um etwas „Licht in die Black Box“ zu bringen, könnten weitere Kontrollen durchgeführt werden. Der Hemmstoff für die Translation ist ein Anfang, aber auch eher ein „Tropfen Zauberflüssigkeit“. Aus der Fragestellung an Schüler/-innen, welche Bedingungen für Transkription und Translation erforderlich sind, können sich weitere Experimente ergeben – so z. B.:

- (1) Was passiert, wenn man die Reaktion im Kühlschrank durchführt?
- (2) Was passiert, wenn man sie bei $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ durchführt oder das Reaktionsgefäß vorher kocht?
- (3) Was passiert, wenn der pH-Wert der Reaktionslösung unphysiologisch sauer oder alkalisch wird?
- (4) Was passiert, wenn man RNase oder DNase zugibt?
- (5) Was passiert, wenn man DNase zugibt, nachdem die RNA produziert wurde?

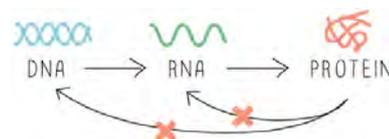


ABB. 3 Das „Zentrale Dogma der Molekularbiologie“: DNA wird über RNA in Protein übersetzt. Der umgekehrte Weg ist nicht möglich (von speziellen Ausnahmen abgesehen). Foto: miniPCR®.

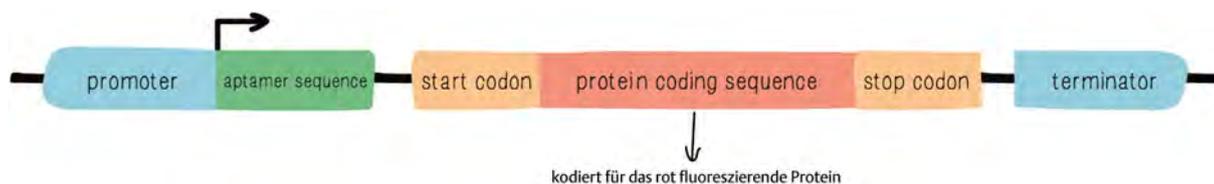


ABB. 4 Schema der für das Experiment verwendeten DNA-Sequenz. Foto: miniPCR®.

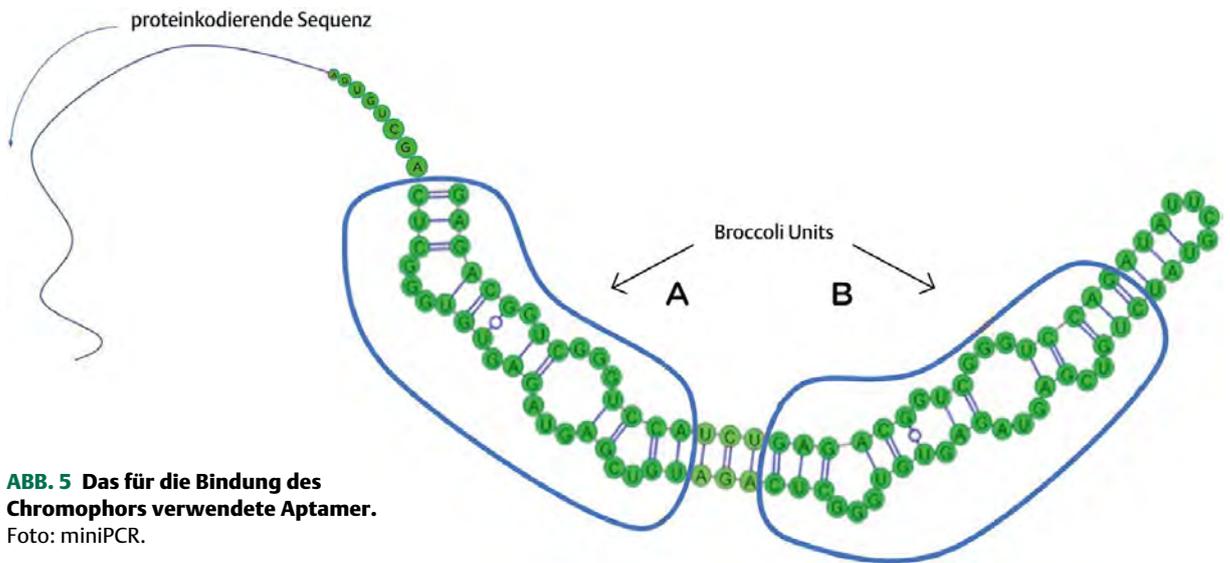


ABB. 5 Das für die Bindung des Chromophors verwendete Aptamer. Foto: miniPCR.

Ein Vorteil des P51TM-Fluoreszenz-Viewers ist, dass man die Palette an Experimenten – auch mit eigener Phantasie – enorm erweitern kann.

Schülerexperiment im Weltraum

Einfach, aber sehr instruktiv ist das „DNA Glow Lab“, in dem die DNA-Struktur einprägsam untersucht werden kann. Das Aufschmelzen von DNA und das Zusammenfügen (Hybridisierung) zur Doppelhelix kann damit in Echtzeit anhand der Fluoreszenz beobachtet werden. Dieses scheinbar so einfache Experiment lässt sich fast beliebig bis hin zu komplexen Reassoziationskinetiken erweitern. Mithilfe eines weiteren Experimentier-Kits können enzymatische Reaktionen in der Fluoreszenz untersucht werden.

Der recht kostengünstige Fluoreszenz-Viewer P51TM kann sogar in der Unter- und Mittelstufe benutzt werden, um fluoreszierende Farbstoffe in bunten Filzstiften sichtbar zu machen. Da dieses Gerät vielfältig

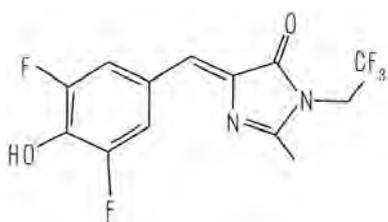


ABB. 6 Der grün fluoreszierende Chromophor ist bereits im zellfreien System enthalten. Foto: miniPCR®.

Weitere Informationen zu P51TM und Experimenten erhalten Sie bei der Autorin.

einsatzbar ist, überrascht es nicht, dass damit in diesem Jahr ein Experiment auf der ISS durchgeführt wird. Selin Kocalar von der *Leigh High School* in San José im Bundesstaat California gewann mit ihrer Idee 2021 den amerikanischen Schüler-Wettbewerb „Genes in Space“. Sie entwickelte gemeinsam mit ihrer Mentorin Bess Miller von der *Harvard Medical School* in Boston eine Möglichkeit, Pathogene wie *Pseudomonas aeruginosa* mit dem zellfreien Biosensor im Weltall nachzuweisen. In der Geschichte der Raumfahrt kam es immer wieder zu Verunreinigungen von Trinkwasser – sowohl beim Apollo-Programm als auch auf der ISS. Im Zuge der Apollo-13-Mission erkrankte ein Crewmitglied ernsthaft an einer Infektion durch *Pseudomonas aeruginosa*. Wasserproben mussten bisher immer zur Erde transportiert und in einem Labor durch rRNA-Sequenzierung auf Kontaminationen geprüft werden. Das erschwert eine Sicherstellung von sauberem Trinkwasser besonders bei langen Missionen – z. B. zum Mars. Selin Kocalars preisgekrönte Idee bietet genau das: eine einfache, benutzerfreundliche, tragbare Methode um die Wasserqualität zu testen – und zwar nicht nur im Weltraum, sondern auch auf der Erde, wo kontaminiertes Wasser in vielen Regionen ein großes Problem darstellt.

Was bisher nur amerikanischen Schüler/-innen vorbehalten war, soll nun auch in Deutschland möglich werden. Die kleine Firma BioWissKomm plant mit Unterstützung des VBIO den Schülerwettbewerb „Genes in Space“ auch in Deutschland einzuführen. Eine Lehrer-Schüler-Konferenz im Zeiss-Planetarium in Berlin ist bereits für den 21./22. März 2023 geplant. Danach werden großzügige Sponsoren gesucht, um 2024 oder 2025 ein Schülerexperiment in den Weltraum schicken zu können.

Zum Weiterlesen:

- F. Crick (1958). On Protein Synthesis. Symp. Soc. Exp. Biol. XII.
- D. Thieffry, S. Sarkar: Forty years under the central dogma. Trends Biochem. 23.
- J. D. Watson, F. H. C. Crick (1953). Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid. Nature 171.
- miniPCR bioTM Lernlabor BioBits® (2020). Zentrales Dogma, Version 1.2. https://emerginginvestigators.org/documents/genes_in_space_2021, Stand: 31.03.22
- <https://www.instagram.com/p/CTVdH12pqoe/>, Stand: 30.03.2022
- <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/glimmender-fisch-das-erste-design-haustier-leuchtet-rot-a-275525.html>, Stand: 31.03.22

Sarah Block, König-Heinrich-Schule und BioWissKomm, Fritzlar, E-mail: sarah-eliesabeth.block@schule.hessen.de, s.block@biowisskomm.de



ABB. 1 Freilandexperiment mit verschiedenen Chemotypen des Rainfarns (*Tanacetum vulgare*).

Chemische Diversität bei Pflanzen – wozu?

CAROLINE MÜLLER

*In einigen Pflanzenarten unterscheiden sich Individuen untereinander deutlich in der Zusammensetzung ihrer spezialisierten chemischen Verbindungen, weisen also eine hohe Chemodiversität auf. Welchen Nutzen dies für Pflanzen in einer sich verändernden Umwelt haben könnte, ist derzeit Gegenstand intensiver Forschung, unter anderem am Rainfarn (*Tanacetum vulgare*, Abbildung 1). Chemodiversität ist eine wichtige Dimension von Biodiversität und sollte künftig mehr Beachtung finden – auch in der Landwirtschaft.*

Individuen einer Art unterscheiden sich in zahlreichen Merkmalen. Manche davon sind sehr offensichtlich, wie beispielsweise die Größe oder die Form (Abbildung 2). Bei Tieren, inklusive dem Menschen, sind Verhaltensunterschiede besonders auffallend, hier können verschiedene Persönlichkeiten beobachtet werden [1]. Bei Pflanzen finden sich gut sichtbare innerartliche Unterschiede zum

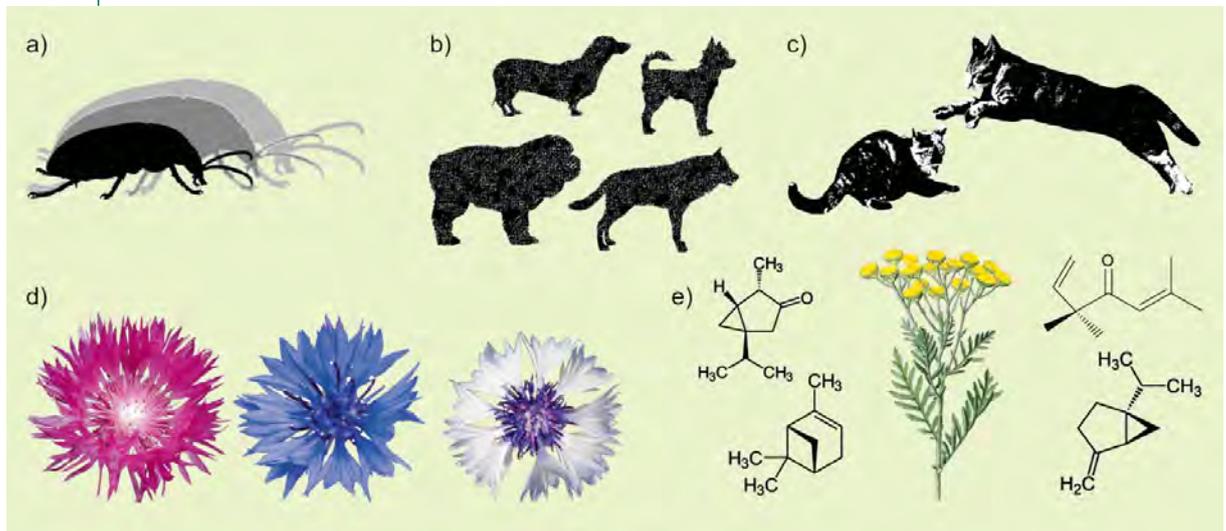
Beispiel in der Blütenfarbe. Weniger offensichtlich – und daher weitaus weniger gut untersucht – sind Unterschiede in der Zusammensetzung an für die Art oder die Pflanzenfamilie spezifischen chemischen Inhaltsstoffen, sogenannte spezialisierte (oder: sekundäre) Metaboliten, die in Wechselwirkungen zwischen Pflanzen und anderen Organismen involviert sind. Diese Metaboliten dienen im Allgemeinen der Abwehr von Fressfeinden oder Pathogenen wie Pilzen und Bakterien, können jedoch auch Organismen anlocken, die auf die Pflanzenart spezialisiert sind. Damit bestimmen sie ganz zentral die ökologische Nische eines Individuums, die ► individuelle Nische [2]. Die Kommunikation mittels chemischen Metaboliten ist die älteste „Sprache“ der Welt: Für eine erste Verständigung im Meer war ein Informationsaustausch mittels chemischer Botenstoffe unabdingbar; bei der sexuellen Fortpflanzung finden Spermien mithilfe chemischer Botenstoffe die Eizelle. Nach wie vor wird sowohl im Wasser als auch an Land ein Großteil der Informationen chemisch vermittelt.

Ausgeprägte individuelle Unterschiede in den Eigenschaften einer Art führen zu hoher Diversität in einer Population. Chemische Diversität, oder kurz ► Chemodiversität, ist nicht sichtbar, aber wir können sie riechen oder schmecken, wenn wir beispielsweise Thymian oder Oregano als Gewürze verwenden. Beide Arten zeigen deutliche innerartliche Unterschiede in der Zusammensetzung von

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 246 erklärt.



ABB. 2 | INNERARTLICHE UNTERSCHIEDE



Innerhalb einer Art finden sich vielfach Unterschiede im Erscheinungsbild zwischen Individuen, die zu Diversität führen. So kann sich beispielsweise a) die Größe, b) die Form, c) die Persönlichkeit, d) die Farbe oder e) die Chemie zwischen Individuen einer Art unterscheiden. Abb.: Silvia Eckert.

spezialisierten Metaboliten, den Terpenen, die für den intensiven Geruch und Geschmack verantwortlich sind. Individuen, welche solche innerartlichen Unterschiede in ihrem Metabolitenmuster zeigen, nennt man auch ► Chemotypen. Diese Unterschiede beruhen auf genetischen und biochemischen ► Polymorphismen. Bereits vor über 20 Jahren wurde die Hypothese aufgestellt, dass diese Po-

lymorphismen mit der Tatsache zusammenhängen, dass Individuen einer Pflanzenart von verschiedenen herbivoren Organismen befallen werden und mit verschiedenen anderen Pflanzenarten konkurrieren [3]. In der Tat konnten die Autoren der Studie damals zeigen, dass verschiedene Chemotypen von Thymian bzw. verschiedene in der Art vorkommende Terpene eine unterschiedliche Wirkung auf pflanzenfressende Schnecken-, Insekten- und Säugetierarten, aber auch auf Bakterien, Pilze und die Keimung von Samen anderer Pflanzenarten hatten [3]. Für manche Pflanzenarten sind nur zwei bis drei verschiedene Chemotypen beschrieben, andere weisen eine deutlich höhere Anzahl an Chemotypen auf wie zum Beispiel der Rainfarn (*Tanacetum vulgare*, Abbildung 1).

IN KÜRZE

- Innerhalb verschiedener Pflanzenarten kann sich die **Zusammensetzung an chemischen Inhaltsstoffen** stark unterscheiden. Die Ökologie und Evolution der Funktion solcher Chemodiversität ist derzeit Gegenstand intensiver Forschung.
- Der Rainfarn (*Tanacetum vulgare*) weist eine besonders **hohe Diversität in Terpenprofilen der Blätter und Blüten auf**, man unterscheidet hier zwischen Chemotypen. Auf Rainfarn spezialisierte Arten wie z. B. einige Blattlausarten, aber auch Pollen-fressende Käfer zeigen unterschiedliche Präferenzen für bestimmte Chemotypen.
- Chemodiversität kann **auf diversen Skalen betrachtet** werden. Sie variiert räumlich und zeitlich innerhalb eines Individuums, zwischen Individuen einer Population, zwischen Populationen über die Saison und aufgrund unterschiedlicher Umwelteinflüsse.
- Pflanzen, die in neue Gebiete eingeführt wurden und sich dort erfolgreich ausbreiten, haben möglicherweise einen **großen Vorteil durch intraspezifische Chemodiversität**, da diese u. a. die Anpassungsfähigkeit von Fressfeinden erschweren könnte.
- Chemodiversität ist eine wichtige Dimension von ► Biodiversität. Sie sollte gezielt in der Landwirtschaft genutzt werden, um die **Widerstandsfähigkeit von Nutzpflanzen** gegenüber Umweltfaktoren zu steigern.

Rainfarn – Modell für hohe Chemodiversität

Der Rainfarn gehört zu den Korbblütlern (Asteraceae) und ist eine weit verbreitete, krautige Pflanze, die unter sehr verschiedenen Umweltbedingungen wachsen kann. Aufgrund der Zusammensetzung der Terpene in den Blättern und Blüten werden zahlreiche Chemotypen unterschieden. Im Feld wurden bereits auf kleinem Raum (< 3 km²) über 14 Chemotypen gefunden, die unterschiedlich häufig vorkommen und deren Terpenprofil jeweils von einem bis drei Terpenen dominiert wird (Abbildung 3) [4]. Trotz der Terpene und anderer Inhaltsstoffe, die für ihre effiziente Verteidigung gegen Fressfeinde bekannt sind, sind diverse Herbivorenarten auf den Pflanzen zu finden [5]. Gut untersucht sind insbesondere Beziehungen zwischen Rainfarn und verschiedenen spezialisierten Blattlausarten, aber auch Blütenbesuchern [5–8]. So scheinen verschiedene auf Rainfarn spezialisierte Blattlausarten, wie die rot gefärbte Art *Uroleucon tanaceti* und die eher grünliche Art

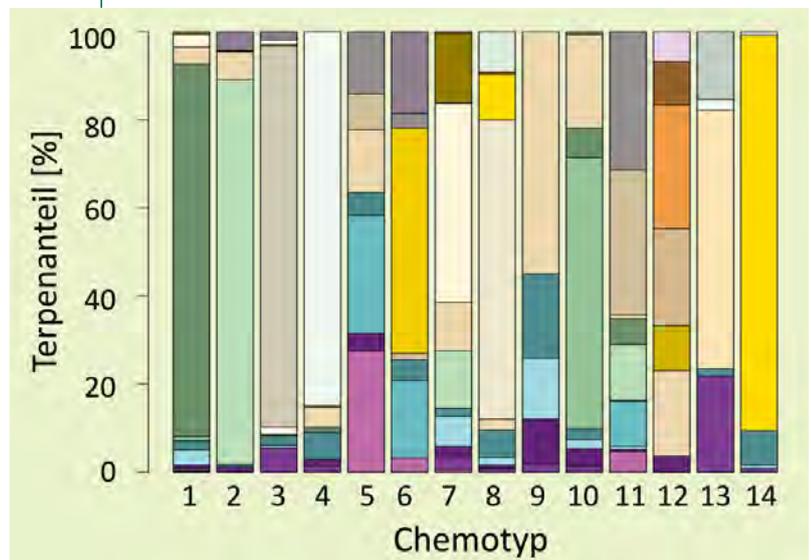
Macrosiphoniella tanacetaria (Abbildung 4), im Freiland bestimmte Chemotypen zu bevorzugen, auf denen die Blattläuse gehäuft vorkommen [4]. Auch innerhalb der Pflanzenindividuen zeigt sich eine unterschiedliche Verteilung. Während *U. tanacetii* eher ältere Blätter kolonisiert, sind Individuen der Art *M. tanacetaria* auf den jüngeren, weiter oben befindlichen Pflanzenteilen, an den jungen Blättern und den Stängeln unterhalb der Blüten zu finden. Dies weist auf eine gewisse Variation auch innerhalb von Pflanzenindividuen in der chemischen Zusammensetzung, aber auch in der mechanischen Zugänglichkeit und damit insgesamt der Pflanzenqualität für herbivore Insekten hin.

Die meisten Terpene sind flüchtig und daher für viele Organismen bereits aus der Distanz wahrnehmbar. So können sie zur Anlockung von Insekten beitragen. Für Pflanzen bedeutet dies ein Dilemma: Bestäuber müssen angelockt werden, Fressfeinde – insbesondere an den für die Reproduktion wichtigen Blüten – sollten dagegen fernbleiben. Auch bei Pollen-fressenden Käfern und Insekten, die sich von den Blütenköpfchen ernähren, gibt es unterschiedliche Präferenzen für verschiedene Chemotypen [6]. Dabei unterscheiden sich die Chemotypen nicht nur in ihrer Terpenzusammensetzung, sondern auch in der Größe und dem Durchmesser der Blütenköpfchen, der Dauer der Blühperiode und dem Nährwert des Pollens. Im Laufe der Blühperiode steigt zudem die Chemo-diversität der Oberflächenkomponenten auf dem Pollen (berechnet mit dem ► Shannon-Index), und in später blühenden Pflanzen findet sich ein höherer Proteingehalt im Pollen [6]. Diese sich ändernden Eigenschaften könnten helfen, um auch später im Jahr, wenn die Häufigkeit der Bestäuber generell zurückgeht, für diese noch attraktiv zu sein und verdeutlichen die zeitliche Dynamik von Chemo-diversität.

Skalen der Chemodiversität und deren Erforschung

Chemodiversität kann auf verschiedenen Skalen betrachtet werden, was hier am Beispiel des Rainfarns erklärt werden soll (Abbildung 5): Die Chemodiversität kann sowohl auf räumlicher als auch auf zeitlicher Skala variieren. Bereits innerhalb von Individuen zeigt sich räumliche und zeitliche Variation. So weisen die Blüten und Blätter eines Individuums ein vergleichsweise ähnliches Terpenspektrum auf, zumindest ist bei beiden Organen jeweils das gleiche Monoterpen dominant [6]. In den Wurzeln finden sich dagegen weniger und teils andere (häufiger Sesqui-)Terpene als in den oberirdischen Pflanzenteilen, und die für die Blätter definierten Chemotypen spiegeln sich hier nicht wider [9]. Darüber hinaus verändern sich im Lauf der Saison die Terpenanzahl und deren Konzentration und nehmen von jungen zu älteren Pflanzen deutlich zu, wobei das anfangs dominante, Chemotyp-charakterisierende Terpen im Allgemeinen weiterhin dominant bleibt [4].

ABB. 3 | CHEMOTYPEN DES RAINFARNS



Im Freiland wurden bereits auf kleinem Raum (< 3 km²) unter 140 beprobten Rainfarnpflanzen (*Tanacetum vulgare*) 14 verschiedene Chemotypen gefunden. Die verschiedenen Farben stehen für unterschiedliche Terpene, die in den Blättern der Pflanzen vorkommen. Die Häufigkeit der Chemotypen nimmt von links nach rechts ab; so wurde der Chemotyp 1 (dominiert von dem Terpen β -Thujon) 36-mal gefunden, der Chemotyp 14 nur einmal. Daten nach [3], Terpenanzahl reduziert auf 28 Komponenten, die mit >5% im Originaldatensatz vertreten waren.

Zudem wird das Profil der Inhaltsstoffe durch verschiedene Umwelteinflüsse modifiziert. Sowohl abiotische Faktoren wie Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit [9, 10] als auch biotische Faktoren wie Befall durch herbivore Insekten [7] können die Zusammensetzung verändern. So nimmt beispielsweise die Terpenkonzentration in Blättern zweier Chemotypen in Antwort auf Trockenstress leicht ab, wohingegen die der Wurzeln sowohl durch Trockenstress als auch durch Herbivorie an den Blättern deutlich zunimmt [10]. Erhöhte Düngezugabe führt bei diesen Chemotypen dagegen nur in Blättern zu einer Abnahme der Terpenkonzentration, während Wurzelterpene in ihrer Gesamtkonzentration durch Düngezugabe unverändert bleiben [9]. Diese unterschiedlichen Antworten in verschiedenen Pflanzenteilen machen deutlich, dass oberirdische und unterirdische Pflanzenteile vermutlich unterschiedlichen Selektionsdrücken ausgesetzt sind. Mit seinen unterschiedlichen Antworten auf verschiedene Stressfaktoren weist der Rainfarn insgesamt eine hohe phänotypische Plastizität auf.

Rainfarn ist eine stark auskrenzende Pflanze, das heißt in den Blütenköpfchen einer Pflanze finden sich zahlreiche Samen, die nach Bestäubung durch Pollen von verschiedenen anderen Pflanzen entstanden sind. Zieht man Samen einer Mutterpflanze an, können diese also verschiedene Chemotypen aufweisen. Möchte man genetisch identische Organismen für Versuche erzeugen, kann man mit Stecklingen arbeiten. Rainfarn lässt sich sehr gut vegetativ vermehren und die Stecklinge weisen eine relativ



stabile Terpenzusammensetzung auf [6]. An diesen lässt sich phänotypische Plastizität im engeren Sinne untersuchen. Durch die Auskreuzung und hohe Diversität in Chemotypen finden sich auch innerhalb von Populationen – wie bereits erwähnt – deutliche Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der Individuen (Abbildung 3, [4, 8]). Das Vorkommen und die Häufigkeit verschiedener Chemotypen unterscheiden sich aber erst recht zwischen Populationen [11].

Interessant ist die Fragestellung, inwieweit es gegebenenfalls zu unterschiedlicher Wahrnehmung von Pflanzenindividuen durch z. B. Insekten kommt, je nachdem, ob sie in Nachbarschaft mit Pflanzen desselben Chemotyps („Monoplot“) oder in Nachbarschaft mit Pflanzen verschiedener Chemotypen („Mischplot“) wachsen. In einem Semi-Freilandexperiment, in dem sowohl Mono- als auch Mischplots von Rainfarn-Chemotypen angeboten wurden, waren Pollen-fressende Käfer beispielsweise signifikant weniger auf Pflanzen in Mischplots vertreten [6]. Somit haben Chemotypen, die attraktiv für Fressfeinde sind, einen Vorteil, wenn sie in der Umgebung von anderen Chemotypen wachsen, und können von hoher Chemodiversität profitieren. In einem großangelegten Freilandexperiment mit Mono- und Mischplots aus fünf verschiedenen Chemotypen (Abbildung 1) wurden über die letzten beiden Jahre hinweg nun systematisch die Häufigkeiten verschiedener Blattlausarten sowie Blütenbesucher aufgenommen, um zu überprüfen, ob dies ein generelles Muster ist. Hier scheinen jedoch artspezifische Unterschiede in den Präferenzen bzw. Häufigkeiten der Insekten zu bestehen.

Für Experimente kann schließlich auch mit Pflanzen verschiedener Populationen gearbeitet werden, die im Freiland vor Ort beprobt werden [4] oder deren Samen in verschiedenen Regionen Deutschlands, Europas und der Welt gesammelt und dann unter standardisierten Bedingungen angezogen werden [11].

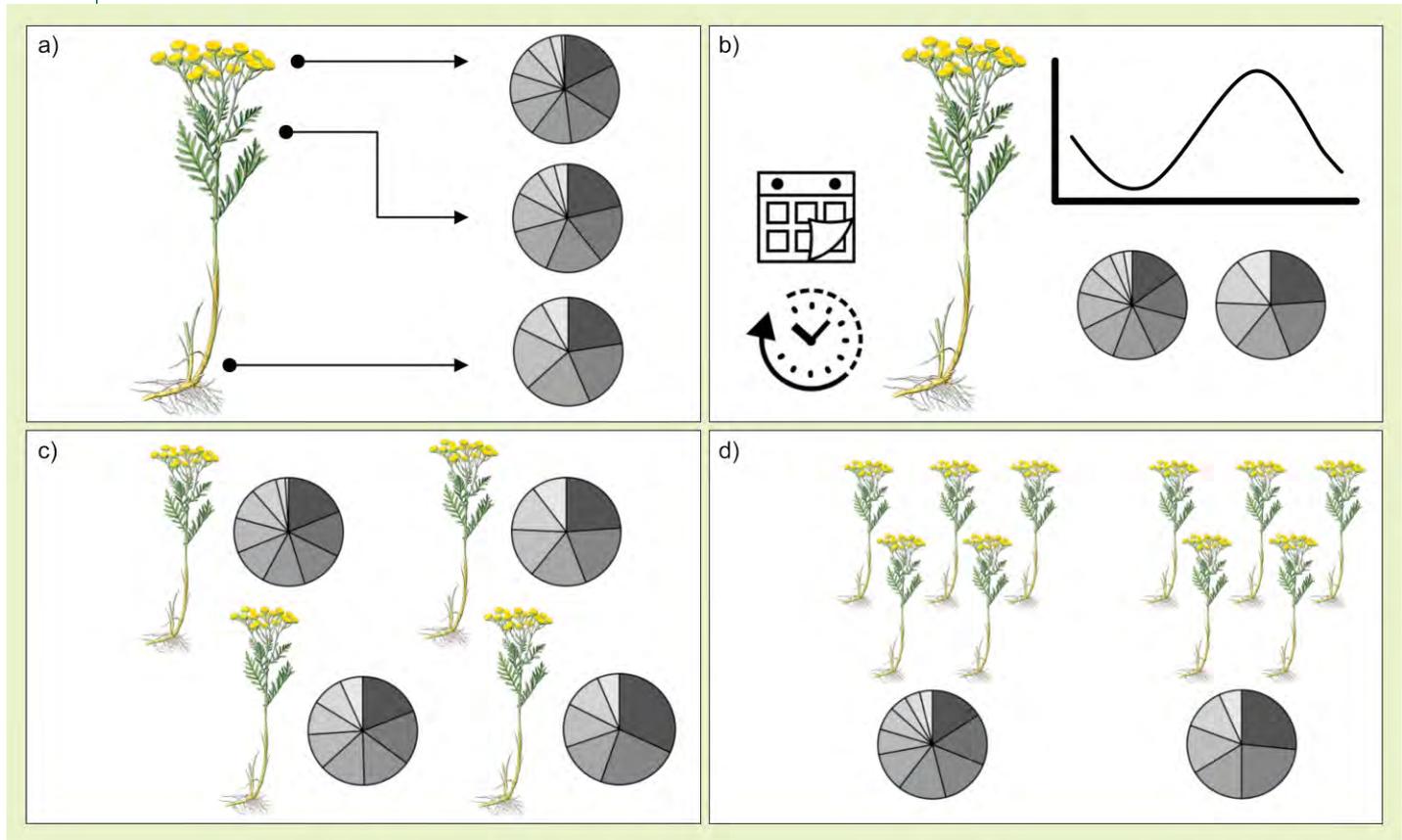
Die Rolle von Chemodiversität im Invasionskontext

Der Rainfarn stammt vermutlich ursprünglich aus der Kaukasusregion und Osteuropa, von wo aus er sich vor über 500 Jahren nach Westeuropa ausbreitete [12]. Nach Nordamerika wurde Rainfarn schließlich als Medizinalpflanze eingeführt und breitete sich teilweise so stark aus, dass viele Populationen dort heute als invasiv gelten. Invasive Arten sind Arten, die durch den Menschen bedingt in neuen Gebieten vorkommen, sich dort etablieren und ökologischen, wirtschaftlichen oder gesundheitlichen Schaden anrichten. Eine der großen Fragen in der Ökologie lautet, warum es manchen Arten gelingt, in der neuen Umgebung eine sehr hohe Bedeutung bzw. Dominanz zu erlangen. Zahlreiche Hypothesen wurden diesbezüglich formuliert [13]. Hierbei sollten Pflanzenindividuen nicht isoliert betrachtet werden, sondern in ihrer jeweiligen Umwelt. Pflanzen, die anderswo eingeschleppt werden, haben zunächst meist weniger Fressfeinde, möglicherweise aber auch weniger Mutualisten, d. h. Partner mit positiven Wechselwirkungen. Ihre chemische Zusammensetzung mag im invasiven Gebiet ansässigen Fressfeinden zunächst unbekannt sein und abschreckend oder zumindest nicht attraktiv wirken. Ist eine Pflanzenart chemisch sehr divers, riechen und schmecken Individuen derselben



ABB. 4 Auf Rainfarn spezialisierte Blattlausarten. *Uroleucon tanacetii* (links) und *Macrosiphoniella tanacetaria* (rechts) sind zwei der vielen Blattlausarten, die auf Rainfarn (*Tanacetum vulgare*) spezialisiert sind. Beide Arten zeigen unterschiedliche Präferenzen für bestimmte Chemotypen und bevorzugen auch innerhalb eines Pflanzenindividuums verschiedene Bereiche: Die älteren Blätter werden bevorzugt von *U. tanacetii* besiedelt, die jüngeren Blätter und Triebe von *M. tanacetaria*. Fotos: Dominik Ziaja und Jana Stallmann.

ABB. 5 | SKALEN VON CHEMODIVERSITÄT



Innerhalb einer Art kann sich die chemische Zusammensetzung stark unterscheiden zwischen a) Geweben eines Individuums, b) über die Saison, c) zwischen Individuen einer Population und d) in Populationen. Abb.: Silvia Eckert.

Art unterschiedlich, je nachdem, auf welchen Chemotypen ein Pflanzen-besuchendes Insekt gerade trifft. Somit könnte es deutlich schwieriger sein, sich an diese Chemie anzupassen, da sie eben nicht vorhersagbar ist.

Ein solcher Vorteil hoher chemischer Diversität, wie ihn die oben beschriebene chemische Diversitätshypothese erwarten lässt, wurde zum Beispiel als eines der Erfolgsrezepte beim Rainfarn postuliert: In Pflanzen aus 13 europäischen Populationen und neun nordamerikanischen Populationen, deren Blatt-Terpene nach Wuchs unter standardisierten Bedingungen verglichen wurden, fanden sich insgesamt 21 Chemotypen [11]. Immerhin elf der Chemotypen wurden in Pflanzen aus dem nordamerikanischen Gebiet detektiert, von denen zwei nicht in europäischen Pflanzen vorkamen. Diese hohe chemische Diversität im invasiven Gebiet ist vermutlich auf mehrfache Einführung der Pflanzen nach Nordamerika und/oder Hybridisierung der eingeführten Individuen zurückzuführen. Insgesamt war die chemische Diversität (berechnet mit dem Shannon-Index) der Pflanzen europäischer Herkunft zwar höher, Pflanzen nordamerikanischer Herkunft wiesen dagegen insgesamt eine signifikant höhere Terpenkonzentration auf [11]. Möglicherweise verändern Pflanzen in ihrer neuen Umgebung aufgrund ande-

rer Umwelteinflüsse ihre Investition von Ressourcen in Wachstum *versus* Abwehr, die nach wie vor gegen generalistische pflanzenfressende Insekten und andere weitverbreitete Pathogene sehr effizient sein sollte. Eine Gefahr der Anlockung von auf die Pflanzenart angepasste Spezialisten ist im invasiven Gebiet weniger gegeben. Ein Mosaik an unterschiedlichen Umweltfaktoren kombiniert mit unterschiedlicher genetischer und phänotypischer Plastizität bestimmt letztlich die Diversität an Merkmalskombinationen der Individuen und ihre individuelle Nische.

Allerdings wurden bisher nur relativ wenige Arten auf chemische Diversität zwischen heimischen und invasiven Populationen hin untersucht. Ein weiteres Beispiel ist das orientalische Zackenschötchen, *Bunias orientalis* (Brassicaceae), bei dem in mehreren Populationen die Senfölglykosidzusammensetzung, aber auch die Gesamtzusammensetzung diverser polarer Metaboliten in den Blättern analysiert wurde [14]. Nur 17 Prozent der knapp 4.000 gemessenen Metaboliten wurden tatsächlich in allen 161 untersuchten Individuen gefunden; die Diversität unterschied sich jedoch vor allem zwischen Individuen, aber nicht zwischen Populationen unterschiedlicher Herkunft. Auch konnten unterschiedliche Senfölglykosid-Chemo-



typen gefunden werden. Je höher die Chemodiversität der Senfölglykoside in den Pflanzen war, desto geringer war die Überlebenswahrscheinlichkeit der Raupen der generalistischen Herbivorenart *Mamestra brassicae* [14]. Diese Ergebnisse unterstützen die Hypothese, dass hohe Chemodiversität für Pflanzen von Vorteil sein kann. Die Chemodiversität der Art spiegelte sich außerdem in der genetischen Diversität wieder [14]. Insgesamt sind mehr Studien notwendig, die die Diversität in der Zusammensetzung pflanzlicher Metaboliten sowie den tatsächlichen Druck durch Herbivoren bzw. Interaktionen mit Mutualisten messen, um besser zu verstehen, welche Faktoren möglicherweise zum Ausbreitungs- und Invasionserfolg von Arten beitragen.

Chemodiversität – eine wichtige Dimension von Biodiversität

Die Bedeutung von Biodiversität gelangt – leider sehr spät – zunehmend in das Blickfeld der Bevölkerung und der Politik. Das Bewusstsein steigt, dass eine hohe Biodiversität wünschenswert und förderungswürdig ist. So wie die Chemodiversität kann auch Biodiversität auf vielen verschiedenen Ebenen gemessen werden, von Genen bis hin zu Ökosystemen. Ein häufig verwendetes Maß für die Biodiversität der Arten ist der Shannon-Index, der sowohl die Artenzahl als auch deren Häufigkeit berücksichtigt. Während derzeit zahlreiche Arten noch nicht einmal bekannt sind, geschweige denn ihre Biologie beschrieben ist, sterben andere Arten mit einer besorgniserregend hohen Rate aus. Eine hohe Biodiversität kann vielfach mit einer erhöhten Ökosystemstabilität in Verbindung gebracht werden. So konnte gezeigt werden, dass Habitate mit hoher Biodiversität beispielsweise eine höhere Resilienz haben, sich also nach Stressereignissen, wie sie in der sich derzeit stark ändernden Umwelt vermehrt auftreten, schneller erholen können.

Ähnliches gilt höchstwahrscheinlich auch für eine hohe Chemodiversität: Populationen mit hoher chemischer Diversität sollten stabiler gegen Störung sein. Wenn Fressfeinde oder auch Pathogene unterschiedliche Chemotypen bevorzugen, dann ist bei hoher Chemodiversität die Gefahr gering, dass eine ganze Population den Schädlingen zum Opfer fällt. Einzelne Chemotypen, die unter Umständen wegfallen, könnten in ihrer ökologischen Funktion durch andere ersetzt werden. Somit kann Chemodiversität als eine wichtige Dimension von Biodiversität betrachtet werden. Zukünftige Forschung sollte diese Dimension der Biodiversität, die eine essenzielle Rolle für diverse Interaktionen zwischen Organismen spielt, berücksichtigen und die Funktion von Chemodiversität bei der Erhaltung von Biodiversität beleuchten.

Potenzielle Bedeutung von Chemodiversität für die Landwirtschaft

Eine hohe intraspezifische Chemodiversität von Pflanzen erhöht vermutlich die Widerstandskraft der gesamten Po-

GLOSSAR

Biodiversität: Biologische Diversität, die meist auf der Ebene von Arten betrachtet wird, aber auch auf der Ebene von Genen, höheren Taxa oder Habitaten gemessen werden kann.

Chemodiversität: Phytochemische Diversität in pflanzlichen Metaboliten, die für das Überleben einer Pflanze in ihrer Umwelt essenziell sind.

Chemotyp: Gruppierung von Pflanzen entsprechend einer prominenten Substanzklasse, z. B. Terpenen oder Senfölglykosiden. Die Chemotypen werden meist nach der dominanten Verbindung benannt.

Individuelle Nische: Ökologische Nische eines Individuums, die aus vielen Dimensionen von Umweltbedingungen und Ressourcen besteht, die das Individuum benötigt, um seinen Lebensstil zu realisieren.

Polymorphismus: Merkmalsvariation im Erscheinungsbild eines Organismus. Unterschiedliche Phänotypen beruhen auf unterschiedlicher genetischer Ausstattung.

Shannon-Index (H'): In der Biodiversitätsforschung etablierter Index, der sich berechnet nach $H' = -\sum (p_i \cdot \ln p_i)$, wobei i die Anzahl der Arten ist und p die relative Häufigkeit jeder Art. Der Index lässt sich auch zur Berechnung der Chemodiversität eines Individuums anwenden, wobei dann i die Anzahl der Metaboliten und p die relative Häufigkeit des Metaboliten ist.

pulation. Wenn einzelne Individuen jeweils gegen unterschiedliche Antagonisten unterschiedlich gut verteidigt sind, ergibt sich in der Summe ein besseres Überleben, als wenn alle Individuen chemisch gleich sind und von einem Schädling, der an diesen „Chemotypen“ angepasst ist, komplett vernichtet werden. Eine Verwendung chemisch diverser Individuen oder anderweitig unterschiedlicher Sorten könnte somit den Einsatz von Pestiziden deutlich verringern oder ganz unnötig machen und damit zu einer Erhaltung der Biodiversität beitragen. Derzeit wird im Rahmen einer von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungsgruppe zum Thema „Ökologie und Evolution der intraspezifischen Chemodiversität von Pflanzen“ (FOR 3000) untersucht, welche ökologischen Konsequenzen Chemodiversität hat und wie diese genetisch aufrechterhalten wird. Erkenntnisse aus den Untersuchungen an drei Modellarten, die bisher nicht in der Landwirtschaft verwendet werden (u. a. am Rainfarn), könnten möglicherweise auf Nutzpflanzen übertragen werden. Statt dem Ziel zu folgen, die perfekte Pflanze zu züchten, die allen Widrigkeiten trotzt, wäre es dringend an der Zeit umzudenken und hoher Diversität auch auf dem Acker einen höheren Stellenwert zuzuweisen, um damit die Abwehrkraft von Nutzpflanzen in ihrer ökologischen Gemeinschaft zu steigern.

Zusammenfassung

Pflanzen können eine hohe Diversität in der Zusammensetzung von spezialisierten Metaboliten aufweisen, die auch als Chemodiversität bezeichnet wird. Der Rainfarn (*Tanacetum vulgare*) zeichnet sich durch eine besonders hohe Vielfalt von Chemotypen aus, deren Zusammensetzung an Terpenen sowohl innerhalb von Individuen als auch zwischen Individuen und nicht nur räumlich sondern auch zeitlich variiert. Diese Chemodiversität hat große Auswirkungen auf andere Organismen wie Insekten, die von einzelnen Terpenen angezogen, von anderen aber auch abgeschreckt werden können. Chemodiversität kann als eine wichtige Dimension von Biodiversität betrachtet werden. Eine hohe Diversität macht Pflanzen vermutlich erfolgreich, unter anderem bei Invasionen in neue Gebiete, und könnte ihre Resilienz steigern. Eine hohe Chemodiversität sollte daher auch in der Landwirtschaft angestrebt werden.

Summary

Chemical diversity in plants – what for?

Plants can show a high diversity in the composition of their specialized metabolites, a phenomenon called chemodiversity. Common tansy (*Tanacetum vulgare*) is characterized by a particularly high diversity of chemotypes, which do not only vary in terpene composition with regard to space, but also with regard to time – both within and between individuals. This chemodiversity has large effects on other organisms such as insects, which are attracted by some terpenes but are repelled by others. Chemodiversity can be considered as one important dimension of biodiversity. Presumably, a high diversity makes plants successful, among other things when invading new areas, and may enhance their resilience. Therefore, a high chemodiversity should also be aimed at in sustainable agriculture.

Schlagnworte:

Biodiversität, chemische Diversität, individuelle Unterschiede, invasive Pflanzen, Landwirtschaft, *Tanacetum vulgare*.

Literatur

- [1] M. I. Kaiser, C. Müller (2021). What is an animal personality? *Biology and Philosophy* 36,1–25.
- [2] C. Müller, R. R. Junker (2022). Chemical phenotype as important and dynamic niche dimension of plants. *New Phytologist*, <https://doi.org/10.1111/nph.18075>
- [3] Y. B. Linhart, J. D. Thompson (1999). Thyme is of the essence: Biochemical polymorphism and multi-species deterrence. *Evolutionary Ecology Research* 1, 151–171.
- [4] S. Kleine, C. Müller (2011). Intraspecific plant chemical diversity and its relation to herbivory. *Oecologia* 16, 175–186.
- [5] G. Schmitz (1998). The phytophagous insect fauna of *Tanacetum vulgare* L. (Asteraceae) in Central Europe. *Beiträge zur Entomologie* 48, 219–235.
- [6] E. J. Eilers et al. (2021). Flower production, headspace volatiles, pollen nutrients and florivory in *Tanacetum vulgare* chemotypes. *Frontiers in Plant Science* 11, 611877.
- [7] R. Jakobs, R. Schweiger, C. Müller (2019). Aphid infestation leads to plant part-specific changes in phloem sap chemistry, which may indicate niche construction. *New Phytologist* 221, 503–514.
- [8] M. V. Clancy et al. (2018). Metabotype variation in a field population of tansy plants influences aphid host selection. *Plant Cell and Environment* 41, 2791–2805.
- [9] S. Kleine, C. Müller (2013). Differences in shoot and root terpenoid profiles and plant responses to fertilisation in *Tanacetum vulgare*. *Phytochemistry* 96, 123–131.
- [10] S. Kleine, C. Müller (2014). Drought stress and leaf herbivory affect root terpenoid concentrations and growth of *Tanacetum vulgare*. *Journal of Chemical Ecology* 40, 1115–1125.
- [11] V. C. Wolf et al. (2011). High chemical diversity of a plant species is accompanied by increased chemical defence in invasive populations. *Biological Invasions* 13, 2091–2102.
- [12] S. Kleine, L. Weißinger, C. Müller (2017). Impact of drought on plant populations of native and invasive origins. *Oecologia* 183, 9–20.
- [13] J. M. Jeschke, T. Heger (2018). *Invasion Biology. Hypotheses and Evidence*. Wallingford, UK: CAB International.
- [14] L. J. Tewes et al. (2018). Intracontinental plant invader shows matching genetic and chemical profiles and might benefit from high defence variation within populations. *Journal of Ecology* 106, 714–726.

Verfasst von:



Caroline Müller hat an der Freien Universität Berlin Biologie studiert und auf dem Gebiet der chemischen Ökologie promoviert. Nach verschiedenen Postdoc-Positionen im Ausland, so am Boyce Thompson Institute in Ithaca, USA, und der Universität Leiden, Niederlande, war sie an der Universität Würzburg tätig, an der sie sich im Fach Ökologie habilitierte. Seit 2007 ist sie Professorin für Chemische Ökologie an der Universität Bielefeld. Sie ist in mehreren Gremien tätig und derzeit Sprecherin der Forschungsgruppe FOR 3000 zum Thema Chemodiversität bei Pflanzen.

Korrespondenz:

Prof. Dr. Caroline Müller
Universität Bielefeld
Chemische Ökologie/Biologie
Universitätsstr. 25
33615 Bielefeld
E-Mail: caroline.mueller@uni-bielefeld.de

Produktion, Nachhaltigkeit und Akzeptanz von kultiviertem Fleisch

Fleisch(r)evolution

FLORIAN FIEBELKORN | JACQUELINE DUPONT | LENA SZCZEPANSKI | NADINE FILKO



Utopie oder Realität? Verpackung eines Rindfleischburgers aus Zellkulturen. Abb. BOK+Gärtner und F. Fiebelkorn.

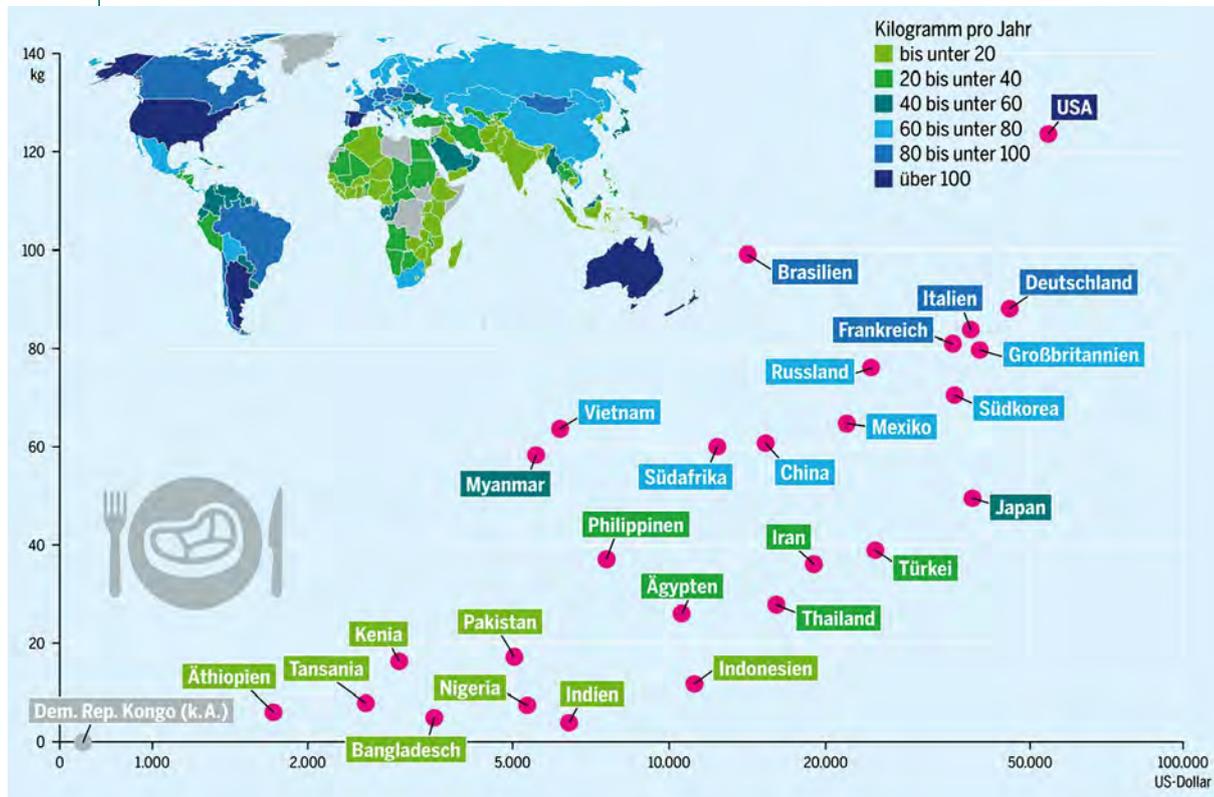
Die derzeitige Produktion und der hohe Konsum von Fleisch in Industriestaaten wie Deutschland tragen in erheblichem Maße zum Klimawandel und Biodiversitätsverlust bei. Ansätze, die negativen Auswirkungen durch neue Technologien zu überwinden, gibt es viele. Einer davon ist kultiviertes Fleisch. Viele Wissenschaftler, Lebensmittelproduzenten und Start-ups sehen in kultiviertem Fleisch eine nachhaltige und tierethisch vertretbare Alternative zu der konventionellen Produktionsweise von Fleisch. Doch warum ist das mithilfe von Zell- und Gewebekulturtechniken produzierte Fleisch, dessen Herstellung (fast) ganz ohne die Tötung von Tieren auskommt, dann noch nicht auf dem deutschen Markt verfügbar? Der Artikel geht dieser Frage anhand von

Einblicken in die Geschichte und aktuelle Produktionsverfahren von kultiviertem Fleisch und dessen Nachhaltigkeitspotenzial nach. Zusätzliche Erklärungsansätze werden auf Basis ernährungspsychologischer Forschungen zur Akzeptanz und der aktuellen rechtlichen Situation zur Zulassung von kultiviertem Fleisch gegeben.

Bis 2050 wird die Weltbevölkerung voraussichtlich auf 9,7 Milliarden Menschen ansteigen – insbesondere durch einen Bevölkerungszuwachs in den Schwellen- und Entwicklungsländern [1S]. Der Fleischverbrauch ist in den meisten Industrieländern seit Jahrzehnten auf einem konstant hohen Niveau [2S]. In Deutschland beispielsweise haben die Menschen im Jahr 2017 über 80 kg pro Kopf verbraucht (Abbildung 1). In den Vereinigten Staaten von Amerika wurde im selben Jahr sogar ein Spitzenwert von über 120 kg pro Kopf erreicht [2S]. Mit steigendem Wohlstand der Mittelschicht in den Schwellen- und Entwick-

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 259 erklärt.

ABB. 1 | PRO-KOPF-FLEISCHVERBRAUCH IM JAHR 2017



Abgebildet sind nur Länder mit über 50 Millionen Einwohnern nach Wirtschaftsleistung in US-Dollar und Fleischverbrauch in Kilogramm pro Jahr. Adaptiert aus [110S, S. 11]. Abb. Bartz/Stockmar (M), CC BY 4.0.

lungsländern ist davon auszugehen, dass auch hier die Nachfrage nach Fleischprodukten steigen wird [2S]. Laut Prognosen wird die weltweite Fleischnachfrage auf diese Weise bis 2050 um 70 Prozent ansteigen. Tritt dieses Szenario wirklich ein, werden die Ressourcen unseres Planeten nicht ausreichen, um die Weltbevölkerung mit ausreichend Fleisch zu versorgen [2S, 3].

Dabei ist die industrielle Nutztierhaltung neben dem Transport- und Energiesektor hauptverantwortlich für den Klimawandel und den Verlust von Biodiversität [4S–6S]. Die gesamte Wertschöpfungskette der Produktion von Fleisch – vom Futteranbau bis zum Vertrieb der Waren – verantwortet je nach Berechnungsgrundlage zwischen 18 und 50 Prozent der weltweiten CO₂-Emissionen [5S, 6S]. Zudem wirft die Haltung und Schlachtung von Nutztieren viele tierethische Fragen auf [7S, 8S].

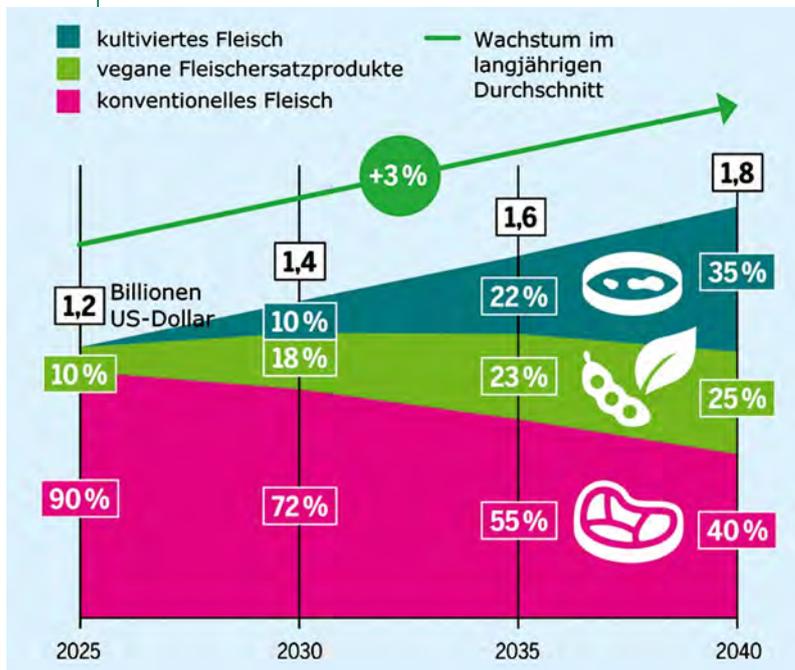
Bei dem reziproken Beziehungsgeflecht zwischen Fleischkonsum, tierischer und menschlicher Gesundheit sowie den daraus resultierenden Umweltbelastungen sprechen Tilman und Clark [9S] auch von einem „Ernährungs-Gesundheits-Umwelt-Trilemma“. Um dieses aufzulösen, ist laut dem Report der EAT-Lancet-Kommission über „Healthy Diets from Sustainable Food Systems“ neben einer Verbesserung der Produktionsbedingungen tierischer Nahrungsmittel eine grundlegende Veränderung unserer Ernährungsweise nötig [10S].

Neben den beiden Entwicklungen einer fortwährenden Intensivierung und Effizienzsteigerung von Produktionssystemen für tierische Nahrungsmittel und einer Reduzierung des Fleischkonsums wird in den letzten Jahren vermehrt das Potenzial nachhaltiger Fleischalternativen, wie beispielsweise von proteinreichen Pflanzen, Insekten und kultiviertem Fleisch, diskutiert [11S–13S]. Denn obwohl ein Großteil der Konsumenten noch nicht bereit ist, den Fleischkonsum zu verringern [14S], finden Fleischalterna-

IN KÜRZE

- Der globale Fleischkonsum soll laut Marktanalysen bis 2040 zu 35 Prozent mit **kultiviertem Fleisch** gedeckt werden.
- Im **Dezember 2020** wurde in Singapur als erstem und einzigem Land der Welt kultiviertes Hühnerfleisch **für den menschlichen Verzehr** zugelassen.
- Eine **Zulassung** von kultiviertem Fleisch als „Novel Food“ **in Europa steht bisher noch aus**.
- Die Produktion von kultiviertem Fleisch ist im Vergleich mit der konventionellen Produktion von Fleisch in einigen Punkten **nachhaltiger und aus tierethischer Sicht vertretbarer**.
- Eine **industrielle Produktion von kultiviertem Fleisch** zur Versorgung des Lebensmitteleinzelhandels und der Gastronomie ist aus technischen und rechtlichen Gründen **bisher (noch) nicht möglich**.
- Informationskampagnen sind notwendig, um kultiviertes Fleisch in der deutschen Bevölkerung bekannter zu machen und deren **Konsumbereitschaft zu steigern**.

ABB. 2 | PROGNOSE DER GLOBALEN MARKTANTEILE FÜR FLEISCH UND FLEISCHERSATZPRODUKTE



Angegeben sind die prognostizierten globalen Marktanteile für kultiviertes Fleisch, vegane Fleischersatzprodukte und konventionelles Fleisch in Billionen US-Dollar sowie prozentuale Anteile und durchschnittliches jährliches Wachstum bis zum Jahr 2040. Adaptiert aus [110S, S. 11]. Abb. Bartz/Stockmar (M), CC BY 4.0.

tiven gerade bei jüngeren Konsumenten Anklang. Insbesondere diese zeigen auch eine Tendenz zur Reduzierung ihres Fleischkonsums [15S]. In den kommenden Jahren wird auf dem Fleischersatzmarkt vor allem ein Boom in der Herstellung von pflanzenbasierten Fleischalternativen und kultiviertem Fleisch erwartet [16S]. So wird laut einer Marktanalyse der Unternehmensberatung A.T. Kearney der globale Fleischkonsum in 20 Jahren nur noch zu 40 Prozent mit Fleisch aus konventioneller Nutztierhaltung gedeckt [16S, Abbildung 2]. Insgesamt sollen 35 Prozent der ursprünglichen Marktanteile von konventionellem Fleisch bis 2040 von kultiviertem Fleisch übernommen werden, was einem Finanzvolumen von umgerechnet 0,63 Billionen US-Dollar entspricht – 10 Prozent mehr als für pflanzenbasierte Fleischalternativen prognostiziert werden (Abbildung 2).

Moderne Fleischalternative mit Geschichte

Im Dezember 2020 hat Singapur als erstes Land der Welt kultiviertes Fleisch in Form von kultiviertem Hühnerfleisch für den menschlichen Verzehr zugelassen [17]. Die Idee, Fleisch aus Zellkulturen herzustellen, ist allerdings schon fast 100 Jahre alt (Abbildung 3). Die Idee von kultiviertem Fleisch wurde wahrscheinlich erstmals 1897 in einem Science-Fiction-Roman mit dem Titel „Auf Zwei Planeten“ von Kurd Laßwitz aufgegriffen [17]. Auch der ehemalige britische Premierminister Winston Churchill hat

bereits 1931 darüber geschrieben, Fleisch aus Zellkulturen herzustellen: „Wir werden von dem Aberwitz abkommen, ein ganzes Huhn zu züchten, um die Brust oder den Flügel zu essen, und jene Teile getrennt in einem geeigneten Medium züchten“ [18S: S. 66]. Bei Winston Churchill ist davon auszugehen, dass er durch gemeinsame Gespräche mit seinem Bekannten Alexis Carrel zu diesem Gedanken angeregt wurde. Alexis Carrel war zu seiner Zeit Pionier und Experte auf dem Gebiet der Organtransplantation und entwickelte wegweisende Techniken zur Kultivierung von Zellen [19S, 20S].

In den frühen 1950er Jahren hatte der Niederländer Willem van Eelen die Idee, Gewebekulturen für die Herstellung von Fleischprodukten zu verwenden [21S]. Aus seinen Erfahrungen als Kriegsgefangener während des zweiten Weltkrieges wuchs van Eelens Interesse an Lebensmitteln und seine Intention, sich für mehr Tierwohl einzusetzen. Darauf folgend studierte er in den Niederlanden Psychologie und Medizin und wurde Zeuge medizinischer Experimente, die sein Interesse an kultiviertem Fleisch weckten [22S]. Anfang der 1960er Jahre gelang es, Zellen mithilfe von Gewebekulturtechniken bereits in einem größeren Maßstab zu züchten, als dies noch zur Zeit von Alexis Carrel möglich war [23S]. Im Jahr 1997 meldete van Eelen zusammen mit seinen beiden Kollegen Willem van Kooten und Wiete Westerhof das erste Patent zur industriellen Herstellung von kultiviertem Fleisch an, das ihnen 1999 erteilt wurde [24S].

Das erste *Proof-of-Concept* eines kultivierten Burger-Patties aus Rindfleisch wurde 2013 von Mark Post, einem niederländischen Forscher und Mitgründer des Unternehmens Mosa Meat, in einer Pressekonferenz geliefert [17, 25S]. Nachdem der Nachweis durch Post erbracht war, dass sich kultiviertes Rindfleisch für den menschlichen Verzehr herstellen lässt, begann die Start-up-Szene der Branche rasant zu wachsen. Im Jahr 2020 gab es bereits mehr als 50 Unternehmen, die sich auf die Herstellung von kultiviertem Fleisch aus Zellen vom Rind, Schwein, Huhn oder Fisch, aber auch auf Fette, Gelatine, ► Nährmedien und Trägermaterialien (engl. *scaffolds*) spezialisiert haben [26S]. Neben Großbritannien (9 Unternehmen) zählen vor allem Israel (10 Unternehmen) und die USA (24 Unternehmen) die meisten Start-ups mit einem Fokus auf kultiviertem Fleisch [26S, 27S].

In Deutschland gibt es derzeit vier Unternehmen, die sich auf die Produktion von kultiviertem Fleisch fokussiert haben. Dazu gehören Bluu Seafood, die zellbasierten Fisch herstellen, und Innocent Meat, die modulare Lösungen für den *Business-2-Business*-Markt zur Bereitstellung von Zelllinien, Nährmedien und Trägergerüsten sowie von Soft- und Hardware anbieten [27S]. Ob Deutschland im globalen Vergleich bezüglich der Produktion von kultiviertem Fleisch wirklich „auf ganzer Linie pennt“, wie es Richard David Precht einmal formuliert hat, bleibt abzuwarten [28S, Minute 08:14 im Vortrag]. Mittlerweile haben auch viele nationale und internationale Großkonzerne der Tech-

Das Original-Patent von Willem van Eelen mit dem Titel „Industrial scale production of meat from in vitro cell cultures“ können Sie unter <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=W01999031223> herunterladen.

Eine ausführliche Übersicht über die Geschichte von kultiviertem Fleisch finden Sie unter https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_cellular_agriculture.

Pharma- und Food-Branche wie Google, Merck, Nestlé oder Cargill in die Kulturfleisch-Szene investiert [29S]. Auch einige deutsche Fleischunternehmen haben bereits millienschwere Investments abgeschlossen. So hat beispielsweise die PHW-Gruppe als größter deutscher Geflügelzüchter und -verarbeiter bereits 2018 in das Start-up-Unternehmen SuperMeat aus Israel investiert, das sich auf die Produktion von kultiviertem Hühnerfleisch spezialisiert hat [30S].

Moderne Produktion von kultiviertem Fleisch

Zur Produktion von kultiviertem Fleisch werden Technologien der Zell- und Gewebekultur genutzt, die ursprünglich vor allem für medizinische Zwecke entwickelt wurden [31]. Diese Form der Fleischproduktion ist Teil eines innovativen Zweigs der Nahrungsmittelindustrie, der auch als „Zelluläre Landwirtschaft“ bezeichnet wird. Erklärtes Ziel von Stakeholdern der Zellulären Landwirtschaft ist es, mithilfe von zellbasierten, biotechnologischen Herstellungsverfahren traditionelle tierische Produkte wie Fleisch, Milch, Fisch, Meeresfrüchte und Leder zu substituieren [3]. Fleisch von Rindern, Schweinen, Hühnern, aber auch von Schafen, Truthähnen und Fischen konnte bereits im Labormaßstab *in vitro* (in vitro = lat. im Glas) produziert werden [32]. Auch wenn sich die Herstellungsverfahren für die verschiedenen Fleischsorten leicht voneinander unterscheiden, ist das Grundprinzip bei allen sehr ähnlich [31]. Die vier wichtigsten Schritte bei der Herstellung von kultiviertem Fleisch sind: (1) Zellentnahme, (2) Zellvermehrung (Zellproliferation), (3) Muskelentstehung (Zelldifferenzierung), (4) Weiterverarbeitung (Abbildung 4). Die wichtigsten „Zutaten“ zur Herstellung von kultiviertem Fleisch sind ► Stammzellen, Nährmedien, Trägermaterialien und ► Bioreaktoren. Im Folgenden wird sich – wenn nicht anders erwähnt – auf die Produktion von kultiviertem Rindfleisch bezogen.

Starterzellen – Zelltypen, Gewinnung, Proliferation und Differenzierung

Fleisch ist ein komplexes Gewebe, welches neben verschiedenen Gefäßen zur Nährstoffversorgung je nach Fleischart bis zu 90 Prozent Muskelfasern und 10 Prozent Fett- und Bindegewebe aufweist [33]. Um es wachsen zu lassen, braucht es in einem ersten Schritt eine Zelle des Muskel- oder Fettgewebes – die Starterzelle [3]. Dabei können als Starterkultur sowohl homogene Proben, die beispielsweise ausschließlich Muskelzellen enthalten, als auch heterogene Proben, die mehrere Zelltypen enthalten, verwendet werden. Im Folgenden fokussieren wir uns auf die Selektion homogener Proben und die Produktion von Muskelzellen, da diese den größten Anteil des Fleisches ausmachen, und gehen nur am Rande auf die Produktion von Fettgewebe ein. Die Prozesse zur Produktion beider Gewebe-



ABB. 3 Wichtige Persönlichkeiten in der Geschichte von kultiviertem Fleisch: a) Winston Churchill (*1874–†1965), b) Alexis Carell (*1873–†1944), c) Willem van Eelen (*1923–†2015), d) Mark Post (*1957). Fotos: a) Yousuf Karsh, CC BY 2.0; b) Library of Congress, Prints & Photographs Division; c) One Idea at a Time – Judith Warringa Fotografie; d) Mosa Meat.

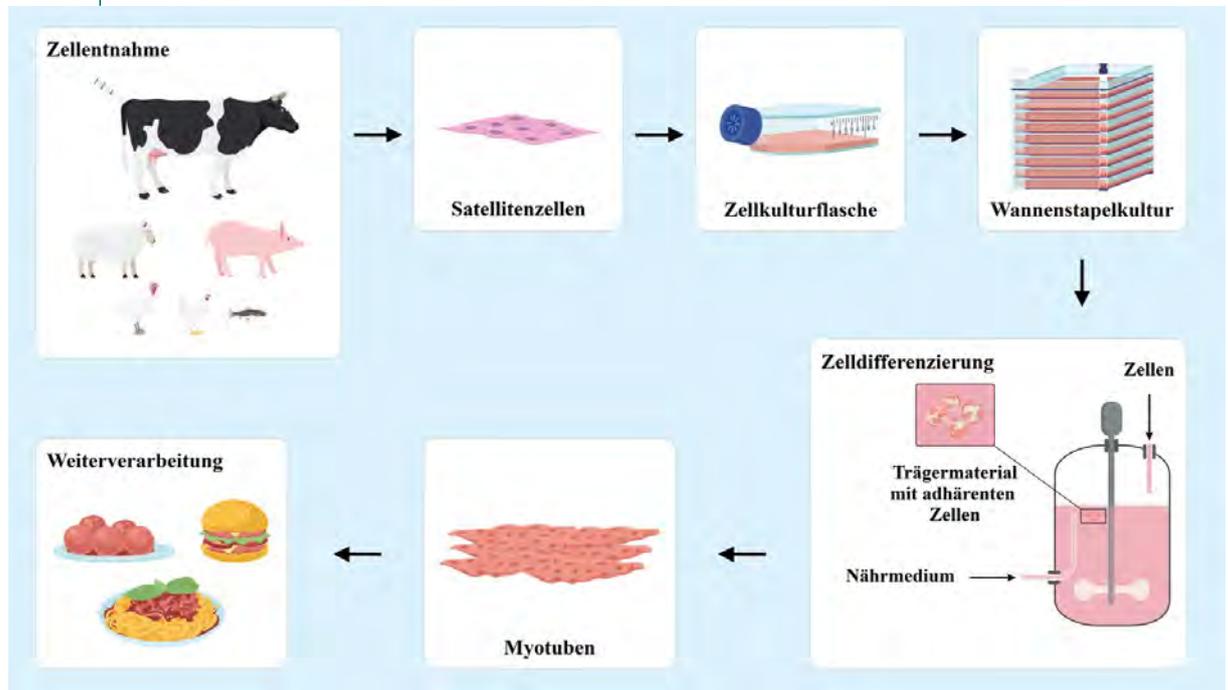
typen sind allerdings in ihren Grundsätzen relativ ähnlich, wenn auch nicht 1:1 übertragbar [34].

Wie lassen sich die entsprechenden Starterzellen gewinnen? Die gängigste Methode stellt die Entnahme von Muskelgewebe durch eine Biopsie dar – alternativ kann aber auch postmortales Muskelgewebe der entsprechenden Tierart verwendet werden [31]. Aus der Gewebeprobe werden ► adulte Stammzellen isoliert, die als Starterzellen dienen. Eine 0,5-Gramm-Biopsie ergibt eine Ausbeute von circa 10.000 adulten Stammzellen. Zur effektiven Skalierung der Produktion von kultiviertem Fleisch müssen sich diese Zellen mindestens 30- bis 40-mal verdoppeln [3].

Neben adulten Stammzellen können auch pluripotente Zellen, wie zum Beispiel ► embryonale (engl. *embryonic stem cells*; ESC) ► oder induzierte pluripotente Stammzellen (engl. *induced pluripotent stem cells*, iPSCs) als Starterzellen verwendet werden [34; Kasten „Die wichtigsten Zelltypen zur Herstellung von kultiviertem Fleisch“]. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Zelltypen, die für die Produktion von kultiviertem Fleisch als Starterzellen verwendet werden. Jeder Zelltyp bietet bezüglich seiner Gewinnungsmethode, Proliferationskapazität und seinen Differenzierungsmöglichkeiten spezifische Vor- und Nachteile für die Produktion von kultiviertem Fleisch (Tabelle 1).

Wie könnte ein Restaurant für kultiviertes Fleisch aussehen? Werfen Sie unter <https://www.youtube.com/watch?v=baF22S1Yg2c> einen Blick in das Restaurant und die Produktionsanlage von SuperMeat in Tel Aviv, Israel.

ABB. 4 | HERSTELLUNG VON KULTIVIERTEM FLEISCH AUS ADULTEN STAMMZELLEN



Schematisch dargestellt wird die Herstellung von kultiviertem Fleisch aus adulten Stammzellen. Adaptiert aus [111S, S. 2].

Satellitenzellen sind die am leichtesten zugänglichen myogenen Vorläuferzellen im Skelettmuskelgewebe (Kasten „Die wichtigsten Zelltypen zur Herstellung von kultiviertem Fleisch“). Die Nachkommen von Satellitenzellen, die sogenannten Myoblasten, vermehren sich schnell und verlassen den Zellzyklus als spindelförmige Myozyten, die in ihrer weiteren Entwicklung zu Myofasern verschmelzen [3, 40S]. Ein Vorteil der Nutzung von Satellitenzellen ist, dass sie ihre Tendenz, sich zu Skelettmuskelfasern zu entwickeln, von ihrem Ursprungsgewebe erben und nicht (um)programmiert werden müssen [41S]. Ein Nachteil ist, dass Myoblasten nur eine begrenzte Anzahl von Zellteilungen durchlaufen und allmählich ihre Differenzierungsfähigkeit verlieren [3]. Protokolle und Techniken für die Kultivierung von Satellitenzellen müssen daher noch erheblich optimiert werden, um ihre Proliferationskapazität zu erhöhen, damit sie letztendlich für die industrielle Herstellung von kultiviertem Fleisch geeignet sind [31].

Auch wenn die Differenzierung von embryonalen Stammzellen zu Muskelzellen weniger effektiv verläuft als bei Satellitenzellen [42], eignen sich diese unter anderem aufgrund ihrer unbegrenzten Proliferationskapazität zur Produktion von kultiviertem Fleisch [32]. Ein weiterer Zelltyp, der genutzt werden kann, sind induzierte pluripotente Stammzellen [32; Kasten „Die wichtigsten Zelltypen zur Herstellung von kultiviertem Fleisch“]. Analog zu den embryonalen Stammzellen und gegensätzlich zu den Satellitenzellen weisen die induzierten pluripotenten Stammzellen eine unbegrenzte Proliferationskapazität auf, da eine frühe Festlegung auf bestimmte Gewebelinien gehemmt ist [3]. Während gegenwärtig induzierte pluripotente

Stammzellen insbesondere für Forschungszwecke und medizinische Anwendungen erzeugt und verwendet werden, ist ihre Erzeugung in einem Umfang, der für die Produktion von kultiviertem Fleisch benötigt wird, derzeit nicht möglich [34]. Außerdem müssten die rechtlichen Aspekte von gentechnischer Veränderung im Lebensmittelbereich berücksichtigt werden.

Zellvermehrung und -differenzierung – Nährmedien, Trägermaterialien und Bioreaktoren

Sind die Zellen erst einmal gewonnen, wird zur Vermehrung ein Medium benötigt, das die notwendigen Nährstoffe wie anorganische Salze, Aminosäuren, Kohlenhydrate, Vitamine, Proteine, Lipide und Fettsäuren enthält [43, 44]. Aktuell wird oftmals ► fetales Kälberserum als Zusatz im ► Nährmedium verwendet, welches nach der Schlachtung eines trächtigen Tiers aus dem Blut des Rinderfötus zwischen dem 3. und 7. Trächtigkeitsmonat gewonnen wird [45]. Dazu wird dem Fötus mit einer Spritze das Blut aus dem schlagenden Herzen entnommen, wodurch der Fötus stirbt. Weltweit werden jährlich etwa 800.000 Liter fetales Kälberserum für Forschung, Biotechnologie und pharmazeutische Zwecke produziert, was einer Menge von ungefähr zwei Millionen Rinderföten entspricht [46S]. Neben den ethischen Bedenken in Bezug auf den Stress und die Schmerzen des Fötus können tierische Seren je nach Qualität Endotoxine enthalten oder viral kontaminiert sein, was zu erheblichen Sicherheitsbedenken führt [45]. Fetales Kälberserum enthält unter anderem Wachstumsfaktoren, Cytokine und Hormone, die das Wachstum der Zellen op-

TAB. 1 ZELLTYPEN ZUR HERSTELLUNG VON KULTIVIERTEM FLEISCH UND IHRE EIGENSCHAFTEN

| Zelltypen | relevante Zellen | Lokalisierung (in vivo) | Gewinnungsmethode | Proliferationskapazität | Differenzierungsmöglichkeiten | Isolierungsmöglichkeiten |
|--------------------------|-------------------------------------|---|---|-------------------------|--|--|
| adulte Stammzellen | Satellitenzellen | unterhalb der Basalmembran der Myozyten | Muskelbiopsie | limitiert | Myozyten | Rinder, Schweine, Schafe, Hühner, Fische |
| | fibro-adipogene Vorläuferzellen | interstitieller Raum der Skelettmuskeln | Muskelbiopsie | limitiert | Adipozyten Fibroblasten | Rinder, Schweine |
| | mesenchymale Stammzellen | zahlreiche Orte, z. B. Knochenmark, Nabelschnur, Skelettmuskeln, Fettgewebe | Gewebebiopsie | limitiert | Adipozyten Chondrozyten Fibroblasten Myozyten Osteozyten | Rinder, Schweine, Schafe, Hühner |
| pluripotente Stammzellen | embryonale Stammzellen | innere Zellmasse der Blastocyste | Isolation aus der inneren Zellmasse | unbegrenzt | beliebig | Rinder, Schweine, Schafe, Hühner, Fische |
| | induzierte pluripotente Stammzellen | somatisches Gewebe (Gewinnung der Ausgangszellen) | Reprogrammierung somatischer Zellen durch z. B. Überexpression von pluripotenten Transkriptionsfaktoren | unbegrenzt | beliebig | Rinder, Schweine, Schafe, Hühner |

Adaptiert aus [34, S. 4]

timal fördern [45]. Insgesamt enthält fetales Kälberserum zwischen 200–400 verschiedene Proteine und tausende molekulare Stoffwechselprodukte in undefinierten Konzentrationen, so dass ein vollständiger Ersatz durch chemisch definierte Komponenten nur mit hohem Kostenaufwand erreicht werden kann. Neben den materiellen Kosten für die Komponenten von Nährmedien – insbesondere die Kosten für Wachstumsfaktoren – sind personelle Ressourcen für ihre Entwicklung und technische Optimierung für die Herstellung von kultiviertem Fleisch notwendig [47S]. Die Ausgaben für Nährmedien und deren technische Optimierung haben sich daher als einer der Hauptkostentreiber bei der Skalierung der Stammzellproduktion erwiesen [48S]. Hinzu kommt, dass Zellen in der Proliferationsphase ein anderes Nährmedium als in der Differenzierungsphase benötigen, da die Stoffwechselaktivität von der Energie- und Nährstoffnutzung zur hochspezialisierten Proteinproduktion übergeht [3]. Es gibt bereits erste tierfreie Serumalternativen, die erfolgreich zur Proliferation tierischer Stammzellen eingesetzt wurden [44, 49S]. Um kultiviertes Fleisch zukünftig ohne den Zusatz von tierischem Serum im Nährmedium kultivieren zu können, wird an der Entwicklung geeigneter Nährmedien auf der Grundlage von Bakterien, Hefen, Pilzen oder Mikroalgen geforscht [46S]. Das Unternehmen Mosa Meat vermeldet auf seiner Webseite, ein ► serumfreies Nährmedium zur Differenzierung entwickelt zu haben, welches für die Herstellung von kultiviertem Rindfleisch geeignet ist [50S, 51].

Zusätzlich zum Nährmedium brauchen die Zellen zur Vermehrung und Differenzierung einen festen Untergrund [35], weshalb sogenannte Träger- oder Gerüststrukturen benötigt werden [42, 52S, 53S]. Idealerweise sollte das Gerüst eine möglichst große Oberfläche bieten, wodurch die Diffusionsrate maximiert werden kann. Weiterhin sollte das verwendete Gerüst Bewegungsfreiheit für die Zellen bie-

ten, da so deren Wachstum und Differenzierung unterstützt werden kann [35]. Trägergerüste gibt es in unterschiedlichen Formen und Materialien. Je nach Einsatzgebiet kommen zum Beispiel ► *Microcarrier*-Perlen [44], Maschennetze [24S], Hydrogele [33], große elastische Platten oder dünne Filamente zum Einsatz [35]. Trägergerüste tierischer Herkunft, wie zum Beispiel Kollagen, werden für die Produktion von kultiviertem Fleisch mittlerweile eher vermieden, da für ihre Herstellung immer noch eine beträchtliche Anzahl von Nutztieren erforderlich wäre. Vielversprechendere essbare Materialien aus nicht-tierischen Quellen, die aktuell zum Einsatz kommen, sind Stärke, Chitin/Chitosan, Alginate, Agarose und Hyaluronsäure [3, 33, 54S]. Wenn das verwendete Gerüst nicht essbar ist, muss es vor der weiteren Verarbeitung von den Muskelfasern getrennt werden [44]. Dabei können mechanisch oder enzymatisch induzierte Trennungsvorgänge verwendet werden [35, 55S], was neben einem immensen Mehraufwand auch Kosten verursacht.

Die Vermehrung und Differenzierung der Zellen findet in Bioreaktoren statt. Die Zellvermehrung beginnt meist in kleinen Kultursystemen wie beispielsweise in einfachen Zellkulturflaschen. Danach folgt eine schrittweise, volumetrische Expansion des Kultursystems und eine sich daran anschließende Zelldifferenzierung sowie Produktreifung in großen Bioreaktoren mit Volumen von bis zu mehreren 100 Litern [56S, 57S]. In Bioreaktoren können alle Umweltbedingungen wie beispielsweise die Temperatur und der pH-Wert exakt kontrolliert und konstant gehalten werden, so dass optimale Bedingungen für die Vermehrung und Differenzierung der Zellen vorliegen. Außerdem kann durch einen Bioreaktor eine ausreichende Versorgung mit Sauerstoff und Nährstoffen garantiert werden.

Für die Produktion von kultiviertem Fleisch können viele verschiedene Typen von Bioreaktoren verwendet

DIE WICHTIGSTEN ZELLTYPEN ZUR HERSTELLUNG VON KULTIVIERTEM FLEISCH

Adulte Stammzellen (Satellitenzellen):

In den meisten Fällen werden für die Produktion von kultiviertem Fleisch adulte Stammzellen genutzt, die im Falle von Muskelgewebe auch als Satellitenzellen bezeichnet werden. Diese sind beispielsweise für die Regeneration der Muskulatur nach einer Verletzung verantwortlich [35, 36S]. Satellitenzellen differenzieren sich mit hoher Effizienz zu Muskelzellen (Myozyten), sind jedoch in geringer Anzahl im Gewebe vorhanden und besitzen eine relativ limitierte Proliferationskapazität [37S].

Embryonale Stammzellen:

Embryonale Stammzellen (engl. embryonic stem cells; ESC) können sich in jedes beliebige Gewebe differenzieren und werden deshalb auch als pluripotente Stammzellen bezeichnet [38S]. In ihrer Entwicklung verlieren sie allerdings ihre Pluripotenz. So können sich ► mesenchymale Stammzellen (engl. mesenchymal stem cells; MSCs) beispielsweise nur noch in Knochenzellen (Osteozyten), Knorpelzellen (Chondrozyten), Muskelzellen (Myozyten) und Fettzellen (Adipozyten) differenzieren.

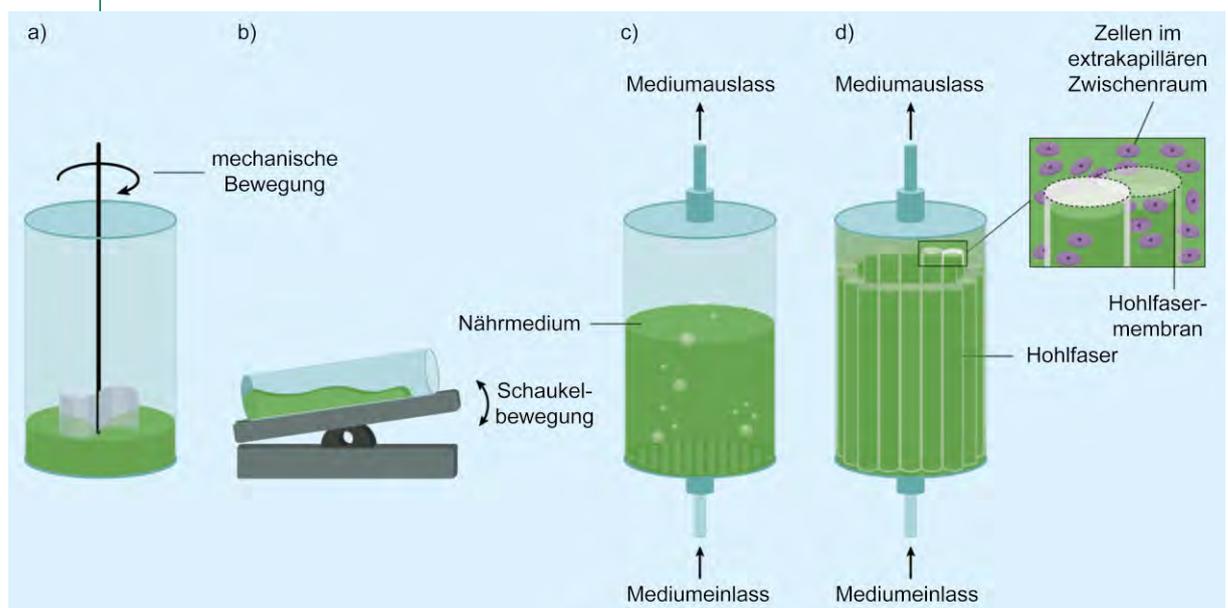
Induzierte pluripotente Stammzellen:

Induzierte pluripotente Stammzellen (engl. induced pluripotent stem cells, iPSCs) werden durch Reprogrammierung von nicht-pluripotenten somatischen Zellen gewonnen. Zur Reprogrammierung werden die nicht-pluripotenten somatischen Zellen gentechnisch verändert, indem über Transfektion/Transduktion stammzellspezifische Transkriptionsfaktoren in die Zellen eingeschleust werden [34]. Die Reprogrammierung erfolgt über die gezielte Expression einer Kombination unterschiedlicher Transkriptionsfaktoren [39S].

werden [58, Abbildung 5]. Bei der großindustriellen Produktion von kultiviertem Fleisch werden zukünftig hauptsächlich Rührkesselbioreaktoren mit mechanischen, hydraulischen oder pneumatischen Rührwerken zum Einsatz kommen [3]. Wellenbioreaktoren, Fließbettbioreaktoren und Hohlfaserbioreaktoren könnten ebenfalls für die Herstellung von kultiviertem Fleisch verwendet werden, sind aber je nach Zelltyp und Trägermaterial aufwändiger in der Handhabung [58]. Die Wahl des Reaktortypen und der Reaktorgröße hängt neben den verwendeten Zelltypen und Trägermaterialien auch von weiteren Aspekten im Produktionsprozess ab. Ausgehend vom definierten Endprodukt muss eine passende, kontrollierte Umgebung zur Proliferation der Stammzellen im Bioreaktor gegeben sein. Die Expansion der Zellproliferation in großem Maßstab in Bioreaktoren stellt gleichzeitig eine große Herausforderung für die industrielle Produktion von kultiviertem Fleisch dar [58].

Werden beispielsweise *Microcarrier*-Perlen als Trägermaterial verwendet, werden die Starterzellen vorab an die Perlen gebunden und mit dem Nährmedium in einen Bioreaktor mit mechanischem Rührsystem gegeben, so dass sie sich maximal vermehren [45]. Entscheidet man sich zur Verwendung eines Hohlfaserbioreaktors, dienen die Hohlfasern als Trägermaterial. Die Starterzellen müssen bei diesem Vorgehen vor der Zugabe in den Bioreaktor nicht an das Trägermaterial gebunden werden [45]. Sobald die Kultur mit den Starterzellen in einen Hohlfaserreaktor überführt wird, lagern sich die Starterzellen zu Beginn der Proliferation selbstständig an den Hohlfasern an. In der anschließenden Differenzierungsphase verschmelzen mehrere Satellitenzellen zu Myotuben [31], die sich dann

ABB. 5 | KULTURSYSTEME ZUR VERMEHRUNG UND DIFFERENZIERUNG GROSSER ZELLMENGEN



Dargestellt sind Kultursysteme zur Vermehrung und Differenzierung großer Zellmengen in einem Rührkesselreaktor (a), Wellenbioreaktor (b), Fließbettbioreaktor (c) und Hohlfaserbioreaktor (d). Adaptiert aus [3, S. 406].

TAB. 2 POTENZIALE UND HERAUSFORDERUNGEN IM PRODUKTIONSPROZESS VON KULTIVIERTEM FLEISCH

| Komponente der Produktion | Potenziale | Herausforderungen |
|---------------------------|---|---|
| Zelltypen | + adulte und pluripotente Stammzellen als Quelle verwendbar + Isolierungs- und Sortierungsprotokolle zur Gewinnung von Stammzellen landwirtschaftlich relevanter Tierarten bereits vorhanden | – Kosten und Leichtigkeit der Gewinnung eines Zelltyps stehen im umgekehrten Verhältnis zur Proliferationsfähigkeit – geringe Ausbeute bei der Reprogrammierung von iPSCs inklusive phänotypischen Nebenwirkungen (Endprodukt entspricht nicht der antizipierten Reprogrammierung) |
| Kulturmedien | + hochentwickelte Medien zur Expansion und Differenzierung relevanter Zelltypen bereits verfügbar + mehrere serumfreie Kulturmedien bereits entwickelt | – Wirksamkeit serumfreier Kulturmedien noch gering – Wachstumsfaktoren für Medien sehr kostspielig |
| Bioreaktoren | + Möglichkeit zur dynamischen Kultivierung von Zellen + Verbesserung der Zellkultivierung und -differenzierung + Möglichkeit der Kultivierung deutlich höherer Zellmengen | – potenzielle Schädigung der Zellen durch die dynamische Kultivierung – relativ hoher Energieverbrauch – Anpassung von Prozessparametern durch Hochskalierung notwendig |
| Trägermaterial | + große Diversität an Biomaterialien für Trägergerüste + Verteilung und Lokalisation der Zellen kann bestimmt werden + <i>Microcarrier</i> -Perlen können zur Verbesserung des Geschmacks und der Textur des Endproduktes beitragen | – Auswahl der Biomaterialien für das Trägergerüst begrenzt durch die Anforderungen an Biokompatibilität, Essbarkeit und Weiterverarbeitung – Einschränkungen in der Nährstoff- und Sauerstoffdiffusion bei größeren 3D-Gerüststrukturen |

Adaptiert aus [34, S. 5]

zu Muskelfasern entwickeln [42]. Die Muskelfasern fangen an zu wachsen und können schließlich zu einem Endprodukt weiterverarbeitet werden [42].

Andere Gewebetypen wie Fettgewebe können unabhängig vom Muskel kultiviert und während der Verarbeitung des Muskelgewebes zum Endprodukt mit diesem kombiniert werden [31]. Mit dem hier vorgestellten Produktionsverfahren ist es daher nur möglich, verarbeitete Produkte wie Burger-Patties oder Würstchen herzustellen [44]. Bei der Produktion von kultiviertem Fleisch können nicht nur Trägergerüste zur Zellkultivierung in Bioreaktoren verwendet werden, sondern auch trägerfreie Suspensionen [59]. Ein Zellwachstum in einer trägerfreien Suspension erfordert einen Wechsel des Nährmediums im Bioreaktor und/oder eine Modifizierung der Zellen [3]. Durch die Verwendung von Zellsuspensionen können höhere Zelldichten erreicht und technisch einfacher entnommen werden. Allerdings ist das Zellwachstum bei dieser Methode schwer zu kontrollieren, wodurch die Zellausbeute relativ ungenau vorhersehbar ist [3, 59].

Die Produktionsverfahren entwickeln sich aber stetig weiter: So konnte 2021 erstmals steakähnliches Gewebe bestehend aus Skelettmuskeln, Fett- und Blutkapillarfasern mithilfe einer Ko-Kultivierung von Satellitenzellen und Stammzellen aus Rinderfett sowie durch ► Bioprinting hergestellt werden [60]. Damit das Endprodukt qualitativ mit den sensorischen Eigenschaften von Fleisch in Farbe, Geschmack und Textur möglichst übereinstimmt, muss die biochemische und strukturelle Zusammensetzung des gezüchteten Gewebes ähnlich der des natürlichen Produktes sein [61].

Wie die eben beschriebene Herstellung von kultiviertem Fleisch verdeutlicht, befindet sich das Verfahren in einem Entwicklungsprozess. Es müssen noch einige Herausforderungen zur Skalierung überwunden werden, da

mit kultiviertes Fleisch zu einem konkurrenzfähigen Preis in Restaurants und Supermärkten angeboten werden kann [42]. Für Unternehmen in Deutschland besteht die Möglichkeit einer finanziellen Förderung bei der Entwicklung und Optimierung von Verfahren sowie Technologien zur Herstellung von kultiviertem Fleisch (oder anderen alternativen Proteinquellen) durch spezifische Förderprogramme, unter anderem vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft [62S]. Eine Übersicht der Potenziale und Herausforderungen im Produktionsprozess von kultiviertem Fleisch, an denen derzeit noch intensiv geforscht wird [3, 34], gibt Tabelle 2.

Wie nachhaltig ist die Produktion von kultiviertem Fleisch?

Inwieweit die Produktion von kultiviertem Fleisch nachhaltiger als die von konventionellem Fleisch ist, wird derzeit kontrovers diskutiert [61, 63S, 64]. Je nach Herstellungsmethode und Fleischsorte können Angaben zu ausgewählten Nachhaltigkeitsindikatoren stark schwanken. Zudem gibt es viele verschiedene Indikatoren für die Bewertung der Nachhaltigkeit eines Nahrungsmittels. Im Folgenden werden der Flächenverbrauch, Wasserverbrauch, Energieverbrauch und das Treibhauspotenzial genauer betrachtet. Wenn nicht anders angegeben, wird sich auf die derzeit aktuelle und umfassendste ► Lebenszyklusanalyse (engl. *life cycle assessment*, LCA) von Sinke und Oedegard [65] bezogen (Tabelle 3).

Während für die Produktion von kultiviertem Fleisch deutlich weniger Fläche benötigt wird als für die Produktion von Rind-, Schweine- oder Hühnerfleisch [64–67S, Tabelle 3], verhält es sich beim Indikator Wasserverbrauch mit dem Nachhaltigkeitspotenzial nicht eindeutig. Die neusten LCA's zeigen, dass der Wasserverbrauch bei der Herstellung von kultiviertem Fleisch ähnlich dem bei der

Die ausführliche LCA-Analyse zum Nachhaltigkeitspotenzial von kultiviertem Fleisch können Sie unter <https://cedelft.eu/publications/rapport-lca-of-cultivated-meat-future-projections-for-different-scenarios/> einsehen.

TAB. 3 VERGLEICH AUSGEWÄHLTER NACHHALTIGKEITSINDIKATOREN FÜR DIE PRODUKTION VON RIND-, SCHWEINE-, HÜHNER- UND KULTIVIERTEM FLEISCH

| | Kultiviertes Fleisch | Rindfleisch | Schweinefleisch | Hühnerfleisch |
|--|-----------------------------|-------------|-----------------|---------------|
| Flächenverbrauch ¹ [m ² pro kg essbare Tiermasse] | 1,8 (konv.) 1,7 (nach.) | 31,6 | 6 | 4,6 |
| Wasserverbrauch ¹ [Liter pro kg essbare Tiermasse] | 42 (konv.) 56 (nach.) | 258 | 40 | 46 |
| Energieverbrauch ² [MJ pro kg essbare Tiermasse] | 106 | 85,6 | 17,8 | 26,6 |
| Treibhauspotential ¹ [kg CO ₂ -Äquivalent pro kg essbare Tiermasse] | 13,6 (konv.) 2,5 (nach.) | 100 | 14 | 11 |

¹ Daten adaptiert aus [65, S. 23, 27–29]. Für Rind-, Schweine- und Hühnerfleisch sind derzeitige globale Durchschnittswerte angegeben.

² Daten adaptiert aus [64, S. 34]. Für Rind-, Schweine- und Hühnerfleisch sind Durchschnittswerte für die USA angegeben.

Die Daten für das kultivierte Fleisch beziehen sich aufgrund der begrenzten Datenmenge nicht spezifisch auf eine Art kultiviertes Fleisch wie beispielsweise kultiviertes Rindfleisch. Alle Angaben für Rind-, Schweine- und Hühnerfleisch beziehen sich auf die Verwendung konventioneller Energiequellen. Bei kultiviertem Fleisch wird bei den Angaben zwischen der Verwendung konventioneller (konv.) und nachhaltiger Energiequellen (nach.) unterschieden. Je nach Haltungs- und Zuchtform der Tiere beziehungsweise der Herstellung des kultivierten Fleisches können die Werte schwanken.

Produktion von Schweine- und Hühnerfleisch ist. Verglichen mit der Produktion von Rindfleisch hingegen ist der Wasserverbrauch für kultiviertes Fleisch deutlich geringer [67S, Tabelle 3]. Anders ist es bei der Betrachtung des Energieverbrauchs. Die bei kultiviertem Fleisch verwendeten Bioreaktoren benötigen sehr viel Energie, mehr als zur Produktion aller zuvor genannten Fleischsorten [64, 67, Tabelle 3]. Und wie verhält es sich dann mit dem Treibhauspotential? Nach Tuomisto und Teixeira de Mattos [66S] sowie Tuomisto et al. [67] werden bei der Produktion von kultiviertem Fleisch weniger CO₂-Äquivalente freigesetzt, so dass es ein geringeres Treibhauspotential als konventionelle Fleischprodukte aufweist. Im Gegensatz zu den eben genannten Studien betrachtet Mattick [64] das Treibhauspotential der Produktion von kultiviertem Fleisch kritischer. Zwar soll es verglichen mit Rindfleisch ein geringeres Treibhauspotential haben, bei Schweine- und Hühnerfleisch hingegen soll der hohe Energieverbrauch letztlich zu einem ähnlichen Treibhauspotential führen. Sinke und Oedegrad [65] bestätigen mit ihren neuesten Analysen die Annahmen von Mattick [64] und betonen, dass die Verwendung nachhaltiger Energiequellen der Schlüssel zur Senkung des Treibhauspotentials von kultiviertem Fleisch ist.

Wie gesund ist kultiviertes Fleisch?

Neben den oben untersuchten Indikatoren spielen weitere Faktoren bei der Betrachtung der Nachhaltigkeit von kultiviertem Fleisch eine große Rolle. Dazu zählt beispielsweise die Verwendung von Antibiotika. Weltweit werden diese in der industriellen Tierhaltung vermehrt routinemäßig zur Wachstumsförderung und Krankheitsvorbeugung eingesetzt, obgleich in Deutschland der medizinisch begründete Einsatz von Antibiotika bei der intensiven Nutztierhaltung von jedem Tierhalter gemeldet werden muss [68S–71S]. Durch einen vermehrten Antibiotikaeinsatz steigt auch die Wahrscheinlichkeit der Bildung von Antibiotikaresistenzen bei Bakterien. Diese können bei-

spielsweise über Kontakt mit dem Tier oder über kontaminiertes Fleisch auf den Menschen übertragen werden [71S, 72S]. Bei der Produktion von kultiviertem Fleisch werden laut Aussagen der meisten Produzenten keine Antibiotika eingesetzt, da dieses in sterilen Nährmedien kultiviert wird. Dadurch wird die Gefahr der Bildung von Antibiotikaresistenzen beim Menschen als ernsthafte Bedrohung der öffentlichen Gesundheit minimiert [73S, 74S].

Zur Nährstoffzusammensetzung von kultiviertem Fleisch liegen derzeit noch keine Analysen vor. Da man diese aber über die Auswahl und Zusammensetzung des Nährmediums gut kontrollieren kann, geht man davon aus, dass die potenzielle Nährstoffzusammensetzung vom im Handel erhältlichen kultiviertem Fleisch der von konventionellem Filetfleisch (ohne Binde- und Fettgewebe) ähneln wird [61]. Bezogen auf die Nährstoffzusammensetzung könnte kultiviertes Fleisch als ein funktionales Lebensmittel zur Förderung der menschlichen Gesundheit genutzt werden, indem das Fleisch gezielt mit Nährstoffen wie Omega 3-Fettsäuren, Vitamin B12 oder Vitamin D angereichert wird [75S, 76S].

Bioethische Argumente pro und contra kultiviertes Fleisch

Nach Beck [77] nutzen Befürworter von kultiviertem Fleisch im Allgemeinen drei Argumente, um dessen Vorteile darzustellen: (1) die Steigerung menschlicher Gesundheit und Nahrungssicherheit, (2) die höhere Nachhaltigkeit und bessere Ökobilanz im Vergleich mit der konventionellen Fleischproduktion und (3) die Reduktion von Tierleid. Die ersten beiden Argumente wurden soeben schon ausführlich dargelegt, so dass im Folgenden auf das dritte Argument fokussiert wird.

Die Produktion von kultiviertem Fleisch bietet eine große Chance, das Tierleid als Folge der aktuellen Produktionsbedingungen von konventionellem Fleisch zu reduzieren [77], weil eine geringere Anzahl von Nutztieren unter artgerechten Haltungsbedingungen lediglich als

FLEISCH ODER NICHT FLEISCH? DAS IST HIER DIE FRAGE!

Nach den Leitsätzen des Deutschen Lebensmittelhandbuchs für Fleisch und Fleischerzeugnisse wird Fleisch definiert als „[...] Teile von geschlachteten oder erlegten warmblütigen Tieren, die zum Genuss für Menschen bestimmt sind“ [85S, S. 1]. Im engeren Sinne werden unter Fleisch lediglich die Skelettmuskeln von Säugetieren und Vögeln verstanden, die für den menschlichen Verzehr geeignet gelten, mitsamt dem darin eingebetteten oder damit verbundenen Fett- und Bindegewebe sowie den Gefäßen zur Nährstoffversorgung. Nach der Verordnung für die Erzeugung und Überwachung von Lebensmitteln tierischen Ursprungs (Verordnung (EG) Nr. 853/2004) bezeichnet der Ausdruck „Fleisch“ alle genießbaren Teile, einschließlich Blut, von Huftieren, Geflügel, Hasentieren, freilebendem Wild, Farm-, Klein- und Großwild [86S]. Da kultiviertes Fleisch nur teilweise unter diese Definitionen von „Fleisch“ fällt, stellt sich die Frage, ob Fleisch, welches mit Methoden der Zellulären Landwirtschaft hergestellt wurde, überhaupt als solches bezeichnet werden darf [87S].

Der europäische Agrarausschuss hat sich im April 2019 unter dem alten EU-Parlament dagegen ausgesprochen, dass In-vitro-Produkte als „Fleisch“ bezeichnet und konventionelle Begriffe von Fleischprodukten wie Wurst zur Beschreibung dieser verwendet werden dürfen [87S]. In den USA hat die National Cattlemen's Beef Association bereits einen Antrag an das Landwirtschaftsministerium gestellt, dass die Definition von Fleisch abgeändert werden soll, so dass Produkte aus Zellulärer Landwirtschaft nicht als „Fleisch“ bezeichnet werden dürfen [88S]. Zudem gibt es bereits in einigen Staaten der USA Gesetze, beziehungsweise Gesetzesvorlagen, die die Bezeichnung von In-vitro-Produkten als „Fleisch“ auf Verpackungen strafbar macht [89S]. Es bleibt also abzuwarten, welche Bezeichnung kultiviertes Fleisch im Lebensmittel-einzelhandel und in der Gastronomie in Zukunft letztendlich tragen wird.

„Zellspender“ fungieren müsste. Biopsien zur Gewinnung von Stammzellen könnten im Zuge von obligatorischen veterinärmedizinischen Untersuchungen schmerzfrei durchgeführt werden [77–79S]. So könnte es auf lange Sicht sogar möglich sein, die intensive Nutztierhaltung einzudämmen, beziehungsweise ganz auf sie zu verzichten [77]. Zudem könnten gefährdete Tierarten wie beispielsweise viele Meeresfische besser geschützt werden, da es prinzipiell möglich ist, von allen Tierarten Muskelzellen für die Produktion von kultiviertem Fleisch zu entnehmen, ohne diese dafür zu töten [77]. Auf diese Weise könnten sowohl exotische Speisewünsche auf ethisch und rechtlich unproblematischem Wege erfüllt als auch das Problem der Überfischung und Überjagung von Wildbeständen gefährdeter Tierarten eingedämmt werden [66S, 77, 80S].

Es gibt aber auch einige Argumente, die gegen eine Nutzung von kultiviertem Fleisch sprechen (vgl. auch Beck [77] für eine ausführliche Darstellung von Pro- und Contra-Argumenten zur Nutzung von kultiviertem Fleisch). Neben den wissenschaftlich-technischen Herausforderun-

gen inklusive der Nutzung von fetalem Kälberserum (vgl. Starterzellen – Zelltypen, Gewinnung, Proliferation und Differenzierung) gibt Beck [77] aus umwelt- und tierethischer Perspektive zu bedenken, dass die Instrumentalisierung der Mensch-Tier-Beziehung durch die Produktion von kultiviertem Fleisch weiter vorangetrieben werden könnte. Van der Weele und Driessen [81S] sprechen diesbezüglich vom „Pig-in-the-backyard“-Phänomen: So könnte jeder Konsument seine „Lieblingsfleisch-Haustiere“ halten und diesen von Zeit zu Zeit Stammzellen entnehmen, wenn der Hunger nach Fleisch kommt – und dies ohne schlechtes Gewissen, weil die Tiere ein artgerechtes und unbeeinträchtigt Leben führen können. Einige Autoren gehen sogar so weit, dass es zu einer Entwicklung von gewaltfreiem Kannibalismus kommen könnte, da für die Produktion von kultiviertem Fleisch theoretisch auch Muskelzellen von Menschen kultiviert werden könnten [77, 79S, 82S]. So wahnsinnig und utopisch der Gedanke auch erscheinen mag, gibt es dazu schon einen ersten Rezeptvorschlag in einem Kulturfleisch-Kochbuch vom „Bistro In Vitro“ in Form von „Celebrity Cubes“: Man nehme ein paar Stammzellen seines Lieblingsstars, züchte diese in quadratischen Eiswürfelformen in einem Heimbioreaktor und biete sie seinen Gästen als exklusive Eiswürfel in Fusion-Food-Cocktails an [83S]. Ein weiteres Argument gegen die Nutzung von kultiviertem Fleisch zielt auf die Verletzung der Integrität der Natur ab [77]. Der massive Einsatz von Technik zur Naturbeherrschung und zur Produktion von Fleisch entfremde Menschen allmählich von der Natur [77]. Damit einher geht auch die Vorstellung, dass der Konsum von Fleisch „natürlich“ ist und die Produktion und der Konsum von kultiviertem Fleisch dagegen „unnatürlich“ [84].

Rechtliche Einordnung und Zulassung von kultiviertem Fleisch als ► Novel Food

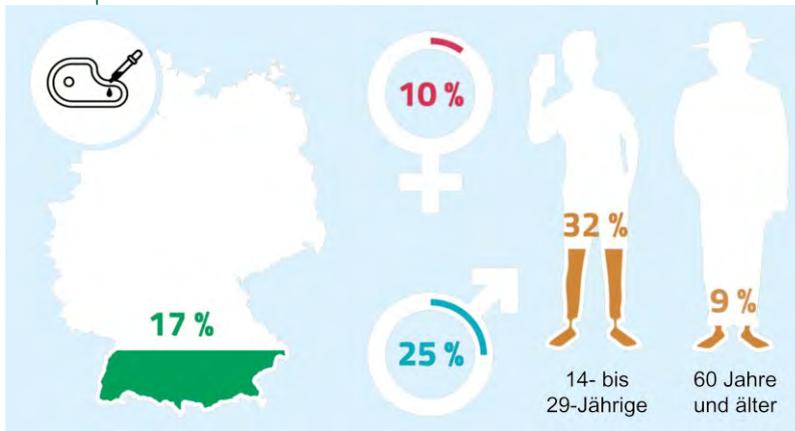
Neben den Herausforderungen bei der Produktion von kultiviertem Fleisch sind die rechtlichen Rahmenbedingungen ausschlaggebend für eine Markteinführung [43; Kasten „Fleisch oder nicht Fleisch? Das ist hier die Frage!“]. In der Europäischen Union gelten „Lebensmittel, die aus von Tieren, Pflanzen, Mikroorganismen, Pilzen oder Algen gewonnenen Zell- oder Gewebekulturen bestehen oder daraus isoliert oder erzeugt wurden“ (NFV-EU 2015/2283, Art. 3 Abs. 2) als neuartige Lebensmittel. Es ist davon auszugehen, dass kultiviertes Fleisch mit dieser Definition als neuartiges Lebensmittel gilt [43]. Zuständig für die Zulassung von neuartigen Lebensmitteln in Europa sind die Europäische Kommission und die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA). Die wissenschaftliche Bewertung und Zulassung von kultiviertem Fleisch erfolgt – abhängig von den Ausgangszellen – auf Basis der Novel-Food-Verordnung (NFV-EU 2015/2283) [3, 87S].

Gemäß der Verordnung muss für die Zulassung von kultiviertem Fleisch ein Antrag bei der Europäischen Kommission gestellt werden. Dieser Antrag muss ernährungs-

Besuchen Sie unter <https://bistro-inviro.com/en/welcome-to-bistro-in-vitro/> das fiktive „Bistro In Vitro“-Restaurant und stellen Sie Ihr eigenes Kulturfleisch-Menü zusammen.

Die aktuelle Novel-Food-Verordnung können Sie unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32015R2283> einsehen.

ABB. 6 | WER WÜRD KULTIVIERTES FLEISCH KAUFEN?



Angegeben ist die Bereitschaft der deutschen Bevölkerung zum Kauf von kultiviertem Fleisch als Alternative zu konventionellem Fleisch; insgesamt (links), aufgeteilt nach Geschlecht (Mitte) und den beiden angegebenen Altersgruppen (rechts). Adaptiert aus [109S, Minute 0:33]. Abb.: FWU Institut für Film und Bild.

physiologische Informationen über die Zusammensetzung des Produktes und den antizipierten Verwendungszweck sowie technische Informationen zum Herstellungsprozess des Produktes enthalten. Zur Bewertung der Sicherheit des Produktes beantragt die Europäische Kommission bei der EFSA die Anfertigung eines Sicherheitsgutachtens. Der Antrag wird im Anschluss allen EU-Mitgliedstaaten zur Verfügung gestellt [3]. Bisher ist bei der Europäischen Union allerdings noch kein Antrag auf Zulassung von kultiviertem Fleisch als Novel Food gestellt worden [87S].

Akzeptanz von kultiviertem Fleisch in der deutschen Bevölkerung und anderswo

Obwohl die Produktion von kultiviertem Fleisch im Vergleich zu der von konventionellem Fleisch viele Vorteile

aufweist, wird der Erfolg einer Markteinführung stark von der Akzeptanz der Konsumenten abhängen. Laut einer Forsa-Umfrage, beauftragt durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), sehen 29 Prozent der Deutschen kultiviertes Fleisch als eine angemessene Maßnahme an, um einen Beitrag zur Ernährungssicherheit der Weltbevölkerung zu leisten [90S]. Allerdings würden nur 17 Prozent der Befragten kultiviertes Fleisch als eine Alternative zu konventionellem Fleisch im Supermarkt kaufen [90S, 91S; (Abbildung 6)]. Im Gegensatz dazu ist die Bereitschaft der deutschen Bevölkerung kultiviertes Fleisch zu probieren sehr hoch. Sie liegt zwischen 57 und 76 Prozent [92S, 93S]. In den USA [94S], Italien [95S] und in den Niederlanden [96S] wurden ähnliche Ergebnisse erhalten (Tabelle 4). Für die Bevölkerung in den USA konnte sogar gezeigt werden, dass diese im Vergleich zur europäischen Bevölkerung eine höhere Konsumbereitschaft gegenüber kultiviertem Fleisch aufweist [3, 97].

Die Hauptunterschiede in den Befragungsergebnissen – teilweise auch innerhalb eines Landes – scheinen im Wesentlichen auf den Informationen über kultiviertes Fleisch zu beruhen, die den Teilnehmern gegeben wurden [3]. So konnte bereits gezeigt werden, dass kultiviertes Fleisch deutlich weniger attraktiv ist, wenn es als technologische Innovation dargestellt wird, als wenn der Schwerpunkt der Informationen auf der Ähnlichkeit mit konventionellem Fleisch oder den ökologischen Vorteilen liegt [98S]. Ebenso sind Namensgebungen wie „Laborfleisch“ (engl. *lab grown meat/lab meat*) oder „Fleisch aus dem Reagenzglas“, die an Wissenschaft und Unnatürlichkeit erinnern, deutlich weniger ansprechend als Bezeichnungen wie „Kultiviertes Fleisch“ (engl. *cultivated meat*) oder „Sauberes Fleisch“ (engl. *clean meat*), die die Vorteile gegenüber konventionellem Fleisch hervorheben [84]. Ge-

TAB. 4 AKZEPTANZ VON KULTIVIERTEM FLEISCH BEI ERWACHSENEN (PERSONEN ÜBER 18 JAHREN)

| Studie | Land | Frage | Zustimmung in Prozent |
|-----------------------------|--|--|--|
| Bryant et al. [112S] | USA, Indien, China | Wie wahrscheinlich ist, dass Sie Sauberes Fleisch essen? Antwort: äußert wahrscheinlich | USA: 29,8%, Indien: 48,7%, China: 59,3% |
| Bryant & Dillard [98S] | USA | Würden Sie Kulturfleisch probieren? Würden Sie Kulturfleisch regelmäßig kaufen? Würden Sie Kulturfleisch anstelle von konventionellem Fleisch essen? | 64,6% 24,5% 48,5% |
| Dupont et al. [113] | Deutschland | Würden Sie einen In-vitro-Fleisch-Burger konsumieren? | 58,4% |
| Gomez Luciano et al. [114S] | England, Spanien, Brasilien, Dom. Republik | Würden Sie Kulturfleisch kaufen? | England: 20,0%, Spanien: 42,0%, Brasilien: 11,5%, Dom. Rep.: 15,0% |
| Mancini & Antonioli [95S] | Italien | Würden Sie Kulturfleisch probieren? Würden Sie Kulturfleisch kaufen? | 54,0% 44,0% |
| Weinreich et al. [93S] | Deutschland | Würden Sie In-vitro-Fleisch probieren? Würden Sie In-vitro-Fleisch kaufen? | 57,0% 30,0% |
| Wilks & Phillips [94S] | USA | Würden Sie In-vitro-Fleisch probieren? | 65,0% |

Adaptiert aus [97, S. 9] sowie [103S, 104]

rade im angloamerikanischen Raum gibt es eine Vielzahl weiterer alternativer Bezeichnungen, die alle unterschiedliche Konnotationen tragen, wie beispielsweise „Kulturfleisch“ (engl. *cultured meat/cultivated meat*), „Zellbasiertes Fleisch“ (engl. *cell-based meat*), „Kunstfleisch“ (engl. *fake meat*) oder „Frankenstein-Fleisch“ (engl. *frankenmeat*) [26S, 93S, 99S, 100S]. Da Studien zur Wirkung verschiedener Bezeichnungen von kultiviertem Fleisch weitestgehend im englischen Sprachraum durchgeführt wurden [99S, 101S], wäre eine Replikation in der deutschen Bevölkerung sinnvoll, um konkrete Hinweise für eine Vermarktung von kultiviertem Fleisch in Deutschland zu erhalten. Eine erste Studie hierzu zeigte, dass die Bezeichnung „Sauberes Fleisch“ am positivsten von deutschen Konsumenten wahrgenommen wird. „Laborfleisch“ und „In-vitro-Fleisch“ waren eindeutig negativ konnotiert, „Kultiviertes Fleisch“ lag im Mittelfeld und rief je nach Ernährungsweise unterschiedliche Assoziationen hervor [102S].

Welche Faktoren beeinflussen die Konsumbereitschaft von kultiviertem Fleisch?

Die öffentliche Meinung über kultiviertes Fleisch ist gemischt. Viele potenzielle Konsumenten nehmen kultiviertes Fleisch als „unnatürlich“ wahr [84, 103S]. Die Bewer-

tung der Unnatürlichkeit scheint vor allem auf affektiven Mechanismen wie Angst und Ekel zu beruhen, die sich wiederum negativ auf die Konsumbereitschaft auswirken [84, 103S, 104]. So konnte bereits nachgewiesen werden, dass die Angst vor neuartigen Lebensmitteln (engl. *food neophobia*), die Angst vor deren neuartigen und meist unbekanntem Herstellungsverfahren (engl. *food technology neophobia*) sowie der Ekel vor Lebensmitteln (engl. *food disgust*) einen negativen Einfluss auf die Konsumbereitschaft und auf die Einstellung gegenüber kultiviertem Fleisch haben [104]. Die Einstellung selbst konnte ebenfalls als wichtiger Einflussfaktor für die Konsumbereitschaft von kultiviertem Fleisch identifiziert werden. Dabei zeigten Probanden mit einer positiveren Einstellung gegenüber kultiviertem Fleisch auch eine höhere Bereitschaft, es zu konsumieren [93S, 104]. Zudem deuten viele Studien darauf hin, dass zukünftige Konsumenten von kultiviertem Fleisch eher jünger als älter, eher männlich als weiblich sind [3, 105S, 106S] sowie einen eher hohen Fleischkonsum aufweisen und nicht vegetarisch sind [104]. Weiterführend konnte in experimentellen Studien nachgewiesen werden, dass die Bereitstellung von Informationen über die ökologischen und gesundheitlichen Vorteile von kultiviertem Fleisch einen positiven Einfluss auf die Konsumbereitschaft hat [97].

GLOSSAR

Adulte Stammzellen: Gewebestammzellen, die für die Erneuerung des Gewebes zuständig sind. Man bezeichnet sie als multipotent, weil sie zwar unterschiedliche Gewebetypen, aber nicht jeden Zelltyp bilden können.

Bioprinting: Technologie, bei der mithilfe eines 3D-Druckers 3D-Strukturen wie Gerüste, Gewebe oder Organe hergestellt werden können. Zur Bildung einer 3D-Struktur wird Biotinte, die aus lebenden Zellen, Biomaterialien oder aktiven Biomolekülen besteht, vom 3D-Drucker schichtweise aufgetragen.

Bioreaktor: Behälter, in dem Zellen oder Mikroorganismen unter kontrollierten und regulierten Bedingungen (u. a. Temperatur, pH-Wert) in einem Nährmedium optimal kultiviert werden können.

Embryonale Stammzellen: Zellen eines tierischen Frühembryos aus der inneren Zellmasse der Blastocyste vor dem Einsetzen einer sichtbaren Differenzierung in unterschiedliche Zelltypen. Man bezeichnet sie als pluripotent, weil sie sich zu jedem Zelltyp des Organismus differenzieren können.

Fetales Kälberserum: Serum aus dem Blut von Rinderföten, das zwischen dem 3. und 7. Trächtigkeitsmonat nach der Schlachtung gewonnen wird.

Induzierte pluripotente Stammzellen (iPSCs): Reprogrammierte, somatische Zellen, die sich ähnlich verhalten wie embryonale Stammzellen. Die Reprogrammierung erfolgt über stammzellenspezifische Transkriptionsfaktoren, die über Transduktion/Transfektion in die somatischen Zellen eingeschleust werden. Das Epigenom der somatischen Zellen wird in einen embryonalen Zustand zurückversetzt, so dass die iPSC genetisch identisch mit ihren Ursprungszellen sind.

Lebenszyklusanalyse (LCA, engl. life cycle assessment): Modellierung und Analyse der Gesamtmweltwirkungen eines Produkts oder Verfahrens entlang eines Lebenszyklus.

Mesenchymale Stammzellen (MSCs): Stammzellen des Bindegewebes, die sich u. a. zu Adipozyten und Myozyten differenzieren können.

Microcarrier (Mikroträger): Partikel, meistens kleine Perlen, mit einer elektrisch geladenen Oberfläche, auf denen sich Zellen anheften und wachsen können. Die Kultivierung der Zellen erfolgt unter ständigem Rühren des Nährmediums in Bioreaktoren.

Nährmedium (auch Medium): Eine Nährlösung, die Nährstoffe sowie anorganische Salze zur Aufrechterhaltung von Osmolarität und pH-Wert enthält. Man unterscheidet zwischen Erhaltungsmedien, die das Überleben von Zellen ermöglichen und Proliferationsmedien, die die Nähr- und Wachstumsstoffe für die Proliferation der Zellen enthalten.

Novel Foods: Lebensmittel, die vor dem 15. Mai 1997 nicht in nennenswertem Umfang in der europäischen Union für den menschlichen Verzehr verwendet wurden. Dazu gehören beispielsweise Lebensmittel aus Zell- und Gewebekulturen.

Serumfreie Nährmedien: Medien, die nicht mit tierischem Serum supplementiert sind, aber spezielle Proteine oder Proteinfractionen wie Pflanzenextrakte enthalten können.

Stammzellen: Undifferenzierte Zellen, die die Fähigkeit besitzen, sich in alle Zelltypen eines Organismus weiterzuentwickeln. Man unterscheidet zwischen embryonalen und adulten Stammzellen.

Zelluläre Landwirtschaft: Transformativer Zweig der Industrie zur Herstellung von biologisch äquivalenten Lebensmitteln aus traditioneller Landwirtschaft und Tierhaltung, wie z. B. Fleisch, Fisch, Milchprodukte oder Leder, mithilfe von Einzellern sowie Zell- und Gewebekulturtechniken.

Falls Sie als Lehrperson die Produktion, Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit oder bioethische Betrachtung von kultiviertem Fleisch in Ihrem Unterricht thematisieren möchten, stehen Ihnen Bildungsmaterialien hierfür zur Verfügung [107S, 109S].

Ausblick

Kultiviertes Fleisch weist als eine nachhaltigere Alternative zu konventionellem Fleisch ein hohes Potenzial auf, Anteile des globalen Fleischkonsums und der steigenden Nachfrage nach Fleisch zu bedienen [108]. Für das Jahr 2040 wird prognostiziert, dass kultiviertes Fleisch 35 Prozent der Marktanteile von konventionellem Fleisch übernehmen wird [16S]. Wissenschaftliche Fortschritte in der Produktion von kultiviertem Fleisch und finanzielle Investitionen unterstützen das Wachstum der kultivierten Fleisch-Branche [51, 60, 108]. Obgleich technische und ökonomische Fortschritte zu beobachten sind, lassen sich weder aus technischer sowie ökonomischer noch aus rechtlicher und konsumentenpsychologischer Sicht klare Aussagen zur Zulassung sowie zum Markteintritt von kultiviertem Fleisch in Europa tätigen. Allerdings kann aufgrund einer Bearbeitungsdauer der Zulassungsanträge bei der Europäischen Kommission und EFSA von circa 18 Monaten, einer Revisionschleife von sechs Monaten und einem weiteren Jahr für organisatorische Aspekte wohl frühestens ab 2025 mit einem Markteintritt von kultiviertem Fleisch in Europa zu rechnen sein. Ob kultiviertes Fleisch 2025 in deutschen Supermärkten erhältlich sein wird und bis 2040 den globalen Markt als Alternative zu konventionellem Fleisch erobert hat, bleibt spannend zu beobachten.

Zusammenfassung

Kultiviertes Fleisch ist mithilfe von Zell- und Gewebekulturtechniken hergestelltes Fleisch, welches ein großes Potenzial aufweist, als nachhaltigere und tierethisch vertretbare Alternative zu konventionell produziertem Fleisch den Proteinmarkt zu erobern. Neben Herausforderungen bei der Hochskalierung ist kultiviertes Fleisch derzeit noch nicht als „Novel Food“ auf dem europäischen Markt zugelassen. Regierungen anderer Regionen der Welt zeigen sich offener für das neuartige Fleisch. So kam es im Dezember 2020 in Singapur zur ersten Zulassung von kultiviertem Hühnerfleisch für den menschlichen Verzehr. Indes arbeiten Akteure weltweit unter Hochdruck an der Weiterentwicklung von Nährmedien, Trägermaterialien, Bioreaktoren und anderen Parametern im Produktionsprozess, um beispielsweise die Effektivität serumfreier Nährmedien für eine großindustrielle Produktion zu verbessern. Im Januar 2022 erreichten Wissenschaftler aus den Niederlanden einen weiteren Meilenstein bei der Entwicklung eines serumfreien Mediums, welches die Differenzierung von Rindersatellitenzellen bei der Produktion von kultiviertem Fleisch unterstützt. Neben den technischen und rechtlichen Herausforderungen bei der Produktion ist die Akzeptanz der Konsumenten entscheidend für eine erfolgreiche Markteinführung. Auch wenn der Großteil der Konsumenten in Europa bereit wäre, das kultivierte Fleisch zu probieren, sind die Ausbildung von positiven Einstellungen und der Abbau von Angst und Ekel gegenüber kultiviertem Fleisch Schlüsselfaktoren zur Akzeptanz des neuartigen Lebensmittels.

Summary

Meat (r)evolution?

Cultured meat is meat produced with the help of cell and tissue culture techniques that has high potential to conquer the protein market as a more sustainable and animal-ethical alternative to conventionally produced meat. In addition to challenges with upscaling, cultured meat has not yet been approved as a “novel food” on the European market. Governments in other regions of the world are more open to novel meat. For example, the first approval of in vitro chicken meat for human consumption was granted in Singapore in December 2020. Meanwhile, stakeholders around world are working hard to further develop culture media, scaffolds, bioreactors and other parameters in the production process, for example, to improve the efficacy of serum-free culture media for large-scale industrial production. In January 2022, scientists from the Netherlands achieved another milestone in developing a serum-free medium that supports the differentiation of bovine satellite cells for cultured meat production. In addition to the technical and legal challenges in production, consumer acceptance is crucial for a successful market entry. Even if the majority of consumers in Europe would be willing to try cultured meat, the formation of positive attitudes and the reduction of fear and disgust towards it are key factors for the acceptance of this novel food.

Schlagworte

Konventionelle Tierhaltung, Zelluläre Landwirtschaft, Zell- und Gewebekulturtechniken, In-vitro-Fleisch

Literatur

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

- [3] M. J. Post et al. (2020). Scientific, sustainability and regulatory challenges of cultured meat. *Nature Food*, 1, 403–415. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0112-z>
- [17] N. Treich (2021). Cultured Meat: Promises and Challenges. *Environmental and Resource Economics*, 79, 33–61. <https://doi.org/10.1007/s10640-021-00551-3>
- [31] M. J. Post, C. van der Weele (2014). Principles of Tissue Engineering for Food. In: R. Lanza, R. Langer, R. Vacanti (Eds.). *Principles of Tissue Engineering*. Elsevier, 1647–1662. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-398358-9.00078-1>
- [32] I. Kadim et al. (2015). Cultured meat from muscle stem cells: A review of challenges and prospects. *Journal of Integrative Agriculture*, 14, 222–233.
- [33] T. Ben-Arye, S. Levenberg (2019). Tissue Engineering for Clean Meat Production. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3, 1–19. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00046>.
- [34] J. Reiss et al. (2021). Cell sources for cultivated meat: Applications and considerations throughout the production workflow. *International Journal of Molecular Sciences*, 22. <https://doi.org/10.3390/ijms22147513>

- [35] I. Datar, M. Betti (2010). Possibilities for an in vitro meat production system. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 11, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2009.10.007>
- [42] M. K. Gaydhane et al. (2018). Cultured meat: state of the art and future. *Biomanufacturing Reviews*, 3, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s40898-018-0005-1>
- [43] Deutscher Bundestag (2019). *Ausarbeitung: Einzelfragen zu In-vitro-Fleisch*. WD 5-3000-151/18. <https://www.bundestag.de/resource/blob/592836/5d0ea08045a3e9baf92393495d754a2/WD-5-151-18-pdf-data.pdf>
- [44] P. D. Edelman et al. (2005). In Vitro-Cultured Meat Production. *Tissue Engineering*, 11.
- [45] G. Gstraunthaler, T. Lindl (2021). *Zell- und Gewebekultur. Allgemeine Grundlagen und spezielle Anwendungen*. 8. Auflage, Springer Spektrum, Berlin.
- [51] T. Messmer et al. (2022). A serum-free media formulation for cultured meat production supports bovine satellite cell differentiation in the absence of serum starvation. *Nature Food*, 3, 74–85. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00419-1>
- [58] S. J. Allan et al. (2019). Bioprocess Design Considerations for Cultured Meat Production With a Focus on the Expansion Bioreactor. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00044>
- [59] K. D. Fish et al. (2020). Prospects and challenges for cell-cultured fat as a novel food ingredient. *Trends in Food Science & Technology*, 98, 53–67. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.005>
- [60] D. H. Kang et al. (2021). Engineered whole cut meat-like tissue by the assembly of cell fibers using tendon-gel integrated bioprinting. *Nature Communications*, 12, 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25236-9>
- [61] M. J. Post, J.-F. Hocquette (2017). New Sources of Animal Proteins: Cultured Meat. In: P. P. Purslow. *New aspects of meat quality: From Genes to ethic*. Elsevier, 425–441.
- [64] C. S. Mattick (2018). Cellular agriculture: The coming revolution in food production. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 74, 32–35. <https://doi.org/10.1080/00963402.2017.1413059>
- [65] P. Sinke, I. Odegard (2021). *LCA of cultivated meat. Future projections for different scenarios*. https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/04/CE_Delft_190107_LCA_of_cultivated_meat_Def.pdf
- [67] H. L. Tuomisto et al. (2014). *Environmental impacts of cultured meat: alternative production scenarios*. Proceedings of the 9th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector, 1360–1366. <https://doi.org/10.1021/es202956u>
- [77] B. Beck (2019). *Ethische Argumente pro und contra In-vitro-Fleisch*. In: J. Rückert-John, M. Kröger (Hrsg.). *Fleisch – Vom Wohlstandssymbol zur Gefahr für die Zukunft*. 1. Auflage, Nomos, 293–322.
- [84] M. Siegrist et al. (2018). Perceived naturalness and evoked disgust influence acceptance of cultured meat. *Meat Science*, 139, 213–219. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.02.007>
- [97] C. Bryant, J. Barnett (2020). Consumer acceptance of cultured meat: An updated review (2018–2020). *Applied Science*, 10, 1–25. <https://doi.org/10.3390/app1015201>
- [104] J. Dupont, F. Fiebelkorn (2020). Attitudes and acceptance of young people toward the consumption of insects and cultured meat in Germany. *Food Quality and Preference*, 85, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2020.103983>
- [108] Good Food Institute (2020). *State of the Industry Report. Cultivated Meat*. <https://gfi.org/resource/cultivated-meat-eggs-and-dairy-state-of-the-industry-report>

Verfasst von:



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



Jacqueline Dupont, geb. 1993, hat an der Universität Osnabrück Biologie und Chemie auf Gymnasiallehramt studiert. Aktuell arbeitet sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Abteilung Biologiedidaktik an der Universität Osnabrück und forscht im Rahmen ihrer Promotion zum Thema „Akzeptanz von Kindern und Jugendlichen aus Deutschland gegenüber Nahrungsmitteln aus Insekten und In-vitro-Fleisch“.



Lena Szczepanski, geb. 1995, hat an der Universität Osnabrück Biologie und Physik auf Gymnasiallehramt studiert. Anschließend absolvierte sie ihren Vorbereitungsdienst am Zentrum für schulpraktische Lehrerausbildung in Münster. Aktuell arbeitet sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Abteilung Biologiedidaktik an der Universität Osnabrück und forscht im Rahmen ihrer Promotion zum Thema „Vorstellungen und Konsumbereitschaft von Kindern und Jugendlichen gegenüber neuartigen Lebensmitteln aus Zellulärer Landwirtschaft“.



Nadine Filko, geb. 1986, absolvierte ihr Studium der Politikwissenschaft und Philosophie an der Universität Bremen und der University of Copenhagen (Dänemark). Seither war sie unter anderem Redakteurin des Start-up-Magazins „Berlin Valley“ und hat das Management sowie Autorentätigkeiten für unterschiedliche Publikationen mit Technologiefokus übernommen. Aktuell lebt und arbeitet sie als freiberufliche Autorin sowie Projektmanagerin in Berlin und betreut u. a. das vom Deutschen Fachverlag ins Leben gerufene Magazin „New Meat“. Im Oktober 2019 hat sie ihr erstes Buch „Clean Meat. Fleisch aus dem Labor: Die Zukunft der Ernährung?“ veröffentlicht. Mit ihrem politikwissenschaftlichen Hintergrund liegt der Fokus ihrer Arbeit in der Analyse von technologischen Innovationen, die das Potenzial zu einer nachhaltigen gesellschaftlichen Transformation haben.

Korrespondenz

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

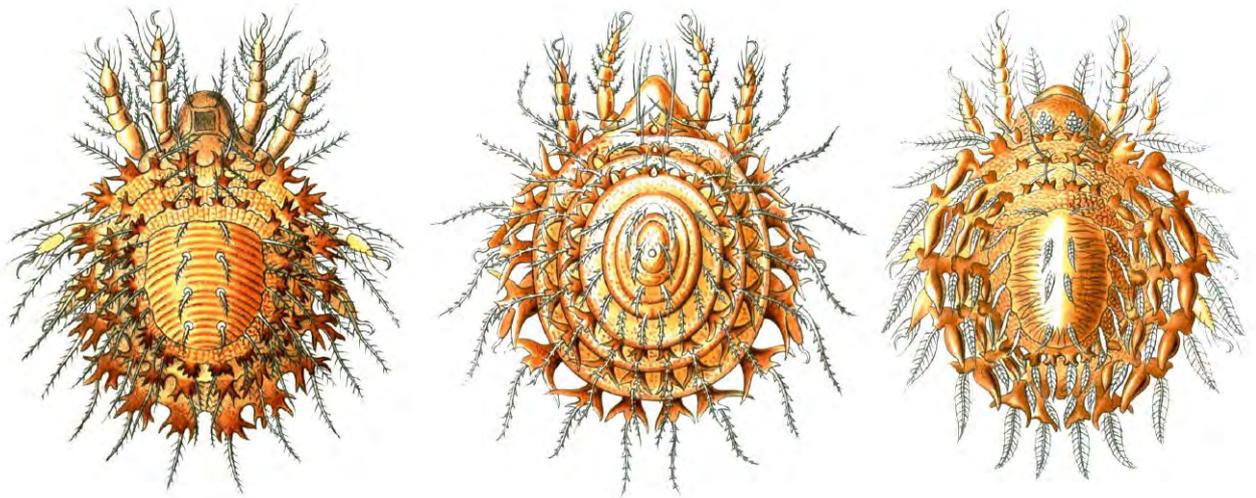


ABB. 1 Die Schönheit im Verborgenen: Milben-Zeichnungen von Ernst Haeckel [2].

Mit der Lupe durch den Wald

Hornmilben – die unscheinbare Vielfalt aus dem Boden

KATJA WEHNER | MICHAEL HEETHOFF

Die winzig kleinen, in den unterschiedlichsten Mikrohabitaten auf der ganzen Welt lebenden Hornmilben sind eine faszinierende Tiergruppe. Bereits vor über 500 Millionen Jahren entstanden, entwickelten sie eine enorme Diversität, die sich auch in einer großen Vielzahl an Schutzmaßnahmen vor Fressfeinden widerspiegelt. Sie selbst ernähren sich eher friedlich von totem organischem Material, Pilzen und Bakterien. Zum „Skandal der Evolution“ wurden Hornmilben aus einem anderen Grund: Etwa 10 Prozent der bekannten Hornmilbenarten vermehren sich rein eingeschlechtlich, haben also die Männchen im Laufe der Evolution „abgeschafft“. Dass dies über hundert Millionen Jahre funktioniert und sogar zur Entstehung zahlreicher neuer Arten geführt hat, ist ein einzigartiges Erfolgsmodell in der Biologie.

Wenn wir über Biodiversität sprechen, so haben wir meist direkt die „bunte“ und sichtbare Vielfalt der Organismen im Auge: große Wirbeltiere, farbenfrohe Schmetterlinge, duftende Blütenpflanzen und beeindruckende Bäume. Daher faszinieren uns Aufnahmen aus den tropischen Regenwäldern, die sich durch die vielen unterschiedlichen und meist fremdartigen Tier- und Pflanzenarten auszeichnen. Ein Spaziergang im heimischen Buchen-, Fichten- oder Mischwald gestaltet sich dagegen vergleichsweise trist. Doch der Eindruck täuscht: Gehen wir auf die Knie und bewaffnen unser Auge mit einer guten Lupe, so finden wir hunderttausende von Kleinstlebewesen aus hunderten von Arten und das auf jedem Quadratmeter des mit Laubstreu bedeckten Waldbodens. Konzentrieren wir uns an dieser Stelle auf einen Teil dieser Diversität: die Mesofauna. Hierunter verstehen wir mehrzellige Tiere im Millimeter-Bereich – vor allem Springschwänze (Collembola, eine ursprüngliche Gruppe der Insekten), Enchytraeiden (Enchytraeidae, kleine Verwandte der Regenwürmer) und verschiedenste Arten von Bodenmilben. Unter diesen Bodenmilben dominieren die Hornmilben (Oribatida), in älterer Literatur auch als Moosmilben bezeichnet. In eher unscheinbaren Farben fallen die blinden Achtbeiner, die zu den Spinnentieren gehören, nur den wirklich danach Suchenden auf. Wechseln wir jedoch von der Lupe zum

Mikroskop, dann verstehen wir sofort, warum der irische Ökologe Paul Giller die Bodentier-Gemeinschaft als den „Regenwald des kleinen Mannes“ („poor man’s tropical rainforest“) bezeichnet hat [1]. Ein passender Vergleich, wie wir finden: nicht nur wegen der hohen Diversität, sondern auch wegen der Fremdartigkeit, Vielfalt und Schönheit der Formen. So war auch schon Ernst Haeckel in seinen „Kunstformen der Natur“ [2] von der komplexen Morphologie einiger Hornmilbenarten angetan (Abbildung 1). Mit diesem Beitrag möchten wir daher den wenig beachteten Hornmilben eine Bühne bieten und zeigen, dass sie in evolutionsbiologischer und ökologischer Hinsicht ganz erstaunliche Tiere sind. Der Blick auf den Waldboden wird danach sicher ein anderer sein, so viel wollen wir an dieser Stelle schon versprechen.

Fressen und gefressen werden

Wie sah die Welt vor ca. 400 Millionen Jahren aus? Am Übergang vom Silur zum Devon hatten sich bereits einige Pflanzen an Land etabliert. Tierische Vorstöße in Richtung permanentes Landleben hingegen gab es kaum. Fossile Funde von terrestrisch lebenden Hornmilben gehen jedoch zurück bis ins frühe Devon – und die gefundenen Exemplare sehen den verwandten, heute noch existierenden Arten bereits sehr ähnlich [3]. Studien anhand von Genanalysen datieren den Ursprung der Hornmilben sogar bereits in das Präkambrium (ca. 550 Millionen Jahre) [4]. In jedem Fall haben die Hornmilben als Zeitzeugen die Dinosaurier sowohl kommen als auch wieder gehen sehen.

Durch die Zunahme von Landpflanzen entstand auf den terrestrischen Böden eine reichhaltige und ungenutzte Quelle an organischem Material. Hornmilben gehörten wahrscheinlich zu den ersten Tieren, die diese Quelle als Nahrung nutzten und so den Gang an Land bewerkstelligen konnten [4]. Auch heute noch ernähren sich die meisten Hornmilbenarten als Zersetzer von organischem Material und leisten so einen wichtigen Beitrag im Energie- und Stoffkreislauf der Böden und Pflanzen [5]. Vorwiegend Pilze fressende (fungivore) und Bakterien fressende Hornmilbenarten tragen zur Regulierung der Mikroorganismen-Gemeinschaften im Boden bei [6]. Dies ist durchaus eine erwähnenswerte Besonderheit, denn die landlebenden Spinnentiere (Arachnida) ernähren sich ansonsten fast ausschließlich räuberisch. So zählen heute neben diversen Insekten und

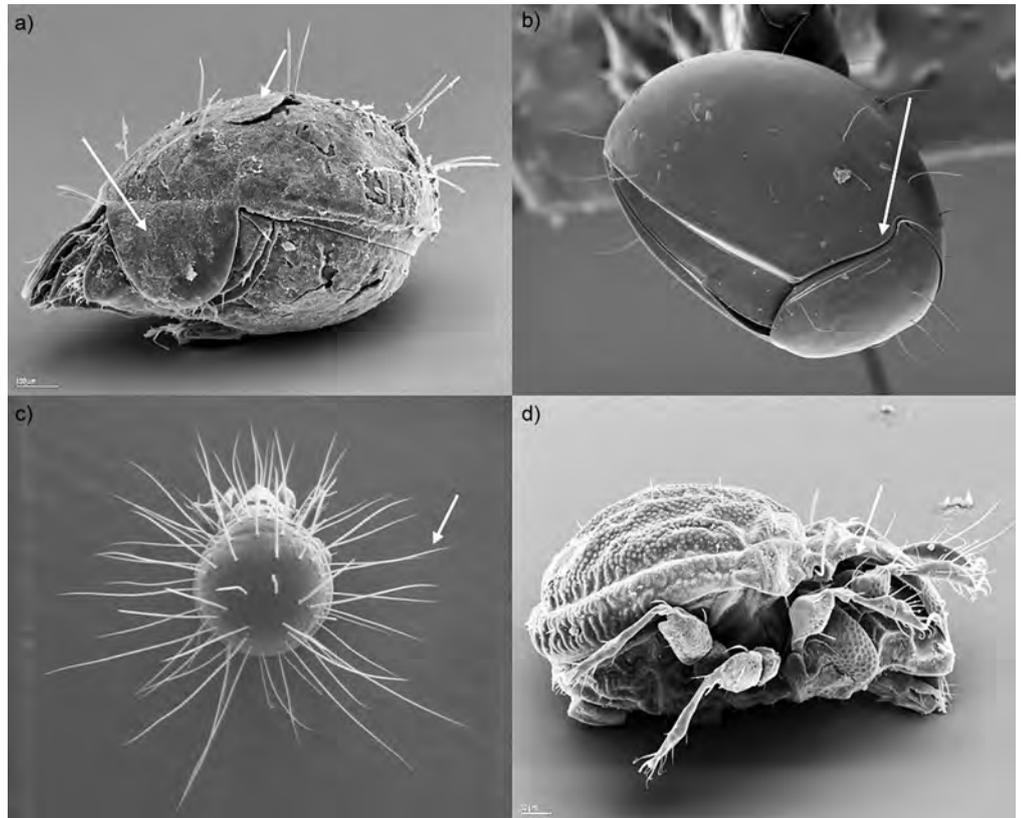


ABB. 2 Morphologischer Schutz vor Fressfeinden: a) *Eupelops plicatus* schützt seine Extremitäten durch sogenannte Pteromorphe und „ein dickes Fell“. b) Vertreter ptychoider Hornmilben können durch das Einklappen des Vorderkörpers ihre Extremitäten vollständig in den Körper zurückziehen. c) Diese australische Milbenart zeigt ein beeindruckendes Ausmaß an Borsten. d) Die Gattung *Carabodes* schützt weichhäutige Stellen der Beinansätze durch das Anklappen in dafür vorgesehene Vertiefungen. Bilder: Katja Wehner und Sebastian Schmelzle.

Amphibien vor allem andere Milben (Raubmilben, Gamasina) zu den wichtigsten Räubern der Hornmilben [7, 8].

Hornmilben sind also seit mehreren hundert Millionen Jahren eine beliebte Beute im Bodennahrungsnetz – und haben entsprechend der langen Zeit eine Vielzahl von effektiven morphologischen und chemischen Schutzmechanismen zur Abwehr der Räuber entwickelt. Während juvenile Hornmilben (Larven, und bis zu drei Nymphen-

IN KÜRZE

- Hornmilben sind „lebende Fossilien“ und bereits aus dem Devon bekannt.
- Hornmilben sind als Zersetzer beteiligt an Energie- und Stoffkreisläufen.
- Mit Dichten von vielen zehntausenden Individuen pro Quadratmeter und einer weltweiten Verbreitung sind Hornmilben ein wichtiger Bestandteil des Bodennahrungsnetzes.
- Hornmilben haben zahlreiche morphologische und chemische Abwehrmechanismen gegen Fressfeinde entwickelt.
- Relativ zu ihrem Körpergewicht gesehen gehören Hornmilben zu den stärksten Tieren der Welt.
- Skandale der Evolution: Etwa 10 Prozent aller bekannten Hornmilbenarten reproduzieren ohne Männchen (parthenogenetisch).
- Ein Modell für die Zukunft: *Archezogetes longisetosus*

stadien) aufgrund fehlender Sklerotisierung morphologisch nicht besonders geschützt sind, unterstellt man den erwachsenen Tieren ein Leben im „feindfreien Raum“ [9]. Lange hat man als Erklärung hierfür vor allem die vielen morphologischen Anpassungen an den Fresschutz gesehen wie zum Beispiel die Beine schützende Körperanhänge, eine starke Sklerotisierung oder Borsten [9] (Abbildung 2). Mittlerweile wissen wir aber, dass die Hornmilben, sowie die aus ihnen wahrscheinlich hervorgegangenen astigmaten Milben (Astigmata), auch eine hocheffiziente chemische Verteidigung entwickelt haben [7, 8, 10]. Wir kennen heute bereits weit über einhundert chemische Stoffe unterschiedlichster Substanzklassen, welche vermutlich alle von den Hornmilben selbst synthetisiert werden können. *Oribatula tibialis* ist sogar in der Lage, sich mit Hilfe von Blausäure zu verteidigen und diese in einer für die Tiere selbst ungefährlichen Vorstufe zu speichern [11].

Doch auch die chemische Verteidigung liefert natürlich keine vollkommene Sicherheit und ist sogar für manchen Fressfeind besonders attraktiv: Der zitronige Geschmack des traditionellen Würchwtitzer Milbenkäses wird durch Neral, einen flüchtigen Bestandteil von Zitronenöl, verursacht, welches wiederum durch die für die Reifung des Käses eingesetzte und beim Genuss mit verzehrte Milbe *Tyrollichus casei* (Astigmata) produziert wird [12]. Auch wenn es dem geneigten Käse-Gourmet zu Freuden gereicht, so dient dieses Sekret eigentlich dem Schutz der Tiere vor Fressfeinden. Und was dem Käse-Gourmet das Neral, sind dem Pfeilgiftfrosch die Alkaloide: Zahlreiche tropische Hornmilbenarten produzieren Alkaloide und schützen sich so vor Fraß durch andere Gliedertiere. Pfeilgiftfrösche jedoch sind auf ebendiese Alkaloide der Hornmilben angewiesen, da sie diese nicht selbst synthetisieren können. Die zum eigenen Schutz vor Räubern dringend benötigten Stoffe werden aus der gefressenen Beute isoliert und gespeichert. Für diese Pfeilgiftfrösche sind die Alkaloide der

Hornmilben also nicht nur ungiftig, sondern ein essentieller Bestandteil des eigenen Überlebens [13].

Neben der chemischen Verteidigung behelfen sich zahlreiche Hornmilbenarten mit morphologischem Schutz vor Räubern [14]. Viele, besonders größere Arten, sind dunkel gefärbt, was durch eine starke Sklerotisierung und teilweise Mineralisierung ihrer Kutikula zu erklären ist. Zusätzlich kann eine Zementschicht, das sogenannte Cerotegument, aufgelagert sein. Mehrfach unabhängig entwickelt hat sich eine ganz besondere Körperform, die Ptychoidie. Die Tiere haben einen rundlichen Körperbau, können die Extremitäten vollständig in den Körper zurückziehen und sich mithilfe des Prodorsums, einer Art Kopfschild, verschließen. In diesem eingekapselten Zustand bieten sie wenig Angriffsfläche für Räuber, denn die so entstehende Kapsel kann teilweise bis zum 560.000-fachen Druck des eigenen Körpergewichts widerstehen [15] (Abbildung 3).

Auch an anderer Stelle beweisen Hornmilben erstaunliche morphologische Fähigkeiten. Die unter 1 mm große und etwa 100 µg schwere tropische Art *Archegozetes longisetosus* hat in ihren Krallen Haltekräfte, die etwa 1.000-fach höher sind als ihr eigenes Körpergewicht [16]. Damit sind Hornmilben, relativ gesehen, die bislang stärksten bekannten Tiere der Welt.

Divers und abundant – überall Hornmilben

Hornmilben kommen weltweit in den verschiedensten (Mikro-) Habitaten wie Laubstreu, Baumkronen, Moospolstern, Pilzen, Flechten, Wiesen, Mooren und Gewässern vor. Sie haben sich auch extreme Lebensräume wie die arktischen Regionen oder das Hochgebirge erschlossen, und einige Arten haben sogar vom Landleben wieder ins Süßwasser oder ins Meer gewechselt [6]. Während die meisten Arten in den tropischen oder gemäßigten Regionen eine bis wenige Generationen pro Jahr hervorbringen, benötigt die antarktische Art *Alaskozetes antarcticus* etwa fünf

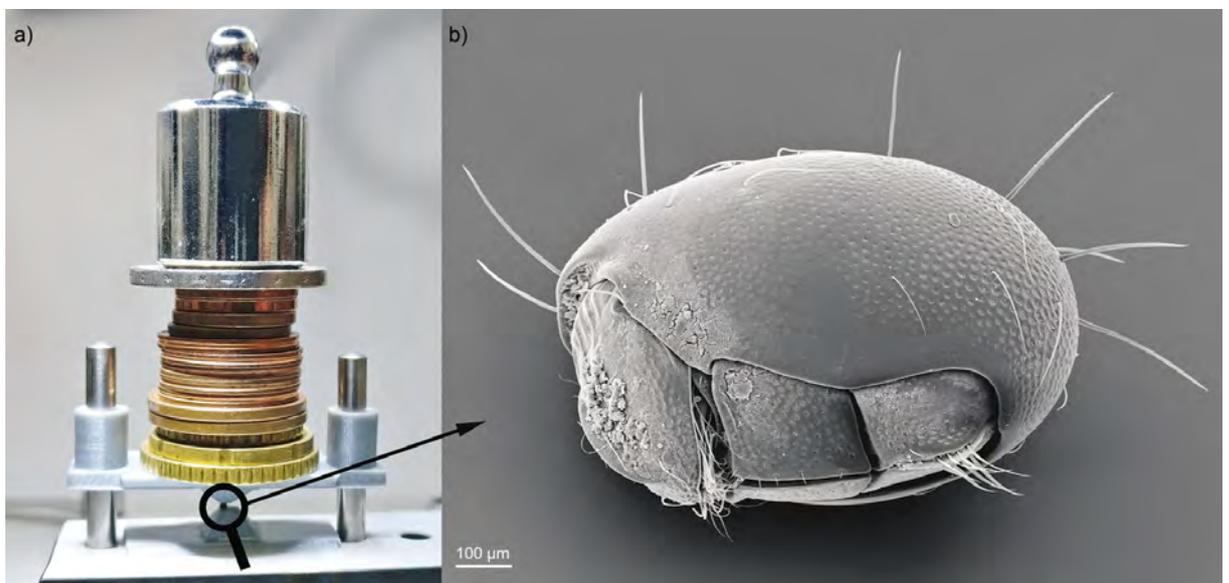


ABB. 3 Beein-druckende Druckresistenz von *Steganacarus magnus*. Das Gesamtgewicht auf der 420 µg schweren Milbe beträgt 110,17 g. Bilder: Sebastian Schmelzle aus [7].



ABB. 4 Hornmilben – divers und abundant: a) *Platynothrus peltifer*, b) *Xenillus* sp., c, d) *Phthiracarus* sp. Bilder: Frank Ashwood.

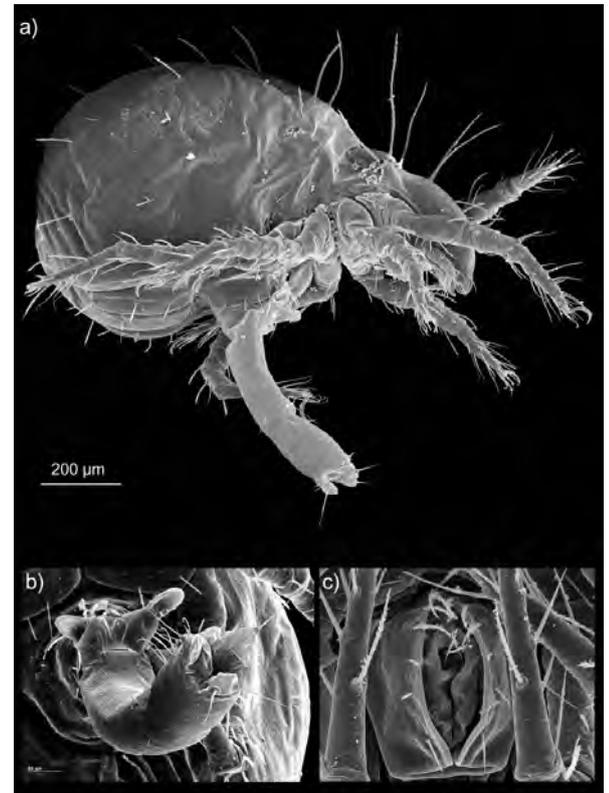


ABB. 5 Legebohrer (Ovipositor) von *Archegozetes longisetosus* (a, b). Zur Eiablage wird der Legebohrer aus der Genitalöffnung ausgestülpt (c). Bilder: Michael Heethoff.

Jahre für die Entwicklung bis zur eigenen Eiablage und hat eine Lebenserwartung von bis zu sieben Jahren – ein erstaunliches Alter für ein nur etwa 0,2 mm großes Tier [17].

Obwohl sich die meisten Hornmilben frei in ihren bevorzugten Mikrohabitaten bewegen, sind einige Arten für die Entwicklung ihrer Larven auf besondere Lebensräume angewiesen: Seziert man Fichtennadeln, so kann man in etwa einem Drittel davon 2–4 Jungtiere von verschiedenen Hornmilben entdecken. Die Tiere verbringen in den selbst gegrabenen Nadelhöhlen bis zu zwei Jahre ihrer Entwicklung [18, 19].

In gemäßigten Regionen erreichen Hornmilben Dichten von 10.000 bis 1.000.000 Individuen pro Quadratmeter [20] und machen demnach einen großen Anteil der Bodenmesofauna aus. Weltweit sind etwa 11.000 Arten beschrieben, geschätzt wird die Artenzahl jedoch sogar auf 100.000 [21] (Abbildung 4). Doch diese beeindruckenden Zahlen täuschen etwas: Auch Hornmilben sind durch den Klimawandel und die Land- und Waldwirtschaft durchaus gefährdet [22], und so wird aktuell auch erstmals eine Rote Liste für Hornmilben erstellt, um die Diversität und die Gefährdung systematisch zu dokumentieren.

Männchen – ohne geht es auch

Die meisten Hornmilbenarten vermehren sich – so wie die meisten anderen Tiere auch – sexuell. Die Männ-

chen setzen dabei Spermatophoren am Boden ab, die anschließend ohne direkten Partnerkontakt durch das Weibchen aufgenommen werden. Abgelegt werden die Eier dann durch einen ausstülpbaren Ovipositor (Abbildung 5). Obwohl die meisten Hornmilben bisexuell sind, sind erstaunlich viele Arten, ganze Gattungen und sogar Familien eingeschlechtlich, also parthenogenetisch [23]. Solche parthenogenetischen Linien entstehen in der Evolution immer mal wieder, sind aber meist kurzlebig, da sie durch fehlende Rekombination und genetische Vielfalt sogenannte „Sackgassen der Evolution“ darstellen [24]. Nur ganz wenige Ausnahmen von dieser Regel sind bekannt, und diese wurden als „Skandal der Evolution“ bezeichnet [25]. Und unter diesen Ausnahmen stellen die Hornmilben wiederum eine besondere Gruppe dar, denn hier ist die Parthenogenese teilweise nicht nur über 100 Millionen Jahre alt [26], sondern es sind ohne sexuelle Rekombination auch zahlreiche neue Arten entstanden [12, 23]. Eine mögliche Erklärung für die Langlebigkeit und die Möglichkeit zur Diversifikation könnte sein, dass die Tiere eine spezielle Art der Keimzellbildung verwenden: die invertierte Meiose. Diese Form der Meiose kennt man z. B. auch von Nematoden, und sie scheint das Genom trotz ausbleibender Durchmischung gut vor schädlichen Mutationen zu schützen [28].

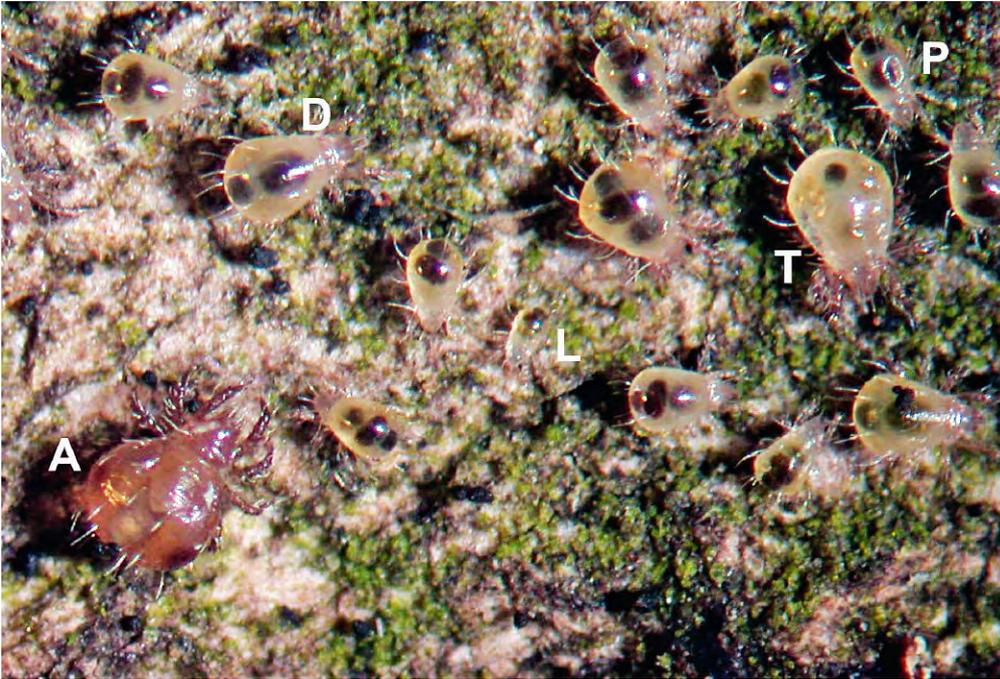


ABB. 6 Entwicklungsstadien von *Archegozetes longisetosus*: L: Larve, P: Protonympe, D: Deutonymphe, T: Tritonymphe, A: Adult. Die Cuticula sklerotisiert erst im erwachsenen Stadium. Foto: Michael Heethoff.

Im größten parthenogenetischen Cluster der Hornmilben – den Desmonomata – könnte es sogar zu einer Rück-Evolution von sexueller Reproduktion gekommen sein: Die sexuelle Gattung *Crotonia*, die in Wäldern der südlichen Hemisphäre beheimatet ist, erscheint in molekularen Stammbäumen als nahe Verwandte inmitten von parthenogenetisch reproduzierenden Arten [29]. Somit scheint das genetische Programm für Männchen in manchen Linien zwar inaktiviert, aber nicht verschwunden zu sein.

Ein Modell muss her

Die hohe Diversität der Lebewesen zwingt die Wissenschaft quasi dazu, sich für detaillierte Untersuchungen auf ausgewählte Arten als Modelle zu konzentrieren und die so gewonnenen Erkenntnisse dann auf andere Arten zu übertragen. So haben unter anderem das Bakterium *Escherichia coli*, die Acker-Schmalwand *Arabidopsis thaliana*, die Fruchtfliege *Drosophila melanogaster*, der Nematode *Caenorhabditis elegans* und auch die Hausmaus *Mus musculus* weitreichende Berühmtheit erlangt. Solche Modellarten müssen relativ einfach zu kultivieren sein und sollten keine allzu langen Generationszeiten aufweisen. Für die Spinnentiere gibt es keine Modellart mit ähnlicher Berühmtheit, auch wenn der – fälschlicherweise als „Krebs“ bezeichnete – Atlantische Pfeilschwanzkrebs *Limulus polyphemus* sowie die Wandernde Tigerspinne *Cupiennius salei*, in zahlreichen Aspekten ihrer Biologie hervorragend untersucht sind. Seit annähernd dreißig Jahren etabliert sich nun jedoch eine Hornmilbe zunehmend

als Modellart: die parthenogenetische *Archegozetes longisetosus*. Sämtliche in Laboren kultivierte und untersuchte Individuen gehen auf ein einzelnes schwangeres Weibchen zurück, welches von Roy A. Norton 1993 in Puerto Rico gesammelt wurde [30]. Seither wurden zahlreiche Studien zur Ökotoxikologie, chemischen Ökologie, Entwicklungsbiologie, Neurobiologie und Biochemie dieser Modellart veröffentlicht. Einen Trivialnamen hat sich *Archegozetes longisetosus* zwar noch nicht verdient, aber sie zählt mittlerweile ohne Zweifel zu den am besten untersuchten Spinnentieren überhaupt (Abbildung 6).

Zusammenfassung

Hornmilben sind faszinierende Tiere. Vor über 500 Millionen Jahren entstanden, leben sie heute in hohen Dichten und in großer Vielfalt in den unterschiedlichsten Ökosystemen und Mikrohabitaten auf der ganzen

Welt – ein langer Zeitraum, der sich auch in einer großen Vielfalt an Maßnahmen zum Schutz vor den zahlreichen Fressfeinden widerspiegelt. Hornmilben selbst hingegen ernähren sich meist eher friedlich von abgestorbenem organischen Material, Pilzen und Bakterien. Etwa zehn Prozent der bekannten Hornmilbenarten vermehren sich rein eingeschlechtlich – haben also die Männchen im Laufe der Evolution „abgeschafft“. Dass dies über hundert Millionen Jahre funktioniert und sogar zur Entstehung zahlreicher neuer Arten geführt hat, ist ein einzigartiges Erfolgsmodell in der Biologie – und ein „Skandal der Evolution“.

Summary

Oribatid mites – inconspicuous diversity from the soil

Oribatid mites are fascinating animals. Having come into existence over 500 million years ago, they now live in high densities and show a high diversity in a wide range of ecosystems and microhabitats all over the world. This is a long period of time, which is also reflected in the development of a high variety of defence mechanisms in oribatid mites against their numerous predators. Oribatid mites themselves, however, usually feed on dead organic material, fungi and bacteria rather peacefully. About ten percent of the known oribatid mite species reproduce purely unisexually – i. e. have “abolished” males in the course of evolution. The fact that this has worked over hundreds of millions of years and has even led to the emergence of numerous new species is a unique model of success in biology – and an “evolutionary scandal”.

Schlagworte:

Hornmilben, Boden-Nahrungsnetz, chemischer und morphologischer Fraßschutz, „Skandale der Evolution“, Parthenogenese

Literatur

- [1] P. S. Giller (1996). The diversity of soil communities, the 'poor man's tropical rainforest', *Biodiv. Conser.* 5, 135–168.
- [2] E. Haeckel (1904). *Kunstformen der Natur*, Bibliographisches Institut Leipzig und Wien, Tafel 66 – Arachnida.
- [3] R. A. Norton et al. (1988). Oribatid mite fossils from a terrestrial Devonian deposit near Gilboa, New York, *J. Paleo.* 62, 259–269.
- [4] I. Schaefer et al. (2010). Arthropod colonization of land – Linking molecules and fossils in oribatid mites (Acari, Oribatida), *Mol. Phyl. Evol.*, 57, 113–121.
- [5] D. A. Wardle et al. (2004). Ecological linkages between aboveground and belowground biota, *Science* 304, 1629–1633.
- [6] D. E. Walter, H. C. Proctor (1999). *Mites. Ecology, Evolution and Behaviour*, CABI Publishing, Wallingford, New York, Sydney.
- [7] M. Heethoff et al. (2011). Tasty but protected – first evidence of chemical defense in oribatid mites. *J. Chem. Ecol.*, 37, 1037–1043.
- [8] A. Brückner et al. (2016). Attack and defense in a gamasid-oribatid mite predator-prey experiment – sclerotization outperforms chemical repellency. *Acarologia* 56, 451–461.
- [9] K. Peschel et al. (2006). Do oribatid mites live in enemy-free space? Evidence from feeding experiments with the predatory mite *Pergamasus septentrionalis*. *Soil Biol. Biochem.* 38, 2985–2989.
- [10] M. Heethoff, G. Rasputnig (2012). Expanding the 'enemy-free space' for oribatid mites: evidence for chemical defense in juvenile *Archegozetes longisetosus* against the rove beetle *Stenus junco*. *Exp. Appl. Acarol.* 56, 93–97.
- [11] A. Brückner et al. (2017). Storage and release of hydrogen cyanide in a chelicerate (*Oribatula tibialis*), *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 114, 3469–3472.
- [12] A. Brückner, M. Heethoff (2016). Scent of a mite: origin and chemical characterization of the lemon-like flavor of mite-ripened cheeses, *Exp. Appl. Acarol.* 69, 249–261.
- [13] R. Saporito et al. (2007). Oribatid mites as a major source for alkaloids in poison frogs. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 104, 8885–8890.
- [14] R. A. Norton, V. M. Behan-Pelletier (1991). Calcium carbonate and calcium oxalate as cuticular hardening agents in oribatid mites (Acari: Oribatida), *Can. J. Zool.* 69, 1504–1511.
- [15] S. Schmelzle, N. Blüthgen (2019). Under pressure: force resistance measurements in box mites (Actinotrichida, Oribatida), *Front. Zool.*, <https://doi.org/10.1186/s12983-019-0325-x>
- [16] M. Heethoff, L. Koerner (2007). Small but powerful: the oribatid mite *Archegozetes longisetosus* Aoki (Acari, Oribatida) produces disproportionately high forces, *J. Exp. Biol.*, 210, 3036–3042.
- [17] T. Pfingstl, H. Schatz (2021). A survey of lifespans in Oribatida excluding Astigmata (Acari), *Zoosymposia* 20, 7–27.
- [18] S. Hågvar (1998). Mites (Acari) developing inside decomposing spruce needles: Biology and effect on decomposition rate, *Pedobiologia* 42, 358–377.
- [19] C. C. Labandeira et al. (1997). Oribatid mites and the decomposition of plant tissues in Palaeozoic coal-swamp forests, *Palais* 12, 319–353.
- [20] M. Maraun et al. (2008). Soil Fauna: Composition and function, in: E. Beck, J. Bendix, I. Kottke, F. Majeschin, R. Moslandl (Eds), *Gradients in a tropical montane ecosystem*, Ecological Studies, Springer, 181–192.
- [21] H. Schatz et al. (2011). Suborder Oribatida van der Hammen, 1968, in: Z.-Q. Zhang (Ed), *Animal Biodiversity: An Outline of Higher Level Classification and Survey of Taxonomic Richness*, *Zootaxa* 3148, 141–148.
- [22] K. Wehner et al. (2021). How land-use intensity affects sexual and parthenogenetic oribatid mites in temperate forests and grasslands in Germany. *Exp. Appl. Acarol.* 83, 343–373.
- [23] R. A. Norton, S. C. Palmer (1991). The distribution, mechanisms and evolutionary significance of parthenogenesis in oribatid mites, in: R. Schuster, P.W. Murphy (eds), *The Acari: Reproduction, Development and Life-History Strategies*, Chapman and Hall, London, pp. 107–136.
- [24] G. Bell (1982). *The Masterpiece of Nature: The Evolution and Genetics of Sexuality*. University of California Press, USA, 635.
- [25] J. Maynard Smith (1978). *The Evolution of Sex*. Cambridge University Press, 222.
- [26] M. Heethoff et al. (2007). Adding to the reproductive biology of the parthenogenetic oribatid mite, *Archegozetes longisetosus* (Acari, Oribatida, Trhypochthoniidae), *Turk. J. Zool.* 31, 151–159.
- [27] M. Maraun et al. (2003). Radiation in sexual and parthenogenetic oribatid mites (Oribatida, Acari) as indicated by genetic divergence of closely related species, *Exp. Appl. Acarol.* 29, 265–277.
- [28] M. Heethoff et al. (2009). Parthenogenesis in Oribatid Mites (Acari, Oribatida): Evolution without sex, in: I. Schön, K. Martens, P. Dijk (eds), *Lost Sex*, Springer, Dordrecht.
- [29] K. Domes et al. (2007). Re-evolution of sex breaks Dollo's law, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 104, 7139–7144.
- [30] M. Heethoff et al. (2013). The 20th anniversary of a model mite: a review of current knowledge about *Archegozetes longisetosus* (Acari, Oribatida), *Acarologia* 53, 353–368.

Verfasst von:

Katja Wehner studierte Biologie an der TU Darmstadt und promovierte dort 2009. Bereits seit 2004 arbeitet sie im Bereich der Bodenökologie und spezialisierte sich auf die Mesofauna-Gruppe der Hornmilben. Seit 2013 ist sie wissenschaftliche Mitarbeiterin in der AG „Ökologische Netzwerke“ an der TU Darmstadt. Im Zentrum ihrer Forschungsaktivität steht die Erfassung der Artendiversität im Zusammenhang mit dem Reproduktionsmodus in verschiedenen Mikrohabitaten. Seit 2020 ist sie Koordinatorin für die erste Rote Liste der Hornmilben in Deutschland.



Michael Heethoff studierte Biologie an der TU Darmstadt und promovierte dort 2003. Von 2004–2013 war er zunächst wissenschaftlicher Assistent, später Akademischer Rat an der Universität Tübingen (Abteilung für Evolutionsbiologie der Invertebraten) und untersuchte dort neben dem Reproduktionsmechanismus eingeschlechtlicher Hornmilben auch deren Morphologie in Hinblick auf den Schutz vor Fressfeinden. Mit einem Forschungsstipendium der DFG verbrachte er die Zeit von 2010–2012 an der Universität Graz und untersuchte dort die chemische Verteidigung von Hornmilben. 2012 habilitierte er an der Universität Tübingen und wechselte 2013 als Gruppenleiter an die TU Darmstadt. Seit 2021 ist er dort außerplanmäßiger Professor für Evolutionäre Tierökologie.

Korrespondenz:

Dr. Katja Wehner
TU Darmstadt / AG Ökologische Netzwerke /
AG Evolutionäre Tierökologie
Schnittspahnstraße 3
64287 Darmstadt
Email: katja.wehner@tu-darmstadt.de

Prof. Dr. Michael Heethoff
TU Darmstadt / AG Evolutionäre Tierökologie
Schnittspahnstraße 3
64287 Darmstadt
Email: heethoff@bio.tu-darmstadt.de

Unterschätzte Gefahr durch pilzliche Krankheitserreger

Lebensbedrohliche Pilzinfektionen

FRANZISKA SCHMIDT | THORSTEN HEINEKAMP | AXEL A. BRAKHAGE



Konidiophor des humanpathogenen Schimmelpilzes *Aspergillus fumigatus* mit grün leuchtenden Sporen.

Foto: V. Voltersen (Leibniz-HKI).

Invasive Pilzinfektionen stellen global eine Bedrohung dar. Sie gehen mit Sterberaten von 30–90 Prozent einher und töten jährlich mehr als 1,5 Millionen Menschen weltweit. Trotz dieser Gefahr werden sie oft zu spät diagnostiziert oder ganz übersehen. Pilzinfektionen gelten bei der WHO inzwischen als globale infektiologische Herausforderung. Nur ein Bruchteil der bekannten Pilze wurde als krankheitserregend beim Menschen beschrieben. Die Interaktion dieser Pilze mit dem Menschen ist allerdings komplex. Sie haben Strategien entwickelt, um die Abwehr durch das Immunsystem zu unterlaufen.

Nach den Tieren mit ca. 7 Millionen Arten stellt das Reich der Pilze (Fungi) mit geschätzten 2,2–3,8 Millionen unterschiedlichen Arten das zweitgrößte Organismenreich der Eukaryoten dar [1]. Während bei den Tieren ca. 20 Prozent der Arten beschrieben werden konnten, kennen wir Schätzungen zufolge erst zwischen zwei und acht Prozent aller Pilzarten; die meisten Arten sind somit unbekannt.

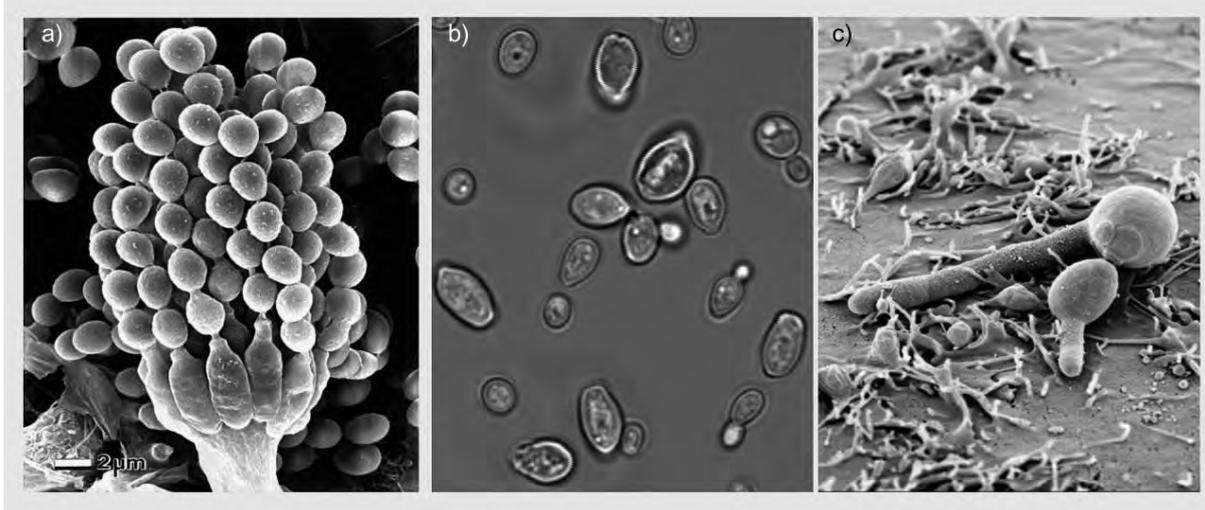
Pilze sind ubiquitäre Organismen, d. h. sie sind vermutlich in allen Habitaten auf der Erde anzutreffen. Uns begegnen sie als winzige Organismen: in der Luft, die wir atmen, und in der Nahrung, die wir zu uns nehmen. Kein Mensch ist frei von Pilzen; sie sind ein wichtiger Bestandteil unserer Haut, Lunge, des Mundes, Darms und der Vagina. Pilze begegnen uns auch als makroskopische Vielzeller wie der Champignon oder der bislang größte bekannte Organismus der Welt: ein Dunkler Hallimasch, *Armillaria ostoyae*, im US-Bundestaat Oregon. Er hat ein

unterirdisches Netzwerk aus Pilzfäden – ein Myzel – gebildet, das sich über eine Fläche von mehreren Quadratkilometern erstreckt und ein Gewicht von mehreren Tausend Tonnen aufweist [2].

Neben ihren vielfältigen Erscheinungsformen sind Pilze durch eine enorme Diversität des Stoffwechsels (Metabolismus) gekennzeichnet: Sie können fast alle auf der Erde vorkommenden organischen Substanzen abbauen und verwerten. Auf Grund dieser Eigenschaften und ihrer großen Anpassungsfähigkeit können sie in vermutlich allen Ökosystemen leben; sie besiedeln selbst extreme Lebensräume wie die Arktis, Wüsten oder salzhaltige Gewässer [3]. Ein eindrucksvolles Beispiel für die Anpassung von Pilzen an ihre jeweiligen Lebensräume ist die Besiedlung so ungewöhnlicher Nischen wie die des verunglückten Atomreaktors in Tschernobyl. Seit geraumer Zeit wird an den Reaktorwänden, aber auch in seiner Umgebung, das Wachstum stark pigmentierter (melanisierter) Pilze beob-

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 276 erklärt.

ABB. 1 | VEGETATIVE VERMEHRUNG VON PILZEN



a) Elektronenmikroskopische Aufnahmen eines Konidiophors von *Aspergillus fumigatus*. b) Sprossende Zellen der Hefe *Candida albicans*. c) Filamente von *C. albicans* auf Epithelzellen. Fotos: a) aus [26], b) F. Schmidt, c) K. Holland, M. Özel, K. Zakikhany, B. Hube.

achtet, welche der Strahlung widerstehen können [4]. Ein weiteres Beispiel für die große Anpassungsfähigkeit von Pilzen ist deren Isolation durch Wissenschaftler auf der internationalen Raumstation. Die bereits auf der Erde durch die Luft in die Raumkapsel gelangten Pilze können die Raumstation auch im Weltall besiedeln und trotz Schwerelosigkeit und kosmischer Strahlung wachsen [5].

Ein wichtiger Aspekt der Verbreitung von Pilzen liegt in ihrem Lebenszyklus und der Produktion der bereits erwähnten Sporen begründet. Sporen sind so klein und leicht, dass sie durch die Luft über weite Strecken transportiert werden können und Pilzen die Erschließung neuer Lebensräume ermöglichen. Wie bei der Spezies *Aspergillus fumigatus* erfolgt die Sporulation oft über die Ausbildung von Konidiophoren, sporentragenden Strukturen im Hyphengeflecht (Abbildung 1a). Die bei *A. fumigatus* gebildeten Sporen werden als Konidien bezeichnet und bilden lange Ketten. Eine alternative Variante der Vermehrung ist die Sprossung, bei der durch das Abschnüren einer Zellausstülpung eine Tochterzelle entsteht (Abbildung 1b). Dies ist z. B. der Fall bei *Candida albicans*. Dieser Pilz besitzt allerdings auch die Fähigkeit, Hyphen auszubilden, was wichtig für die Pathogenität des Pilzes ist (Abbildung 1c).

Pilze sind sesshaft und können keine Photosynthese betreiben, um Energie zu gewinnen. Als heterotrophe Organismen sind sie deshalb darauf angewiesen, die lebensnotwendigen Substrate aufzunehmen. Dafür zersetzen sie totes oder absterbendes organisches Material in ihrer Umgebung. Diese als saprophytisch bezeichnete Lebensweise der Zersetzung von totem Material und dessen Abbau zu organischen und anorganischen Verbindungen, welche wiederum als Lebensgrundlage von Pflanzen dienen, begründen die zentrale ökologische Rolle der Pilze im Nähr-

stoffkreislauf. Die Bandbreite an nutzbaren Nahrungsquellen ist enorm. Einige Pilze sind sogar darauf spezialisiert, Lignin – also die Hauptverbindung verholzter pflanzlicher Zellwände – abzubauen. Weitere Pilze von großer ökologischer Bedeutung sind Mykorrhiza-Pilze, ohne die die meisten Landpflanzen (80-90%) nicht optimal wachsen könnten [6]. Flechten – eine Symbiose von Pilzen mit Algen oder Cyanobakterien – können extreme Lebensräume wie z. B. blanken Fels besiedeln [7].

IN KÜRZE

- Lebensbedrohliche Pilzinfektionen sind unterschätzt und betreffen jährlich ca. **150 Millionen Menschen weltweit**.
- Die **zahlenmäßig häufigsten Infektionen** in Europa und Deutschland werden durch *Candida albicans*, *Aspergillus fumigatus* und weitere Spezies dieser Gattungen verursacht.
- Dem **angeborenen Immunsystem**, insbesondere neutrophilen Granulozyten und alveolaren Makrophagen, kommt große Bedeutung für die Verteidigung gegen diese Pilze zu.
- Verteidigungsmechanismen sind die **Phagozytose** und die intrazelluläre Prozessierung von Pilzzellen in diesen Phagozyten sowie die **Produktion antifungaler extrazellulärer Vesikel** durch neutrophile Granulozyten.
- Pilze haben Immunevasionsmechanismen entwickelt, mit denen **sie die Verteidigungsmechanismen unterlaufen** können. Dazu gehören Oberflächenproteine und insbesondere das Sporenpigment von *Aspergillus fumigatus*, mit denen die Pilze die Erkennung und ihre Abtötung in Phagosomen verzögern können.
- Sowohl der gezielte Transport von Antibiotika in Phagosomen als auch die Produktion aggressiver antifungaler Vesikel bieten möglicherweise **neue Therapieoptionen**.

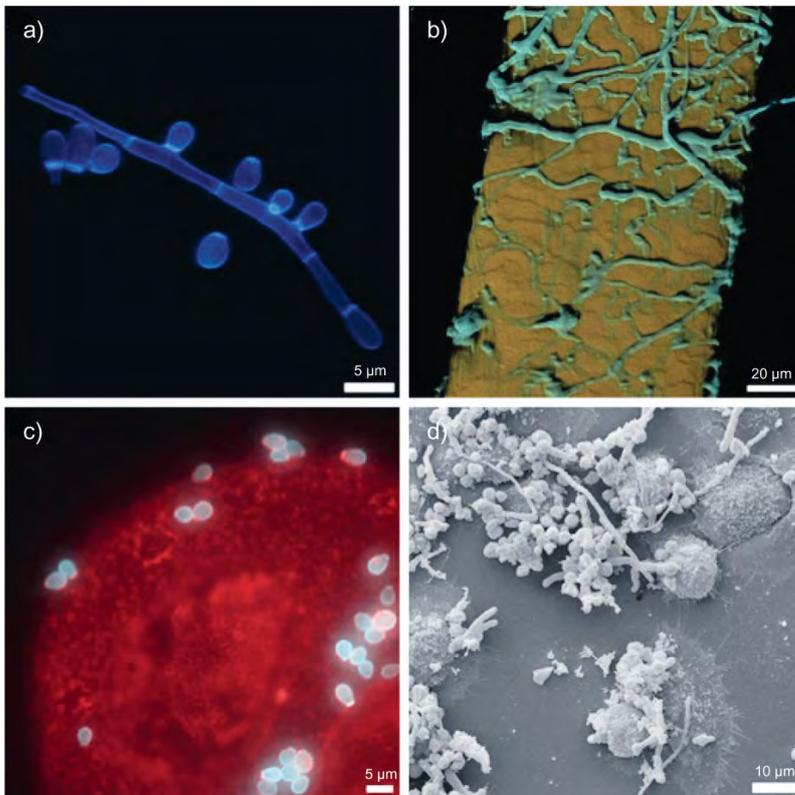


ABB. 2 Beispiele für Dermatophyten, Hyphen und Mikrokonidien von *Arthroderma benhamiae* auf Haaren und Keratin-bildenden Zellen. a) Fluoreszenzmikroskopische Aufnahme von Hyphen und Mikrokonidien. b) Kolonisierung von menschlichem Haar, cyan: pilzliche Hyphen, orange: Autofluoreszenz des Haares. c) Anheftung von Mikrokonidien an humane Keratin-bildende Zellen der Epidermis (Keratinozyten), cyan: pilzliche Hyphen, rot: gefärbte Keratinozyten. d) Menschliche Keratinozyten mit keimenden *A. benhamiae*-Mikrokonidien. Fotos aus [13].

Die Bedeutung von Pilzen reicht weit über den bereits erläuterten Nutzen für die Ökosysteme hinaus. Pilze sind auch von wirtschaftlichem Interesse, so z. B. in der Nahrungsmittelindustrie bei der Herstellung von Lebensmitteln wie Käse, Bier, Wein oder Sojasauce [8]. Des Weiteren ist ihre Fähigkeit der Produktion spezieller Naturstoffe von enormer gesellschaftlicher Bedeutung. Naturstoffe sind niedermolekulare Substanzen, von denen Pilze vermutlich Millionen verschiedene produzieren können. Einige dieser Verbindungen bilden die Grundlage wichtiger Medikamente wie Antibiotika (z. B. Penicilline und Cephalosporine) oder der cholesterinsenkenden Statine [9].

Pathogene Pilze: Gefährlich für Pflanzen und Menschen

Neben ihrem großen nützlichen Potenzial besitzen Pilze aber auch eine sehr gefährliche Seite: Sie sind gefürchtete Krankheitserreger von Pflanzen, Tieren und Menschen. Aus dem gesamten Organismenreich der Pilze und ▶ Oomyceten sind derzeit etwa 8000 Arten als pflanzenpathogen beschrieben worden [3]. Einige dieser Pilzpathogene weisen bereits Resistenzen gegen eingesetzte Fungizide auf.

Diese Entwicklung muss sorgfältig beobachtet werden, wenn man bedenkt, dass die Ernährung der Menschheit im Wesentlichen von nur fünf Pflanzenarten abhängt und dass für diese Pflanzen eine große Zahl von pathogenen Pilzen bekannt ist. Weiterhin hat die Schädigung einer solch großen Pflanzenbiomasse durch Pilze einen negativen Einfluss auf das Klima [10] (www.klimafakten.de, www.ippc.int/en/).

Eine direkte Schädigung des Menschen durch Pilze kann mindestens drei Ursachen haben:

1. Pilze produzieren Giftstoffe (Toxine) wie z. B. der Schimmelpilz *Aspergillus flavus*, der u. a. die Naturstoffe der Aflatoxine zu biosynthetisieren vermag, welche die stärksten natürlich vorkommenden krebserregenden Substanzen darstellen. Aflatoxine können sich in Lebensmitteln wie Erdnüssen, Pistazien oder getrockneten Früchten finden und wirken schon in kleinen Mengen krebserregend (karzinogen) [11].
2. Millionen von Menschen leiden an Allergien, die durch mit Pilzsporen assoziierten Molekülen verursacht werden und sehr schwere Verläufe zur Folge haben können [12].
3. Pilze können direkt Infektionen beim Menschen verursachen. Dabei lassen sich zwei große klinische Krankheitsbilder unterscheiden: Hautpilze infizieren die Oberflächen von Menschen und Tieren, während lebensbedrohliche invasive Pilzinfektionen einzelne Organe, aber auch den ganzen Körper in Mitleidenschaft ziehen können.

Hautpilze (Dermatophyten)

Der überwiegende Teil menschlicher Pilzinfektionen ist auf Hautpilze oder Dermatophyten zurückzuführen (Abbildung 2). Weltweit infizieren diese Pilze ca. 1 Milliarde Menschen pro Jahr [3]; in Deutschland sind etwa 9 Millionen Patienten jedes Jahr betroffen (ca. 12% der Bevölkerung). Die im engeren Sinne als Dermatophyten bezeichneten Fadenpilze sind durch die Sekretion des Enzyms Keratinase charakterisiert. Es katalysiert die Spaltung der Proteine der Hornsubstanz (Keratin) von Haaren und Nagelmaterial, wodurch die Pilze diese Substrate als Kohlenstoffquelle zum Wachstum verwenden können. Zu den bedeutenden Vertretern zählen *Microsporum canis*, *Epidermophyton floccosum*, *Arthroderma benhamiae* sowie Pilze der Gattung *Trichophyton*, darunter der häufigste Dermatophyt des Menschen *Trichophyton rubrum* [13, 14]. Lokale Hautmykosen können neben der Gruppe der Dermatophyten auch durch Hefen sowie Schimmelpilze verursacht werden. Insbesondere die Hefen *Candida albicans* und *Malassezia furfur* sind Bestandteil der Hautflora und gelten im Zusammenhang mit Hautmykosen als ▶ fakultative Pathogene. Eine Infektion des Menschen hängt von seinem Immunstatus, der Integrität der Haut und deren Säureschutzmantel ab. Charakteristische Symptome einer Hautmykose sind lokale Rötungen und Juckreiz sowie Bläschenbildung [14].

Auch Infektionen der Schleimhäute kommen vor. Sie werden häufig durch Vertreter der Gattung *Candida*, insbesondere *C. albicans*, verursacht. Von Schleimhautinfektionen durch *Candida* (oft als Hefe-Infektionen bezeichnet) sind weltweit mehr als 135 Millionen Frauen jährlich betroffen [3]. *C. albicans* kann ein Mitbewohner (Kommensale) des Menschen z. B. im Darm sein. Ob der Pilz wirklich auch in immunkompetenten Menschen nur ein harmloser Mitbewohner ist, wird zurzeit diskutiert, da erstaunlicherweise von 30 getesteten Pilzen nur *C. albicans* Th17-Immunezellen zu aktivieren vermochte. Th17-Zellen befinden sich im Gewebe, können aber auch im Blut zirkulieren. Sie sind an der Regulation der Immunantwort beteiligt und tragen zur schützenden Immunität bei, können aber auch zur Auslösung von Erkrankungen führen. Wenn es nun z. B. bei entzündlichen Erkrankungen des Gastrointestinaltrakts zu einer Vermehrung von *C. albicans* im Darm kommt, werden vermehrt Th17-Zellen aktiviert, die im Blut zirkulieren und auch die Lunge erreichen. Wenn diese Patienten Konidien von *A. fumigatus* einatmen, wie es alle Menschen regelmäßig tun, kann es zu einer pathologischen Kreuzreaktion kommen: Die Th17-Zellen reagieren übermäßig auf die den *C. albicans*-Proteinen sehr ähnlichen *A. fumigatus*-Proteine. Die Immunezellen vermehren sich und können eine Entzündung der Lunge auslösen. So könnte z. B. Asthma durch eine Darm-entzündung verursacht werden [15]. Gerade in den letzten Jahren wurde zunehmend die Bedeutung des Mikrobioms des Menschen als präventiver Faktor im Kontext mit Infektionen erkannt, z. B. zur Verhinderung von Darmentzündungen oder der Ausbreitung von *C. albicans* [16].

Verursacher lebensbedrohlicher Pilzinfektionen

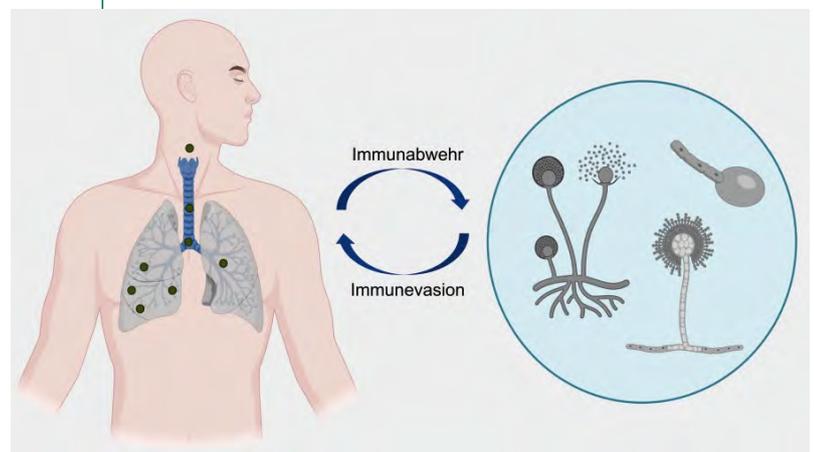
Von den bekannten Pilzen sind ca. 300 bisher als humanpathogen beschrieben worden. Ungefähr 90 Prozent aller Todesfälle durch pathogene Pilze werden durch Spezies der Gattungen *Aspergillus*, *Cryptococcus*, *Candida* oder *Pneumocystis* verursacht [3]. Einige dieser Pilze sind zu einem großen Problem in den Kliniken geworden, da systemische Pilzkrankheiten mit hohen Sterberaten einhergehen. Aktuelle Schätzungen gehen weltweit von rund 150 Millionen schweren, zum Teil lebensbedrohlichen Infektionen aus, von denen über 1,5 Millionen letztendlich zum Tod der Patienten führen [3]. Die Dunkelziffer scheint allerdings wesentlich höher zu sein. Entsprechend ihrer Bedeutung gelten Pilzinfektionen bei der WHO als globale Herausforderung. Unterstützt wird diese Einschätzung zusätzlich durch die *Centers for Disease Control and Prevention* (CDC) in den USA, welche auf Grund des schnellen Anstiegs von resistenten Erregerstämmen, *Candida* als eine gefährliche Bedrohung der menschlichen Gesundheit einstufen. Trotz dieser Gefahren werden Pilzinfektionen oft zu spät diagnostiziert oder ganz übersehen.

Die Prädisposition für lebensbedrohliche Pilzinfektionen ist hauptsächlich durch weitere Erkrankungen bezie-

hungsweise deren begleitende Therapien gegeben, insbesondere durch solche, die das Immunsystem schwächen oder funktionell beeinträchtigen. Dazu zählen z. B. Krebs-erkrankungen, hämatologische Erkrankungen oder Transplantationen. Allerdings lassen sich Prädispositionen in der modernen Medizin nicht verhindern, da darunter auch lebensrettende Therapien von Patienten z. B. mit Corticosteroiden, Zytostatika oder auch antibakteriellen Antibiotika fallen. Da die Zunahme solcher Therapien auf Grund des demographischen Wandels und der verbesserten Therapiemöglichkeiten von bisher schwer behandelbaren Krankheiten erwartet werden kann, ist auch mit einer steigenden Inzidenz von lebensbedrohlichen Pilzinfektionen zu rechnen. Der Klimawandel ist dabei noch unberücksichtigt – er könnte möglicherweise die Entstehung neuer krankheitserregender Pilze fördern, z. B. durch deren Adaptation an höhere Temperaturen wie aktuell bereits für *Candida auris* diskutiert wird [3]. *C. auris* wurde erstmals 2009 als Erreger einer Ohrinfektion (Latein *auris*: das Ohr) in Japan beschrieben. Dieser multiresistente Pilz wird zunehmend als nosokomialer Keim bei hospitalisierten Patienten beobachtet und wird von Mensch zu Mensch übertragen. Dieser Trend der Zunahme einer Sensibilisierung für Pilzinfektionen spiegelt sich auch in der Zunahme an Einsendungen von klinischen Proben an das Nationale Referenzzentrum für Invasive Pilzinfektionen wider, das gemeinsam von Jena und Würzburg organisiert wird (www.nrz-myk.de/). Invasive Mykosen beschränken sich allerdings zunehmend nicht nur auf abgegrenzte Risikogruppen, sondern treffen auch Patienten, die an chronischen Lungenkrankheiten leiden oder mit Influenzaviren oder SARS-CoV-2 infiziert sind [17, 18].

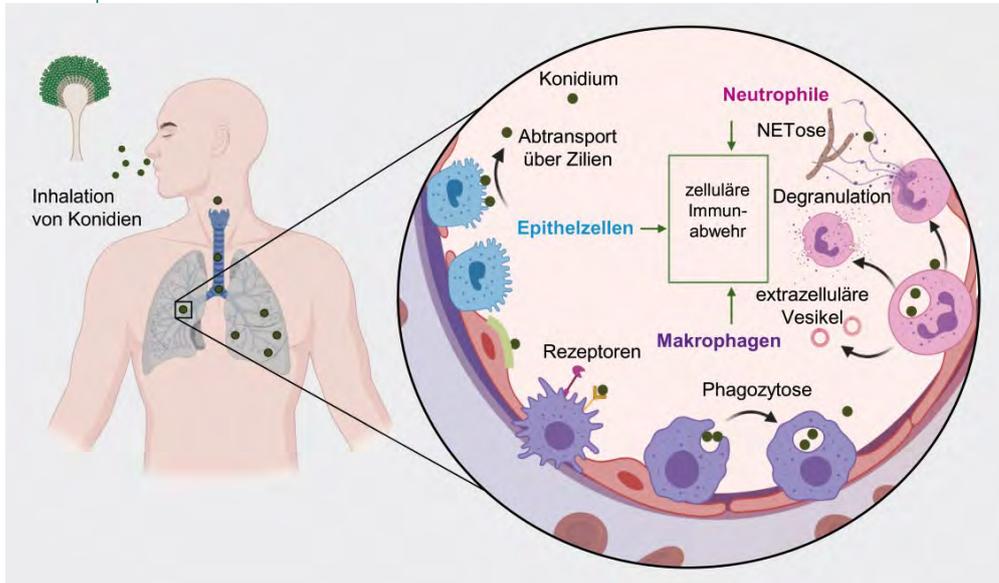
Die Pilzerreger, die zahlenmäßig die häufigsten invasiven Pilzinfektionen in Europa verursachen, sind *Candida albicans* und *Aspergillus fumigatus* sowie weitere Spezies dieser Gattungen (Abbildung 1). Die Pathophysiologie

ABB. 3 | VERTEIDIGUNG VERSUS IMMUNEVASION



Gegen die Immunabwehr des Menschen haben Pilze Eigenschaften entwickelt, die es ihnen erlauben, die Abwehr zu unterlaufen, was als Immunevasion bezeichnet wird.

ABB. 4 | VERTEIDIGUNG GEGEN KONIDIEN VON *A. FUMIGATUS*



In der Lunge bekämpfen Epithelzellen und verschiedene Immunzellen des angeborenen Immunsystems inhalede Konidien des Schimmelpilzes *Aspergillus fumigatus*. Für Details siehe Text.

der von diesen Pilzen in der Regel in immungeschwächten Patienten verursachten Infektionen reicht vom Befall einzelner Organe wie z. B. der Lunge, Nieren oder Leber bis hin zu einer Sepsis und Multiorganversagen. Die Diagnose pilzlicher Erkrankungen ist in vielen Fällen schwierig und erfolgt in der Regel zu spät. Die Therapie z. B. bei der

invasiven Aspergillose ist ineffektiv; neue Wirkstoffklassen für die Therapie fehlen. All das zusammen führt zu einer hohen Letalität dieser Erkrankungen, die zwischen 30 und 90 Prozent liegt, je nach betrachtetem Patientenkollektiv [3]. Weitere wichtige humanpathogene Pilze wie *Cryptococcus neoformans* kommen in Europa wesentlich weniger häufig vor als in den USA und Afrika, da dieser Pilz häufig mit nicht oder schlecht behandelten AIDS-Erkrankungen assoziiert ist [3].

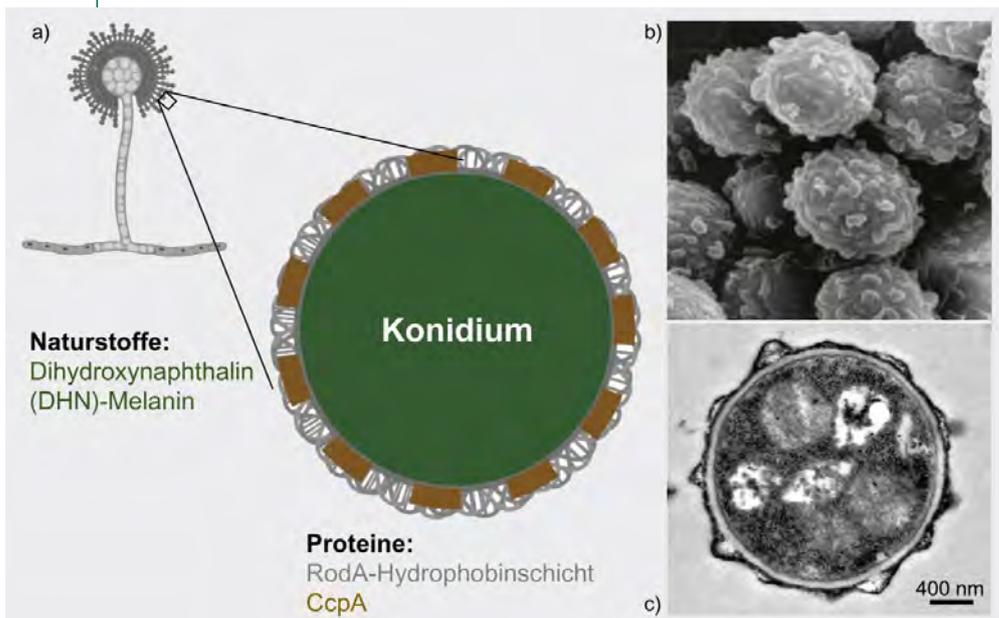
Immunabwehr versus Immunevasion

Ein entscheidender Aspekt in der Etablierung einer als invasive Aspergillose bezeichneten systemischen Infektion durch *A. fumigatus* ist der Immunstatus der Patienten. Die jährlich steigenden Zahlen von Organ-

und Knochenmarkstransplantationen, die Entwicklung neuer Chemotherapien zur Tumorbehandlung und Therapien, die zur Schwächung der Aktivität von Immunzellen führen, resultieren in einer stetig wachsenden Gruppe von Risikopatienten, bei denen die körpereigenen Verteidigungsmechanismen gestört sind. Eine solche Beeinträchtigung stellt den optimalen Nährboden für opportunistisch humanpathogene Erreger dar, zu denen auch *A. fumigatus* gehört. Die zusätzlichen Faktoren einer unzureichenden Diagnostik und die Zunahme an Resistenzen gegen Antimykotika, insbesondere der Azole, resultieren in einem Wettlauf gegen die Zeit, diese Infektionen einigermaßen unter Kontrolle zu halten. Die Interaktion von Pilzen mit dem Immunsystem des Menschen ist komplex. So spielt das Immunsystem die wesentliche Rolle für die Abwehr gegen Pilzinfektionen (Abbildung 3). Pilze wiederum haben zum Teil einzigartige Virulenzfaktoren entwickelt, die es ihnen erlauben, die Immunabwehr zu unterlaufen (Immunevasion) und in Konsequenz schwere Infektionen auszulösen.

Unsere Arbeitsgruppe beschäftigt sich mit beiden Aspekten von Infektionen durch *A. fumigatus*. Beim Einatmen gelangen Konidien in die feinzweigigen Lungenbläschen, wo sie neben Epithelzellen auf alveolare Ma-

ABB. 5 | MOLEKÜLE ZUR IMMUNEVASION AUF DER KONIDIENOBERFLÄCHE VON *A. FUMIGATUS*



a) Schematische Darstellung von DHN-Melamin (grün) und Proteinen auf der Konidienoberfläche. b) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Konidien von *A. fumigatus*. c) Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme eines Konidiums von *A. fumigatus*; gut zu erkennen ist die elektronendichte äußere Schicht aus DHN-Melamin. Fotos: b) aus [27], c) H. Schmidt, Leibniz-HKI.

krophagen und neutrophile Granulozyten treffen (Abbildung 4). Die letzteren werden als professionelle ▶ Phagozyten bezeichnet. Sie bilden in Kombination mit weiteren Zelltypen eine wichtige Komponente der angeborenen Immunabwehr [19]. Alveolare Makrophagen, neutrophile Granulozyten und auch in geringerem Maße Epithelzellen fressen (phagozytieren) eingeatmete Sporen. Die Sporen besitzen allerdings Eigenschaften, die es ihnen erlauben, das Immunsystem zu unterlaufen und sich im Menschen zu vermehren.

Grundsätzliche Voraussetzung für die Pathogenität eines Pilzes ist dessen Fähigkeit bei 37 °C wachsen zu können, was bei weitem nicht für alle Pilze gilt und insbesondere häufig nicht für Umweltpilze. Weiterhin haben pathogene Pilze Strategien entwickelt, um an das wenige, frei verfügbare Eisen im Körper des Menschen zu gelangen. *A. fumigatus* bildet dafür kleine, spezielle eisenbindende Moleküle, Siderophore, die auch zu den Naturstoffen zählen und Eisen mit einer sehr hohen Affinität zu binden vermögen [9]. Pilze besitzen auf ihrer Oberfläche Strukturen, die von menschlichen Rezeptoren als körperfremd erkannt werden, wie z. B. β -1,3-Glukan in der pilzlichen Zellwand von dem Rezeptor Dektin-1 erkannt wird. Diese Erkennung ist die Grundlage für die Initiierung der Immunabwehr. Um sich nun vor dem Immunsystem zu verstecken, besitzt *A. fumigatus* auf seiner Oberfläche Proteine und spezielle Naturstoffe wie z. B. ein Melaninpigment, die es dem Immunsystem erschweren, die Sporen zu erkennen, indem sie die durch Rezeptoren erkennbaren Moleküle verdecken. Dieses Konzept der Tarnkappen-Moleküle wurde am Beispiel der Hydrophobine auf der Konidienoberfläche von *A. fumigatus* entdeckt [20] und schließt auch weitere Proteine wie CcpA ein [21] (Abbildung 5). Damit sind Pilzsporen vor einer schnellen Entdeckung durch das Immunsystem geschützt, wodurch eine Infektionsetablierung begünstigt wird.

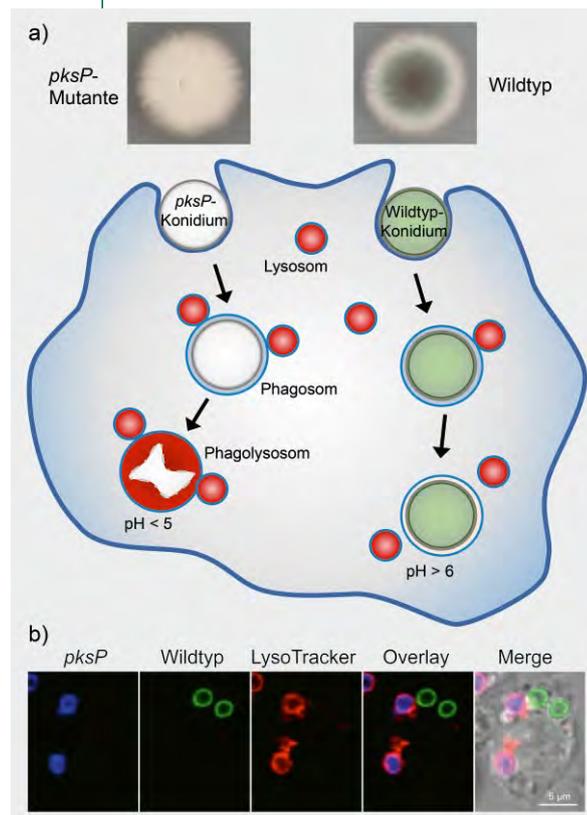
Warum es sich in der Evolution durchgesetzt hat, dass unser Immunsystem solche Pilze schlechter erkennt, obwohl dies ja offensichtliche Nachteile besitzt, wird diskutiert [20]. Eine Erklärung könnte sein, dass die verminderte Erkennung der vielen Sporen, die wir täglich einatmen einen Selektionsvorteil darstellte. Eine schnelle, überschießende Immunreaktion mit Schädigung des menschlichen Gewebes wird auf diese Weise bei uns in der Regel vermieden. Ein Nachteil ist natürlich die durch die schlechtere Immunerkennung verzögerte Bekämpfung dieser Pilze, was in einigen Fällen zu schweren Infektionen führen kann.

Ein prominenter Naturstoff und wesentlicher Virulenzfaktor von *A. fumigatus*, der ein zentrales Molekül der Immunevasion darstellt, ist das rauchfarbene grau-grüne Melaninpigment der Sporen, das *A. fumigatus* auch seinen Namen gab: Das lateinische Wort *fumus* bedeutet „der Rauch“ (Abbildungen 5 und 6). Bei dem Pigment handelt es sich um ein spezielles Polyketid-Derivat, das als Dihydroxynaphthalin (DHN)-Melanin bezeichnet wird.

DHN-Melanin besitzt vielfältige Wirkungen auf das Immunsystem, wie die reduzierte Bindung von ▶ Opsoninen an Konidien oder die Inhibition der Phagosomenreifung, die im Folgenden ausgeführt wird [22].

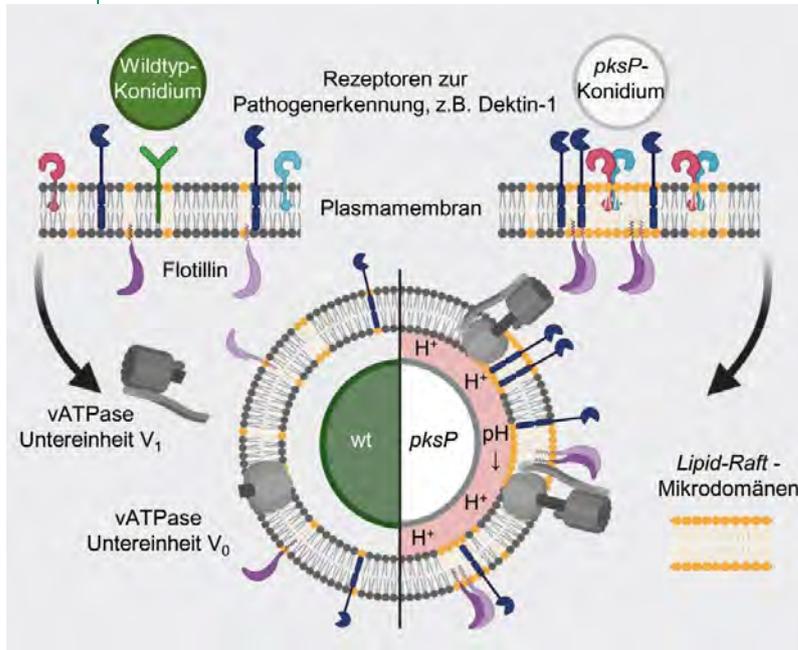
Normalerweise werden eingeatmete Partikel wie auch Sporen von z. B. Makrophagen in einem Prozess, der als Phagozytose bezeichnet wird, erkannt und internalisiert. Die membranumhüllten Sporen (beispielsweise nicht melanisierte Konidien der *pksP*-Mutante) befinden sich dann intrazellulär in Phagosomen, die durch weitere Schritte zu Phagolysosomen reifen können, welche durch einen niedrigen pH-Wert und das Vorhandensein reaktiver Sauerstoffspezies und aggressiver Enzyme charakterisiert sind (Abbildung 6). Dadurch werden eingeatmete Mikroorganismen in der Regel verdaut, also abgetötet. Bei *A. fumigatus* haben wir beobachtet, dass Sporen – solange sie ihre Melaninhülle besitzen – schlechter erkannt und phagozytiert

ABB. 6 | HEMMUNG DER PHAGOSOMENANSÄUERUNG DURCH DHN-MELANIN VON *A. FUMIGATUS*



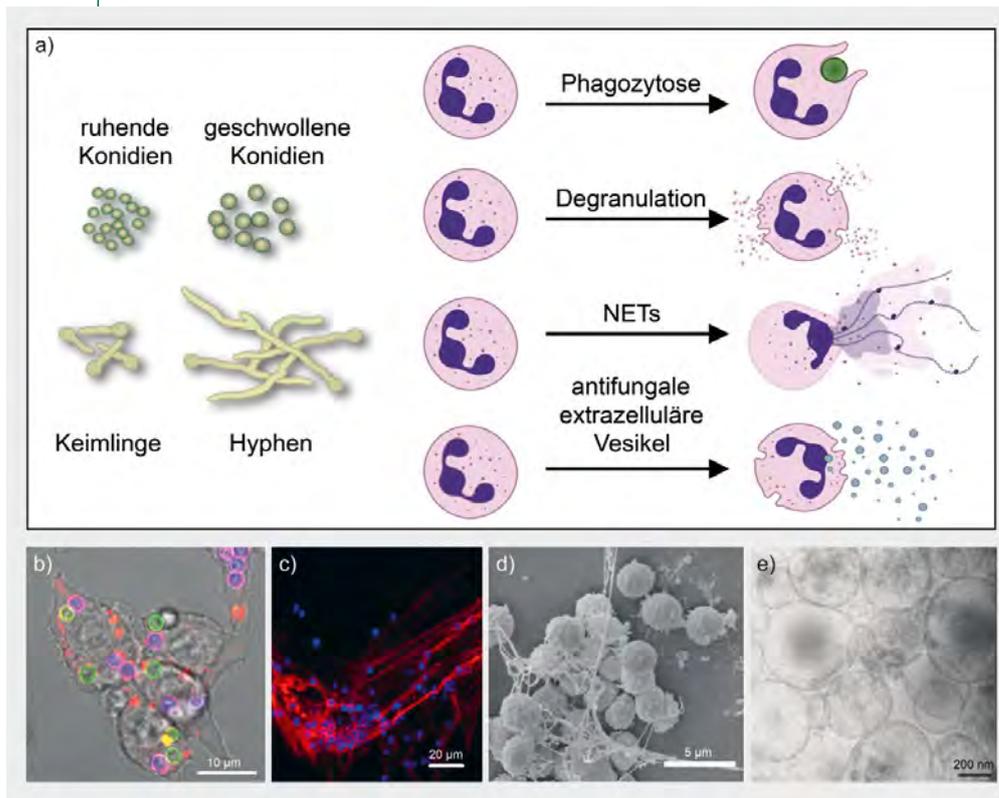
a) Schematische Darstellung der intrazellulären Prozessierung von Konidien der weißen *pksP*-Mutante und von grünen Wildtyp-Konidien; für Details siehe Text. b) Fluoreszenzmikroskopische Aufnahmen der Ansäuerung von Phagosomen in RAW264.7 Makrophagen; eine Makrophage hat gleichzeitig Wildtyp-Konidien (in grün markiert) und Konidien der weißen *pksP*-Mutante (in blau markiert) phagozytiert. Angesäuerte konidienhaltige Phagosomen sind mit LysoTracker rot gefärbt. Nur *pksP*-Konidien zeigen einen roten Ring, charakteristisch für angesäuerte Phagosomen. Fotos: a) T. Heinekamp, b) aus [23].

ABB. 7 | INTERAKTION VON *A. FUMIGATUS*-KONIDIEN MIT DER PHAGOSOMENMEMBRAN



Das DHN-Melanin der Konidien stört die Ausbildung von *Lipid-Raft*-Mikrodomänen, die für die Funktionsfähigkeit der Phagosomen bedeutsam sind. Ausschnitt aus der Membran von Phagosomen (oben) und Darstellung der Membran eines Phagosoms (unten); dargestellt ist die Situation nach Internalisierung eines grünen Wildtyp-Konidiums (links) und eines weißen *pksP*-Konidiums (rechts). Für Details siehe Text.

ABB. 8 | AKTIVITÄT NEUTROPHILER GRANULOZYTEN GEGEN *A. FUMIGATUS*



a) Übersicht über die Abwehrmechanismen neutrophiler Granulozyten. b) Immunfluoreszenzmikroskopie phagozytierter Konidien nach Ko-Infektion mit melanisierten Konidien sowie der pigmentlosen *pksP*-Mutante. c) Fluoreszenzmikroskopie und d) REM-Aufnahme von Netzfäden gegen Konidien. e) TEM-Aufnahme extrazellulärer Vesikel. Fotos: b) F. Schmidt, c, d) aus [24], e) aus [25].

werden (Tarnkappeneffekt). Wird die Phagozytose dann doch eingeleitet, wenn die Sporen z. B. schwellen, werden die Konidien von Membranen umschlossen, in die Zelle gezogen (internalisiert) und so in die Phagosomen aufgenommen. Durch deren anschließende Verschmelzung mit zahlreichen zellulären Vesikeln, den Lysosomen, entsteht das angesäuerte Phagolysosom. Dieses bildet die Grundvoraussetzung für die Aktivierung verschiedener abbauender Enzyme wie z. B. Proteasen zum Abbau von Proteinen (Abbildung 6). Das Resultat der Phagozytose mit intrazellulärer Prozessierung der Sporen ist das Abtöten der Pathogene, die Sekretion bestimmter Botenstoffe, den Zytokinen, zur Rekrutierung weiterer Immunzellen, und die Präsentation von Antigenen für Zellen des erworbenen Immunsystems.

Ganz anders verhält es sich allerdings mit melanisierten Konidien. Deren Phagozytose ist verzögert, und wenn sie dann doch in Phagosomen landen, weisen diese eine verminderte Ansäuerung auf. Als Resultat können Makrophagen Konidien mit Melanin schlechter abtöten, die Konidien überleben in den Makrophagen und sind sogar geschützt vor weiteren Immunzellen (Abbildung 6). Fehlt die Melaninhülle in den Konidien, wie z. B. in der „weißen“ *pksP*-Mutante, ist dagegen der normale Prozess der Phagozytose zu beobachten, also eine vollständige Ansäuerung und effiziente Abtötung aufgenommener Konidien (Abbildung 6). Diese und weitere Ergebnisse belegten die große Bedeutung von DHN-Melanin für die Immuneva-

sion. Der zu Grunde liegende molekulare Mechanismus war allerdings für lange Zeit ungeklärt und konnte erst kürzlich von uns entschlüsselt werden. Es handelt sich um einen neuen Pathogenese-Mechanismus, der darauf beruht, dass DHN-Melanin die Bildung von *Lipid-Raft*-Mikrodomänen in der phagosomalen Membran stört, wodurch die Bildung funktionaler Phagolysosomen verhindert wird (Abbildung 7). Die Konsequenz ist eine reduzierte Rekrutierung verschiedener Proteine an die Membran des Phagosoms. Eines dieser Proteine ist die vakuoläre (v)ATPase, eine Protonenpumpe, welche Wasserstoff-

ionen in das Lumen der Phagosomen pumpt. Dieser Ionentransport ist Grundlage der bereits beschriebenen Absenkung des pH-Wertes. *Lipid Rafts* bilden die Plattform für den Zusammenbau der vATPase-Komplexe in der phagosomalen Membran (Abbildung 7). Eine Reduktion von *Lipid-Raft*-Strukturen in der Membran hat eine verminderte Ansäuerung von Phagosomen, die melanisierte Konidien enthalten, zur Folge. Dadurch wird verhindert, dass Sporen schnell abgetötet werden, und deren verlängerte Überlebenszeit ermöglicht ihre Auskeimung und die Infiltration der Lunge. *Lipid Rafts* in der phagolysosomalen Membran werden durch die Chaperone Flotillin (Flot)-1 und Flot-2 stabilisiert (Abbildung 7). Diese Erkenntnis wurde mit Hilfe von *knockdown*-Experimenten in Zellkulturen und der Untersuchung von Flot-*knockout*-Mäusen erlangt. Menschen mit einem bestimmten Einzelnukleotid-Polymorphismus (SNP) im Flot-1 Gen besitzen ein erhöhtes Risiko, an einer invasiven Aspergillose zu erkranken [23]. Die Entdeckung dieses SNPs kann in Zukunft helfen, Risikopatienten zu erkennen.

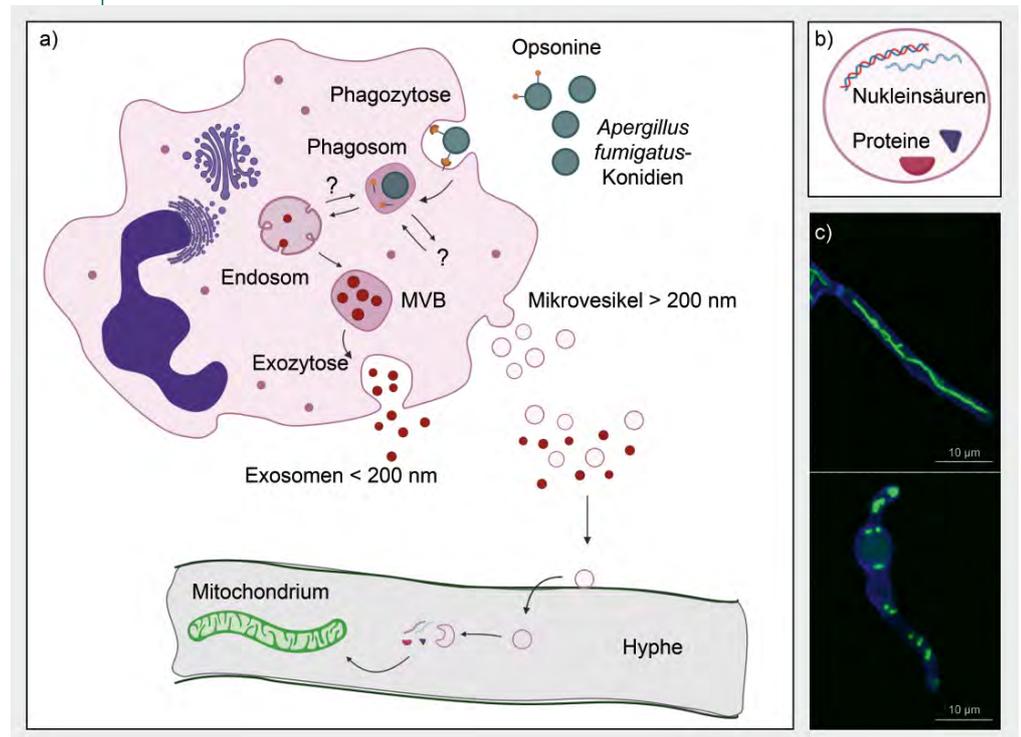
Auf Grund unserer Erkenntnisse zur Interferenz von Konidien mit der Reifung funktionaler Phagolysosomen versuchen wir auch Therapieoptionen zu evaluieren. Ein Ansatz basiert auf der Verwendung von polymerbasierten Nanopartikeln kombiniert mit makromolekularen Prodrugs, die erst nach Aufnahme im Sporen-enthaltenden Phagosom von Makrophagen freigesetzt werden und dort gezielt wirken. Es sollte möglich sein, phagosomale Pathogene mit solchen Nanopartikeln, die mit Antimykotika beladen sind, zu erreichen und dadurch sehr gezielt abzutöten. Auf diese Weise könnten neue Wirkstoffe für die Therapie von Pilzinfektionen eingesetzt werden, mit dem zusätzlichen Vorteil von geringeren Nebenwirkungen für die Patienten. Unsere Erkenntnisse eröffnen möglicherweise neue Behandlungsmöglichkeiten auch für andere Infektionserreger, die in Phagosomen überleben.

Antifungale extrazelluläre Vesikel zur Abtötung von Pilzen

Einen zweiten Zelltyp, der vermutlich zur Abwehr einer *Aspergillus*-Infektion am wichtigsten ist, bilden neutrophile Granulozyten, die verschiedene Angriffsmechanismen gegen Pilze besitzen. Auch diese kurzlebigen, aggressiven Immunzellen kön-

nen Konidien und kurze Keimlinge phagozytieren (Abbildung 8). Wenn die ausgekeimten Sporen und die Keimlinge zu groß werden, können sie weder von Makrophagen noch von neutrophilen Granulozyten phagozytiert werden. Dann ist die Abtötung solcher Keimlinge und auch Hyphen durch extrazelluläre Mechanismen neutrophiler Granulozyten erforderlich. Dazu zählt z. B. die Degranulation: Die Zellen scheiden einen Cocktail von aggressiven, Mikroorganismen abtötenden und verdauenden Enzymen aus. Einen weiteren potenziellen Mechanismus haben wir beobachtet, als neutrophile Granulozyten nach Ko-Inkubation mit Sporen und Hyphen von *A. fumigatus* „neutrophile extrazelluläre Netze“ (NETs) produzierten [24] (Abbildung 8). Diese schon vorher bekannten Chromatinfasern werden von Immunzellen wie ein Netz ausgeworfen und sollen die Verbreitung von Infektionserregern im Gewebe verhindern. Auf *C. albicans* wirken die in den Netzen vorhandenen Proteine fungizid; bei *A. fumigatus* konnten wir dies nicht beobachten, so dass die Bildung von NETs durch neutrophile Granulozyten kein wirksames Mittel der Abtötung darstellt.

ABB. 9 | BIOGENESE VON ANTIFUNGALEN EXTRAZELLULÄREN VESIKELN



a) Für die Produktion von antifungalen extrazellulären Vesikeln (afEVs) müssen neutrophile Granulozyten Wildtyp-Konidien phagozytieren. Die dadurch erzeugten Signale für die Produktion von afEVs sind unbekannt. Extrazelluläre Vesikel können von der Membran abgeschnürt werden (Mikrovesikel) oder entstehen durch Integration von kleinen Vesikeln in Endosomen und der Bildung von multivesikulären „Bodies“ (MVBs), die zur Zelloberfläche bewegt werden und die Exosomen entlassen. Mikrovesikel und Exosomen adhären an Hyphe und werden sogar in Hyphe aufgenommen. b) Beispiele für die Fracht von extrazellulären Vesikeln. c) Fluoreszenzaufnahmen von Mitochondrien (grün) in einer Hyphe von *A. fumigatus* (blaue Umrandung), oben: unbehandelt, unten: behandelt mit afEVs von neutrophilen Granulozyten. Es ist deutlich die Fragmentierung der Mitochondrien zu erkennen, die auf die Abtötung der Hyphe hinweist. Fotos: c) aus [25].

Anders verhält es sich mit Pilzhyphe abtötenden extrazellulären Vesikeln, die von Neutrophilen gebildet werden [25]. Vermutlich produziert jeder neutrophile Granulozyt ständig kleine, membranumfasste, extrazelluläre Vesikel. Sporen von *A. fumigatus* induzieren nun die Produktion von Vesikeln, die Pilzhyphe abtöten können (antifungale extrazelluläre Vesikel), die z. T. sogar von den Pilzhyphe aufgenommen werden und so vermutlich noch besser ihre toxische Fracht auf die Pilze übertragen können (Abbildung 9). Damit wurde eine neue extrazelluläre Waffe der Neutrophilen gegen Pilze entdeckt, die zur Entwicklung neuer Diagnostika und Therapieformen verhelfen könnte. So wäre es denkbar, extrazelluläre Vesikel mit bestimmte Krankheitserreger abtötenden Proteinen oder anderen Molekülen mit Hilfe von synthetischer Biologie zu füllen und Patienten zu verabreichen. Ebenso wäre denkbar, zur Diagnostik nach Pilz-spezifischen extrazellulären Vesikeln im Blut von Patienten zu fahnden.

Zusammenfassung

Invasive Pilzinfektionen gehen mit Sterberaten von 30–90 Prozent einher und töten weltweit jährlich mehr als 1,5 Millionen hauptsächlich immungeschwächte Menschen. Trotz dieser Gefahr werden invasive Pilzinfektionen oft zu spät diagnostiziert und ihre Therapiemöglichkeiten sind begrenzt. Die aktuelle Forschung hat zum Ziel, sowohl die Verteidigungsstrategien des menschlichen Wirts als auch die Mechanismen verstehen zu lernen, mit denen Pilze die Immunabwehr unterlaufen können. Wichtige Immunzellen sind Makrophagen und neutrophile Granulozyten.

GLOSSAR

fakultative Pathogene: Erreger, die einen Wirt mit geschwächtem Immunstatus benötigen, um Krankheiten zu verursachen.

nosokomiale Keime: Krankheitserreger, die im Verlauf eines Krankenhausaufenthalts eine Infektion verursachen.

Phagozyten: Fresszellen (Makrophagen, Granulozyten), die Mikroorganismen aufnehmen und zerstören.

Oomyceten: Die Eipilze bilden eine eigene Organismengruppe, die enger mit Algen als mit Pilzen verwandt ist. Daher werden sie auch als Schein- oder Algenpilze bezeichnet. Zu den Eipilzen zählen viele Pflanzenpathogene, wie z. B. *Phytophthora infestans*, der Erreger der Kraut- und Knollenfäule bei Kartoffeln.

Opsonine: Körpereigene Proteine, die an Mikroorganismen binden und diese für die Erkennung durch Phagozyten markieren.

Lipid-Raft-Mikrodomänen: Kleine (10–200 nm) Bereiche in Zellmembranen mit einer speziellen Lipid- und Proteinzusammensetzung. Lipid Rafts zeichnen sich durch eine charakteristische Anreicherung von Sterolen (Cholesterin) und Sphingolipiden aus. Als geordnete Membrandomänen dienen Lipid Rafts z. B. der Bildung von Molekülclustern, die an der zellulären Signalübertragung beteiligt sind.

*Einige pathogene Pilze, wie *Aspergillus fumigatus*, interferieren mit der Reifung von Phagosomen und können so in diesen Zellkompartimenten, geschützt vor dem restlichen Immunsystem, eine bestimmte Zeit überleben und sich dann ausbreiten. Es wird deshalb in Zukunft wichtig sein, gezielt Wirkstoffe in Phagosomen transportieren zu können, um solche intrazellulären Krankheitserreger effektiv zu erreichen. Neutrophile Granulozyten sind essentiell für die Abwehr von Pilzkrankungen. Sie produzieren auch antifungale extrazelluläre Vesikel, die *A. fumigatus* abtöten und die ein großes Potenzial als neuartiger Therapieansatz gegen Infektionen, aber auch für die Diagnose von Infektionskrankheiten aufweisen.*

Summary

Life-threatening fungal infections

*Invasive fungal infections are associated with mortality rates ranging from 30–90 per cent and kill more than 1.5 million mainly immunosuppressed people every year worldwide. Despite this threat, the diagnosis of these invasive fungal infections is often delayed and therapeutic options are limited. Current research aims at understanding defense strategies of the human host as well as the mechanisms allowing fungi to evade the immune defense. Important immune cells are macrophages and neutrophilic granulocytes. Some pathogenic fungi – like *Aspergillus fumigatus* – interfere with the maturation of phagosomes in these cells and are able to survive for a certain time in this cell compartment – well protected against the remaining immune system – and then they spread. Thus – in the future – it will be important to specifically target phagosomes and transport substances into them to fight such intracellular pathogens. Neutrophilic granulocytes are essential for defending invasive fungal infections. These cells also produce antifungal extracellular vesicles that kill *A. fumigatus*. Extracellular vesicles do not only have a great potential as novel therapeutic approach against infections but also for the diagnosis of infectious diseases.*

Danksagung

Wir bedanken uns bei allen Mitarbeitern für die exzellenten Kooperationen zwischen den verschiedenen Gruppen unserer Forschungsprogramme. Diese Arbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft durch den SFB/TR 124 *FungiNet* – Pathogene Pilze und ihr menschlicher Wirt – Netzwerke der Interaktion, den SFB 1278 *PolyTarget* – Polymerbasierte Nanopartikel-Bibliotheken für die Entwicklung zielgerichteter anti-inflammatorischer Strategien, das DFG-Exzellenzcluster *Balance of the Microverse* und das BMBF-Programm *InfectControl* unterstützt. Einige Abbildungen wurden mit BioRender.com erstellt.

Schlagworte

Pilze, Pilzinfektionen, Immunzellen, Immunevasion, extrazelluläre Vesikel, Phagosomen

Literatur

- [1] D. L. Hawksworth, R. Lücking (2017). Fungal Diversity Revisited: 2.2 to 3.8 Million Species. *Microbiol. Spectr.* 5, <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.FUNK-0052-2016>
- [2] C. L. Schmitt et al. (2008). United States Department of Agriculture: The Malheur National Forest. Location of the World's Largest Living Organism [The Humongous Fungus].
- [3] M. C. Fisher et al. (2020). Threats Posed by the Fungal Kingdom to Humans, Wildlife, and Agriculture. *mBio* 11, <https://doi.org/10.1128/mBio.00449-20>
- [4] A. Casadevall et al. (2017). Melanin, Radiation, and Energy Transduction in Fungi. *Microbiol Spectr* 5, <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.FUNK-0037-2016>
- [5] G. De Middeleer et al. (2019). Fungi and Mycotoxins in Space – A Review. *Astrobiology* 19, 915–926.
- [6] M. G. A. van der Heijden et al. (2015). Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. *New Phytol* 205, 1406–1423.
- [7] A. Genre et al. (2020). Unique and common traits in mycorrhizal symbioses. *Nat Rev Microbiol* 18, 649–660.
- [8] J. Dupont et al. (2017). Fungi as a Source of Food. *Microbiol Spectr* 5, <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.FUNK-0030-2016>
- [9] A. A. Brakhage (2013). Regulation of fungal secondary metabolism. *Nat Rev Microbiol* 11, 21–32.
- [10] M. C. Fisher et al. (2012). Emerging fungal threats to animal, plant and ecosystem health. *Nature* 484, 186–94.
- [11] W. Cao et al. (2022). Aflatoxin B1: metabolism, toxicology, and its involvement in oxidative stress and cancer development. *Toxicol Mech Methods*, 1–25.
- [12] M. G. Blango et al. (2019). Conidial surface proteins at the interface of fungal infections. *PLoS Pathog* 15, e1007939.
- [13] A. Burmester et al. (2011). Comparative and functional genomics provide insights into the pathogenicity of dermatophytic fungi. *Genome Biol.* 12, R7.
- [14] N. M. Martinez-Rossi et al. (2021). State-of-the-Art Dermatophyte Infections: Epidemiology Aspects, Pathophysiology, and Resistance Mechanisms. *J Fungi (Basel)*, 629.
- [15] P. Bacher et al. (2019). Human Anti-fungal Th17 Immunity and Pathology Rely on Cross-Reactivity against *Candida albicans*. *Cell* 176, 1340–1355.e15.
- [16] M. H. Mirhakkak et al. (2021). Metabolic modeling predicts specific gut bacteria as key determinants for *Candida albicans* colonization levels. *Isme j* 15, 1257–1270.
- [17] K. Am. Marr et al. (2021). Aspergillosis Complicating Severe Coronavirus Disease. *Emerg Infect Dis* 27, 18–25.
- [18] F. L. van de Veerdonk et al. (2017). Influenza-Associated Aspergillosis in Critically Ill Patients. *Am J Respir Crit Care Med* 196, 524–527.
- [19] A. A. Brakhage et al. (2010). Interaction of phagocytes with filamentous fungi. *Curr Opin Microbiol* 13, 409–15.
- [20] V. Aimananda et al. (2009). Surface hydrophobin prevents immune recognition of airborne fungal spores. *Nature* 460, 1117–21.
- [21] V. Voltersen et al. (2018). Proteome Analysis Reveals the Conidial Surface Protein CcpA Essential for Virulence of the Pathogenic Fungus *Aspergillus fumigatus*. *mBio* 9, <https://doi.org/10.1128/mBio.01557-18>.
- [22] T. Heinekamp et al. (2015). Interference of *Aspergillus fumigatus* with the immune response. *Semin Immunopathol* 37, 141–52.
- [23] F. Schmidt et al. (2020). Flotillin-Dependent Membrane Microdomains Are Required for Functional Phagolysosomes against Fungal Infections. *Cell Rep* 32, 108017.
- [24] S. Bruns et al. (2010). Production of extracellular traps against *Aspergillus fumigatus* in vitro and in infected lung tissue is dependent on invading neutrophils and influenced by hydrophobin RodA. *PLoS Pathog* 6, e1000873.
- [25] I. A. Shopova et al. (2020). Human Neutrophils Produce Antifungal Extracellular Vesicles against *Aspergillus fumigatus*. *mBio* 11, <https://doi.org/10.1128/mBio.00596-20>
- [26] A. A. Brakhage et al. (1999). Pigment Biosynthesis and Virulence. *Contrib Microbiol* 2, 205–215.
- [27] B. Jahn et al. (2000). Interaction of human phagocytes with pigmentless *Aspergillus* conidia. *Infect Immun* 68, 3736–9.

Verfasst von:



Franziska Schmidt studierte Biologie (Bachelor) an der Friedrich-Schiller-Universität Jena und absolvierte von 2014–2016 den Masterstudiengang Mikrobiologie ebenfalls in Jena. Seit 2016 war sie Doktorandin in der Arbeitsgruppe von Axel Brakhage am Leibniz Institut für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie (Leibniz-HKI) in Jena. Seit 2021 ist sie Postdoc in derselben Gruppe.



Thorsten Heinekamp studierte Biologie (Diplom) an der Universität Bielefeld. Die Promotion erfolgte 2002 an der Universität Göttingen, seit 2003 ist er Postdoc, wissenschaftlicher Mitarbeiter und Gruppenleiter in der Abteilung von Axel Brakhage, erst an der Universität Hannover, dann am Leibniz-HKI in Jena.



Axel Brakhage hat seit 2004 den Lehrstuhl für Mikrobiologie und Molekularbiologie am Institut für Mikrobiologie der Universität Jena inne und ist seit 2005 Direktor des Leibniz-Instituts für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie (Leibniz-HKI) in Jena sowie Leiter der Abteilung Molekulare und Angewandte Mikrobiologie. Er ist Sprecher des SFB/TR „Pathogene Pilze und ihr menschlicher Wirt – Netzwerke der Interaktion (FungiNet)“, des Exzellenzclusters Balance of the Microverse, und des BMBF-Konsortiums InfectControl.

Korrespondenz:

Prof. Dr. Axel A. Brakhage
Leibniz Institut für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie (Leibniz-HKI)
Adolf-Reichwein-Str. 23, 07745 Jena
Email: axel.brakhage@leibniz-hki.de

Fabel oder Tatsache?

Nichtgenetische Vererbung

DENIS MEUTHEN



Mit Mechanismen der nichtgenetischen Vererbung können Organismen folgende Generationen über den Zustand der Umwelt informieren, ohne die eigene Basensequenz zu verändern. Das ermöglicht ihren Nachkommen eine vorteilhafte Anpassung an veränderte Umwelten in Zeiträumen, die für eine genetische Evolution zu kurz sind. Nach einem kurzen historischen Rückblick werden zuerst die Mechanismen der nichtgenetischen Vererbung vorgestellt. Es folgen eine Diskussion der Bedingungen für deren Evolution und eine Präsentation aktueller Forschungsthemen.

Jean-Baptiste de Lamarck behauptete am Anfang des 19. Jahrhunderts, dass Lebewesen im Laufe ihres Lebens vorteilhafte Anpassungen an die Umwelt erwerben und diese an die Nachkommen weitergeben. Doch es dauerte nicht lange, bis die Forschungsergebnisse von Darwin und Mendel die Mechanismen genetischer Veränderung, genetischer Vererbung und natürlicher Selektion erklärten. Dadurch stellte sich Lamarcks Evolutionstheorie als falsch heraus, und über ein Jahrhundert lang wurde jegliche Möglichkeit der Anpassung von Organismen an ihre Umwelt innerhalb einer Generation sowie eine nichtgenetische Vererbung solcher Merkmale dem Reich der Fabeln zugeordnet [1]. Doch schon in den 1930er Jahren stellte man fest, dass Ähnlichkeiten zwischen Eltern und ihren Nachkommen nicht nur mit genetischer Vererbung zu erklären sind. Pferdezüchter bemerkten, dass die Fohlen von großen Stuten schneller wuchsen als jene von kleinen

Stuten [2]. Da dieser Effekt unabhängig von der Körpergröße der Väter war, wurde eine rein genetische Vererbung als unwahrscheinlich betrachtet. Nur wenig später beobachtete man, dass angefressene Exemplare des Acker-Rettichs (*Raphanus repbanistrum*) Nachkommen erzeugten, welche mehr bittere Senfölglykoside enthalten und somit für Pflanzenfresser ungenießbar sind [3]. Auch in Wasserflöhen (*Daphnia cucullata*) zeigte sich, dass Mütter aus Umwelten mit vielen räuberischen Mückenlarven Nachkommen produzierten, die Strukturen für eine effektive Verteidigung wie große Helme und Stacheln besaßen [3]. Doch erst mit dem technologischen Fortschritt der letzten Jahre wurden die Mechanismen hinter der nichtgenetischen Vererbung verständlich.

Mechanismen der nichtgenetischen Vererbung

Generell ist ein Teil der Variationsbreite von Merkmalen auf umweltbedingte Variation zurückzuführen. Dieser Teil wird inzwischen unter dem Begriff ► phänotypische Plastizität eingeordnet. *Phaino* ist das griechische Wort für „ich erscheine“, *typos* steht für „Gestalt“, während *plastikos* „zur Verformung oder Modellierung“ bedeutet. Abgeleitet von diesen Worten versteht man unter phänotypischer Plastizität also die Fähigkeit von Individuen, ihr Erscheinungsbild in Abhängigkeit von der Umwelt zu verformen. Diese Fähigkeit resultiert vor allem daraus, dass Mechanismen existieren, welche bestimmen, wie oft einzelne Gensequenzen abgelesen, also transkribiert und translatiert werden. Solche Mechanismen werden unter dem Begriff ► Epigenetik zusammengefasst und lassen sich als mit der DNA assoziierte „Lesezeichen“ verstehen [4]. Solche „Lesezeichen“ können Methylgruppen sein, die direkt mit einzelnen Basen auf der DNA verbunden sind. Alternativ können Histone – Proteine, auf denen die DNA aufgewickelt ist – verändert werden. Zu den Histonmodifikationen gehört beispielsweise das Anhängen von Methylgruppen, Phosphatgruppen, Acetylgruppen, Ubiquitinen oder anderen funktionellen Gruppen. Diese Veränderungen beeinflussen Gensequenzen sowie regulatorische Elemente und wirken sich so auf die Auslesungshäufigkeit von Genen aus. Auch Chromatin-Remodeling-Komplexe greifen an Histonen an, und können so ganze Chromosomenregionen freilegen oder unzugänglich machen. Es gibt zudem genetische Regionen, welche ihre Position auf dem Genom verändern können, was als Nebeneffekt ihre Auslesungshäufigkeit beeinflusst. Sie werden als transponierbare Elemente bezeichnet. Darüber hinaus existieren sequenzspezifische Proteine, auch als Transkriptionsfaktoren bekannt, welche die Auslesung ihrer Zielgene beeinflussen können. Umweltveränderungen können Transkriptionsfaktoren aktivieren oder deaktivieren. Unter Umständen können diese Proteine sogar ihre eigene Transkription beeinflussen und dadurch Rückkopplungsschleifen erzeugen. Transkriptionsfaktoren interagieren zudem mit anderen epigenetischen Mechanismen und

binden beispielsweise in Abhängigkeit von Methylierungen besser oder schlechter an ihre Zielsequenzen. Auch nach der Transkription können epigenetische Mechanismen wirken. Kurze, nichtcodierende microRNA-Stränge können sich an mRNA-Stränge binden und so deren Translation verstärken oder verhindern. Dieser Mechanismus ist als RNA-Interferenz bekannt. Diese epigenetischen Mechanismen führen in Konsequenz zu einer Veränderung des Erscheinungsbildes, welches nicht nur die Physiologie, sondern auch Morphologie, Verhalten und Lebensgeschichte der Lebewesen beinhaltet.

Aus der Veränderung des Erscheinungsbildes ergibt sich die erste Möglichkeit nichtgenetischer Vererbung. Mütter können in ihren Eizellen nämlich zusätzlich zu ihrer Erbinformation andere Substanzen wie Nährstoffe, Hormone, Immunzellen oder Antikörper einlagern. Die Menge dieser Substanzen kann dabei durch die elterliche Umwelt beeinflusst werden. In anderen Worten: Sie ist eine Konsequenz der Auswirkung der phänotypischen Plastizität auf die Physiologie eines Individuums. Beispielsweise wirkt sich eine Umwelt mit viel Nahrung sowohl positiv auf das Wachstum der Mutter als auch auf die Menge an Nährstoffen in ihren Eizellen aus. Das bietet dem Nachwuchs ebenfalls einen unmittelbaren Wachstumsvorteil. Säugetiere können ihrem Nachwuchs über die Plazenta und die Muttermilch noch mehr von diesen Substanzen liefern. Auch Väter können dem Nachwuchs über ihre Samenflüssigkeit – oder bei Insekten über Spermienpakete – Nährstoffe weitergeben.

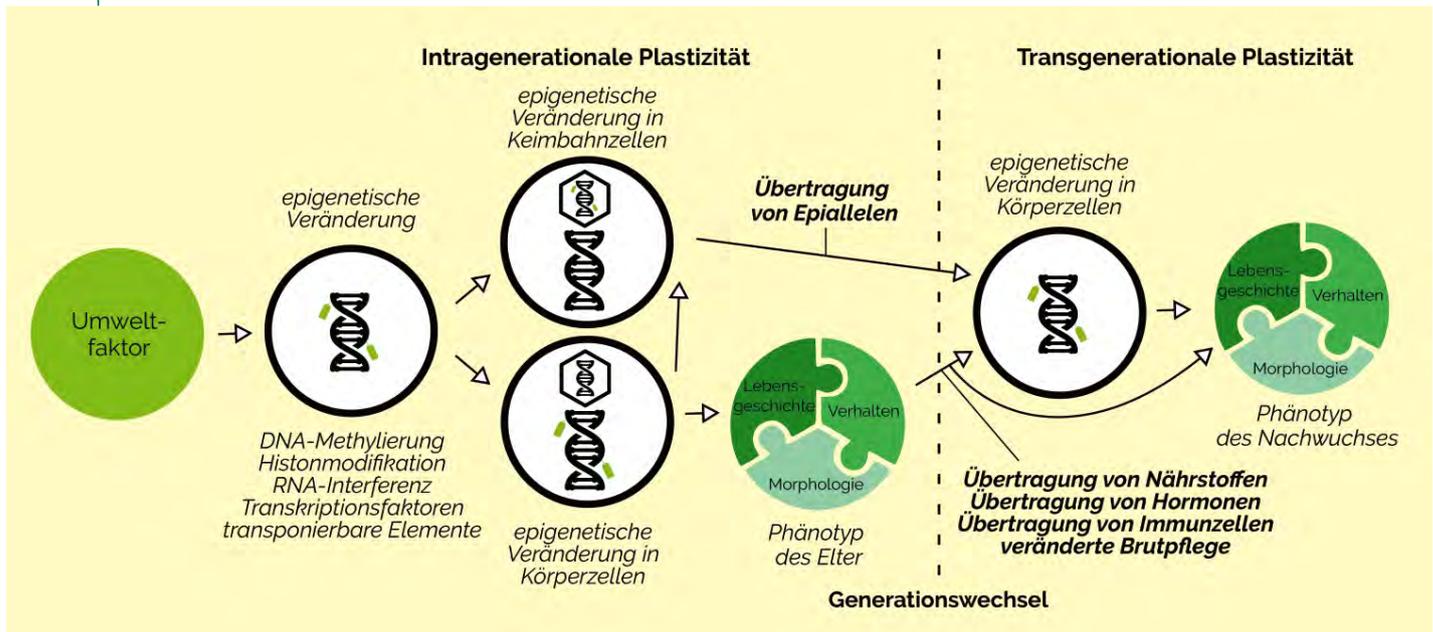
Eine zweite Möglichkeit, wie sich der Phänotyp der Eltern direkt auf den Nachwuchs auswirken kann, ist die Brutpflege. Während dieser kommunizieren Eltern mit ihrem Nachwuchs taktil, akustisch oder über chemische Botenstoffe. Bei eierlegenden Tieren können die sich entwickelnden Embryonen teils bereits vor der Geburt elterliche Signale wahrnehmen. So können weitere Informationen nichtgenetisch weitergegeben werden wie beispielsweise Melodien bei Vögeln oder Informationen über die Anwesenheit von Räubern bei Fischen. Die dritte Möglichkeit der nichtgenetischen Vererbung ist die Übermittlung von ► Epiallelen, d. h. der veränderten epigenetischen Information, über die Keimbahn. So können epige-

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 283 erklärt.

IN KÜRZE

- Nichtgenetische Vererbung **spielt in der Evolution eine wichtige Rolle**. Sie erfolgt über die Übertragung von Nährstoffen, Hormonen, Immunzellen und Epiallelen sowie eine veränderte Brutpflege.
- Umweltinformationen aus vielen verschiedenen Quellen müssen integriert werden, um einen **optimal angepassten Phänotyp** zu entwickeln.
- Die **relative Priorität jeder Information** ist von Art und Umweltfaktor abhängig. Es verbleiben jedoch noch viele offene Fragestellungen.

ABB. 1 | MECHANISMEN NICHTGENETISCHER VERERBUNG



Im Rahmen intragenerationaler Plastizität verursacht ein veränderter Umweltfaktor epigenetische Veränderungen (z. B. Methylierungen, Histonmodifikationen, RNA-Interferenzen, Transkriptionsfaktoren, transponierbare Elemente) in Keimbahnzellen und Körperzellen. Die epigenetischen Veränderungen in Körperzellen führen zu einer Veränderung des Phänotyps der Eltern, wirken sich also z. B. auf deren Verhalten, Morphologie und Lebensgeschichte aus. Nichtgenetische Vererbung über Generationen kann entweder aus einer Weitergabe von Epiallelen aus Keimbahnzellen oder aus dem veränderten Phänotyp der Eltern (Übertragung von Nährstoffen, Hormonen, Immunzellen oder veränderte Brutpflege) resultieren. Diese übermittelten Informationen können sich entweder direkt auf den Phänotyp des Nachwuchses auswirken oder das Epigenom in den Körperzellen des Nachwuchses und dadurch deren Phänotyp modifizieren. Dieser Prozess wird auch als transgenerationale Plastizität bezeichnet.

netische Muster früherer Generationen zu epigenetischen Veränderungen in den Körperzellen des Nachwuchses führen. Das wird dann unmittelbar im Erscheinungsbild der nächsten Generation sichtbar. Unabhängig vom genauen Mechanismus wird die nichtgenetische Vererbung auch als ► transgenerationale Plastizität bezeichnet. Damit grenzt sie sich von der ► intragenerationalen Plastizität ab, welche nur den Einfluss der Umwelt innerhalb einer Generation bezeichnet (Abbildung 1). Die Effekte transgenerationaler Plastizität sind nicht zu unterschätzen. Eine Studie bei dem Fadenwurm *Caenorhabditis elegans* kam kürzlich zu dem Ergebnis, dass solche Effekte ungefähr gleich stark ausfallen wie eine Akkumulation von genetischen Mutationen über 250 Generationen [5].

Evolution von phänotypischer Plastizität und nichtgenetischer Vererbung

Vorteilhafte phänotypische Plastizität ist ein Produkt der Evolution. Als solche ist sie nicht omnipräsent, sondern existiert nur bei einigen Lebewesen im Zusammenhang mit ausgewählten Umweltfaktoren. Das liegt daran, dass diese Fähigkeit auch Kosten mit sich bringt, welche durch Vorteile aufgewogen werden müssen. Die erste Bedingung zur Evolution der Plastizität ist, dass sich Umwelten zeitlich und räumlich innerhalb eines Habitats verändern. Gleichzeitig dürfen diese Fluktuationen nicht

zu kurzfristig ausfallen, da eine plastische Anpassung Zeit benötigt. Zweitens muss sich der optimale Phänotyp innerhalb dieser Spannweite von Umwelten unterscheiden. Drittens müssen verlässliche Signale existieren, welche diese Umweltveränderungen vorhersagen oder erkennbar machen. Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, würde sich eine unveränderliche Ausprägung eines Allrounder-Phänotyps gegenüber der Plastizität evolutionär durchsetzen [6].

Für die Evolution vorteilhafter nichtgenetischer Vererbung ist die zuverlässige Vorhersagbarkeit von Umwelten über Generationen hinaus elementar wichtig. Sollten Umwelten nämlich kurzfristig fluktuieren oder Elterntiere regelmäßig abwandern, würde sich in der Evolution eine ausschließlich persönliche Einschätzung der Umwelt als vorteilhafter herausstellen. Dieser Umstand wird besonders relevant, wenn sich die nichtgenetische Vererbung über mehrere Generationen erstreckt. Denn es ist oft eine Herausforderung, die Umweltbedingungen, welche viele Generationen später herrschen werden, zuverlässig vorherzusagen. Deshalb evolviert eine derartige ► multigenerationale Plastizität nur in einem eng gesteckten Rahmen. Die Generationszeiten müssen im Verhältnis zur Umweltveränderung kurz ausfallen. Gleichzeitig darf sich die Umwelt nur in geringem Maß ändern, und die Signale zur Einschätzung der Umwelt müssen relativ ungenau sein.

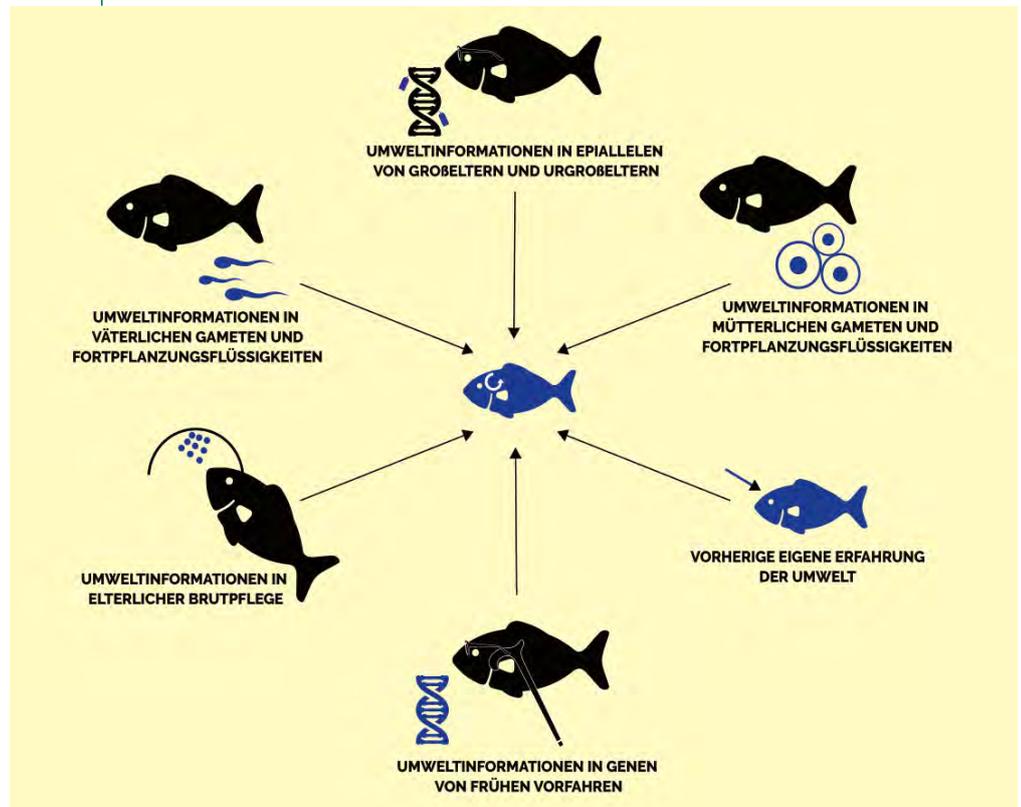
Das wird an einem Beispiel multigenerationaler nichtgenetischer Vererbung beim Fadenwurm *C. elegans* deutlich. Dieser schnelllebige Organismus hat eine Generationszeit von drei Tagen und lebt im Bodengrund, welcher Temperaturveränderungen nur langsam annimmt. Gleichzeitig können Individuen anhand persönlicher Einschätzung ihrer Umwelt zukünftige Temperaturveränderungen im Boden nur ungenau vorhersagen. Deshalb werden in diesem Modellsystem temperaturinduzierte epigenetische Veränderungen mindestens 14 Generationen lang weitergegeben [7].

Integration nichtgenetischer Information

Bei Vorhandensein nichtgenetischer Vererbung können Informationen über die Umwelt von vielen verschiedenen Quellen bezogen werden (Abbildung 2). Gene übermitteln Informationen von frühen Vorfahren. Nichtgenetische Vererbung übermittelt Informationen von Urgroßeltern, Großeltern, Vätern und Müttern. Die Umwelt kann zudem ebenfalls persönlich wahrgenommen werden. Hierbei ergibt sich die Frage, wie diese Informationen, welche sehr unterschiedlich ausfallen können, integriert werden sollten. Ein Ansatz hierzu findet sich in der Informationstheorie.

Der Satz von Bayes bietet eine mathematische Regel, wie Informationen aus verschiedenen Quellen, welche zu unterschiedlichen Zeiten gesammelt wurden, optimal integriert werden können. Er wurde im 18. Jahrhundert von einem Priester aus London mit einer Vorliebe für Mathematik entwickelt: Thomas Bayes wollte aus dem Wissen eines Ereignisses in der Vergangenheit die Wahrscheinlichkeit eines ähnlichen zukünftigen Ereignisses berechnen können. Seine Idee war, basierend auf vorherigem Wissen eine erste Einschätzung vorzunehmen und diese bei Erwerb neuen Wissens anzupassen. Der Satz von Bayes beschreibt dementsprechend einen Verrechnungsmechanismus, mit dem vorheriges Wissen und neue Informationen optimal miteinander zu einem neuen Wissensstand kombiniert werden können. Weil dieser Ansatz zur Integration von Informationen auch für andere Organismen optimal sein sollte, wird er seit kurzem auch als Konzept vorgeschlagen, um die Auswirkungen von verschiedenen Informationen auf den Phänotyp von Organismen zu verstehen [8]. Um eine optimale plastische Anpassung zu erzielen, sollte ein Organismus also seinen Wissens-

ABB. 2 | INTEGRATION VON UMWELTINFORMATIONEN

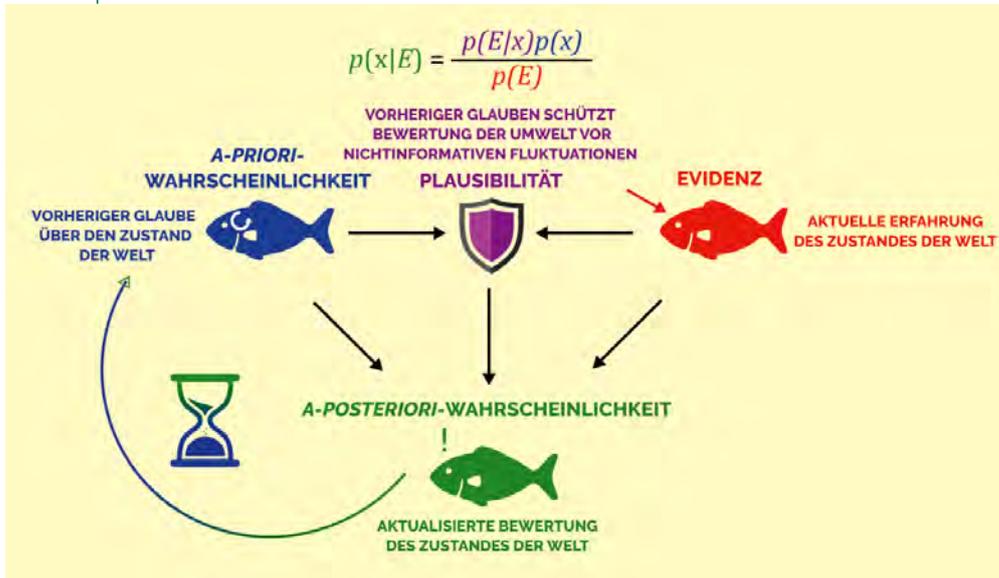


Verschiedene Quellen von Informationen über die Umwelt können zur Entwicklung eines optimalen Phänotyps integriert werden. Informationen finden sich in den Genen von frühen Vorfahren, in den Epiallelen von Großeltern und Urgroßeltern, in mütterlichen und väterlichen Gameten und Fortpflanzungsflüssigkeiten sowie in der Art und Weise der elterlichen Brutpflege. Darüber hinaus kann die Umwelt auch persönlich wahrgenommen werden.

stand über die Umwelt (*A-posteriori*-Wahrscheinlichkeit) nach der Beobachtung eines Ereignisses (Evidenz) unter Berücksichtigung vorherigen Wissens (*A-priori*-Wahrscheinlichkeit) und einer Plausibilitätsfunktion aktualisieren (Abbildung 3). Durch diesen Mechanismus wird der Einfluss nichtinformativer kurzfristiger Umweltfluktuationen auf den Phänotyp gering gehalten. Die Verbindung des Satzes von Bayes und der Evolutionstheorie führte zu vielen neuen Erkenntnissen. Darunter finden sich Hinweise zur relativen Relevanz der verschiedenen Informationsquellen (Abbildung 2).

Eine erste Erkenntnis ist, dass die Bedeutung der Information von früheren Generationen mit jeder weiteren Generation abnehmen sollte. Das liegt daran, dass die Relevanz einer früher erworbenen Information mit zunehmendem zeitlichen Abstand abnimmt. Daraus folgt, dass die Effekte der Umwelt früherer Generationen mit jeder Generation schwächer werden sollten, was bereits bei vielen Arten empirisch bestätigt werden konnte. Beispielsweise stellte man in *Daphnia ambigua* fest, dass die durch Umweltvariation induzierte veränderte Genexpression in der dritten Generation schwächer ausfällt als in der zweiten [9].

ABB. 3 | EINSCHÄTZUNG DER UMWELT



Die Integration von Umweltinformationen lässt sich mit Hilfe des Satzes von Bayes mathematisch beschreiben. Zu jedem Zeitpunkt wird die *A-priori*-Wahrscheinlichkeit (d. h. der vorherige Glaube über den Zustand der Welt) mit der Evidenz (d. h. die aktuelle Erfahrung des Zustandes der Welt) integriert, um eine Plausibilität, welche vor nichtinformativen Umweltfluktuationen schützt, zu formen. Aus Plausibilität, *A-priori*-Wahrscheinlichkeit und Evidenz formt sich anschließend die *A-posteriori*-Wahrscheinlichkeit, d. h. die aktualisierte Bewertung des Zustandes der Umwelt. Dieser Prozess wiederholt sich kontinuierlich und wird deshalb in der Informationstheorie als Bayes'sche Aktualisierung bezeichnet.

Informationen von Müttern oder Vätern?

Während bekannt ist, dass die Umwelt von beiden Eltern Auswirkungen auf den Phänotyp von Nachkommen haben kann, hängt es von der Art ab, welcher Elter die wichtigere Rolle einnimmt. Wie bereits erläutert, ist die Fähigkeit von Individuen, die Umweltbedingungen der nächsten Generation vorherzusagen, eine Bedingung für die Evolution von vorteilhafter nichtgenetischer Vererbung. Das ist nur möglich, wenn sich Individuen langfristig in derselben Umwelt aufhalten, in welcher ihre Nachkommen vertreten sein werden. Dementsprechend ist das Geschlecht, welches stationärer ist, meistens auch dasjenige, welches einen größeren Teil zur nichtgenetischen Vererbung beiträgt [10]. In vielen Arten gibt es zudem nur ein Geschlecht, welches die Brutpflege durchführt. Verständlicherweise kann unter solchen Umständen auch nur ein Geschlecht über die Brutpflege Informationen an den Nachwuchs vermitteln. Beispielsweise betreiben bei der Dickkopflritze (*Pimephales promelas*) nur die Männchen Brutpflege. Dementsprechend haben bei dieser Art die Väter einen größeren Einfluss auf den Phänotyp der Nachkommen als die Mütter [11]. Darüber hinaus unterscheiden sich Mütter und Väter in Hinblick auf die zur Verfügung stehenden Mechanismen der nichtgenetischen Vererbung. Mütter können in ihren Eizellen Nährstoffe, Hormone und Immunzellen unterbringen, was bei den Spermien der Väter nicht möglich ist. Auch die Vererbung von Epiallenen kann bei Müttern und Vätern unterschied-

lich erfolgen. Beispielsweise unterscheiden sich väterliche und mütterliche Methylome in Nicht-Säugetieren darin, in welcher Form sie an den Nachwuchs vererbt werden. Methylome aus Spermien können ohne Modifizierung übermittelt werden, während mütterliche Methylome stark reorganisiert werden. Daraus ist bei Nicht-Säugetieren eine größere Relevanz der väterlichen Umwelt auf das Methylom des Nachwuchses ableitbar. Bei Säugetieren hingegen ist die Situation komplexer, da das Methylom während der Entwicklung der Zygote komplett zurückgesetzt wird. Väterliche Methylome werden während dieses Prozesses im Vergleich zu mütterlichen schneller demethyliert, was bei Säugetieren eine größere Relevanz der mütterlichen Umwelt auf das Nachwuchs-Methylom nahelegt.

Informationen von früheren Generationen oder eigene Wahrnehmung?

Eine weitere Erkenntnis ist, dass die relative Bedeutung der nichtgenetisch vererbten Informationen vom Entwicklungsstadium des Nachwuchses abhängt. Juvenile Organismen sollten sich mehr auf Informationen früherer Generationen verlassen, während bei adulten Lebewesen die eigene Wahrnehmung der Umwelt an Relevanz zunimmt. Das liegt erstens daran, dass eine Anpassung des Phänotyps ein langwieriger Prozess ist – es kann Wochen bis Monate dauern, bis dieser Prozess vollendet ist. Deshalb ist es ein Vorteil, diesen Prozess basierend auf vererbten Informationen schon unmittelbar nach der Entstehung der Zygote beginnen zu können – also lange bevor Lebewesen über entwickelte Sinne zur Wahrnehmung der Umwelt verfügen. Auch ist die Entwicklung der Sinne selbst nach der Geburt oft nicht abgeschlossen, wodurch eine eigene Einschätzung der Umwelt im frühen Lebensstadium nicht möglich ist. Auch nach abgeschlossener Sinnesentwicklung und erstmaliger vollständiger Wahrnehmung der Umwelt bleiben nichtgenetisch vererbte Umweltinformationen erst einmal relevant. Das liegt daran, dass vererbte Informationen über einen längeren Zeitraum gesammelt wurden und so einen akkuraten Mittelwert der Umweltbedingungen darstellen. Im Gegensatz dazu ist die erstmalige eigene Wahrnehmung der Umwelt anfällig gegenüber nichtinformativen Umweltfluktuationen. Erst mit zunehmendem Alter sollte die vererbte Information an Relevanz verlieren. Das liegt daran, dass Lebewesen dann einen verlässlichen Mittelwert der eigenen Wahrnehmung der Umwelt erstellen können, wel-

cher zudem aktueller ist. Diese beschriebenen Muster wurden bereits mehrfach in empirischen Studien nachgewiesen. Beispielsweise sind die Effekte elterlicher Umwelten in juvenilen *Daphnia cucullata* stärker als in adulten [3].

Aktuelle Forschungsthemen

Während es viele Beispiele vorteilhafter nichtgenetischer Vererbung gibt, kann diese auch Nachteile haben. Beispielsweise haben Menschen, deren väterliche Großväter während des Zweiten Weltkrieges hungern mussten, im Schnitt eine um fünf Jahre kürzere Lebenserwartung [12]. Auch Stress und Vergiftungen können negative Konsequenzen für spätere Generationen haben. Deshalb ist es Gegenstand aktueller wissenschaftlicher Diskussionen, ob nichtgenetische Vererbung im Durchschnitt vorteilhaft ist oder nicht. Eine der Schwierigkeiten hierbei ist der momentane Mangel an Studien, welche sich mit tatsächlicher transgenerationaler Plastizität befassen. Hierbei muss nämlich konkret mit einem Umweltfaktor gearbeitet werden, der eine elterliche Vorhersage der Eltern über die Umwelt der Nachkommen erlaubt. Leider befassten sich bisher viele Studien lediglich mit einer Konditionsweitergabe über Generationen, was zwar regelmäßig zu großen Effekten führt, aber wenig mit der Vorhersage zukünftiger Umwelten zu tun hat [13]. Während nachgewiesen ist, dass Epiallele über Generationen weitergegeben werden, ist der detaillierte Mechanismus der Vererbung von mütterlichen und väterlichen Epiallelen noch unklar. Das macht es auch schwierig einzuschätzen, welcher Anteil der elterlichen Epiallele sich tatsächlich im ► Epigenom des Nachwuchses wiederfindet. Beispielsweise fand man in einer aktuellen Studie bei Menschen heraus, dass während der ersten Teilungszyklen einer Zygote kein Methylohm zu finden ist. Erst in späteren Zyklen erfolgt eine Neumethylierung durch bisher noch nicht vollständig verstandene Mechanismen [14].

Aktuelle mathematische Modelle der Evolution, welche auf dem Satz von Bayes basieren, führen zu interessanten testbaren Theorien. Eine Vorhersage ist, dass Plastizität in juvenilen Lebewesen höher ausfallen sollte als im Adultstadium. Die Dauer der Periode hoher Plastizität sollte allerdings negativ mit der Zuverlässigkeit der Signale zur Erfassung von Umweltveränderungen korrelieren [8]. Denn bei nichtinformativen Signalen sollte die Umwelt über einen längeren Zeitraum selbst erfasst werden, um eine anschließende vorteilhafte plastische Anpassung zu erlauben. Bei sehr zuverlässiger nichtgenetisch vererbter Information sollte die Umwelt nach der Embryonalentwicklung hingegen nur noch zu wenig weiterer plastischer Anpassung führen. Da es schwer ist, die relative Zuverlässigkeit von Signalen über Umweltveränderungen vergleichend einzuschätzen oder sie direkt zu manipulieren, wird es noch dauern, bis empirische Beweise zu diesen Theorien vorliegen.

Kürzlich fanden erste Studien empirische Hinweise auf ► Telegonie. Darunter versteht man die Theorie, dass Männchen den weiblichen Körper markieren können, so dass der Nachwuchs auch Merkmale früherer Paarungspartner trägt, obwohl spätere Paarungspartner die Väter sind. Bei der Fliege *Telostylinus angusticollis* wurde die Körpergröße der Nachkommen tatsächlich von der Kondition des vorherigen männlichen Paarungspartners beeinflusst und nicht von dem Partner, welcher die Eizellen befruchtete [15]. Auch wenn es noch unklar ist, welche Bedingungen die Evolution von Telegonie begünstigen, hätte dieser Prozess interessante Konsequenzen für die Evolution der Partnerwahl. Unter diesen Umständen würden sich nämlich Männchen durchsetzen, welche die Kondition des vorherigen Partners eines Weibchens beurteilen können. So können sie sich gezielt mit Weibchen verpaaren, deren vorheriger Partner eine hohe Kondition hatte. Bei Vorhandensein von Telegonie würde diese Strategie die Qualität der Nachkommen des Männchens erhöhen. Auch eine andere Weibchenwahl würde so begünstigt. Während die Eizellen heranwachsen, sollten die Weibchen sich nämlich mit Männchen, welche eine hohe Kondition haben, verpaaren. Nach der Reifung der Eizellen sollten sie hingegen Partner mit der besten genetischen Kompatibilität bevorzugen. Die Telegonie stellt somit ein neues, spannendes Forschungsgebiet innerhalb der nichtgenetischen Vererbung dar.

GLOSSAR

Epiallel: Das spezifische epigenetische Muster eines Genortes.

Epigenetik: Mechanismen, welche durch Regulierung der Genexpression – ohne Manipulation der Basensequenz – zu Veränderungen in Organismen führen.

Epigenom: Die Gesamtheit der epigenetischen Veränderungen des Genoms einer Zelle.

Informationstheorie: Teilbereich der Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik. Mathematische Darstellung von Informationen sowie von deren Übertragung und Verarbeitung.

Intragenerationale Plastizität: Einfluss der selbst wahrgenommenen Umwelt auf den eigenen Phänotyp.

Methylohm: Die Gesamtheit der Methylierungen des Genoms einer Zelle.

Multigenerationale Plastizität: Einfluss der Umwelt früherer Generationen auf den Phänotyp einer mindestens zwei Generationen später nachfolgenden Generation.

Phänotypische Plastizität: Die Fähigkeit von individuellen Genotypen, in verschiedenen Umwelten verschiedene Phänotypen auszubilden.

Telegonie: Die auf Aristoteles zurückzuführende Theorie, dass Nachkommen die Eigenschaften eines vorherigen Paarungspartners der Mutter vererbt bekommen können.

Transgenerationale Plastizität: Einfluss der Umwelt früherer Generationen auf den Phänotyp einer nachfolgenden Generation.

Zusammenfassung

Die nichtgenetische Vererbung wurde lange vernachlässigt, stellt sich aber heutzutage als wichtiges Forschungsthema heraus. Die Übermittlung von Nährstoffen, Hormonen, Immunzellen, Epiallelen und eine veränderte Brutpflege kann zu einer vorteilhaften Anpassung der Nachkommen an die Umwelt führen. Nur wenig fluktuierende, langfristig gut vorhersagbare Umweltfaktoren begünstigen die Evolution von nichtgenetischer Vererbung. Die vielen übermittelten Informationen früherer Generationen müssen mit eigenen Erfahrungen integriert werden, um sich optimal an Umwelten anpassen zu können. Der Satz von Bayes bietet hierbei einen auf der Wahrscheinlichkeitsrechnung basierenden mathematisch optimalen Ansatz, korrekte Schlüsse über den Zustand der Umwelt zu ziehen. Dabei ist die relative Priorität jeder Informationsquelle von den natürlichen Bedingungen jeder Art abhängig. Die nichtgenetische Vererbung bleibt ein faszinierendes Forschungsgebiet mit vielen spannenden offenen Fragestellungen.

Summary

Non-genetic inheritance – fable or fact?

Non-genetic inheritance has been long neglected, but has nowadays turned out to be an important research topic. The transfer of nutrients, hormones, immune cells, epialleles and an altered parental care can lead to a beneficial adaptation of offspring to their environment. Only environmental factors that fluctuate little and are well predictable in the long-term facilitate the evolution of non-genetic inheritance. The wide range of information passed on by earlier generations has to be integrated with own assessments in order to be able to adapt to the environment. Based on probability calculation, Bayesian updating offers a mathematically optimal approach to draw correct conclusions about the state of the environment. However, the relative priority of every source of information depends on the natural conditions of each species. Non-genetic inheritance remains a fascinating research field with a lot of exciting open questions.

Schlagnworte:

phänotypische Plastizität, transgenerationale Plastizität, nichtgenetische Vererbung, Epigenetik

Literatur

- [1] M. J. West-Eberhard (1989). Phenotypic plasticity and the origins of diversity. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 20, 249–278.
- [2] A. Walton et al. (1938). The maternal effects on growth and conformation in Shire horse-Shetland pony crosses. *Proc. Roy. Soc. B* 125, 311.
- [3] A. A. Agrawal et al. (1999). Transgenerational induction of defences in animals and plants. *Nature* 401, 60–63.
- [4] J. M. Wagner et al. (2010). Lesezeichen im Buch des Lebens. *Epigenetik. Pharm. Unserer Zeit* 39, 176–182.
- [5] L. M. Johnson et al. (2020). Short-term heritable variation overwhelms 200 generations of mutational variance for metabolic traits in *Caenorhabditis elegans*. *Evolution* 74, 2451–2464.
- [6] C. K. Ghalambor et al. (2007). Adaptive versus non-adaptive phenotypic plasticity and the potential for contemporary adaptation in new environments. *Funct. Ecol.* 21, 394–407.
- [7] A. Klosin et al. (2017). Transgenerational transmission of environmental information in *C. elegans*. *Science* 356, 316–319.
- [8] J. A. Stamps et al. (2016). Bayesian models of development. *Trends Ecol. Evol.* 31, 260–268.
- [9] N. R. Hales et al. (2017). Contrasting gene expression programs correspond with predator-induced phenotypic plasticity within and across generations in *Daphnia*. *Mol. Ecol.* 26, 5003–5015.
- [10] J. J. Herman et al. (2014). How stable 'should' epigenetic modifications be? Insights from adaptive plasticity and bet hedging. *Evolution* 68, 632–643.
- [11] D. Meuthen et al. (2021). Paternal care effects outweigh gamete-mediated and personal environment effects during the transgenerational estimation of risk in fathead minnows. *BMC Ecol. Evol.* 21, 187.
- [12] G. Kaati et al. (2007). Transgenerational response to nutrition, early life circumstances and longevity. *Eur. J. Hum. Genet.* 15, 784–790.
- [13] A. Sánchez-Tójar et al. (2020). The jury is still out regarding the generality of adaptive 'transgenerational' effects. *Ecol. Lett.* 23, 1715–1718.
- [14] H. Guo et al. (2014). The DNA methylation landscape of human early embryos. *Nature* 511, 606–610.
- [15] A. J. Crean et al. (2014). Revisiting telegony: offspring inherit an acquired characteristic of their mother's previous mate. *Ecol. Lett.* 17, 1545–1552.

Verfasst von:



Denis Meuthen, geb. 1984, 2004–2010 Biologiestudium an der Universität zu Köln und der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. 2016 Promotion zum Dr. rer. nat. (Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn). 2017–2019 Postdoktorand an der University of Saskatchewan. 2020–2022 Postdoktorand an der Universität Bielefeld. Seit Juli 2022 Freigeist-Fellow und Nachwuchsgruppenleiter an der Universität Bielefeld.

Korrespondenz

Dr. Denis Meuthen
AG Evolutionsbiologie
Universität Bielefeld
Konsequenz 45
33615 Bielefeld
Email: denis.meuthen@uni-bielefeld.de

VERANSTALTUNGSTIPP

22. September 2022

Carlo Klein & Wolfgang Nellen

Wir CRISPRn uns durch die Apokalypse – Science und Science Fiction der genetischen Optimierung

Vortrag/Workshop (kostenlos)

Future Space, Wilhelmstr. 2, 34117 Kassel



Die Ausbreitung des Halbschmarotzers Mistel

Per Vogel, Wind und Seilschaft

STEFAN BOSCH | PETER LURZ

*In jüngster Zeit kommt es in einigen Regionen Europas zu einer starken Ausbreitung der Weißbeerigen Mistel (*Viscum album*), meistens auf Kosten ihrer Wirtsbäume. Als wichtige Ursachen hierfür gelten veränderte klimatische Wuchsbedingungen im Rahmen des Klimawandels, Veränderungen in der Vogelwelt, die für die Samenverbreitung mitverantwortlich ist, eine unzureichende Baumpflege auf Streuobstwiesen, die aufkommenden Mistelbefall frühzeitig entfernt, sowie das rückläufige Interesse an Streuobstprodukten [1–3]. Dieser Beitrag thematisiert ökologische Erkenntnisse über die Mistel, die punktuell in verschiedenen Regionen ihres Verbreitungsgebietes gewonnen wurden, sowie die Ausbreitung von Misteln innerhalb bereits befallener Bäume. Denn um sich neue Wirte zu erschließen, nutzen Misteln unterschiedliche Strategien.*

Den Germanen und Kelten galten Misteln als heilige Pflanzen. Druiden sollen sie nicht nur bei Asterix in einer Zeremonie mit goldenen Sicheln geschnitten und als Heilpflanze verwendet haben. Noch heute werden Inhaltsstoffe der Mistel wie Viscotoxine und Viscolectine in der Schul- und Alternativmedizin gegen Bluthochdruck, Arteriosklerose oder Krebs eingesetzt [4]. Neuere Ansätze basieren auf einer Entschlüsselung des Erbguts der Mistel und der Identifikation spezieller Proteine, denen ein medizinisches Wirkstoffpotenzial zugesprochen wird [5].

Der immergrüne, kugelförmige Halbstrauch wächst auf Ästen und Zweigen von Laub- und Nadelbäumen (Abbildung 1). Deren Versorgungsleitungen zapft die Mistel mit speziellen Saugwurzeln (Haustorien) an, um ihnen Wasser und Nährstoffe zu entziehen. Als Hemiparasiten betreiben Misteln selbst Photosynthese, benötigen aber Wasser und nehmen dadurch auch im Xylem gelöste Stoffe wie z. B. Stickstoff (in Form von Nitrat), Kalium und organische Verbindungen von der Wirtspflanze auf [1]. In Europa kommen mehrere Unterarten der Mistel vor: Die Tannenmistel auf Weißtannen (Abbildung 2), die Kiefernmistel auf Kiefern, die Kreta-Mistel auf der Kalabrischen Kiefer (*Pinus brutia*; [6]) und die Laubholzmistel auf Pappeln und Apfelbäumen (Abbildung 1). Letztere ist in Süd-, Mittel- und Nordostdeutschland weit verbreitet [7]. Die Entstehung der Unterarten lässt sich durch eiszeitliche Refugien erklären, und möglicherweise existieren noch weitere Unterarten [3].



ABB. 1 Misteln wachsen als Halbschmarotzer auf Ästen von Bäumen und bilden dort große kugelförmige, immergrüne Halbsträucher. Alle Fotos: Stefan Bosch.



ABB. 2 Verschiedene Mistelarten sind auf bestimmte Wirtsbäume spezialisiert, wie die Laubholzmistel auf Obstbäume oder Pappeln, und die hier gezeigte Tannenmistel auf Nadelbäume. Das Foto wurde im Nordschwarzwald aufgenommen.

IN KÜRZE

- Die Laubholzmistel **breitet sich** in vielen Regionen aus mehreren Gründen **zunehmend aus** und vermag die Wirtsbäume zu wechseln.
- Wirtsbäume **drohen abzusterben**, da Misteln ihnen Wasser und Nährstoffe entziehen, in Süddeutschland sind vor allem Obstbäume in Streuobstgebieten betroffen.
- Die Verbreitung erfolgt durch **fruchtfressende Vogelarten**, die die klebrigen Samen per Schnabel oder Kot in den Kronen anderer Bäume absetzen, sowie durch einen weiteren Mechanismus.
- Die Samen erhalten durch in den Beeren enthaltenes Viscin, einem Gemisch aus hauptsächlich Polysacchariden (Cellulose und Hemicellulose) und einem kleinen Anteil von Pektinen, **eine hohe Kleb- und Haftfähigkeit** (viscum = Vogelleim).
- Nach Austritt aus der Beere bildet die Cellulose lange Schnüre, an denen die Samen haften. Solche Seilschaften können innerhalb eines Baumes abtropfen oder **in die Umgebung verdriften** und so weitere Bäume befallen.

In jüngster Zeit kommt es in manchen Regionen zu einer erheblichen Ausbreitung der Laubholzmistel. Auf Streuobstwiesen breitet sie sich in Süddeutschland stark auf Obstbäumen aus, wenn die Hochstamm-Obstbäume unter Hitze und Baumkrankheiten leiden und nicht mehr ausreichend gepflegt, sprich regelmäßig geschnitten und dabei auch vom Mistelbefall befreit werden [2, 3, eigene Beobachtungen]. Daneben werden aber auch andere Baumarten befallen. Als typische Wirtsbäume der Laubholzmistel gelten in Mitteleuropa Apfel und Pappel. Weltweit sind für *Viscum album* Wirte in 452 Arten, Unterarten und Hybriden bekannt. Die Familie der Rosengewächse (Rosaceae), zu denen der Apfel gehört, hat mit 128 die meisten Wirte, gefolgt von den Weidengewächsen (*Salicaceae*) mit 63. Bei den Pappeln (Genus *Populus*) sind 28 Wirtsarten bekannt [8], unter anderem Schwarz-, Silber- und Kanadische Pappel (*Populus nigra*, *P. alba* und *P. canadensis*).

Mittlerweile ist auch ein Befall an weiteren, bislang nicht oder kaum betroffenen Baumarten festzustellen. So werden in Südwestdeutschland die dort bislang als „mistelresistent“ angesehenen Birnbäume ebenfalls befallen [3]. In Süddeutschland sind Misteln in jüngster Zeit auch auf Haselnuss, Birke (Abbildung 3) und Linden nachweisbar [eigene Beobachtungen]. Auch in anderen Regionen sind Veränderungen beim Befall von Wirtsbäumen hin zu neuen Baumarten festzustellen, z. B. in der Ukraine [1]. Über die Ursachen dieser Erweiterung der Wirtsbaumliste kann nur spekuliert werden. Inwiefern ein verändertes Verhalten der Vögel als Vektoren, andere beteiligte Vogelarten, die unten thematisierten Mistelschnüre oder veränderte ökologische Rahmenbedingungen wie der Klimawandel dazu beitragen, bleibt vorerst unklar. So werden eine Bestandszunahme bei der Misteldrossel sowie die Arealausweitung der Mistel nach Norden und in höher gelegene Regionen (z. B. in der Schweiz) infolge des Klimawandels diskutiert [1, 9].

Was macht einen Baum zum Mistelwirt?

Die Besiedlung eines Wirtsbaumes ist ein komplexes Zusammenspiel zwischen dessen Eigenschaften und denen des Parasiten und seiner Vektoren, im Fall der Mistel von beerenfressenden Vögeln. Seitens der Wirtsbäume hängt der Befall einer polnischen Studie zufolge teilweise von individuellen Eigenschaften des Baumes wie Höhe, Wuchsform, Alter und Rindendicke ab [10]. Dünne Rinde wird von den auskeimenden Mistelsamen leichter penetriert, und große und hohe Bäume werden bevorzugt von fruchtfressenden Vögeln angefliegen. In Polen stellte man eine Präferenz für fremdländische, angepflanzte Baumarten aus 28 Wirtstaxa fest. Zudem traten dort Misteln gehäuft in innerstädtischen Bereichen und an Orten mit erhöhtem Stickstoffeintrag auf [10].

Eine Parasitierung nehmen Wirtspflanzen allerdings nicht unbeantwortet hin. Abwehrmaßnahmen der Wirte umfassen physikalische (z. B. Ablagerung von Ligninen in

der Rinde, Verdickung der Rinde) und biochemische Abwehrreaktionen (z. B. Produktion von Terpenen), um eine Etablierung der Mistel durch Ausbildung der Saugwurzeln zu verhindern. Manche Pflanzen versuchen gefiederte Samentransporteur mit Dornen abzuhalten [11]. Das Alter des Baumes und dessen Umfang spielen scheinbar auch bei der Verbreitung eine Rolle, da Bäume mit einem Durchmesser unter zehn Zentimetern in Bruthöhe zum Beispiel im Iran offenbar nicht befallen werden. Dagegen begünstigen die geringe Entfernung zu Nachbarn und die vom Menschen gewählten Baumstandorte an Straßen, in Randbereichen und offenen Beständen einen Mistelbefall [12].

Ökologische Bedeutung der Mistel

Ein Befall mit Misteln kann den Trockenheitsstress der Bäume verstärken und ihre Mortalität im Gegensatz zu nicht befallenen Bäumen signifikant erhöhen (z. B. bei der Waldkiefer *Pinus sylvestris*, [9, 13]). Dadurch können wirtschaftliche Schäden bei der Holzernte entstehen. Ökologisch sind Mistelbüsche ein eigener Mikrokosmos und fungieren als Hotspots der Biodiversität. Mit den Beeren werden nicht nur fruchtfressende Vogelarten angelockt, sondern mit den Blüten im Frühjahr auch zahlreiche Insektenarten als Bestäuber, neben der ebenfalls möglichen Windbestäubung. Die Büsche dienen Vögeln als Schlaf- und Nistplätze. Außerdem beherbergen Misteln Pilze, Bakterien, Flechten und Insekten. Eine Studie aus Ungarn zeigt, dass mindestens acht Insektenarten spezifisch von der Mistel abhängig sind [14]: Unter anderem der Blattfloh *Cacopsylla visci*, die Deckelschildlaus *Carulaspis visci*, die Weichwanzen *Hypseloecus visci* und *Pinalitus visci-cola*, der Spitzmaulrüssler *Ixapion variegatum* und der Rüsselkäfer *Liparthrum bartschii* kommen dort ausschließlich auf der Mistel vor. Darüber hinaus wird die Erde unterhalb der mistelbefallenen Bäume mit Nährstoffen wie dem Kot angelockter Vögel und darin enthaltener Samen angereichert. Beides wirkt sich positiv auf die Vielfalt und das Vorkommen von Mikroorganismen im Boden aus (z. B. [15]).

Mistelbeeren mit Schnüren und Klebstoff

Eine zentrale Rolle kommt den Mistelbeeren und ihren Inhaltsstoffen zu. Die etwa 0,5 bis 0,8 Zentimeter großen Mistelbeeren reifen im November und Dezember und stellen für Vögel eine wichtige Winternahrung dar [4]. Die Fruchtschale (Mesokarp) umschließt die vom Endokarp und Nährgewebe umgebenen grünen Keimlinge sowie das Fruchtfleisch (Mesocarp), das cellulose- und viscinhaltiges Gewebe bzw. Zellen enthält [17]. Dieses Cellulose-Viscin-System arbeitet arbeitsteilig: Cellulosefäden in den Viscinzellen können Schnüre bilden, an denen die Samen hängen, und das Viscin entspricht dem Kleber [4, 16]. Beim Riss der Beerenhülle dringt die leicht dehnbare Cellulose samt den eingeschlossenen Samen aus dem Endospermsack hervor und zudem ein



ABB. 3 Vielerorts kommt es zunehmend zum Übergang der Mistel von den klassischen Wirtsbäumen wie Apfel oder Pappel auf andere Arten wie Haselnuss, Linde oder die hier gezeigte Birke.

Gemisch aus weiteren Polysacchariden wie Hemicellulose (u. a. Arabinose, Mannose, Galactose, Xylose) und Pektin. Dieses Cellulosesystem findet sich in dicken Lagen an den Samen, aber auch an Haarzellen und im gesamten Beerengewebe [17]. Das ebenfalls im Mesokarp enthaltene Viscin ist ein zähflüssiger, hochvisköser Naturstoff von hoher Klebrigkeit. Seine Klebe- bzw. Haftfähigkeit hat der Mistel den lateinischen Artnamen *viscum*, also Leim, eingetragen.

Das System Parasit-Wirt-Samenverbreiter

Die Verbreitung von Mistelsamen ist ein Paradebeispiel der Zoochorie, also der Ausbreitung von Samen durch Tiere. Diese kann sowohl durch eine äußerliche Anheftung an Gefieder, Schnabel oder Beinen als auch durch eine Darmpassage der Samen stattfinden. Vögel fungieren in diesem Sinne als Samenverbreiter und „Krankheitsvektoren“, indem sie Mistelsamen über den Kot oder durch Regurgitation aus dem Magen abgeben sowie sich anhaftender Beeren durch Schnabelwetten an Ästen zu entledigen versuchen. Die Mönchsgrasmücke (*Sylvia atricapilla*) hinterlässt mit dieser Art der Beerenbearbeitung direkt auf Ästen des Wirtsbaumes die Samen [1]. Eine Deposition der Mistelsamen auf Ästen im Kronenbereich wird durch die die Samen umgebende Klebeschicht ermöglicht, die trotz der Darmpassage ihre Klebekraft nicht verliert [16]. Typische Mistelverbreiter sind die Misteldrossel (*Turdus viscivorus*), die Wacholderdrossel (*T. pilaris*), Star (*Stur-*

nus vulgaris), Kohlmeise (*Parus major*), Blaumeise (*Cyanistes caeruleus*), Mönchsgrasmücke und andere Beerenfressende Arten [4, 6, 18]. Der Transport per Vogel ermöglicht eine schnelle und großflächige Ausbreitung der Samen.

Die Beziehungen zwischen Pflanzen untereinander und mit fruchtfressenden Tieren sind von unterschiedlichen „Interessen“ gefärbt. Wir kennen bzw. erkennen vermutlich nur Teile davon, und es gibt noch viel zu erforschen und zu verstehen. Die Mistel profitiert von der Samenverbreitung auf einen geeigneten „sicheren“ Ast, der ein erfolgreiches Keimen und Wachsen ermöglicht. Spezialisierte Samenverbreiter wie zum Beispiel Drosseln beeinflussen ihrerseits die Samenverbreitung, indem sie bestimmte Standorte bevorzugt anfliegen. Zunächst sind die Kronenbereiche hoher Bäume für Vögel attraktiv, als Sitzmöglichkeit und Ausguck, um Feinde rechtzeitig zu erkennen, aber auch als Nahrungsquelle. Hohe, Mistelfrüchte tragende Bäume werden bevorzugt angefliegen und ein bereits erfolgter sowie ein erweiterter, dichter Mistelbefall in der Krone garantiert durch ein gutes Fruchtangebot Futtersicherheit. Letzteres stellt allerdings einen Konflikt dar, da ein zu hoher Befall sich negativ auf

den Wirtsbaum auswirkt, und damit am Ende auch auf die Misteln selbst. Misteln breiten sich aber auch durch Mistelschnüre aus, und es stellt sich die Frage, welche Rolle diese vogelunabhängige Form der Verbreitung spielt: Inwieweit erschließt diese zweigleisige Ausbreitung Keimmöglichkeiten in neuen Nischen, die das Vogelsystem nicht abdeckt?

Mistelschnüre: Samen auf Seilschaft

Der entscheidende Faktor, der Mistelsamen hoch droben in der Krone hält, aber auch seine weitere Ausbreitung in und um einem befallenen Baum sicherstellt, ist die Klebekraft der Schleimschicht, die den Samen umgibt. Denn neben der Verbreitung per Vogel spielt das „Abtropfen“ innerhalb eines befallenen Baumes eine wichtige Rolle (Abbildung 4). Hat sich ein Mistelbusch erfolgreich im Kronenbereich etabliert und produziert er erste Früchte, können seine Samen auf darunter gelegene Äste und Zweige abtropfen und dort auskeimen. Es kommt zu einer oft dramatischen und grotesk aussehenden Überbesiedlung mit zahlreichen Mistelbüscheln (Abbildung 5a), die den Wirtsbaum nachhaltig schwächen und zum Tod führen können (Abbildung 5b).

EINFACHES EXPERIMENT ZUR „KLEBEKRAFT“ DER MISTELBEEREN

Werkstoffe werden mit standardisierten Verfahren geprüft, Klebeverbindungen unter anderem mit einem Kurzzeit-Zugversuch, bei dem die Festigkeit einer Klebung getestet wird. Reißt die Klebeschicht zwischen zwei zusammengeklebten Körpern, spricht man von einem Adhäsionsbruch in der Klebeschicht, reißt die Klebeschicht an der beklebten Oberfläche von einem Grenzschichtbruch. Mit einem einfachen Versuch kann man die Klebekraft der Mistelbeeren demonstrieren. Er geht auf spektakuläre Aktionen von Klebstoffherstellern zurück, die mit kleinen Klebeflächen ganze Autos an Kranhaken baumeln lassen, um die Effektivität ihrer Produkte zu demonstrieren.

Die Klebe- und Haftfähigkeit des Mistelbeereninhaltes kann man auf ähnliche Weise veranschaulichen. Hierzu wird ein Korken halbiert, jede Hälfte mit einem Haken versehen und der klebrige Inhalt mehrerer Mistelbeeren auf den beiden freien Flächen verteilt. Nach Entfernen der Samen werden

die beiden Klebeflächen aufeinandergepresst. Ein Korkenteil wird an einem Gestell eingehängt, am anderen angeklebten Korken ein Gefäß für Gewichte befestigt (hier eine Becherlupe ohne Deckel). Das Gefäß wird so lange mit Gewichten oder hier mit Münzen gefüllt, bis die Klebestelle bricht. Dann wird das Gesamtgewicht von unterem Korken mit Haken, Sammelgefäß und Gewichten auf einer Küchenwaage genau gemessen. Eigene Versuche ergaben Brüche der etwa 3,6 Quadratzentimeter großen Klebefläche bei folgenden Gewichten: Handelsüblicher Klebestift 197 bis 263 Gramm, Doppelklebeband über 1000 Gramm und Mistelbeere immerhin beachtliche 160 bis 182 Gramm. Es lohnt sich mit der verwendeten „Mistel-Klebstoff-Menge“, der Andruckzeit etc. zu experimentieren.



Betrachtet man in Gebieten mit starker Vermistelung die Bäume genauer, erkennt man schnell, dass dieses einfache, mehr oder weniger der Schwerkraft folgende, senkrechte Abtropfen auf darunter gelegene Strukturen kaum ausreicht, um in oft erheblichem Ausmaß neue Mistelwuchsorte zu begründen. Hier kommen die Mistelschnüre ins Spiel. Sie bestehen aus 15 bis 20 Zentimeter langen stabilen Fäden, an denen die Samen wie Perlen an einer Schnur aufgereiht kleben (Abbildung 6). Diese Mistelschnüre baumeln im Winterhalbjahr oft zahlreich aus den Mistelbüschen herab. Im Versuch bleiben Mistelschnüre über viele Monate stabile, reißfeste Gebilde [eigene Beobachtungen].

Mit dem Eröffnen der Beere vermögen sich die im Fruchtfleisch enthaltenen Cellulosemikrofibrillen um mehr als das mehrfach Hundertfache zu dehnen. Waren sie zunächst mit 3 nm Durchmesser eng aufgewickelt und senkrecht zur langen Achse der Zelle angeordnet, werden sie abgewickelt bzw. entwickelt und entlang der Dehnungsrichtung ausgerichtet. Viscinzellen sind von 0,75 mm auf beachtliche 15 bis 20 Zentimeter dehnbar. Das Verhalten der Mikrofilamente ist vielleicht am ehesten mit der Länge eines ein- und ausgerollten Maßbandes vergleichbar [17, 20]. Diese Fähigkeit ist einmalig für cellulosehaltige Zellwände. Die auf diese Weise entstehenden Fäden sind klebrig, sehr elastisch, relativ zugfest und bruchstabil. An diesen Fäden baumeln oft viele Samen – aufgereiht und von den Viscinellulosefilamenten gehalten – von den Mistelbüschen (siehe auch Kasten „Einfaches Experiment zur „Klebekraft“ der Mistelbeeren“).

Die Ausbreitung dieser „Samen-Seilschaften“ erfolgt auf zwei Wegen: Entweder lösen sie sich und fallen auf tiefer gelegene Strukturen herab oder der Wind sorgt für ein Verdriften in unterschiedlichste Richtungen und über unterschiedlichste Entfernungen in andere Baumabschnitte oder Nachbarbäume. Nach Herbst- und Winterstürmen sind zuvor schnurreiche Mistelbüsche leergefegt. Offenbar gibt zumindest in süddeutschen Obstbaumgebieten



ABB. 4 Aus der Krone in den Baum: Die kleine Mistel auf dem Ast im Vordergrund entstand durch Abtropfen der Samen aus dem darüber liegenden Mistelbusch in der Baumkrone.

vor allem diese Schnur-Wind-Verbreitung der effektiven Ausbreitung von Misteln innerhalb ihrer Wirtsbäume und deren Nachbarbäume einen zusätzlichen Schub [eigene Beobachtungen].

Die Verbreitung von Samen kann unterschiedliche Strategien verfolgen: eine zufällige oder eine gerichtete

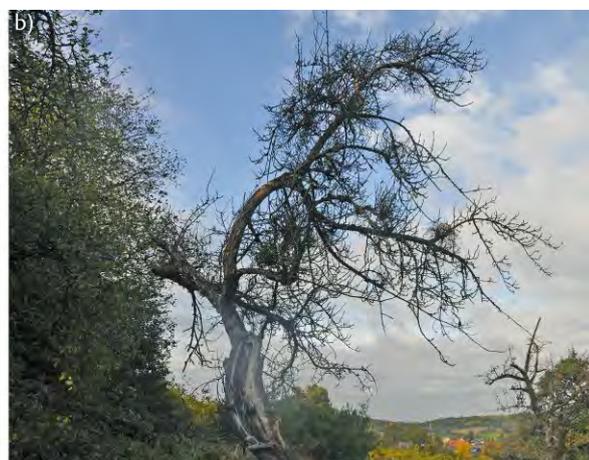


ABB. 5 Wo Obstwiesen nicht mehr bewirtschaftet und die Obstbäume nicht regelmäßig geschnitten werden, breiten sich Misteln auf vielen Bäumen aus. Stark „vermistelte“ Bäume (a) sterben ab (b) und damit auch die Mistelbüsche.



ABB. 6 Aus den Mistelbeeren entleeren sich neben den Samen ein Gemisch aus Polysacchariden, Pektin und Viscin von hoher Haft- und Klebefähigkeit. Dieses Gemisch kann lange Schnüre bilden, an denen die Samen kleben. Mit Hilfe der Samenschnüre können Samen innerhalb des Baumes oder auf benachbarte Bäume verbreitet werden.

Verbreitung [21]. Im System Wirt-Mistel-Samenverbreiter findet eine vom Vogelverhalten gesteuerte und dadurch gezielte Verbreitung von Samen auf potenziell günstige Keimpositionen in Wirtsbäumen statt. Die Bevorzugung von bestimmten Bäumen durch Vögel kann allerdings auch zu einem Paradoxon führen, da es dort zu einem hohen Mistelbefall kommen kann. Letzterer schädigt den Wirt und dadurch auch den Parasiten Mistel selbst. Durch den Wind verbreitete Mistelschnüre ermöglichen eine zusätzliche Ausbreitung unabhängig von Vögeln im Sinne einer Verbreitung von Spezialisten und von Nichtspezialisten.

Mistelbefall – was tun?

Angesichts sich stark auf Kosten der Wirtsbäume ausbreitender Misteln wird vielerorts über die Möglichkeiten eines Managements nachgedacht [1]. Obstbaumbesitzern wird meistens das Ausschneiden befallener Äste und Einbringen einer Wundheilsalbe empfohlen [2, 3] oder ein Verbinden der Äste, um ein erneutes Keimen zu verhindern. Ökologisch fragwürdigere Optionen sind die Anwendung von Wachstumsregulatoren, Herbiziden oder

Arboriziden. Biologische Ansätze sind das Vermeiden von Monokulturen und häufiger Wirtsarten in der Nähe von Obstgärten oder die Pflanzung von Pufferstreifen an vermistelten Zonen mit Nadel- und Laubbäumen der resistenten Arten aus den Gattungen *Quercus*, *Cercis*, *Paulownia*, *Koelreuteria*, *Larix*, *Ulmus*, *Catalpa*, *Platanus*, *Ailanthus*, *Ginkgo* und *Cotynus*. Bei den zweihäusigen Misteln wäre auch das Entfernen weiblicher Pflanzen zumindest ein theoretischer Ansatz, der aber offenbar noch nicht verfolgt wird.

Beim Management der Mistel sollte bedacht werden, dass Misteln signifikant zur Artenvielfalt sowohl im Baum als auch im Boden beitragen und eine wichtige Nahrungsquelle für einige Vogelarten sind. Vogelkot, der sich unter Mistelwirtsbäumen sammelt, enthält neben Nährstoffen auch Samen, die die Pflanzenvielfalt erhöhen und z. B. zur Regeneration von Waldökosystemen beitragen [19]. Wo die Grenze zwischen einem für die Biodiversität nützlichen und für den Wirtsbaum schädlichen Mistelbefall liegt, muss noch eruiert bzw. im Einzelfall entschieden werden.

Zusammenfassung

Misteln wachsen auf Ästen und Zweigen von Laub- und Nadelbäumen. Typische Wirtsbäume der Laubholzmistel sind in Mitteleuropa Apfel oder Pappel. Die Besiedlung eines Wirtsbaumes ist ein Zusammenspiel zwischen Eigenschaften des Wirtsbaumes, des Parasiten und seiner Vektoren, im Fall der Mistel von beerenfressenden Vögeln (Zoochorie). Per Vogel erreicht die Mistel geeignete Äste in Baumkronen, die ein erfolgreiches Keimen und Wachsen ermöglichen. Samen verbreitende Drosseln profitieren andererseits von der Beerennahrung in einem von ihnen ausgesuchten, sicheren Ausguck. Aber Misteln breiten sich auch durch „Abtropfen“ innerhalb befallener Bäume aus. Wenn sich die reifen Beeren öffnen, entleert sich das Mesokarp mit den von Viscin und Cellulose überzogenen Samen. Diese Naturstoffe sind von hoher Klebrigkeit und bilden 15 bis 20 Zentimeter lange stabile Fäden, an denen die Samen kleben. Solche Mistelschnüre baumeln im Winter zahlreich aus den Mistelbüschen herab und fallen entweder auf tiefer gelegene Strukturen oder der Wind verdriftet sie in die Umgebung. Offenbar trägt zumindest in manchen Regionen diese Schnur-Wind-Verbreitung zur effektiven Ausbreitung von Misteln innerhalb ihrer Wirtsbäume und deren Nachbarbäume bei. Mistelschnüre ermöglichen eine Vogel-unabhängige Ausbreitung.

Summary

*Via birds, wind and rope team: the dispersal of the hemiparasite mistletoe (*Viscum album*)*

Mistletoe grows on the twigs and branches of deciduous and coniferous trees. Typical deciduous hosts in central Europe are apple and poplar trees. The colonisation of a host tree is an interactive process between the innate characteristics of the host tree and the parasite with its vectors,

in this case berry-eating (frugivore) birds (zoochory). The mistletoe is placed by birds on a suitable branch within the crown of a tree thus enabling a successful germination and growth. In turn, thrushes dispersing mistletoe seeds profit from the berry food in a safe lookout chosen by them. However, mistletoe also disperses by „dripping down“ from infested/parasitized trees. When the ripe berries of the mistletoe open, the mesocarp releases the seeds coated with cellulose and viscin. The latter is a natural substance that is very sticky and forms 15 to 20 cm long threads to which the seeds stick. During winter, these mistletoe threads dangle from the mistletoe bushes and either drop down onto lower branches or are dispersed by the wind. In some regions, this thread-wind-dispersal apparently contributes to the effective spreading of mistletoe within their hosts and their neighbouring trees. Thus, mistletoe threads enable a form of dispersal independent of birds.

Schlagworte:

Mistel, Wirtsbäume, Frugivorie, Samenverbreitung, Viscin-Fäden

Literatur

- [1] Y. Krasylenko et al. (2020). The European mistletoe (*Viscum album* L.): distribution, host range, biotic interactions and management worldwide with special emphasis on Ukraine, Botany, <https://doi.org/10.1139/cjb-2020-0037>
- [2] S. Bosch (2020). Misteln schaden Apfelbäumen, Vögel 57, 76–77.
- [3] Naturschutzbund Deutschland (Hrsg.) (2016). Misteln in Streuobstbeständen, Berlin, 8 pp., https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/streuobst/infopapiere/160701_nabu-hintergrund_misteln_in_streuobstbest_nden.pdf
- [4] A. Lüttig, J. Kasten (2003). Hagebutte & Co: Blüten, Früchte und Ausbreitung europäischer Pflanzen, Fauna Verlag, Nottuln, 218.
- [5] L. Schröder et al. (2022). The gene space of European mistletoe (*Viscum album*), The Plant Journal 109, 278–294.
- [6] D. Kahle-Zuber (2008). Biology and evolution of the European mistletoe (*Viscum album*). Diss. Univ. ETH Zürich, <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/150874>
- [7] <http://www.floraweb.de/webkarten/karte.html?taxnr=26634> und <http://www.floraweb.de/pflanzenarten/artenhome.xsql?suchnr=26634&>
- [8] C.W. Barney et al. (1998). Hosts of *Viscum album*, Eur. J. Path., 1998, 28: 187–208.
- [9] M. Dobbertin et al. (2005). The upward shift in altitude of pine mistletoe (*Viscum album* ssp. *Austriacum*) in Switzerland—the result of climate warming? Int. J. Biometeorol. 50, 40–47.
- [10] J. Kolodziejek et al. (2013). Distribution, frequency and host patterns of European mistletoe (*Viscum album* subsp. *album*) in the major city of Lodz, Poland, Biologia 68, 55–64.
- [11] M. Muche et al. (2022). Biology and resource acquisition of mistletoes, and the defense responses of host plants, Ecological Processes 11, 24.
- [12] D. Kartoolinejad et al. (2007). The Relationship among Infection Intensity of *Viscum album* with some Ecological Parameters of Host Trees, Int. J. Environ. Res. 1, 143–149.
- [13] E. Bilgili et al. (2020). The distribution of pine mistletoe (*Viscum album* ssp. *austriacum*) in Scots pine (*Pinus sylvestris*) forests: from stand to tree level, Scandinavian Journal of Forest Research 35, 20–28, <https://doi.org/10.1080/02827581.2020.1729402>
- [14] I. Varga et al. (2012). Adatok a fehér fagyöngy (*Viscum album*) hazai rovarfaunájához (Data to the hungarian insect fauna of european mistletoe (*Viscum album*), Növényvédelem 48, 153–164.
- [15] A. Mellado et al. (2016). Temporal dynamic of parasite-mediated linkages between the forest canopy and soil processes and the microbial community, New Phytologist 211, 1382–1392.
- [16] G. E. Walsberg (1975). Digestive adaptations of *Phainopepla nitens* associated with the eating of mistletoe berries, Condor 77, 169–174.
- [17] J.-I. Azuma et al. (2000). The cellulose system in viscin from mistletoe berries, Cellulose 7, 3–19.
- [18] J. E. Aukema, C. Martínez del Río (2002). Where does a fruit eating bird deposit mistletoe seeds? Seed deposition patterns and an experiment, Ecology 83, 489–496.
- [19] A. Mellado, R. Zamora (2016). Spatial heterogeneity of a parasitic plant drives the seed-dispersal pattern of a zoochorous plant community in a generalist dispersal system, Functional Ecology 30, 459–467.
- [20] J. E. Aukema (2003). Vectors, viscin, and Viscaceae: Mistletoes as parasites, mutualists, and resources, Front. Ecol. Environ. 1, 212–219.
- [21] O. Spiegel, R. Nathan (2010). Incorporating density dependence into the directed-dispersal hypothesis, Ecology 91, 1538–1548.

Verfasst von:



Stefan Bosch, geb. 1962, ist Mediziner und beschäftigt sich in seiner Freizeit intensiv mit Ornithologie, Kleinsäugern, Wildpflanzen und Naturschutz. Mit Peter Lurz hat er zahlreiche Fachbeiträge und mehrere Bücher veröffentlicht.



Peter Lurz, geb. 1962, hat Botanik und Zoologie studiert und gibt Vorlesungen über Ökologie an der Universität in Edinburgh, Schottland. Er ist anerkannter Hörnchenexperte und hat in den letzten 25 Jahren an Forschungs- und Naturschutzprojekten sowie verschiedenen Vogel- und Säugetierprojekten gearbeitet.

Korrespondenz:

Dr. Stefan Bosch
Metterstr. 16
D-75447 Sternenfels
stefan-bosch@web.de

LEHRBUCH

Deutsche Alternative

Wer ein gutes Lehrbuch zur Biologie suchte, dem wurde lange Zeit der Campbell, später auch der Purves als Standardwerk empfohlen. Seit kurzem bereichert ein neues gewichtiges Lehrwerk den Markt – der BOENIGK!

Das von Prof. Dr. Jens Boenigk von der Universität Duisburg-Essen herausgegebene Lehrbuch hält, was es in der Kurzcharakterisierung auf der Rückseite verspricht: Auf 1014 Seiten vermittelt das Lehrbuch komplizierte Sachverhalte der Biologie mit verständlichen Texten in Kombination mit hervorragenden, qualitativ hochwertigen und farbigen Abbildungen. Alle grundlegenden Themengebiete der Biologie wie Cytologie, Physiologie, Genetik oder Evolution werden anschaulich und sehr gut strukturiert dargestellt. Besonders interessant ist das vorangestellte Kapitel „Grundlagen“, in dem das Wesen des Faches Biologie sowie die hier bedeutsamen Biomoleküle vorgestellt werden.

Die Reihenfolge der Kapitel führt didaktisch geschickt von den allgemeinen strukturellen, biochemischen und genetischen Grundlagen hin zur Evolution der Organismen, sodann zu deren Ergebnis in Form der Vielfalt der Organismenformen bis schlussendlich zu deren Wechselwirkungen mit der Umwelt. Jedes der großen Teilgebiete der Biologie wird in Kapiteln mit einzelnen Themenabschnitten gegliedert, die einem nachvollziehbaren roten Faden folgen und somit mundgerecht aufgearbeitet sind. Jedem dieser Themenabschnitte ist eine prägnante Überschrift, welche den nachfolgenden Inhalt in einer knappen Aussage zusammenfasst, vorangestellt. Es folgen dann auf zwei oder vier Seiten kurze Texte mit großformatigen Abbildungen, welche selbst bei komplexen Sachverhalten wie dem Spleißen eukaryontischer Prä-mRNA oder den diversen zellulären Stoffwechselprozessen für ein vertieftes Verständnis sorgen. Hierbei wird die Didaktik des abbil-

dungsbasierten Lernens konsequent umgesetzt, denn Text und Abbildungen bilden eine gelungene Symbiose und sorgen dadurch für ein gutes Verständnis der vorgestellten Sachverhalte. Am Ende eines jeden Kapitels findet sich eine Übersicht zu weiterführender Literatur, die zur Vertiefung der Erkenntnisse einlädt. Des Weiteren unterstützt am Ende des Lehrwerkes ein 78-seitiges Glossar den Lesenden beim Nachvollziehen zentraler Konzepte oder Fachbegriffe, ohne die kein biologisches Lehrwerk auskommt. Erfreulich am BOENIGK ist auch seine Aktualität: So werden bedeutsame Themen der heutigen Zeit wie die Epigenetik oder die COVID-19-Pandemie ausgiebig abgehandelt. Interdisziplinäre Aspekte wie der Klimawandel finden in diesem Lehrbuch ebenfalls eine entsprechende Berücksichtigung.

Geschrieben ist der BOENIGK Biologie in erster Linie für Bachelor-Studierende der Biologie, denn er umfasst die Grundlagen und das notwendige Fachwissen für ein Verständnis komplexer biologischer Sachverhalte! Auf diesem Grundwissen kann im Rahmen der Spezialisierung beim Masterstudium aufgebaut werden.

Aufgrund seiner Gliederung bietet es sich aber auch für Hochschuldozent/-innen sowie schulische Lehrkräfte der Biologie oder Naturwissenschaften als Nachschlagewerk und Materialfundus für die Lehrtätigkeit an. So sind die einzelnen Kapitel unabhängig voneinander rezipierbar; sie bauen nicht zwingend aufeinander auf. Die Abbildungen des Buches für Dozenten/-innen und Lehrkräfte sind online verfügbar, so dass sie in Lehrveranstaltungen und Unterricht eingesetzt werden können. Voraussetzung dafür ist lediglich eine Registrierung beim Verlag. Auch für die 2. Phase der Fachlehrkräfte-Ausbildung an Studienseminaren stellt der BOENIGK eine vorzügliche Alternative zu den in deutscher Übersetzung vorliegenden amerikanischen Lehrwerken dar. Allein die grafische Darstellung von biologischen Konzepten

dürfte die angehenden Lehrkräfte darin bestärken, ihren Ausbildungsunterricht in höherem Maße abbildungsorientiert zu planen und auf diesem Wege Lernprozesse sinnvoll zu optimieren. In Auszügen ist der BOENIGK auch den Schüler/-innen der gymnasialen Oberstufe zu empfehlen, da hier zentrale Themengebiete der Kernlehrpläne SII verständlich und einprägsam abgehandelt werden. Gerade die Kombination aus hochwertigen Abbildungen und kurzen Textabschnitten unterstützt Oberstufen-Lernende bei der Vorbereitung von Klausuren und Abiturprüfung. Zugleich kann das Lehrbuch aber auch tiefergehendes Interesse von Lernenden im Selbststudium befriedigen oder bei der Anfertigung von Referaten unterstützen.

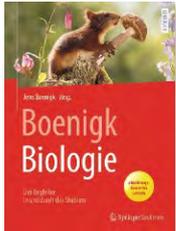
Für Bachelor-Studierende wird ein 102-seitiges Arbeitsbuch kostenpflichtig angeboten, mit dem viele Aspekte aus dem Lehrbuch nachbereitet werden können. Auch in diesem Arbeitsbuch stehen farbige Abbildungen im Vordergrund, bei denen Lücken in der Beschriftung oder in Fließtexten zu füllen oder aber eigene Fachtexte zu erstellen sind. Mit dem Erwerb des Arbeitsbuches steht zugleich ein eBook zur Verfügung, bei dem die Lösungen online eingegeben werden können und eine vereinfachte Prüfung der Richtigkeit ermöglicht wird. Bei analoger Bearbeitung ist die Lösung ebenfalls online verfügbar.

Der BOENIGK, an dem insgesamt 17 Autor/-innen mit Beiträgen beteiligt sind, ist insgesamt ein innovatives Lehrbuch der Biologie, das nicht nur Fachleute, Studierende oder Lernende begeistern wird. Auch das Lesen aus reinem Interesse mit wenig biologischen Vorkenntnissen wird aufgrund der außergewöhnlichen Gestaltung zu einem wahren Genuss.

Michael Hänsel, Kamp-Lintfort

Boenigk Biologie.

Jens Boenigk (Hrsg.), Springer Spektrum, Heidelberg, 2021, 1061 S., 84,99 Euro, ISBN 978-3-662-61269-9.



KLIMAWANDEL

Ständiger Wandel



Wir leben in einer Zeit, in der kaum ein Tag vergeht, ohne dass uns in den Medien Katastrophen, Wetterereignisse und Klimaveränderungen

in den schlimmsten Farben geschildert werden. Mal sind es die Gletscher, die zurückgehen, mal Überflutungen, mal ausgedehnte Waldbrände oder ungewöhnliche Temperaturen irgendwo auf der Erde. Diese Ereignisse werden meist isoliert behandelt, ohne einen Vergleich zu anderen Regionen der Erde oder zu Klimaereignissen in der Vergangenheit. War das Klima früher immer besser? Gab es früher keine Wetterkatastrophen? Wer über diese Thematik ein fundiertes Buch lesen möchte, ist mit diesem Klimabuch von zwei ausgewiesenen Schweizer Klimaforschern gut bedient. Dieses Buch rekapituliert nicht nur das Klima der letzten tausend Jahre in Europa, sondern zeigt auch auf, wie das Klima mit gesellschaftlichen Veränderungen, Hungersnöten, Epidemien und Kriegen in Verbindung stehen kann.

Das Buch liefert zunächst eine kurze und prägnante Einführung in die Wetter- und Klimaforschung (Meteorologie und Klimatologie). Es führt in die Methoden der aktuellen Meteorologie ein, aber auch in die Methoden, um das Klima der Vergangenheit zu rekonstruieren. Dazu zählen die Analyse von Eisbohrkernen, Pollenprofilen, Baumringwachstum und Stalagmitenveränderungen. Hinzu kommen schriftliche Berichte über Wetterereignisse, Gletschergößen und den Anbau von Wein und Ölbäumen.

Die beiden Autoren haben aus all diesen Daten das Klima der letzten 1000 Jahre detailliert rekonstruiert. Zu jedem Jahrhundert wird

dargelegt, welche Sommer oder Winter besonders warm bzw. besonders kalt waren und wie sich dies auf die landwirtschaftlichen Erträge, gesellschaftliche Entwicklungen und Kriege ausgewirkt haben kann. Nach einer ausgeprägten Warmzeit im 11. bis 13. Jahrhundert, in der Weinanbau bis Mittelengland möglich war und Grönland von den Wikingern besiedelt wurde, folgte ab 1300 die Kleine Eiszeit, die erst mit Ende des 19. Jahrhunderts zu Ende ging. Aus dieser Zeit kennen wir die Bilder mit zugefrorenen Flüssen und Seen, auf denen man im Winter überall Schlittschuh fahren konnte. Dies waren auch Jahrhunderte mit vielen Kriegen, Seuchen und vor allem Hungersnöten, die dazu führten, dass viele Menschen verstarben oder in die Neue Welt auswanderten. Im 20. Jahrhundert änderte sich das Klima stärker als in den Jahrtausenden vorher, indem die mittleren Temperaturen der Ozeane und Landmassen anstiegen. Bekanntlich wird diese Veränderung mit der Freisetzung von Treibhausgasen in Verbindung gebracht. Diese anthropozänen Klimaveränderungen werden beschrieben, analysiert und thematisiert.

Das Buch zeigt auf, dass unser Klima nie konstant war, sondern sich ständig verändert hat; dies gilt natürlich nicht nur für die letzten 1000 Jahre, sondern für die ganze Erdgeschichte. Nicht vergessen sollten wir, dass wir in den letzten zwei Millionen Jahren einen regelmäßigen Wechsel von Kaltzeiten (Eiszeiten) und Warmzeiten hatten. Die letzte Eiszeit ging vor erst 12.000 Jahren zu Ende und führte zu immensen Klimaveränderungen und zu einem Anstieg des Meeresspiegels um 120 Meter. Mitteleuropa wurde erst danach für uns Menschen besiedelbar.

„Klima und Gesellschaft“ ist ein auch für den Laien gut lesbares und reich bebildertes Sachbuch und eine wichtige Quelle, um die anthropozänen Klimaveränderungen be-

werten zu können. Dieses Buch lohnt sich für jeden, der sich für Klima, Gesellschaft und Geschichte interessiert.

Michael Wink, Heidelberg

Klima und Gesellschaft in Europa. Die letzten tausend Jahre. Christian Pfister, Heinz Wanner, Haupt-Verlag Bern, 2021, 424 S., 49,00 Euro. ISBN 978-3-258-08182-3

PRIMATENFORSCHUNG

Schlecht lesbare Hoffnung



Die britische Forscherin Jane Goodall wurde vor allem durch ihre bahnbrechenden Arbeiten im Bereich der Natur- und Verhaltensforschung berühmt. Ihre

Bücher über das Leben und das Verhalten der Schimpansen in Tansania machten sie auch einem breiten Publikum bekannt. In den letzten Jahrzehnten widmet sie sich mit dem von ihr gegründeten Jane Goodall Institut auch über die Primatenforschung weit hinausgehenden Fragen des Tier- und Klimaschutzes. Diese Aktivitäten umfassen verschiedene internationale Programme für den Umwelt-, Klima- und Artenschutz. Goodalls Ko-Autor Douglas Abrams ist Literaturagent und Autor, der im Jahr 2016 gemeinsam mit dem Dalai Lama und Desmond Tutu das Buch der Freude veröffentlichte. Das vorliegende Werk folgt einem ähnlichen Motto und schildert viele, oft sehr persönliche Ideen zu dem Stichwort Hoffnung: Hoffnung auf eine Lösung der drängenden Probleme wie dem Klimawandel und Umweltschutz, dem Artensterben oder den schlechten Lebensbedingungen in den Entwicklungsländern.

Das Buch stellt ein langes Zwiegespräch dar, das von lockeren und spontanen Ideen bis zu der Beschreibung von persönlichen Erlebnissen und Begegnungen mit den betroffenen Menschen, Wissenschaftlern und Tieren reicht. Nicht die Ergebnisse der Primatenforschung stehen hier im Mittelpunkt, sondern die Natur im weitesten Sinne und die Zukunftsaussichten der Menschheit.

Leider macht gerade diese Dialogform das Buch schwer lesbar. Die Grundlage waren sicher die zahlreichen Gespräche zwischen den beiden Autoren, aber die Dialoge wirken etwas gekünstelt: „Du benennst diese Arten als wären sie dir sehr vertraut“, bemerkte ich. „Nun, das liegt daran, dass sie mir sehr am Herzen liegen.“ oder „Welche Arten sind denn bereits zurückgekehrt?“, fragte ich. „Also“, begann Jane, die Finger zum Abzählen erhoben ... oder „Kein Wunder, dass ich noch so gesund bin.“ „Wunderbar“, sagte ich. Leider wird diese Form fast in dem gesamten Buch durchgehalten. Es spricht grundsätzlich nichts dagegen, in einen Text Zitate einzufügen, aber lange, offensichtlich für die Publikation nachträglich aufbereitete Zwiegespräche können den Leser nur schwer über 250 Seiten fesseln. Die angesprochenen Themen sind interessant und wichtig, das Buch ist auch mit zahlreichen Fotos illustriert. Wie erwähnt, lässt die literarische Umsetzung leider etwas zu wünschen übrig. Aber wem dies gefällt, lernt viel über die Ideen von Jane Goodall. Wer sich jedoch mehr für ihre eigentliche Forschung interessiert, findet in ihren anderen, früher publizierten Büchern mehr Informationen dazu.

Wolfgang Skrandies, Gießen

Das Buch der Hoffnung.

Jane Goodall, Douglas Abrams, Penguin Random House, Verlagsgruppe München, 2021, 272 S., 22,00 Euro, ISBN 978-3-442-31608-3.

MEER & KÜSTE

Am Strand den Horizont erweitern



Der Strandkorb ist ein unverzichtbares Möbel für den Urlaub an Nord- oder Ostseeküste, er verspricht eine entspannte Lage und einen weiten

Blick über das Meer. „Astrofreaks“ können in einem Schlafstrandkorb inzwischen sogar einen Blick in den Nachthimmel wagen. Genau das gilt auch für das Buch „Vom Strandkorb aus betrachtet“. Inhaltlich gleicht die Strandkorb-Sicht einem Zoom von kosmischen Ausblicken (Das Große und Ganze) über weite Dimensionen (Zwischen Horizont und Wasserlinie) bis zur unmittelbaren Nähe (Treffpunkt Spülsaum).

Wer sich für die Natur am Strand interessiert, wird sicher schon auf Bücher des Biologie-Didaktikers Bruno P. Kremer gestoßen sein, wie „Naturspaziergang am Meer“ (Kosmos Verlag 1991), „Erlebnis Küste“ (Quelle und Meyer 2012), oder „Düne, Strand und Watt“ (Kosmos Verlag 2018). Das vorliegende Buch ist eine aktualisierte und überarbeitete Neufassung des vergriffenen Buches „Kremers Strandkorb Sammelurium, Natur-Wissen für die schönsten Tage des Jahres“ (Hirzel-Verlag 2009), diesmal als preiswertes Taschenbuch. Alle Kremer-Bücher zeichnet ein lockerer und kenntnisreicher Schreibstil aus, garniert mit viel Sprachwitz und einprägsamen Wortspielen, wie „Aquarobik“ zur Simulation des Wassermoleküls, „Dünamik“ für die Entstehung von Dünen, oder „Allerhand Aufsässige“ zur Beschreibung fest-sitzender Seepocken.

Das informative und gleichzeitig unterhaltsame Buch liefert einen naturwissenschaftlichen Gesamt-

blick auf die Meeresküsten mit dem Schwerpunkt Nord- und Ostsee. Ob der Leser folgende Sachverhalte faszinierend, überraschend oder unvermutet findet, bleibt ihm überlassen, bemerkenswert sind sie in jedem Fall:

- Die Bodentemperatur der Mond-sichel beträgt im beleuchteten Teil +120 °C, im beschatteten dagegen -130 °C.
- Die „Sieben Meere“ sind eigentlich drei Ozeane und fünf Meere.
- In Norddeutschland lebt man streng genommen auf skandinavischem Boden.
- Die Nordfriesischen Inseln sind Überbleibsel nach Landverlusten, die Ostfriesischen Inseln dagegen Sandablagerungen.
- Die Form von Wattrippeln folgt komplizierten mathematischen Gesetzen und entsteht durch die Bewegung von zwei Medien unterschiedlicher Dichte.
- In den 54.000 km³ Nordseewasser sind mehr als 1,8 Milliarden Tonnen Meersalz enthalten.
- Der Salzgehalt der Ostsee gleicht dem unserer Tränen.
- Die tiefste Stelle der Niederlande liegt 6,75 m unter NN.
- Der mittlere Hochwasserstand einer Küste ist an der Seepockenlinie ablesbar.

Nicht nur naturkundlich Interessierte, sondern auch Lehrer der MINT-Fächer werden hier einen wahren Fundus von physikalischen, chemischen, geologischen und biologischen Informationen zu Meer und Küste finden. Am Ende werden Sie sogar erfahren, wieviel Wasser der Golfstrom transportiert hat oder wie oft die Strandfliege mit den Flügeln geschlagen hat, während Sie diese Rezension gelesen haben.

Inge Kronberg, Büsum

Vom Strandkorb aus betrachtet.

Faszinierendes, Überraschendes und Unvermutetes von der Meeresküste. Bruno P. Kremer, Springer, Berlin, 2021, 269 S., 19,99 Euro, ISBN 978-3-662-62959-8.

AUSSERSCHULISCHE LERNORTE

MS Wissenschaft – das schwimmende Wissenschaftsmuseum

Seit 2002 präsentiert die MS Wissenschaft in vielen deutschen Städten Wissenschaft zum Anfassen. Dabei greift das schwimmende Wissenschaftsmuseum die Themen des von der Initiative Wissenschaft im Dialog gemeinsam mit dem Bundesforschungsministerium ausgelobten Wissenschaftsjahres auf. Im Jahr 2021 stand dieses unter dem Motto „Bioökonomie“ und die MS Wissenschaft begab sich auf eine (Schiffs-) Reise durch nachhaltige Wirtschaftsformen. Der Themenkomplex rund um nachhaltige Wirtschaftsformen ist brandaktuell, denn angesichts zum Teil besorgniserregender klimatischer Entwicklungen im Wechselspiel mit der stetig wachsenden Weltbevölkerung und der exzessiven Nutzung fossiler Rohstoffquellen besteht sofortiger Handlungsbedarf.

Im Forschungsschiff „MS Wissenschaft“ wird dieses global relevante Theoriegebäude (be-)greifbar aufbereitet (Abbildung 1). In ca. 30 deutschen und österreichischen Städten gastiert das Schiff, in dem die Besucher/-innen in die dort gar nicht mehr abstrakte Welt der Bioökonomie eintauchen können. Die inhaltlichen Schwerpunkte stehen unter übergeordneten politisch-gesellschaftlichen Fragestellungen bzw. Herausforderungen: Verfahren, in denen Mikroorganismen eingesetzt werden, ressourcenerhaltende Kreislaufprozesse, „futuristische“ Lebensmittel und die Nutzung natürlich vorhandener Wirkstoffe. Einige der Fragestellungen sind: „Wie können wir natürliche Ressourcen und Prozesse nutzen?“ (Abbildung 2), „Welche biobasierten Produkte gibt es

schon?“ (Abbildung 3) und „Was werden wir in Zukunft essen?“ (Abbildung 4). Besonders eindrucksvoll ist das Geduldsspiel-Modell zum dynamischen Gleichgewicht der UN-Nachhaltigkeitsziele (Abbildung 5).

Renommierte Forschungsinstitute, darunter das Forschungszentrum Jülich, die Fraunhofer Academy München sowie das Bonares-Zentrum für Bodenforschung bieten interaktive Ausstellungselemente mit dem entsprechenden wissenschaftlichen Anspruch und dokumentieren so den aktuellen Forschungsstand der Nutzungsmöglichkeiten neuer Technologien. Eine Wissenswelt für sich, geschickt integriert in ein nur räumlich begrenztes, alleine schon wegen des Ambientes ungewöhnliches Life-Museum machen den Ausstellungsbesuch zu einem „Learning by doing“-

ABB. 1 Bioökonomie ist global. Das Museumsschiff fährt etwa 30 deutsche und österreichische Städte an.
Alle Fotos C. Högermann.



ABB. 2 Übersicht über die Nutzung natürlicher Ressourcen.



ABB. 3 Kleidung kann biobasiert hergestellt werden.



ABB. 4 Wie sehen die Lebensmittel der Zukunft aus?



ABB. 5 Geduldsspiel-Modell zum dynamischen Gleichgewicht der UN-Nachhaltigkeitsziele.

Erlebnis mit hohem Aufklärungs- und Behaltwert. Die Exponate sind so konzipiert, dass sowohl große und kleine Privatbesucher/-innen als auch Schulklassen davon profitieren können.

Ausführliche Informationen inklusive eines virtuellen Rundgangs durch die Ausstellung, Informationen zu den Exponaten zum Ausdrucken, die Tourdaten sowie Anmeldeformalitäten sind abrufbar unter <https://ms-wissenschaft.de/de/ausstellung/>

Christiane Högermann, Osnabrück

PARTNER DES MENSCHEN

Der Esel (*Equus asinus*)

Esel gelten als störrisch und unbelehrbar. Davon zeugen umgangssprachliche Ausdrücke wie Eselsbrücke, Eselsmütze, Eselsohr oder Eselei. Wobei eine Eselei mitunter zum Ei des Kolumbus wird, wie die Anekdote von Alexander Fleming (1881–1955) zeigt; hätte er seine Staphylokokken-Kulturen verschlossen, hätte er das Penicillin nie entdeckt. Der folgende Artikel soll den schlechten Ruf des Esels zurechtrücken.

„Der gewöhnliche Esel ist jedermanns Sklave und jedermanns Narr“, mit diesen Worten wurde das Grautier von Carl W. Neumann 1928 in die damalige Jubiläumsausgabe von Brehms Tierleben (Abbildung 1) eingeführt. Die kleinen, langohrigen Verwandten der Hauspferde können sich kaum mit den Phänotypen von stattlichen Kaltblütern, die gleichmütig ihre Arbeit verrichten, oder eleganten Warmblütern, die zu allerlei Kunststücken und hurtigem Galopp taugen, messen. Dennoch zeichnen sich diese genügsamen Tiere doch durch so bemerkenswerte Fähigkeiten aus, dass manch eine Verhaltensweise der Langohren bereits im Mittelalter in den europäischen Sprachgebrauch eingeflossen ist. Ein Paradebeispiel ist das deutsche Wort „Eselsbrücke“, das sein Pedant im Französischen „guide-âne“ findet.

Schon in der Mitte des 16. Jahrhunderts illustrierte Conrad Gesner in seiner vierbändigen „Historia animalium“ des Esels gemäßen Gebaren: „Wo er über ein brück gehen sol/die luck und durchsichtig/also/daß das wasser darunter hinfließend/gesehen werde mag/da hat man müh/sol man ihn darüber bringen.“ Sonach war es vonnöten, die Planken einer brüchigen Brücke blickdicht zu machen, um einen Esel über einen Wasserlauf zu lotsen. Ein arttypisches Verhalten, das von dem in der Bundeswehr diensttuenden Esel Hermann gut 400 Jahre später abermals bestätigt wurde: Hermann buckelte zwar im Bezirk Char Darah im spannungsgeladenen Kundus die schweren Waffen und die dazu gehörige Munition, aber er verweigerte das Durchschreiten von Wassergräben. Wegen dieser Insubordination musste der Bundes-

wehresel Hermann seinen aktiven Dienst quittieren und wurde für 100 US-Dollar auf einem örtlichen Markt verkauft.

Im Vergleich dazu erfreuen sich die Esel des Österreichischen Bundesheeres ihres wohlverdienten Pensionistenlebens; de jure werden die Eselveteranen keineswegs verkauft oder verwurstet. In mehreren Streitkräften evozieren die Langohren erneut das Interesse der Admiralität – aus pekuniären, strategischen und logistischen Abwägungen sollen sie wieder zum Militärdienst verpflichtet und in Krisengebiete abkommandiert werden. Esel sind eben billiger, genügsamer und leiser als Kampfhubschrauber.

Equus asinus – die wahren Baumeister

Sicherlich ist das Hauptwerk des Baumeisters George Bähr (* 15. März 1666; † 16. März 1738) die Dresdner Frauenkirche (Abbildung 2) – ein Gotteshaus, geschaffen, um der evangelischen Liturgie einen gebührenden Rahmen zu verschaffen. Doch ohne Zutun von trittsicheren Eseln hätte dieses Fanal des protestantischen Glaubens nicht erschaffen werden können. Die äußere Kuppel wird von einer Wendelrampe zweieinhalb Mal umrundet; die auf einer Länge von nur 146 Metern einen Höhenunterschied von 19 Metern überwindet, was einer Steigung von satten 14 Prozent entspricht. Auf diesem Eselgang schafften die Tragtiere etwa 12.000 Tonnen Sandstein in die Höhe, die bei der Konstruktion der „Steinernen Glocke“ verbaut wurden. Für touristische Visitatoren wurden im Eselgang mittlerweile Nischen mit Sitzgelegenheiten eingerichtet – Komfortzonen, die den Langohren wohl kaum gewährt waren.

Eselsbrücke – der Bedeutungswandel

Allem Anschein nach scheuen Esel weniger das Wasser als solches, sondern vielmehr das unstete Glitzern der Wasseroberfläche; denn die

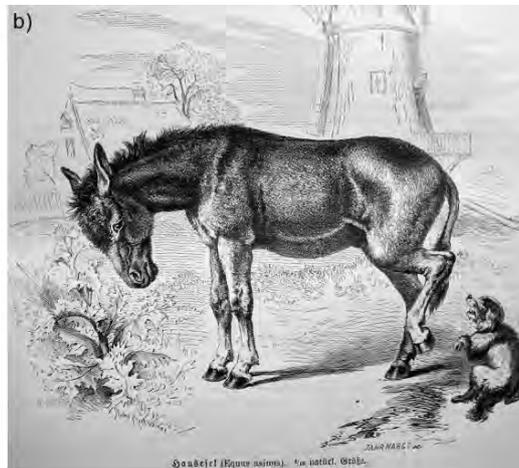
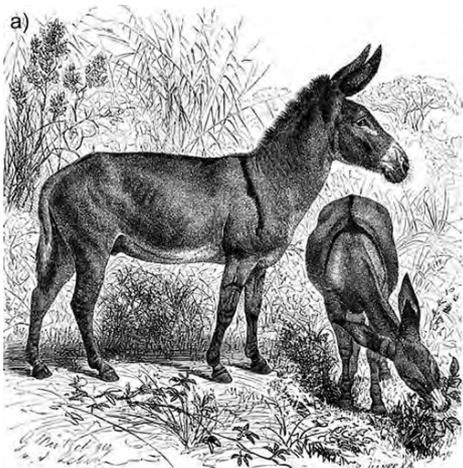


ABB. 1 Brehms Tierleben stellt zwei Abbildungen des Afrikanischen Esels (*Equus asinus*) einander gegenüber: Den stolzen Wildesel (a) und den fügsamen Hausesel (b).



ABB. 2 Die Dresdner Frauenkirche wurde mit Hilfe von Eseln erbaut.
Foto: netopyr über www.wikipedia.de.

wechselnden Reflexionen weisen dem Tier keinen trittsicheren Pfad. Aus diesem Grund queren Esel nur Furten, die wenigstens mit einem Behelfssteg überspannt worden sind – die sogenannte Eselsbrücke (Abbildung 3). Zunächst ein zusätzlicher Aufwand, der gleichwohl oder eben darum zum Ziel führt.

Erst Didakten und Pädagogen wie Dr. Wilhelm Medicus gaben im 19. Jahrhundert der Eselsbrücke ihre heutige Bedeutung: „Eselsbrücken werden auf der anderen Seite immer mehr für Schüler erfunden, daß sie sich ihr Köpfchen nicht zerbrechen müssen, wenn man z. B., wie es nach und nach geschieht, für jeden Classiker ein eigenes Wörterbuch herausgibt.“ Seitdem gilt als Esel, wer solche Hilfe nötig hat.

Der Esel als Landschaftspfleger und -gestalter

2013 veröffentlichte die Europäische Kommission einen „Aktionsplan zur Bewahrung des europäischen Ziesels *Spermophilus citellus* innerhalb der Europäische Union“. Zum Erfolg dieses ambitionierten Vorhabens konnte die Expertise des slowaki-

schen Zoologen Ervín Hapl mit den Anlagen innovativer „Eselsbrücken“ beitragen. Nachdem etliche Versuche zur Wiederansiedlung des Ziesels im Nationalpark Muránska planina gescheitert waren, entschloss sich Hapl im Jahr 2011 auf einem baumlosen Grund mit niedriger Krautschicht einige Esel anzusiedeln. Im gleichen Jahr setzte er auf demselben Gelände noch zwölf Ziesel aus. Acht Jahre später zählte die Zieselpopulation bereits 2000 Individuen. Durchaus ein veritabler Fortpflanzungserfolg für eine Spezies, die in der dortigen Gegend als ausgestorben galt – abgesehen von den Risiken einer Verinselung. Gleichwohl wird *Spermophilus citellus* von der Europäischen Kommission als Sympathieart angesehen, die auch Nichtfachleuten einen zwanglosen Zugang zu komplexen ökologischen Zusammenhängen ermöglichen kann.

Mit ihren Hufen lockern die Esel nicht nur den Oberboden auf, sondern hinterlassen auch mehr oder weniger tiefe Kuhlen. Diese Mulden erleichtern den Zieseln sowohl den Bau ihrer zirkulären Wohnbauten als auch ihrer sackartigen Schlupflöcher. Karpophage *Scarabaeen* wie *Aphodius citellorum* oder *Ontophagus vitulus* folgen den Zieseln in ihre Bauten. Zum einen sind die Exkremente von *S. citellus* die Nahrungsgrundlage dieser *Scarabaeen*, zum anderen entwickeln sich ihre Larven in der geschützten Umgebung der unterirdischen Bauten.

Darüber hinaus werden von Zieseln aufgegebene Bauten von geschützten Arten wie der Wechselkröte *Bufo viridis* oder der Schlingnatter *Coronella austriaca* besiedelt. Auch Erdhummeln profitieren von der gelockerten Erde, worin sie ihre Brutröhren treiben können.

Außerdem scheint der Appetit der Ziesel auf die invasive Pflanzenart Silberblättriger Nachtschatten (*Solanum elaeagnifolium*) dessen



ABB. 3 Esel überqueren Gewässer am liebsten über blickdichte Brücken. Heute helfen sogenannte Eselsbrücken beim Auswendiglernen. Abbildung u. a. gefunden www.zeitblueten.com

Verbreitung zu begrenzen. Und selbst unachtsame Ziesel, die es nicht rechtzeitig in ihre Schlupflöcher schaffen, tragen unfreiwillig zur Regeneration des Ökosystems bei: Die deckungslosen Nager werden zur Beute von Raubvögeln oder Iltissen; dadurch konnten sich auch deren Populationen stabilisieren – eine erstaunliche Steigerung der Biodiversität, nur weil Narren ihre Hufabdrücke in einer Bodenkruke hinterlassen haben.

Zum Weiterlesen

- Anonymus (k. A.). Eintrag Eselsbrücke in der von der Uni Trier digitalisierten Oekonomischen Encyclopädie des Johann Georg Krünitz, erschienen zwischen 1773 und 1858 in sagenhaften 242 Bänden.
- A. E. Brehm (1928). Brehms Tierleben. Die Säugetiere. Verlag von Philipp Reclam jun., Leipzig, 2. Band.
- European Commission (2013): Action Plan for the Conservation of the European Ground Squirrel *Spermophilus citellus* in the European Union. Bonner zoologische Beiträge, 48: 93–109.
- C. Gesner (1551–1558). Historia animalium in vier Bänden. Überarbeitet bzw. übersetzt von Conrad Forer 1606, Heidelberg.
- W. Medicus (1867). Die Naturgeschichte nach Wort und Spruch des Volkes. C. H. Beck'sche Buchhandlung, Nördlingen.
- E. Stresemann (1974). Exkursionsfauna. Volk und Wissen Volkseigner Verlag, Berlin, 6. stark überarbeitete Aufl.
- K. F. W. Wander (1867). Deutsches Sprichwörter-Lexikon. F. A. Brockhaus, Leipzig, Bd. 1.

Internet

- <https://www.frauenkirche-dresden.de/kuppelaufstieg/>, zuletzt abgerufen am 27.04.2021.
- <https://www.youtube.com/watch?v=VslhSTJ1FIQ>, zuletzt abgerufen am 27.04.2021.

Thomas Volker Müller,
Stuttgart



MANAGEMENT-FALLSTRICKE, TEIL 13

Die Bestätigungsverzerrung: Wie wir stets unsere Erwartungen erfüllen

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

Bernhard Borstenschwein schreckte erst auf, als seine Frau ihn sanft an die Schulter fasste. „Du hast verschlafen“, hörte er sie grunzen. Oh nein! Überstürzt packte er seine Aktentasche, strich sich seinen Schnurrbart glatt und eilte im Schweinsgalopp seiner Pflicht entgegen. Zu spät bemerkte er, dass der feine Zwirn noch zu Hause auf dem Bügel hing und er stattdessen seinen blauen Freizeitpullover trug. „Das ist aber wirklich ein Pechtag heute!“, schalt er sich selbst, doch es war zu spät zum Umkehren. Beim Unterstand tat sich zunächst nichts, doch dann kam Hansi Hirsch und erkundigte sich nach einem Luxusschlitten. Sofort war Bernhard Borstenschwein in seinem Element. Er saß mit ihm auf den Ledersitzen Probe, zeigte ihm die Sonderausstattung und überzeugte ihn am Ende durch eine

kleine Spritztour. Der Hirsch unterzeichnete einen Kaufvertrag über den teuersten Schlitten, den er anzubieten hatte.

Der Pechtag wandelte sich in den Glückstag. Ob das an seinem Glückspullover lag? Wie es der Zufall wollte, gelang Bernhard Borstenschwein auch das nächste Mal, als er seinen blauen Pullover trug, ein großer Verkaufserfolg. Konnte das sein? Immer wenn er seinen blauen Pullover trug, wurde der Tag erfolgreich. Das konnte kein Zufall sein! Ab sofort trug er immer dann seinen Pullover, wenn sich ein großer Kunde angekündigt hatte. Tatsächlich bestätigte es sich. Er verkaufte immer dann besonders gut, wenn er den blauen Pullover trug. Bernhard Borstenschwein wurde zweimal zum Verkäufer des Jahres ausgezeichnet und bekam eine goldene Anstecknadel.

Mit den Jahren änderte sich das Kaufverhalten der Kunden. Die Nachfrage nach den Luxusschlitten stagnierte und die Verkaufszahlen drohten einzubrechen. Daher bekam Bernhard Borstenschwein eines Tages einen jungen Kollegen an die Seite gestellt, der die Geschäfte wieder etwas ankurbeln sollte. Ein Online-Angebot sollte etabliert werden, mit Bestellungen auf Knopfdruck. Bernhard weigerte sich, den neuen Kollegen zu unterstützen. Er als alteingesessener Verkäufer wusste schließlich, wie man verkaufte. Da brauchte man keine Kunden, die weit weg von einem am Rechner saßen. Hier am Stand wurden die Geschäfte gemacht!

Bernhard Borstenschwein tat derweil alles, was in seiner Macht stand um die Verkäufe anzukurbeln. Vorsichtshalber trug er nun täglich seinen Glückspullover, auch wenn sich gerade kein Großkunde angekündigt hatte. Der junge Kollege ließ sich indes nicht verunsichern und arbeitete weiter an seinen ausgefallenen Ideen. Als er seine ganze Elektronik verkabelt hatte, startete er sein erstes Verkaufsgespräch per Webcam. Der Pulloverträger beäugte ihn kritisch und beobachtete ihn, wie er noch am gleichen Tag einen großen Schlitten verkaufte. Bernhard Borstenschwein war zwar zuerst überrascht, aber im Grunde erschien ihm der Erfolg doch logisch. Gutmütig tätschelte er die Schulter des jungen Kollegen. „Du hast Glück, dass ich für Dich heute meinen blauen Pullover angezogen habe“, gratulierte er ihm. „Das mit dem ganzen Elektronikram hätte nämlich auch ganz schön nach hinten losgehen können“.

Und die Moral von der Geschichte: Wir hören nur das, was uns nützt und ignorieren gekonnt, was unsere Thesen nicht stützt.

Ihre Andrea Hauk,
andreaauk@gmx.de

FAKTENBOX

Wir neigen zum Selbstbetrug! Durch die sogenannte Bestätigungsverzerrung picken wir in der Regel aus einer Fülle an Informationen nämlich genau diejenigen heraus, die unser eigenes Weltbild bestätigen. Zur Erfüllung der eigenen Erwartungen nehmen wir auch gerne ein Vehikel her, das unsere Thesen unterstützt (der blaue Pulli). Unser Gehirn sucht fortwährend nach Parallelen und nach unterstützenden Informationen. Durch diese selektive Wahrnehmung spielen wir unbewusst alles andere herunter und nehmen die gegenteiligen Informationen viel weniger stark wahr.

Ging es Ihnen nicht auch schon so? Immer wenn sie ihren Schirm dabei hatten, regnete es nicht, aber wehe sie ließen ihn einmal daheim liegen? Ob Ausflugsplanung, Zielvereinbarungsgespräch des Mitarbeiters oder Beurteilung der momentanen Verkaufszahlen: Die Bestätigungsverzerrung schlägt in allen Bereichen zu.

Wie schnell verändern sich Umstände? Wie stark ist die aktuelle Lage mit früheren überhaupt zu vergleichen? Durch die Bestätigungsverzerrung wird die eigene Meinung auch bei sich ändernden Bedingungen immer bestätigt werden. Die Lösung: Machen Sie sich aktiv bewusst, dass es dieses Phänomen gibt und folgen Sie dem wissenschaftlichen Ansatz, möglichst bewusst und objektiv Dinge immer wieder neu zu beurteilen und zu hinterfragen.

RÜCKBLICK

- 1/22 Die unerwartet diversen Gifte der Hundertfüßer
- 1/22 Große Artenvielfalt im Südpolarmeer
- 1/22 Die Grüne Wüste Südamerikas?
- 1/22 100 Jahre Forschung an Wanderheuschrecken
- 1/22 Bakterielle Sensorenkomplexe zur Umweltnavigation
- 1/22 Biologieunterricht praktisch und digital
- 1/22 Gift- und Rauschpflanzen in der frühen Antike
-
- 2/22 Bakterien als Plastikmüllabfuhr
- 2/22 Mit Röntgen in die dritte Dimension
- 2/22 „Wahre Treue“ bei Kupferrotten Springaffen?
- 2/22 Rund, spitz, gespalten
- 2/22 Der Steinschmätzer
- 2/22 Mit Staubsaugern und Handschuhen gegen Viren

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 4/2022 erscheint im November 2022

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

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

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



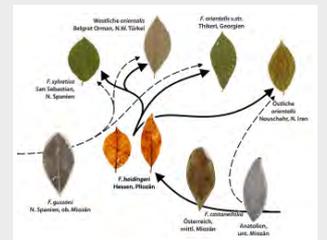
IM NÄCHSTEN HEFT

Luangwa – das Tal des Leoparden

Von Menschen weitgehend unbeeinflusste Ökosysteme sind heutzutage auch in Afrika selten geworden. Sambia ist eines der verbliebenen Länder mit großen Wildnisgebieten und einer beeindruckenden Artenvielfalt. Das im Osten gelegene Luangwatal ist eine der letzten großen afrikanischen Naturlandschaften mit weitgehend intakten Lebensräumen und durch mehrere Nationalparks geschützt.

**Die Buche, ein eurasisches Art-Mosaik**

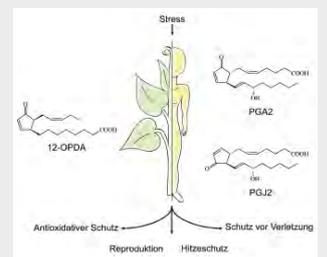
Die Buche ist eine der bekanntesten Laubbäume der nördlichen Hemisphäre. Die heutigen Arten sind das Produkt einer dynamischen Vergangenheit, die von globalen Prozessen beeinflusst wurde, und zeigen zahlreiche Hinweise auf frühere zwischenartliche Kontakte. Unser Artikel fasst die neusten Erkenntnisse zur stark vernetzten Evolution der Buchenarten Europas und Asiens zusammen.

**Invasive Neophyten in Deutschland**

Biologische Invasionen sind in der Natur alltäglich und werden meist von klimatischen Veränderungen gesteuert. Diese natürlichen Invasionen werden heute allerdings durch anthropogene Invasionen um ein Vielfaches übertroffen. Ob die Neankömmlinge nutzen oder eher schaden und deshalb bekämpft werden sollten, muss von Fall zu Fall geprüft werden.

**Funktionelle Konvergenz des Oxylin-Signalling**

An der Regulation von Stressantworten sind sowohl bei Pflanzen als auch bei Tieren Oxidationsprodukte von Membranlipiden beteiligt. Die Tatsache, dass die tierischen Prostaglandine und die pflanzliche cis-12-Oxophytodien säure teils ähnliche molekulare und physiologische Wirkungen hervorrufen, weist auf eine funktionelle Konvergenz hin.

**Der Bärensee in Siebenbürgen**

Der Bärensee ist ein heliothermer Salzwassensee mit einer stabilen Dichteschichtung. In der Übergangsschicht ändern sich Temperatur und Lichtstärke sprunghaft, wodurch mehrere ökologische Lebensräume entstehen. Unser Beitrag stellt dieses einzigartige Unterwassersystem vor.



ONLINE



jobvector

KARRIERE-EVENT

FÜR NATURWISSENSCHAFTLER



01. SEPTEMBER 2022

15. JUNI 2023

08. DEZEMBER 2022

14. SEPTEMBER 2023

23. FEBRUAR 2023

07. DEZEMBER 2023

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

Kostenfrei anmelden!

www.jobvector.de/karrieremesse

