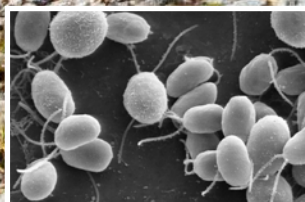


JOURNAL STUDIUM INTEGRALE

Überschiebung in den Alpen



Schimpansen leben außerhalb der Steinzeit



Evolution der Mehrzelligkeit im Labor?



Flugsaurier mit ausgefeilter Konstruktion

Eine Verteidigung der theistischen Grundlegung objektiver Moral

NEU

Ist ohne Gott alles erlaubt?

Markus Widenmeyer

Moral ohne Gott?

Eine Verteidigung der theistischen Grundlegung objektiver Moral

SCM Hänssler, Reihe Studium Integrale, Hardcover, Format 16,5 x 24, 167 Seiten, 4 Tafeln

ISBN: 978-3-7751-6169-5

14,95 EUR [D] / 17,60 EUR [A] / 17,80 CHF

Erhältlich im Buchhandel
oder direkt unter
www.wort-und-wissen.org

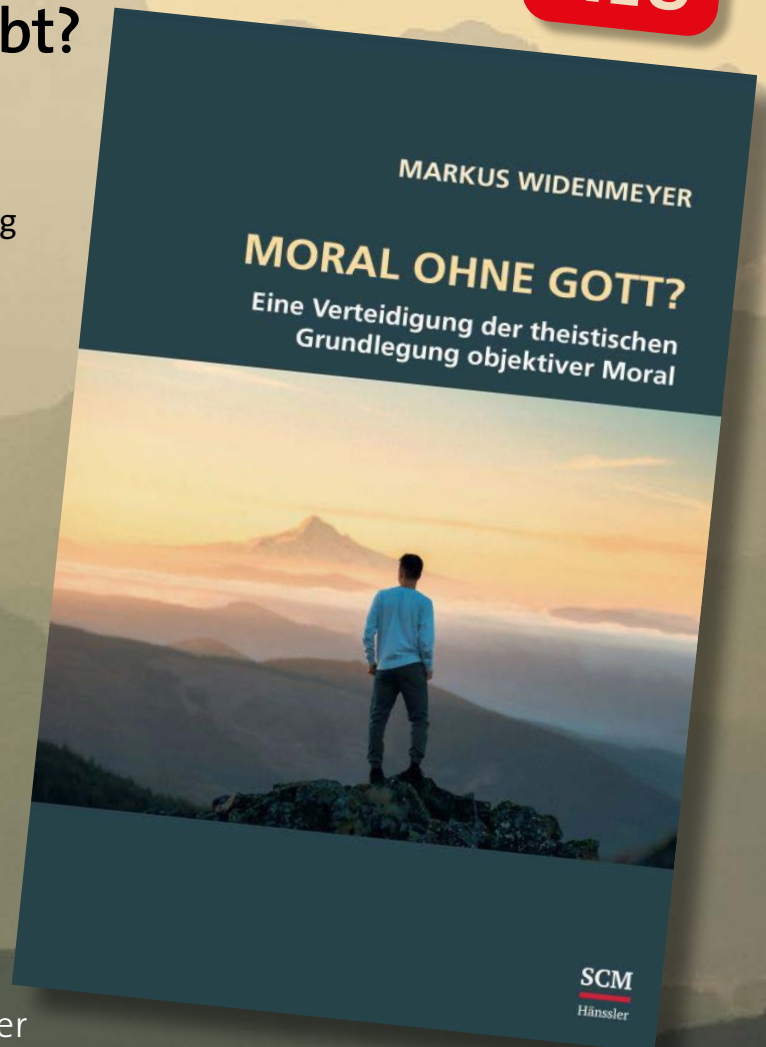
Erstauflage 2022

„Ohne Gott ist alles erlaubt.“
Üblicherweise gilt der Atheismus als unvereinbar mit einer objektiven Moral. Moral wäre ein Produkt der Evolution oder Ausdruck menschlicher Interessen. Zwischen Nächstenliebe und Grausamkeit bestünde kein objektiver moralischer Unterschied.

Jedoch vertreten seit einigen Jahrzehnten auch immer mehr atheistische und agnostische Philosophen einen moralischen Realismus: Es gibt objektive Moral, die unabhängig vom Menschen und von der Natur existiert, hier aber auch gleichzeitig ohne Gott gedacht wird. Moral hätte einen nichtgeistigen Ursprung.

Neben kurzen Betrachtungen anderer nichttheistischer Moralkonzepte ist der Schwerpunkt dieses Buches die Auseinandersetzung mit diesem nichttheistischen moralischen Realismus. Es zeigt sich insbesondere, dass Moral aus einer Reihe von Gründen einen geistigen, intelligiblen Ursprung haben muss.

Im Gegenzug wird daher eine theistische Grundlegung objektiver Moral vorgeschlagen und gegen verschiedene Einwände verteidigt..



Erhältlich auch bei: Studiengemeinschaft Wort und Wissen e. V.

Rosenbergweg 29 • 72270 Baiersbronn

Tel. (0 74 42) 8 10 06 • Fax (0 74 42) 8 10 08 • E-Mail sg@wort-und-wissen.de



„Die schönste Überschiebung der Welt.“ „Die schönste Zeche der Welt.“ – Mitunter werden mit solch ungewöhnlichen Superlativen UNESCO-Welterbestätten beschrieben und beworben. Zu ihnen zählen vermehrt bedeutende geologische Aufschlüsse mit Dimensionen im Kilometer- oder Zehnerkilometer-Bereich. Zwei der Orte, über deren geologische Phänomene Michael KOTULLA berichtet, ist nicht nur der Welterbe-Status gemein, sondern auch eine über 150-jährige Erforschungsgeschichte.

Die Fossilkliffe von Joggins (Nova Scotia, Kanada) sind für ihre verschütteten, aufrecht stehenden Bäume in oberkarbonischen, kohleführenden Ablagerungen berühmt. Seit ihrer Entdeckung gelten sie als ein Beleg für ein Wachstum an Ort und Stelle. Und in Verbindung mit den wiederkehrenden Kohlenflözen gilt ihr Übereinander als eine langandauernde Abfolge zahlreicher versunkener Wälder bzw. Waldsumpfmoor-Landschaften. Die seitdem unter den meisten Geologen allgemein akzeptierte Vorstellung der Entstehung der Kohlenflöze – als an Ort und Stelle gewachsenes Pflanzenmaterial – wird von Michael KOTULLA neu und kritisch aufgegriffen. Er führt zahlreiche Indizien an, die für Antransport und Ablagerung des Pflanzenmaterials sprechen. Ein Vergleich der gegensätzlichen Interpretationen zeigt, dass in Bezug auf mögliche Bildungs- bzw. Ablagerungszeiten ein Unterschied von mehreren Größenordnungen vorliegen kann.

Die Glarner Hauptüberschiebung (Welterbe Tektonikarena Sardona, Schweiz) zeugt von gewaltigen Massenverlagerungen und enormen Kräften, die einstmals gewirkt haben müssen. Als „magische Linie“ ist sie weit hin sichtbar. Entlang dieser Linie „stehen die Berge kopf“: Älteres Gestein liegt über jüngerem. Dieser Befund und weitere Phänomene haben dazu geführt, dass die Alpen heute als Kollisionsgebirge interpretiert werden. Michael KOTULLA fragt nach dem Mechanismus des Überschiebungsprozesses und der -geschichte.

In der Frage nach dem Ursprung des Menschen werden neben Fossilien und Ähnlichkeiten im Körperbau oder Erbgut auch Verhaltensähnlichkeiten zwischen Menschenaffen und Menschen als Indizien für Evolution angeführt. Evolutionstheoretisch sollte man erwarten, dass die Schimpansen, die als unsere nächsten Verwandten gelten, auch ohne spezielles Training Steinwerkzeuge zum Schneiden herstellen können, wie man dies für sogenannte Vormenschen annimmt und wie es von Kapuzineraffen bekannt ist. Neue Studien enttäuschen diese Erwartungen jedoch, wie Benjamin SCHOLL berichtet. Ansätze einer eigenen „Steinkultur“ konnten bei Schimpansen nicht nachgewiesen werden. Ganz im Gegenteil dazu erweisen sich Neandertaler mit zunehmender Kenntnis ihrer Fähigkeiten als eine Menschenform, die bezüglich ihrer handwerklichen Fähigkeiten uns heutigen Menschen ebenbürtig ist. – Um Verhaltensstudien geht es auch bei ganz anderen Organismen. Manche Ameisen können die Kaste wechseln und damit ihr Verhalten ändern. Welche Stoffe und Gene dahinterstecken, schildert Harald BINDER. Es zeigt sich, dass dem Kastenwechsel eine intelligente Konzeption zugrunde liegt.

Auch in dieser Ausgabe werden evolutionäre Hypothesen beleuchtet. Im dritten und letzten Teil seiner Serie zur „Sauerstoffkatastrophe“ zeigt Boris SCHMIDTGALL, dass die Entstehung des auf Sauerstoff beruhenden (aeroben) Energiestoffwechsels in den Zellen gleichzeitig auch mehrere ausgefeilte Schutzmaßnahmen gegen den sogenannten „oxidativen Stress“ erfordern würde. Die für den Organismus gefährlichen Reaktionsprodukte des Sauerstoffs müssen unschädlich gemacht werden. Angesichts dieser Situation erscheint eine schrittweise Entstehung unmöglich. Plausible evolutionäre Entstehungshypothesen liegen nicht vor und bekannte Evolutionsmechanismen scheinen für eine Entstehung dieser hochkomplexen Schutzvorrichtung grundsätzlich überfordert zu sein.

Nicht nur bei der Entstehung einzelliger photosynthetisch aktiver Organismen, sondern auch bei der Entstehung der Vielzelligkeit bei Pflanzen und Tieren erweisen sich evolutionäre Modelle als erklärungsschwach. Peter BORGER befasst sich mit einer aktuellen Studie über die Entstehung der Mehrzelligkeit und die damit verbundene Aufgabenteilung zwischen verschiedenen Zellgruppen. Demnach soll sich bei Grünalgen Mehrzelligkeit im Labor in kurzer Zeit entwickelt haben. Ein genauer Blick auf die Daten zeigt jedoch, dass es sich um eine programmierte Anpassung als Reaktion auf die Gegenwart von Fressfeinden und somit um ein Beispiel für Plastizität handelt.

In *Studium Integrale Journal* haben auch Beiträge im Grenzbereich Naturwissenschaft – Philosophie – Theologie ihren Platz. In einem Text über das „alte“ kosmologische Argument für die Existenz Gottes argumentiert Sandro FREIBURGHHAUS, dass es gute Gründe dafür gibt, dass das Universum einen Anfang und daher auch eine Ursache hat. Er nennt Gründe dafür, dass diese Ursache des Universums zeitlos, immateriell, unveränderlich, ohne Ursache, unglaublich mächtig und wahrscheinlich persönlich ist. Das entspricht genau der klassischen Definition Gottes.

Mit diesen und vielen weiteren Themen hoffen wir, auch mit dieser Ausgabe eine abwechslungsreiche und gewinnbringende Lektüre anbieten zu können.

■ IMPRESSUM

Herausgeber

Studiengemeinschaft Wort und Wissen e.V.,
Rosenbergweg 29, D-72270 Biersbronn,
Tel. (0 74 42) 8 10 06, Fax (0 74 42) 8 10 08
E-Mail: sg@wort-und-wissen.de

Redaktion

Dr. Harald Binder, Konstanz
Dr. Martin Ernst, Kirchzarten
Dr. Reinhard Junker, Biersbronn

Korrespondenzadresse

Dr. Reinhard Junker, Rosenbergweg 29,
D-72270 Biersbronn

Design

DESIGNBYTHOLEN
Regine Tholen AGD, Langgöns

Produktion

Dönges - Gutenbergdruckhaus & Medien,
GmbH & Co. KG, Dillenburg

Erscheinungsweise und Bezugsbedingungen

Die Zeitschrift erscheint zweimal jährlich.
Jahresbezugspreis € 15,00; für Studenten
€ 10,00; Preise inkl. Versandkosten und
MwSt. Auslandspreise auf Anfrage.
Einzelhefte: € 8,50 (inkl. Versandkosten).
Bestellungen richten Sie an den Herausgeber.
Das Abonnement kann zum Jahresende
gekündigt werden. Die Kündigung
muss schriftlich erfolgen.

Alle Rechte vorbehalten.

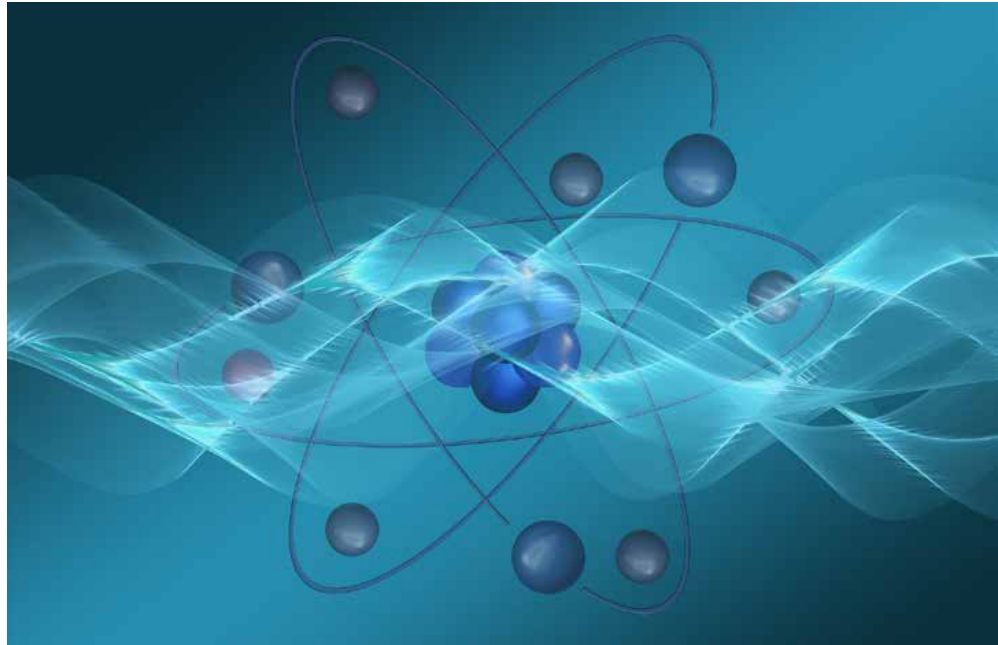
Die Verantwortung für den Inhalt tragen
die jeweiligen Autoren. Der Herausgeber
und die Redaktion identifizieren sich nicht
zwangsläufig mit allen Details der Darlegungen.

■ TITELBILD

Die Glarner Hauptüberschiebung und das
Martinsloch in den Tschingelhörnern (Tektonikarena Sardona / Schweiz), von Osten
gesehen; siehe den Beitrag „Die schönste
Überschiebung der Welt“ ab Seite 50.
(Bild: Pascal Halder, Adobe Stock)

ISSN 0948-6135

■ Inhalt



■ THEMEN

| | | |
|-----------------|---|----|
| M. Kotulla | Karbonzeit: Wie entstanden die Kohlenablagerungen? | 4 |
| B. Scholl | Schimpansen leben außerhalb der Steinzeit. Überraschende Neuigkeiten aus der Verhaltensforschung | 12 |
| S. Freiburghaus | Das kosmologische Argument für die Existenz Gottes | 20 |
| B. Schmidtgall | Die „Sauerstoffkatastrophe“. 3. Biologische Schutzvorrichtungen gegen oxidativen Stress | 27 |

■ REZENSIONEN

| | | |
|----------------|---|----|
| R. Junker | Darwin in der Stadt. Die rasante Evolution der Tiere im Großstadtdschungel (Menno Schilthuisen) | 66 |
| B. Schmidtgall | Was ist Leben? Die fünf Antworten der Biologie (Paul Nurse) | 68 |



■ KURZBEITRÄGE

| | | |
|----------------|--|----|
| P. Borger | Krabbenaugen-Design: Optimale Nanotechnologie | 36 |
| B. Scholl | Schlaue schwäbische Neandertaler | 37 |
| R. Junker | Die Gegenvögel der Kreide – Vögel 1.0 | 41 |
| P. Borger | Evolution der Mehrzelligkeit im Labor: programmierte Anpassung gegen Fress- feinde? | 44 |
| H. Binder | Verhaltensänderung bei Ameisen – welchen Einfluss haben Gene? | 47 |
| M. Kotulla | „Die schönste Über- schiebung der Welt“ | 50 |
| B. Schmidtgall | Fossile Mikroorganismen in sehr alten Sediment- schichten? | 53 |

■ STREIFLICHTER

| | |
|---|----|
| Moostierchen – willkommen im „explosiven“ Kambrium-Club | 56 |
| Ausgefeilte flugtaugliche Konstruktion eines Flugsauriers | 57 |
| Bienen-Nahrung – es darf auch Fleisch und Aas sein | 57 |
| Bei Wolfsrudeln in freier Wildbahn gibt es keine Alpha-Tiere | 59 |
| Fliegen geht auch anders | 60 |
| Mini-Schnecke wirft Fragen auf | 61 |
| Gletscher- oder Wassererosion? | 62 |
| Erinnerungen eines Einzelzellers – Gedächtnis ohne Gehirn | 63 |
| Es gibt nichts Besseres als die DNA, um Information zu speichern | 64 |

Karbonzeit: Wie ent- standen die Kohlenablagerungen?

Mitte des 19. Jahrhunderts versuchten führende Geologen, die Entstehung der karbonischen Kohlenlager zu entschlüsseln: War das Pflanzenmaterial an Ort und Stelle gewachsen – verwurzelt im Untergrund – (autochthon) oder war es antransportiert und abgelagert worden (allochthon)? Die Autochthonie/Allochthonie-Frage gilt seit Lyell und Dawson zu Gunsten der Autochthonie als geklärt. – Eine voreilige Entscheidung. Denn werden neuere Erkenntnisse entsprechend ausgewertet, liegen zahlreiche Indizien für eine allochthone Entstehung vor.

Michael Kotulla

Einleitung

Die Kliffe von Joggins (Nova Scotia, Kanada) gelten als der weltbeste Aufschluss kohleführender karbonischer Schichten und sind berühmt für ihre verschütteten, aufrecht stehenden Bäume (Abb. 1, Kasten 1). Dieses einzigartige Fenster in die Vergangenheit hat vor über 150 Jahren „die junge Wissenschaft der Geologie tiefgreifend beeinflusst“; es „dient(e) als Prüffeld für die Prinzipien des Uniformitarismus*, der in situ* pflanzlichen Herkunft von Kohle und der Unvollständigkeit der fossilen Überlieferung“ (WALDRON & RYGEL 2005).¹

Nach DAVIES et al. (2005) hätten Charles LYELL und William DAWSON realisiert,² dass es sich bei „Joggins“ um urzeitliche Landschaften handle, die von bemerkenswerten Pflanzen und Tieren bewohnt waren. Diese Landschaften sol-

len charakterisiert sein durch ein wiederholtes Wachsen und Ausbreiten von Vegetationsdecken (die späteren Kohlenflöze), die episodisch von Sediment überschüttet wurden.

Diese urzeitlichen Landschaften – Waldsumpfmoores (Abb. 2, Abb. Z1–Z2) – soll es in allen Regionen mit kohleführenden, oberkarbonischen Ablagerungen des euramerischen Raumes gegeben haben, – mit Bezug auf einige der heutigen Staaten – von den USA und Kanada über Großbritannien, Frankreich, Deutschland, Tschechien und Polen bis in die Ukraine.

Belege für Autochthonie

Unter den meisten Geologen gilt heute als allgemein akzeptiert, dass das ursprüngliche Pflanzenmaterial der euramerischen Kohlenflöze fast ausschließlich an Ort und Stelle gewachsen,

Abb. 1 Lycopside-Stamm mit anhängenden Stigmarien. In aufrechter (Wachstums-) Position; Steinkern-erhaltung. Joggins-Formation (Oberkarbon), Cumberland-Becken, Nova Scotia (Kanada). Neigung der Schichten „korrigiert“; Maßstab: s. Geologenhammer. Foto: Michael C. RYGEL, 2001 (Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0).

verändert und eingebettet wurde – so schreiben TEICHMÜLLER & TEICHMÜLLER (1982, 19): „Autochthone Kohlen entstehen von Pflanzen, welche nach dem Tod *in situ* Torf bilden. Im Gegensatz dazu bilden sich allochthone Kohlen von Pflanzenresten, die beträchtliche Distanzen von ihrem Ursprungsort wegtransportiert worden sind, z. B. verdriftete Stämme von Bäumen und umgelagerter Torf (...). Fast alle abbauwürdigen Kohlenflöze sind autochthon, und die Wurzelböden im Liegenden solcher Flöze oder die Stubbenhorizonte in ihnen oder die aufrechten Stämme (...) sind Belege für ihre Autochthonie.“³

Vorgehensweise

Zur Autochthonie/Allochthonie-Frage werden neuere Erkenntnisse präsentiert und die von TEICHMÜLLER & TEICHMÜLLER (1982) konkret genannten Belege für Autochthonie diskutiert. Dafür verwendet der Verfasser Teile aus KOTULLA (2020) und KOTULLA & DRÜEKE (2021); ggf. sind weitere Einzelheiten und weitere Referenzen dort zu finden. In Kasten 1 werden die Fossilklüfte von Joggins vorgestellt. In Kasten 2 wird gezeigt, dass die Interpretationen zu den Bildungs- bzw. Ablagerungszeiten ausgehend von einer Autochthonie- oder Allochthonie-Sichtweise in einem krassen Verhältnis zueinander stehen.

Die Schlüsselfrage neu gestellt: autochthon oder allochthon?

Die Sedimentgesteinsfolgen

Die über 900 m mächtige Joggins-Formation besteht hauptsächlich aus Ton-, Silt- und Sandsteinen (Siliciklastika). Ihr sind 75 Kohlenflöze zwischengeschaltet; 63 „Horizonte“ führen Lycopsiden*-Stämme und 220 „Horizonte“ zusammengesetzte Stigmarien-, „Wurzeln“ (Stand: DAVIES et al. 2005).⁴

Im Ruhr-Karbon ist das kohleführende, siliciklastische* Gesteinspaket 3–4 km dick; es enthält etwa 250 Flöze.⁵ Wichtige Leithorizonte sind marine* Einschaltungen sowie vulkanische Aschenlagen, sog. (Kaolin-) Kohlentonsteine (BURGER et al. 2005).

Im Donez-Becken sind einer etwa 5 km mächtigen, siliciklastischen Folge etwa 250 Kohlenflöze und mehr als 250–300 (marine) Kalksteinhorizonte zwischengeschaltet. Die Gesamtmächtigkeit der Kohlen beträgt etwa 60 m; durch den aktiven Kohlenbergbau gehört das Donez-Becken zu den größten Kohlenrevieren der Welt. Es sind mindestens 37 vulkanische Aschenlagen bekannt, 25 davon treten im Flözverband auf (DAVYDOV et al. 2010).

Kompakt

Die Frage der Entstehung der karbonischen Kohleablagerungen wird neu aufgegriffen. Es wird dargelegt, dass die mutmaßlichen Belege für Autochthonie – Wurzelböden und aufrechte Stämme – keine gültigen Kriterien darstellen. Insgesamt liegen nur Indizien vor, die darauf hinweisen, dass die Sediment- und Pflanzenakkumulationen (die späteren Kohlen) durchweg unter Wasserbedeckung stattfanden, also keine mutmaßlichen Waldsumpfmoor-Landschaften bestanden haben können. Demnach muss auch das Pflanzenmaterial antransportiert worden sein, sodass die Frage zugunsten einer Allochthonie entschieden werden müsste.



Die kohleführenden Schichtenfolgen zeichnen sich durch das wiederholte Auftreten der einzelnen Schichtglieder aus.

Natur der Kohlen(flöze)

Die Kohleneinschaltungen erscheinen als integraler Teil der gesamten Sediment(gesteins)folge. Sie werden vertikal und lateral (seitlich) von aquatischen Sediment(gestein)en umschlossen. Diese sind hauptsächlich siliciklastischer Natur; das Material ist durch bewegtes Wasser antransportiert und abgelagert worden.

Großskalig betrachtet sind Kohlen(flöze) linsenförmige Einschaltungen (von Pflanzensubstanz) im Sedimentkörper. Merkmale von Kohlenflözen sind Aufspaltung und Scharung sowie mitunter „Vereinigung“ mit dem nächsthöheren Kohlenflöz (sog. Z-Verbindung). In diesen Fällen kann das Nebengestein (Berge) auf kurzer Distanz zu mehreren Dekametern anwachsen. I. d. R. sind Ober- und Unterseite der Kohlenflöze scharf begrenzt.

Kleinskalig betrachtet sind Kohlenflöze häufig in größerem Maße in ihrem Aufbau heterogen. So sind cm- oder dm-dicke, z. T. linsenförmige Einschaltungen von Nebengestein oder Brandschiefer (Kohle mit siliciklastischen Beimengungen) weit verbreitet.

Aufbau und Struktur der Kohlenflöze im Kontext der gesamten Sedimentgesteinsfolge legen insgesamt nahe, dass das Pflanzenmaterial

Abb. 2 (Re)konstruktion der Landschaft zur „Steinkohlenzeit“. Zu dem Bild heißt es in KUKUK & HAHNE (1962, 6): „Landschaft zur Steinkohlenzeit. Mit Verlandungspflanzen, vorwiegend Schachtelhalmen, bestandene offene Wasserstelle im Vorlande des alten variszischen Gebirges, umgeben von dem üppigen Pflanzenwuchs eines Waldsumpfmoores, aus Farnen und Bärlappgewächsen bestehend. In der Mitte Siegelbäume und Baumfarne, links Schuppenbäume, Baumfarne und niedere Farne, rechts die höher entwickelten Cordaitenbäume. (...)“.

Hinweis zu den Anmerkungen: Die Anmerkungen enthalten umfangreiche Zitate und weitere Informationen; sie sind deshalb – wie die Z-Verweise – als Zusatzmaterial zum Artikel ausgelagert und unter www.si-journal.de/jg29/heft1/karbon.pdf abruf- bzw. herunterladbar.

Mit einem Stern* versehene Begriffe werden im Glossar erklärt.

wie auch das umgebende siliciklastische Material antransportiert und abgelagert wurde.

Trockenfallen (subaerische Exposition)?

Im Falle der Joggins-Formation interpretieren DAVIES et al. (2005) die Sedimentgesteine als Küsten- oder küstennahe Ablagerungen; dabei unterscheiden sie temporäre, eingeschränkt-marine Konditionen sowie terrestrische* Konditionen einer „sumpfigen“ oder „trockenen Überschwemmungsebene“ (autochthone Sichtweise). Sie betonen aber, dass kein Trockenfallen (subaerische* Exposition) zu erkennen ist. Es würden Anhaltspunkte wie tiefgreifende Taleinschnitte oder gut entwickelte Paläoböden fehlen.

Da keine Indizien für ein Trockenfallen vorliegen, ergänzt dies die Folgerung des vorhergehenden Abschnitts dahingehend, dass es sich durchweg und kontinuierlich um Ablagerungen handelt, die unter Wasserbedeckung entstanden.

Es können keine Waldsumpfmoor-Landschaften bestanden haben.

Vulkanische Aschen (Kohlentonsteine)

Kohlentonsteine und Bentonite treten in oberkarbonischen, euramerischen Sedimentfolgen verbreitet auf, u. a. im westfälischen Becken (Ruhr-Karbon, 38 Kohlentonsteine), im britischen Becken, im oberschlesischen Becken und im Donez-Becken. Kohlentonsteine (Bezeichnung für im Flözverband auftretend) und Bentonite sind umgewandelte, d. h. ummineralisier-

te vulkanische Aschen. Sie führen häufig noch primär-magmatogene Komponenten wie die resistenten Schwerminerale Zirkon und Apatit. Die Horizonte (oder Lagen) sind häufig nur millimeter- bis dezimeterdick, aber seitlich (lateral) weit aushaltend. Ihre räumliche Verbreitung kann mehrere 100.000 km² betragen. Vulkanische Aschenlagen liefern nicht nur Leithorizonte, sondern echte Isochronen, d. h. exakte Zeit-Bezugsflächen – denn ein Aschenniederschlag einer explosiven Eruption erfolgt quasi gleichzeitig während einer Spanne von Stunden oder wenigen Tagen (KOTULLA 2020).

Die Aschen explosiver vulkanischer Eruptionen der Karbonzeit sind im Wasser (aquatisch) abgesetzt worden (z. B. STÖFFLER 1963; FÜCHTBAUER & MÜLLER 1977). Bei jedem Aschenniedergang handelt es sich um eine zufällige Momentaufnahme der Bedingungen in der Wassersäule und am Untergrund. Die Aschenlagen treten stratigraphisch* in allen Positionen innerhalb der Kohlenflöze auf, in deren unteren, mittleren und oberen Teilen; sie haben eine große räumliche Verbreitung. Sie bilden i. d. R. scharfe ebene Unter- und Obergrenzen. Die derzeit einzige an der Oberfläche beobachtbare Kohlentonstein-Lage des Ruhr-Karbons tritt im Flöz Angelika auf (Aufschluss Kampmannbrücke in Essen-Heisingen, Abb. 3).

Die Aschenüberlieferung zeigt an, dass zum Zeitpunkt eines Aschenniedergangs kein (Vegetations-) Relief vorhanden war, also zu keinem Zeitpunkt ein mutmaßliches Waldsumpfmoor (Abb. 2) bestanden haben kann. Vielmehr lag zum Zeitpunkt des Aschenniedergangs eine Schicht-artige Pflanzenakkumulation unter Wasserbedeckung vor.

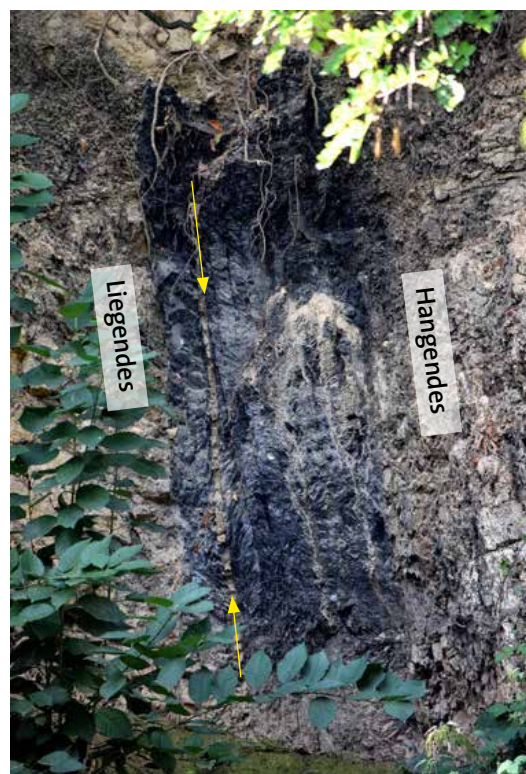
Die Aschenüberlieferung zeigt des Weiteren an – anders als in einem anzunehmenden Waldsumpfmoor –, dass selbst die dünnsten Aschenlagen 1) *nicht* durch ein Weiterwachsen der Vegetation von unten her und 2) *nicht* durch ein Einwurzeln einer neuen Vegetation(sdecke) von oben her durchdrungen wurden. In keinem Fall ist eine Wachstumsaktivität an Ort und Stelle erkennbar.

„Wurzelböden“

Die sogenannten „Wurzelböden“ sind kleiner 0,2 bis größer 3,0 m mächtig; sie sollen häufig im Liegenden der Flöze vorkommen (Bsp. Ruhr-Karbon, KUKUK 1938; Abb. 4).

Die „Wurzelböden“ zeigen – verglichen mit heutigen Böden – keine bodenbildenden Produkte wie Umwandlung, Horizonte etc. (SCHULTZ 1958). FÜCHTBAUER & MÜLLER (1977, 269) zufolge hat sich die Auffassung durchgesetzt, dass „Wurzelböden“ mit Sicherheit keine

Abb. 3 Kohlentonstein-Lage im Flöz Angelika, Ruhr-Karbon. Das Flöz Angelika hat hier eine Mächtigkeit von 65 cm; der Kohlentonstein (gelbe Pfeile) – eine umgewandelte vulkanische Aschenlage – ist etwa 3 cm dick (Detail s. Abb. Z-3). Das Flöz wird unmittelbar von Tonsteinen unter- und überlagert (vgl. KASIELKE 2013). Bochum-Formation; geologische Wand Kampmannbrücke, Essen-Heisingen. Foto: M. KOTULLA, 2020.



Bodenbildungen sind“. In MURWASKI & MEYER (2017) heißt es, dass ein Wurzelboden ein „bei Kohlenlagern vielfach im Liegenden des Flözes auftretende, von Wurzeln der Moorpflanzen durchzogene Sedimentschicht“ ist. Dies aber ist eine genetische Definition, die Autochthonie voraussetzt; deskriptiv handelt es sich um ein Basisorgane (Stigmarien und Appendices) führendes Sediment(gestein).

„Wurzelböden“ sind keine Böden.

Die Mächtigkeit des „Wurzelbodens“ ist „von der Dicke der Flöze völlig unabhängig und umgekehrt“; es treten auch Stigmarienbänke („Wurzelböden“) ohne Zusammenhang mit einem Flöz auf (Ruhr-Becken; KUKUK 1938, 194f). Daraus wurde gefolgert, dass kein biologisch-genetischer Zusammenhang zwischen Vegetation (Kohlenflöz) und „Wurzel“organe führendem Flözliegenden bestehen muss. Die Beobachtung führte u. a. zu der Aussage, dass „Wurzelböden“ kein „Beweis“ für die Autochthonie der Flöze seien (JESSEN 1961, 313).

Dies zeigt sich auch nach der Neuaufnahme des Profils der Fossilkliffe von Joggins (DAVIES et al. 2005). Demnach liegen 220 punktuelle oder Horizont-beständige Vorkommen von Stigmarien-„Wurzeln“ vor, davon 20 unter den insgesamt 75 Flözen. LOGAN (1845) hatte seinerzeit angegeben, dass – bis auf einen Fall – alle Kohlenflöze einem „Wurzelboden“ aufliegen.

Aus den „Wurzelböden“ – den Basisorgane führenden Sediment(gestein)en – werden fast ausschließlich Stigmarien und Stigmarien-Appendices beschrieben (Abb. 4). Von den im Wesentlichen hohlen (horizontalen) Stigmarienachsen gehen lateral radialstrahlig die hohlen Appendices ab (Abb. 5–7). Diese bezeichnende allseitige Anordnung der Appendices weist auf Charakteristika von Wasserpflanzen und nicht von Landpflanzen hin. Dennoch entwerfen z. B. HETHERINGTON et al. (2016) das Bild von Lycophyten-Bäumen mit ausgedehnten, unterirdischen Wurzelsystemen in einem Kohlensumpfwald (Abb. 7).

Die Basisorgane liegen im Sediment in vielfältiger Weise vor: Abgebrochene (abgeworfene?) Appendices regellos verstreut oder eingeregelt; zusammenhängende Basisorgane, zusammengepresst oder als „Körperfossil“ (nicht zusammengepresst). Dies sind Anzeichen für sedimentäre Prozesse: subaquatische Ablagerung und teilweise Einregelung durch Strömung. Eine Zerdrückung der Basisorgane, die im Wasser unter den vermutlich mattenartigen (Schwimm-) Vegetationsdecken herabhingen, kann bei deren Absatz auf dem feinkörnigen Schlamm erfolgt sein. Andererseits könnten diese (ggf. im Sinken



Abb. 4 „Wurzelboden“, zum Flöz Finefrau gehörend (Witten-Formation, Ruhrkarbon). Flachgepresste Stigmarien mit flachgepressten Appendices. Museum Zeche Nachtigall, Muttental (Witten). Bildbreite etwa 1,2 m. In der Objektbeschriftung im Museum heißt es u. a.: „Das versteinerte Stück Waldboden (...)“. Foto: M. KOTULLA, 2020.

befindlichen) Vegetationsdecken mit im Wasser herabhängenden Basisorganen nahe dem Untergrund durch unterspültes Sediment fixiert worden sein.

Die Basisorgane führenden Sediment(gestein)e – Ton-, Silt-, Sand- und Kalksteine – zeigen keine Anzeichen einer subaerischen Exposition (s. o.). Das deutet darauf hin, dass ihre Oberflächen – die „Böden“ der mutmaßlichen

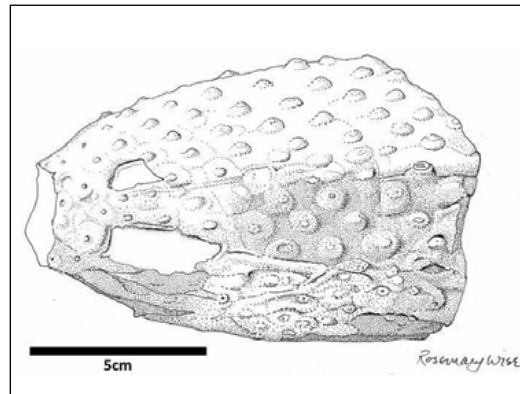


Abb. 5 „Zylindrische, unzerdrückte Stigmarien mit Abbruchnarben der Appendices; die Narben (Stigmen) sind namensgebend. Abbildung: Wiedergabe von Fig. S7 (Teil B, gezeichnet nach ihrer Fig. S7A) aus HETHERINGTON et al. (2016) in *Proceedings of the National Academy of Sciences* (PNAS), Verwendung gemäß „Rights & Permissions“.



Abb. 6 Hohle Stigmarien-Appendices mit jeweils einem Leitbündel. Ausschnitt eines Dünnschliffs eines Torfdolomits (mineralisierte, nicht inkohlte Konkretion in Kohlenflözen). Wiedergabe der Fig. 195 aus GOTHAN (1921). Original-Beschriftung: „Appendices von *Stigmaria ficoides*, quer durchschliffen; das Leitbündel und der gewebefreie Raum in den Appendices ist deutlich sichtbar. Vergr.“

Glossar

Akkumulation, akkumuliert: (An)sammlung, (an)gesammelt.

in situ: Am Ort; hier: an Ort und Stelle gewachsen, wo eingebettet.

Lycopside: Bärlapppflanzen; hier baumförmige, ausgestorbene Gewächse, bis zu 40 m hoch. Dazu gehören die Gattungen *Lepidodendron* (Schuppenbaum) und *Sigillaria* (Siegelbaum). Hohlgewächse, zum größten Teil aus „Rinden“gewebe bestehend.

marin: Das Meer betreffend; bezieht sich auf im (oder durch das) Meer (verursachte) ablaufende Prozesse und Bildungen.

siliciklastisch: Material, welches sich aus Silicium-haltigen Mineralen zusammensetzt; oft zur Abgrenzung von Karbonatgesteinen.

stratigraphisch: Hier im Sinne von fein-stratigraphisch; die Beschreibung eines Gesteinskörpers und die Altersfolge seiner Einheiten.

subaerisch: Bezieht sich auf Prozesse, die an der freien Luft bzw. an der Erdoberfläche (unter freiem Himmel) auftreten.

Uniformitarismus: Ein von WHEWELL (1832) geprägter Begriff zur Charakterisierung der „geologischen Prinzipien“ von LYELL (1832). Das „Uniformitäts- oder Gleichförmigkeitsprinzip“ (auch „Aktualitätsprinzip“) ist heute das vorherrschende regulative (Interpretations-) Prinzip in der Geologie.⁸

terrestrisch: Das Land betreffend; bezieht sich auf Prozesse, Kräfte und Bildungen, die auf dem Festland auftreten.

Landvegetation – stets unter Wasser lagen. Es scheint sich durchgängig um aquatische Sedimentationsräume zu handeln, nicht um Untergründe („Böden“), in welche „eingewurzelt“ wurde.

Aufrecht stehende Bäume

Aufrechte Baumstämme in Wachstumsposition werden von zahlreichen Lokalitäten beschrieben (vgl. KOTULLA & DRÜEKE 2021, Tab. 5). Einzigartig ist aber – hinsichtlich ihrer Häufigkeit und Zugänglichkeit – nach wie vor der natürli-

che Aufschluss der Kliffe von Joggins (Abb. 9–12). Im Ruhr-Karbon sind sie nur vereinzelt beobachtet worden;⁶ nach Kenntnis des Verfassers gibt es derzeit keinen Aufschluss an der Oberfläche, der einen aufrechten Lycopside-Stamm zeigt.

Aufrecht stehende Bäume sind kein zwingendes Indiz für ein Wachstum am Ort der Einbettung.

Die große Mehrzahl der aufrechten Lycopside-Stämme der Joggins-Formation (59 aus 63) tritt in reinen siliciklastischen Abfolgen auf, ohne einen Bezug zu einem Kohlenflöz; nur 4 „liegen“ unmittelbar einem Kohlenflöz auf (DAVIES et al. 2005, Appendix A). Anders die Darstellung von LYELL (1845; seine Fig. 2); seine schematischen Zeichnungen präsentieren – mit einer Ausnahme – alle aufrechten Stämme als Kohlenflözen aufliegend.

Die Position der Stämme in der Orientierung des Wachstums ist nicht zwangsläufig ein Indiz für ein In-situ-Wachstum. Transportierte Bäume (mit ihren Basisorganen) mögen in einer stabilen Gleichgewichtslage (= Wachstumsorientierung) zum Absatz gekommen sein. Im Ruhr-Karbon werden im Hangenden von Kohlenflözen sitzende Stämme bzw. Stammstümpfe beschrieben, die wurzellos und an der Basis abgerundet sind (sog. Kessel) und sowohl in Wachstumsposition als auch umgekehrt eingebettet sind.⁷

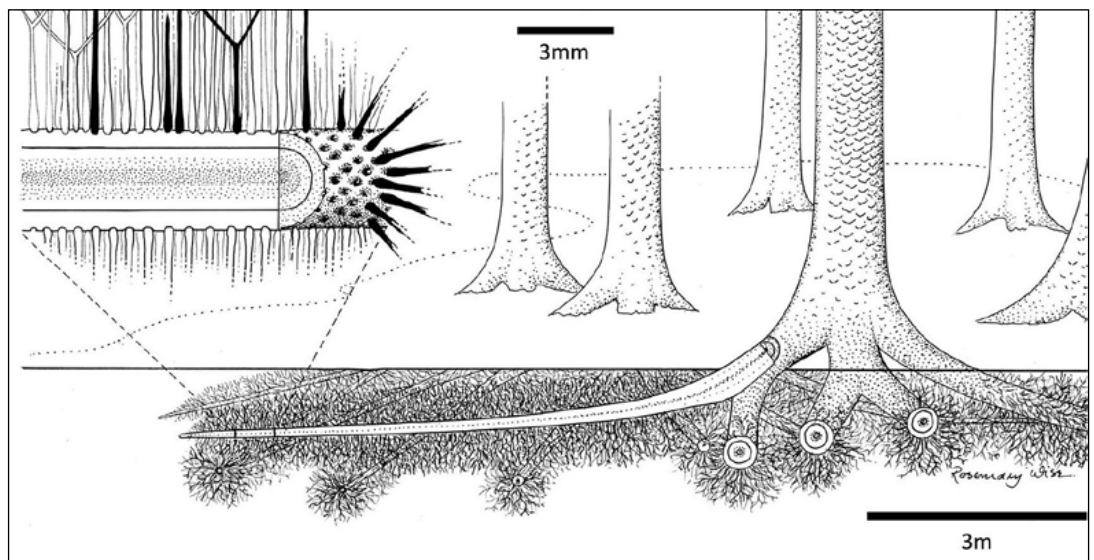


Abb. 7 Eine (Re)konstruktion des Stigmarien-„Wurzel“systems. Nach HETHERINGTON et al. (2016) bildeten die gigantischen Lycopside-Bäume – eines mutmaßlichen Kohlensumpfwaldes – ein unterirdisches (subterranes) Wurzelsystem. Von den im Wesentlichen hohlen, mit einem Zentralzylinder versehenen Stigmarienachsen (interpretiert als Hauptwurzeln) gehen lateral radialstrahlig (Vergrößerung oben links) die sog. Appendices ab (interpretiert als „Wurzeln“ und als rootlets bezeichnet). Diese ebenfalls hohlen Appendices besitzen einen einzelnen Gefäßstrang; sie können sich bis in eine vierte Ordnung verzweigen (ihre Fig. 1c). Auf dieser Grundlage berechneten HETHERINGTON et al. (2016) die (mögliche) Anzahl endständiger „Wurzeln“ zu etwa 25.600 pro Meter Strang. Dieser ausgedehnte „Wurzelteller“ (root plate) hätte den Bäumen u. a. Halt gegeben. Allerdings ist die radialstrahlige Anordnung der Appendices vielmehr ein deutliches Merkmal einer Wasserpflanze (siehe Textteil). Abbildung: Wiedergabe von Fig. 4 (Ausschnitt) aus HETHERINGTON et al. (2016) in Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), Verwendung gemäß „Rights & Permissions“.

1 | Die Fossilkliffe von Joggins (Nova Scotia, Kanada)



Übersicht

Joggins ist eine kleine Ortschaft an der Chignecto Bay, einem nördlichen Arm der Bay of Fundy, im Cumberland County, in der kanadischen Provinz Nova Scotia. Die Kliffküste bei Joggins ist ein natürlicher geologischer Aufschluss. Aufgrund der besonderen Lagerungsverhältnisse kann die Abfolge der Schichtgesteine von unten nach oben – vom Liegenden zum Hangenden – die Kliffküste entlang von Norden nach Süden abgegangen und beobachtet werden (Abb. 9).

Die 915 m mächtige Joggins-Formation setzt sich aus Tonsteinen, Siltsteinen und Sandsteinen (Siliciklastika) sowie untergeordnet Kalksteinen und Kohlen zusammen. Das Fossilinventar umfasst – neben den verschütteten aufrechten Baumstämmen – Pflanzenreste, Reptilien, Muscheln, Ostrakoden, Gastropoden und Foraminiferen sowie Tetrapoden-Spuren und andere Spurenfossilien.

UNESCO-Welterbe

Die Fossilkliffe von Joggins sind 2008 auf Antrag der kanadischen Provinz Nova Scotia in die UNESCO-Welterbeliste aufgenommen worden. Im Antrag wird als herausragender, universaler Wert der Stätte angeführt: „Die großartig aufgeschlossene Folge von Sedimentschichten bewahrt die Fossilien in situ und bietet einen Umweltkontext, der weltweit einzigartig ist. Die fossile Überlieferung umfasst die beiden bestimmenden, ikonischen Elemente des ‚Kohlezeitalters‘: fossile Wälder der ‚Kohlesümpfe‘ und die ersten Reptilien, die als früheste Amnioten die ältesten bekannten Vertreter von Reptilien, Vögeln und Säugetieren sind“ (Joggins Fossil Institute 2007, vi).⁹ Demnach wird die autochthone Entstehung des akkumulierten Pflanzenmaterials (die späteren Kohlen) als Tatsache aufgefasst bzw. präsentiert.

Aufrecht stehende, verschüttete Lycopside-Stämme – Bilddokumentation

KOTULLA & DRÜEKE (2021, Anhang) liefern eine neuere Bilddokumentation der Fossilkliffe, die hauptsächlich den Kliffabschnitt der Joggins-Formation umfasst. Es werden u. a. zahlreiche Fotografien von aufrecht stehenden, verschütteten Lycopside-Stämmen gezeigt

Abb. 9 Teil der Fossilkliffe von Joggins, Nova Scotia, Kanada. Blick auf die unteren 600 Profilmeter der Joggins-Formation; von vor dem Coal Mine Point aus gesehen. Die nach Süden einfallenden oberkarbonischen Schichten werden diskordant von rötlichen, pleistozänen Sedimenten überlagert. Foto: Michael C. RYCEL, 2008 (Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0).



Abb. 10 Joggins-Formation: mindestens fünf aufrecht stehende Lycopside-Stämme (Übersichtsaufnahme). Etwa 1 km NO Coal Mine Point (vgl. Abb. 9). Wechselfolge aus Ton-/Siltsteinen und Sandsteinen. Zu b siehe Detailaufnahme (Abb. 11); a ist fraglich (eine Detailaufnahme fehlt). Kliffhöhe etwa 20 m. Foto: S. DRÜEKE, 2017.



Abb. 11 (Bild links) Detail zu Abb. 10: aufrecht stehender Lycopside-Stamm (Position b). Der Stamm verbreitert sich nach unten (Basis) mit Fortsätzen von Stigmarien (Basisorgane, weiße Pfeile); partiell sind Überreste des Hohlgewächses noch erhalten (schwarzer Pfeil). Der Hohlstamm (Basis) und die hohlen Stigmarien sind mit Sand verfüllt (Sandstein-Steinkern); darüber folgen Ton-/Siltsteine und erneut Sandstein. Der Stamm ist unten hauptsächlich von Ton-/Siltstein und oben von Sandstein umgeben. Foto: S. DRÜEKE, 2017.

Abb. 12 (Bild rechts) Joggins-Formation: aufrecht stehender Lycopside-Stamm. Etwa 0,8 km S Coal Mine Point (vgl. Abb. 9). Steinkern, an der Basis (links) Stigmarien-Fortsatz (gelber Pfeil). Die Basis des Stammes ist von Ton-/Siltstein, der Stammteil darüber von Sandstein umgeben. Foto: S. DRÜEKE, 2018.

(Auswahl s. Abb. 10–12). Abb. 10 ist eine Übersichtsaufnahme eines kleinen Kliffausschnitts, in welchem alleine mindestens fünf Lycopside-Stämme aufgeschlossen sind.

2 | Zur Bildungszeit karbonischer Kohlenlager

Ob die karbonischen Kohlenlager autochthon oder allochthon entstanden sind, hat maßgeblichen Einfluss auf ihre Bildungs- bzw. Ablagerungszeiten. Dies wird in nachfolgender Gegenüberstellung ansatzweise dargelegt. Zu ausführlichen Betrachtungen sei auf KOTULLA (2020) sowie KOTULLA & DRÜEKE (2021) verwiesen.

Autochthone Sichtweise

Bereits LYELL (1855) schrieb einem 12–15 m dicken Flöz bei Pottsville (Pennsylvania) eine Pflanzenakkumulation [an Ort und Stelle, MK] zu, die Tausende von Jahren angedauert haben müsse (S. 394f).

1 m Kohle (vgl. Abb. 3) repräsentieren – unter Einbeziehung einer Verdichtung – eine Zeitdauer von etwa 5–10 Tausend Jahren (z. B. TEICHMÜLLER & TEICHMÜLLER 1982, 17f). Dies wird von der Bildung von Torf abgeleitet; es werden Akkumulationsraten von durchschnittlich 1–2 mm pro Jahr genannt.¹⁰

Im Falle der aufrechten Baumstämme werden Sedimentationsraten hauptsächlich von einer mutmaßlichen Verrottungszeit abgeleitet. Primär scheint bei dieser biologischen Indikation eine Orientierung an einer möglichen Maximalzeit vorzuliegen: 10–100 Jahre für etwa 1–10 m Sedimentakkumulation (unter Einbeziehung einer Verdichtung; z. B. BAILEY 2011).¹¹

Allochthone Sichtweise (nach KOTULLA & DRÜEKE 2021)

Das Pflanzenmaterial (die späteren Kohlen) wurde – vermutlich als Matten-artige Vegetationsdecken – antransportiert und abgelagert. Hierbei sind Akkumulations- bzw. Sedimentationsraten von einem Meter in Stunden vorstellbar (s. u.).

Größere Sedimentationsunterbrechungen sind nicht erkennbar.

Die aufrecht stehenden Lycopside-Bäume (insbesondere Lokalität Joggins, Kasten 1) wurden antransportiert und in aufrechter, stabiler Lage abgelagert. Die Gefügemerkmale der Sedimentgesteine, die die aufrecht stehenden Bäume umschließen und verfüllen, u. a. Schräg- und Kreuzschichtung, zeigen eine rasche Sedimentation unter wechselhaften hydrodynamisch hochenergetischen Verhältnissen (Material- und Korngrößenwechsel) an. Eine sukzessive Verrottung der Hohlstämmen (mit Bezug auf das „Rinden“gewebe) – oben mehr als unten – ist bisher nicht festgestellt worden. Dies wäre zu erwarten, wenn sich die Verschüttung der Bäume über Jahre bzw. Jahrzehnte hinziehen würde. Da kein unterschiedlicher Grad der Verrottung vorliegt, ist eine rasche und zugleich vollständige Verschüttung wahrscheinlich. Es wird die Perspektive einer Minimalbetrachtung vorgeschlagen mit einer Akkumulationsrate von einem Meter in Stunden. Größere Sedimentationsunterbrechungen sind nicht erkennbar.

Vergleich der Bildungs- bzw. Ablagerungszeiten

Ein überschlägiger Vergleich der Bildungs- bzw. Ablagerungszeiten zeigt, dass – auf Basis der präsentierten Interpretationen – ein Unterschied von mehreren Größenordnungen vorliegt; jeweils allochthon zu autochthon:

- Kohlenvegetation: Stunden versus Tausende Jahre (etwa 1 zu 10.000.000).
- Lycopside-Stämme führende Siliziklastika: Stunden versus Dekaden Jahre (etwa 1 zu 10.000).

Ergebnis und Schlussfolgerung

Die Hauptargumente für eine mutmaßliche autochthone Natur der (Kohlen-) Vegetation sind „Wurzelböden“ im Liegenden der Flöze oder aufrechte Stämme in Wachstumsposition (s. o. TEICHMÜLLER & TEICHMÜLLER 1982). „Wurzelböden“ – besser: Basisorgane führende Sediment(gestein)e – waren keine Böden; es ist auch nicht in das Sediment (den Untergrund) hinein eingewurzelt worden. Der Begriff „Wurzelboden“ ist irreführend und taugt nicht als Beleg bzw. Kriterium für Autochthonie. Aufrechte Stämme treten häufig ohne einen Bezug zu einem Kohlenflöz – also nicht einem Kohlenflöz aufliegend – auf; die aufrechte Position kann als stabile Gleichgewichtslage während des Transports und Absatzes erklärt werden. Alleine be-

trachtet sind diese aufrechten Bäume kein zwingender, kein eindeutiger Beleg für Autochthonie und passen in Zusammenhang mit den Fehlen von wirklichen Wurzelböden und den dargestellten, primär sedimentären Indizien vielmehr in einen allochthonen Kontext.

Die Autochthonie/Allochthonie-Frage – so zeigt das umfangreiche Schrifttum der letzten knapp 200 Jahre – ist eine essenzielle Frage; sie ist Ausdruck über Vorstellungen der (geologischen) Vergangenheit und der möglicherweise wirkenden Prozesse (WALDRON & RYSEL 2005). Der Verfasser schlägt eine allochthone Entstehung der euramerischen Kohlen vor. Eine allochthone Entstehung der Kohlen hat weitreichende Schlüsse zur Folge. So müssten Entwicklungen in der Wissenschaft der Geologie, die von der Autochthonie-Vorstellung der Kohlenentstehung tiefgreifend beeinflusst worden sind, überprüft und gegebenenfalls korrigiert werden. Dies würde beispielsweise auf Ablagerungsumgebungen, Bildungs- bzw. Ablagerungszeiten (Kasten 2) und insgesamt auf die Prinzipien des Uniformitarismus zutreffen.

Schlussergänzung

Zum Thema der karbonischen Kohlenablagerungen ist von der Studiengemeinschaft Wort und Wissen 1986 das Buch *Karbonstudien* von Joachim SCHEVEN herausgegeben worden (Abb. 8). SCHEVEN (1986) fragt u. a., ob „die Wälder unserer Steinkohlenflöze in Hunderttausenden von Jahren herangewachsen“ sind. Er zeigt an zahlreichen Beispielen aus dem Ruhr-Karbon und der Joggins-Küstenlokalität auf, dass die Sedimente zwischen den Pflanzenakkumulationen (Zwischengesteine der späteren Kohlenflöze) sehr rasch und ohne größere Sedimentationsunterbrechungen abgelagert worden sind. Des Weiteren legt er dar, dass die „Wurzelböden des Karbons mit den sie enthaltenden Wurzelorganen gleichzeitig abgelagert worden sind.“ Dabei sind seine Ausführungen in vielen Teilen weitaus umfangreicher, als es dieser begrenzte Beitrag leisten kann.

Dank

Mein Dank gilt Dr. Reinhard JUNKER und Dr. Martin ERNST für die Durchsicht des Manuskripts und wertvolle Hinweise.

Literatur

- BAILEY RJ (2011) Buried trees and basin tectonics: A discussion. *Stratigraphy* 8, 1–6.
- BURGER K, BIEG G & PEISTERER W (2005) Klassische und primitive Kaolin-Kohlesteinen im Ruhrkarbon. In: Deutsche Stratigraphische Kommission



Abb. 8 Buchcover von *Karbonstudien* (SCHEVEN 1986).

- (Hrsg.) Stratigraphie von Deutschland V – Das Oberkarbon (Pennsylvanien) in Deutschland. *Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg* 254, 169–180.
- DAVIES SJ, GIBLING MR, RYGEL MC & CALDER JH (2005) The Joggins Formation: stratigraphic framework and sedimentological log of the historic fossil cliffs. *Atlantic Geology* 41, 115–141.
- DAVYDOV VI, CROWLEY JL, SCHMITZ MD & POLETAEV VI (2010): High-precision U-Pb zircon age calibration of the global Carboniferous time scale and Milankovitch band cyclicity in the Donets Basin, eastern Ukraine. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 11, Q0AA04, doi:10.1029/2009GC002736.
- FÜCHTBAUER H & MÜLLER G (1977) *Sediment-Petrologie Teil II. Sedimente und Sedimentgesteine*. 3. Auflage, Stuttgart.
- GOTHAN W (1921) *Pontonié's Lehrbuch der Paläobotanik*. Zweite umgearbeitete Auflage, Berlin.
- GOULD SJ (1990) *Die Entdeckung der Tiefenzeit. Zeitpfeil oder Zeitzyklus in der Geschichte unserer Erde*. München Wien.
- HETHERINGTON AJ, BERRY CM & DOLANA L (2016) Networks of highly branched stigmarian rootlets developed on the first giant trees. *PNAS* 113, 6695–6700.
- JESSEN W (1961) Zur Sedimentologie des Karbon mit Ausnahme seiner festländischen Gebiete. *Compte Rendu, Quatrième Congrès International de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifère*, Heerlen, 1958, volume 2, 307–322.
- Joggins Fossil Institute (2007) Nomination of The Joggins Fossil Cliffs for Inscription on the World Heritage List.
- KASIELKE T (2013) *Exkursion: Essen-Heisingen, geologische Exkursion am Nordufer des Baldeneysees*. *Jahrb. Bochumer Bot. Ver.* 4, 95–105.
- KOTULLA M (2020) Bentonit-Horizonte in paläozoischen Sedimentfolgen: Tephrostratigraphie und U-Pb-Altersbestimmungen mit magmatogenen Zirkonen. *W+W Special Paper G-20-1*, Baiersbronn. https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/Bentonit-Horizonte_G-20-1.pdf
- KOTULLA M & DRÜEKE S (2021) Die Fossilkliffe von Joggins, Nova Scotia, Kanada: Zur Entstehung der karbonischen Kohleablagerungen. *W+W Special Paper G-21-1*, Baiersbronn. https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/Joggins_G-21-1.pdf
- KUKUK P (1938) *Geologie des Niederrheinisch-Westfälischen Steinkohlengebietes*. Textband, Berlin.
- KUKUK P & HAHNE C (1962) *Die Geologie des Niederrheinisch-Westfälischen Steinkohlengebirges (Ruhrreviers)*. Herne.
- LOGAN WE (1845) Section of the Nova Scotia coal measures as developed at Joggins on the Bay of Fundy, in descending order, from the neighborhood of the west Ragged Reef to Minudie, reduced to vertical thickness. *Geological Survey of Canada, Report of Progress for 1843, Appendix*, 92–159.
- LYELL C (1830–33) *Principles of Geology. Being an Attempt to Explain the Former Changes of the Earth's Surface by Reference to Cause Now in Operation*. London.
- LYELL C (1845) *Travels in North America; with geological observations on the United States, Canada, and Nova Scotia, Vol. 2*, London.
- LYELL C (1855) *A Manual of Elementary Geology*. 5th ed., London.
- MURAWSKI H & MEYER M (2010) *Geologisches Wörterbuch*. 12. Auflage, Stuttgart.
- SCHVEEN J (1986) *Karbonstudien: neues Licht auf das Alter der Erde*. *Wort und Wissen, Band 18*. Neuhausen-Stuttgart.
- SCHULTZ LG (1958) *Petrology of Underclays*. *Bull. Geol. Soc. Amer.* 69, 363–402.
- STÖFFLER D (1963) *Neuere Erkenntnisse in der Tonsteinfrage auf Grund sedimentpetrographischer und geochemischer Untersuchungen im Flöz Wahlschied der Grube Enseldorf (Saar)*. *Beitr. Miner. Petrogr.* 9, 285–312.
- TEICHMÜLLER M & TEICHMÜLLER R (1982) The geological basis of coal formation. In: STACH E, MACKOWSKY M-T, TEICHMÜLLER M, WAYLOR GH, CHANDRA D & TEICHMÜLLER R (eds.) *Stach's Textbook of Coal Petrology*. 3rd, rev. and enlarged edition, 5–86.
- WALDRON JWF & RYGEL MC (2005) Role of evaporite withdrawal in the preservation of a unique coal-bearing succession: Pennsylvanian Joggins Formation, Nova Scotia. *Geology* 33, 337–340.
- WHEWELL W (anonym publiziert) (1832) *Principles of Geology, being an Attempt to Explain the Former Changes of the Earth's Surface, by Reference to Causes now in Operation*. By Charles Lyell, Esq. F.R.S., Professor of Geology in King's College, London. Vol. II. London. 1832. *The Quarterly Review* 47, 103–132.

Weitere Literaturangaben siehe o. a. Zusatzmaterial.

Anschrift des Verfassers:

*Michael Kotulla, SG Wort und Wissen,
Rosenbergweg 29, 72270 Baiersbronn;
E-Mail: m.kotulla@wort-und-wissen.de*

Schimpansen leben außerhalb der Steinzeit

Überraschende Neuigkeiten aus der Verhaltensforschung

Verhaltensähnlichkeiten zwischen Menschenaffen und Menschen spielen in Evolutionsmodellen eine große Rolle. Doch können Schimpansen überhaupt Steinwerkzeuge zum Schneiden herstellen, wie man dies für sogenannte Vormenschen annimmt? Und geben Menschenaffen ihre erlernte Nutzung von Werkzeugen ähnlich an die nächste Generation weiter wie wir Menschen? Zwei Studien von Elisa BANDINI von der Universität Tübingen aus dem Jahr 2021 geben überraschende Antworten.

Benjamin Scholl

Einleitung

Nach der Evolutionstheorie wird davon ausgegangen, dass sich Schimpansen und Menschen vor circa 7 Millionen radiometrischen Jahren (MrJ) aus schimpansenähnlichen Vorfahren entwickelt hätten. Im Zuge dieser Annahme sucht man in der Verhaltensforschung nach möglichst vielen ähnlichen Fähigkeiten von Schimpanse und Mensch, um dadurch eine gemeinsame Abstammung zu bestätigen. Dies gilt auch für den Gebrauch von Werkzeugen. Und tatsächlich sind Schimpansen diejenigen Affen, die das größte Repertoire an Werkzeugen in freier Natur nutzen. Die Frage ist allerdings, ob Schimpansen auch selbstständig Schneidewerkzeuge aus Stein herstellen können, wie man sie vor 2-3 MrJ fossil gefunden hat. Dies wurde nun erstmals von BANDINI et al. (2021a) in einer Studie an nicht kultivierten Schimpansen in

menschlicher Obhut untersucht. Außerdem zeigten BANDINI und Kollegen (2021b) am Beispiel von Orang-Utans in Zoos auf, dass Menschenaffen die Werkzeugnutzung von Hämmern ganz anders lernen, als es bisher oft aus evolutionärer Perspektive vermutet worden war. Es gibt also einmal mehr überraschende Neuigkeiten aus der Erforschung des Verhaltens von Menschenaffen.

Bisherige Steinwerkzeugnutzung bei Menschenaffen

Schimpansen können Steine in freier Wildbahn als Hammer und Amboss zum Nussknacken einsetzen. Da dies aber nur bei einigen Populationen und in diesen nicht bei allen Individuen beobachtet wurde, hatte man es als einen „Beleg für eine Kultur bei Schimpansen“ angesehen.

Introbild In einer neuen Studie wurde untersucht, ob Schimpansen selbstständig Steinwerkzeuge herstellen und zum Schneiden einsetzen können. Links: Schimpanse. Rechts: Ein Oldowan-Steinwerkzeug (2,6-1,5 Mio. rJ). (AdobeStock; José-Manuel BENITO ÁLVAREZ, CCO)

Insgesamt sind nur fünf menschlich kultivierte Menschenaffen bekannt, die Steinsplitter hergestellt haben.

hen (HAYASHI et al. 2005). Dennoch ist bei Schimpansen nach aktuellem Wissensstand in freier Natur keine Bearbeitung von Steinsplittern als Schneidewerkzeuge bekannt. Daher nutzte man bisher Versuche mit von Menschen trainierten Schimpansen, um die Fähigkeiten zur Werkzeugherstellung bei Menschenaffen einschätzen zu können (BRANDT 2017d). So wurde dem menschlich aufgezogenen Zwergschimpansen Kanzi ab den 1990ern beigebracht, einfachste Steinwerkzeuge herzustellen.¹ Dieses Verhalten erlernten außerdem noch seine Halbschwester Panbanisha und deren beiden Söhne, sowie ein männlicher Borneo-Orang-Utan namens Abang in den 1980ern. Also sind insgesamt nur fünf menschlich kultivierte Menschenaffen bekannt, die Steinsplitter hergestellt haben, welche anschließend als Werkzeuge genutzt wurden (BANDINI et al. 2021a). Mit diesen Steinwerkzeugen waren die Menschenaffen dann auch in der Lage, zu schneiden, zu bohren oder zu graben (ROFFMAN et al. 2012). Insgesamt schienen die Versuche mit trainierten Menschenaffen daher ganz gut in die evolutionäre Ansicht zu passen, dass sich Schimpansen als Modell der Steinwerkzeugherstellung und -nutzung für die vermuteten Vorfahren der Menschen (wie z. B. *Australopithecus* und *Kenyanthropus*) eignen (vgl. u. a. MERCADER et al. 2002 und LUNCZ et al. 2016): „Die derzeit weit verbreitete Annahme ist, dass die Werkzeugnutzungskultur von Schimpansen auf zur menschlichen Kultur homologen [stammesgeschichtlich übereinstimmenden] sozialen Lernmechanismen basiert“ (BANDINI & TENNIE 2017).

Die spontane Werkzeugherstellung und -nutzung bei Schimpansen

Durch die neue Studie von BANDINI und Kollegen (2021a) wurde deutlich, dass Schimpansen in ihrer natürlichen Umgebung „vor der Steinzeit“ leben und damit kein adäquates Modell für eine potenzielle Steinzeitkultur der Frühmenschen darstellen. Mit dem Ausdruck „vor der Steinzeit“ durch die Universität Tübingen (2021a) wird suggeriert, dass Schimpansen evolutionär in freier Wildbahn noch vor der Steinzeit stünden. Doch wie hatten BANDINI und Kollegen (2021a) dies herausgefunden?

Sie stellten elf Gemeine Schimpansen (*Pan troglodytes*) in einem norwegischen Zoo und auch in einer Schutzstation in Sambia je zwei Gefäße mit Futter zur Verfügung. Das Futter

Kompakt

Verhaltensexperimente mit lebenden Menschenaffen werden evolutionstheoretisch oft als Datenquelle zur Evolution der Steinwerkzeuge von Vormenschen herangezogen. Dabei untersuchte man bisher vor allem Menschenaffen, denen die Herstellung von Steinsplittern als Schneidewerkzeuge vorgemacht wurde. In einer neuen Studie von BANDINI et al. (2021a) wurde nun erstmalig die Fähigkeit zur Herstellung und Nutzung von Steinwerkzeugen mit nicht kultivierten (d. h. nicht von Menschen trainierten) Schimpansen in menschlicher Obhut getestet. Es zeigte sich, dass die Schimpansen weder Steinsplitter herstellen noch als Schneidewerkzeuge nutzen können. Dies überraschte die Forscher, da eine solche Fähigkeit bereits 1994 bei Gehaubten Kapuzineraffen nachgewiesen wurde, welche durch eine postulierte Evolutionsgeschichte seit 46 Millionen radiometrischen Jahren (Ma) von Menschenaffen getrennt sind. Aus evolutionärer Perspektive stellt dieser Befund infrage, ob die Werkzeugnutzung durch *trainierte* Menschenaffen überhaupt als Beleg für die vermutete Evolution des Menschen dienen kann. Im Gegenteil erscheint die Deutung eines konvergenten Verhaltens wahrscheinlicher.

Eine weitere Studie von BANDINI et al. (2021b) vergrößert die Zweifel daran, dass das Erlernen der Werkzeugnutzung bei Menschenaffen mit der sich ständig kumulativ weiterentwickelnden Lehr-Lern-Kultur des Menschen vergleichbar ist. Die Autoren wiesen erstmalig nach, dass auch Orang-Utans Hämmer als Werkzeuge zum Nussknacken einsetzen können. Dabei entwickelten mehrere Individuen dieses Verhalten unabhängig voneinander, obwohl es ihnen nicht kulturell vermittelt worden war.



war von außen sichtbar und konnte nur durch Zerschneiden eines Seils bzw. einer Plexiglascheibe erlangt werden. Die Schimpansen erhielten alles, was man dazu benötigt: Hammersteine und einen Steinkern (extra an die Größe und Morphologie der Schimpansenhände angepasst), von dem man Steinsplitter abschlagen kann. Doch eines erhielten die Schimpansen nicht: die menschliche Anleitung bzw. ein Vorbild, wie man mittels Schlägen der Hammersteine auf die Steinkerne Steinsplitter zum Schneiden anfertigen kann. Claudio TENNIE, der in der Erforschung des Verhaltens von Schimpansen weltweit bekannt ist, stellt fest, dass „die Schimpansen vermutlich verstanden hatten, dass die Behälter Futter [je nach Vorlieben der Schimpansen Banane, Erdnüsse, Kekse oder Joghurt] enthielten, und auch klar motiviert waren, an diese Belohnung zu kommen“ (Univer-

Abb. 1 Experimente haben gezeigt, dass Schimpansen eine Reihe verschiedener Werkzeuge nutzen, um an Futter zu gelangen. Ob Schimpansen auch ohne menschliche Anleitung Steinwerkzeuge herstellen können, war bisher noch nicht untersucht worden. (Damien NEADLE, CC BY-SA 4.0)



Abb. 2 Ein Schimpanse knackt eine Nuss mit einer Metallkugel, die er als Werkzeug anstelle eines Steines in einem Experiment verwendet. (SCHRAUF C et al., PLOS ONE, CC BY-SA 2.5)

Nicht ein Schimpanse aus Norwegen oder Sambia versuchte auch nur ansatzweise, Steinsplitter zum Schneiden herzustellen.

sität Tübingen 2021a). Dennoch versuchte nicht eines der Tiere aus Norwegen oder Sambia auch nur ansatzweise, Steinsplitter zum Schneiden herzustellen. Sie taten das auch nicht, als man ihnen von Menschen hergestellte Steinsplitter sozusagen als Muster vorlegte. Sie nutzten nicht einmal die bereitgestellten Steinsplitter zum Aufschneiden der Kiste mit dem Nahrungsköder und schenkten den Splittern insgesamt nur wenige Sekunden Beachtung. Trotzdem hantierten sie viel mit den Testmaterialien und versuchten erfolglos, die Futterbox mit Händen und Zähnen und selbst herbeigebrachten Werkzeugen (Stöcken, Plastikbechern) zu öffnen.

Was könnte die Ursache dieses Scheiterns sein? Von den Verhaltensforschern, die diese Studie kommentierten, wurde vermutet, dass Steine von den Schimpansen als Material nicht genutzt wurden, weil sie eventuell im Umgang mit Steinen weniger geübt waren als mit Stöcken und Kunststoff (BANDINI et al. 2021a). Angesichts der Tatsache, dass Steine häufig – selbst in Zoos und vor allem in freier Wildbahn – zur Verfügung stehen, erscheint dies aber eher unglaubwürdig. Auch die Tatsache, dass das Experiment in Sambia reproduziert werden konnte, spricht gegen diese Vermutung. Ebenso kommen BANDINI et al. (2021a) zu dem Schluss, dass es wahrscheinlicher ist, dass Schimpansen keine spontane Fähigkeit zur Steinwerkzeugherstellung besitzen und dies nur durch intensiven menschlichen Kontakt bzw. durch Nachahmung lernen können.

Der Versuchsaufbau von BANDINI et al. (2021a) war bewusst dem von WESTERGAARD &

SUOMI (1994) in der Gestaltung nachempfunden, um eine Vergleichbarkeit zwischen Kapuzineraffen und Schimpansen zu ermöglichen. Dementsprechend gingen BANDINI et al. (2021a) vor dem Versuch mit Schimpansen aus evolutionärer Perspektive davon aus, dass diese ebenfalls zur Herstellung und Nutzung von Steinwerkzeugen in der Lage sein würden.

Allerdings muss neben der Herstellung von Steinsplittern auch noch deren korrekter Einsatz beim Schneiden erlernt werden, wie die bisherige Verhaltensforschung mit menschlich kultivierten Tieren zeigte (BANDINI et al. 2021a): Der bereits erwähnte Orang-Utan Abang erlernte das Aufschneiden einer Seilkonstruktion, die eine Belohnung verschloss, erst nach neun Demonstrationen durch Menschen – und dabei führte der Versuchsleiter selbst die Hand des Orang-Utans mit dem Schneidestein. Für das Herstellen der Steinsplitter mit freihändiger Perkussionstechnik waren weitere sieben Demonstrationen durch Menschen nötig. Wie viele Demonstrationsversuche die vier genannten Zwergschimpansen in Gefangenschaft brauchten, um Steinsplitterherstellung zu erlernen, ist nicht bekannt.

Zu ergänzen ist außerdem, dass Schimpansen, die von Menschen aufgezogen wurden, im Umgang mit Werkzeugen ihre Artgenossen aus der Wildnis übertreffen. Ihre Verhaltensweisen sind auch nicht vom Überlebenszwang der natürlichen Umwelt abhängig und sie orientieren sich stark an ihren menschlichen Vorbildern. BANDINI et al. (2021a) schlussfolgern, dass aus den bisherigen Experimenten mit menschlich aufgezogenen Menschenaffen nicht einfach so auf die Evolution des Menschen geschlossen werden kann: „Da wild lebende Menschenaffen keinen Zugang zur menschlichen Enkulturation⁴ haben, sind die Ergebnisse von enkulturierten Affen für phylogenetische [stammesgeschichtliche] Schlussfolgerungen von [nur] begrenztem Wert.“

„Ergebnisse von enkulturierten Affen sind für phylogenetische Schlussfolgerungen von begrenztem Wert.“

Auch wenn die Schimpansen in der Studie von BANDINI et al. (2021a) nicht in der Lage waren, Steinsplitter herzustellen und als Schneidewerkzeug zu nutzen, kann man nicht sicher ausschließen, dass man ein solches Verhalten bei Schimpansen in Zukunft einmal beobachten wird.⁵ So hielten beispielsweise WESTERGAARD und SUOMI noch 1994 fest, dass Kapuzineraffen keine Steinsplitter mittels Werfen von Steinkernen auf den Boden herstellen können, was sie aber bereits 1995 dann doch beobachten konnten.

Kapuzineraffen überraschen mit ihren Werkzeugfähigkeiten

Der Vergleich der Studie von BANDINI et al. (2021a) mit den Ergebnissen einer Verhaltensstudie mit Gehaubten Kapuzineraffen (*Cebus apella*) ist besonders spannend, da diese Neuweltaffen aus Südamerika nach dem Evolutionsmodell in keiner näheren Verwandtschaft mit dem Menschen stehen. Prinzipiell würde man daher aus darwinistischer Sicht erwarten, dass die Werkzeugfähigkeiten von Schimpansen, die als die nächsten lebenden Verwandten des Menschen gelten, denen der Kapuzineraffen weit überlegen sind. Dies ist aber nicht der Fall, denn einzelne Kapuzineraffen können Steinwerkzeuge mit Hilfe von mindestens fünf verschiedenen Techniken herstellen (Werfen, stationärer und tragbarer Amboss sowie Freihand-Perkussion mit Steinen bzw. Holz) (WESTERGAARD & SUOMI 1995). Immerhin 93 % der bearbeiteten Steinkerne wiesen scharfe Kanten auf, was eine ziemlich hohe Ausbeute darstellt. Die Intelligenz von Gehaubten Kapuzineraffen zeigt sich auch daran, dass sie als einzige Primaten Steine in freier Wildbahn gewohnheitsmäßig zum Graben zur Nahrungssuche verwenden (DE ANDRADE MOURA & LEE 2004).

Einer Verhaltensstudie von WESTERGAARD & SUOMI (1994) zufolge gelang es sechs von elf Gehaubten Kapuzineraffen, mittels Schlagen eines bereitgestellten Steinkerns auf eine harte Oberfläche Steinsplitter herzustellen. Die Autoren betonen, dass dies „spontan“ ohne Anleitung durch Menschen geschah. Als WESTERGAARD und SUOMI ihre Untersuchungen 1995 wiederholten, gelang dies sogar elf von siebzehn Kapuzineraffen.

Des Weiteren beobachteten WESTERGAARD & SUOMI (1994) drei von fünfzehn Affen, die ohne Anleitung Steinsplitter als Schneidewerkzeuge verwendeten, um eine Box mit Nahrung (Zuckersirup) aufzuschneiden.² Dabei stießen sie mit dem Steinwerkzeug durch die durchsichtige Actetat-Abdeckung und schnitten sie mit Auf- und Abbewegen wie mit einem Brotmesser durch. Zwei der Affen kombinierten sogar zwei Werkzeuge, indem sie einen Stein in die Abdeckung stießen und mit einem anderen als Hammer darauf schlugen. Später entwickelten noch zwei weitere Affen der



Abb. 3 Gehaubte Kapuzineraffen können ohne Anleitung spontan Steinsplitter herstellen und sogar zum Schneiden eines Nahrungsbehälters verwenden. (Sean McCANN, CC BY-SA 2.0)

Gruppe ebenfalls diese Fähigkeit. Dies an sich ist schon erstaunlich, aber einer der drei Affen mit Namen Morris ging noch einen Schritt weiter. Erst testete er Steine zum Schneiden. Wenn sie zu groß waren, schlug er sie gegen den Versuchsapparat oder gegen andere Steine, um Steinsplitter bzw. Steinkerne herzustellen, die nun klein genug waren, um damit die Abdeckung aufzuschneiden.

Gemessen am damaligen Forschungsstand waren die Ergebnisse von WESTERGAARD & SUOMI (1994) spektakulär, denn man wusste zwar bereits aus einigen Studien, dass Kapuzineraffen Werkzeuge ähnlich wie Schimpansen nutzen können (z. B. Schlangen jagen mit einem Stock), aber nicht, dass dies auch auf die Nutzung von Steinwerkzeugen zum Schneiden zutrifft. Die Autoren schlussfolgern, dass die Erfindung von Steinwerkzeugen eine Fähigkeit sein könnte, die einige Male unabhängig und deutlich früher als erwartet innerhalb von Hominiden entstanden sein könnte – also eine

Konvergenz sei. Dies aus den Studienergebnissen abzuleiten, ist allerdings fraglich, da WESTERGAARD & SUOMI (1994) ebenfalls die Unterschiede zwischen Oldowan-Steinwerkzeugen und den Steinwerkzeugen der Kapuzineraffen betonen: Die Oldowan-Technik ist wesentlich fortschrittlicher als die Schneidewerkzeuge der Kapuzineraffen, nutzt häufiger die Hammer-Perkussion, nutzt „präzise, fein kontrollierte Schlagbewegungen“ und retouchiert die Kanten nach. Diese Begrenzungen gelten ebenfalls für Zwergschimpansen, wie die Autoren klarstellen. Gerade deshalb ist es nicht sinnvoll, davon auszugehen, dass die Fähigkeit zur Herstellung der frühesten gefundenen Steinwerkzeuge³ bereits vor der evolutionären Abspaltung der afrikanischen Menschenaffen von der Linie des Menschen entstanden sein könnte – was ja auch die Studie von BANDINI et al. (2021a) zu widerlegen scheint.

Auch Orang-Utans lernen Werkzeugnutzung anders als vermutet

Eine zusätzliche Studie von BANDINI und Kollegen (2021b) brachte weitere interessante Erkenntnisse über das Verhalten von Menschenaffen. Bislang war man in der Forschungsgemeinschaft allgemein davon ausgegangen, dass Schimpansen die einzigen Menschenaffen seien, die Hämmer spontan zum Knacken von harten Nüssen verwenden können. Solches Verhalten von Gemeinen Schimpansen wurde in freier

Wildbahn bereits in der Elfenbeinküste und in Guinea beobachtet, obwohl es dazu auch Anekdoten über wildlebende Zwergschimpansen und Gorillas gibt (BANDINI et al. 2021b). Die Nutzung von Hämmern zum Nussknacken wurde unter Primaten außerdem nur bei Kapuzineraffen und Langschwanzmakaken (*Macaca fascicularis*) wissenschaftlich beschrieben. Da Orang-Utans nach Schimpansen das zweitgrößte Repertoire an Werkzeuggebrauch in der Tierwelt aufweisen (BANDINI et al. 2021b), war es eine interessante Frage, ob man eine sponta-



Abb. 4 Ein Orang-Utan-Weibchen auf der Anlage des Zoos Leipzig. Orang-Utans können nicht nur Decken zum Schlafen, sondern auch Hämmer zum Nussknacken nutzen, wie 2021 erstmals publiziert wurde. (Pixabay)

ne Nutzung eines Hammers im Experiment bei diesen Menschenaffen nachweisen kann. Dafür wurden vier Orang-Utans im Leipziger Zoo und acht Orang-Utans in Zürich⁶ in einem Experiment beobachtet.

Alle beteiligten Orang-Utans hatten laut Aussagen ihrer Pfleger noch nie mit Holzhämmern hantiert oder jemandem dabei zugesehen. Man stattete sie mit einem Holzhammer, einem Amboss und harten Nüssen aus. Die Orang-Utans hatten noch keine Erfahrung mit dieser Art von Nüssen (in Leipzig wurden Macadamia-Nüsse und in Zürich Kola- oder Paranüsse eingesetzt). In Leipzig gelang es schließlich nur einem zehnjährigen Weibchen mit Namen Padana, Nüsse mit einem Hammer zu knacken. Auch nach fünf Experimentendurchläufen verwendete keiner der drei anderen Orang-Utans den Holzhammer. Stattdessen bissen oder schlugen sie die Nüsse auf, wie sie es auch bisher getan hatten. Selbst nachdem Padana ihnen mehrfach vorgemacht hatte, wie sie Nüsse mit dem Hammer knackte und aß, ahmte keiner der anderen Orang-Utans dieses Verhalten nach, obwohl man das aus evolutionärer Perspektive erwartet hatte.

Keiner der Orang-Utans ahmte das Verhalten des Nüsse-Knackens mithilfe eines Hammers nach.

In Zürich waren acht Orang-Utans in drei Gruppen getestet worden. In jeder Gruppe entwickelte je ein Tier die Hammernutzung spontan im ersten Durchlauf. Später schafften es auch allen anderen Orang-Utans mit Ausnahme

eines Jungtieres, den Holzhammer zu nutzen. Möglicherweise waren die Züricher Experimente erfolgreicher, weil die Kola-Nüsse noch härter als die Macadamia-Nüsse sind und sich daher besser mit einem Werkzeug als mit den Zähnen öffnen lassen.

Insgesamt gelang es also einem Orang-Utan (*Pongo abelii*) aus dem Leipziger Zoo und mindestens drei Orang-Utans (*P. abelii* und *pygmaeus*) aus dem Züricher Zoo, den Holzhammer ohne Anleitung zum Nussknacken einzusetzen. „In der Wissenschaft war man bisher von der gegenteiligen Annahme ausgegangen und hatte sogar erwartet, dass diese Fertigkeit [des Hämmerns] bei Menschenaffen ausstürbe, wenn sie nicht kulturell weitergegeben werden kann“, so Elisa BANDINI (Universität Tübingen 2021b). In der Verhaltensforschung war häufig vermutet worden, dass das Nussknacken mit einem Hammer als komplexes, mehrstufiges Verhalten⁷ kulturell unter Menschenaffen „weiter gegeben und erhalten“ (BANDINI et al. 2021b) oder nach anderen Forschern sogar „imitiert“ oder gar „unterrichtet“ wird (NEADLE, BANDINI & TENNIE 2020). Im Gegensatz dazu stellen BANDINI et al. (2021b) aber fest: „Die Orang-Utans können selbst dieses komplexe Verhalten also rein durch individuelles Lernen entwickeln.“ Für genau diesen Sachverhalt hatten auch schon andere Experimente mit Schimpansen gesprochen (vgl. u. a. JUNKER 2013; BANDINI & TENNIE 2017; SCHOLL 2018).

„Es fehlen bisher noch schlüssige Beweise dafür, dass (unkultivierte, ungeschulte) Affen die Fähigkeit besitzen, Handlungen zu kopieren.“

BANDINI et al. (2021b) fassen zusammen: „Es fehlen bisher noch schlüssige Beweise dafür, dass (unkultivierte, ungeschulte) Affen die Fähigkeit besitzen, Handlungen zu kopieren“ – womit sie insbesondere das Nachahmen neuartiger Handlungen meinen. Da diese Nachahmungsfähigkeit bei von Menschen trainierten Menschenaffen wie beim Zwergschimpansen Kanzi aber vorhanden ist, vermuten die Autoren, dass „diese Art von Training die Gehirnstrukturen der Individuen verändert, um das Kopieren von Handlungen zu ermöglichen“. Die Neigung gefangener Affen, häufiger als wilde Artgenossen Werkzeuge einzusetzen, ist auch als „captive effect“ bekannt (BANDINI & Tennie 2017). Hier besteht sicherlich noch weiterer Forschungsbedarf zur Identifizierung der zugrundeliegenden kognitiven und neuronalen Prozesse.

Das individuelle Erlernen des Hämmerns der Orang-Utans ist umso beachtlicher, da in einer

ähnlichen Studie von NEADLE, BANDINI & TENNIE (2020) mit dreizehn in Gefangenschaft lebenden Gemeinen Schimpansen (10–52 Jahre alt) gar keiner von ihnen es lernte, eine Nuss mit einem Holzhammer zu knacken – weder spontan noch nach intensivem Vormachen ihres Tierpflegers. Dies verwundert umso mehr, da ja in zwei wildlebenden Schimpansen-Populationen diese Fähigkeit vorhanden ist und sogar Kapuzineraffen dazu spontan in der Lage sind (ebd.).

BANDINI et al. (2021) zeigten somit, dass gewisse Verhaltensweisen der Werkzeugnutzung prinzipiell im genetisch angelegten Verhaltensrahmen von Menschenaffen vorhanden sind. Dies wird als „zone of latent solutions hypothesis“ (ZLS) bezeichnet. Damit meinen Verhaltensforscher den verborgenen Rahmen dessen, was ein Menschenaffe von alleine lernen kann, wenn die entsprechenden Rahmenbedingungen wie geeignetes Material und ausreichende Motivation vorhanden sind. Es handelt sich also nicht um das Nachahmen einer Werkzeugnutzung (daher auch der Begriff „non copying social learning“), sondern nur um eine Erhöhung der Wahrscheinlichkeit, dass ein Gruppenmitglied selbst anfängt, Werkzeuge auszuprobieren, wenn sich die Gruppe oft genug in einem Gebiet mit den nötigen Materialien und Nahrungsressourcen aufhält. Diese Form des Lernens unterscheidet sich deutlich von der sich stets weiterentwickelnden (kumulativen) Kultur des Menschen, in der Werkzeugtechniken über viele Generationen aktiv an die Kinder weitergegeben und von diesen stetig verbessert werden (vgl. SCHOLL 2018). Im Gegensatz dazu zeigen die fossilen Steinreste, die beim Nussknacken mit Steinen als Hämmern entstanden sind, dass sich bei Schimpansen in ca. 4000 rJ und bei Kapuzineraffen in ca. 3000 rJ die Technik des Nussknackens nicht wirklich verändert oder weiterentwickelt hat (außer der Steinform bei Kapuzineraffen), was gegen Lernen durch Imitation und für spontanes Lernen spricht (NEADLE, BANDINI & TENNIE 2020).

Diskussion

BANDINI et al. (2021a) kommen zu dem Schluss, dass sich die Fähigkeiten der Herstellung von scharfen Steinsplittern zum Schneiden „wohl erst lange nach dieser Trennung [von Schimpanse und Mensch aus einem schimpansenähnlichen Vorfahren] in der Evolution unserer menschlichen Vorfahren herausbildeten“ (Universität Tübingen 2021a). Desweiteren halten die Autoren als bisherigen Forschungsstand fest, dass erstens „umstritten bleibt“, wie der „wichtige Meilenstein in der Evolution“ der Stein-

splitterherstellung entstanden ist, zweitens, woher dieses Verhalten kommt, und drittens, warum man davon 4 MrJ lang in der Evolutionsgeschichte keine Nachweise findet (BANDINI et al. 2021a). Das sind erstaunlich viele Fragezeichen im Hinblick auf die kulturelle Evolution des Menschen aus Darwin'scher Perspektive.

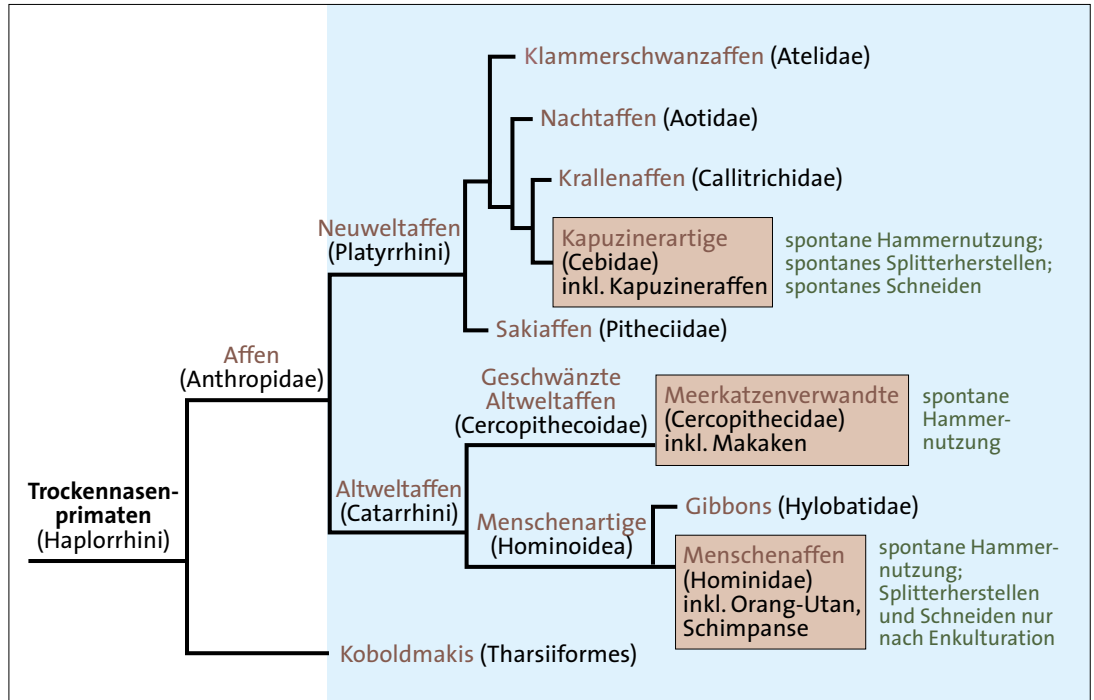
Die Herstellung von scharfen Steinsplittern bildete sich „wohl erst lange nach“ der Aufspaltung von Schimpanse und Mensch heraus.

Schimpansen scheinen nach aktuellen Forschungsergebnissen der Studie von BANDINI et al. (2021a) von Natur aus nicht das kognitive Vermögen zu besitzen, um selbstständig Steinsplitter herzustellen und einzusetzen. Dies ist aus evolutionärer Perspektive erklärungsbedürftig, zumal untrainierte Kapuzineraffen in menschlicher Obhut dies sehr wohl können. Neuweltaffen (Platyrrhini) wie Kapuzineraffen sowie Geschwänzte Altweltaffen (Cercopithecoidea) wie Makaken trennen immerhin 46 MrJ bzw. 30 MrJ Evolutionsgeschichte von Menschenaffen (Hominidae) (FINSTERMEIER et al. 2013; BEGUN 2017). Der Vergleich mit Kapuzineraffen spricht somit wesentlich stärker für eine konvergente Werkzeugnutzung innerhalb der Primaten als für ein evolutionäres Verwandtschaftsverhältnis. Das wiederum lässt den Schluss zu, dass die verhaltensbiologische Kluft zwischen Schimpansen und Menschen in der Steinwerkzeugnutzung weiter ist, als man aus evolutionstheoretischer Perspektive bisher vermutet hat.

Die Werkzeugnutzung innerhalb der Primaten scheint eher konvergent entstanden zu sein und zeigt keine Verwandtschaftsverhältnisse an.

In einer weiteren Studie konnten BANDINI et al. (2021b) nachweisen, dass Orang-Utans auf eine andere Weise das Hämmern lernen, als dies viele evolutionäre Verhaltensforscher bisher gedacht hatten. Mindestens vier von zwölf Orang-Utans lernten spontan die Nutzung von Hämmern zum Nussknacken – während dreizehn Schimpansen in einer Studie von Neadle, BANDINI & TENNIE (2020) trotz Anleitung nicht dazu in der Lage waren. Ein solches komplexes Verhalten wie das Hämmern wird bei Menschenaffen also individuell erlernt und nicht zwangsläufig durch eine typisch menschliche Lehr-Lern-Kultur (vgl. BOESCH 1991) über Generationen hinweg weitergegeben und weiterentwickelt.

Abb. 5 Die Systematik der Trockennasenprimaten mit den beschriebenen Fähigkeiten und Gattungen, zwischen denen keine enge evolutionäre Verwandtschaft besteht. (verändert nach <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Trockennasenprimaten&oldid=215280573>)



Allerdings gibt es auch weitere Gründe, warum am gängigen Evolutionsmodell von schimpansenähnlichen Vorfahren über *Australopithecus*, *Kenyanthropus*, „*Homo*“ *habilis* und anderen Formen mit einfacheren Werkzeugfähigkeiten hin zum echten Menschen mit komplexen Werkzeugfähigkeiten Kritik anzumelden ist:

Erstens zeigen eingehende Untersuchungen, dass Werkzeuge des Zwergschimpansen Kanzi trotz menschlicher Anleitung und eigenem Ausprobieren nicht auf dem Niveau der ältesten anerkannten Steinwerkzeugfunde sind. Die Steinsplitter von Kanzi erreichen weder die Qualität der 3,3 MrJ alten Lomekwikultur noch der 2,6 MrJ alten Oldowan-Kultur. „Die Abschlagbewegungen sind nicht kontrolliert, die Hammersteine zeigen Hinweise auf viele Fehlschläge, die Kerne sind wenig abgebaut und die erzeugten Splitter werden nicht bearbeitet“ (BRANDT 2013).

Zweitens ist eine Abstammung des Menschen von angeblichen Vormenschen wie z. B. *Kenyanthropus*, *Australopithecus* und „*Homo*“ *habilis* (vgl. BRANDT 2017a, b, c, e) anhand der Körpermerkmale zu bezweifeln, da diese beispielsweise wegen ausgeprägter Kletteranpassungen eher den Menschenaffen als den echten Menschen (wie z. B. *Homo erectus*, *neanderthalensis* und *sapiens*) zugeordnet werden sollten. Im Schöpfungsmodell könnte man diese sogenannten „Vormenschen“ also einem oder mehreren geschaffenen Grundtypen von Großaffen zuzuordnen statt dem Grundtyp Mensch.

Drittens ist der Nachweis noch gar nicht erbracht, dass fossile nichtmenschliche Formen wie *Kenyanthropus*, *Australopithecus* oder „*Homo*“ *naledi* rein anatomisch zu einer Werkzeugherstellung in der Lage gewesen wären (vgl. BRANDT 2017b, e): Dies liegt teilweise am Fehlen von ge-

eignetem fossilen Datenmaterial sowie an mangelnder empirischer Grundlage für den Zusammenhang von Knochenmerkmalen und Werkzeugherstellungsfähigkeiten. *Australopithecus afarensis* besitzt viele nichtmenschliche Klettermerkmale an der Hand und war wohl auch zu zierlich für die notwendigen kraftvollen Bewegungen der Steinwerkzeugherstellung. Das schimpansengroße Gehirn von *Australopithecus* und *Kenyanthropus* besaß wahrscheinlich eine großaffenähnliche Struktur (vgl. BRANDT 2021) und legt somit eine komplexere Werkzeugherstellung nicht nahe. Auch die wohl hauptsächlich pflanzliche Nahrung dieser beiden Gattungen lässt nicht erwarten, dass sie regelmäßig Steinsplitter zum Zerlegen von toten Tieren nutzten.

Schimpansen leben weder in noch vor der Steinzeit, weil sie gar keine eigene Kultur der Steinwerkzeugherstellung besitzen.

Außerhalb des evolutionären Denkrahmens ließe sich daher vorläufig festhalten: Schimpansen leben nicht in, auch nicht vor, sondern außerhalb der Steinzeit, weil sie im Gegensatz zum Menschen gar keine eigene Kultur der Steinwerkzeugherstellung besitzen.

Anmerkungen

- ¹ Er entwickelte als einziger Menschenaffe zusätzlich zur antrainierten Perkussionstechnik, bei welcher man Steine aufeinander schlägt, noch die gezielte Wurftechnik, bei der Steinkerne zum Splittern auf harte Oberflächen geworfen werden.
- ² Zwei Affen gelang dies bereits in der ersten Versuchsrunde. Der dritte Kapuzineraffe schaffte es erst in der zehnten Versuchsrunde.

- ³ Die Autoren meinen hier noch die Oldowan-Steinwerkzeugfunde statt der mit 3,3 MrJ noch älteren Steinwerkzeuge aus Lomekwi 3 in Kenia.
- ⁴ Enkulturation meint das Erlernen der Verhaltensweisen einer Kultur.
- ⁵ Mögliche Ursachen für den Misserfolg sind: geringe Motivation, sensible und damit irreversible Lernphasen, begrenzte Übungsmöglichkeiten, vorherige Erfahrungen sowie die Qualität der Umweltbedingungen (BANDINI et al. 2021b).
- ⁶ Dies ist eine gleichartige ältere unveröffentlichte Untersuchung von Martina FUNK 1993-1994 in Zürich, die von BANDINI et al. (2021b) erstmalig ausgewertet wurde.
- ⁷ Dieses „Multi-Step-Behavior“ beinhaltet in freier Wildbahn die Schritte: 1. Nuss finden, 2. Amboss finden oder bereitlegen und ggf. stabilisieren, 3. Hammer finden, 4. ggf. Transport der Materialien und 5. Präzises Hämmern (BANDINI et al. 2021b). Laut HAYASHI et al. (2005) ist es eine der komplexesten Verhaltensweisen von Wildtieren überhaupt.

Literatur

- BANDINI E & TENNIE C (2017) Spontaneous reoccurrence of “scooping”, a wild tool-use behaviour, in naïve chimpanzees. *PeerJ*. 2017; 5: e3814.
- BANDINI E et al. (2021a) Naïve, unenculturated chimpanzees fail to make and use flaked stone tools. *Open Research Europe* 2021, <https://open-research-europe.ec.europa.eu/articles/1-20/v2>.
- BANDINI E et al. (2021b) Naïve orangutans (*Pongo abelii* & *Pongo pygmaeus*) individually acquire nut-cracking using hammer tools. *Am. J. Primatol.*, <https://doi.org/10.1002/ajp.23304>.
- BEGUN DR (2017) Evolution of the Hominoidea. In: Fuentes A: *The International Encyclopedia of Primatology*, <https://doi.org/10.1002/9781119179313.wbprim0063>.
- BOESCH C (1991) Teaching among wild chimpanzees. *Anim. Behav.* 41, 530–532.
- BRANDT M (2013) Können Schimpansen wie Menschen Steinwerkzeuge herstellen? *Stud. Integr. J.* 20, 4–9.
- BRANDT M (2017a) Wie sicher sind Deutungen in der Paläanthropologie? *Australopithecus sediba* und sein merkwürdiges Merkmalsmosaik. In: BRANDT M: Frühe Homininen. *Studium Integrale Special*, S. 9–49.
- BRANDT M (2017b) *Homo naledi* – neuer Hominine mit vielen Fragezeichen. In: BRANDT M: Frühe Homininen. *Studium Integrale Special*, S. 51–79.
- BRANDT M (2017c) „*Homo habilis*“ war kein Mensch. Kluft zwischen fossilen Menschen und Menschenaffen größer geworden. In: BRANDT M: Frühe Homininen. *Studium Integrale Special*, S. 83–92.
- BRANDT M (2017d) Können Schimpansen wie Menschen Steinwerkzeuge herstellen? In: BRANDT M: Frühe Homininen. *Studium Integrale Special*, S. 117–122.
- BRANDT M (2017e) Wer waren die ersten Steinwerkzeughersteller in der Menschheitsgeschichte? In: BRANDT M: Frühe Homininen. *Studium Integrale Special*, S. 129–203.
- BRANDT M (2021) Gab es Vormenschen? Irrungen und Wirrungen in der Paläoneurologie. *W+W Special Paper B-21-4*, <https://www.wort-und-wissen.org/artikel/vormenschen-palaeoneurologie/>.
- FINSTERMEIER K et al. (2013): A Mitogenomic Phylogeny of Living Primates. *PLOS ONE* 8(7):e69504.
- HAYASHI M, MIZUNO Y & MATSUZAWA T (2005) How does stone-tool use emerge? Introduction of stones and nuts to naïve chimpanzees in captivity. *Primates* 46, 91–102.
- JUNKER R (2013) Schimpanse und Mensch: Affen äffen nicht nach. *Stud. Integr. J.* 20, 63–64.
- LUNCZ LV et al. (2016) Distance-decay effect in stone tool transport by wild chimpanzees. *Proc. R. Soc. B* 283: 20161607.
- MERCADER J, PANGER M & BOESCH C (2002) Excavation of Chimpanzee Stone Tool Site in the African Rainforest. *Science* 296, 1452–1455.
- DE ANDRADE MOURA AC & LEE PC (2004) Capuchin Stone Tool Use in Caatinga Dry Forest. *Science* 306, 1909.
- NEADLE D, BANDINI E & TENNIE C (2020) Testing the individual and social learning abilities of task-naïve captive chimpanzees (*Pan troglodytes* sp.) in a nut-cracking task. *PeerJ*. 2020; 8: e8734.
- ROFFMAN I et al. (2012) Stone tool production and utilization by bonobo-chimpanzees (*Pan paniscus*). *PNAS* 109, 14500–14503.
- SCHOLL B (2018) Affe = Mensch? Ein Überblick über verhaltensbiologische Unterschiede zwischen Affen und Menschen. *W+W Special Paper B-18-1*, https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/b-18-1_affe-mensch.pdf.
- Universität Tübingen (2021a) Gebrauch von Steinwerkzeugen: Schimpansen leben vor der Steinzeit. Pressemitteilung vom 20.07.2021, <https://uni-tuebingen.de/universitaet/aktuelles-und-publikationen/pressemitteilungen/newsfullview-pressemitteilungen/article/gebrauch-von-steinwerkzeugen-schimpansen-leben-vor-der-steinzeit/>.
- Universität Tübingen (2021b) Zum Nussknacken nutzen Orang-Utans spontan einen Holzhammer. Pressemitteilung vom 11.08.2021, <https://uni-tuebingen.de/universitaet/aktuelles-und-publikationen/newsfullview-aktuell/article/zum-nussknacken-nutzen-orang-utans-spontan-einen-holzhammer/>.
- WESTERGAARD GC & SUOMI SJ (1994) A simple stone-tool technology in monkeys. *J. Hum. Evol.* 27, 399–404.
- WESTERGAARD GC & SUOMI SJ (1995) The stone tools of capuchins (*Cebus apella*). *Int. J. Primatol.* 16, 1017–1024. 105

Anschrift des Verfassers:

Benjamin Scholl, SG Wort und Wissen,
Rosenbergweg 29, 72270 Bayersbronn;
E-Mail: benjamin.scholl@wort-und-wissen.de

Das kosmologische Argument für die Existenz Gottes

„Alles, was einen Anfang hat, hat eine Ursache.“ Diese einfache Aussage ist intuitiv einleuchtend und gleichzeitig überaus folgenschwer. Denn kombiniert man sie mit der naturwissenschaftlich immer stärker erhärteten Vermutung, dass das Universum einen Anfang hat, gelangt man zu einem bemerkenswerten Schluss: Das Universum hat eine Ursache. Und mehr als das: Eine Analyse der Eigenschaften dieser Ursache zeigt überraschende Parallelen zur traditionellen christlichen Vorstellung von Gott.

Sandro Freiburghaus

Einleitung

Die Frage nach der Existenz Gottes ist eine der ältesten Fragen der Menschheitsgeschichte. Seit Jahrhunderten wird sie quer durch alle Wissenschaftsdisziplinen hindurch kontrovers diskutiert. Auf Seiten derjenigen, die für die Existenz eines Gottes argumentieren, lassen sich in der Literatur drei Hauptarten von sogenannten Gottesbeweisen finden.

Nach dem *ontologischen Gottesbeweis* wird allein aufgrund der Bedeutung des Gottesbegriffes gefolgert, dass ein göttliches Wesen in der Realität existieren muss. Die erste Formulierung dieses Gottesbeweises wird Anselm von Canterbury zugeschrieben. Er definierte Gott als etwas, über das hinaus nichts Größeres gedacht werden kann, und argumentierte, dass das Größte, was man sich denken kann, nicht nur in der Vorstellung, sondern auch in der Realität

Introbild AdobeStock;
mdmediendesign; NGC
2244 - The Rosette Nebula

existieren muss. Wenn Gott also das Größte ist, was man sich denken kann, muss er in der Realität existieren (BROMAND & KREIS 2011, 32).

Eine bekannte Variante des *teleologischen Gottesbeweises* basiert auf der unvorstellbaren Feinabstimmung der Naturgesetze und der physikalischen Konstanten in unserem Universum. Nach diesem Gottesbeweis ist die beste Erklärung für eine solche Feinabstimmung ein Schöpfer (oder Designer), der das Universum mit einem Ziel und zu einem Zweck exakt so geschaffen hat, dass Leben möglich ist (COLLINS 2012, 202).

In diesem Artikel konzentriere ich mich auf die dritte Art der Gottesbeweise, den *kosmologischen Gottesbeweis*. Eine der gebräuchlichsten Formen dieses Beweises ist die sogenannte *kalām-Form*, welche ihren Namen vom arabischen Wort für „Rede“ erhalten hat, da diese Form des Gottesbeweises im Mittelalter von muslimischen Gelehrten aufgestellt und später von christlichen Philosophen weiterentwickelt wurde. Das Argument kann wie folgt formuliert werden:

Erste Prämisse: Alles, was einen Anfang hat, hat eine Ursache.

Zweite Prämisse: Das Universum hat einen Anfang.

Schlussfolgerung: Das Universum hat eine Ursache.

Dieser Gottesbeweis ist als sogenanntes *deduktives Argument* aufgebaut. Das bedeutet, dass die Schlussfolgerung logisch zwingend aus den beiden Prämissen folgt. Wenn die beiden Prämissen wahr sind, dann muss zwingend und unausweichlich auch die Schlussfolgerung wahr sein. Der entscheidende Punkt in diesem Argument ist also die Frage, ob die beiden Prämissen wirklich wahr sind. Ich werde in diesem Artikel daher in einem ersten Teil dafür argumentieren, dass wir gute Gründe haben, davon auszugehen, dass die Wahrheit beider Prämissen wahrscheinlicher ist als ihre Negation. Dies bedeutet, dass es rational ist, die Schlussfolgerung für wahr zu halten. In einem zweiten Schritt werde ich dann diskutieren, welche Eigenschaften diese Ursache des Universums aufweisen muss. Wir werden dabei sehen, dass die notwendigen Eigenschaften der Ursache des Universums genau mit denjenigen übereinstimmen, die in einer *monotheistischen Sicht* Gott zugeschrieben werden. Damit werde ich zeigen, dass das *kosmologische Argument* ein überzeugender Beweis für die Existenz eines *monotheistischen Gottes* ist.

In einem abschließenden Fazit werde ich die gewonnenen Erkenntnisse zusammenfassen und kurz auf die Grenzen des *kosmologischen Gottesbeweises* eingehen.

Kompakt

Das *kosmologische Argument* für die Existenz Gottes basiert auf zwei Prämissen. Erstens: Alles, was einen Anfang hat, hat eine Ursache. Zweitens: Das Universum hat einen Anfang. Aus diesen zwei Prämissen folgt logisch zwingend die Schlussfolgerung, dass das Universum eine Ursache hat. In diesem Artikel wird argumentiert, dass es gute Gründe für beide Prämissen gibt und dass es daher rational ist, von einer Ursache des Universums auszugehen.

In einem zweiten Schritt wird aufgezeigt, dass diese Ursache des Universums zeitlos, immateriell, unveränderlich, unverursacht, unglaublich mächtig und wahrscheinlich persönlich ist, was genau der klassischen Definition Gottes entspricht. Das *kosmologische Argument* ist damit ein starker Hinweis auf die Existenz Gottes.

Erste Prämisse: Alles, was einen Anfang hat, hat eine Ursache

Die meisten Menschen akzeptieren diese Prämisse als offensichtlich wahr, da sie unserem intuitiven Wissen entspricht, dass nichts einfach unverursacht aus dem Nichts entstehen kann (CRAIG 2008, 111). Denn wäre dies möglich, dann müssten wir erwarten, dass wir dauernd auf Dinge stoßen, die einfach plötzlich unverursacht aus dem Nichts auftauchen. Da wir dies in unserem Alltag nicht erleben, liegt die Überzeugung nahe, dass alles, was einen Anfang hat, auch eine Ursache hat. William Lane Craig, einer der weltweit führenden Experten in Bezug auf das *kalām-Argument*, kommt daher zu folgendem Schluss: „Die erste Prämisse ist intuitiv so offensichtlich, besonders wenn sie auf das Universum angewendet wird, dass wahrscheinlich niemand, der bei klarem Verstand ist, wirklich glaubt, dass sie falsch ist“ (CRAIG 2000, 141).¹

Dennoch haben in letzter Zeit einige Skeptiker damit begonnen, diese Prämisse in Frage zu stellen. So war zum Beispiel J. L. MACKIE der Meinung, dass wir die Möglichkeit einer unverursachten Entstehung des Universums nicht einfach *a priori* als unakzeptabel ablehnen können. Basierend auf den Philosophen David HUME (1711–1776) argumentiert er, dass es durchaus möglich ist, sich einen unverursachten Anfang vorzustellen. Er schreibt: „Es gibt *a priori* keinen triftigen Grund, warum ein bloßes Entstehen von Dingen, das durch nichts determiniert ist, inakzeptabel sein sollte“ (MACKIE 1982, 94).² MACKIES Argument ist dabei nicht, dass er triftige Gründe aufführt, weshalb es tatsächlich vorkommen könnte, dass etwas unverursacht entsteht. Er bestreitet lediglich, dass wir die erste Prämisse einfach so als gegeben annehmen können.

Doch MACKIES Argument gegen die erste Prämisse ist bei genauerer Betrachtung nicht überzeugend. Philosophen haben schon längst darauf hingewiesen, dass die bloße Möglichkeit eines unverursachten Anfangs noch lange nicht

bedeutet, dass dies auch wirklich plausibel ist. Nur weil etwas theoretisch möglich ist, heißt das noch lange nicht, dass es rational ist, daran zu glauben. Selbst wenn MACKIE also recht haben sollte und es theoretisch möglich wäre, dass etwas unverursacht aus dem Nichts entsteht, so beweist unsere tagtägliche Erfahrung doch, dass verursachte Anfänge viel plausibler sind als unverursachte. Daher bleibt es die rationalere Haltung, an der ersten Prämisse festzuhalten, selbst wenn MACKIES Gedankenspielerei erfolgreich wäre. Die Forderung von Mackie, nur dann an der ersten Prämisse festzuhalten, wenn die Unmöglichkeit eines unverursachten Ursprungs zweifelsfrei bewiesen ist, ist daher komplett überzogen. Selbst David Hume, auf den sich MACKIE bei seiner Argumentation bezieht, betonte, dass seine Überlegungen ihn nicht dazu gebracht haben, das in der ersten Prämisse festgehaltene Prinzip abzulehnen. In einem Brief an John STEWART schrieb er 1754: „Ich habe nie eine so absurde Behauptung aufgestellt, dass etwas ohne Ursache entstehen könne“ (GRIEG 1932, 187).³

Ein zweiter Einwand, der in jüngerer Zeit häufig gegen die erste Prämisse eingebracht wurde, bezieht sich auf die Entdeckungen der Quantenphysik. Es wird gesagt, dass sich auf sub-atomarem Level Ereignisse abspielen, die unverursacht sind, und dass diese deshalb Ausnahmen vom Prinzip der Verursachung darstellen. Könnte nicht auch die unverursachte Entstehung des Universums eine solche Ausnahme der ersten Prämisse sein?

Dieser Einwand basiert auf einem falschen Verständnis der Quantenphysik. Erstens ist nicht klar, dass diese Phänomene in der Quantenphysik wirklich als unverursacht zu interpretieren sind. Viele Physiker sehen große Schwierigkeiten mit dieser Interpretation (der sogenannten Kopenhagener Interpretation) und erforschen daher deterministische Erklärungstheorien (CRAIG 2008, 114). Es ist also nicht bewiesen, dass die Quantenphysik Ausnahmen zur ersten Prämisse beinhaltet. Zweitens – und das ist der entscheidende Punkt – kommt die Entstehung der quantenphysikalischen Teilchen sogar gemäß der Kopenhagener Interpretation nicht aus dem Nichts, sondern aus spontanen Fluktuationen entsprechender Quantenfelder. Sie sind also nicht unverursacht, sondern besitzen einfach keine deterministische Ursache für ihre Entstehung (CRAIG 2008, 114; vgl. Abb. 2).

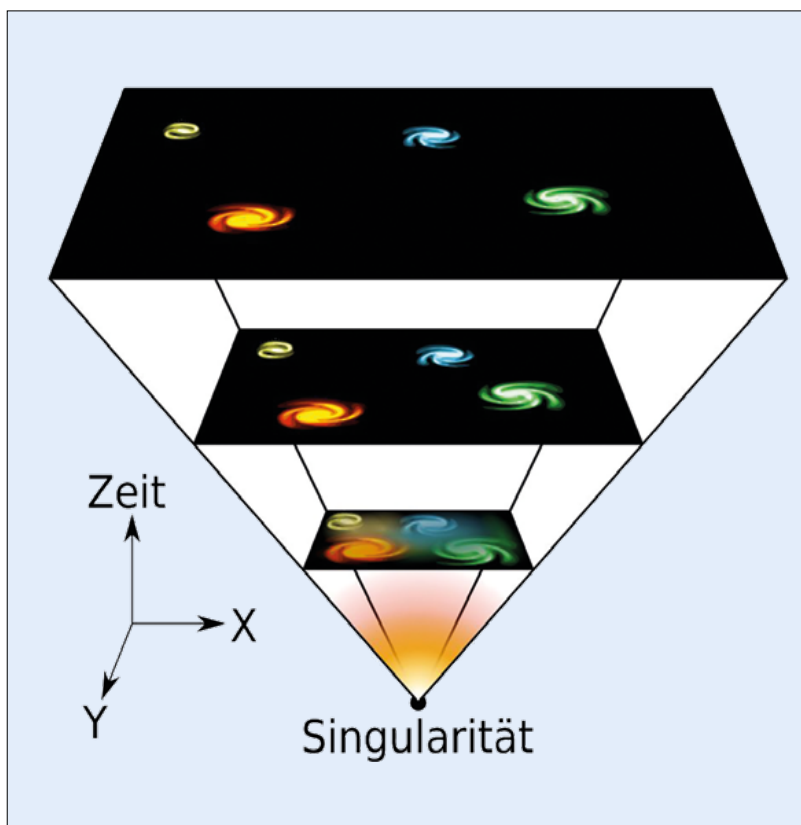
Wir halten also fest, dass die Einwände gegen die erste Prämisse nicht überzeugend sind. Es ist daher rational, unserer intuitiven Überzeugung und Erfahrung zu vertrauen, wonach alles, was einen Anfang hat, auch eine Ursache hat.

Zweite Prämisse: Das Universum hat einen Anfang

Die zweite Prämisse behauptet, dass das Universum einen Anfang hat. Lange Zeit besagte die vorherrschende naturwissenschaftliche Meinung, dass das Universum seit jeher in einem stationären Zustand existiert hat. Erst im 20. Jahrhundert wurde diese sogenannte Steady-State-Theorie ernsthaft in Frage gestellt, als Alexander Friedman und Georges Lemaître unabhängig voneinander Modelle aufstellten, die ein expandierendes Universum vorhersagten. Damit war es nicht länger möglich, das Universum als eine statische, zeitlose Entität zu betrachten (CRAIG 2002, 101). Heute geht eine Mehrheit der Experten davon aus, dass das Universum einen definierten Anfang vor ungefähr 13,8 Milliarden Jahren hat. Ich möchte an dieser Stelle nicht auf die Diskussion um das Alter des Universums eingehen. Für unsere Fragestellung ist einzig die Tatsache relevant, dass sich fast alle Experten darin einig sind, dass das Universum einen Anfang hat. Für diese Annahme sprechen sowohl naturwissenschaftliche als auch philosophische Argumente. Wir wollen an dieser Stelle die drei stärksten betrachten.

Als erstes betrachten wir das oben bereits kurz erwähnte naturwissenschaftliche Argument, das auf der Expansion des Universums beruht (Abb. 1). Kurz nachdem Albert EINSTEIN seine allgemeine Relativitätstheorie aufgestellt hatte, stellte er zu seiner Überraschung fest, dass seine Formeln nur mit großer Mühe überhaupt

Abb. 1 Illustration der zunehmenden Entfernung von Galaxien aufgrund des expandierenden Universums. (Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Universe_expansion-de.svg)



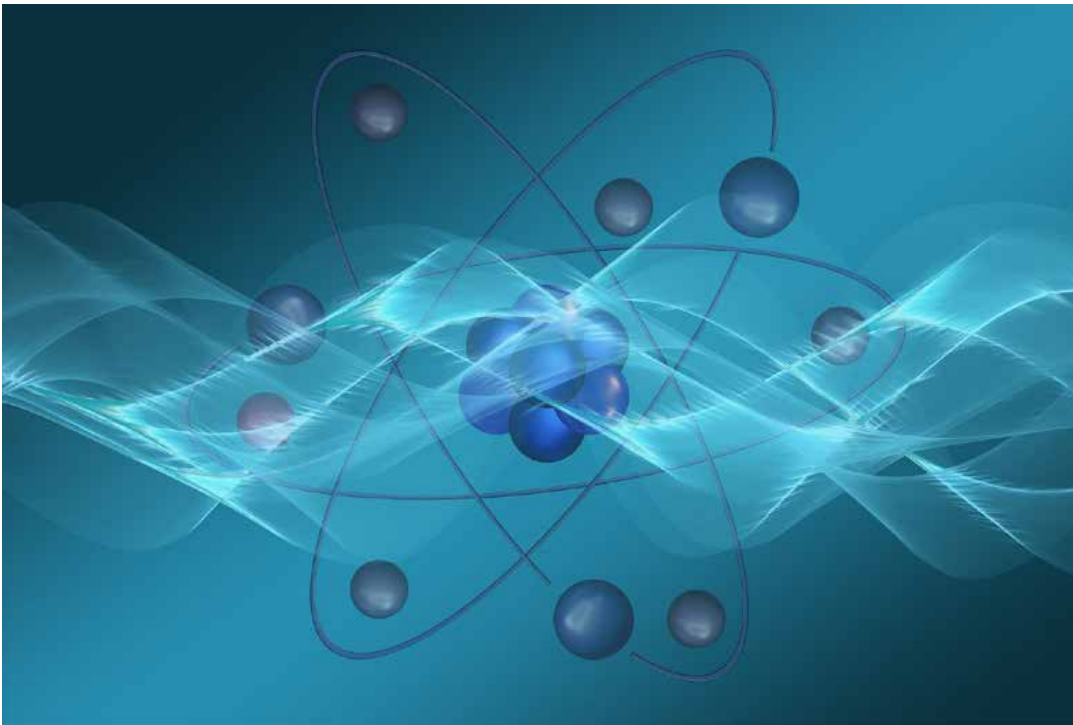


Abb. 2 Der Zerfallszeitpunkt eines radioaktiven Elements kann nicht genau vorhergesagt werden. Dennoch liegt eine Ursache für den Zerfall vor, nämlich der metastabile Zustand des Atomkerns. (AdobeStock)

Das BGV-Theorem belegt, dass jedes Universum, das sich im Durchschnitt ausdehnt, einen Anfang haben muss.

ein statisches und ewiges Modell des Universums zuließen, das überdies sehr instabil war. FRIEDMAN und LEMAÎTRE lösten dieses Problem, indem sie ein expandierendes Modell des Universums aufstellten. Nur wenige Jahre später entdeckte der amerikanische Astronom EDWIN HUBBLE die sogenannte Rotverschiebung von weit entfernten Galaxien. Darunter versteht man ein Phänomen analog zum Doppler-Effekt des Lichts, das auftritt, wenn sich die Lichtquelle vom Betrachter entfernt und damit das Licht zum roten Ende des Spektrums verschiebt. Damit hatte HUBBLE ein starkes Indiz entdeckt, das die theoretische Vorhersage von FRIEDMAN und LEMAÎTRE bestätigte, nämlich dass sich Galaxien voneinander entfernen, weil sich das Universum ausdehnt. Im Jahr 2003 haben ARVIND BORDE, ALAN GUTH und ALEXANDER VILENKIN außerdem ein Theorem aufgestellt (BGV-Theorem), das belegt, dass jedes Universum, das sich im Durchschnitt ausdehnt, einen Anfang haben muss (BORDE, GUTH und VILENKIN, 2003). Vilenkin schrieb dazu: „Mit dem jetzt vorliegenden Beweis können sich Kosmologen nicht länger hinter der Möglichkeit eines Universums mit einer ewigen Vergangenheit verstecken“ (VILENKIN 2006, 176).⁴

Viele Physiker haben versucht, alternative Modelle zu entwickeln, die ohne die Annahme einer durchschnittlichen Ausdehnung des Universums auskommen, um damit dem BGV-Theorem zu entkommen. Prominente Beispiele

sind die Theorie der ewigen Inflation, zyklische (bzw. oszillierende) Modelle oder die Idee des sogenannten *emergent universe*, gemäß der das Universum in einer ersten, unendlichen Phase wie ein statischer Same existierte, aus dem das Universum dann zu expandieren begann. In einem bemerkenswerten Aufsatz haben AUDREY MITHANI und ALEXANDER VILENKIN (der übrigens wesentlich an der Formulierung von Modellen mit ewiger Inflation beteiligt war) im Jahr 2012 allerdings gezeigt, dass keines dieser alternativen Modelle einen Anfang des Universums vermeiden kann. Sie schreiben: „Hat das Universum einen Anfang? An diesem Punkt scheint die Antwort auf diese Frage wahrscheinlich ja zu sein. Wir haben drei Szenarien besprochen, die einen Weg zu bieten schienen, einen Anfang zu vermeiden, und wir haben festgestellt, dass keines dieser Szenarien tatsächlich eine ewige Vergangenheit hat“ (MITHANI und VILENKIN 2012, 5).⁵

Das zweite Argument für den Anfang des Universums, das wir betrachten wollen, ist ebenfalls ein naturwissenschaftliches. Es handelt sich dabei um die kosmologischen Implikationen des zweiten Satzes der Thermodynamik. Dieses Gesetz beschreibt, dass in einem geschlossenen, isolierten System (wie es das Universum zu sein scheint) die Menge an brauchbarer Energie abnimmt, was dazu führt, dass das System zu einem Zustand des Gleichgewichts tendiert, in dem keine weiteren Veränderungen innerhalb des Systems mehr möglich sind. Diesen Zustand nennt man den Wärmetod des Universums. Die Implikation dieses Gesetzes für unsere Frage nach dem Anfang des Universums ist offensichtlich. Craig hat sie treffend formuliert: „Wenn das Universum nach ausreichender Zeit einen

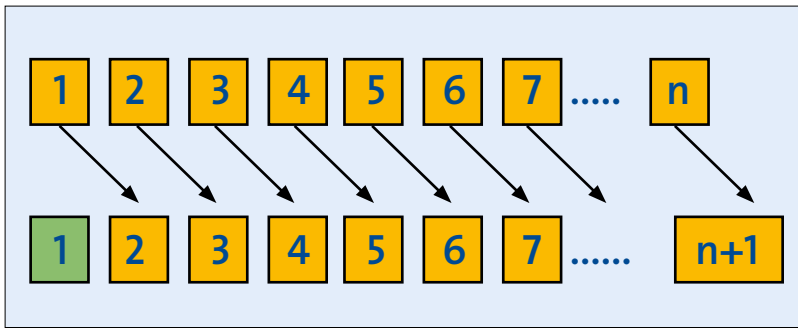


Abb. 3 Illustration von Hilberts Hotel.

Wärmetod erleiden wird, warum befindet es sich dann, wenn es schon immer existiert hat, nicht jetzt schon im Zustand dieses Wärmetodes?“ (CRAIG 2008, 141)⁶ Die Tatsache, dass unser Universum noch nicht in diesem Gleichgewicht ist, in dem alle nutzbare Energie aufgebraucht ist, lässt keinen anderen Schluss zu, als dass unser Universum nicht seit ewig existiert, sondern einen zeitlichen Anfang hat.

Betrachten wir nun noch ein philosophisches Argument, das gegen ein statisches, ewiges Universum spricht. Das Argument ergibt sich aus der Tatsache, dass ein ewiges Universum bereits eine aktual unendliche⁷ Anzahl an vergangenen Momenten durchlaufen haben müsste, um bis zum jetzigen Moment gelangt zu sein. Doch dies führt zu philosophischen Schwierigkeiten, da eine aktuelle Unendlichkeit im Gegensatz zur potenziellen Unendlichkeit in der Realität nicht existieren kann.

Da es in der Realität keine aktual unendliche Anzahl an Dingen geben kann, ist die Möglichkeit einer unendlichen Anzahl vergangener Zeitmomente ausgeschlossen.

Betrachten wir dazu die bekannte Illustration des deutschen Mathematikers David Hilbert. Hilbert beschreibt ein fiktives Hotel, in dem es eine unendliche Anzahl Zimmer gibt (Abb. 3). Stellen wir uns vor, dass jedes dieser Zimmer besetzt ist und nun ein weiterer Gast einchecken will. In diesem unendlichen Hotel ist es möglich, diesen Gast aufzunehmen. Dazu wird einfach der Gast vom Zimmer #1 in das Zimmer #2 verlegt, der Gast vom Zimmer #2 in das Zimmer #3, und so weiter. Auf diese Weise wird Zimmer #1 leer und steht nun für den neuen Gast zur Verfügung. Hilberts Hotel hat also die Fähigkeit, einen zusätzlichen Gast aufzunehmen, obwohl es bereits vorher komplett besetzt war. Dazu kommt, dass nach dem Einchecken des neuen Gasts die Gesamtzahl an Gästen gleichgeblieben ist, nämlich unendlich. Diese absurden Gedankenexperimente deuten darauf hin, dass in der Realität keine aktual unendlichen Mengen möglich sein können. Craig

schreibt dazu: „Es gibt ganz einfach keinen Weg, diese Absurditäten zu vermeiden, sobald wir die Möglichkeit der Existenz von aktueller Unendlichkeit zulassen“ (CRAIG 2002, 96)⁸. Wenn es also in der Realität keine aktual unendliche Anzahl an Dingen geben kann, dann schließt das auch die Möglichkeit einer unendlichen Anzahl an vergangenen Zeitmomenten aus. Dies bedeutet, dass bis heute noch nicht eine unendliche Anzahl an Zeitmomenten vergangen ist, was gleichbedeutend mit der Aussage ist, dass das Universum einen zeitlichen Anfang hat.

An dieser Stelle könnte aus christlicher Sicht folgender Einwand eingebracht werden: Gehört es nicht zum Wesen Gottes, dass er ewig ist? Würde die Unmöglichkeit einer aktual unendlichen Menge an vergangenen Zeitmomenten damit nicht auch die ewige Existenz Gottes in Frage stellen? Dieser Einwand basiert meiner Ansicht nach auf einem falschen Verständnis des göttlichen Attributs der Ewigkeit. Wenn Gott als ewig bezeichnet wird, dann wird damit traditionell nicht ausgedrückt, dass er seit einer aktual unendlichen Anzahl von Zeitmomenten existiert, sondern dass er im Gegenteil gerade außerhalb der Zeit in einer ewigen Gegenwart existiert. John MacArthur und Richard Mayhue schreiben dazu: „Gott transzendiert vollkommen alle Begrenzungen der Zeit, sodass er ohne Anfang, ohne Ende und auch ohne Aufeinanderfolge von Zeitelementen [...] ist“ (MACARTHUR & MAYHUE 2020, 231) [Hervorhebung durch den Verf.]. Die Ewigkeit als Attribut Gottes wird durch die Unmöglichkeit der aktuellen Unendlichkeit also nicht tangiert, da Gott außerhalb der Zeit steht und seine Ewigkeit damit nicht die Existenz einer unendlichen Menge an aufeinanderfolgenden Zeitmomenten impliziert. Ganz anders präsentiert sich der Fall beim Universum. In unserem Universum sind Raum und Zeit untrennbar miteinander verknüpft. Unser Universum kann nicht außerhalb der Zeit existieren. Damit würde eine ewige Existenz des Universums tatsächlich eine aktual unendliche Anzahl von Zeitmomenten bedeuten, was gemäß obenstehender Diskussion unmöglich scheint.

Wir halten also fest, dass die zweite Prämisse des kosmologischen Arguments durch Argumente aus Naturwissenschaft und Philosophie gestützt wird und dass Gegenargumente wenig überzeugend sind. Es ist daher rational, anzunehmen, dass das Universum einen Anfang hat.

Schlussfolgerung: Das Universum hat eine Ursache

Wir haben nun gesehen, dass sowohl starke philosophische als auch naturwissenschaftliche Ar-

gumente für die beiden Prämissen des kosmologischen Gottesbeweises sprechen. Es ist daher rational, zu glauben, dass die beiden Prämissen auf jeden Fall wahrscheinlicher wahr als falsch sind. Da das kosmologische Argument also valide ist, folgt aus den beiden Prämissen logisch zwingend und unausweichlich die Schlussfolgerung. Es ist daher ebenfalls rational anzunehmen, dass die Schlussfolgerung wahrscheinlich wahr ist. Das Universum hat also eine Ursache.

Als nächstes stellt sich nun die Frage, welche Eigenschaften diese Ursache des Universums hat. Es ist offensichtlich, dass die Ursache selbst außerhalb des Universums liegt. Das bedeutet, dass die Ursache nicht durch Dinge charakterisiert sein kann, die erst mit dem Universum entstanden sind. Die aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisse zeigen, dass Raum, Zeit und Materie mit dem Beginn des Universums angefangen haben. Die Ursache des Universums muss also nichtträumlich, immateriell und zeitlos sein. Die Zeitlosigkeit der Ursache bringt laut CRAIG noch weitere Eigenschaften mit sich, wie zum Beispiel die Unveränderlichkeit (weil eine Veränderung immer in der Zeit geschehen muss) und die Anfangslosigkeit (CRAIG 2002, 107). Außerdem können wir davon ausgehen, dass die Ursache selbst unverursacht ist, weil wir es sonst mit einer unendlichen Regression von Ursachen zu tun bekommen. Schließlich muss diese Ursache auch überaus mächtig sein, da sie so etwas Gewaltiges wie das gesamte Universum aus dem Nichts erschaffen konnte (CRAIG 2008, 152).

Die wichtigste und erstaunlichste Eigenschaft dieser Ursache ist aber, dass sie wahrscheinlich persönlich ist. Die folgenden drei Argumente sprechen für diese Annahme. Das erste Argument folgt aus der Tatsache, dass wir nur zwei Arten von Erklärungen kennen: Wissenschaftliche und persönliche Erklärungen. Wenn man nach der Erklärung für die Existenz eines Autos fragt, dann kann man entweder die naturwissenschaftlichen Zusammenhänge erklären, die dem Auto zugrunde liegen, oder auf die Kreativität von Carl BENZ hinweisen, der als der Erfinder des ersten Autos gilt. Beide Erklärungen sind absolut legitim, auch wenn sie ganz unterschiedliche Erklärungsaspekte betreffen. Im Zusammenhang mit der Entstehung des Universums ist es unmöglich, eine wissenschaftliche Erklärung zu geben, da es vor dem Universum noch keine Materie und keine Naturgesetze gab, die als wissenschaftliche Erklärung dienen könnten. Daher bleibt als einzige Möglichkeit die persönliche Erklärung (Craig 2008, 152).

An dieser Stelle könnte man zurecht einwenden, dass dieses Argument nicht absolut zwingend ist. Aus der Tatsache, dass wir keine

Die Ursache des Universums ist zeitlos, immateriell, unveränderlich, unverursacht, unglaublich mächtig und wahrscheinlich persönlich.

wissenschaftliche Erklärung für die Entstehung des Universums haben, folgt nicht logisch zwingend, dass es dafür eine persönliche Erklärung geben muss. Es ist theoretisch durchaus denkbar, dass es noch andere Arten von Erklärungen gibt, von denen wir nichts wissen. Das Argument ist also nicht deduktiv. Das heißt, es sagt nicht, dass die Ursache des Universums persönlich sein muss. Vielmehr ist das Argument ein sogenannter Schluss auf die beste Erklärung (Inference to the Best Explanation). Da wir schlicht keine bessere und überzeugendere Erklärung für den Ursprung des Universums kennen als die persönliche Erklärung, ist es plausibel anzunehmen, dass die Ursache des Universums persönlich ist.

Das zweite Argument für die Persönlichkeit der Ursache folgt aus ihrer Existenz jenseits von physikalischer Zeit und Materie. Wir kennen nur zwei Arten von Entitäten, die diese Eigenschaften aufweisen: entweder ein persönlicher Verstand oder ein abstraktes Objekt wie zum Beispiel eine Zahl. Da abstrakte Objekte nie eine kausale Wirkung haben können, fallen sie als mögliche Ursache des Universums weg. Es bleibt also nur ein persönlicher Verstand (CRAIG 2002, 108).

Das dritte Argument basiert auf einer seltsamen Konsequenz dessen, was wir bisher festgehalten haben. Wir haben gesehen, dass die Ursache für das Universum zeitlos und unveränderlich ist. Dies wirft die Frage auf, weshalb der Effekt (also das Universum) nicht ebenso zeitlos ist. CRAIG formuliert das scheinbare Problem wie folgt: „Wie kann es sein, dass all die kausalen Bedingungen, die für die Entstehung des Effekts genügen, unveränderlich existieren, und der Effekt trotzdem nicht parallel zur Ursache ewig existiert?“ (CRAIG 2008, 153).⁹ Die einzige Lösung für dieses Problem scheint darin zu liegen, dass die Ursache des Universums eine Person ist, die sich freiwillig dafür entschieden hat, das Universum in der Zeit zu erschaffen.

Wir haben also gute Gründe, davon auszugehen, dass die Ursache des Universums auch persönlich ist.

Schlussergänzung

Wir haben in diesem Artikel gezeigt, dass es rational ist zu glauben, dass alles, was einen Anfang hat, auch eine Ursache hat. Wir haben außerdem gezeigt, dass das Universum einen Anfang hat. Daraus folgt unweigerlich, dass das

Universum eine Ursache hat. Diese Ursache ist zeitlos, immateriell, unveränderlich, unverursacht, unglaublich mächtig und wahrscheinlich persönlich. Wenn wir diese Eigenschaften der Ursache unseres Universums anschauen, dann können wir unschwer feststellen, dass diese Eigenschaften sehr genau ein Wesen beschreiben, das wir traditionell Gott nennen. Der Kleine Westminster Katechismus definiert den Gott der Bibel beispielsweise wie folgt: „Gott ist ein Geist, unendlich, ewig und unveränderlich in seinem Wesen“ (Westminster Shorter Catechism: Question 4).¹⁰ Die Parallelen zwischen dieser Definition und den Eigenschaften der Ursache des Universums, die sich logisch aus dem kosmologischen Argument ergeben, sind augenfällig. Das kosmologische Argument ist damit ein überzeugender Beweis für die Existenz Gottes.

Doch das kosmologische Argument hat auch seine Grenzen. So gibt uns dieses Argument zum Beispiel keine Hinweise über den moralischen Charakter der transzendenten Ursache des Universums. Außerdem sagt das kosmologische Argument nichts zu den entscheidendsten Fragen des christlichen Glaubens wie zum Beispiel dazu, ob Jesus Christus tatsächlich die Inkarnation Gottes ist und ob wir durch seinen Tod und seine Auferstehung gerettet werden.

Das kosmologische Argument allein ist also nicht in der Lage, die Wahrheit des gesamten christlichen Glaubens zu beweisen. Doch das ist auch nicht seine Aufgabe, da wir neben diesem Argument noch eine Vielzahl an anderen Argumenten haben, die die unterschiedlichen Aspekte des christlichen Glaubens belegen. Das kosmologische Argument stellt aber einen der stärksten Beweise dafür dar, dass unser Universum tatsächlich durch Gott verursacht wurde und dass es daher rational ist, an die Existenz eines Gottes zu glauben.

Anmerkungen

- ¹ Originalzitat: „The first premise is so intuitively obvious, especially when applied to the universe, that probably no one in his right mind really believes it to be false.“
- ² Originalzitat: „There is a priori no good reason why a sheer origination of things, not determined by anything, should be unacceptable.“
- ³ Originalzitat: „I never asserted so absurd a proposition as that anything might arise without a cause.“
- ⁴ Originalzitat: „With the proof now in place, cosmolo-

gists can no longer hide behind the possibility of a past-eternal universe.“

- ⁵ Originalzitat: „Did the universe have a beginning? At this point, it seems that the answer to this question is probably yes. Here we have addressed three scenarios which seemed to offer a way to avoid a beginning, and have found that none of them can actually be eternal in the past.“
- ⁶ Originalzitat: „If, given sufficient time, the universe will suffer heat death, then why, if it has existed forever, is it not now in a state of heat death?“
- ⁷ Aktuelle Unendlichkeit bezeichnet im Gegensatz zur potenziellen Unendlichkeit die tatsächliche Existenz eines unendlich großen Gegenstandsereiches.
- ⁸ Originalzitat: „There is simply no way to avoid these absurdities once we admit the possibility of the existence of an actual infinite.“
- ⁹ Originalzitat: „How can all the causal conditions sufficient for the production of the effect be changelessly existent and yet the effect not also be existent along with the cause?“
- ¹⁰ Originalzitat: „God is a Spirit, infinite, eternal, and unchangeable, in his being.“

Literatur

- BORDE A, GUTH A & VILENKIN A (2003) Inflationary spacetimes are not past-complete. *Physical Review Letters* 90:151301.
- BROMAND J & KREIS G (2011) Gottesbeweise von Anselm bis Gödel. Berlin: Suhrkamp Verlag.
- COLLINS R (2012) The Teleological Argument: An Exploration of the Fine-Tuning of the Universe. In CRAIG WL & MORELAND JP (Hg) *The Blackwell Companion to Natural Theology*. Malden, MA: Blackwell Publishing Ltd., S. 202–281.
- CRAIG WL (2000) *The Kalam Cosmological Argument*. Eugene, OR: Wipf and Stock Publishers.
- CRAIG WL (2002) *The Kalam Cosmological Argument*. In: Craig WL (Hg) *Philosophy of Religion: A Reader and Guide*. New Brunswick, NJ: Rutgers University Press, S. 92–113.
- CRAIG WL (2008) *Reasonable Faith: Christian Truth and Apologetics*. Wheaton, IL: Crossway.
- GRIEG JYT (Hg) (1932) *The Letters of David Hume*, Volume I. Oxford: Oxford University Press.
- MACARTHUR J & MAYHUE R (Hg) (2020) *Biblische Lehre – Eine systematische Zusammenfassung biblischer Wahrheit*. Berlin: EBTC Europäisches Bibel Trainings Centrum e. V.
- MACKIE JL (1982) *The Miracle of Theism: Arguments for and against the Existence of God*. Oxford: Clarendon Press.
- MITHANI A & VILENKIN A (2012) *Did the Universe have a Beginning?* *Physical Review D: Particles and Fields* 46 (6).
- VILENKIN A (2006) *Many Worlds in One: The Search for Other Universes*. New York, NY: Hill and Wang.
- Westminster Shorter Catechism: Question 4, Westminster Shorter Catechism Project, 21. Mai 2019, besucht am 05. Januar 2021, https://www.shortercatechism.com/resources/wsc/wsc_004.html

Anschrift des Verfassers:

Sandro Freiburghaus, Schützenrain 4,

3042 Ortschwaben, Schweiz;

E-Mail: sandro.freiburghaus@gmail.com

Die „Sauerstoffkatastrophe“

3. Biologische Schutzvorrichtungen gegen oxidativen Stress

Sauerstoff ist für den Energiehaushalt vieler Lebewesen unverzichtbar. Zugleich sind viele Reaktionsprodukte des Sauerstoffs für Organismen in hohem Maße schädlich. Sie verursachen sogenannten „oxidativen Stress“. Daher sind vielfältige hochkomplexe molekulare Schutzvorrichtungen gegen oxidativen Stress lebensnotwendig. Die Entstehung solcher Vorrichtungen in Lebewesen im Zuge der postulierten großen Sauerstoffkatastrophe durch evolutive Vorgänge erscheint in hohem Maße unplausibel. Aus schöpfungstheoretischer Perspektive bieten sich hier weit bessere Erklärungsmöglichkeiten.

Boris Schmidtgall

Einleitung

Wann immer ein Antrieb konstruiert wird, stellt sich unmittelbar die Frage nach einer möglichst effizienten Energieverwertung. Nicht weniger wichtig sind jedoch sicherheitstechnische Überlegungen. Treibstoffe von Automobilen sind hochentzündlich, diejenigen von Raketen explosiv. Darüber hinaus sollte die Konstruktion möglichst wenig störanfällig funktionieren. Dies ist wegen einer kaum überschaubaren Zahl an möglichen Ursachen für Funktionsausfälle eine besondere Herausforderung. Dementsprechend heißt es auf der Internetseite eines Expertenteams im Bereich Maschinenbau: „Für Maschinenbauer gehört die Sicherheitstechnik wohl zu den komplexesten und unbeliebtesten Themen.“¹ Es müssen viele Eventualitäten im Voraus bedacht und schwierige Entscheidungen getroffen werden, da eingerichtete Sicherheitsfunktionen auch unter unterschiedlichen Bedingungen ihren Zweck erfüllen müssen. Zu-

¹ <https://www.stoeber.de/loesungen/sicherheitstechnik/>

Kompakt

Im Rahmen der Evolutionslehre wird angenommen, dass der auf Sauerstoff beruhende (aerobe) Energiestoffwechsel in den Zellen im Zuge der „großen Sauerstoffkatastrophe“ durch Evolution aus strikt anaeroben* Organismen entstand. Während der aerobe* Stoffwechsel hinsichtlich der Effektivität gegenüber dem anaeroben vorteilhaft ist, stellt der Umgang mit giftigen Reaktionsprodukten des Sauerstoffs, den „reactive oxygen species“ (ROS), eine besondere Herausforderung dar. Schäden durch ROS treten sehr schnell und bei sehr vielen Arten von Biomolekülen ein. Proteine werden durch Reaktionen mit ROS zur Entfaltung (Denaturierung) veranlasst und verlieren ihre Funktion, bei der DNA kommt es zu Mutationen oder der Blockade von Ableseprozessen, mehrfach ungesättigte Fettsäurebausteine aus Membranen von Eukaryoten* sind ebenfalls für Schäden durch ROS anfällig. Daher verfügen alle aeroben Organismen über eine große Vielfalt an Einrichtungen zum Schutz und zur Reparatur von Biomolekülen. Untersuchungen solcher Vorrichtungen haben wiederholt gezeigt, dass es sich dabei in der Regel um anspruchsvolle und nichtreduzierbar komplexe Systeme handelt, die offenkundig teleologischer (zielgerichteter) Natur sind. Zudem können Organismen ohne solche Systeme nicht in einer mit Sauerstoff angereicherten Atmosphäre überleben.

Evolutionäre Hypothesen beschränken sich auf das Herausgreifen von Einzelaspekten wie etwa der vergleichenden Analyse von ROS-abbauenden Enzymen in allen Lebewesen oder rein hypothetischen Annahmen wieder Vorbereitung von Organismen auf ROS durch „reactive sulfur species“ (RSS). Insgesamt wird jedoch deutlich, dass schrittweise verlaufende Darwin'sche Vorgänge als Erklärung für eine sehr schnelle und äußerst anspruchsvolle Umrüstung von anaeroben Organismen zu aeroben nicht einmal ansatzweise taugen. Vielmehr weisen die raffiniert eingerichteten und sich gegenseitig ergänzenden Schutzfunktionen auf intelligente Schöpfung hin.

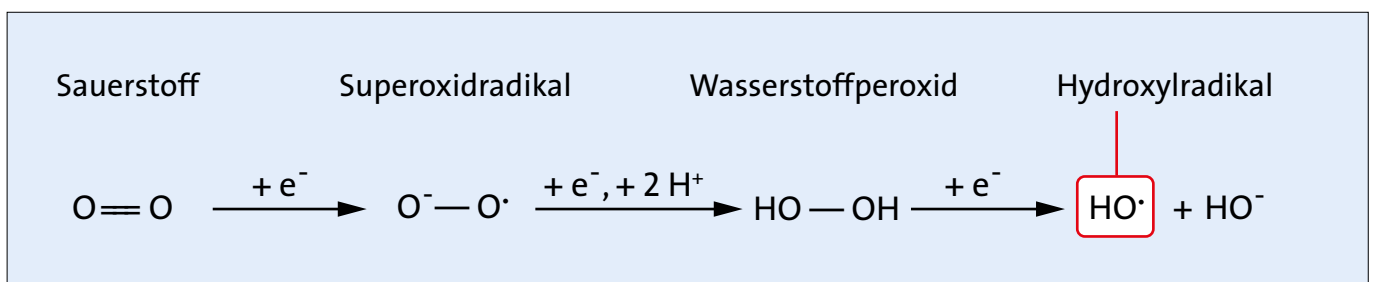
Mit einem Stern* ver-
sehene Begriffe werden
im Glossar erklärt.

dem muss gewährleistet sein, dass die Sicherheitsfunktionen die eigentliche Funktion der Maschine nicht nennenswert beeinträchtigen.

Auch in Organismen gibt es eine Vielzahl von Einrichtungen, die Schäden verhindern sollen. Bekannte Beispiele sind das Immunsystem und zelluläre Mechanismen, die Mutationen vorbeugen. Eine weitere Klasse sehr wichtiger Schutzfunktionen bei Lebewesen ist ausgerechnet auf denjenigen chemischen Stoff ausgerichtet, den sehr viele Organismen für ihren Energiehaushalt brauchen: molekularen Sauerstoff (O₂). Der Grund dafür ist die Entstehung schädlicher Reaktionsprodukte als Folge verschiedener chemischer Reaktionen von Sauerstoff in Organismen. Für die Evolutionslehre ist dieser Sachverhalt problematisch, da erklärt werden muss, wie Organismen durch einen schrittweisen Vorgang gleichzeitig sowohl einen sauerstoffabhängigen Energiehaushalt als auch eine Reihe von Sicherheitsfunktionen gegen Schäden durch Sauerstoffderivate* erlangt haben können.

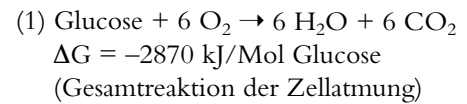
Wie in den beiden ersten Folgen zum Thema „Sauerstoffkatastrophe“ ausgeführt, gehen viele Forscher gegenwärtig davon aus, dass die ersten Organismen vor ca. 4 Milliarden Jahren in einer nahezu sauerstofffreien Erdatmosphäre entstanden sein sollen (KNOLL & NOWAK 2017). Demnach müssten die ersten Organismen Anaerobier* gewesen sein, was unter Kennern des Themas derzeit Konsens ist (NEUBECK & FREUND 2020). Vor etwa 3 Milliarden Jahren seien dann Sauerstoff-generierende Mikroorganismen evolviert, die für die Anreicherung der Atmosphäre mit Sauerstoff vor ca. 2,4 Milliarden Jahren (Great Oxygenation Event, GOE) verantwortlich sein sollen. Hierbei gehen die Auffassungen bezüglich der Ursachen und des genauen Verlaufs dieses Vorgangs jedoch recht weit auseinander (SCHMIDTGALL 2021). Darüber hinaus wird allgemein angenommen, dass der GOE die Entstehung höherer Organismen überhaupt erst ermöglicht hat – und das trotz der oben erwähnten Schädlichkeit von Sauerstoff. Im Folgenden soll die Frage erörtert werden, ob die Entstehung von Schutzvorrichtungen gegen Schäden durch Sauerstoff durch evolutive Vorgänge im Zuge des GOE plausibel ist.

Abb. 1 Die wichtigsten ROS („reactive oxygen species“) und ihre Entstehung aus Sauerstoff durch Aufnahme von Elektronen (e⁻).



Schäden durch Sauerstoff in der Zelle

Für den Energiehaushalt vieler Organismen ist molekularer Sauerstoff unverzichtbar. Seine Umwandlung in Wasser in dem als „Zellatmung“ bezeichneten biochemischen Prozess macht den wesentlichen Teil der thermodynamischen* Triebkraft aus, die zur Bildung von ATP, der Energiewährung der Zelle, genutzt wird.



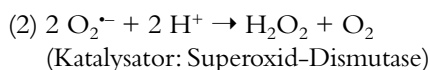
Die Nutzung dieser „kontrollierten Verbrennung“ von Kohlenhydraten ermöglicht aeroben* Organismen eine effektivere Art der Energiegewinnung als den Anaerobiern. Der „Treibstoff“ der Aerobier weist eine deutlich höhere Energiedichte auf als derjenige von anaerob lebenden Organismen. Man könnte dies mit der Überlegenheit des Dieseltreibstoffs gegenüber einem Akku elektrisch getriebener Fahrzeuge vergleichen – der erste hat eine ca. 50-fach höhere Energiedichte.

Die Kehrseite der Verwendung von Sauerstoff ist jedoch die Schädlichkeit seiner Reaktionsprodukte. Während das Sauerstoffmolekül selbst praktisch unschädlich ist, wird es bei vielen chemischen und physikalischen Vorgängen in der Zelle in reaktivere Moleküle umgewandelt, die gravierende Schäden verursachen können. Für solche Moleküle hat sich in der Literatur die Sammelbezeichnung „reactive oxygen species“ (ROS) etabliert (KRUMOVA & COSA 2016). In vielen chemischen Reaktionen des Sauerstoffs in der Zelle entstehen zunächst Superoxidradikale, die anschließend häufig in Wasserstoffperoxid umgesetzt werden (Abb. 1). In weiteren Reaktionen können das besonders reaktive Hydroxylradikal bzw. Radikale verschiedener organischer Verbindungen gebildet werden.

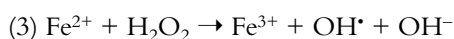
Die jeweiligen ROS gehen je nach ihren Eigenschaften in unterschiedlichem Ausmaß und an verschiedenen molekularen Komponenten der Zelle chemische Reaktionen ein (D'AUTRÉ-AUX & TOLEDANO 2007). Superoxidradikale wei-

sen eine moderate chemische Reaktivität auf und reagieren bevorzugt mit Eisen-Schwefel-Clustern, die in allen Organismen wichtige Funktionen im Energiehaushalt und der Synthese molekularer Bausteine ausführen. Solche Reaktionen können daher zentrale Stoffwechselwege wie die Glykolyse, den Zitratzyklus oder die Synthese bestimmter Aminosäuren beeinträchtigen bzw. zum Erliegen bringen. Wasserstoffperoxid reagiert bevorzugt mit dem Schwefelatom des Cysteins, einer Aminosäure, die in einer Vielzahl von Proteinen aller Organismen vorhanden ist. Durch solche Reaktionen kann es zur Veränderung der dreidimensionalen Struktur der Proteine kommen, sodass sie funktionsunfähig werden. Zudem führen solche Verformungen (Entfaltungen) von Proteinen dazu, dass sie aneinander haften (Aggregation), wodurch sich schwer lösliche und für die Zelle sehr schädliche Plaques bilden.

Aufgrund ihrer Reaktivität unterliegen ROS einer genauen Kontrolle innerhalb der Zelle. Die Konzentration des etwas stabileren Wasserstoffperoxids liegt etwa im nanomolaren* Bereich und ist ungefähr um den Faktor Tausend höher als diejenige des labileren Superoxidradikals (SIES & JONES 2020). Zu Schäden durch ROS kommt es vor allem dann, wenn die hochreaktiven Hydroxylradikale entstehen. Von besonderer Wichtigkeit ist hierbei ein chemischer Prozess, der als Fenton-Reaktion bezeichnet wird (KOPPENOL & HIDER 2019).



Fenton-Reaktion:



Superoxidradikale werden schnell durch das Enzym Superoxid-Dismutase (SOD) in Wasserstoffperoxid umgewandelt, das bei Vorhandensein von Fe^{2+} gespalten wird, sodass sich Hydroxylradikale bilden. Diese Radikale reagieren wahllos mit allen molekularen Komponenten der Zelle. Ob Nukleinsäuren (DNA und RNA), Proteine oder Bestandteile der Zellwand – durch Reaktion mit Hydroxylradikalen entstehen gravierende Schäden in allen Typen biochemischer Funktionseinheiten.

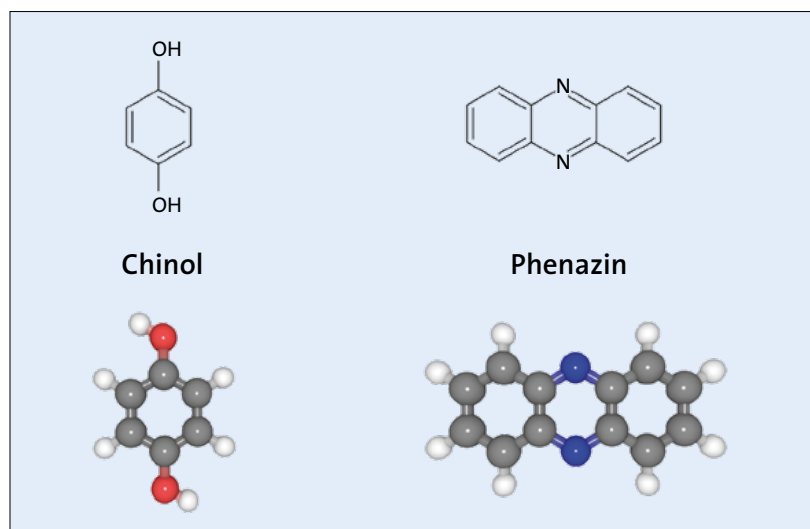
Durch Reaktionen von Hydroxylradikalen mit DNA kommt es zu Mutationen oder zur vollständigen Blockade des Ablesevorgangs der RNA-Polymerase. Vor allem letztere Schäden können für Organismen tödlich sein, wenn sie nicht rechtzeitig repariert werden. In diesem Zusammenhang ist auch zu berücksichtigen, dass die Bildung von ROS in hohem Maße gefördert wird, wenn Moleküle vorhanden sind, die Elektronen auf den Sauerstoff übertragen

1 | Entstehung und Nutzung von ROS in der Zelle

ROS können durch chemische Reaktionen des Sauerstoffs mit Biomolekülen der Zelle (endogene* Quellen) oder mit von außen stammenden chemischen Verbindungen (exogene* Quellen) gebildet werden. Bei den Reaktionspartnern, die zur Entstehung von ROS führen, handelt es sich im Allgemeinen um Moleküle, die leicht ein einzelnes Elektron auf Sauerstoffmoleküle übertragen, sodass Superoxidionen entstehen. Zu solchen Quellen von ROS gehören vor allem ungebundene Metallionen (Fe^{2+} , Cu^{+}) oder organische Elektronenüberträger wie Chinole oder Phenazine (Abb. 2). Aber auch Eisenspeicherproteine und bestimmte eisenhaltige Enzyme können zur Entstehung von ROS beitragen. Bei höheren Lebewesen kommen solche Vorgänge vor allem in Phagozyten (weißen Blutkörperchen) vor. Phagozyten enthalten Transmembran-Enzyme mit der Bezeichnung NADPH-Oxidasen (NOXs), die zur Abtötung von Krankheitserregern Superoxidionen erzeugen und darüber hinaus unverzichtbare Funktionen in der Zelldifferenzierung und dem programmierten Zelltod ausüben (MAGNANI et al. 2017).

Eine andere bedeutende Quelle von ROS sind Mitochondrien – die „Kraftwerke“ der Zelle. Dort sind vor allem die NADH-Dehydrogenasen (Komplex I) und die Chinole des Q-Pools für einen hohen Eintrag von Superoxidionen ursächlich (KRUMOVA & COSA 2016). Insgesamt gibt es in menschlichen Zellen über 40 Enzyme, die Superoxidradikale bzw. Wasserstoffperoxid generieren (Go et al. 2015). Darüber hinaus gibt es noch eine Reihe an Enzymen, bei deren normaler Funktion als Nebenprodukt ROS anfallen. Hier sind insbesondere eisenhaltige Cytochrome und Fettsäure-oxidierende Lipoxygenasen zu nennen.

Neben chemischen Reaktionen kann energiereiche Strahlung durch Spaltung chemischer Bindungen (z. B. bei Wasserstoffperoxid) Sauerstoffradikale erzeugen oder das Sauerstoffmolekül in einen angeregten Zustand versetzen (Singulett-Sauerstoff). Solche Vorgänge sind vor allem in Organismen und Geweben relevant, die in erhöhtem Ausmaß dem Licht ausgesetzt sind (SIES & JONES 2020). Es kann also durchaus davon gesprochen werden, dass die Bildung von ROS ein ständiger und weit verbreiteter Vorgang in Zellen ist.



(s. Kasten „Entstehung von ROS“). Daher muss in Zellen auch die Konzentration freier Metallionen wie $Fe^{2+}/^{3+}$ und organischer Elektronenüberträger streng kontrolliert werden (GALARIS et al. 2019; IMLAY 2013). Erhöhte Konzentrationen von ROS und damit einhergehender oxidativer Stress führen relativ schnell zum programmierten Zelltod.

Abb. 2 Strukturformeln und Kalottenmodelle der organischen Elektronenüberträger Chinol und Phenazin (Atomsymbole: grau: Kohlenstoff, rot: Sauerstoff, blau: Stickstoff, weiß: Wasserstoff).

Durch ROS treten in Zellen sehr schnell Schäden ein, die zentrale Stoffwechselwege zum Erliegen bringen können.

Die Geschwindigkeit, mit der die beschriebenen Schäden durch ROS eintreten, ist unter heutigen Bedingungen sehr hoch. Beispielsweise liegt die Halbwertszeit für beschädigte Eisen-Schwefel-Cluster im Darmbakterium *E. coli* selbst bei Vorhandensein von ausreichend SOD und einer niedrigen Konzentration von 0,1 nM Superoxidionen im zellulären Milieu bei nur 20 Minuten (IMLAY 2013). Das daraus resultierende Problem beschreibt IMLAY wie folgt: „Dieser Zeitrahmen ist im Vergleich zu der Zellteilungsrate sehr kurz, weswegen diese Situation nur tolerabel ist, weil Zellen beständig die beschädigten Cluster durch chemische Reduktion und Remetallierung reparieren.“

Es wäre jedoch zu kurz gegriffen, nur im Überschuss an ROS eine Gefahr für die reibungslose Funktion der Zellbiochemie zu sehen. Inzwischen ist auch bekannt, dass eine zu niedrige Konzentration an ROS ebenfalls schädlich ist, da diese Moleküle in allen aeroben Organismen als Botenstoffe fungieren (GO et al. 2015; SIES & JONES 2020). Dementsprechend ist für diese Moleküle auch das Wahren einer definierten Konzentration (Homöostase) notwendig.

Zelluläre Vorrichtungen zum Schutz gegen oxidativen Stress

Kontrolle der Konzentration an ROS in der Zelle

Da ROS im zellulären Geschehen bei vielen Vorgängen und in vielen Kompartimenten anfallen, bedarf es einer großen Vielfalt von Mechanismen, die für einen Abbau der ROS sorgen. Die Notwendigkeit solcher Schutzvorrichtungen ist bei allen Lebewesen gegeben, die mit Sauerstoff in Kontakt kommen. Bei höheren

Lebewesen gelangt der Sauerstoff über Transportmechanismen in die Zellen, während er bei Mikroorganismen einfach durch die Zellwand diffundiert.

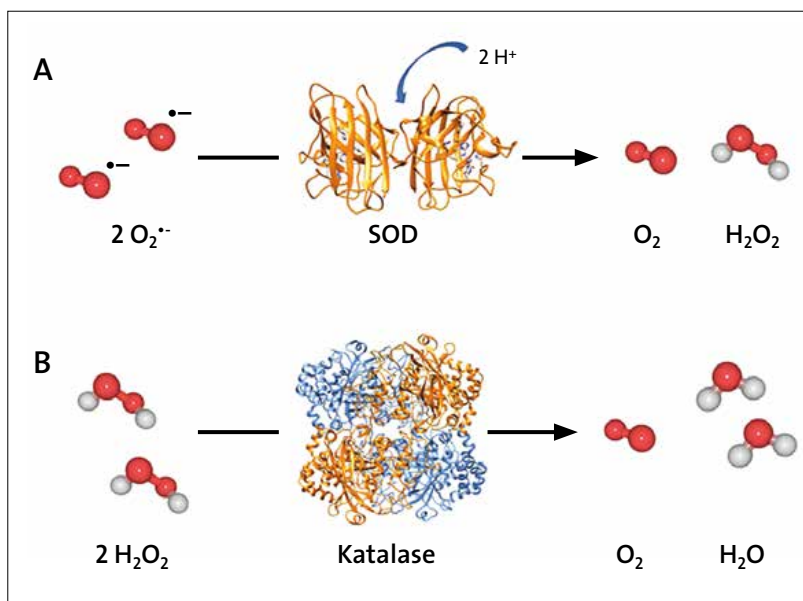
Bakterielle Zellwände sind im Unterschied zu denjenigen von höheren Organismen deutlich weniger für Schäden durch ROS anfällig, da sie überwiegend aus gesättigten bzw. einfach ungesättigten Fettsäure-Bausteinen bestehen. Dagegen müssen alle anderen molekularen Komponenten von Zellen stets vor den schädlichen Wirkungen der ROS geschützt werden, und angesichts sehr schnell eintretender Schäden müssen rasche Reparaturprozesse erfolgen. So besitzen selbst kleine Bakterien ausgefeilte mehrstufige Systeme zur Abwehr von oxidativem Stress.

Enzyme: Viele Bakterien (Prokaryoten und Archaeen) und alle höheren Organismen verfügen über verschiedene Enzyme, die Superoxidradikale und Wasserstoffperoxid abbauen (Abb. 3). Der Abbau von Superoxidradikalen erfolgt hauptsächlich durch Enzyme, die als Superoxid-Dismutasen (SOD) bezeichnet werden. Das Funktionsprinzip ist dabei die Beschleunigung des Zerfalls von Superoxidradikalen zu Sauerstoff (O_2) und Wasserstoffperoxid (H_2O_2) (s. Reaktionsgleichung 3). Zudem weisen viele Organismen Katalasen auf, die Wasserstoffperoxid zu Sauerstoff und Wasser zersetzen. Diese Enzyme sind ein sehr effektiver Schutz gegen ROS, da sie diese giftigen (weil sehr reaktiven) Moleküle mit der physikalisch nahezu maximal möglichen Reaktionsgeschwindigkeit von 10^6 - 10^7 Reaktionen pro Sekunde abbauen (HERBERT & PINSANT 1948; MILO & PHILLIPS 2016). Diese Reaktionsgeschwindigkeiten gehören zu den schnellsten überhaupt. Sie sind um das 10^5 -Fache höher als durchschnittliche Enzymreaktionen und stellen eher Ausnahmen dar (MILO & PHILLIPS 2016).

Molekulare Regler (Regulons) der Synthese von SOD und Katalasen: Entscheidend für die Wirkung der oben angeführten Enzyme ist ihre Konzentration im zellulären Milieu, die wiederum davon abhängig ist, in welcher Rate sie in der Zelle synthetisiert werden. Hierfür gibt es in bakteriellen Zellen Sensoren, die dafür sorgen, dass die Synthese dieser Enzyme hoch- bzw. herunterfahren wird, je nachdem wie hoch die Belastung durch oxidativen Stress ist (IMLAY 2013).

Bei einigen Bakterien fungieren als OxyR bezeichnete Proteine als Regler der Konzentration von Katalasen und SOD. OxyR werden durch Reaktion mit Wasserstoffperoxid oder Superoxidradikalen in eine aktive Form überführt, die durch Aktivieren entsprechender Gene die Synthese von SOD und Katalasen ankur-

Abb. 3 Enzymatischer Abbau von Superoxidradikalen durch SOD (A) und von Wasserstoffperoxid durch Katalasen (B).



belt (PEDRE et al. 2018). Bei *E. coli*-Bakterien erfolgt diese Reaktion innerhalb von 1-2 Minuten, nachdem die Zellen mit Wasserstoffperoxid in Kontakt kommen, und ist damit extrem schnell (STORZ 2016). Ebbs der oxidative Stress wieder ab, wird OxyR durch Reaktion mit Glutaredoxin, einem kleinen Protein, aus der aktiven wieder in eine inaktive Form überführt. Interessanterweise gibt es bei vielen grampositiven Bakterien ein Detektionssystem für ROS, das in umgekehrter Weise funktioniert: Ein Protein mit der Bezeichnung PerR hemmt in seiner aktiven Form die Synthese von SOD und Katalasen. Durch Reaktion mit H_2O_2 wird PerR inaktiviert und löst sich von der DNA, sodass die Synthese von ROS-abbauenden Enzymen in Fahrt kommt.

Wie schon zuvor erwähnt, gibt es organische Moleküle, die die Entstehung von Superoxiden durch Elektronentransfer auf Sauerstoff fördern (z. B. Phenazine, Chinole). Solche Moleküle können leicht Zellmembranen durchdringen, da sie selbst fettliebend sind. Im Inneren der Zelle entziehen diese Moleküle bestimmten Komponenten der Atmungskette Elektronen (vor allem von Flavinen) und übertragen sie dann auf Sauerstoff, sodass Superoxidradikale gebildet werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Gegenwart von Phenazinen die Superoxid-Konzentration in Bakterienzellen auf das ca. 100-Fache erhöht (IMLAY 2013). Daher verfügen Bakterien über ein weiteres regulatorisches Protein (SoxR), das weder auf H_2O_2 noch auf Superoxidradikale anspricht, sondern auf organische Moleküle, die als Elektronenüberträger fungieren. Auch SoxR fördert in seiner durch ROS aktivierten Form die Synthese von SOD.

Bakterien weisen also ein Schutzsystem auf, das die Zelle auf zweifache Weise gegen oxidativen Stress absichert. Es detektiert sowohl die Moleküle, die die Schäden verursachen (Super-

oxidradikale, Wasserstoffperoxid), als auch organische Verbindungen, die ihre Entstehung fördern. In beiden Fällen folgt auf die Detektion eine schnelle Reaktion, indem Enzyme hergestellt werden, die die ROS abbauen.

In Bakterien liegen effiziente Detektionssysteme sowohl für ROS als auch für organische Elektronenüberträgermoleküle vor – eine doppelte Absicherung gegen oxidativen Stress.

Vitamine und andere kleine Moleküle: Abgesehen von den komplexen Schutzmechanismen durch aufwändige Nanomaschinen gibt es in Organismen eine Reihe von kleinen Molekülen, die in relativ hoher Konzentration im Zellmilieu vorliegen und zum Abfangen der ROS dienen. Besondere Wichtigkeit haben hierbei schwefelhaltige kleine Peptide wie Glutathion oder einige Vitamine. Bei höheren Lebewesen spielen Vitamine im Hinblick auf oxidativen Stress eine wichtigere Rolle als bei Bakterien, da vor allem die Zellmembran höherer Organismen wegen ihrer mehrfach ungesättigten Fettsäure-Bausteine recht empfindlich gegenüber Schäden durch ROS ist. Verhindert werden solche Schäden vor allem durch die gemeinsame Wirkung von Vitamin E (α -Tocopherol) und Vitamin C (Ascorbinsäure). Vitamin E ist ein ausgesprochen fettliebendes Molekül, das deshalb in die Zellwand aufgenommen wird. Es neutralisiert ROS unter Bildung sehr langlebiger Radikale, die für Zellbestandteile sehr viel weniger schädlich sind. An der Grenzfläche von Zellwand und Zellinnenraum werden Vitamin-E-Moleküle durch Reaktion mit Vitamin C wieder regeneriert (WALSH & TANG 2019).

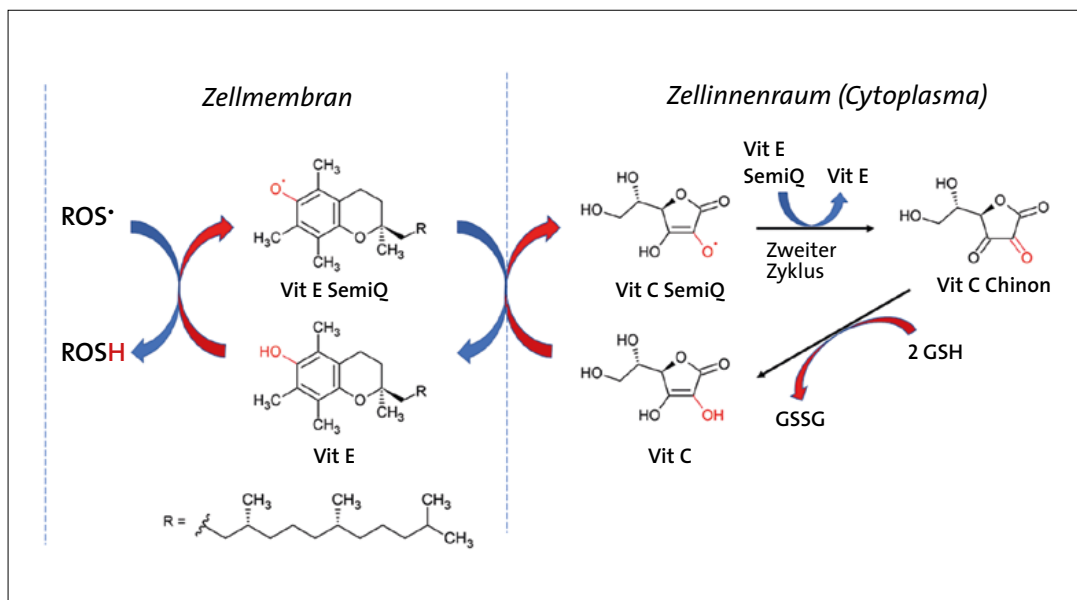


Abb. 4 Abbau von ROS durch chemische Reaktion mit Vitamin E/Vitamin C. Innerhalb der Zellmembran erfolgt der Abbau von ROS durch Reaktion mit Vitamin E (Vit E), wobei es zur Bildung des Semichinons des Vitamin E (Vit E SemiQ) kommt. Vitamin E wird durch Reaktion mit Vitamin C regeneriert, wobei es nach zwei Zyklen zur Bildung des Chinons des Vitamin C kommt. Dieses Molekül wird durch Reaktion mit zwei Molekülen Glutathion (GSH) wieder ins Vitamin C überführt.

2 | Funktionsweise der molekularen Regler OxyR und SoxR

OxyR-Proteine weisen an einer bestimmten Stelle exponierte Thiol(-SH)-Gruppen* auf, die infolge einer Oxidation durch H_2O_2 eine Disulfidbrücke (-S-S-) bilden (PEDRE et al. 2018). Dieser Vorgang zieht eine Veränderung der dreidimensionalen Struktur nach sich, sodass OxyR dann mit einer erhöhten Affinität an bestimmte Genregionen bindet und so die Synthese von SOD und Katalasen fördert. Als Proteine, die durch Binden an die DNA die Transkription bestimmter Gene fördern, zählen die OxyR zu den Transkriptionsfaktoren. Auch das Protein PerR funktioniert nach dem gleichen Prinzip, nur in umgekehrter Weise: Bei geknüpfter Disulfidbrücke weist es eine sehr geringe Affinität zu einer bestimmten DNA-Region auf, während die Spaltung der Brücke eine

sehr hohe Affinität bewirkt. Da PerR die Transkription einer DNA-Region verhindert, solange es daran gebunden ist, spricht man von einem Repressor. SoxR ist ein Protein, das aus zwei Untereinheiten zusammengesetzt ist. Es beinhaltet in jeder Untereinheit jeweils ein oxidationsempfindliches Eisen-Schwefel-Zentrum, das überraschenderweise ausgesprochen selektiv mit organischen Elektronenüberträgern (Chinole, Phenazine) reagiert und nicht mit ROS, wie dies im Fall vieler anderer Fe-S-Zentren geschieht. SoxR bindet stets an die DNA, wobei nur die oxidierte Form die Synthese von SOD anregt. Wenn die giftigen organischen Verbindungen beseitigt sind, wird SoxR reduziert oder abgebaut, sodass die Synthese von SOD nicht weiter aktiviert wird.

Schutz vor den Folgen der Wirkung von ROS und Reparatur beschädigter Biomoleküle

Schutz vor der Aggregation* von Proteinen: Wie oben erwähnt führt oxidativer Stress zu einer verstärkten Fehlfaltung von Proteinen und zur Bildung schädlicher Plaques. Ein wichtiger Mechanismus der Vorbeugung der Proteinaggregation in Lebewesen ist erst in den letzten ca. 30 Jahren näher erforscht worden. KORNBERG et al. fanden bereits in den 1990er Jahren heraus, dass Bakterien deutlich empfindlicher auf verschiedene Arten von Stress reagieren, wenn Polyphosphat (polyP) nicht in genügender Konzentration vorliegt (AKIYAMA et al. 1992). Allerdings fand man erst später heraus, warum es sich so verhält. Bei *E. coli*-Bakterien, die erhöhten Konzentrationen von H_2O_2 ausgesetzt wurden, ist eine verstärkte Bildung langer Kettenmoleküle aus Phosphateinheiten (polyP) nachgewiesen worden (GRAY et al. 2014). Wie gezeigt werden konnte, verhindern polyP-Moleküle selbst bei hohen Konzentrationen von ROS nahezu komplett die Aggregation von Proteinen. Auch bei Fehlfaltungen von Proteinen in Folge von erhöhten Temperaturen erwiesen sich polyP-Makromoleküle als sehr wirksam, wobei längere polyP-Ketten (>100 Phosphat-Einheiten) effektiver waren als kurze (< 50 Phosphat-Einheiten) (GRAY & JAKOB 2015). Die Wirkungsweise von polyP-Ketten ist relativ simpel: Sie umwickeln fehlgefaltete Proteine und sorgen aufgrund ihrer vielfachen negativen Ladung für gegenseitige Abstoßung. PolyP-Kettenmoleküle sind chemisch relativ robust und unempfindlich gegenüber Reaktionen

mit ROS. Ihre Synthese in *E. coli* erfolgt durch das Enzym polyP-Kinase (PPK) aus Adenosin-triphosphat (ATP) und der Abbau durch Exopolyphosphatasen (PPX). Im Fall von oxidativem Stress werden Exopolyphosphatasen von ROS inhibiert, d. h. unfähig gemacht, ihre Funktion auszuüben. Folglich kommt es zu einer Anhäufung von polyP, sodass die gefährliche Proteinaggregation verhindert wird. Nimmt die Belastung durch ROS wieder ab, sorgen die erneut aktivierten PPX für einen schnellen Abbau von polyP, da es in erhöhter Konzentration ebenfalls giftig ist (DESFOUGÈRES et al. 2020).

PolyP ist in allen bisher untersuchten Organismen nachgewiesen worden und scheint vor allem in Säugetieren an einer ganzen Reihe von wichtigen Prozessen wie Proteinhomöostase*, Energiehaushalt und programmiertem Zelltod beteiligt zu sein (MCINTYRE & SOLESIO 2021). Im Unterschied zu Bakterien sind allerdings viele Details bezüglich der Synthese von polyP und seiner Funktionen in höheren Organismen noch unbekannt (DESFOUGÈRES et al. 2020). Es kann jedoch festgehalten werden, dass alle Lebewesen, die mit Sauerstoff in Kontakt kommen, ohne polyP und dessen wichtiger Schutzfunktion nicht leben könnten.

Reparatur entfalteter Proteine: Der Schutz durch polyP beschränkt sich auf das Verhindern der Aggregation der Proteine. Schäden an den Proteinen werden dadurch nicht behoben. Wenn also die Stresssituation vorbei ist und das polyP wieder abgebaut wird, ist eine Reparatur der Proteine erforderlich, da sie anderenfalls aggregieren können. Hierfür besitzen wiederum alle Typen von Zellen Proteine, die der Fehlfaltung vorbeugen bzw. fehlerhaft gefaltete Proteine wieder in die richtige Form bringen. Solche Proteine werden allgemein als Chaperone bezeichnet. Während im Fall erhöhter Temperaturen in vielen Organismen die Synthese ATP-abhängiger Hitzeschockproteine aktiviert wird (z. B. Hsp 60 in *E. coli*), sieht die Strategie bei oxidativem Stress anders aus. Zunächst wird die Synthese von Proteinen hochreguliert, die entfaltete Proteine binden und so die Aggregation verhindern (Holdasen). Holdasen lösen sich erst dann von ihrem Bindungspartner, wenn die ROS abgebaut sind und zusätzlich ein ATP-abhängiges Protein bereitsteht, das entfaltete Protein zu reparieren. Solche Systeme liegen sowohl bei Bakterien vor (*E. coli*: Hsp33) als auch bei Eukaryoten (Hefe: Get3). Es handelt sich dabei um exakt getaktetes Protein-Teamwork, wie es auch von REICHMANN et al. beschrieben wird (REICHMANN et al. 2018): „Die Inaktivierung von oxidiertem Hsp33 und die Freisetzung von betroffenen Proteinen werden ebenfalls sorgfältig orchestriert und erfordern nicht

nur reduzierende Bedingungen, sondern auch die Anwesenheit von faltenden Chaperonen und ATP, die die Rückfaltung der gebundenen Proteine unterstützen.“

DNA-Reparatur: Schäden an Proteinen zu verhindern und zu beheben ist jedoch bei Weitem nicht ausreichend für die Stabilität einer Zelle unter aeroben Bedingungen, da Auswirkungen von Schäden an der DNA erheblich schwerere Konsequenzen nach sich ziehen. Die Reparatur von DNA-Molekülen ist jedoch nicht weniger aufwändig als diejenige von Proteinen. Das Reparaturprinzip besteht im Ausschneiden beschädigter Teile und anschließendem Ersetzen durch intakte Entsprechungen, wobei es verschiedene Typen von Enzymen für die Reparatur von verschiedenen Schäden an der DNA gibt. Für das Erkennen und Ausschneiden beschädigter Nukleobasen* sind DNA-Glykosylasen zuständig, wobei es je nach Art des Schadens unterschiedliche Enzyme gibt (STEVEN et al. 2016). Ist die Nukleobase Cystein

Schäden durch ROS erfordern Reparaturen durch sehr aufwändige, aus vielen Komponenten bestehende, fein abgestimmte Mechanismen, die in hohem Maße zielgerichtet sind.

nicht intakt, wird sie von der Uracil-DNA-Glykosylase ausgeschnitten, während oxidierte Guanin-Basen (8-Oxoguanin) durch 8-Oxoguanin-Glykosylasen entfernt werden. Bei Menschen treten pro Tag pro Zelle ca. 10.000 solcher Schäden auf (STEVEN et al. 2016). Die Ersetzung von Nukleobasen erfolgt durch das Zusammenspiel zweier Enzyme: Endonukleasen fügen die richtige Base wieder ein und Ligasen verknüpfen erneut den Strang. So sind also allein für die Reparatur von Nukleobasen drei verschiedene Enzymklassen zuständig. Noch komplizierter verhält es sich, wenn das DNA-Rückgrat beschädigt wird (die Zuckereinheiten). Hier sind in Bakterien drei verschiedene Enzymklassen zuständig, während in Eukaryoten hierfür ganze 18 Enzyme zum Einsatz kommen (STEVEN et al. 2016).

Ist eine Entstehung des Schutzes gegen oxidativen Stress durch Evolution plausibel?

Herausforderungen für die Evolutionslehre

Vor dem Hintergrund der dargestellten Schutz- und Reparaturmechanismen gilt es, die Plausibilität eines Übergangs von strikt anaeroben

Organismen hin zu aeroben durch evolutive Vorgänge zu beurteilen. Es ist insgesamt deutlich geworden, dass der Anspruch an einen solchen evolutiven Übergang gewaltig ist. Angesichts einer *sehr schnellen* Zerstörungsrate *sehr vieler* zellulärer Bestandteile schon durch sehr geringe Mengen von ROS ist die *rasche* und *zeitgleiche* Entstehung einer nahezu unüberschaubaren Fülle von *hochkomplexen* Mechanismen zur Vorbeugung und Reparatur von mannigfaltigen Schäden unverzichtbar. Es ist auffällig, dass praktisch alle aeroben Lebewesen über diese Vielfalt von Schutzvorrichtungen verfügen, von denen keine verzichtbar zu sein scheint. Selbst ein allmählich oder in wiederholten schwachen Schüben eintretender „Great Oxygen Event“ (GOE) erfordert also eine explosionsartige Bildung hochkomplexer, fein abgestimmter und hochgradig effizienter Schutzmechanismen gegen die Wirkung der giftigen Sauerstoffderivate.

Erschwerend kommt hinzu, dass gegenwärtig sogar strikt anaerobe Organismen über einige Schutzmechanismen gegen oxidativen Stress verfügen und davon ausgegangen wird, dass die Organismen vor dem GOE noch wesentlich empfindlicher gegenüber Schäden durch ROS waren (SHENG et al. 2014). Es erscheint in keiner Weise plausibel, dass solche Lebewesen auch nur einen geringen Hauch Sauerstoff hätten überleben können, geschweige denn eine „große Sauerstoffkatastrophe“. Die wiederholt in der wissenschaftlichen Literatur vorgebrachte Annahme von Rückzugsmöglichkeiten für Organismen in sehr sauerstoffarme Nischen erklärt in keiner Weise, durch welche konkreten Schritte Organismen zu dieser Fülle von Schutzmechanismen gegen ROS gelangt sind.

Alle angeführten Systeme zur Abwehr von oxidativem Stress sind nichtreduzierbar komplex und notwendigerweise hochgradig effizient. Sie bestehen stets aus mehreren aufeinander abgestimmten Komponenten und können nur als Gesamtheit funktionsfähig sein. Als Beispiel sei hier noch einmal das noch relativ simple polyP-Schutzsystem angeführt. Für die Funktion dieses „urtümlichen“ Systems (GRAY et al. 2014) bedarf es des Vorhandenseins eines konstant aufrecht erhaltenen ATP-Spiegels in der Zelle, wofür wiederum eine ATP-Synthase notwendig ist – ebenfalls ein reichlich komplexes Protein. Zudem müssen *zugleich* polyP-auf- und abbauende Enzyme vorliegen (PPK und PPX), wobei es erforderlich ist, dass PPK gegen ROS resistent ist, während bei PPX eine Art Schalter vorliegen muss, damit es bei Vorliegen von ROS deaktiviert werden kann. Bei der Betrachtung solcher Systeme drängt sich teleologisches Denken besonders hartnäckig auf.

Die schnellen Zerstörungsraten einer Vielzahl von zellulären Komponenten erfordern eine rasche evolutive Entstehung hochkomplexer Abwehrmechanismen gegen oxidativen Stress.

Noch weit mehr Schwierigkeiten bereitet allerdings die Tatsache, dass die Entstehung von ROS an zentrale Prozesse des Energiehaushalts gekoppelt ist. So hätten die ersten Mikroorganismen, die Sauerstoff-generierende Photosynthese betrieben, *sofort* auch über alle Schutzsysteme vor Schäden durch ROS verfügen müssen. Gleiches gilt für die ersten aerob lebenden Organismen: Sobald die erste Atmungskette operativ war, mussten es auch alle ROS-Schutzsysteme sein. Und schließlich müsste erklärt werden, wie die schädlichen ROS auch noch zu unverzichtbaren Botenstoffen geworden sind.

Diese Sachverhalte zeigen auf, dass für Evolution kein nennenswerter Spielraum gegeben ist.

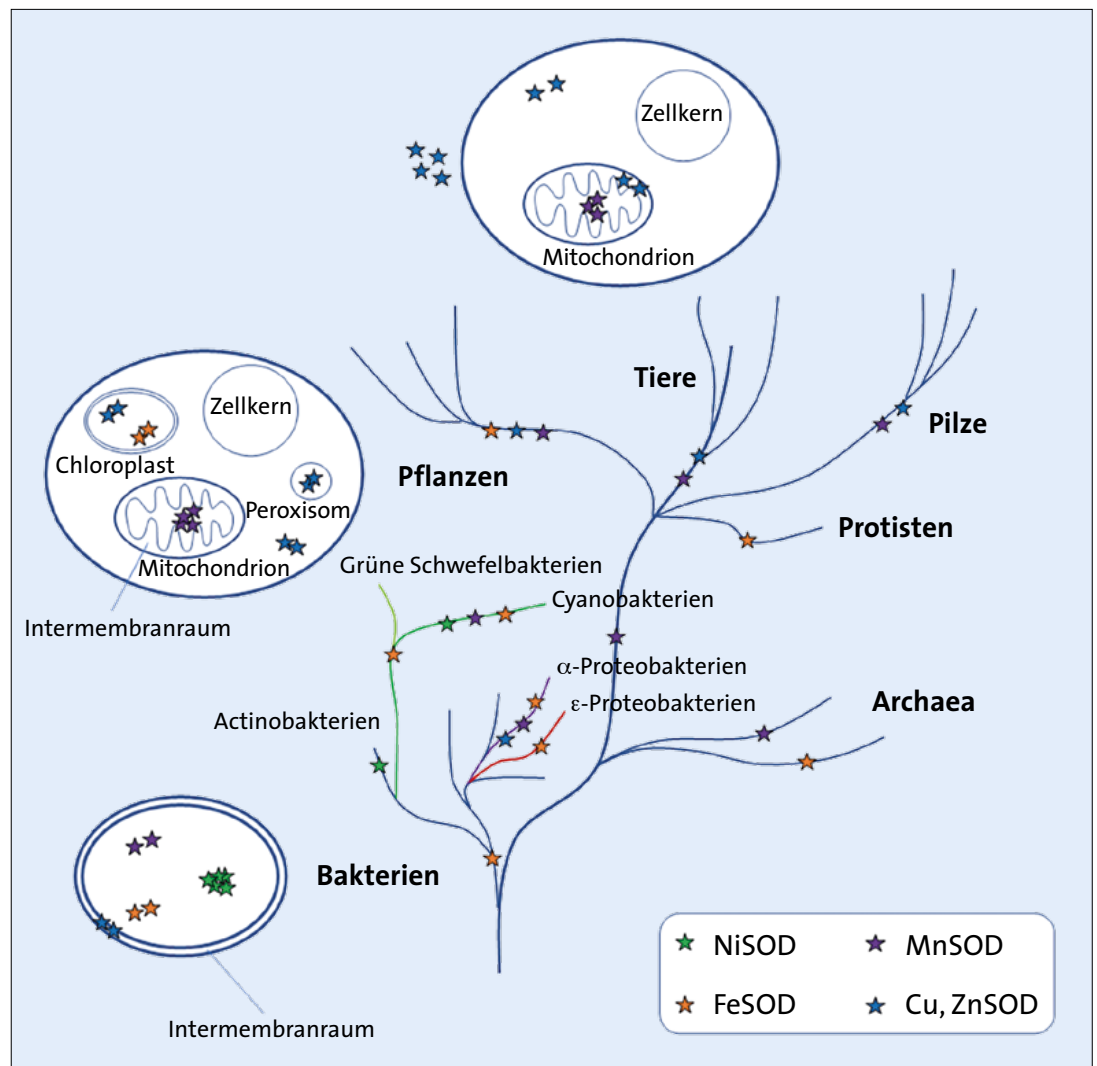
Evolutionstheoretische Hypothesen

Als Argumente für eine evolutive Entstehung solcher Schutzmechanismen und auch aerober

Organismen werden meistens vergleichende Analysen heute lebender Lebewesen angeführt. Ähnlichkeiten in der Ausstattung zum Schutz vor ROS werden dann durch Unterstellung einer gemeinsamen Abstammung erklärt. Ein Beispiel dafür ist das Vorliegen von SOD in nahezu allen Organismen (MILLER 2012).

In Lebewesen gibt es vier Typen von SOD, die recht unterschiedlich gebaut sind und in ihrem Reaktionszentrum (RZ) verschiedene Metallionen aufnehmen: FeSOD (Eisen im RZ), MnSOD (Mangan im RZ), NiSOD (Nickel im RZ), CuZnSOD (Kupfer und Zink im RZ). SOD sind mittelgroße Enzyme, die aus weit über 200 Aminosäuren bestehen und aus zwei Untereinheiten zusammengesetzt sind. Während in der Domäne der Bakterien alle Typen von SOD vorkommen, weisen Archaea nur solche mit Eisen oder Mangan auf. Protisten* enthalten nur eisenhaltige SOD, während bei Tieren und Pilzen nur CuZnSOD und MnSOD vorkommen (MILLER 2012). Darüber hinaus sind die verschiedenen SOD hinsichtlich ihrer Aminosäuresequenz und der dreidimensionalen Struktur recht unterschiedlich. Insgesamt kann also festgehalten werden, dass die Verteilung der verschiedenen SOD sich nicht sinnvoll in allge-

Abb. 5 Verteilung von SOD (Superoxid-Dismutase) in den Domänen des Lebens – angeordnet gemäß dem allgemein angenommenen evolutionstheoretischen Stammbaum (nach MILLER 2012). Das Vorliegen von SOD ist durch Sterne verschiedener Farbe dargestellt (blau: CuZnSOD; lila: MnSOD; orange: FeSOD; grün: NiSOD). Bei Annahme einer evolutiven Entstehung aller Organismen erfordert die Verteilung der SOD eine vielfache unabhängige Entstehung der gleichen Typen von Enzymen in verschiedenen Domänen des Lebens (Konvergenzen).



mein angenommene Abstammungsschemata fügen lässt (Abb. 5). Dies spricht nicht für Evolution, sondern eher für spezifische Schöpfung, die vermutlich den Bedingungen für den jeweiligen Lebensraum und der Kompatibilität mit den jeweiligen Stoffwechselsystemen der Organismen Rechnung trägt.

Als weitere Hypothese wird angeführt, dass es schon vor dem GOE reaktive Moleküle gab, mit denen die noch anaerob lebenden Organismen zurechtkommen mussten. So behaupten NEUBECK & FREUND (2020), dass durch reaktive Schwefelspezies (RSS) eine Art vorbereitender Schwefel-Stress gegeben war, der die Evolution hin zu ROS-Schutzsystemen ermöglichte. Allerdings erweist sich diese Argumentation angesichts der z. T. deutlich anderen chemischen Eigenschaften von ROS im Vergleich zu RSS als komplett unhaltbar. Denn gerade Schwefelverbindungen in Organismen stellen die empfindlichsten Reaktionspartner für ROS dar.

Fazit

Die dargelegten Befunde zeigen deutlich auf, dass die Umstellung auf einen Stoffwechsel mit Sauerstoff (infolge eines GOE) derart hohe Anforderungen an eine Umrüstung von Organismen stellt, dass die Annahme, solche Vorgänge könnten durch Darwin'sche Evolution verwirklicht werden, in hohem Maße unplausibel erscheint. Nichts spricht dafür, dass dies möglich ist, jedoch sehr vieles dagegen. Demgegenüber sind die unübersehbar teleologischen und biochemisch außerordentlich anspruchsvollen Schutzeinrichtungen gegen oxidativen Stress in Organismen ein eindrucksvolles Indiz für intelligente Schöpfung.

Literatur

- AKIYAMA M, CROOKE E & KORNBERG A (1992) The Polyphosphate Kinase Gene of *Escherichia coli*. *J. Biol. Chem.* *267*, 22556–22561.
- D'AUTRÉAUX B & TOLEDANO MB (2007) ROS as signaling molecules: mechanisms that generate specificity in ROS homeostasis. *Mol. Cell Biol.* *8*, 813–824.
- DESFOUGÈRES Y, SAIARDI A & AZEVEDO C (2020) Inorganic polyphosphate in mammals: Where's Wally? *Biochem. Soc. Trans.* *48*, 95–101.
- GALARIS D, BARBOUTI A & PANTOPOULOS K (2019) Iron homeostasis and oxidative stress: An intimate relationship. *Biochim. Biophys. Acta - Mol. Cell Res.* *1866*, 118535.
- GO Y-M, CHANDLER JD & JONES DP (2015) The cysteine proteome. *Free Radic. Biol. Med.* *84*, 227–245.
- GRAY MJ & JAKOB U (2015) Oxidative Stress protection by polyphosphate – new roles for an old player. *Curr. Opin. Microbiol.* *24*, 1–6.
- GRAY MJ, WHOLEY W-J et al. (2014) Polyphosphate is a primordial Chaperone. *Molecular Cell* *53*, 689–699.

Glossar

| | |
|--|--|
| aerob: unter Verwendung von Sauerstoff lebend | stoffderivate mit erhöhter chemischer Reaktivität) |
| anaerob: ohne Sauerstoff lebend | SOD: superoxide dismutase (Enzyme, die Superoxid-Moleküle abbauen) |
| Derivat: abgeleitete chemische Verbindung | Thermodynamische Triebkraft: aus Energiebilanzen chemischer Prozesse resultierende Richtung bestimmter Vorgänge. |
| GOE: great oxygenation event | Thiol-Gruppe: funktionelle chemische Gruppe, die aus den Elementen Schwefel und Wasserstoff zusammengesetzt ist: -SH. |
| Homöostase: Wahren eines bestimmten Zustandes physiologischer Parameter (pH-Wert, Konzentrationen etc.) | |
| Protisten: einzellige oder wenigzellige Eukaryoten | |
| ROS: reactive oxygen species (Sauer- | |

- HERBERT D & PINSENT J (1948) Crystalline Bacterial Catalase. *Biochemistry* *43*, 193–202.
- IMLAY JA (2013) The molecular mechanisms and physiological consequences of oxidative stress: lessons from a model bacterium. *Nat. Rev. Microbiol.* *11*, 443–454.
- KNOLL AH & NOWAK MA (2017) The timetable of evolution. *Sci. Adv.* *3*, e1603076.
- KOPPENOL WH & HIDER RH (2019) Iron and redox cycling. Do's and don'ts. *Free Radic. Biol. Med.* *133*, 3–10.
- KRUMOVA K & COSA G (2016) Overview of Reactive Oxygen Species. In: *Singlet Oxygen: Applications in Biosciences and Nanosciences* (Bd. 1, S. 1–21). Royal Society of Chemistry.
- MCINTYRE B & SOLESIO ME (2021) Mitochondrial inorganic polyphosphate (polyP): the missing link of mammalian bioenergetics. *Neural Regeneration Res.* *16*, 2227–2228.
- MILLER A-F (2012) Superoxide dismutases: Ancient enzymes and new insights. *Febs Letters* *586*, 585–595.
- MILO R & PHILLIPS R (2016) *Cell biology by the numbers*. Taylor & Francis, Oxfordshire.
- NEUBECK A & FREUND F (2020) Sulfur Chemistry May Have Paved the Way for Evolution of Antioxidants. *Astrobiology* *20*, 670–675.
- PEDRE B, YOUNG D et al. (2018) Structural snapshots of OxyR reveal the peroxidatic mechanism of H₂O₂ sensing. *Proc. Natl. Acad. Sci.* *115*, E11623.
- REICHMANN D, VOTH W & JAKOB U (2018) Maintaining a Healthy Proteome during Oxidative Stress. *Molecular Cell* *69*, 203–213.
- SCHMIDTGALL B (2021) Die „Sauerstoffkatastrophe“. 1. Extreme Krise als Auslöser genialer „Neuerfindungen“ des Lebens? *Stud. Integr. J.* *28*, 13–21.
- SHENG Y, ABREU IA et al. (2014) Superoxide dismutases and superoxide reductases. *Chem. Rev.* *114*, 3854–3918.
- SIES H & JONES DP (2020) Reactive oxygen species (ROS) as pleiotropic physiological signalling agents. *Mol. Cell Biol.* *21*, 364–383.
- STEVEN AC, BAUMEISTER W et al. (2016) *Molecular biology of assemblies and machines* (1. Aufl.). Garland Science, New York.
- STORZ G (2016) New perspectives: Insights into oxidative stress from bacterial studies. *Archives of Biochemistry and Biophysics* *595*, 25–27.
- WALSH CT & TANG Y (2019) *The Chemical Biology of Human Vitamins*. CPI Group, London.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Boris Schmidtgall, SG Wort und Wissen, Blumenhofstr. 9, 72290 Lossburg;

E-Mail: boris.schmidtgall@wort-und-wissen.de

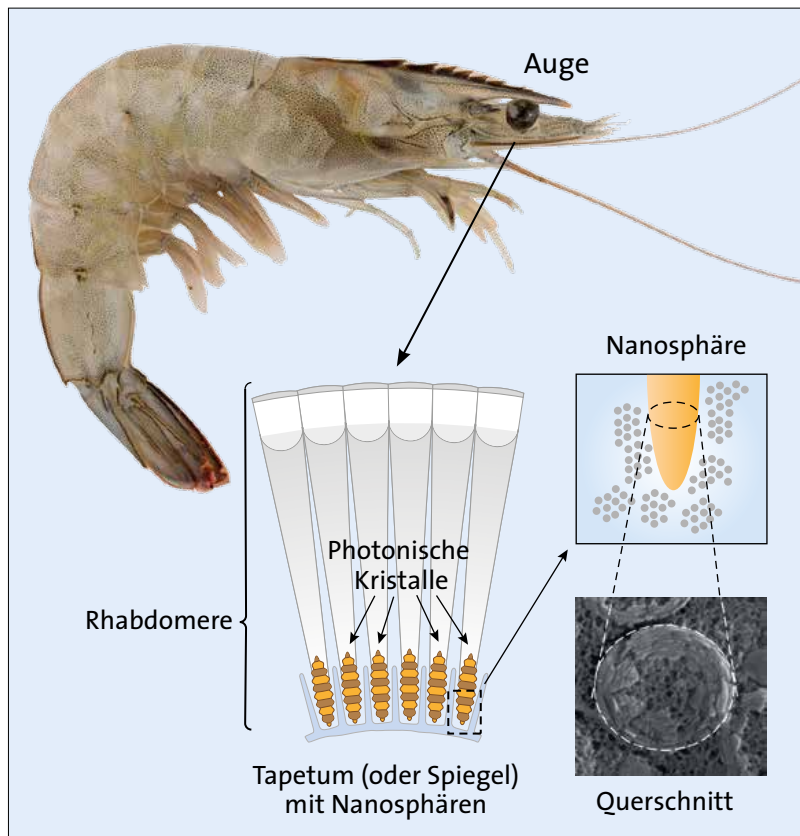
Krabbenaugen-Design: Optimale Nanotechnologie

Eine erstaunliche Augenkonstruktion ermöglicht es einer Garnelenart, in der Tiefsee auch bei sehr wenig Licht noch sehen zu können. Winzige Spiegel im Facettenauge richten das Licht auf einen Brennpunkt. Dabei handelt es sich um sogenannte „photonische Kristalle“, also periodische Nanostrukturen, deren Design darauf ausgerichtet ist, die Bewegung von Photonen zu lenken..

Peter Borger

Dekapoden („Zehnfüßkrebse“) sind zehnbeinige Krustentiere wie Hummer, Garnelen und Krebse. Sie besitzen Augen, die sich stark von unseren Linsenaugen unterscheiden. Unsere Augen fokussieren das Licht durch Lichtbrechung mittels Linsen, während die aus vielen kleinen Einzelaugen zusammengesetzten Facettenaugen der Zehnfüßkrebse winzig kleine Spiegel verwenden, um das Licht auf einen Brennpunkt zu richten. Die Konstruktionsprinzipien könnten nicht unterschiedlicher sein und beide erfordern spezielle Ausführungen. Ein Team von israelischen Wissenschaftlern des Weizmann Institute of Science und der Ben-Gurion-Universität hat bei einer Garnelenart eine erstaunliche Augenkonstruktion entdeckt,

Abb. 1 Der ausgeklügelte Aufbau des Auges der Weißfußgarnelle (*Litopenaeus vannamei*). (Bild: Garnelengeshas, AdobeStock; Grafiken nach PALMER et al. 2020).



die es ihnen ermöglicht, in der Tiefsee auch bei sehr wenig Licht noch sehen zu können.

Die Forscher analysierten die Augen der Weißfußgarnelle (*Litopenaeus vannamei*) unter dem Elektronenmikroskop. Sie entdeckten, dass der Spiegel (das Tapetum) aus einer Anordnung von Nanosphären (winzigen Spiegelkugeln) mit einem Durchmesser von 330 Nanometern besteht (0,00033 mm); ihr Durchmesser ist somit kleiner als die Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Diese Nanosphären sind in einer regelmäßigen Anordnung gepackt und um die untere Hälfte des Rhabdoms gewickelt. Das Rhabdom ist die kristalline Struktur in den Facettenaugen der Gliederfüßer, die die Lichtrezeptorproteine zum Einfangen der Photonen enthält (Abb. 1). Die Sphären selbst bestehen aus 8-10 dünnen konzentrischen Schichten von insgesamt 70 Nanometern Manteldicke, die einen mit einer flüssigen Substanz gefüllten Kern umgeben. Die Schichten werden aus Einzelkristallen von Isoxanthopterin gebildet, eine außergewöhnliche Konstruktion, da diese chemische Substanz prismatische Kristalle bildet. Dies verleiht den Sphären in ihrer Gesamtheit eine außergewöhnliche Eigenschaft, nämlich Doppelbrechung. Bei der Doppelbrechung variiert der Umfang der Lichtablenkung, also der Brechungsindex, je nach der Position im Bereich der Sphäre. Entlang der Mitte der Sphäre beträgt der Index 1,4, der ungefähr demjenigen von Wasser entspricht. Aber entlang des Randes ist der Index mit fast 1,96 „einer der höchsten Brechungsindizes aller biologischen Materialien“ (PALMER et al. 2020).

Die Forscher führten Computersimulationen durch, um die Reflexion von verschiedenen möglichen Anordnungen der Sphären zu vergleichen. Es stellte sich heraus, dass die Größe und Dicke der Sphären und die Schichten, aus denen sie bestehen, optimal konzipiert waren. Ebenso wichtig ist die Tatsache, dass sie mit

Flüssigkeit gefüllt statt massiv waren. Auch die Doppelbrechung der Sphären sorgte für bessere Reflexion als die simulierten Sphären, die in allen Richtungen den gleichen Brechungsindex hatten. Außerdem waren sie optimal beschaffen für blaues Licht, den einzigen Bereich des Spektrums des Sonnenlichts, der nennenswert bis in die Tiefen des Lebensraum der Garnele vordringt (SARFATI 2021).

Die Konstruktion ist also optimal ausgestattet für die Reflexion des Lichts, sodass die Fotorezeptoren am Boden der Nanosphären alle Lichtquanten, die in diese Meerestiefen eindringen, verlustfrei einfangen. Nach allem, was bisher bekannt ist, kann das gesamte Design dieser Augen nicht verbessert werden. Die israelischen Forscher kamen zu dem Schluss, dass „die Größe, das Kern/Schale-Verhältnis und die Anordnung der Partikel ebenfalls optimiert sind, um die Rückstreuung des Spiegel-Reflektors zu maximieren, sowohl in Bezug auf die Intensität als auch auf die spektralen Eigenschaften“ (PALMER et al. 2020).

Die winzigen Spiegel im Auge der Garnele sind ein wahres Wunderwerk, bei dem es sich – wie es im Fachjargon heißt – um „photonische Kristalle“ handelt, also um periodische Nanostrukturen, deren Design speziell darauf ausgerichtet ist, die Bewegung von Photonen zu lenken. In der Diskussion führten die Forscher an, dass es zwar theoretische Studien über die überlegene Optik von photonischen Kristallen mit doppelbrechenden Bausteinen gibt. Dennoch seien sie in der Praxis nicht hergestellt worden,

Die winzigen Spiegel im Auge der Garnele sind ein wahres Wunderwerk.

weil es nicht gelungen ist, ihre Bausteine richtig anzuordnen. Die Forscher bezeichneten die Konstruktion der sphärischen doppelbrechenden Bausteine als „das Genie der Shrimp-Lösung“, weil für diese Form keine besondere Ausrichtung erforderlich war (SARFATI 2021).

So kamen sie zu dem Schluss, dass „die Garnele ein einzigartiges Beispiel für ein natürliches photonisches System darstellt, das optische Eigenschaften aufweist, die zuvor nicht synthetisch (d. h. vom Menschen) erforscht wurden. [...] Das System bietet Inspiration für das Design von photonischen Kristallen, die aus sphärisch symmetrischen doppelbrechenden Partikeln aufgebaut sind, für den Einsatz in ultradünnen Reflektoren und nicht-irisierenden Pigmenten“ (PALMER et al. 2020). Die Garnele hat für ihren Lebensraum einen überaus effizienten optischen Sensor: Augen, die auch die letzte Spur des verfügbaren Lichtes nutzen. Neben anderen faszinierenden Typen von Augen handelt es sich um eine besondere Ausprägung, über die wir nur staunen können!

Literatur

- PALMER BA et al. (2020) A highly reflective biogenic photonic material from core-shell birefringent nanoparticles. *Nature Nanotechnology* 15, 138–144.
- SARFATI J (2021) Shrimp Eye Design: Reflective nanotechnology could inspire new optical coating. *Creation* 43, 22–23.

Schlaue schwäbische Neandertaler

Funde aus der Schwäbischen Alb belegen die Intelligenz des Neandertalers

Das Bild eines primitiven affenähnlichen Neandertalers wird schon seit vielen Jahrzehnten nicht mehr vertreten. Ständig kommen neue Erkenntnisse über die genialen Fähigkeiten dieser frühen Menschen ans Licht, die nicht nur einen Teil ihres spezifischen Erbgutes, sondern auch ihre Intelligenz mit dem modernen Menschen (*Homo sapiens*) gemeinsam haben. Das zeigt sich auch bei Entdeckungen von Steinwerkzeugen in der Heidenschmiede in der Schwäbischen Alb.

Benjamin Scholl

Einleitung

Ein Team von Forschern der Universität Tübingen untersuchte Steinwerkzeugfunde aus der Heidenschmiede an der Brenz bei Heidenheim auf der östlichen Schwäbischen Alb. Die Heidenschmiede ist eine Fundstelle mit ca. 5000 Steinartefakten (größtenteils dem Moustérien-

Technokomplex¹ zugeordnet), die bereits 1928 entdeckt worden war. Seit 1931 ruhten aber die Forschungsarbeiten des damals aktiven Amateurarchäologen Hermann Mohn und wurden erst vor kurzem wieder von ÇEP und Kollegen (2021) aufgenommen. Durch das Zusammenstellen der gefundenen Steinartefakte zu ihren ursprünglichen Steinkernen gelang es den For-



Abb. 1 Ein von Neandertalern vor ca. 50.000 bis 70.000 Jahren gefertigter Quarzit-Faustkeil aus der Heidenschmiede. Eine erneute Untersuchung der Steinartefakte aus der Heidenschmiede offenbarte die komplexen kognitiven und manuellen Fähigkeiten der dort lebenden Neandertaler. (Thilo PARG, CC BY-SA 3.0)

schern, einiges über die erstaunlichen Fähigkeiten der Neandertaler als Steinwerkzeughersteller in der Heidenschmiede ans Licht zu bringen.

Eine historische Einordnung der Funde

ÇEP et al. (2021) untersuchten die archivierten Steinartefakte genauer und setzten einzelne Steinsplitter zu ursprünglichen Steinkernen zusammen. Die Funde werden einem Alter von mindestens 50.000 bis 42.000 radiometrischen Jahren (rJ) zugeordnet, stammen also aus einer Zeit, als keine *Homo sapiens*, sondern nur Neandertaler auf der Schwäbischen Alb lebten. Zu genau dieser Zeit vor 45.000 rJ wanderte der moderne *Homo sapiens* wohl erstmals von Süden nach Süd- und Osteuropa ein, was Knochenfunde in Bulgarien, Italien, Rumänien und eventuell Tschechien belegen (PODBREGAR 2021a; HAJDINJAK et al. 2021). Diese modernen Menschen trugen zumindest in Rumänien und

Entgegen der bisher gültigen Sichtweise könnte die Fortpflanzung zwischen modernen Menschen und Neandertalern „üblich“ gewesen sein.

Bulgarien noch deutlich längere Neandertaler-DNA-Abschnitte in ihrem Erbgut als die heutigen Europäer (HAJDINJAK et al. 2021). Die Ergebnisse der Sequenzvergleiche des Erbguts mit 3,0 bis 3,8 bzw. sogar 6,4 Prozent Neandertaler-DNA² führten HAJDINJAK et al. (2021) zu dem Schluss, dass vier der bekannten frühen Menschen aus Bulgarien bzw. Rumänien vor nicht vielen Generationen Neandertaler-Vorfahren gehabt hatten. Daraus leiten HAJDINJAK et al. (2021) ab, dass entgegen der bis dahin gültigen Sichtweise die Fortpflanzung zwischen modernen Menschen und Neandertalern zu dieser Zeit „üblich“ gewesen sein könnte. Jedenfalls so lange, bis schließlich die letzten typischen Neandertaler vor ca. 40.000 rJ aus Europa verschwanden. Shara BAILEY von der New York University, die an der Studie über die Knochen- und Werkzeugfunde der Bacho Kiro Cave in Bulgarien mitwirkte, stellt fest, dass es im Zeitraum, in dem Neandertaler und moderne Menschen in Europa gleichzeitig gelebt haben, einen kulturellen Austausch über die Steinwerkzeugfertigung gegeben haben muss: „Die Ähnlichkeiten zwischen diesen Funden und denen aus Neandertaler-Fundstätten müssen durch die Interaktion zwischen beiden Populationen entstanden sein“ (PODBREGAR 2020).

Eine neue Studie von PEDERZANI et al. (2021) mit Fossilien aus der Bacho Kiro Cave in Bulgarien, die auch die ältesten europäischen Funde von *Homo sapiens* enthält, ergab außerdem, dass damals das dortige Klima im Schnitt 10 bis 15 Grad Celsius unter den heutigen Temperaturen lag. Dies zeigt nach PEDERZANI, „dass diese Menschengruppen flexibler in Bezug auf die von ihnen genutzten Umgebungen und anpassungsfähiger an unterschiedliche klimatische Bedingungen waren als angenommen“ (PODBREGAR 2021b). Somit wären auch die modernen Menschen in Südosteuropa, die Zeitgenossen der Neandertaler auf der Schwäbischen Alb waren, intelligenter in der Nutzung ihrer Umwelt gewesen, als bisher vermutet wurde. Man hatte den damaligen modernen Menschen nur zugetraut, dass sie Europa bloß in einer Warmzeit hätten besiedeln können (HAJDINJAK et al. 2021). „Auf der Grundlage dieser neuen Erkenntnisse müssen nun neue Modelle für die Ausbreitung unserer Spezies über Eurasien erstellt werden, die ihre größere klimatische Flexibilität berücksichtigen“, so der Seniorautor Jean-Jacques HUBLIN vom Max-Planck-Institut für Evolutionäre Anthropologie (PODBREGAR 2021b).

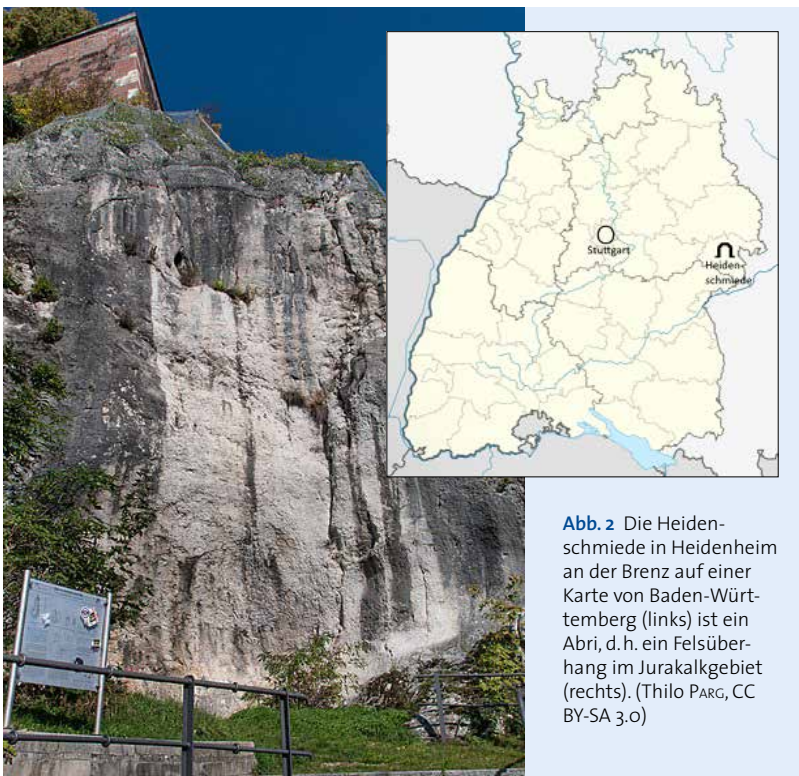


Abb. 2 Die Heidenschmiede in Heidenheim an der Brenz auf einer Karte von Baden-Württemberg (links) ist ein Abri, d.h. ein Felsüberhang im Jurakalkgebiet (rechts). (Thilo PARG, CC BY-SA 3.0)

Die Steinwerkzeugfunde der Heidenschmiede

Vor circa 45.000 rJ bevölkerten Steppenmammut, Wollnashörner, Wildpferde und Rentiere die Schwäbische Alb, wie an 14 kg fossilem Tiermaterial aus der Heidenschmiede nachgewiesen werden konnte (ÇEP et al. 2021). Einige der Knochen weisen Schnittspuren auf und waren also von den Neandertalern mit Steinwerkzeugen bearbeitet worden. Anhand zusammengesetzter Steinartefakte konnten die Arbeitsschritte der Neandertaler wie in einem 3D-Puzzle rekonstruiert werden. Solche Rekonstruktionen wurden in dieser Region bisher selten durchgeführt, da die Neandertaler in der Regel nicht alle zusammengehörigen Steinfunde an einem Ort hinterlassen hatten und die dortigen Ausgrabungen im letzten Jahrhundert oft nicht ganz so gründlich durchgeführt wurden wie heute. Außerdem liegen insgesamt nur wenig Fundstellen auf der Schwäbischen Alb im Verhältnis zu der langen Besiedlungszeit der mittleren Altsteinzeit vor, die man in einem geologischen Langzeitrahmen postuliert (ÇEP et al. 2021).³ So war bisher die Produktion von Steinklingen an sich nur selten auf der Schwäbischen Alb nachgewiesen worden. Damit stellen die reichhaltigen Funde der Heidenschmiede eine Ausnahme dar (ÇEP et al. 2021).

An den Hinterlassenschaften der Heidenschmiede ist hervorzuheben, dass die Neandertaler hier vor ca. 45.000 rJ verschiedene Techniken zu kombinieren wussten, wie ÇEP et al. (2021) herausfanden: Sie konnten Steinklingen mit und ohne Levallois-Technik herstellen. Die komplexe Levallois-Technik ist dadurch gekennzeichnet, dass der Steinkern aufwändig mit vielen Abschlügen exakt vorbereitet wird (Abb. 4). Erst danach wird die eigentliche Klinge durch einen gezielten Schlag längs aus dem bearbeiteten Steinkern herausgelöst (auch „Schildkern-Technik“ genannt). Diese Technik setzt ein großes Wissen über die Art und Weise der Schläge und das gewünschte Zielobjekt sowie ein feines Fingerspitzengefühl voraus. Dafür hat die Levallois-Technik aber auch viele Vorteile: Die gewonnenen Steinklingen sind sehr scharf, groß und dünn und sie sind effektiv einsetzbar. Außerdem werden die vorhandenen Ressourcen an Stein gut genutzt. Auf diese Art lassen sich neben Klingen auch Schaber und Spitzen für Waffen herstellen (ÇEP et al. 2021). Insgesamt führen die Autoren (Tab. 2) mindestens elf ganz verschiedene Steinkernformen bei neunundzwanzig bearbeiteten Steinkernen in der Heidenschmiede⁴ auf.

Die Neandertaler von Heidenschmiede nutzten sogar noch die Steinreste, um daraus wieder andere Werkzeuge mit wieder anderen



Abb. 3 Die Rekonstruktion eines Neandertalers, der gerade ein Wildpferd erlegt hat. So ähnlich wie hier im Gallo-Römischen Museum Tongeren in den Niederlanden dargestellt, mag es auch in der Heidenschmiede bei der Jagd auf Wildpferde ausgesehen haben. (Paul HERMANS, CC BY-SA 4.0)

Techniken herzustellen, wie ein zusammengesetzter Steinfund verdeutlicht (ÇEP et al. 2021). Somit kannten die Schwäbischen Neandertaler bereits vor etwa 45.000 rJ das Recycling. Sie konnten abstrahieren, wie sie die unterschiedlichen Steinteile auf verschiedene Weisen weiter verarbeiten konnten. Zu den hergestellten Werkzeugen gehören Schaber, Klingen und Keilmesser, mit denen z. B. Leder bearbeitet wurde.

Interessanterweise ist die Levallois-Technik in Europa schon seit mindestens 335.000 bis 325.000 rJ in Gebrauch, wie Funde im südlichen Kaukasus belegen (ADLER et al. 2014). Neben Neandertaler und frühem *Homo sapiens* wurde diese komplexe Technik also bereits zuvor vom *Homo heidelbergensis* benutzt (EREN & LYCETT 2012), der Gebiete in Deutschland seit über 600.000 rJ besiedelt hat. Der Heidelberger Mensch gilt als typische Übergangsform zwischen *Homo erectus* und Neandertaler, da er sich weder von seinem mutmaßlichen Vorgänger *Homo erectus* noch von seinem Nachfolger Neandertaler klar abgrenzen lässt (vgl. ATHREYA 2007).

Die Universität Tübingen (2021) überschlägt sich in ihrer Pressemitteilung geradezu mit Lobreden auf die Intelligenz der Neandertaler, die diese Werkzeuge konstruierten: „Sie unterstreichen einmal mehr, dass die Neandertaler hochentwickelte Fähigkeiten besaßen.“ Die Neandertaler wussten also genau, was sie herstellen wollten, durchdachten zuvor jeden ein-

Neandertaler besaßen „große geistige Flexibilität und Anpassungsfähigkeit, gepaart mit handwerklichem Geschick“.

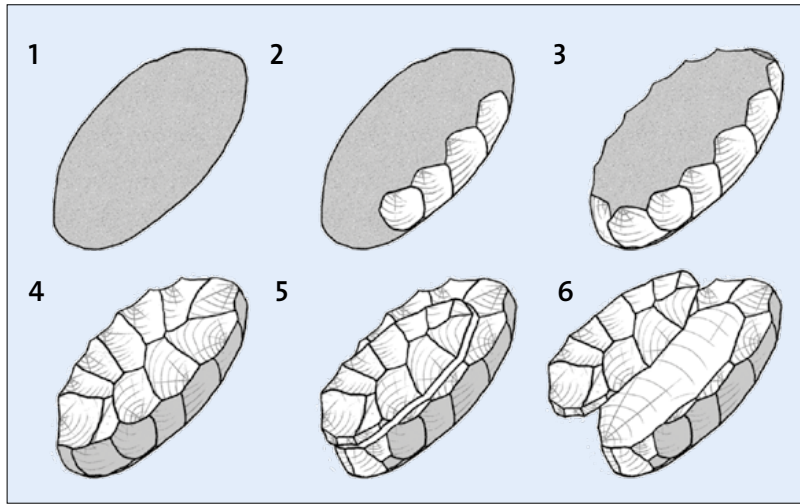


Abb. 4 Herstellung einer Steinklinge mit der komplexen Levallois-Technik durch eine Folge vieler geplanter und präziser Abschlüge an einem Steinkern. (Nach José-Manuel BENITO ÁLVAREZ, CC BY-SA 2.5)

Tab. 1 Die verzweigten Arbeitsschritte aus einem Steinkern, die anhand der Steinartefakte aus der Heidenschmiede rekonstruiert wurden. Die so entstandenen Steinrohlinge konnten anschließend von den Neandertalern zu passenden Werkzeugen bearbeitet werden. (Eigene Darstellung nach ÇEP et al. 2021, Abb. 6)

zelen Handlungsschritt und nutzen dabei ganz verschiedene und aufeinander aufbauende Fertigungstechniken, um zu einer „großen Formenvielfalt“ an Steinwerkzeugen zu gelangen. Die Universität Tübingen (2021) schlussfolgert: „Die neuen Studienergebnisse untermauerten andere Untersuchungen, denen zufolge die Neandertaler große geistige Flexibilität und Anpassungsfähigkeit besaßen, gepaart mit handwerklichem Geschick.“

Aus der Schöpfungsperspektive sind die Funde aus der Schwäbischen Alb wenig überraschend, schließlich berichtet ja schon das erste Buch der Bibel – die Genesis –, dass der Mensch von Anfang an mit Intelligenz und Geist von Gott geschaffen wurde – egal, ob wir ihn damals als *Homo sapiens*, Neandertaler oder *Homo erectus* klassifiziert hätten.

Verzweigte Arbeitsschritte zur Herstellung vieler Steinrohlinge aus einem Steinkern

| 1. Ausgangsteinkern | | |
|--|---|--|
| 2. Bearbeitung des Kerns (Volumen und Oberflächen) | | |
| 3. Reduktion des Kerns (hauptsächlich Abtrennen von Klingen) | | |
| 4. Dreiteilung des Kerns: | | |
| 4a. Unteres Stück (Entfernung der Kernkappe) | Objektdrehung 4b. Mittleres Stück (bevorzugter Levallois-Kern) | Objektdrehung 4c. Oberes Stück (Kernkappe als Kern verwendet) |
| 5a. Unteres Stück (nicht verwendet) | 5b. Kernkonfiguration (Formgebung der Ober- und Unterseite für einen Levallois-Kern) | 5c. Entfernen eines weiteren Kernrand-Rohlings von der oberen Kernfläche, aber kein Kern vorhanden |
| 6a. Minimale Entfernung im formalen Kernbereich | 6b. Entfernen eines Ziel-Rohlings | 6c. Entfernung auf der Reduktionsfläche |
| | 7b. Umgestaltung des Levallois-Kerns | 7c. Entfernung auf der Reduktionsfläche |
| | Objektdrehung 8b. Entfernen von kleinen Längs-Rohlingen von der unteren Kernfläche | 8c. Dorsale (rückseitige) Reduktion |
| | 9b. Entfernen von kleinen Längs-Rohlingen von der unteren Kernfläche | 9c. Entfernung eines Schneidsplitters (éclat débordan) |

Anmerkungen

- Das Moustérien ist eine der Steinzeugindustrien aus der mittleren Altsteinzeit in Eurasien mit einem Alter von ca. 300.000 bis 40.000 rJ.
- Nach FU et al. (2015) sind es 6–9 Prozent Neandertaler-DNA im *Homo-sapiens*-Fund von Peștera cu Oase in Rumänien, was einen Neandertaler-Vorfahren vor vier bis sechs Generationen bedeutet. Die übliche Formulierung „Neandertaler-DNA“ ist eigentlich irreführend, denn es handelt sich nicht um spezifische Gene, sondern um spezifische Allele von Genen, also bestimmte charakteristische Gen-Varianten.
- BRANDT (2015) hat anhand eingehender Untersuchungen aufgezeigt, dass insgesamt viel zu wenige Steinartefakte gefunden wurden, um Jahrhunderttausende oder gar Jahrmillionen Menschheitsevolution zu rechtfertigen. Dem Autor zufolge ist anhand der Menge der Steinartefakte eher von einer Steinzeit auszugehen, die nur einige Jahrtausende dauerte.
- Die 29 angeführten Steinkerne: 7 Flakes and blade cores, 2 Discoidal cores, 1 Core on flake, 1 Ventral core (Kombewa), 5 Recurrent centripetal levallois cores, 3 Configured Levallois cores, 2 Polymorphic cores, 4 Residual polymorphic cores, 1 Blade core, 1 Bladelet and blade core, 1 Core debris, 1 Undetermined residual core.

Literatur

ADLER DS et al. (2014) Early Levallois technology and the Lower to Middle Paleolithic transition in the Southern Caucasus. *Science* 345, 1609–1613.

ATHREYA S (2007) Was *Homo heidelbergensis* in South Asia? A test using the Narmada fossil from central India. In: PETRAGLIA M & ALLCHIN B (eds) *The Evolution and History of Human Populations in South Asia*, 137–170, doi: 10.1007/1-4020-5562-5_7.

BRANDT M (2015) *Wie alt ist die Menschheit? Demographie und Steinwerkzeuge mit überraschenden Befunden*. 6. Auflage. Holzgerlingen: SCM Hänssler.

ÇEP B, SCHÜRCH B, MÜNZEL SC & FRICK JA (2021) Adaptive capacity and flexibility of the Neanderthals at Heidenschmiede (Swabian Jura) with regard to core reduction strategies. *PLOS ONE* 16(9): e0257041.

EREN MI & LYCET SJ (2012) Why Levallois? A Morphometric Comparison of Experimental ‘Preferential’ Levallois Flakes versus Debitage Flakes. *PLOS ONE* 7(1): e29273.

FU Q et al. (2015) An early modern human from Romania with a recent Neanderthal ancestor. *Nature* 524, 216–219, <https://doi.org/10.1038/nature14558>.

HAJDINJAK M et al. (2021) Initial Upper Palaeolithic humans in Europe had recent Neanderthal ancestry. *Nature* 592, 253–257.

PODBREGAR N (2020) Ältester *Homo sapiens* Europas entdeckt. 45.000 Jahre alte Funde in bulgarischer Höhle belegen frühe Präsenz unserer Vorfahren, <https://www.scinexx.de/news/biowissen/aeltester-homo-sapiens-europas-entdeckt-2/>.

PODBREGAR N (2021a) Die verschwundenen Ur-Europäer. DNA liefert neue Einblicke in die frühesten Vertreter des *Homo sapiens* in Europa. Schädel aus Zlaty kun, <https://www.scinexx.de/news/biowissen/die-verschwundenen-ur-europaer/>.

PODBREGAR N (2021b) *Homo sapiens* war kältetoleranter als gedacht. Vor 45.000 Jahren lebten unsere Vorfahren auf dem Balkan in subarktischem Klima, <https://www.scinexx.de/news/biowissen/homo-sapiens-war-kaeltetoleranter-als-gedacht/>.

PEDERZANI S et al. (2021) Subarctic climate for the earliest *Homo sapiens* in Europe. *Sci. Adv.* 7, doi: 10.1126/sciadv.abi4642.

Universität Tübingen (2021) Späte Neandertaler auf der Schwäbischen Alb nutzten ausgeklügelte Techniken, <https://uni-tuebingen.de/universitaet/aktuelles-und-publikationen/pressemitteilungen/newsfullview-pressemitteilungen/article/spaete-neandertaler-auf-der-schwaebischen-alb-nutzen-ausgekluegelte-techniken/>.

Die Gegenvögel der Kreide – Vögel 1.0

Ein neu entdecktes Vogelfossil aus der Gruppe der Gegenvögel weist mit einer kurzen Schnauze und einem sehr langen Zungenbeinapparat eine bisher unbekannt Merkmalskombination auf. Wahrscheinlich besaß die neue Art *Brevirostruavis macrohyoideus* eine lange, herausstreckbare Zunge, ähnlich der Zunge von Kolibris und Spechten. *Brevirostruavis* erweitert die bereits große Vielfalt von Gegenvögeln, die plötzlich im Fossilbericht auftaucht. Ein aktuelles Cladogramm der Gegenvögel weist anstelle gabeliger Verzweigungen fast nur Vielfachverzweigungen auf – zusammen mit dem plötzlichen fossilen Auftreten ist das evolutionstheoretisch problematisch. Die sehr unterschiedliche Vogelfauna in Kreide und Tertiär ist aber auch für bestimmte Ansätze der Schöpfungslehre eine Herausforderung.

Reinhard Junker

Zu den eigenartigen Befunden des Fossilberichts gehört die ausgeprägte Unterschiedlichkeit der Vogelwelt der Kreide (145–66 Millionen radiometrische Jahre, MrJ) im Vergleich zur Vogelfauna des Tertiärs (66–2,6 MrJ). Man könnte von „Vögeln 1.0“ und „Vögeln 2.0“ sprechen. Obwohl die Gestalten der Vögel beider Faunen äußerlich teilweise recht ähnlich sind, gibt es deutliche Unterschiede im Skelettbau. Die meisten Vogelarten aus der Kreide werden zu zwei großen Gruppen gestellt, den Ornithuromorpha („Vogelschwänze“ und verwandte Formen) und den Enantiornithes („Gegenvögel“). Die Bezeichnung „Ornithuromorpha“ nimmt Bezug auf den fächerförmigen Schwanz, wie er auch bei den heute lebenden Vögeln ausgebildet ist. Für die Bezeichnung „Gegenvögel“ gibt es in der Fachliteratur keine einheitliche Begründung. Es wird auf zwei anatomische Besonderheiten hingewiesen, die die Enantiornithes von anderen Vögeln unterscheiden: Zum einen die Art der Verwachsung einiger Fußknochen, zum anderen der Bau des Gelenks zwischen Schulterblatt und Rabenbein (FEDUCIA 2012). Bei den Gegenvögeln sind Gelenkkopf und Gelenkpfanne im Vergleich zu allen anderen Vögeln sozusagen vertauscht. Es erscheint unmöglich, dass die beiden anatomischen Ausprägungen evolutiv von einer Form zur anderen überführt werden könnten. Aus den Ornithuromorpha sollen die heutigen Vögel (Neornithes) hervorgegangen sein, während die Gegenvögel am Ende der Kreide ausgestorben sind. Beide Gruppen treten in der unteren Kreide fossil plötzlich in großer Vielfalt auf, darunter auch Formen mit Merkmalen, die als „abgeleitet“ („höherentwickelt“) eingestuft werden.¹ Die beiden Vogelgruppen reihen sich damit in die zahlreichen Fälle eines plötzlichen fossilen Auftretens von Organismengruppen ein. Abb. 1 zeigt die systematische Stellung der Gegenvögel.

Die beiden Vogelgruppen reihen sich in die zahlreichen Fälle eines plötzlichen fossilen Auftretens von Organismengruppen ein.

Gegenvögel

Im Folgenden sollen die Gegenvögel etwas näher betrachtet werden. Neben den bereits beschriebenen Merkmalen weisen sie weitere Besonderheiten auf: Die Knochen haben im Vergleich mit anderen Vögeln ein einzigartiges Muster in ihrer Gewebestruktur; sie zeigen zyklische Pausen beim Knochenwachstum – ein Muster, das weder bei heutigen Vögeln noch bei den mutmaßlichen Vorläufern der Gegenvögel vorkommt (CHIAPPE 1995, 352f.). Im Schädelbereich waren einige „primitive“ Merkmale ausgebildet, z. B. weniger Knochenverwachsungen oder ein ungegabelter Unterkieferknochen (O’CONNOR & CHIAPPE 2011, 135). Auch im Fußbereich sind die Knochenverwachsungen meist geringer.² Die meisten Gegenvögel waren bezahnt, z. T. war die Anzahl der Zähne reduziert; wenige waren ganz unbezahnt. Ihre Zähne sind nicht gezackt und haben eine eingeschnürte Basis (PADIAN & CHIAPPE 1998, 27). Sie besaßen einen langen, fleischigen Schwanz mit einem verlängerten Pygostyl (verwachsene letzte Wirbel).

Abb. 1 Vereinfachte Systematik der Wirbeltierklasse der Vögel (Avialae) mit Gegenvögeln (Enantiornithes) und Ornithuromorpha, zu denen auch die heute lebenden Vögel gehören und die als einzige Gruppe der Vögel bis heute überlebt haben. Die Position einzelner Gattungen ist im Fluss. (Eigene Darstellung auf der Basis der Cladogramme von WANG et al. 2015 und MAYR 2017)

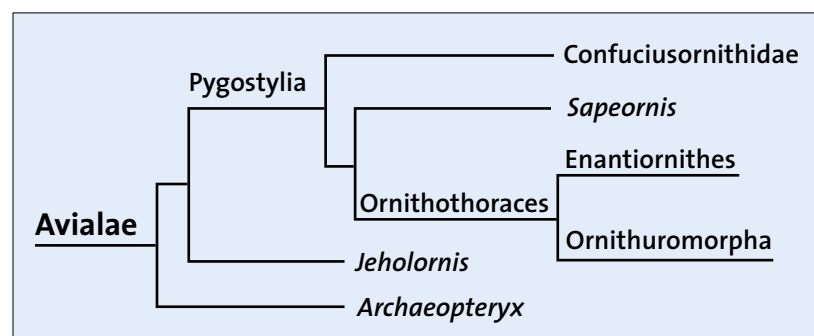




Abb. 2 Rekonstruktion von *Brevirostruavis macrohyoideus*. (Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences.)

Eine Besonderheit ist auch, dass der sogenannte Dreiknochenkanal³ anders geformt ist als bei modernen Vögeln (FEDUCCIA 2001, 142). Die Flugfähigkeiten der Gegenvögel gelten als vergleichbar denen heutiger Vögel (SANZ et al. 2002, NAVALÓN et al. 2015, 6⁴). Bei den Gegenvögeln sind sehr verschiedene Flugstile sowie Flügel- und Beinformen in einer den heutigen Vögeln vergleichbaren Vielfalt ausgebildet (WALKER & DYKE 2009, 17; vgl. CHIAPPE & DYKE 2002, 105f., 111⁵), ebenso sind verschiedene ökologische und morphologische Typen bekannt. Die Größe der Arm- und Handschwingen war heutigen Taxa vergleichbar, auch ein Daumenfittich war ausgebildet (O’CONNOR et al. 2011, 58). Die bekannten Vorderextremitäten-Proportionen der Gegenvögel fallen in den Bereich heutiger Taxa. Diese Vögel umfassten also wahrscheinlich die gesamte Bandbreite der Flugstile der heutigen Vögel (DYKE & NUDDS 2009, 251).

Die Gegenvögel bestanden aus über 50 Gattungen und waren weltweit verbreitet. Sie waren oft nur spatzen groß und erreichten Größen bis 30 cm. Die evolutionären Beziehungen zwischen den Taxa der Gegenvögel sind wenig geklärt und kaum verstanden (WALKER & DYKE 2009, 17). In einem neueren Cladogramm (Abb. 3) sind fast alle Knotenpunkte zusammengefallen – eine Auswirkung des verbreiteten Vorkommens von Merkmalswidersprüchen, die als Konvergenzen (d. h. Merkmale von unabhängiger Evolution ohne gemeinsame Abstammung) interpretiert werden (O’CONNOR et al. 2017, 52; LI et al. 2021).

Brevirostruavis – Gegenvogel mit langer Zunge

Die Vielfalt der Gegenvögel wird seit Kurzem durch eine weitere ungewöhnlich spezialisierte Art erweitert (Abb. 2). Eine neu entdeckte Art weist Merkmale des Kiefers auf, die den Besitz einer langen Zunge nahelegen (LI et al. 2021). Die neue Art wurde *Brevirostruavis macrohyoideus*

genannt, was so viel bedeutet wie „Vogel mit kurzer Schnauze und langer Zunge“. Der etwa starengroße Vogel besaß lange Krallen, was zusätzlich zu den Proportionen seiner Zehenknochen nach Ansicht der Autoren darauf hindeutet, dass er in Bäumen lebte. Die Namensgebung ist durch eine ungewöhnliche Kombination von Merkmalen im gut erhaltenen Schädelbereich motiviert, die bisher bei keiner anderen lebenden oder ausgestorbenen Vogelart bekannt war: einerseits eine auffallend kurze schnabelartige Schnauze mit kleinen Zähnchen, andererseits ein extrem langer Zungenbeinapparat, der kaum kürzer als der Schädel ist. Ein solch langer Zungenbeinapparat kommt bei heutigen Vögeln vor, die eine lange Zunge besitzen, nämlich bei Spechten und Kolibris (vgl. Abb. 3). Die Wissenschaftler schließen daraus, dass auch *Brevirostruavis* eine lange, herausstreckbare Zunge besaß, auch wenn sein kurzer Schnabel dazu nicht passend erscheint, und er sich dementsprechend wahrscheinlich auf spezialisierte Weise ernährte. Denkbar wäre ein Einsatz der Zunge wie bei Spechten, um Insekten aus Löchern im Holz zu ergattern oder um an nektarähnliche Flüssigkeiten von Pflanzen zu gelangen.

Die Forscher analysierten auch die evolutionäre Position von *Brevirostruavis* und fanden heraus, dass diese Gattung zu keiner der Hauptgruppen der Gegenvögel passt. Erneut zeigt sich, dass das Cladogramm der Gegenvögel wegen vieler Konvergenzen kaum in interne Verwandtschaftsgruppen unterteilt werden kann und eine ausgeprägte Vielfachverzweigung (Polytomie) bildet (LI et al. 2021, 6). Zu den Konvergenzen gehört auch die Verlängerung des Zungenbeinapparats, die unter den Gegenvogel-Arten ebenfalls bei *Sulcavis* vorkommt (LI et al. 2021, 2).

Brevirostruavis passt zu keiner der Hauptgruppen der Gegenvögel.

Diskussion

Der neue Fund unterstützt bisherige systematische Befunde: Er vergrößert die ausgeprägte Vielfalt der Gegenvögel, die im Fossilbericht plötzlich in der Unterkreide (vor ca. 130 bis 120 MrJ) auftauchen. Und er bestätigt das Fehlen eines einigermaßen stimmigen Stammbaums (Abb. 4). Dass ein Konsensbaum kaum gabelige Verzweigungen aufweist, ist ein klares Indiz für eine unsystematische Verteilung von Merkmalen unter den verschiedenen Taxa. Daraus folgt, dass die Merkmalsverteilung sich nicht baumförmig darstellen lässt. Beide systematische Befunde widersprechen evolutionstheoretischen Erwartungen einer schrittweisen



Entstehung und Aufzweigung. Und beide lassen sich leichter im Rahmen eines Schöpfungsmodells deuten. Denn plötzliches fossiles Erscheinen kann als Indiz dafür gewertet werden, dass die betreffenden Gattungen in fertiger Form ins Dasein gekommen sind. Und das Fehlen einer ausgeprägten Baumstruktur in Cladogrammen spricht für freie Kombinierbarkeit von Merkmalen, was ein Schöpfungsindiz ist. Ein Schöpfer ist nämlich frei, Merkmale beliebig zu kombinieren, dagegen ist Evolution an natürlich ablaufende Prozesse gebunden (nicht umsonst erwartet man evolutionstheoretisch einen Stammbaum und keine Vielfachgabelungen).

Das Fehlen einer ausgeprägten Baumstruktur in Cladogrammen spricht für freie Kombinierbarkeit von Merkmalen – ein Schöpfungsindiz.

Andererseits haben diejenigen Schöpfungsmodelle, welche eine gleichzeitige Erschaffung von Grundtypen zugrunde legen, ebenfalls mit einem schwerwiegenden Problem zu kämpfen. Es fehlt eine Erklärung dafür, warum die Vogelwelt der Kreide auffällig anders gebaut ist als die des darauffolgenden Tertiärs. Eine biogeographische Erklärung (d. h. auf der Basis der geographischen Verteilung) bietet sich nicht an, da die jeweiligen Vogelgruppen weltweit auf (fast) allen Kontinenten verbreitet sind. Warum die Gegenvögel am Ende der Kreide ausgestorben sind, ist für alle Ursprungsmodelle unbekannt. Für O'CONNOR et al. (2011, 59) ist das „eines der großen Rätsel der Paläontologie der Vögel“.

Anmerkungen

¹ „Although still showing a suite of primitive skeletal traits, even the earliest enantiornithines (i.e., *Protopteryx fengningensis*) had already developed forelimb elements of modern proportions, a carinate sternum, and an advanced pectoral girdle including a triosseal canal for the passage of flight muscles, all of which suggest active flapping flight and a wing stroke similar to that of present-day birds“ (NAVALÓN 2015, 6).

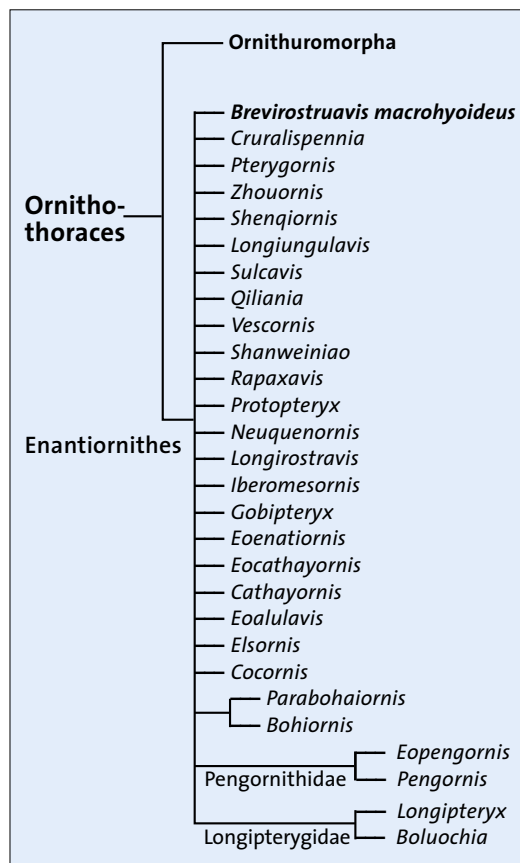


Abb. 3 Links: Der Carolinaspecht (*Melanerpes carolinus*) zeigt seine Zunge. Rechts: Weibchen des Rubinkehlkolibris (*Archilochus colubris*) mit herausgestreckter Zunge. (Beide Fotos: Pixabay)

Abb. 4 Phylogenetische Position von *Brevirostruavis macrohyoideus* im Konsensbaum der Enantiornithes nach der Analyse von Li et al. (2021). Der Konsensbaum fasst alle phylogenetischen Bäume zusammen. Weisen diese viele Merkmalswidersprüche auf, kommt es zu Polytomien (Vielfachverzweigungen).

„... by the Early Cretaceous, enantiornithines were already incredibly diverse in form and function“ (O'CONNOR & CHIAPPE 2011, 154).

² O'CONNOR et al. (2011, 57f.) halten es allerdings für möglich, dass es sich um ontogenetische Stadien der Individualentwicklung handelt.

³ Zwischen Furkula, Rabenbein (Coracoid) und Schulterblatt befindet sich bei Vögeln eine Lücke, das Foramen triosseum (Dreiknochenkanal, triosseal canal), durch die eine starke Sehne verläuft, die den kleinen Brustmuskel (M. supracoracoideus) mit dem Oberarmknochen verbindet. Dieses System ist für die Hebung des Flügels verantwortlich.

⁴ „... these primitive avians had achieved aerodynamic competence comparable to those of many modern birds“ (NAVALÓN 2015, 6).

⁵ „Their flight apparatus approaches that of their living counterparts in proportions and shares with them several derived characters (e.g., alula, mobile scapulocoracoid articulation, narrow interclavicular“ (CHIAPPE & DYKE 2002, 105f.). „These birds had modern wing configurations with the ulna-radius the longest segment, much shorter fingers (yet still clawed), and an alula ...“ (ebd., 111).

⁶ Der Konsensbaum ist ein Cladogramm, der die (ggf. widersprüchlichen) Verzweigungsinformationen aller vorliegenden Cladogramme der betreffenden Organismengruppe zusammenfasst.

Literatur

- CHIAPPE LM (1995) The first 85 million years of avian evolution. *Nature* 379, 349–355.
- CHIAPPE LM & DYKE GJ (2002) The mesozoic radiation of birds. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 33, 91–124.
- DYKE GJ & NUDDS RL (2009) The fossil record and limb disparity of enantiornithines, the dominant flying birds of the Cretaceous. *Lethaia* 42, 248–254.
- FEDUCCIA A (2001) The problem of bird origins and early avian evolution. *J. Ornithol.* 142 Sonderheft 1, 139–147.
- FEDUCCIA A (2012) *The riddle of the feathered dragons: Hidden Birds of China*. Yale University Press.
- LI Z, WANG M, STIDHAM TA, ZHOU Z & CLARKE J (2021) Novel evolution of a hyper-elongated tongue in a Cretaceous enantiornithine from China and the evolution of the hyolingual apparatus and feeding in birds. *J. Anat.*, doi:10.1111/joa.13588.
- MAYR G (2017) Pectoral girdle morphology of Mesozoic birds and the evolution of the avian supracoracoid muscle. *J. Ornithol.* 158, 859–867.
- NAVALÓN G, MARUGÁN-LOBÓN J, CHIAPPE LM, SANZ JL & BUSCALIONI A (2015) Soft-tissue and dermal arrangement in the wing of an Early Cretaceous bird: Implications for the evolution of avian flight. *Sci. Rep.* 5:14864, doi:10.1038/srep14864.
- O’CONNOR JK & CHIAPPE LM (2011) A revision of enantiornithine (Aves: Ornithothoraces) skull morphology. *J. Syst. Palaeont.* 9, 135–157.
- O’CONNOR J, CHIAPPE LM & BELL A (2011) Pre-modern birds: Avian divergences in the Mesozoic. In: DYKE G & KAISER G (eds) *Living Dinosaurs: The Evolutionary History of Modern Birds*. John Wiley & Sons, pp 39–114.
- O’CONNOR JK, ZHENG XT, HU H, WANG XL & ZHOU ZH (2017) The morphology of *Chiappeavis magnapremaxillo* (Pengornithidae: Enantiornithes) and a comparison of aerodynamic function in Early Cretaceous avian tail fans. *Vertebr. Palasiatica* 55, 41–58.
- PADIAN K & CHIAPPE LM (1998) The origin and early evolution of birds. *Biol. Rev.* 73, 1–42.
- SANZ JL, PÉREZ-MORENO BP, CHIAPPE LM & BUSCALIONI AD (2002) The birds from the Lower Cretaceous of Las Hoyas (Province of Cuenca, Spain). In: CHIAPPE LM & WITMER LM (eds) *Mesozoic birds: Above the heads of dinosaurs*. Berkeley, Los Angeles, London: University California Press, pp 209–229.
- WALKER CA & DYKE GJ (2009) Euenantiornithine birds from the Late Cretaceous of El Brete (Argentina). *Irish J. Earth Sci.* 27, 15–62.
- WANG M, LI D et al. (2015) Second species of enantiornithine bird from the Lower Cretaceous Changma Basin, northwestern China with implications for the taxonomic diversity of the Changma avifauna. *Cret. Res.* 55, 56–65.
- WANG M, LLOYD GT, ZHANG C & ZHOU Z (2021) The patterns and modes of the evolution of disparity in Mesozoic birds. *Proc. R. Soc. B* 288: 20203105; doi:10.1098/rspb.2020.3105.

Evolution der Mehrzelligkeit im Labor: programmierte Anpassung gegen Fressfeinde?

Aus evolutionstheoretischer Sicht ist die Entstehung der Mehrzelligkeit eine Notwendigkeit für die Evolution höherer Organismen, weil sie die Aufgabenteilung zwischen verschiedenen Zellgruppen ermöglicht. Nach der vorherrschenden Lehrmeinung haben sich mehrzellige Organismen 20-30-mal unabhängig voneinander entwickelt. Daher sollte dieses Merkmal ganz einfach entstehen können. In einer neuen Studie mit Grünalgen wurde kürzlich berichtet, dass sich die Mehrzelligkeit im Labor in weniger als 500 Generationen entwickelt hat. Ein genauer Blick auf die Daten zeigt jedoch, dass es sich um eine programmierte Anpassung handelt, die in der Gegenwart von Raubtieren induziert und/oder selektiert wird.

Peter Borger

Kürzlich wurde in *Nature Communications* eine Arbeit mit einem etwas schwer verständlichen Titel veröffentlicht: „The evolution of convex trade-offs enables the transition towards multicellularity“ („Die Evolution konvexer Trade-offs ermöglicht den Übergang zur Vielzelligkeit“) (BERNARDES 2021). Es geht dabei um den Übergang von Einzelligkeit zu Vielzelligkeit.

Der Begriff „Trade-off“ lässt sich am besten mit „Ausgleich“ oder „Abhängigkeit“ überset-

zen und ist der englische Begriff für eine gegenläufige Abhängigkeit, d. h. nimmt die eine Größe zu, dann nimmt zugleich die andere ab. Um welchen Trade-off handelt es sich hier? Was genau ist hier die Abhängigkeit? Dies veranschaulicht Abb. 1: einen gegenläufigen Zusammenhang zwischen Reproduktions- und Überlebensrate der Zellen. Das Adjektiv „konvex“ bezieht sich hier auf die Form der Trade-off-Kurve. In diesem Diagramm stellt die y-Achse

(vertikale Achse) die Reproduktionsrate dar, während die x-Achse (horizontale Achse) die Überlebensrate der Zellen repräsentiert. Die gekrümmte Linie zeigt, dass mit einer Abnahme der Reproduktionsrate eine Zunahme der Überlebensrate einhergeht. Und genau diesen Zusammenhang konnten die Wissenschaftler aufzeigen: Zwar reproduzierten sich die Algen in Zellverbänden weniger stark als die einzelligen Varianten, sie gleichen das aber durch eine höhere Gesamtüberlebensrate aus.

Herausforderungen der Vielzelligkeit

Im Rahmen der Evolutionslehre wird davon ausgegangen, dass Mehrzelligkeit entstand, als sich Einzeller in Kolonien zusammenschlossen, um ihre Überlebenschancen zu erhöhen. Dies wird heutzutage auch bei Bakterien in Biofilmen beobachtet. Damit aus einer Einzeller-Kolonie aber ein höherer Organismus entsteht, bedarf es einer ganzheitlichen Umstrukturierung der Zellen, denn die Vielzelligkeit bringt große physikalische und biologische Herausforderungen mit sich. Zudem muss auch ihr genetisches Informationssystem neu organisiert werden, damit die Programme in den verschiedenen Zellen reguliert werden können. Dies geschieht durch epigenetische Programmierung. Außerdem müssen die Zellen aufeinander abgestimmt sein und miteinander kommunizieren. Große Organismen können nicht einfach als riesige Einzeller existieren, die zu immensen Größen heranwachsen, weil biophysikalische Gesetzmäßigkeiten (Diffusion, Austausch von Signalen usw.) und bioenergetische Beschränkungen (abnehmendes Volumen-Oberflächen-Verhältnis) dies unmöglich machen.

Die Vielzelligkeit bringt große physikalische und biologische Herausforderungen mit sich.

Um diese physikalischen Probleme zu überwinden, bedarf es präziser Lösungen. Die zu erfüllenden Funktionen müssen auf verschiedene Zellen aufgeteilt werden, wozu es einer genauen Organisation bedarf. In einzelligen eukaryotischen Organismen geschieht dies mit Hilfe von Organellen wie z. B. Mitochondrien, die auf die Energiegewinnung spezialisiert sind. Um größere Organismen zu bilden, sind spezialisierte Zellgruppen, Gewebe und Organe erforderlich, also mehrzellige Systeme aus spezialisierten Zellen. Mehrzelligkeit ist also eine notwendige Voraussetzung für alle höheren Lebensformen, und dies erfordert neben einem völlig anderen Zelltyp (mit Zellkern und Zellorganellen) auch Abstimmungen zwischen den verschiedenen Zelltypen.

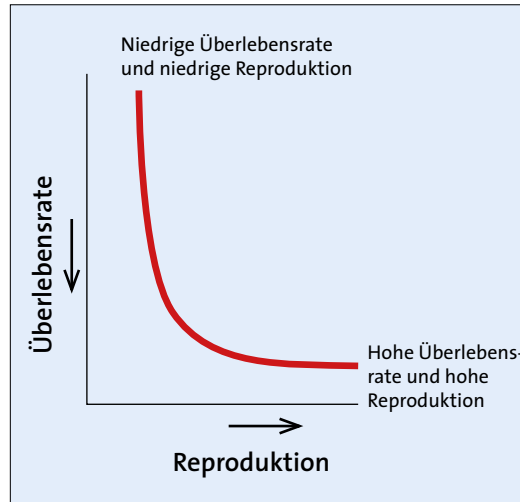


Abb. 1 Evolutionstheoretiker versuchen, die Entwicklung mehrzelliger Gruppen aus Einzelzellen im Rahmen eines Kompromisses zwischen Reproduktion und Überleben zu verstehen. Die rote Kurve zeigt, dass eine abnehmende Überlebensrate mit einer erhöhten Reproduktion einhergeht. Daraus ergibt sich die konvexe Trade-off-Kurve. (Nach BERNARDES 2021, geändert)

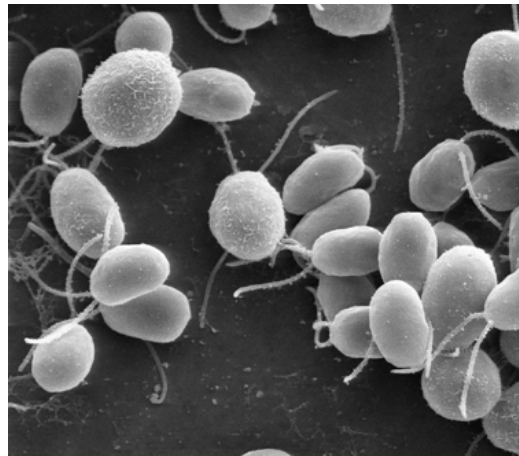


Abb. 2 REM-Aufnahme der Grünalge *Chlamydomonas reinhardtii*. (Bild: Gemeinfrei)

Wie entstand die Vielzelligkeit im Experiment?

Ausgangspunkt für die Studie von BERNARDES et al. waren Einzelzelllinien der Grünalge *Chlamydomonas reinhardtii*, ein kernhaltiger, eukaryotischer, photoautotropher Organismus mit allen erforderlichen Zellorganellen. Sie wurden in An- beziehungsweise Abwesenheit eines Räubers, des Rädertierchens *Brachionus calyciflorus*, jeweils sechs Monate lang in einem Medium kultiviert. Nach sechs Monaten (das entspricht etwa 500 Generationen) zeigten alle zehn Zelllinien, die in Anwesenheit des Rädertierchens wuchsen, Kolonien, während in Abwesenheit des Räubers nur 4 von zehn diese Eigenschaft entwickelten. Was bedeuten diese Befunde für die Evolution der Vielzelligkeit? Überhaupt nichts. Es ist vielmehr ein weiteres Beispiel für die Selektion von Merkmalen, die schon zuvor vorhanden waren und dadurch leicht abgerufen werden können, wenn die Algen durch Räuber befallen werden.

Die Gattung *Chlamydomonas* ist dafür bekannt, dass sie unter Stressbedingungen mehrzellig werden kann.

Eine naheliegende Frage ist, warum die Forscher mit *Chlamydomonas reinhardtii* begonnen haben, um die Evolution der Vielzelligkeit zu dokumentieren. Diese Gattung (*Chlamydomonas*) ist dafür bekannt, dass sie unter Stressbedingungen mehrzellig werden kann. Die Bildung von Zellgruppen in *C. reinhardtii* kann zum Beispiel durch organische Säuren oder Salzstress ausgelöst werden, schreiben die Autoren. Handelt es sich also um ein bereits vorhandenes, programmiertes Merkmal, das ohne Weiteres aktiviert werden kann? Und damit um einen Weg, der in Gegenwart von Fressfeinden leicht gefunden werden kann, wie der Evolutionsbiologe Andreas WAGNER ausführlich darlegte? (WAGNER 2017). Was wäre passiert, wenn die Wissenschaftler um BERNARDES von einem Einzeller ausgegangen wären, von dem wir wissen, dass die Gattung, der er angehört, nicht in der Lage ist, Mehrzelligkeit zu erzeugen?

In „The edge of evolution“ sagt Michael BEHE voraus, dass sich nichts entwickeln wird, was mehr als vier gleichzeitig auftretende zufällige Mutationen erfordert. Wenn die Evolution der Vielzelligkeit innerhalb dieser Reichweite liegt, sollte sich das Merkmal nach BEHE entwickeln können. Sie kann dann als ein vorgegebener Weg betrachtet werden, der Lebewesen hilft, in Stresssituationen zu überleben. Experimentell wäre festzustellen, ob die Veränderung umkehrbar ist, d. h. ob sie mit der Zeit verschwinden und wieder auftauchen kann. Die Umkehrbarkeit würde mit dem übereinstimmen, was wir von einem molekularbiologischen Mechanismus, wie z. B. der Umlagerung von Transposonen*, erwarten würden. Leider gibt es hierzu bisher keine Daten.

Programmierung der Anpassung

Bei verschiedenen Stämmen fanden die Forscher dasselbe Merkmal der Entstehung von Kolonien, das sich mehrmals unabhängig voneinander entwickelte. Dies zeigt, dass diese Anpassung an Fressfeinde kein zufälliger Prozess ist, sondern programmiert. Von Beginn des Experiments an war klar, dass diese Anpassung in der Population stattfinden würde. Das ist etwas anderes als die ursprüngliche Idee, dass die Wege der Evolution nicht vorhergesagt werden können. Neuere Studien zur molekularen Evolution zeigen ein ähnliches Ergebnis. In dem bekannten Langzeitevolutionsexperiment mit *E.-coli*-Bakterien von Richard LENSKI wurde ebenfalls beobachtet, dass mindestens zwei Linien separat evolvierender Bakterien unabhängig voneinander zu genau demselben Genregulationsmuster gelangten. Unter mehreren Tausend Genen, die im Genom der beiden

Bakterienlinien vorhanden sind, befanden sich lediglich 59, deren Aktivität sich im Lauf des Experiments geändert hatte. Ihre Aktivitäten waren aber nicht willkürlich verändert. Stattdessen war die Exprimierung* der Gene in beiden Organismen auf genau dieselbe Weise verändert. Wenn die Aktivität eines bestimmten Gens in Stamm eins zugenommen hatte, dann war das auch in Stamm zwei auch der Fall. Wenn die Aktivität eines anderen Gens in Stamm eins verringert war, dann war das auch in Stamm zwei der Fall – dieses Muster wurde öfter beobachtet. LENSKIS Ergebnisse waren beachtenswert, da die genetischen Änderungen eine vorgegebene Richtung anzustreben schienen. (COOPER 2003).

Die Anpassung an Fressfeinde ist kein zufälliger Prozess, sondern programmiert.

Um die Vielzelligkeit in Grünalgen zu bewirken, war ebenfalls nur die Veränderung einer begrenzten Anzahl von Genen erforderlich. Transkriptomunterschiede* zwischen Zellgruppen und Einzelzellen ergaben 76 unterschiedlich exprimierte Gene (57 hochregulierte und 19 herunterregulierte in gruppenbildenden Grünalgen). Und der begrenzte Zeitrahmen des Experiments von nur sechs Monaten (<500 Generationen) für die Entwicklung der Mehrzelligkeit ist extrem schnell und bedarf keiner großen Zeiträume, wie sie oft für die Darwin'sche Evolution postuliert werden. Kann dies aber durch Mutation und Selektion geschehen? Obwohl die Forscher eine Sequenzierung des gesamten Genoms durchgeführt haben, berichten sie nicht über die Beteiligung von transponierbaren Elementen, die in LENSKIS Experiment die meisten der adaptiven Phänotypen hervorgerufen haben. Dennoch sind sich die Autoren dieser Arbeit darüber im Klaren, dass es sich nicht um einen zufälligen Prozess handeln kann. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass „der ziemlich hohe Grad an Wiederholbarkeit und die geringe Anzahl an Generationen auf einen gewissen Grad an Determinismus für die phänotypische und genomische Reaktion von *C. reinhardtii* auf Druck durch Fressfeinde schließen lassen.“

Das ist eine beeindruckende Aussage, die in der Wissenschaftspresse zu diesem Thema so nicht zu lesen war (BERNARD 2021). Vorhersagbare genetische Veränderungen in der Genexpression sind auch bei den Flügelmustern von Schmetterlingen zu beobachten (LARTER 2018). Ist also Abruf vorhandener Programmierungen die Erklärung, die die Evolutionsbiologie liefern kann, nachdem die Molekularbiologie und

die genetischen Mechanismen der Anpassung aufgedeckt wurden? In der Tat zeigt die neue Ära der Molekularbiologie immer deutlicher, dass Anpassungen im Voraus festgelegt sind! Dies steht im Einklang mit der Hypothese, dass das Leben das Produkt eines vorausschauenden Designers ist.

Literatur

- BERNARD E (2021) Evolution in Echtzeit. Einzellige Grünalge vollzieht in nur 500 Generationen die ersten Schritte zur Mehrzelligkeit. <https://www.sci-nexx.de/news/biowissen/evolution-in-echtzeit/>
- BERNARDES JP et al. (2021) The evolution of convex trade-offs enables the transition towards multicellularity. *Nat. Comm.* 12, 4222, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24503-z>
- COOPER TF, ROZEN DE & LENSKI RE (2003) Parallel changes in gene expression after 20,000 generations of evolution in *Escherichia coli*. *Proc. Natl. Acad. Sci.*

Glossar

- Exprimierung:** Ablesen und Nutzen von Genen.
- Transkriptom:** Eine Momentaufnahme der gesamten RNA-Transkripte, die in einer Zelle oder Gewebe vorhanden sind.
- Transposon (pl: Transposons, oder: Transposonen):** Genetisches Element (DNA-Sequenz), das sich im Genom umlagern und somit neue genetische Zusammenhänge erzeugen kann. Transposons werden derzeit als wichtige Triebkräfte für Anpassungen auf mikroevolutiver Ebene angesehen, aber auch als Triebkräfte für die großen phänotypischen Veränderungen, die für die Makroevolution erforderlich sind. Es sollte beachtet werden, dass sie dem Genom keine neuen genetischen Informationen hinzufügen, sondern bereits vorhandene genetische Programme freisetzen können.

USA 100, 1072–1077.

- LARTER M, DUNBAR-WALLIS A, BERARDI AE & SMITH SD (2018) Convergent Evolution at the Pathway Level: Predictable Regulatory Changes during Flower Color Transitions. *Mol. Biol. Evol.* 35, 2159–2169.
- WAGNER A (2014) Arrival of the fittest. *One World Publications.*

Verhaltensänderung bei Ameisen – welchen Einfluss haben Gene?

Aus unserer Alltagserfahrung wissen wir, dass bestimmte Stoffe unsere Befindlichkeit beeinflussen können; so wirken z. B. Coffein bzw. Teein belebend. Die Wirkung von Toxinen und viele von ihren Angriffsorten in unserem Körper sind uns bekannt und wir wissen, wie sie in biochemische Abläufe eingreifen. Können einzelne Stoffe oder Gene aber auch das Verhalten verändern? An Ameisen wurde eine Studie veröffentlicht, die die Richtung weisen könnte, wie man solche Zusammenhänge verstehen lernen könnte.

Harald Binder

Ameisen zeigen als soziale Insekten in ihren Staaten klare Aufgabenteilungen, die mit einer Zuordnung in unterschiedliche Kasten einhergeht. Für die Fortpflanzung ist die Königin zuständig, während sich die Arbeiterinnen um Nahrungsbeschaffung, Verteidigung, Pflege u. a. m. kümmern. Bei der sozialen Zuordnung der einzelnen Ameisen spielen chemische Botenstoffe (Hormone) eine Rolle. Wie deren Produktion (Expression) initiiert und reguliert wird, ist noch weitgehend unklar. Als soziale Insekten können Ameisen mit ihren umfangreich beschriebenen Verhaltensmustern ein lehrreiches Modell liefern, um die Zusammenhänge zwischen komplexen biochemischen Wechselwirkungen und dem Verhalten von Individuen und Gruppen besser zu verstehen. Die hier vorgestellte Studie zeigt erste richtungsweisende Schritte für diese Forschung.



Abb. 1 *Harpegnathos saltator*-Arbeiterin mit Beute (Foto: Kalesh SADASIVAN; AntWiki)



Abb. 2 *Harpegnathos saltator*-Arbeiterin im unterirdischen Nest bei der Brutpflege. (Foto: Bert HÖLLEDOBLER; AntWiki)

Wechsel in eine andere Kaste

Die in Indien und Sri Lanka vorkommende Ameise *Harpegnathos saltator* (kein gebräuchlicher deutscher Name bekannt) jagt Beutetiere, an die sie sich anschleicht, sie mit einem Sprung überrascht und mit ihren stark ausgeprägten Mandibeln* überwältigt. Von ihnen ist schon länger bekannt, dass erwachsene Tiere – im Unterschied zu vielen anderen Ameisenarten – die Kaste wechseln können. Fällt die Königin für die Fortpflanzung aus, so können Arbeiterinnen nach vorangehender Selektion durch Kämpfe ihre typischen Tätigkeiten wie z. B. das Jagen aufgeben, stattdessen Eier legen und gegenüber anderen Arbeiterinnen ein dominantes Verhalten demonstrieren. Sie werden als Gamergates bezeichnet und ihre veränderte Lebensweise ist charakterisiert durch eine ca. 5 Mal längere Lebensdauer und veränderte Genexpression*. Auch die Zusammensetzung der Zellen im Gehirn und der Neurohormone ist modifiziert. So ist bereits länger bekannt, dass sich bei reifen Gamergates und Arbeiterinnen die Konzentrationen der beiden Hormone JH3 (juvenile hormone III) und 20E (Ecdysteron) unterscheiden. Die beiden Hormone sind bei der Metamorphose von Insekten von Bedeutung. Ein bei vielen Insekten sehr ähnlicher Transkriptionsfaktor* mit der Bezeichnung „Krüppel homolog 1“ (Kr-h1) wird von den Hormonen JH3 und 20E beeinflusst. Erstaunlicherweise korreliert dessen Expression* mit dem unterschiedlichen Verhalten und der entsprechenden Kastenzugehörigkeit bei sozialen Insekten.

GOSPOCIC et al. (2021) haben nun durch unterschiedliche experimentelle Methoden den

Die veränderte Lebensweise der als Gamergates bezeichneten Ameisen ist charakterisiert durch eine ca. 5 Mal längere Lebensdauer und veränderte Genexpression.

Zusammenhang zwischen der Expression* von Kr-h1 und seinem Einfluss auf die Hormone JH3 und 20E und den kastenspezifischen Gehirnzuständen bei den Ameisen (*H. saltator*) genauer untersucht. In Zellkulturen aus Neuronalzellen* aus den Ameisengehirnen wurde die Wirkung der Hormone in vitro getestet und auch Verhaltensstudien einbezogen, in denen Ameisenvölker sozial manipuliert wurden; außerdem wurden die Auswirkungen genetischer Manipulationen („functional genomics“) in der Studie analysiert.

Aufgrund bisheriger Untersuchungsergebnisse stellten die Autoren die Hypothese auf, dass JH3 und 20E die kastenspezifische Genexpression im Gehirn fördern.

Hormone als Trigger

Erste Auswertungen von RNA-Sequenzanalysen von entsprechend manipulierten *H. saltator*-Gehirnen gaben Hinweise darauf, dass eine Injektion von JH3 bzw. einer ähnlichen Substanz im Vergleich zu einer Negativkontrolle zu einem Transkriptionsmuster im Ameisengehirn führte, das dem einer Arbeiterin entspricht, während die Verabreichung von 20E bzw. einer ähnlichen Substanz ein Transkriptionsmuster ergab, das dem im Gehirn einer Gamergate-Ameise ähnelte. Diese Befunde konnten durch in vitro-Experimente bestätigt werden; wenn Zellkulturen aus dem Gehirn von Ameisenpuppen (*H. saltator*) mit JH3 behandelt wurden, bewirkte das eine verstärkte Expression von Genen, die auch in Neuronalzellen von Arbeiterinnen in hohem Maß ausgeprägt werden. Wurden die Zellkulturen mit 20E behandelt, glich das Expressionsmuster dem von Neuronalzellen aus Gamergate-Gehirnen. Es scheint also, dass durch das Verhältnis der beiden Hormone JH3 und 20E die kastenspezifische Modulation der Ameisengehirnzellen beeinflusst werden kann.

GOSPOCIC et al. haben diesen Befund auch an weiteren sozialen Insekten überprüft: an zwei Ameisenarten mit fixierten Königin-Arbeiter-Kasten und an zwei Arten, deren Völker ein Sozialsystem ohne Königinnen aufweisen; weiter an je zwei Arten von Wespen und Bienen. In allen untersuchten neun Arten werden durch JH3 Gene aktiviert, die für nicht reproduzierende Arbeiterinnen spezifisch sind, während bei Gabe von 20E Gene verstärkt werden, die typisch für reproduzierende Tiere sind.

Nach diesen Erkenntnissen behandelten die Autoren Kulturen aus Neuronalzellen von Ameisengehirnen mit JH3 und 20E in einem Verhältnis, das kastenspezifische Entwicklungen in Richtung jagender Arbeiterin oder Gamergate induziert. Dabei untersuchten sie, welche

Mit einem Stern* ver-sehene Begriffe werden im Glossar erklärt.

Das Ausschalten von Kr-h1 zeigt entsprechende Wirkung: In Arbeiterinnen wird das Jagdverhalten unterbunden, wohingegen es in Gamergates initiiert wird.

Gene für Transkriptionsfaktoren durch die Hormone auffällig beeinflusst werden. Die Expression von fünf Transkriptionsfaktoren wurde in beiden Fällen deutlich verändert. Kr-h1 wurde als einziger Transkriptionsfaktor in beiden Fällen sehr früh (nach 6 h) und anhaltend (nach 24 h) auf einem stark erhöhten Niveau ausgeprägt; deshalb konzentrierten sich GOSPOCIC et al. auf diesen. Durch eine spezielle Sequenzierungsmethode (ChIP-Sequenzierung) konnte gezeigt werden, dass Kr-h1 an insgesamt 5981 Genen in irgendwelchen Bereichen bindet, z. B. am Promotor*. Weitere Untersuchungen ergaben, dass 711 bzw. 829 Gene spezifisch in Arbeiterinnen bzw. in Gamergates mit Kr-h1 besetzt sind. Die Gene, an die Kr-h1 kastenspezifisch bindet, werden in der jeweils anderen Kaste stärker exprimiert, das bedeutet, dass Kr-h1 als kastenspezifischer Repressor* wirkt. Kr-h1 bindet an bestimmte Gene in den Gehirnen von Arbeiterinnen und Gamergates und unterdrückt damit deren Reaktion auf JH3 bzw. 20E. Kr-h1 scheint also ein kastenspezifischer Repressor für die Translation* im Gehirn von *H. saltator* zu sein. Nimmt man Kr-h1 im Gehirn von noch unreifen Arbeiterinnen experimentell aus dem Spiel (durch komplementäre Bindung an kurze RNA-Moleküle, siRNA), wird die Expression von Gamergate-typischen Genen verstärkt. Umgekehrt werden in unreifen Gamergates dadurch diejenigen Gene aktiviert, die für Arbeiterinnen spezifisch sind.

Auch im Verhalten von *H. saltator* zeigt das Ausschalten (knock down) von Kr-h1 entsprechende Wirkung: In Arbeiterinnen wird das Jagdverhalten unterbunden, wohingegen es in Gamergates initiiert wird. Dabei ist derzeit noch nicht eindeutig geklärt, wie ein und derselbe Transkriptionsfaktor, nämlich Kr-h1, zu dem kastenspezifischen Expressionsmuster und damit auch zum entsprechenden sozialen Status führen kann.

GOSPOCIC et al. fassen ihre erfreulich breit und differenziert angelegte Studie zusammen, indem sie festhalten, dass ihre gewonnenen Daten darauf hindeuten, dass Kr-h1 der zentrale Regulator der Transkription ist, der die Kastenzugehörigkeit bestimmt. In Gamergates wird er durch das Hormon 20E ausgelöst und legt die entsprechende Identität fest durch Unterdrückung der Expression von Genen, die typisch für Arbeiterinnen sind. In Arbeiterinnen löst das Hormon JH3 die Herunterregelung von Genen aus, die für Gamergates spezifisch sind. Die

Glossar

Expression: Umsetzung eines DNA-Abschnitts in RNA oder auch die Übersetzung in Proteine

Mandibeln: dem Oberkiefer entsprechende Mundwerkzeuge

Neuronalzellen: Nervenzellen

Promotor: DNA-Abschnitt vor dem eigentlichen Gen, an den Proteine binden und die Transkription in RNA regulieren.

Repressor: Protein, das an einen entsprechenden DNA-Abschnitt (Operator) bin-

det und damit die Transkription in RNA verhindert. Die RNA-Polymerase kann nicht an den Promotor binden.

Transkriptionsfaktoren: Proteine, die an DNA-Sequenzen binden und das Umschreiben in RNA regulierend beeinflussen.

Translation: Übersetzung einer codierenden DNA-Sequenz (via Transkription in RNA) in Proteine.

Autoren betonen selbst die Grenzen ihrer Studie und die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen, um herauszufinden, wie genau JH3 und 20E das kastenspezifische Verhalten bei *H. saltator* durch Kr-h1 kontrollieren und inwieweit diese Mechanismen das soziale Verhalten und die Plastizität des Gehirns in anderen Tieren beeinflussen könnten.

Fazit

Die hier vorgestellte Studie ist von großem Interesse für Fragestellungen in Bezug auf den Zusammenhang zwischen dem Verhalten von Organismen und der Wirkung bestimmter Stoffe (Hormone). Oder anders formuliert: Welche Rolle spielen einzelne Substanzen für das Verhaltensmuster von Organismen? Sie zeigt, dass wir beim heutigen Stand der Wissenschaft, bei Einsatz unterschiedlichster experimenteller Ansätze und Nutzung hochauflösender analytischer Methoden erste einfache Zusammenhänge bei Insekten zu verstehen beginnen. Aber bereits bei den Aspekten, die wir derzeit erkennen können, wird deutlich, dass es sich bei Insekten um sehr komplexe und hochspezifische Zusammenhänge handelt, die stark auf eine zugrunde liegende intelligente Konzeption hinweisen. Bereits bei den im Vergleich zum menschlichen zentralen Nervensystem wenig komplexen Systemen sind allein schon die biochemischen Wechselwirkungen verzweigt: Ein und derselbe Transkriptionsfaktor Kr-h1 beeinflusst viele Gene. Diese ersten Ergebnisse und Einsichten liefern weitere Hinweise auf eine hierarchisch übergeordnete Systemebene, in der solche Prozesse eingestellt und reguliert werden. Sie weisen darauf hin, dass das komplexe System auf einer hierarchisch höherliegenden Ebene konzeptionell erfasst und reguliert sein muss, auf die wir bisher keinen analytischen Zugriff haben.

Literatur

GOSPOCIC J, GLASTAD KM, SHENG L, SHIELDS EJ, BERGER SL & BONASIO R (2021) Kr-h1 maintains distinct caste-specific neurotranscriptomes in response to the socially regulated hormones. *Cell* 184, 5807–5823.

„Die schönste Überschiebung der Welt“

Die Glarner Hauptüberschiebung prägt als eine scharfe Linie das Landschaftsbild von Teilen der Schweizer Alpen. Sie ist seit über 150 Jahren Gegenstand der Forschung. Die Bewegung kilometerdicker Gesteinspakete auf einer dünnen Überschiebungsfläche ist mit traditionellen Konzepten der Mechanik nur unzureichend erklärbar. Mit der Frage nach dem Mechanismus stellt sich auch die Frage nach der Kontinuität und dem Tempo des Überschiebungsprozesses.

Michael Kotulla

Abb. 1 Tschingelhörner, Glarner Alpen (Schweiz), von Westen gesehen. Glarner Hauptüberschiebung und Martinsloch. Foto: © IG UNESCO-Welterbe Tektonikarena Sardona, Ruedi HOMBERGER.

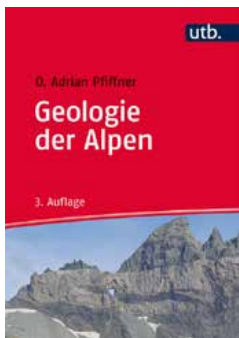


Abb. 2 *Geologie der Alpen* (PFIFFNER 2015, Buchcover)

Mit einem Stern* ver-sehene Begriffe werden im Glossar erklärt.

Einleitung

„Die Glarner Hauptüberschiebung“, so heißt es in einem Video zum UNESCO-Welterbe Tektonikarena Sardona (Schweiz), „gilt als die schönste Überschiebung der Welt“.¹ Sie ist nicht nur schön anzusehen (Abb. 1), sie ist faszinierend und Neugierde weckend. Als Titelbild zur *Geologie der Alpen* stellt PFIFFNER (2015) ihre Bedeutung für das Verständnis zum Prozess der Gebirgsbildung besonders heraus (Abb. 2).

Bei der Glarner Hauptüberschiebung ist eine ältere Gesteinsscholle auf eine jüngere Gesteinsscholle aufgeschoben worden. Älteres Gestein liegt nun großräumig auf jüngerem Gestein (Abb. 3); die Stratigraphie ist dadurch „verkehrt“. Die Überschiebung zeugt von gewaltigen Massenverlagerungen und enormen Kräften, die einstmals gewirkt haben müssen. Das Geschehen soll sich in einer Tiefe von 6–10 km zugetragen haben, bei Umgebungstemperaturen von etwa 220 °C und Drücken von etwa 2000 bar. Die Schubweite beträgt mindestens 30–40 km.

Solch eine Überschiebung ist das Ergebnis von Einengung. Im plattentektonischen Konzept werden die Alpen als Kollisionsgebirge interpretiert. Danach sind u. a. „größere Krustenpakete übereinandergeschoben und zusammengestaucht worden“ (PFIFFNER 2015, 184).

In diesem Sinne handelt es sich bei der Glarner Hauptüberschiebung um eine gewaltige Deckenüberschiebung. Die Glarner Decke (oder Schilt-Decke) über der Hauptüberschiebung ist etwa 2–3 km mächtig und besteht im Wesentlichen aus Verrucano*-Massen.

Überschiebung zum Anfassen: Lokalität Lochsite

Die Lochsite südöstlich Glarus ist ein Weltklasse-Aufschluss. An diesem Ort kann die Überschiebung leicht zugänglich im Sernftal studiert werden (Abb. 4): Permische* Sedimentgesteine der Verrucano-Gruppe überlagern eozäne* Flysch*-Tonsteine. Dazwischen liegt ein wenige Dezimeter dünnes Kalksteinband, der „Loch-

sitenkalk“, in welchem eine messerscharfe Linie (das Septum) verläuft.

Der Lochsitenkalk ist deformiert. Er ist stark mit Kalzit-Adern durchsetzt und weist „Knetstrukturen“ auf, Falten im Zentimeter-Bereich. Der Kontakt zum Verrucano ist durch eine wellige Oberfläche gekennzeichnet. Der Kontakt zum Flysch ist zacken- und lobenartig; teilweise scheint der Flysch in den Kalk „hineinzugreifen“. Deformationen geringeren Grades treten auch im Verrucano und im Flysch auf, allerdings nur etwa in einem Bereich bis von 1–3 Meter oberhalb und unterhalb der Überschiebung. Die makroskopische Aufschluss-Beobachtung legt den Schluss nahe, dass die Hauptbewegung der Überschiebung in dem Bereich stattgefunden hat, der vom Lochsitenkalk eingenommen wird – der Lochsitenkalk also als verfestigtes Schmiermittel die Gleitzone repräsentiert (Abb. 4).

Neuere petrologische* und geochemische Studien des Lochsitenkalks weisen an Komponenten sowohl viskose (Kristallplastizität, korngrößensensitives Kriechen etc.) als auch kataklastische (Zerreibungs- und Zerbrechungsstrukturen) Deformationsprozesse und den Einfluss von Fluiden* nach (HERWEGH et al. 2008). Unzweifelhaft ist der Lochsitenkalk das Ergebnis hoher Scherverformungen; er wird deshalb auch als Lochsiten-Tektonit bezeichnet. Die Herkunft des Kalkes bzw. der Kalziumkarbonat-reichen Lösungen ist einer von zahlreichen Diskussionspunkten; u. a. wird angenommen, dass er aus dem unterliegenden Flysch herausgelöst wurde. Insofern wäre der Lochsitenkalk an dieser Lokalität als hydrothermale Mineralisation aufzufassen (HÜRZELER & ABART 2008).

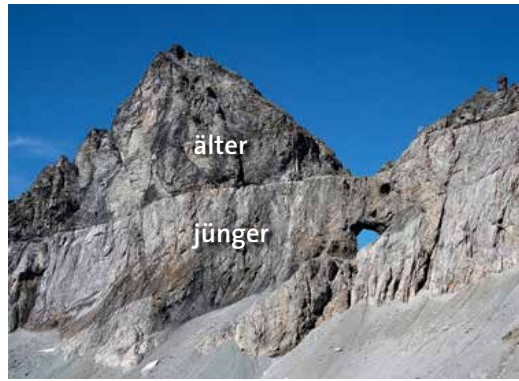


Abb. 3 Die Glarner Hauptüberschiebung und das Martinsloch in den Tschingelhörnern; von Osten gesehen. Eine „Alt-auf-Jung“-Situation: Verrucano-Sedimentgestein (Perm) auf Quinten-Kalk (Oberjura). Foto: © IG UNESCO-Welterbe Tektonikarena Sardona, Ruedi HOMBERGER.

Zur Erforschung des Mechanismus

Zur Erforschung des Überschiebungsprozesses gilt es alle Situationen im Bereich der Überschiebungszone zu erfassen und zu berücksichtigen.

Weiter im Süden liegt Verrucano auf jurassischen oder kretazischen sedimentären Kalken auf. Am Top dieser Kalksteine ist ein dünnes, helles Band ausgebildet, ein „Mylonit“*; er wird auch als Lochsiten-Kalkmylonit bezeichnet. Er repräsentiert – wie an der Lokalität Lochsite – den „Fließhorizont“, über welchen die Verrucano-Massen „glitten“, das verfestigte Schmiermittel.

Bei den Tschingelhörnern (Abb. 5) zum Beispiel befindet sich unterhalb der Glarner Hauptüberschiebung (4a) zwischen Verrucano (1) und eozänem Sardona-Flysch (3a) eine Scholle des oberjurassischen Quinten-Kalks (2). Die Kalkscholle ist ein beim Überschieben mitgerissenes Gesteinspaket, in welchem sogar noch Fetzen sog. Wildflyschs eingeschuppt sind (3b). Insofern sind Quinten-Kalk (3a) und Sardona-Flysch (2) ebenfalls durch eine Überschiebungsfäche (4b) getrennt.

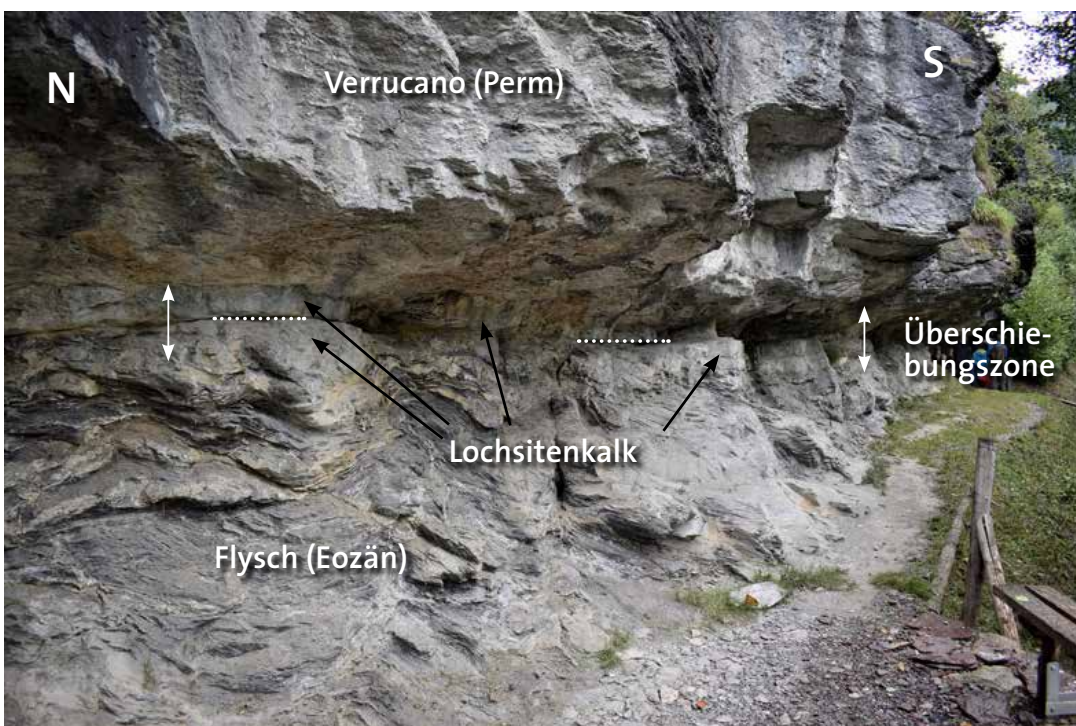


Abb. 4 Lokalität Lochsite südöstlich Glarus im Serrnftal. Hier liegt Verrucano (Perm) auf Flysch (Eozän), dazwischen befindet sich der Lochsitenkalk. Der deformierte Lochsitenkalk repräsentiert die Überschiebungszone (weißer Doppelpfeil); er bildete das Schmiermittel für die „fließende Gleitung“. Im Lochsitenkalk ist eine messerscharfe Linie ausgebildet, das sog. Septum (weiße gepunktete Linie); zur Interpretation s. Textteil. Bewegungsrichtung: relativ nach Nordwesten; N = Norden, S = Süden. Foto: M. KOTULLA, 2021.

Glossar

Eozän: Geologische Serie; 2. Serie des Känozoikums (etwa 56–34 Millionen radiometrische Jahre vor heute).

Fluid: Gemisch aus Flüssigkeiten und Gasen; hier unter erhöhten Druck- und Temperaturbedingungen.

Flysch: Gesteins-Vergesellschaftung; im Wesentlichen Wechsellagerungen von Sandsteinbänken mit Tonstein-Zwischenlagen. Die marinen Sedimentgesteine werden als Ablagerungen interpretiert, die sich an der Front eines entstehenden Gebirges bilden.

Mylonit: Tektonisch beanspruchtes Ge-

stein, das sich in Scherzonen bildet.

petrologisch: die Gesteinskunde betreffend bzw. mithilfe der Gesteinskunde.

Perm: Geologisches System; stratigraphisch oberste Einheit des Paläozoikums (etwa 299–252 Millionen radiometrische Jahre vor heute).

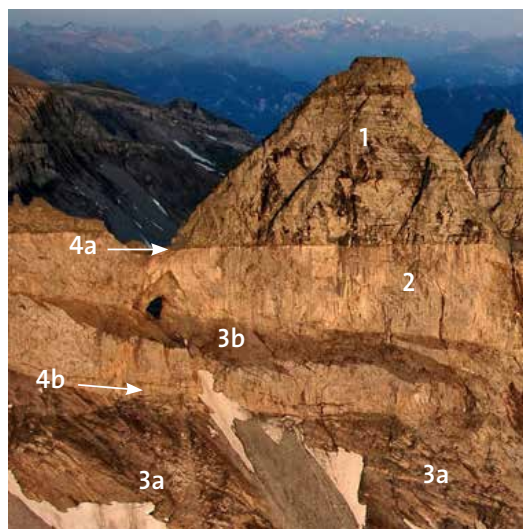
Verrucano: Gesteins-Vergesellschaftung; sie umfasst Brekzien, Konglomerate, Sand, Silt- und Tonsteine sowie vulkanische Gesteine. Die Gesteine werden als Ablagerungen eines von Vulkanen gesäumten Inlandbeckens interpretiert.

„Die Verrucano-Gesteine wurden wie auf einem Luftkissen aus Methan, Kohlendioxid und Wasser über die Flysch- und Kalksteine geschoben.“

Moderne Untersuchungen verbinden Feldbeobachtungen, petrologische und geochemische Reihenanalysen, Laborexperimente und Modelle. Aspekte, die zum Mechanismus diskutiert werden, sind u. a. das „Zusammenspiel von Deformation, Fluide-Fluss und geochemischer Veränderung“, „episodische versus kontinuierliche Verformung und Fluide-Fluss“ sowie die „Verbindung zwischen großräumigen Strukturen, Mikrostrukturen und geochemischen Aspekten“ (HERWEGH et al. 2008). Unter zahlreichen Hypothesen ist die von Joseph MULLIS recht eingängig: „Die Verrucano-Gesteine wurden wie auf einem Luftkissen aus Methan, Kohlendioxid und Wasser über die Flysch- und Kalksteine geschoben“² (vgl. MULLIS et al. 2002).

Fortschritte sind u. a. bei der Ausdifferenzierung von Deformationsregimen, der Erstellung von Deformationsprofilen und der Rekonstruktion bzw. dem Aufbau der Deformationsgeschichte erzielt worden. Demnach ist das meserscharfe, millimeterdünne Septum (Abb. 4)

Abb. 5 Tschingelhörner, Ausschnitt von Abb. 1. Zu den Markierungen siehe Textteil. Foto: © IG UNESCO-Welterbe Tektonikarena Sardona, Ruedi HOMBERGER.



durch kataklastische (spröde) Deformation charakterisiert, während der umgebende Lochsitenkalk (Lokalität Lochsite) bzw. der Lochsitentalkmylonit (südlichen Lokalitäten) intensive duktile (plastische) Deformation aufweist (s. o.), aber auch kleine Brüche.

Der duktile (plastische) Deformationsprozess wird als langfristig, der kataklastische (spröde) Deformationsprozess als extrem kurzzeitig aufgefasst. Letzterer könne – einer Interpretation zufolge – seismischer Natur gewesen sein (Sekunden-Ereignis) mit Schubweiten von „wenigen Dezimetern oder Metern“ (HERWEGH et al. 2008, 334). POULET et al. (2014) sehen in der „schlichten planaren Ausbildung der Glarner Hauptüberschiebung“ „eine komplexe und lang anhaltende Zeitentwicklung“; sie umfasse mehrere kataklastische Ereignisse, die die duktile Deformation entlang der Überschiebung unterbrochen habe. PFIFFNER schließt aus dem mehrfach gefalteten Lochsitenkalk insgesamt auf eine langzeitige Deformationsgeschichte; dabei seien die früheren Strukturen laufend überprägt worden.³

Zeitfragen

HERWEGH et al. (2008) schreiben der Glarner Hauptüberschiebung stratigraphisch ein oligo-/miozänes Alter zu. Nach PFIFFNER⁴ hatte der Vorgang des Überschiebens vor etwa 30 Millionen [radiometrischen]⁵ Jahren begonnen (unteres Oligozän) und war etwa vor 20 oder 15 Millionen [radiometrischen] Jahren zum Abschluss gekommen (unteres/mittleres Miozän). Auch ältere Publikationen nennen eine Zeitdauer von maximal 10 oder 15 Millionen [radiometrischen] Jahren; so werden durchschnittliche Schubraten von 3,5 mm pro [radiometrisches] Jahr (Schubweite 35 km, SCHMID 1975) oder 2 mm pro [radiometrisches] Jahr (Schubweite 30 km, TRÜMPY in Hsü 1969) ausgewiesen.

Hsü (1969) präsentierte kinetische Betrachtungen, deren Ergebnisse aufgrund unzureichend bekannter Parameter nur vorläufigen Charakter haben sollten. Danach könnte die Schubrate, abhängig von der Temperatur, einen maximalen durchschnittlichen Wert von 10 cm pro Jahr erreicht haben; das entspricht einer Minstdauer von 300.000 Jahren. Hsü (1969) nahm an bzw. folgerte, dass die Bewegung durch einen „Stoß von hinten“ in Gang gesetzt worden sei; im weiteren Verlauf könne sich die Bewegung dann durch die Wirkung der Schwerkraft fortgesetzt haben (da ein Gefälle von 10°–12° vorläge; vgl. Höhenunterschied Tschingelhörner zur Tal-Lokalität Lochsite).⁶

In der Hauptsache war die Bewegung der Verrucano-Decke „gleitend“ über einen „Fließhorizont“, der Deformationsprozess also plasti-

scher Natur (s. o.). Bisher ist es aber nicht gelungen, aus den Untersuchungen zur plastischen Deformation auf das Tempo des Überschiebens zu schließen. Vielmehr werden das Tempo oder die Schubraten von radiometrischen Alterswerten abgeleitet bzw. quasi vorgegeben. Eine prozessorientierte Sichtweise steht also noch an ihrem Anfang, und es gilt abzuwarten, was eine unabhängige Forschung, frei von langzeitlichen Vorstellungen, an Ergebnissen liefern wird.

Anmerkungen

- ¹ Video (3:06 min.): Die Entstehung der Alpen. UNESCO-Welterbe Tektonikarena Sardona. <https://www.youtube.com/watch?v=aD7u8Ll2P0g&t=1s>; Welterbe-Website s. <https://unesco-sardona.ch/>
- ² UNESCO-Welterbe Tektonikarena Sardona, Besucherzentrum Elm; Text zu Bild_0130
- ³ <https://vimeopro.com/sardona/die-uberschiebung-und-der-lochsitenkalk/video/72632120>
- ⁴ <https://vimeopro.com/sardona/die-uberschiebung-und-der-lochsitenkalk/video/72633816>
- ⁵ Zur radiometrischen Altersbestimmungsmethode s. KOTULLA (2021)
- ⁶ Die heutige Form der Überschiebungsfläche wird als überprägt, d. h. als nachträglich verändert, aufgefasst.

Literatur

- HERWEGH M, HÜRZELER J-P, PFIFFNER OA, SCHMID SM, ABART R & EBERT A (2008) The Glarus thrust: excursion guide and report of a field trip of the Swiss Tectonic Studies Group (Swiss Geological Society, 14.–16. 09. 2006). *Swiss Journal of Geosciences* 101, 323–340.
- Hsü K (1969) A preliminary analysis of the statistics and kinematics of the Glarus overthrust. *Eclogae Geologicae Helveticae* 62, 143–154.
- HÜRZELER J-P & ABART R (2008) Fluid flow and rock alteration along the Glarus Thrust. *Swiss Journal of Geosciences* 101, 251–268.
- KOTULLA M (2021) Erdgeschichte: Die Erfindung der Zeit. *Studium Integrale Journal* 28, 87–94.
- MULLIS J, RAHN MK, SCHWER P, DE CAPITANI C, STERN WB & FREY M (2002) Correlation of fluid inclusion temperatures with illite “crystallinity” data and clay mineral chemistry in sedimentary rocks from the external part of the Central Alps. *Schweiz. Mine. Petrogr. Mitt.* 82, 325–340.
- PFIFFNER OA (2015) *Geologie der Alpen*. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage; Bern.
- POULET T, VEVEAKIS M, HERWEGH M, BUCKINGHAM T & REGENAUER-LIEB K (2014) Modeling episodic fluid-release events in the ductile carbonates of the Glarus thrust. *Geophysical Research Letters* 41, 7121–7128.
- SCHMIDT SM (1975) The Glarus overthrust; field evidence and mechanical model. *Eclogae Geologicae Helveticae* 68, 247–280.

Fossile Mikroorganismen in sehr alten Sedimentschichten?

Die wohl größte Lücke im Fossilbericht befindet sich im Bereich der ältesten, d. h. der unten liegenden Sedimentschichten. Dort werden Mikroorganismen als frühe Lebensform vermutet. Daher gibt es seit einigen Jahrzehnten Bemühungen, fossile Hinweise auf Mikroorganismen zu finden. Kürzlich behauptete eine internationale Forschungsgruppe um Barbara CAVALAZZI, die bisher ältesten fossilen Überreste von Archaeen gefunden zu haben. Die Arbeit verdeutlicht die Tendenz zur theoriegeleiteten Auswahl und Beurteilung von Daten zu mutmaßlich frühen Lebensformen.

Boris Schmidtgall

Von der Schwierigkeit, Fossilien von Mikroorganismen zu finden

Fossilien dienen als Stützpunkte für die Rekonstruktion hypothetischer Verläufe der Naturgeschichte. Allerdings sind das Fehlen von Fossilien in einem großen Teil der geologischen Schichten sowie die offenen Fragen, wie vollständig und repräsentativ die gefundenen Fossilien für die entsprechenden Abschnitte der Vergangenheit sind, wiederholt als problematisch konstatiert worden. Mikroorganismen haben eine sehr geringe Aussicht, fossil überliefert zu werden. Besonders ausgeprägt ist der Mangel an Fossilien von Einzellern (Mikrofossilien). Um diese große Lücke im evolutionär gedachten

frühen Bereich der Geschichte des Lebens, also im unteren Teil des Fossilberichts zu schließen, werden viele Bemühungen unternommen, Mikrofossilien zu finden.

Diese Suche ist jedoch besonders erschwert, da die Fossilisation von Einzellern im Vergleich zu vielzelligen Organismen, insbesondere solchen mit Hartteilen, bedeutend weniger wahrscheinlich ist. Ein weiteres Problem bei der Suche nach Spuren früher Mikroorganismen stellen Kontaminationen dar, die sowohl von heutigen Organismen als auch von den Forschern selbst stammen können (GOLD et al. 2017); auch die Verwechslung mit anorganischen Strukturen ist eine Herausforderung. Außerdem sind Befunde, die als fossile Hinterlassenschaften von Bakterien



Abb. 1 In Umgebungen wie dieser wird oft die Entstehung erster Organismen vermutet. (AdobeStock)

oder Archaeen gewertet werden, wenig aussagekräftig bezüglich Eigenschaften wie Stoffwechsel oder molekulare Ausstattung. Befunde zu Mikrofossilien sind daher nicht selten umstritten.

Älteste fossile Rückstände von Mikroorganismen?

Eine internationale Forschergruppe um Barbara CAVALAZZI (2021) präsentierte vor Kurzem einige Funde und stellte sie als sichere und bisher älteste fossile Rückstände von Mikroorganismen dar. Wie viele andere Gruppen zuvor analysierten sie Gesteinsproben aus der in Südafrika gelegenen geologischen Schichtenfolge mit der Bezeichnung „Onverwacht-Gruppe“. Sie entnahmen magmatisches Quarzgestein aus der Kromberg-Formation aus ca. 7-8 km Tiefe und identifizierten in dessen feinen Kanälen Strukturen, die sie als fossile Rückstände von Archaeen deuteten. Nach allgemeiner Auffassung soll die geologische Schicht, aus der die Proben stammen, vor 3,4 Milliarden Jahren¹ auf einer Flachmeer-Vulkan-Plattform entstanden sein. Mit der Zeit soll sich darin durch hydraulische Risserzeugung ein hydrothermales Kanalsystem² herausgebildet haben.

Die Autoren interpretierten die Funde als fossile Rückstände von Mikroorganismen aufgrund von Analysen ihrer Form und der chemischen Bestandteile. Hinsichtlich der Form handelt es sich um unverzweigte Filamente ($\phi = 0,77 \mu\text{m}$) mit einigen Unterbrechungen, was als typisches Erscheinungsbild fossilisierter mikrobiologischer Kulturen gilt. Die Unterbrechungen werden als Folge von Zellteilungen oder vor der Fossilisation stattfindendem Abbau der Zellen erklärt. Die gute Erhaltung der 3D-Struktur dieser Filamente wurde auf einen

schnellen Versteinervorgang zurückgeführt.

Durch Analyse der chemischen Bestandteile der Strukturen wurde Kohlenstoff als eine der Hauptkomponenten ermittelt, wobei auch die Elemente Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff nachgewiesen werden konnten. Die Autoren schlossen daraus, dass es sich um Rückstände mineralisierter Zellwandbestandteile handelt. Überraschenderweise fehlte jedoch ein für alle Lebewesen essenzielles und häufig vorkommendes Element: Phosphor.

Überraschenderweise fehlte in dem mutmaßlichen Mikrofossil das für alle Organismen unverzichtbare Element Phosphor.

Darüber hinaus wurden mittels Massenspektrometrie und Röntgenstrahlung Spuren von Schwefel und Nickel nachgewiesen. Durch weitere Analysen mittels Röntgenstrahlung wurden Rückschlüsse auf die Energie des K-Schalen-Niveaus des Nickels gezogen. Die Ergebnisse passten nach Auffassung der Autoren am besten zu Organonickel-Verbindungen mit Ni in den Valenzstufen II/III. Die Messung der Nickel-Konzentration in den Filamenten ergab ähnliche Werte, wie sie auch in heute vorkommenden methanerzeugenden Mikroorganismen vorgefunden werden.

Auf der Grundlage dieser Daten nehmen CAVALAZZI et al. an, dass es sich bei den von ihnen untersuchten Strukturen um fossile Rückstände von methanerzeugenden Archaeen handelt. Das Hauptargument für die Zuschreibung des methanerzeugenden Stoffwechsels ist, dass heutige methanogene Archaeen nickelhaltige Enzyme für diesen biochemischen Vorgang verwenden.

Zur Deutung der Funde

Insgesamt ist die Deutung der vorgefundenen Strukturen als fossile Rückstände von Mikroorganismen auf den ersten Blick plausibel, wobei die zeitliche Einordnung der Entstehung dieser Fossilien auf dem allgemein angenommenen Alter von 3,4 Milliarden Jahren der Kromberg-Formation beruht und ohne Weiteres vorausgesetzt wird. Problematisch ist allerdings das komplette Fehlen des Phosphors in den Filamenten, da dieses Element in sehr vielen biologisch relevanten Molekülen vorhanden ist. Die Autoren kommentierten diesen problematischen Sachverhalt mit nur einem einzigen Satz: „Die Abwesenheit von P könnte das Ergebnis von Aufnahme [durch andere Organismen] oder Auswaschung dieses bioessenziellen Elements sein.“ Diese Ad-hoc-Erklärung leistet keinen Beitrag zu einem tieferen Verständnis des untersuchten Sachverhalts. Es ist überraschend, dass das im Peer-Review-Prozess des Journals *Science* offenbar nicht angenommen worden ist. Es stellt sich automatisch die Frage, warum andere biologisch relevante Elemente wie Nickel oder Schwefel noch erhalten geblieben sind, während der Phosphor selektiv entfernt wurde.

Sollte es sich tatsächlich um fossile Reste von Mikroorganismen handeln, ist außerdem fraglich, ob sie tatsächlich von methanerzeugenden Archaeen stammen, da diese Schlussfolgerung ausschließlich auf den Daten bezüglich des Vorkommens von Nickel beruht. Da Nickel kein seltenes Element in der Erdkruste ist, rechtfertigt dessen Nachweis und Konzentration in den mineralisierten Strukturen allein nicht den Rückschluss auf einen methanogenen Stoffwechsel früher Organismen. Weitere Daten zur Stützung der These wären zwingend notwendig. Stattdessen berufen die Autoren sich wiederholt auf die allgemeine Annahme, dass methanogene Mikroorganismen zu den ältesten Lebensformen gehören. Zudem setzen sie wie viele andere Autoren völlig unkritisch voraus, dass die frühe Erdatmosphäre sauerstofffrei war – ungeachtet vieler Ungereimtheiten dieser Hypothese (SCHMIDTGALL 2021).

Die Autoren der Arbeit gewichten das Vorkommen des ohnehin häufigen Elements Ni in dem Fund recht hoch und setzen unkritisch voraus, dass die Erdatmosphäre einmal sauerstofffrei war.

In diesem Zusammenhang ist es auffällig, dass in einer Reihe von früheren Arbeiten zu Mikrofossilien über oxygene³ Photosynthese betreibende Organismen berichtet wurde, die be-

reits vor 3,1–3,4 Milliarden Jahren existiert haben sollen (SCHOPF 1993, TICE & LOWE 2004). Einige dieser Befunde wurden später aus fragwürdigen Gründen bestritten (HOHMANN-MARRIOTT & BLANKENSHIP 2011). Es wurde allgemein in Frage gestellt, ob der Fundort ungestört und für mikrobielles Leben geeignet sei. Solche Zweifel bei Mikrofossilfunden können aber prinzipiell immer angeführt werden und sind daher nicht ausreichend, um eine ganze Reihe an Befunden in Frage zu stellen. Gegenwärtig finden Veröffentlichungen über oxygene Mikroorganismen vor 3,4 Milliarden Jahren kaum Beachtung und wurden auch von CAVALAZZI et al. vernachlässigt. Interpretationen wie diejenige von CAVALAZZI et al. ereilt dieses Schicksal dagegen vielleicht deshalb nicht, weil sie mit der Annahme einer frühen sauerstofffreien Atmosphäre zusammenpassen, die für die Evolutionstheorie unverzichtbar ist. Aufgrund von theoretischen Vorgaben wird hier offenbar bezüglich der Qualität der vorgebrachten Argumente mit unterschiedlichem Maß gemessen. Jedenfalls ist es überraschend, dass aus dem unspezifischen Vorkommen von geringen Mengen an Nickel weitreichende Schlussfolgerungen bezüglich des Stoffwechsels der vermuteten Mikroorganismen gemacht werden, während das komplette Fehlen des viel wichtigeren Phosphors, dessen Vorkommen in nennenswerter Konzentration zu erwarten wäre, praktisch ignoriert wird. Es liegt die Vermutung nahe, dass es für CAVALAZZI et al. bei ihrer Dateninterpretation mehr auf die Kompatibilität der Ergebnisse zur Evolutionstheorie ankam als auf die tatsächliche Relevanz der Daten.

Anmerkungen

- ¹ Die hier angeführten Altersdatierungen beruhen letztlich auf radiometrischen Datierungen. Daher sind Altersangaben i. S. v. radiometrischen Jahren und nicht tatsächlichen Jahren zu verstehen.
- ² Systeme, die heißes Wasser aus tiefen Schichten führen. Typische Beispiele hierfür sind Geysire.
- ³ sauerstofferzeugende

Literatur

- CAVALAZZI B et al. (2021) Cellular remains in a 3,42-billion-year-old seafloor hydrothermal environment. *Sci. Adv.* 7, eabf3963.
- GOLD DA et al. (2017) Paleoproterozoic sterol biosynthesis and the rise of oxygen. *Nature* 543, 420–423.
- HOHMANN-MARRIOTT MF & BLANKENSHIP RE (2011) Evolution of photosynthesis. *Annu. Rev. Plant. Biol.* 62, 515–548.
- SCHMIDTGALL B (2021) Die „Sauerstoffkatastrophe“, *Stud. Integr. J.* 28, 13–21.
- SCHOPF JW (1993) Microfossils of the early archaean apex chert: new evidence of the antiquity of life. *Science* 260, 640–646.
- TICE MM & LOWE DR (2004) Photosynthetic microbial mats in the 3,416-Myr-old ocean. *Nature* 341, 549–552.

Streiflichter

■ Moostierchen – willkommen im „explosiven“ Kambrium-Club

Manche von ihnen sehen aus wie kleine Moospolster, sind aber in Kolonien lebende winzig kleine Tiere – Moostierchen (Bryozoa). Die einzelnen Tiere werden als Zooiden bezeichnet und sind meist nur etwa 1 mm groß, auch ihre Kolonien aus einigen Hundert bis einigen Tausend Individuen werden meist nicht größer als einige Zentimeter. Die Kolonien leben meist festsitzend auf hartem Substrat – unterschiedliche Formen bildend (Abb. 1) – im Süßwasser oder im Meer und wurden dort schon in über 8.000 m Tiefe gefunden. Ca. 6.500 heute lebende und ca. 15.000 fossile Arten sind bekannt.

Die Zooiden bestehen aus einem Weichkörper (Mund mit Tentakeln zum Filtrieren von Nahrung, Mitteldarm, Enddarm und After) und meist einer schützenden Schale (Abb. 2); es gibt aber auch schalenlose Arten. Innerhalb der Kolonien gibt es durch unterschiedlich ausgeprägte Zooiden eine Arbeitsteilung: Spezialisierte Individuen sind verantwort-

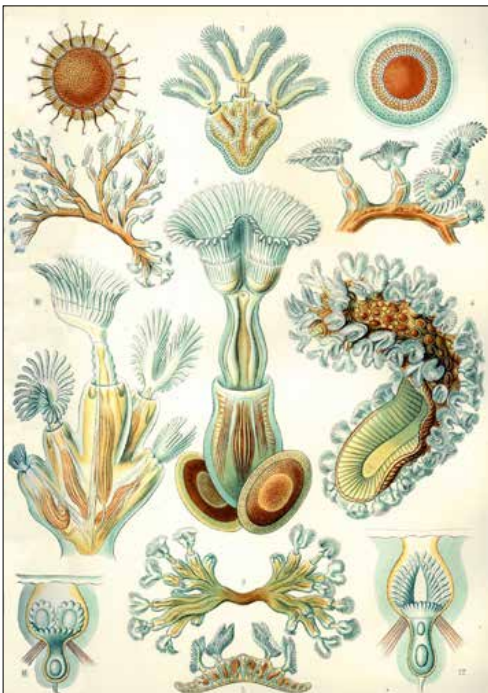


Abb. 1 Moostierchen, aus Ernst HAECKEL, Kunstformen der Natur. (Bild gemeinfrei)

lich für Tätigkeiten wie Reinigung, Verteidigung und Fortpflanzung. Zusammen mit den Armfüßern (Brachiopoda) und Hufeisenwürmern (Phoronida) wurden sie früher dem Tierstamm der Kranzföhler (Tentaculata) zugeordnet, doch sind ihre verwandtschaftlichen Beziehungen nicht geklärt.

Moostierchen waren bisher fossil ab dem unteren Ordovizium bekannt, und zwar mit sechs größeren Ordnungen in unterschiedlichsten Ausprägungen (ZHANG et al. 2021). Das Ordovizium ist die zweitälteste geologische Formation des Paläozoikums. Darunter liegt das Kambrium – besonders bekannt durch die „kambrische Explosion“ – ein mutmaßliches Ereignis, durch das fast alle Tierstämme plötzlich fossil in Erscheinung treten (vgl. ERWIN & VALENTINE 2013; ZHANG et al. 2021). Die kambrische Explosion widerspricht evolutionären Entstehungshypothesen, da Evolution nach üblichen Vorstellungen kleinschrittig verläuft.

Die Moostierchen waren bisher unter den Fossilien der kambrischen Explosion nicht entdeckt worden. Angesichts der fossilen Überlieferung vielfältiger komplexer Formen im unteren Ordovizium und aufgrund von molekularen Daten (molekulare Uhr) wurde jedoch angenommen, dass die Moostierchen auch im Kambrium existiert haben sollten. Das wurde nun durch neue Fossilfunde tatsächlich nachgewiesen (ZHANG et al. 2021). Die Forscher entdeckten eine Reihe von Fossilien aus frühkambrischen Ablagerungen in China und Australien, bei denen es sich eindeutig um Moostierchen handelt. Die Fossilien der neu entdeckten Art *Protomelission gatehousei* bestehen aus millimetergroßen Überresten eines modularen Tieres, dessen Merkmale typisch für Moostierchen sind. Die Einzeltierchen sind alle gleich gestaltet; Schalenelemente wurden nicht entdeckt.

Die Forscher werten die Abwesenheit von Schalenelementen als

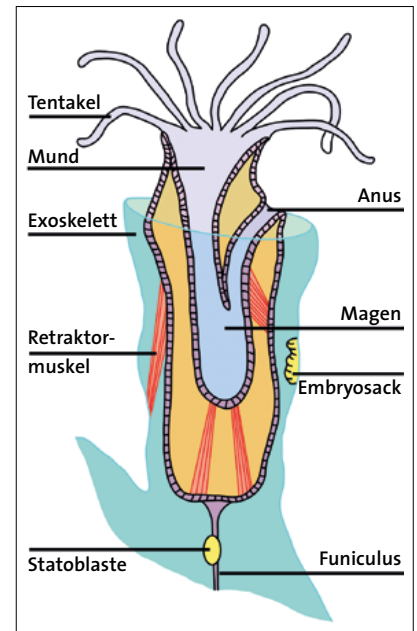


Abb. 2 Anatomie eines Moostierchens. (Bild gemeinfrei)

Grund dafür, dass Moostierchen bisher nicht in kambrischen Schichten nachgewiesen wurden. Heutige Moostierchen-Gruppen ohne Schalen sind ebenfalls fossil nur selten dokumentiert. Entsprechend wird der Besitz von Schalenelementen als Voraussetzung für die Existenz der großen Vielfalt ordovizischer Formen angesehen (ERNST & WILSON 2021).

Protomelission gatehousei kombiniert Merkmale zweier Moostierchen-Gruppen, der Ctenostomatida und Stenolaemata, und wird daher als geeigneter Kandidat für eine Vorfahrenform der anderen Moostierchen angesehen (ERNST & WILSON 2021); allerdings widerspricht eine Merkmalskombination verschiedener Gruppen einer durchgehenden „Primitivität“. Der Moostierchen-Bauplan taucht fossil plötzlich auf, so wie die Baupläne der meisten anderen Tierstämme.

Ähnlich rätselhaft ist die ausgeprägte Diversifizierung im Ordovizium. Sie fällt wahrscheinlich zusammen mit der Existenz von Kalzitmeeren (Kalziumcarbonat, CaCO_3), der zunehmenden Entwicklung von Hartböden und einer robusteren Biomineralisation (so ZHANG et al. 2021). Das sind möglicherweise Bedingungen für die Existenz von beschalteten Formen, aber Randbedingungen sind (generell) keine Ursachen für die Entstehung.

[ERNST A & WILSON MA (2021) Bryozoan fossils found at last in Cambrian deposits. *Nature*, doi: 10.1038/d41586-021-02874-z • ERWIN DH & VALENTINE JW (2013) The Cambrian Explosion. The construction of animal biodiversity. Greenwood Village, Colorado • ZHANG Z, ZHANG Z, MA J et al. (2021) Fossil evidence unveils an early Cambrian origin for Bryozoa. *Nature*, doi: 10.1038/s41586-021-04033-w] R. Junker

■ Ausgefeilte flugtaugliche Konstruktion eines Flugsauriers

Zu den besonders beeindruckenden Geschöpfen gehören zweifellos die nur fossil bekannten Flugsaurier (Pterosaurier). Manche waren nur spatzengroß; die größten unter ihnen besaßen eine Flügelspannweite von mehr als zehn Metern. Man fragt sich unwillkürlich, besonders bei den großen Arten, wie sie fliegen konnten, und diese Frage ist bei Weitem nicht geklärt. Bekannt ist, dass die Flugsaurier besonders leichte und dennoch stabile Knochen hatten. Sie besaßen einzigartige Membranflügel, die von einem überlangen vierten Finger gespannt wurden.

In der Fossilüberlieferung tauchen Flugsaurier als fertige Flieger in Schichten der oberen Trias auf und sind fossil bis zum Ende der Kreide überliefert. Bereits die frühesten Flugsaurier waren geografisch weit verbreitet und ökologisch vielfältig (BRITT et al. 2018). Ganz anders als bei den Vögeln, bei denen das gestaltliche Feld zwischen Theropoden-Dinosauriern und Vögeln mit verschiedenen Mosaikformen gut gefüllt ist, ist die Lücke zwischen Flugsauriern und anderen Echsen seit ihrer Entdeckung vor über 200 Jahren bis heute markant. Ihr Ursprung ist ein „ungelöstes Rätsel“ (EZCURRA et al. 2020). Vom Körperbau her am nächsten heran kommen die Lagerpetidae aus der Obertrias, die sich als wahrscheinlich zweibeinige Läufer fortbewegten. Sie waren jedoch flügellos. Lediglich einige der neuroanatomischen Merkmale, die mit den sensorischen Fähigkeiten zusammenhängen und damit zu den Voraussetzungen der Flugfähigkeit

gehören, waren bei ihnen ausgebildet (EZCURRA et al. 2020), und im Wesentlichen sind es nur diese Merkmale, die sie derzeit als mögliche nächste Verwandte von Flugsauriern qualifizieren.

Eine neue Untersuchung hat nun interessante Erkenntnisse zur Flugfähigkeit der Flugsaurier erbracht. Seit einigen Jahren steht zur Untersuchung von Fossilien die laserinduzierte Fluoreszenz zur Verfügung, ein spektroskopisches Messverfahren auf der Basis von Fluoreszenzanregung durch einen Laser, mit dem auch ehemalige Weichteile von Fossilien zumindest teilweise sichtbar gemacht werden können. Durch Bestrahlung mit einer speziellen Art von Laserlicht können die versteinerten Gewebe dazu angeregt werden, in verschiedenen Farben zu fluoreszieren. Diese Untersuchungsmethode hat auch bei fossilen Vögeln bemerkenswerte Einsichten ermöglicht.

Mithilfe dieser Methode konnte ein Forscherteam um Michael PITTMAN von der Universität Hong Kong Muskeln am Hals und im Bereich des Flügelansatzes eines kleinen Flugsauriers aus der Pterodactylus-Verwandtschaft aus den Solnhofener Plattenkalken nachweisen. Diese Muskeln scheinen die Schultern und den Flügelansatz wie einen kurzen Umhang zu umhüllen. Dadurch wird die Körperform aerodynamischer und Turbulenzen und der Luftwiderstand werden verringert (PITTMAN et al. 2021). Dies erfolgt auf ähnliche Weise, wie das bei Vögeln und Fledermäusen mithilfe von Federn bzw. Haaren geschieht. Die Muskeln wirken somit ähnlich wie Verkleidungen bei einigen Flugzeugen an der Basis der Flügel und sorgen für einen fließenden Übergang vom langen schmalen Hals zu den kräftigen Brustmuskeln und dem Flügelansatz. Die Forscher vermuten, dass sie zugleich den Flügelschlag zudem kräftiger und besser justierbar gemacht haben. Dies dürfte schnelle Flugmanöver ermöglicht haben, wodurch der Flugsaurier wahrscheinlich sogar Insekten jagen konnte. Die Muskelpartie könnte dreifach zweckmäßig gewesen sein: Sie ermöglicht weni-



Abb. 1 Der untersuchte pterodactyloide Flugsaurier zeigt Weichteile an der Basis des Halses, den Schultern und dem Oberarm. (Foto: Michael PITTMAN, CC BY-NC-ND).

ger Luftwiderstand, eine bessere Kontrolle der Flügelposition und einen kräftigeren Flügelschlag.

Je mehr man weiß, desto ausgeklügelter und durchdachter erscheinen die Konstruktionen des Lebens. Die Untersuchungen von PITTMAN et al. bestätigen diese Erkenntnis.

[PITTMAN M, BARLOWA LA, KAYE TG & HABIB MB (2021) Pterosaurs evolved a muscular wing-body junction providing multifaceted flight performance benefits: Advanced aerodynamic smoothing, sophisticated wing root control, and wing force generation. *PNAS* 118, No. 44, e2107631118 • BRITT BB, VECCHIA FMD et al. (2018) *Caelestiventus hanseni* gen. et sp. nov. extends the desert-dwelling pterosaur record back 65 million years. *Nat. Ecol. Evol.* 2, 1386–1392 • EZCURRA MD & NESBITT SJ (2020) Enigmatic dinosaur precursors bridge the gap to the origin of Pterosauria. *Nature* 588, 445–449.] R. Junker

■ Bienen-Nahrung – es darf auch Fleisch und Aas sein

Die uns vertrauten Bienen ernähren sich von Pollen und Nektar. Dagegen verzehren Wespen auch Fleisch, wie man z.B. beim Picknick im Spätsommer beobachten kann, wenn sie aus einem Stückchen Wurst etwas herausbeißen und damit wegfliegen.

Während die bei uns heimischen Bienen als wehrhafte Insekten sich mit einem Giftstachel gegen Störenfriede verteidigen können, kennen

wir aus tropischen Gebieten auch stachellose Bienen (Meliponinae). Diese gab es im Verlauf der Erdgeschichte auch in unseren Breiten, wie durch Bernsteininklusen aus dem Baltikum dokumentiert ist. Die Einschlüsse im baltischen Bernstein (Eozän) liefern uns für diese Zeit Hinweise auf ein subtropisches Klima im Liefergebiet dieses fossilen Harzes.

Bienen gehören zur Insektenordnung der Hautflügler (Hymenoptera). Nach etablierten evolutionären Vorstellungen stehen an deren Ursprung fleischfressende Insekten, die der Familie der Grabwespen (Crabronidae) zugeordnet werden (PETERS et al. 2017). Die Pollen und Nektar verzehrenden Bienen sollen sich in der Kreidezeit im Zusammenhang mit der Verbreitung der Angiospermen (Bedecktsamer) entwickelt haben. Es ist bekannt, dass Vertreter der stachellosen Bienen sich von Fleisch bzw. Aas ernähren. Dies wird als eine Rückkehr zu vermuteten „ursprünglichen“ Ernährungsformen interpretiert.

FIGUEROA et al. (2021) wollten in einer Untersuchung den Zusammenhang zwischen der Nahrung

und der Zusammensetzung der Mikroorganismen im Darm (Mikrobiom) von stachellosen Bienen erkunden. Dazu verteilten sie im Urwald von Costa Rica in der Umgebung von zwei Forschungsstationen entsprechende Köder (z. B. auch Hühnerfleisch oder Aas) und konnten damit 159 stachellose Bienen (Meliponinae) aus 9 Gattungen und 17 Arten sammeln. Darunter waren solche, die sich von Pollen ernährten, aber auch Exemplare, die zusätzlich (fakultativ) oder überwiegend (obligat) Fleisch bzw. Aas als Nahrung nutzen. Aufgrund der geringen Größe der Bienen verwendeten die Forscher jeweils das gesamte Abdomen (Hinterleib) der Insekten, um bestimmte mikrobielle RNA (16S rRNA) zu gewinnen.

Die Forscher identifizierten mehr als 1.900 Sequenzvarianten von 16S rRNA, die sie den entsprechenden Mikroorganismen zuordnen konnten. In obligat aasfressenden Bienen (*Trigona necrophaga*) konnten die Autoren sowohl einige typische Darmbakterien nachweisen als auch neue Milchsäurebakterien und Essigsäurebakterien. Ihre Ernährungsweise geht also einher mit

einer veränderten Zusammensetzung ihres Darm-Mikrobioms. Die Darmbakterien von bekannten Aasfressern wie z. B. Geiern werden von Clostridien und Fusobakterien dominiert. Diese Bakterien finden sich auf dem Aas selbst und sie gedeihen auch im Darm der Geier. Im Darm der Geierbienen finden sich ebenfalls Bakterien, die an den mikrobiellen Verwesungsprozessen von Aas beteiligt sind. Im Mikrobiom der Geierbienen sind säureliebende Bakterien stark vertreten, die man aus der Umwelt der Geierbienen oder auch von anderen Körbchensammler-Bienen kennt. Einige der für *Melipona* typischen Mikroorganismen finden sich auch im Verdauungstrakt von Geierbienen. (Die *Melipona* sind eine Untergruppe der hier untersuchten stachellosen Bienen.) Dies spricht dafür, dass diese sich entweder an die veränderte Ernährung angepasst haben oder dass sie grundsätzliche Funktionen erfüllen, die unabhängig von der Nahrung sind.

Überraschend ist der Nachweis bestimmter Bakterien (*Apilactobacillus micheneri*), die nicht auf den Ködern gefunden wurden, jedoch auf Blüten und Früchten der Pflanzen, die auch Geierbienen besuchen, um ihren Kohlenhydratbedarf zu stillen – sozusagen ihr Dessert. Ein saures Milieu im Verdauungstrakt von Aasfressern scheint diese auch vor gefährlichen Keimen (Pathogenen) auf ihrer Nahrung zu schützen; dies ist zumindest bei anderen Aasfressern wie Geiern nachgewiesen und trifft auch mutmaßlich auf die Geierbienen zu.

In stachellosen Bienen, die sich fakultativ von Aas ernähren, fanden FIGUEROA et al. (2021) die größte Vielfalt in der Zusammensetzung des Mikrobioms, zu der vor allem die Bakterien aus der Umwelt der Insekten beitragen.

Die Nahrung scheint also das Mikrobiom der *Melipona* stark zu prägen. Die Autoren betonen, dass der Zusammenhang von aufgenommener Nahrung und Zusammensetzung des Darm-Mikrobioms noch nichts darüber aussagt, was nun am Anfang stand: zuerst die veränderte Nahrung und als Folge davon die



Abb. 1 Geierbienen (*Trigona*) an einem Köder. Mit freundlicher Genehmigung Quinn S. McFREDERICK.

Änderung in der Zusammensetzung der Darmflora oder umgekehrt; es könnten auch beide Phänomene durch ein noch unbekanntes Ereignis in der Geschichte dieser einzigartigen Bienen ausgelöst worden sein.

Die Studie von FIGUEROA et al. (2021) demonstriert einmal mehr, dass mit den derzeit verfügbaren Technologien zur Sequenzierung von Nukleinsäuren (DNA und RNA) interessante Fragestellungen bearbeitet werden können. Für den hier im Fokus stehenden Zusammenhang zwischen Nahrung und Zusammensetzung der Darmflora bei stachellosen Bienen sind damit erste Befunde vorgelegt, die richtungweisend für weitere Studien sein können.

Aus der Perspektive einer schöpfungsbasierten Interpretation von Naturphänomenen gilt es zunächst einmal festzuhalten, dass die für ursprünglich angesehene carnivore Ernährungsweise der Hautflügler eine Hypothese darstellt (die derzeit durch ausgewählte Fossilien plausibel gemacht werden kann). Die hier vorgestellten Befunde sind aber durchaus verträglich mit einer Vorstellung, dass ursprünglich – nicht nur für Hymenoptera – eine vegetarische Ernährungsweise vorherrschte, die im Laufe der Zeit durch Verhaltensänderung in den Verzehr von Fleisch oder Aas verändert werden kann. Zumindest die entsprechende Anpassung der Darmflora scheint möglich zu sein.

FIGUEROA RL, MACCARO JJ, KRICHILSKY E, YANEGA D & McFREDERICK QS (2021) Why did the bee eat chicken? Symbiont gain, loss, and retention in the vulture bee microbiome. *mBio* 12, e02317-21. Peters RS et al. (2017) Evolutionary history of the Hymenoptera. *Curr. Biol.* 27, 1013-1018.] *H. Binder*

■ Bei Wolfsrudeln in freier Wildbahn gibt es keine Alpha-Tiere

Es wird allgemein angenommen, dass Wolfsrudel von einem Alphamännchen und -weibchen angeführt werden, also von Individuen, die aufgrund von Fähigkeiten wie Stärke und Durchsetzungsfähigkeit



Abb. 1 Wolfsrudel (©Xaver KLAUSSNER, Adobe Stock)

bevorzugten Zugang zu Ressourcen haben. Ihre Verhaltensmuster bei der Wahl von Sexualpartnern, der Nahrungsbeschaffung oder Aggression gegen Artgenossen sollen kaum von anderen Gruppenmitgliedern beeinflusst sein. Demgegenüber gibt es untergeordnete Tiere, deren Verhalten unterwürfig ist, sodass sie relativ leicht von anderen Gruppenmitgliedern beeinflusst oder gehemmt werden können. Der Begriff Alphamännchen und -weibchen ist auch auf Menschen angewandt worden. In der populären Humansozilogie wird der Begriff „Alphamännchen“ häufig verwendet, um eine Reihe von sozialen Verhaltensweisen zu beschreiben, die Männer an den Tag legen, um die größtmögliche Gunst ihrer sozialen Gruppe zu gewinnen. „Alphamännchen“ und „Alphaweibchen“ sind diejenigen, die über andere Menschen bestimmen, während sie von keinem Menschen in ihrem Leben kontrolliert werden.

Die Vorstellung von Alphamännchen und -weibchen, sogenannten „Leitwölfen“, die ein Rudel von Untergebenen führen, beruht auf einer einflussreichen Arbeit von Rudolf SCHENKEL aus dem Jahr 1947 (SCHENKEL 1947). „Durch ständige Kontrolle und Unterdrückung jeglicher Art von Konkurrenz innerhalb des gleichen Geschlechts verteidigen beide ‚Alpha-Tiere‘ ihre soziale Stellung“, schrieb SCHENKEL.

SCHENKELS Artikel mit dem Titel „Expression Studies on Wolves“ wurde häufig zitiert und popularisiert. In Wolfsrudeln führen demnach offenbar die stärksten Tiere das Rudel an und sind für die Nachkommenschaft verantwortlich. Die Schwächeren müssen sich fügen und leisten keinen Beitrag für die nächste Generation – ein Befund, der sehr gut zur Darwin’schen Theorie passt.

Rudolf SCHENKEL machte seine Beobachtungen jedoch nicht in freier Wildbahn. In seiner Arbeit von 1947 beschrieb er das Verhalten von zehn Wölfen, die im Zoo Basel in der Schweiz in einem relativ kleinen Gehege von etwa 10 mal 20 Metern gehalten wurden. Bei seinen Beobachtungen fiel SCHENKEL auf, dass die ranghöchsten Männchen und Weibchen Paare bildeten. Im Laufe der Jahre haben allerdings immer mehr Beobachtungen von Wolfsrudeln in natürlicher Umgebung dazu geführt, dass SCHENKELS Schlussfolgerung bezüglich der Alphantiere angezweifelt wurde (Zusammenfassung in KJØRSTAD 2021).

In den Jahren 1999 und 2000 veröffentlichte David MECH zwei Artikel, in denen er das weit verbreitete Missverständnis korrigierte, wie ein Wolfsrudel organisiert ist. MECH hatte 13 Sommer lang wilde Wolfsrudel auf Ellesmere Island in Kanada studiert. Er beobachtete dabei, dass ein Wolfsrudel immer aus einem

Paar erwachsener Tiere besteht, die er als „Eltern“ oder „Züchter“ (und nicht als „Alphatiere“) bezeichnete, und aus ihrem Nachwuchs. Wölfe kämpfen nicht um die Vorherrschaft in einem Rudel, und „Alphatiere“ gibt es darin nicht. Bei Wolfsrudeln handelt es sich offenbar um Familien. Manchmal wird auch ein einsamer umherziehender Wolf in das Rudel aufgenommen. Die Zusammensetzung von Wolfsrudeln kann sich auch ändern, wenn ein Elternteil stirbt und ein neuer Partner, manchmal mit Jungtieren, aus einer anderen Region eintrifft. Es wurde auch beobachtet, dass eine Tochter zur Partnerin ihres „Stiefvaters“ wird und den Platz der alternden Mutter einnimmt, die im Rudel bleibt (KJØRSTAD 2021).

Heute ist der Begriff „Alpha-Wolf“ unter den auf Wolfsökologie spezialisierten Forschern nicht mehr üblich. In der Umgangssprache ist er jedoch immer noch gebräuchlich und wird es wohl auch in absehbarer Zukunft bleiben. Das Konzept des „Alphatieres“ war im Zoo von Basel relevant, wo SCHENKEL seine Beobachtungen machte. Aber es sollte klar sein, dass der Lebensraum und die Rudelzusammensetzung der Wölfe dort völlig unnatürlich waren. SCHENKELS Wölfe lebten unter Dauerstress, und ihr abnormales Verhalten schien mit der alten darwinistischen Vorstellung übereinzustimmen, dass Wölfe um die Vorherrschaft in einem Rudel kämpfen und dass der Gewinner der „Alpha“-Wolf ist. In der Natur verhalten sich Wolfsrudel allerdings wie liebevolle und fürsorgliche Familien.

Die veränderte Sichtweise auf das Verhalten von Wolfsrudeln zeigt, dass das, was lange als etablierte Wissenschaft propagiert wurde, nur eine durch unnatürliche Bedingungen (Zoohaltung) verzerrte darwinistische Interpretation des Verhaltens von Wölfen darstellte. Das Beispiel zeigt auch, dass sich falsche Vorstellungen, die auf dünner Datenbasis gründen, sehr zäh in der Wissenschaft und in popularisierten Darstellungen halten können.

[SCHENKEL R (1947) Expressions Studies on Wolves. <http://davemech.org/wolf-news-and-information/schenkels-classic-wolf-behavi->

or-study-available-in-english/ • KJØRSTAD E (2021) Wolf packs don't actually have alpha males and alpha females – the idea is based on a misunderstanding. Science Norway, <https://sciencenorway.no/ulv/wolf-packs-dont-actually-have-alpha-males-and-alpha-females-the-idea-is-based-on-a-misunderstanding/1850514> • MECH LD (1999) Alpha Status, Dominance, and Division of Labor in Wolf Packs. Can. J. Zool. 77, 1196–1203 • MECH LD (2000) Leadership in Wolf, *Canis lupus*, Packs. Canadian Field Naturalist] P. Borger

■ Fliegen geht auch anders

Aktiv fliegende Tiere sind uns aus vier Tiergruppen vertraut: Vögel fliegen mithilfe von Federn, Fledermäuse und Flugsaurier nutzen (bzw. nutzen) eine komplex gebaute Flughaut und Insekten besitzen eine elastische Flughaut aus Chitin. Doch damit sind die Flugtechniken nicht ausgereizt. Unter den Käfern gibt es wahre Winzlinge von teils nur 0,4 mm Größe, die es trotz ihrer

geringen Körpergröße schaffen, aktiv zu fliegen. Anstelle von flächigen Flügeln besitzen sie federartige Flügelstrukturen (Abb. 1). Es handelt sich um die sogenannten Federflügel-Käfer (Ptiliidae), die sich trotz ihrer winzigen Körpergröße erstaunlich flink in der Luft bewegen können. In einer aktuellen Studie haben Wissenschaftler die Flügel des nur 0,4 mm großen Käfers *Paratuposa placentis* und die Flügeldecken genauer untersucht. Der Flugstil der Insekten wurde durch Aufnahmen mittels Hochgeschwindigkeits-Kameras aus verschiedenen Perspektiven und mit 3D-Simulationen untersucht (FARISENKOV et al. 2022).

Ein aktiver Flug ist umso schwieriger, je kleiner das Tier ist. Denn durch die Miniaturisierung muss relativ mehr Kraft aufgewendet werden, weil die Luft sozusagen immer zäher wird, je kleiner der Flieger ist. Generell gilt: Größere Körpergröße

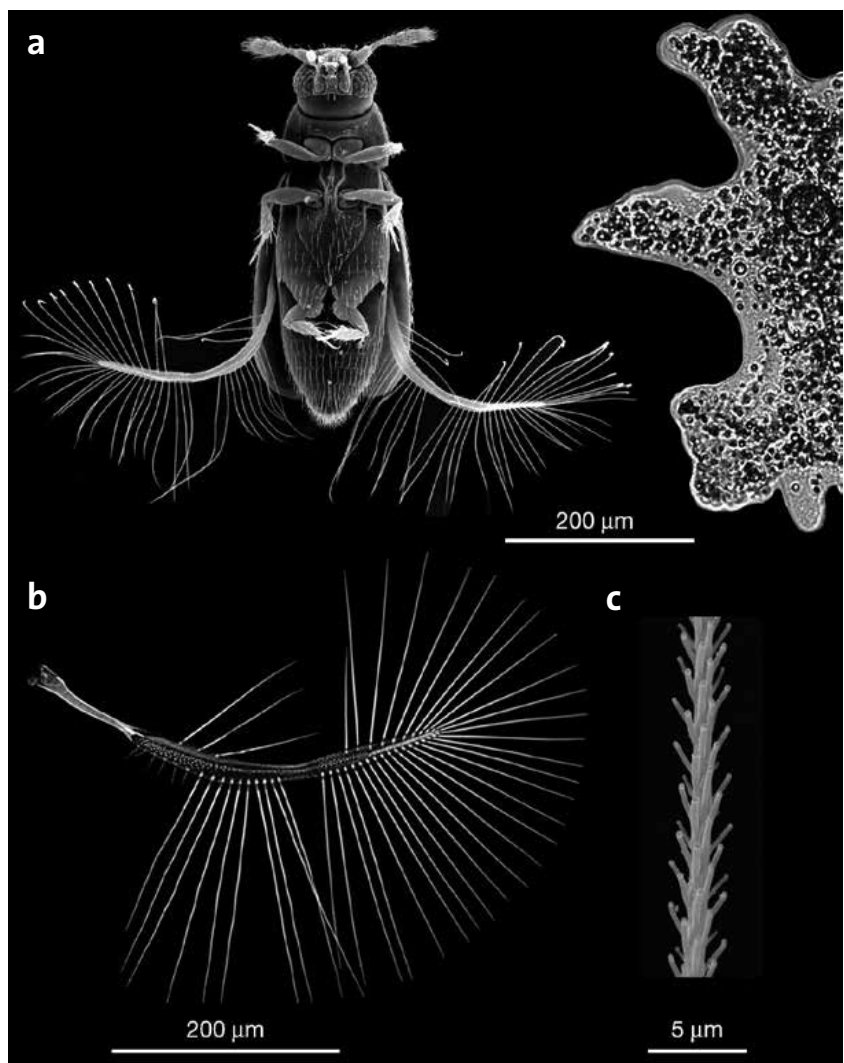


Abb. 1 Federflügel-Käfer *Paratuposa*, rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen. a relative Größe von *P. placentis* (links) und *A. proteus* (rechts), b Flügel von *P. placentis*, c Teil einer Seta (Borste). (Aus FARISENKOV et al. 2022, CC BY 4.0)

ermöglicht einen schnelleren Flug. Die Federflügel-Käfer sind aber so klein, dass die Fähigkeit zum aktiven Flug kaum noch zu erwarten wäre. Dennoch können sie mit Geschwindigkeiten und Beschleunigungen fliegen, die dreimal so hoch sind wie die von anderen kleinen Insekten. FARISENKOV et al. 2022 konnten zeigen, dass diese Leistung auf eine geringere Flügelmasse und einen bisher unbekanntes Flügelbewegungszyklus zurückzuführen ist. Die fiederigen Flügel erwiesen sich als deutlich leichter im Vergleich zu den gängigen Membranflügel. Die einzelnen Borsten der Federstrukturen besitzen weitere kurze Auswüchse (Abb. 1c). Im Zusammenspiel ermöglicht dies den Käfern, ihre Flügel vergleichsweise leicht durch die für sie „zähe“ Luft zu bewegen. Der Flügelschlag folgt einer ausgeprägten Achterschleife, die aus senkrechten Auf- und Abwärtsschlägen besteht. Bei Schlagumkehrungen klatschen die Flügel oberhalb und unterhalb des Körpers fast zusammen. Die freien Zwischenräume der „Federflügel“ sind aufgrund der erhöhten Viskosität (Zähigkeit) der Luft im Miniaturmaßstab kein Problem, da kaum Luft beim Flügelschlag durch die fiederigen Flügel dringt.

Aber nicht nur die ungewöhnlich gestalteten Flügel sind für den Flug entscheidend. Auch die Flügeldecken der Käfer spielen eine wichtige Rolle. Sie bewegen sich im Flug auf eine Weise, dass sie das Schlagsystem der Flügel ausgleichen und dadurch den Flug stabilisieren. Erst das Gesamtsystem ermöglicht die besonderen Flugleistungen der winzigen Käfer.

Die Federflügel-Käfer weisen somit ein deutlich anderes Flugsystem als andere Insekten auf. Für dessen Funktionsweise sind mehrere fein aufeinander abgestimmte Komponenten und zugleich ausgefeilte Bewegungsmuster vonnöten. Einmal mehr sieht es danach aus, dass – jedenfalls im Wesentlichen – das „Alles-oder-nichts-Prinzip“ gilt und zahlreiche feine Abstimmungen erforderlich sind. Dennoch wird sogar eine mehrfach unabhängige Entstehung von Federflügeln auch

in anderen Insektengruppen angenommen (FARISENKOV et al. 2022, 1). Und einmal mehr zeigt sich, dass bei den Lebewesen die Grenzen des physikalisch Vorstellbaren phantasievoll konstruiert ausgenutzt werden – alles zusammen klare Indizien für einen Schöpfer. Kein Wunder, dass die Wissenschaftler damit liebäugeln, die gewonnenen Erkenntnisse bei der Entwicklung von kleinen Fluggeräten nutzen zu können.

[FARISENKOV SE, KOLOMENSKIY D et al. (2022) Novel flight style and light wings boost flight performance of tiny beetles. *Nature* 602, 96–100, doi:10.1038/s41586-021-04303-7] R. Junker

■ Mini-Schnecke wirft Fragen auf

Die Grenzen des physikalisch Möglichen restlos ausnutzen – das scheint die Devise bei der Entstehung der „Extrem“-Lebewesen unter den vielzelligen Tieren zu sein. In dieser Ausgabe von *Studium Integrale Journal* wurde das im Beitrag über die Federflügel-Käfer deutlich. Viele Beispiele dieser Art könnten angefügt werden, etwa ultraleichte Kolibris oder die Zwerg-Fledermaus (*Pipistrellus pipistrellus*), die kaum mehr wiegt als ein halbes Blatt Schreibmaschinenpapier.

In die Reihe der Miniatur-Vielzeller reihen sich auch winzige Schnecken ein, die kleiner sind als ein Sandkorn. Erstaunlich, dass sie überhaupt entdeckt wurden. Eine Forschergruppe fand kürzlich im Sediment einer Höhle in Nordviet-

nam zahlreiche winzige Schneckengehäuse, die im Schnitt nur 0,48–0,57 mm hoch und 0,6–0,68 mm lang waren (PÁLL-GERGELY et al. 2022). Die neue Art aus der Schneckenordnung Stylommatophora erhielt den Namen *Angustopila psammion* (Abb. 1). Das Schalenvolumen betrug inklusive der Schale minimal nur 0,036 mm³. Damit unterbot die *A. psammion* den bisherigen Minusrekord von Landschnecken. Noch kleinere Formen sind nur aus dem Meer bekannt. Der bisherige Minusrekordhalter auf dem Land war *Acmella nana*, die zu einer anderen Schneckenordnung gehört, mit einer Schalenhöhe von 0,60–0,79 mm und einer Schalenweite von 0,5–0,6 mm (PÁLL-GERGELY et al. 2022, 72).

Je kleiner ein Organismus, desto höher die Anforderungen an seine Organe und an seinen Energiehaushalt. Warum tun sich Lebewesen diese Miniaturisierung also an, könnte man salopp fragen. Evolutionsbiologen formulieren daraus die Frage, welche Selektionsdrücke die Miniaturisierung begünstigen, obwohl das Überleben zunehmend schwieriger wird, je geringer die Körpergröße ist. Auch PÁLL-GERGELY et al. (2022, 63) werfen angesichts der neu entdeckten Mini-Schnecke diese Frage auf. Die evolutionären Triebkräfte für die extrem kleine Körpergröße bei wirbellosen Tieren seien in der Evolutionsbiologie nach wie vor umstritten, da einerseits die „Möglichkeiten der Anpassung“, andererseits auch physische und physiologische Zwänge aufeinandertreffen. Die Autoren dis-

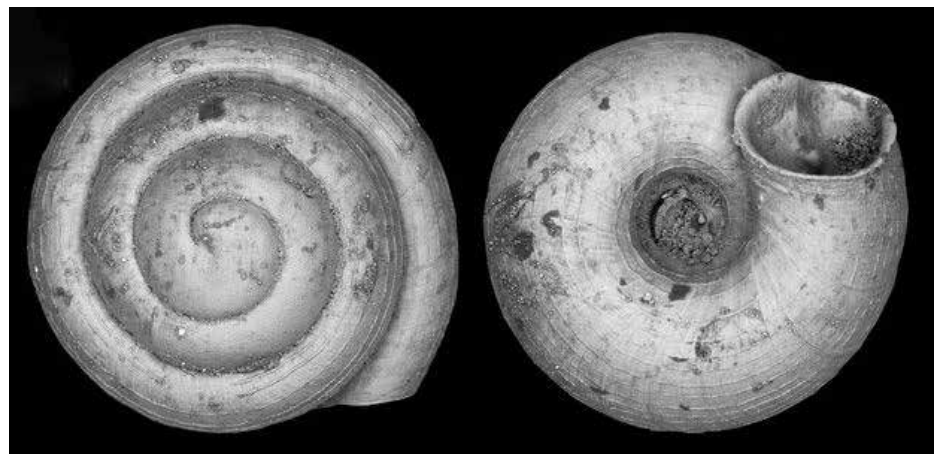


Abb. 1 *Angustopila psammion*. (Foto: Senckenberg)

kutieren, dass die geringe Körpergröße die Aufnahme von sehr kleinen Nahrungspartikeln ermöglicht, ebenso den Zugang zu feinen Spalten, die für größere Tiere zu klein sind. Außerdem macht extreme Kleinheit die Tiere für Räuber unattraktiv und gibt bessere Chancen, unentdeckt zu bleiben.

Aber erklärt das die Evolution der Mini-Schnecken? Den möglichen Vorteilen, die nur auf Mutmaßungen beruhen, stehen harte physische und physiologische Einschränkungen gegenüber. Es wird vermutet, dass Sinnesrezeptoren und die Verarbeitung von Reizen im Gehirn unterhalb einer bestimmten Größe nicht mehr funktionieren, weil die Anzahl der verfügbaren Zellen unter einen lebensfähigen Schwellenwert fällt. Ein weiteres Problem ist eine erhöhte Gefahr des Austrocknens, da das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen bei den kleinsten Landschnecken extrem hoch ist. Außerdem muss die Schneckenschale ausreichend Platz für mindestens ein Ei bieten. Aus diesen Gründen vermuten die Wissenschaftler, dass die Tiere nicht noch kleiner werden können und die minimale Kleinheit erreicht ist.

In einem einflussreichen Artikel haben GOULD & LEWONTIN (1979) das Erfinden von „Anpassungsgeschichten“ kritisiert, mit denen Konstruktionen von Lebewesen durch Evolution erklärt werden. Solche Geschichten seien spekulativ und nicht testbar. Aus der Perspektive der Schöpfung darf man auch spekulieren. Dass die physikalischen Möglichkeiten bis zur absoluten Grenze ausgereizt sind, kann man als Hinweis auf einen Schöpfer werten, der nicht nur gemäß „08/15“ erschaffen hat, sondern Freude am Ausschöpfen des Möglichen hat und dabei nicht allein auf Funktionalität und Zweckmäßigkeit achten muss.

[GOULD SJ & LEWONTIN RC (1979) The Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: A Critique of the Adaptationist Programme. Proc. R. Soc. Lond. B. 205, 581–598 • PÁLL-GERGELY B, JOCHUM A et al. (2022) The world's tiniest land snails from Laos and Vietnam (Gastropoda, Pulmonata, Hypselostomatidae). Contrib. Zool. 91, 62–78, doi:10.1163/18759866-bja10025] R. Junker



Abb. 1 Markante Oberfläche unterhalb der Mättenberg-Nordwand (Grindelwald, Schweiz). Die Pfeile deuten auf die hufeisenförmigen Strukturen (vgl. Abb. 3) und zeigen gleichzeitig die mutmaßliche Strömungsrichtung an. Ausschnitt aus Abb. 2; Foto: M. KOTULLA, 2021.

■ Gletscher- oder Wassererosion?

Zahlreiche Oberflächenformen in den Alpen werden traditionell als Gletscherschliff aufgefasst. Ein Teil dieser Erosionsformen könnte aber durch subglaziale¹ Wasserströme und nicht durch eine Schleifwirkung des Gletschers entstanden sein. Diese Möglichkeit wird für die markante Oberfläche unterhalb der Mättenberg-Nordwand (Grindelwald, Schweiz) in Betracht gezogen.

Beobachtung. Bei einer geologischen Exkursion im Spätsommer 2021 ist einigen Teilnehmern eine markante Oberfläche unterhalb der Mättenberg-Nordwand (Grindelwald, Schweiz) aufgefallen. Sie kann vom Bachbett der Schwarzen Lüttschine aus eingesehen werden (Abb. 2). Dieses Gebiet wurde zuletzt während der kleinen Eiszeit (etwa 1450-1850) vom Oberen Grindelwaldgletscher eingenommen.

Der Kalkstein-Körper hat eine Dimension von wenigen Zehnermetern. Die „Furchen“ der „welligen“ Oberfläche sind nicht eben, sondern steigen etwa in südwestlicher Richtung leicht an. Auffallend sind die liegenden U- oder hufeisenförmigen Strukturen, die links einsetzen und parallel angeordnet sind (Abb. 1, Pfeile).

Interpretation. Die liegenden U- oder hufeisenförmigen Strukturen

ähneln sog. Hufeisenwirbeln (horse-shoe vortices) der skulpturierten Felsen von Cantley (Quebec, Kanada; Abb. 3). In Cantley entstanden diese Erosionsformen durch Fließprozesse, durch subglaziale, schnellströmende Wasser. Aufgrund der Ähnlichkeit der Formen (Cantley – Mättenberg) wird angenommen, dass ihre Entstehung auf gleiche Weise erfolgte. Dabei geben die Pfeile in Abb. 1 auch die Fließrichtung

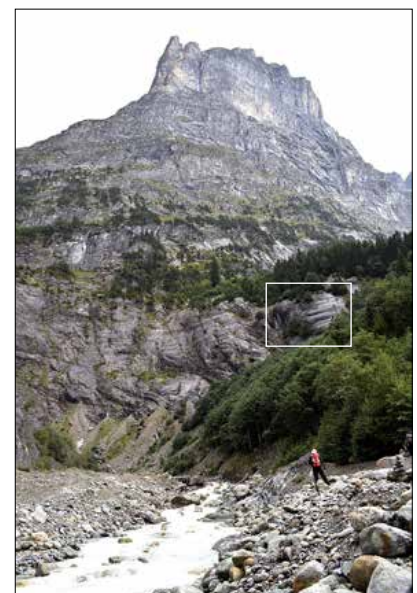


Abb. 2 Nordwand des Mättenbergs bei Grindelwald, Schweiz. Der Bach im Vordergrund, die Schwarze Lüttschine, wird hauptsächlich vom Oberen Grindelwaldgletscher gespeist, der Mitte des 19. Jahrhunderts noch über diesen Talabschnitt und weiter floss. Das weiße Rechteck zeigt die Stelle der markanten Oberfläche, die in Abb. 1 vergrößert dargestellt ist. Foto: M. KOTULLA, 2021.



Abb. 3 Skulpturierte Form (S-Form). Visualisierung der Strömung, von rechts nach links: Hufeisenwirbel (horseshoe vortices), „Die skulpturierten Felsen von Cantley“, Quebec. Video-Screenshot (© Geodoxa).

tion an. Es handelt sich also um einen Analogieschluss.

Diskussion. Üblicherweise werden solche Oberflächen wie am Mättenberg als Gletscherschliff angesprochen bzw. interpretiert. Dass hier eine Wasser- anstelle einer Gletschererosion vorliegen könnte, ist eine vorläufige Interpretation. Denn es bedarf weiterer Beobachtungen aus anderen Perspektiven und unmittelbar am Gesteinskörper selbst. Insbesondere gilt es Erosionsmarken im Millimeter- und Dezimeterbereich zu überprüfen, ob beispielsweise Gletscherschrammen oder Kavitationsmarken² vorliegen.

Relevanz. Erosion durch Eis oder durch Wasser? Das Verständnis für die Bildung von subglazialen Oberflächenformen hat große Relevanz. Denn unterschiedliche Prozesse führen zu unterschiedlichen Interpretationen. So werden zahlreiche groß- und kleinskalige Oberflächenformen in vielen Teilen Kanadas als Produkte subglazialer, hochenergetischer Schmelzwasserströme im Kontext von Megaflut-Ereignissen gedeutet und sind schließlich Indizien für einen abrupten Zusammenbruch des laurentischen Eisschildes am Ende der Eiszeit (siehe dieses Journal, Ausgabe April 2021; KOTULLA 2021, weitere Referenzen dort).

[KOTULLA M (2021) Eiszeit: Indizien für abrupten Zusammenbruch des laurentischen Eisschildes. *Studium Integrale Journal* 28, 53–55. ¹ unter der Eismasse/dem Gletscher gebildet/befindlich; ² spindelförmige Riefen im Millimeter- bis Zentimeterbereich] M. Kotulla

■ Erinnerungen eines Einzelzellers – Gedächtnis ohne Gehirn

Physarum polycephalum ist ein azellulärer Schleimpilz, ein sogenannter Myxogastrid, der eng mit den zellulären Schleimpilzen (Dictyosteliden) einschließlich des bekannten *Dictyostelium discoideum* verwandt ist. *Physarum* wächst zunächst als einzellige Amöbe, wobei die Amöben verschiedener Individuen später verschmelzen, sodass der Organismus seine zelluläre Struktur verliert. Während der Organismus weiter wächst, teilen sich die Zellkerne ohne Zellteilung. Der dabei entstehende Kernsack wird als Coenozyt oder Plasmodium bezeichnet (ALIM 2013). *Physarum* kann also als ein

einzelliger Organismus mit vielen Kernen betrachtet werden, der aufgrund seiner äußeren Glykoprotein-Gel-Schicht ein schleimiges Aussehen hat – daher auch der Name Schleimpilz. Sein Körper ist eine riesige Einzelzelle, die aus miteinander verbundenen Röhren besteht, welche ein komplexes Netzwerk bilden (Abb. 1). Diese Einzeller erreichen enorme Größen und nehmen häufig die Form amöbenartiger Wesen von mehreren Zentimetern Länge an. Aufgrund seiner immensen Ausdehnungsfähigkeit wird *Physarum* im Guinness-Buch der Rekorde als die größte Zelle der Erde geführt.

Die Fähigkeit, Informationen zu speichern und wiederzugewinnen, um nach Nahrung zu suchen oder schädliche Umgebungen zu meiden, wurde bisher nur Organismen mit einem Nervensystem zugeschrieben. *Physarum* hat ein solches System jedoch nicht. Forscher des Max-Planck-Instituts für Dynamik und Selbstorganisation (MPI-DS) und der Technischen Universität München (TUM) haben nun herausgefunden, wie dieser Organismus dennoch Informationen über seine Umgebung abrufen und speichert (KRAMAR & ALIM 2021). *Physarum* wird manchmal als „intelligent“ bezeichnet, denn seine Verhaltensweisen sind ziemlich komplex und der Schleimpilz kann anspruchsvolle Probleme lösen – ohne Gehirn. So



Abb. 1 Schleimpilz *Physarum polycephalum*. (© TommyIX, iStock)

kann er beispielsweise den kürzesten Weg durch ein Labyrinth finden. Sein Röhrennetz kann verschiedene Ressourcen miteinander verbinden und die Biomasse proportional verteilen, um eine optimale Ernährung zu erreichen. Seine Netzwerke transportieren Substrate effizient, sind aber auch ausreichend redundant, um gegen die Zerstörung von Röhren gewappnet zu sein.

Wie könnte das Gedächtnis in Organismen funktionieren, die keinen mehrzelligen Körper und kein Nervensystem besitzen? Es stellte sich heraus, dass die Erinnerung an die Vergangenheit in der Netzwerkarchitektur der Röhren gespeichert wird. Dies wurde deutlich, als die Forscher den Wanderungs- und Fütterungsprozess des Organismus verfolgten. Lange nach der Fütterung beobachteten sie eine deutliche Prägung des Musters der dickeren und dünneren Röhren des Netzwerks durch die jeweilige Nahrungsquelle. Karen ALIM, die leitende Forscherin und Professorin für Theorie biologischer Netzwerke an der Technischen Universität München, kommentiert dies in *Science Daily*: „Angesichts der hochdynamischen Reorganisation des Netzwerks von *P. polycephalum* brachte die Beständigkeit der Prägung die Idee hervor, dass die Netzwerkarchitektur selbst als Gedächtnis der Vergangenheit dienen könnte.“ Zunächst war es jedoch erforderlich, den Mechanismus aufzuklären, der hinter der Bildung der Prägung steht.

Mikroskopische Beobachtungen und mathematische Modellierung zeigten, dass diese Röhren als Reaktion auf eine Nährstoffquelle im Durchmesser wachsen oder schrumpfen, wodurch die Position des Nährstoffs in der Hierarchie der Röhrendurchmesser gespeichert wird. Der Nährstoff selbst löst die lokale Freisetzung eines Weichmachers aus, der durch die zellulären Ströme innerhalb des Röhrennetzes transportiert wird. Röhren, die viel Weichmacher erhalten, vergrößern ihren Durchmesser auf Kosten der anderen Röhren, die schrumpfen. Dadurch werden die Kapazitäten der Röhren für den strömungs-basierten Transport permanent in

Richtung des Nährstoffstandortes erhöht. Dies lenkt auch zukünftige Entscheidungen und Wanderungen der Röhren um. Der Nährstoffstandort wird also in der Hierarchie der Röhrendurchmesser des Netzwerks gespeichert und von dort abgerufen. Mirna KRAMAR, Mitautorin der Studie, kommentiert: „Vergangene Fütterungsereignisse sind in der Hierarchie der Röhrendurchmesser eingebettet, insbesondere in der Anordnung von dicken und dünnen Röhren im Netzwerk“ (TUM 2021).

Obwohl der durch den Nährstoff ausgelöste Weichmacher noch unbekannt ist, könnte das Gedächtnis durch die Verwendung künstlicher, die Röhren aufweichender Verbindungen nachgeahmt werden. Diese Erkenntnisse erklären, wie netzwerkbildende Organismen wie Schleimpilze und Pilze in komplexen Umgebungen gedeihen. Die Autoren schreiben, dass dieser Mechanismus von Strömungsnetzwerken einer Art assoziativem Gedächtnis ähnelt, was höchstwahrscheinlich auch für eine Vielzahl von noch nicht untersuchten Strömungsnetzwerken in anderen Organismen von Bedeutung ist. Als Hoffnung für künftige Entwicklungen führen sie an, dass ihre Erkenntnisse bioinspirierte Designanwendungen ermöglichen könnten, zum Beispiel bei Robotern mit weichen Körpern, die durch komplexe Umgebungen navigieren müssen. Sollte es „eines Tages“ wirklich navigierende Roboter mit Gedächtnis geben, werden sie sicherlich von intelligenten Menschen entworfen worden sein. Ist es da noch angemessen zu glauben, dass *Physarum* durch einen blinden evolutionären Prozess entstanden ist?

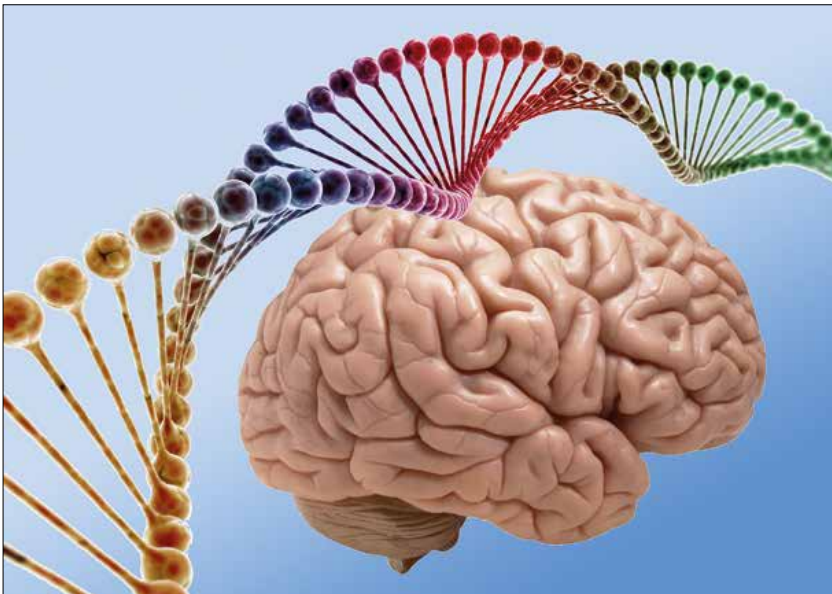
[ALIM K, ANDREW N & PRINGLE A (2013) *Physarum*. *Curr. Biol.* 23, PR1082-R1083. [https://www.cell.com/current-biology/comments/S0960-9822\(13\)01187-1](https://www.cell.com/current-biology/comments/S0960-9822(13)01187-1) • KRAMAR M & ALIM K (2021) Encoding memory in tube diameter hierarchy of living flow network. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 118, e2007815118 DOI: 10.1073/pnas.2007815118 • TUM, Technical University of Munich (2021) A memory without a brain: How a single cell slime mold makes smart decisions without a central nervous system. *ScienceDaily* 23 February 2021. <https://www.sciencedaily.com/releases/2021/02/210223121643.htm>] *P. Borger*

■ Es gibt nichts Besseres als die DNA, um Information zu speichern

Heutzutage werden Daten fast ausschließlich digital und elektronisch gespeichert – auf der Festplatte eines Computers, auf einer CD oder auf einem USB-Stick. Die Speicherung elektronischer Daten überdauert aber nicht ewig. Ganz im Gegenteil: Nach fünfzig Jahren werden die meisten elektronischen Daten fast unlesbar. Außerdem veralten viele Speichermethoden in kürzester Zeit und die gespeicherten Daten können nicht mehr gelesen werden. Denken Sie an eine Floppy-Diskette oder eine Zip-Diskette. Sie sind heutzutage nutzlos, da es die passenden Lesegeräte nicht mehr gibt.

Vor einigen Jahren haben Wissenschaftler eine Methode entwickelt, um Information über einen langen Zeitraum zu speichern: synthetische DNA. Die DNA ist der kompakteste bekannte Informationsträger. Sie speichert Information effizienter als alles, was der Mensch bisher geschaffen hat. Die DNA benötigt keine Festplatten oder anderweitige elektronische Datenträger, die anfällig für mechanische Störungen sind. Darüber hinaus sind die vier Buchstaben der DNA, die einen Code bilden, ideal geeignet, um jede menschliche Sprache darzustellen. Die vier Buchstaben der DNA (A, C, G und T) lassen sich genauso gut digital schreiben wie 00, 01, 10 und 11. Ein Memorystick mit DNA als Speichermedium könnte dann etwa 100 Millionen Mal mehr Information enthalten als die üblichen elektronischen Speichersticks. Es gibt jedoch ein Problem: DNA ist fehleranfällig und wenn die DNA sich nicht in einer lebendigen Zelle befindet, werden die Fehler nicht repariert.

Die DNA ist ein hochkomplexes Molekül und ihre vier Buchstaben sind anfällig für chemische Veränderungen – vor allem durch Oxidation, wodurch die abgespeicherte Information verloren geht. Dieses Problem kann dadurch gelöst werden, dass die DNA luftdicht in winzige Quarzglasperlen verpackt und bei 18°C gelagert wird (GRASS



2015). Um die digitale Information wiederherzustellen, müssen die Perlen nur mit Flusssäure (HF) behandelt werden, einer mäßig starken Säure, die selektiv das Quarzglas auflöst. Da die DNA von der Flusssäure unbeschadet bleibt, kann ihr Informationsgehalt dann wieder in digitale Information umgewandelt werden, wenn man die richtige Apparatur hat, um die DNA zu isolieren und zu entschlüsseln. Mit dieser Methode könnte man die DNA für etwa eine Million Jahre und die synthetische Information stabil erhalten. Sie ist jedoch aufwändig und zeitraubend. Eine Lagerung bei Raumtemperatur wäre vorzuziehen, würde aber (wie oben beschrieben) rasch zu einer abnehmenden Brauchbarkeit des Informationsmediums führen.

Die meisten Schäden in der DNA sind außerdem sehr schwer zu erkennen. Wenn man nicht weiß, welche Information in der DNA enthalten ist, weiß man auch nicht, welche Fehler es gibt. Im Gegensatz zu Fehlern in Computercodes, die sich in der Regel als leere Stellen in der codierten Nachricht zeigen und

leicht zu erkennen sind, werden Fehler in DNA-Sequenzen nicht angezeigt. Das Problem besteht darin, dass sich die gesamte Sequenz verschiebt, wenn etwas in der DNA gelöscht oder hinzugefügt wird, ohne dass es leere Stellen gibt, die jemanden alarmieren würden. In bisherigen Experimenten wurde dieses Problem durch Vervielfältigung der Nachricht in mehreren DNA-Kopien gelöst, d. h. die Information wurde einfach 10 oder 15 Mal wiederholt. Wenn später die Information abgelesen wurde, wurden die verschiedenen Kopien verglichen, um Einfügungen oder Löschungen zu erkennen und die ursprüngliche Nachricht wiederherzustellen.

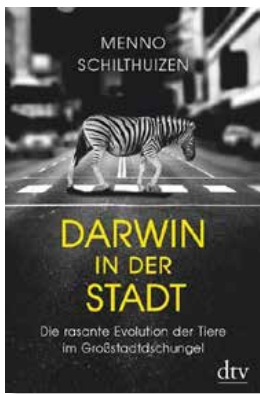
Nun hat eine Gruppe von Bioinformatikern der Universität von Texas (Austin, USA) dieses Problem offenbar gelöst. Die Forscher entwickelten einen Fehlerkorrekturcode, den sie HEDGES (Hash Encoded, Decoded by Greedy Exhaustive Search) nannten, der alle drei grundlegenden Arten von DNA-Fehlern repariert: Einfügungen, Löschungen und Substitutionen. Der entschei-

dende Durchbruch ist ein Kodierungsalgorithmus, der es ermöglicht, die Information auch dann genau abzurufen, wenn die DNA-Stränge während der Lagerung teilweise beschädigt werden. Dazu haben die Forscher die Information wie ein Gitter aufgebaut, sodass jede Information andere Teile der Information absichert. Auf diese Weise muss sie nur einmal gelesen werden und man braucht also nur einen DNA-Strang. Um ihre Methode zu demonstrieren, setzten die Forscher eine DNA-Sequenz, die die kodierte Information des berühmten Buches „Der Zauberer von Oz“ enthielt, hohen Temperaturen und extremer Feuchtigkeit aus. Obwohl die DNA-Stränge durch diese ungünstigen Bedingungen beschädigt wurden, konnte die komplette Information erfolgreich entschlüsselt werden. Man konnte beschädigte DNA, die bis zu 10 % Fehler enthielt, fehlerfrei wiederherstellen (PRESS et al. 2020).

Ist es nicht ironisch, dass ein vom Menschen geschaffener Code zur Wiederherstellung der in der DNA gespeicherten Information als Glanzleistung menschlicher Intelligenz angesehen wird, während entsprechende Vorgänge in der Zelle zur Reparatur der DNA selbst, dem unübertroffenen Informationsspeicher, nicht als Leistung einer höheren Intelligenz erkannt werden?

[GRASS RN, HECKEL R, PUDDU M, PAUNESCU D & STARK WJ (2015) Robust Chemical Preservation of Digital Information on DNA in Silica with Error-Correcting Codes. *Angewandte Chemie (international edition)*, 04 February 2015. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/anie.201411378> • PRESS WH, HAWKINS JA, JONES JR SK, SCHAUB JM & FINKELSTEIN JJ (2020) HEDGES error-correcting code for DNA storage corrects indels and allows sequence constraints. *PNAS* 117, 18489–18496. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2004821117>] P. Borger

Rezensionen



Menno Schilthuis (2018) *Darwin in der Stadt. Die rasante Evolution der Tiere im Großstadtschungel*. München: dtv.

Ein Schöpfungsbuch?

Ein Zebra überquert die Straße auf einem Zebrastreifen – ein geniale Idee für das Cover eines Buches über das Leben von Tieren in der Stadt. Der Untertitel „Die rasante Evolution“ gibt einen deutlichen Hinweis darauf, dass es – vom Autor ungewollt – auch um „Schöpfung“ gehen könnte. Denn nach unserem heutigen Wissensstand spricht rasante Evolution dafür, dass bereits programmierte Möglichkeiten abgerufen werden (vgl. CROMPTON 2019). „Rasant“ heißt im Kontext dieses Buches: innerhalb eines Menschenlebens, in manchen Fällen binnen weniger Generationen der jeweiligen Arten. Denn die städtischen Lebensräume, mit denen sich die Stadtbewohner arrangieren mussten, existieren meist noch nicht lange. Spezielle Anpassungen, die nur in Städten beobachtet werden und andernorts nicht bekannt sind, müssen demnach wahrscheinlich neu entstanden sein. Die alternative Erklärung durch Einwanderung und Selektion passender Formen wird durch genetische Studien nicht unterstützt. Wie ging das so „rasant“?

Genetische Untersuchungen haben immer wieder gezeigt, dass bei rasanter Evolution „alte Programme“ abgerufen werden. Woher kommen diese? Die Biologen hatten aus evolutionstheoretischer Sicht überhaupt nicht damit gerechnet, dass Evolution derart schnell verlaufen könnte. Man hat „uns beigebracht, dass Evolution ein langsamer Prozess sei ...“, schreibt Schilthuis (S. 13). Die vorherrschende Erwartung langsamer Veränderungen hat mit dem auf Darwin zurückgehenden Evolutionsmechanismus zu tun: Auslese (Selektion) auf der Basis zufälliger Veränderungen, die nur selten für den Organismus günstig sind. Die Ausbreitung und Fixierung neuer Varianten in der Population sind zeitaufwändig. Nun hat sich gezeigt, dass es sehr schnell gehen kann – „rasant“. Eine andere Ursache als die auf Darwin zurückgehenden langsamen Mechanismen ist naheliegend.

Neue Lebensräume für viele Arten

Städte bieten eine immens große Anzahl verschiedenster Lebensräume. Eine Millionenstadt sieht Schilthuis als „aufregendes, neuartiges ökologisches System“ (S. 39).

Die Artenzahl ist erstaunlich hoch, manchmal sogar höher als im ländlichen Umland. In manchen Städten ist ein nennenswerter Anteil der eingewanderten Arten exotisch und stammt aus verschiedenartigen Ursprungsregionen in aller Welt (S. 74). Tiere, die in städtischer Umgebung heimisch werden, bringen gewisse Voranpassungen mit (Kapitel 6). Beispielsweise mögen Vögel in den Städten von Hause aus felsigen oder wüsten Untergrund, sie teilen unsere Vorlieben bezüglich Ernährung oder sie sind ganz einfach bezüglich ihrer Lebensumstände nicht besonders wählerisch. Es ist spannend zu verfolgen, welche Arten sich mit den neu entstandenen Lebensräumen anfreunden, als wäre es die selbstverständlichste Sache der Welt, den angestammten Lebensraum mit der städtischen Umgebung einzutauschen. Der Autor beschreibt in kurzweiliger Darstellung viele solcher Beispiele.

Eines der interessantesten Beispiele wird im Prolog geschildert: die Londoner U-Bahn-Stechmücke *Culex pipiens molestus*, die im Tunnelsystem des Londoner U-Bahn-Netzes ihr Dasein fristet. Während oberirdische Stechmücken das Blut von Vögeln saugen, bedient sich die U-Bahn-Stechmücke bei Pendlern und legt ihre Eier in Wasser, das in Vertiefungen und Hohlräumen vorkommt. Später wurde sie in anderen menschengemachten Lebensräumen entdeckt. Untersuchungen des Erbguts verschiedener U-Bahn-Populationen zeigten, dass sie sich genetisch von der oberirdischen Form unterscheiden. Proteine in Fühlern sind verändert, so dass die Mücken „auf menschliche Ausdünstungen anstelle von Vogelgerüchen reagieren“ (S. 13). Gene, die die innere Uhr beeinflussen, sind verändert oder abgeschaltet – im Dunkeln wird die innere Uhr nicht benötigt. Das Sexualverhalten hat sich ebenfalls verändert – statt Paarungen in großen Schwärmen nunmehr bei Begegnungen von Einzeltieren. Welches Ausmaß und Qualität an Änderungen des Erbguts für diese Veränderungen im Verhalten notwendig waren, wird nicht näher geschildert, aber es ist klar, dass eine so schnelle Anpassung nur auf der Basis bereits vorhandener Möglichkeiten erfolgen kann.

„Rasante Evolution“ in städtischen Lebensräumen

Eine solche möglicherweise programmierte Veränderung kann z. B. durch Transposons erfolgen – springende Genabschnitte, die an neuen Stellen im Erbgut eingebaut werden können. Das berühmte Beispiel der hell und dunkel gefärbten Birkenspanner ist durch einen einzelnen Sprung eines Transposons zu erklären; der „erste aktenkundige Fall urbaner Evolution“ (S. 121). In anderen Fällen haben offenbar punktuelle Veränderungen (sog. Punktmutationen) zu Anpassungen geführt.

In Auswahl seien einige weitere Beispiele genannt: Veränderung von Federlänge und Flügelform bei Fahlstirnschwalben ermöglichen größere Wendigkeit (S. 30).

Manche Fische wie der Blaubandkärpfling (auch Killifisch genannt) werden mit chemischem Abfall fertig (S. 156; vgl. JUNKER 2017). Dessen Anpassung an die Wasserverschmutzung erfolgte durch Verlustmutationen in Genen für ein Empfängerprotein von Signalmolekülen innerhalb weniger Dutzend Generationen (S. 159). Weitere Beispiele sind Verhaltensänderungen bei Vögeln (Kapitel 15): Stadtvögel haben z. B. gelernt, den Aluminiumverschluss von Milchflaschen zu öffnen, sie zeigen eine bessere Problemlösefähigkeit, größere Neugier und Wagemut (S. 224). Auch dafür wurden teilweise genetische Veränderungen gefunden. Oder es wurden Änderungen von Vorlieben der Weibchen für bestimmte Gefiedermerkmale der Männchen beobachtet (sexuelle Selektion, Kapitel 17).

Auch Beispiele aus der Pflanzenwelt werden beschrieben: So besitzt der Belgische Pippau (*Crepis sancta*, ein Kornblütler) zwei Sorten von Samen: leichte und mit Härchen versehene bzw. schwere ohne Härchen. In Stadtbiotopen mit eingeschränkten Verbreitungsmöglichkeiten durch den Wind sind letztere bevorzugt und werden eher angetroffen. Die Situation ist hier ähnlich wie bei Pflanzen, die auf kleinen Inseln vorkommen. So sind auch beim Gewöhnlichen Ferkelkraut (*Hypochoeris radicata*) auf Inseln die Samen schwerer und die Härchen kürzer (S. 131f.).

Bewertung

Schilthuizen schreibt: „Abgesehen von einigen wenigen Ausnahmen ... reden wir ja nicht über die Entwicklung völlig neuer Lebensformen“ (183). Welche Ausnahmen der Autor meint, ist allerdings unklar. Nur bei der Erforschung von Veränderungen bei Stadtamseln gegenüber Waldamseln sieht er „stichhaltige Beweise für das Auftreten evolutionärer Neuheiten, angepasst an die Lebensbedingungen in der Stadt“ (S. 270). Allerdings definiert er nicht, was er unter einer „evolutionären Neuheit“ versteht. Die von Schilthuizen beschriebenen Veränderungen der Stadtamseln beinhalten jedenfalls keine Neuheiten: Änderungen in der Ernährung und damit einhergehend der Schnabelform, was auch zu Änderungen im Gesang führe, hormonale Änderungen, Anpassung der biologischen Uhr, Fluchtverhalten und frühere Brutzeit und dadurch Fortpflanzungsisolierung von Stadtamseln, was als beginnende oder sogar bereits etablierte Artbildung angesehen werden kann (S. 270). Allerdings erfordert auch die Artbildung nicht die Etablierung evolutionärer Neuheiten, sondern ist eher ein Prozess einer unterschiedlichen Spezialisierung.

Neben genetischen Änderungen gegenüber der Ursprungspopulation diskutiert Schilthuizen in Kapitel 13 auch die Möglichkeit, dass Anpassungen an die Verhältnisse in der Stadt Ausdruck nicht-erblicher Plastizität sein können. Damit ist gemeint, dass Umweltreize eine Merkmalsvariation bewirken oder schlummernde Programme „einschalten“ können. Ein bekanntes Beispiel für eine plastische Reaktion ist die Verdickung der Hornhaut durch fortgesetzte mechanische Beanspruchung.

Der Autor schreibt: „Überdies müssen die kleinen genetischen Besonderheiten, die erforderlich sind, damit es zur urbanen Evolution kommen kann, oft nicht erst geschaffen werden, sondern sind schon gegeben“ (S. 183f.) und nennt als Beispiel die Gefiederfärbung von Tauben. Als weitere Quelle von Anpassungsmöglichkeiten, die nicht neu evolvieren müssen, nennt er den Gen-Polymorphismus, also die natürliche genetische Variabilität innerhalb von Arten (S. 184). Diese sei das „evolutionäre Kapital jeder Spezies“ (S. 185). In diesen Fällen brauchen die Tiere und Pflanzen „nicht darauf zu warten, bis der Zufall ihnen eine günstige Mutation beschert“ (S. 185).

Schließlich sind auch epigenetische Faktoren zu beachten (S. 190). Schilthuizen zitiert dazu einen Kollegen: „Fast keine der bisher vorgelegten Studien zur urbanen Evolution habe den Unterschied zwischen genetisch bedingter Anpassung und epigenetischen Effekten berücksichtigt, ...“ (S. 191). Unter Epigenetik werden Faktoren und Prozesse zusammengefasst, die gleichsam von außen auf die Gene regulierend einwirken. Diese Faktoren lassen das Erbgut selbst unverändert. Sie sind jedoch nicht dauerhaft vererbbar und daher ohne nennenswerte Bedeutung für die Evolution.

Fazit

Schilthuizen schreibt: „Für Darwin war die Evolution ein langsamer Vorgang, der in einem einzelnen Menschenleben nicht wahrzunehmen war. Dieses eine Mal lag er falsch“ (S. 97). Unter geeigneten Bedingungen können Veränderungen auch „rasant“ erfolgen. Die große Geschwindigkeit, mit der die Veränderungen erfolgen, ist aber nur möglich, wenn die Anpassungen bereits angelegt oder in irgendeiner Weise programmiert sind. Die in diesem Buch geschilderten Beispiele bewegen sich in einem insgesamt engen gestaltlichen, physiologischen und verhaltensbiologischen Rahmen und können nicht als Belege für die Entstehung evolutionärer Neuheiten gewertet werden. Soweit die zugrundeliegenden molekulargenetischen Prozesse aufgeklärt sind, liegen ebenfalls keine Neuheiten vor, sondern sie beruhen auf Mutationen, Gen-Polymorphismus, Plastizität oder Epigenetik, mithin auf einem Potenzial, das als Ausdruck angelegter Möglichkeiten interpretiert werden kann.

Dass so viele Lebewesen sich derart vielfältig auf neue Lebensräume einstellen können, ist nicht selbstverständlich. Die Tiere und Pflanzen bringen offenbar eine so große Anpassungsfähigkeit mit, dass sie sich mit Bedingungen arrangieren können, mit denen ihre Art zuvor gar nicht konfrontiert war. Aus der Sicht der Schöpfungslehre kann man diese Fähigkeit als Ausdruck weiser Vorausschau des Schöpfers interpretieren.

Reinhard Junker

Literatur

- CROMPTON N (2019) Mendel'sche Artbildung und die Entstehung der Arten. Internetartikel, https://www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/b-19-3_mendel.pdf
- JUNKER R (2017) Programmierte Anpassungsfähigkeit bei Killifischen? Stud. Integr. J. 24, 53-54.



Paul Nurse (2021)
Was ist Leben? Die fünf
Antworten der Biologie.
Berlin: Aufbau Verlag.

Eine zentrale Frage, die schon antike Philosophen stellten, lautet: „Was ist Leben?“ Dieser Frage widmete der bekannte österreichische Physiker Erwin Schrödinger (Nobelpreis für Physik 1933) ein vielbeachtetes Buch im Jahr 1944. Schrödingers Anliegen war es, Ansätze für die Erörterung dieser Frage zu finden, ohne eine abschließende Antwort zu geben. Deutlich anders verhält es sich bei der im vergangenen Jahr erschienenen Veröffentlichung von Sir Paul Maxim Nurse, einem britischen Biochemiker, der im Jahr 2001 den Nobelpreis erhalten hat. Er wählte dafür bewusst den gleichen Titel wie Schrödinger, jedoch mit dem Anspruch, diese Frage zu beantworten.

In ähnlicher Weise wie Schrödinger fasst Nurse sich eher kurz (182 Seiten). Demgegenüber betonen nicht wenige Kenner der Biologie, dass auch der heutige Wissensstand bei Weitem nicht ausreicht, um das Leben in seiner gewaltigen Komplexität und faszinierenden Vielfalt der Lebensformen zu erfassen und zu definieren.

Überblick

Der Autor äußert im Vorwort die Hoffnung, dass das Buch dem Leser dazu verhilft, „die Welt mit neuen Augen zu sehen“. Diese neue Sicht soll durch die Betrachtung von fünf Konzepten erlangt werden, die nicht nur ein besseres Verständnis, sondern auch eine Definition von dem, was Leben ist, ermöglichen sollen. Zu diesen Konzepten zählen die Zelle, das Gen, die Evolution durch natürliche Selektion, das Leben als Chemie und das Leben als Information. Jedes dieser Konzepte wird in jeweils einem Kapitel erläutert, wobei die Evolution durch natürliche Selektion das vielfach aufgegriffene Leitmotiv darstellt. In einem weiteren Kapitel stellt Nurse die Relevanz der Wissenschaft für den Umgang mit gegenwärtigen und künftigen Herausforderungen für die Menschheit dar, wobei er sich in einigen Fragen auch politisch deutlich positioniert. Schließlich wird im letzten Kapitel eine Definition des Begriffs „Leben“ anhand von drei allgemeinen Prinzipien formuliert, die auf den zuvor erläuterten fünf Konzepten beruhen.

Evolutionstheorie – unbedingte Treue zu Darwins Lehre

Insgesamt scheint es das Kernanliegen des Autors gewesen zu sein, zu erläutern, was Evolution ist. An vielen

Stellen im Buch wird man damit konfrontiert, was Evolution ist und was sie vermutlich bewirkt. Dabei fällt auf, dass Nurse den Begriff der Evolution gar nicht definiert. Wie schon bei Darwin erscheint Evolution vielmehr als eine Art schöpferische Kraft, die von der Entstehung der ersten Lebewesen über die gesamte Artenvielfalt bis hin zum Bewusstsein des Menschen alles hervorgebracht haben soll. Die Beschreibungen dieser Kraft sind zum Teil jedoch krass widersprüchlich, wie nachfolgend gezeigt wird.

Alles Wichtige zum Thema „Leben“ in Kurzform

Manchmal handelt es sich um einen mysteriösen Vorgang, gleichsam einem übernatürlichen Wunder, wie in der Beschreibung der Entstehung erster Lebewesen (S. 173): „Irgendwie, irgendwo, vor sehr langer Zeit ordneten sich unbelebte und ungeordnete chemische Stoffe zu strukturierten Formen an, die in der Lage waren, sich Dauer zu verleihen, sich selbst zu kopieren und schließlich die alles entscheidende Eigenschaft zu erwerben, durch natürliche Selektion zu evolvieren.“ An anderer Stelle ist die Evolution eine schier unendliche Abfolge von Trial-and-Error-Prozessen im Rahmen von Naturgesetzen, die zur Entstehung von Leben führt (S. 177). Hierbei ist es offenbar kein Problem, dass für die Entstehung von Maschinen zwar versierte Ingenieure erforderlich sind, dass aber niemals eine Selbstentstehung molekularer Maschinen auch nur ansatzweise beobachtet wurde.

In seinen Ausführungen bleibt Nurse der alten Darwin'schen Hypothese einer unmerklich langsamen Entwicklung treu (S. 60): „Sie [die Evolution] ist ein vollkommen ungerichteter und gradueller Prozess, doch wenn sie in unfassbar große Zeiträume eingebettet ist [...], wird sie zu einer unvergleichlichen schöpferischen Kraft.“ Auch dieser Sachverhalt widerspricht vollkommen unserer Erfahrung: Die Entstehung von etwas qualitativ Neuem durch ungerichtete Naturprozesse wurde noch nie beobachtet. Die Zeit stellt hier den Lückenbüßer dar für das gewaltige Erklärungsdefizit der Darwin'schen Lehre hinsichtlich der Entstehung neuartiger biologischer Baupläne, Organe und Funktionseinheiten. Dass diese Kritik auch von einer Reihe von Wissenschaftlern aufgegriffen worden ist, kommt in dem Buch in keiner Weise zur Geltung. Der Umstand, dass Veröffentlichungen wie „Does Evolution need a rethink? Yes urgently“ (LALAND 2014), „The epigenetics revolution“ (CAREY 2012) oder „Evolution: A View from the 21st Century“ (SHAPIRO 2013) sich häufen, dürfte Nurse aber wohl kaum entgangen sein.

Personalisierte Evolution und Selektion als handelndes Subjekt

Gelegentlich wird Evolution durch Unterstellen von Absichten und Zielen auch personifiziert (S. 117): „Die Evolution hat das Bakterium mit der Fähigkeit ausgestattet, die Gegenwart einer alternativen Energiequelle wahrzunehmen und mithilfe dieser Information seine

inneren chemischen Prozesse entsprechend anzupassen.“ Fähigkeiten wie Vorsorge zu treffen, gezielt zu planen oder strategisch zu denken sind aber ausschließlich intelligenten Akteuren vorbehalten und für ziellose Naturvorgänge unbekannt. Nurse dagegen scheint generell keine Unvereinbarkeit zwischen Ziellosigkeit und Kreativität zu sehen und beschreibt die Evolution summarisch als „ziellose[n], aber hochkreative[n] Prozess“ (S. 178) – ein Widerspruch in sich.

Das häufige Wiederholen der Behauptung, die Evolution habe alles hervorgebracht, hat manipulativen Charakter, zumal wirkliche Begründungen fehlen. Einerseits werden optimale Strukturen wie die „zum Fliegen ideale Flügelform des Schmetterlings“ (S. 128) als Folge einer langen ungerichteten Evolution dargestellt, andererseits aber auch Phänomene wie Krebserkrankung, die alles andere als ideal sind. Auch in diesem Fall lautet die Begründung einfach: „Noch einmal: Das ist das Werk der Evolution durch natürliche Selektion“ (S. 146). Warum und wie die Evolution zu derart verschiedenen Ergebnissen kommt, wird nirgends näher erläutert.

Selbst nichtmaterielle Aspekte des Menschseins sollen durch evolutionäre Vorgänge hervorgebracht worden sein: „Der rücksichtslose Ausleseprozess der natürlichen Selektion schuf viele Dinge. Besonders außergewöhnlich ist das menschliche Gehirn. Unsere Selbstreflexion muss sich, zumindest teilweise, entwickelt haben, um uns einen größeren Spielraum bei der Anpassung unseres Verhaltens an unsere veränderliche Welt zu gewähren“ (S. 178; Zielvorgabe: „um ... zu“). Allerdings gibt er zu, dass es hier viele schwierige Fragen gibt, und es bleibt erneut offen, wie die Evolution das alles erzeugt haben soll.

Obwohl in dem Buch wiederholt beteuert wird, dass man für die Erklärung des Ursprungs dieser Dinge „einen Schöpfer nicht bemühen müsse“, vergleicht der Autor Organismen und ihre Einrichtungen oft mit nachweislich geschaffenen Objekten: einer Dampfmaschine (S. 110), einem Computer als logischem und datenverarbeitendem System (S. 119) oder auch einem Auto (S. 134) und argumentiert damit unfreiwillig für Schöpfung.

Die Antwort auf die im Titel gestellte Frage gibt der Autor erst im letzten Kapitel (S. 164–165). Er führt drei Prinzipien an, die zusammen eine Definition des Lebens ergeben sollen: 1. Leben besitzt die Fähigkeit, durch Selektion zu evolvieren; 2. Lebensformen sind abgeschlossene physische Gebilde; 3. Lebewesen sind chemische, physikalische und informationsverarbeitende Maschinen, inklusive z. B. Stoffwechsel oder Selbstreparatur. In früheren Beschreibungen des Lebens wurden üblicherweise sechs oder sieben Eigenschaften angeführt. Insofern unterscheidet sich die „Definition“ von Nurse von früheren höchstens insofern, als sie auf drei Punkte reduziert ist. Etwas Neues erfährt man hier zu dieser Frage jedoch nicht.

Übers Ziel hinaus geschossen

Während Erwin Schrödinger in seinem Werk konsequent bei der Diskussion wissenschaftlicher Fragestellungen blieb, geht Nurse weit über sein eigentliches

Thema hinaus. Ihm scheint es ein wichtiges Anliegen zu sein, aus seinen Erkenntnissen auch dringende Handlungsempfehlungen abzuleiten und sich politisch in einer Reihe von Themen eindeutig zu positionieren. Von medizinisch-ethischen Themen über Empfehlungen zur Debattenkultur bis hin zur Klimaentwicklung – kaum ein medial relevantes Thema bleibt unberührt, wenn auch oft nur oberflächlich.

Schon aus dem Vorwort geht hervor, wie der Autor sich die Zukunft von Menschenleben vorstellt. Demnach „wird die Biologie in den kommenden Jahren in zunehmendem Maße die Grundlagen für die Entscheidungen liefern, mit denen wir festlegen, wie Menschen geboren, ernährt, geheilt und vor Pandemien geschützt werden“ (S. 14). Dabei bleibt offen, wer genau mit „wir“ gemeint ist. Die „Bekämpfung des Klimawandels“ wird als sehr wichtiges Anliegen dargestellt (S. 158), ohne zu reflektieren, dass es Klimaschwankungen schon immer gab und bisher unklar ist, ob bzw. inwieweit sie tatsächlich menschlich verursacht sind. Kritiker des menschengemachten Klimawandels werden pauschal als „Leugner des Klimawandels, die wissenschaftliche Erkenntnisse ignorieren“ diffamiert (S. 162). Inwiefern das alles zur Beantwortung der eigentlichen Fragestellung „Was ist Leben?“ beiträgt, bleibt allerdings das Geheimnis des Autors.

Fazit

Der Nobelpreisträger Paul Nurse wählte einen vielversprechenden, vollmundigen Titel und knüpfte bewusst an Erwin Schrödingers bekannte Veröffentlichung von 1944 an. Herausgekommen ist ein Büchlein, das viele wichtige Themen anreißt, ohne jedoch in die Tiefe zu gehen. Die Evolutionslehre ist darin sehr dominant und wird einseitig dargestellt. Es werden – teilweise überholte – Lehrmeinungen der Evolutionslehre als gesichertes, unumstößliches Wissen angeführt, während neuere Entwicklungen und gravierende Erklärungsdefizite systematisch ausgeblendet werden. Das Buch hat den Charakter einer wenig reflektierten Zusammenfassung der in unserer Zeit vorherrschenden weltanschaulichen Auffassungen. Darüber hinaus werden viele Themen angesprochen, die mit der eigentlichen Fragestellung höchstens entfernt zu tun haben und eher politischen Sachverhalten gewidmet sind, wobei die Ausführungen von einem auffälligen Sendungsbewusstsein gekennzeichnet sind. Die Beantwortung der im Titel gestellten Frage dagegen fördert keine wirklich neue Erkenntnis zu Tage.

Boris Schmidt

Literatur

- CAREY N (2012) *The Epigenetics Revolution: How Modern Biology is Rewriting Our Understanding of Genetics, Disease and Inheritance*. Icon Books.
- LALAND K (2014) Does evolutionary theory need a rethink? Yes urgently. *Nature* 514, 161–164.
- SHAPIRO JA (2013) *Evolution: A view from the 21st Century*. Financial Times Prent.