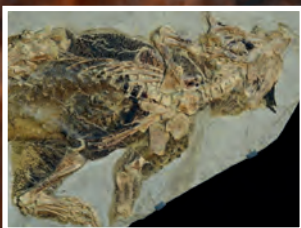
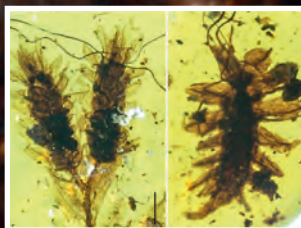


STUDIUM INTEGRALE

Staub im Weltall



Selektionsdruck
für Vogelfedern?



Überraschende
Funde in Bernstein



Indizien für
Schneeball-Erde?

Frühe Homininen

Sammelband über neueste Ergebnisse aus der Urmenschenforschung

Michael Brandt
Frühe Homininen.
Eine Bestandsaufnahme anhand
fossiler und archäologischer Zeugnisse.
Studium Integrale Special.
DIN A 4, Paperback, farbig, 204 Seiten,
117 Abbildungen, 10 Tabellen,
ISBN 3-978-7751-5848-0
24,95 EUR [D]/25,70 EUR [A]/37,50 CHF.

**Erhältlich im Buchhandel
oder unter
www.wort-und-wissen.de**

Frühe Homininen sind ein Brennpunkt evolutionsbiologischer Forschung. Dabei geht es um die zentrale Frage, ob der hypothetische Übergang von affenartigen Formen zum Menschen plausibel gemacht werden kann. In diesem Band werden zu verschiedenen Aspekten der frühen Homininen aktuelle Forschungsergebnisse vorgestellt und diskutiert.

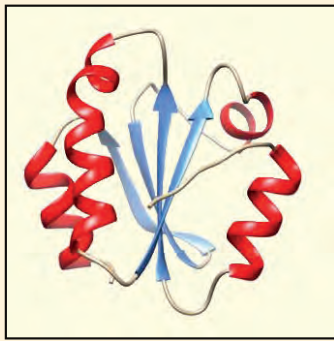
Anhand neuester Fossil- und Werkzeugfunde wird in zehn Einzelbeiträgen gezeigt, dass nach aktueller Kenntnis eine deutliche Grenze zwischen eindeutig menschlichen und nichtmenschlichen Homininen begründet vertreten werden kann.

Der Autor beschäftigt sich seit etwa 30 Jahren mit der menschlichen Urgeschichte und mit Evolutionskritik.



Erhältlich auch bei:

Studiengemeinschaft Wort & Wissen · Rosenbergweg 29 · 72270 Baiersbronn
Telefon (0 74 42) 8 10 06 · Fax (0 74 42) 8 10 08 · e-Mail sg@wort-und-wissen.de



Vor kurzem berichtete die *Welt* auf ihrer Internetseite von einem seltsamen Experiment, das nicht in einem Labor stattfand, sondern in einer Waschmaschine. Der Mathematikprofessor Ingo ALTHÖFER von der Universität Jena beschickte wiederholt seine Waschmaschine mit Legosteinen, um zu beobachten, wie sich die Steine nach einer gewissen Zeit der Rotation zu Blöcken aus zwei bis maximal fünf Bausteinen zusammenfügten. Und wie es für Wissenschaftler typisch ist, untersuchte ALTHÖFER auch die Wirkung einiger Parameter wie Temperatur oder Eigenschaften der Bausteine. Er fand dabei heraus, dass das Experiment am besten mit mittelalten, d. h. weder neuen noch sehr alten Bausteinen und unterhalb von einer Temperatur von 40 °C funktioniert. In dem Artikel wurde aus diesem Befund ge-

folgert, dass gezeigt werden konnte, wie in einem System durch Zufuhr von Energie die Ordnung von alleine zunimmt. Nach den Worten des Autors hält ALTHÖFER den Versuch für eine Analogie des weithin bekannten Ursuppenexperiments von Stanley MILLER, das seit über einem halben Jahrhundert fälschlicherweise als Beleg für die Möglichkeit der Entstehung wichtiger Komponenten des Lebens auf ausschließlich natürlichem Weg angeführt wird. ALTHÖFER könne, so der Autor des *Welt*-Artikels, einem jeden, der mithilfe seiner Waschmaschine Schöpfer spielen will, ein paar gute Tipps geben.

Auch wenn dieses naive Experiment und dessen abwegige Interpretation bei Kennern der Lebensursprungsforschung nicht mehr als Gelächter auslösen dürften, spiegelt es die typische Überzeugung der großen Mehrheit der Wissenschaftler bezüglich der Frage nach dem Ursprung des Lebens wider. Demnach sind für die Entstehung der Bausteine des Lebens einfache Moleküle (z. B. CO₂, H₂O, N₂ usw.) und die Zufuhr von Energie *hinreichend*. Schließlich können sich ja in einer langen Zeitspanne – so heißt es oft – unzählige Konstellationen ergeben, aus denen auch hochkomplexe und effizient organisierte Zellorganellen, ja sogar komplette Zellen hervorgehen können. In dieser Ausgabe von *Studium Integrale Journal* sind mehrere Artikel diesem Thema gewidmet. In den Artikeln „Intrinsisch unstrukturierte Proteine“ und „Das Phosphat-Problem“ schildert Boris SCHMIDTGALL neue bedeutende Herausforderungen für materialistische Szenarien der Lebensentstehung durch biologisch relevante Bausteine. In einem Artikel von Harald BINDER geht es um die Frage, ob Ribonukleinsäuremoleküle (RNA) durch eine wiederholte Abfolge von Trocken-Nass Zyklen entstehen können. Insgesamt wird deutlich: Je mehr wir wissen, desto mehr zeigt sich, dass der Anspruch an naturalistische Lebensentstehungs-Modelle außerordentlich hoch ist, d. h. der Erklärungsbedarf nimmt stetig zu, während der experimentelle Nachweis der postulierten Vorgänge weit zurückbleibt. Die Kluft zwischen Erklärungsziel und Erklärungsleistung naturalistischer Modelle wird immer größer.

Dass andere kleine Teilchen – Staubteilchen – auch interessant sein können, wenn sie im Weltraum vorkommen, zeigt Norbert PAILER anhand neuerer Entdeckungen aus der Astronomie. Gemeinsam ist ihnen, dass sie in einem alten Universum so nicht erwartet wurden. So weiß man heute, dass Staubbringe trotz ihrer Kurzlebigkeit ein allgemeines Phänomen im Weltraum sind, seien es Staubbringe um ganze Galaxien, um (Proto-)Sterne, um Gasplaneten oder neuerdings sogar um Asteroiden und Zwergplaneten. Einmal mehr zeigt sich, dass der Weltraum immer für Überraschungen gut ist.

Ein schier unerschöpfliches Reservoir, Erstaunliches zu entdecken, bilden die Ameisen. Nachdem unser Autor Hans-Bertram BRAUN zuletzt über Ameisen der Gattung *Philidris* berichtet hatte, die sich als Pflanzenzüchter und Gärtner betätigen, und über andere aus der Gattung *Megaponera*, die sich als Sanitäter um verletzte Artgenossen kümmern, schildert er in dieser Ausgabe weitere spannende Details der gegenseitigen Gesundheitsfürsorge dieser sozialen Insekten. Insekten in großer Vielfalt bieten Bernsteine. Der langen Liste erstaunlicher Funde wurden in diesem Jahr weitere bemerkenswerte Beispiele hinzugefügt. Zwei in Bernstein eingeschlossene neu entdeckte Arten waren Meister im Tarnen, zum einen Gespensterschrecken, die Pflanzenteile imitieren, zum anderen Larven von Florfliegen, die sich als Lebermoose tarnen. Außerdem wurden Spinnentiere als Einschlüsse entdeckt. Harald BINDER beschreibt die aktuellen Funde und zeigt, dass die bisher gedachten und erwarteten Abfolgen und Entwicklungslinien von diesen Fossilien nicht belegt werden. Die Fossilien dokumentieren im Gegenteil eine zunehmend komplexere Situation in der Erdgeschichte.

Zum Staunen sind die winzigen Linsen-Hohlspiegel-Augen von Kammuscheln. Henrik ULLRICH berichtet über neue Entdeckungen an diesem ungewöhnlichen Augentyp, die durch neue Mikroskopiertechniken möglich wurden. Der Hohlspiegel liegt hinter der zweischichtigen Netzhaut; der raffinierte Bau des Spiegels ermöglicht die Entstehung von zwei verschiedenen Bildern. Die häufig geäußerte Vorstellung, Augen zeigten evolutionär bedingte Fehlkonstruktionen, erweist sich einmal mehr als irrig.

Mit diesem bunten Strauß spannender Details aus der Schöpfung wünschen wir Ihnen eine aufschlussreiche Lektüre,

Ihre Redaktion **STUDIUM INTEGRALE JOURNAL**

■ IMPRESSUM

Herausgeber

Studiengemeinschaft Wort und Wissen e.V.,
Rosenbergweg 29, D-72270 Baiersbronn,
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, Baiersbronn

Korrespondenzadresse

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

Design

DESIGNBYTHOLEN
Regine Tholen AGD, Langgöns

Produktion

Dönges – Gutenberghaus Druck & 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 Heraus-
geber. Das Abonnement kann zum Jahres-
ende 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

Staub im Weltraum klingt zwar langweilig,
ist aber dank unerwarteter Entdeckungen
zu einem aktuellen und hochinteressanten
Thema geworden (vgl. den Beitrag von
Norbert PAILER). Die gewaltigen Blasen
und filigranen Nebelschwaden, die ESAs
Herschel-Teleskop portraitierte, sind Teil
eines Komplexes einer Molekülwolke im
Sternbild Kassiopeia. (Foto: ESA/Herschel/
NASA/JPL-Caltech, CC BY-SA 3.0 IGO)

ISSN 0948-6135

■ Inhalt



■ THEMEN

N. Pailer	Staub im Weltall. Neueste Daten fordern ein radikales Umdenken	68
R. Junker	Vogelfedern und Vogelflug. 5. Selektion von Feder-Vorstufen – Schlüssel zur Erklärung der Entstehung von Federn?	76
B. Schmidtgal	Intrinsisch unstrukturierte Proteine	84

■ KOMMENTAR

M. Kotulla	Geologisches Weltbild: Aktualismus von Wiederbelebung der Katastrophentheorie gefährdet?	117
------------	--	-----



■ KURZBEITRÄGE

H.-B. Braun	Neues vom Gesundheitssystem der Ameisen	92
R. Junker	Landpflanzen bereits im Kambrium?	94
H. Binder	Neues von Bernstein-Inklusen. Unerwartete Einsichten zur Geschichte von Gliederfüßern	96
M. Kotulla	„Schneeball-Erde“: Total-Vergletscherung der Erde in nur 1000 Jahren?	101
H. Ullrich	Muschelaugen – Hightech im Kleinen	105
B. Schmidtgal	Das „Phosphat-Problem“ in der präbiotischen Chemie	108
H. Binder	Neue Experimente zur RNA-Welt. Bringt ein zyklischer Wechsel nass – trocken den Durchbruch?	113

■ STREIFLICHTER

„Metaplastizität“: Pflanzen können „wählen“	119
Artbildung live bei Darwinfinken	120
Steinwerkzeugfunde allein reichen als Hinweis auf die Anwesenheit des Menschen	121
Paradebeispiel für Co-Evolution infrage gestellt	122
<i>Archaeopteryx</i> – definitiv ein aktiver Flieger	123
Lebensspuren unter extremen Wüstenbedingungen – auch auf anderen Himmelskörpern?	124
Jetzt siehst du mich, jetzt nicht mehr – rätselhafte Organellen ohne Membran	125
Fledermäuse mit „Long Life“-Garantie	126
Vom Salzwasser- zum Süßwasserfisch?	127
Das Geheimnis der Verformbarkeit roter Blutzellen	128

Staub im Weltall

Neueste Daten fördern ein radikales Umdenken

Staubbringe sind trotz ihrer Kurzlebigkeit heute ein allgemeines Phänomen im Weltraum. Wir sehen sie – in einem „alten“ Weltraum – um ganze Galaxien, um (Proto-) Sterne, um (vorwiegend) Gasplaneten – und neuerdings um Asteroiden und Zwergplaneten. Verlustprozesse von Stäuben durch „Herabspiralen“ von Staubkörnern auf Mutterkörper sind naheliegend, während die Frage nach einer effektiven Staubzufuhr offen ist oder zumindest sehr kontrovers diskutiert wird – trotz weitgehend verbesserter Datenlage. Schwerpunkte neuer Erkenntnisse sind überraschende Daten zum Saturn-Staubring durch die *Cassini-Huygens*-Mission und die Entdeckung eines ersten Ringsystems um den Zwergplaneten Haumea.

Norbert Pailer

Oben Thors Helm. Es handelt sich um einen Wolf-Rayet-Ringnebel. Wolf-Rayet-Sterne sind sehr heiße, massereiche und leuchtkräftige Sterne, die zum Ende ihres Lebens große Mengen ihrer Gas- und Staubhüllen durch gewaltige Sternwinde wegblasen und damit die interstellare Materie anreichern. Gleichzeitig ionisiert ihre Strahlung das weggeblasene Gas und lässt es leuchten. Meist ist es Wasserstoff und Sauerstoff, der dann so schöne Gebilde schafft wie den filigranen blauen Bogen im Bild. Der Urheber dieses Spektakels ist der helle, etwas pink wirkende Stern in der Bildmitte (Viererkette). (Martin Rusterholz in CXIELO, CC BY-SA 3.0)

Hinführung

Das Thema „Staub“ klingt zunächst ziemlich profan, erinnert es doch an lästige Hausarbeit. Wir treffen Staub – zum Ärger von Hausfrauen und -männern – regelmäßig auf unseren Regalen an. Aber auch dort ist er nicht nur irdischen Ursprungs, denn je nach Schätzung treffen 100 bis 10 000 Tonnen Staubmaterie in Form von typischerweise mikrometergroßen Teilchen pro Tag in Form von Mikrometeoriten unseren Planeten (vgl. HANSLMEIER 2002, 171 ff.). Falls die Partikel groß genug sind, machen sie sich als Sternschnuppen bemerkbar. Deren Reste sinken langsam Richtung Erde (und Regale). Ähnlich wie auf unseren Regalen verdeckt er auch im Weltraum einiges, was die Astronomen brennend interessiert.

Staub ist nämlich elementar wichtig, z.B. für die effektive Abführung von Energie bei der Sternentstehung, während er in Ringen um Planeten zu seiner schönsten Form aufläuft. Die „Langspiellplatte“ des Planeten Saturn (Abb. 5) mag hier das bekannteste Beispiel sein.

Gäbe es eine Hitliste für astronomische Objekte, dann dürfte der Staub im Weltall darauf nicht fehlen.

Zudem war der Staub im Weltall schon lange als Träger organischer Moleküle im Verdacht (Panspermie-Hypothese) – so wurde beispielsweise im Jahr 2002 die Aminosäure Glycin in interstellaren Wolken entdeckt (KUAN et al. 2003).

Staub wird neuerdings auch als Wasserträger verdächtigt (BRADLEY et al. 2014).

Nun wurde Saturn mit seinem komplexen Ringsystem von der Raumsonde *Cassini-Huygens* rund 12 Jahre lang untersucht, um das Geheimnis seiner Ringe zu lüften. Zurück blieben viele Rätsel und gewagte Hypothesen. Nachfolgend werden die verschiedenen Staubphänomene mit ihren Implikationen für den aktuellen Stand unseres Wissens diskutiert mit den beiden Schwerpunkten Saturn-Staubring und dem ersten entdeckten Staubring um den Zwergplaneten Haumea.

Staubzonen und -ringe im interstellaren Raum

Markantes Staubband einer Galaxie

Ein relativ bekanntes Beispiel für ein Staubband um eine Galaxie ist die Sombrero-Galaxie; sie wird in Abb. 1 von ihrer Kante gezeigt.

Physikalischer Kontext. Das sehr dunkle und stark ausgeprägte Staubband, das die Galaxie umgibt, verleiht ihr das typische Aussehen, das an einen mexikanischen Sombrero erinnert. Es handelt sich um eine Spiralgalaxie im Sternbild Jungfrau.

Auffällig sind die ungewöhnlich große, ausgedehnte Wölbung des „Sombreros“ aus Sternen sowie die dunklen, markanten Staubbahnen in der Ebene der Scheibe. Solche Staubwolken bestehen hauptsächlich aus den Elementen, die in Sternen durch Kernfusion erzeugt werden und die im Weltraum nicht gasförmig auftreten wie Wasserstoff und Helium, also Silizium, Sauerstoff und Kohlenstoff bzw. Verbindungen davon. Nach herrschender Vorstellung entstehen die Staubwolken, wenn Sterne große Teile ihrer prozessierten Materie abblasen oder in Supernovae explodieren. Das diffuse Leuchten in der ausgedehnten Zentralwölbung stammt von Milliarden alter Sterne. Die spektakulären Staubringe enthalten viele jüngere, hellere Sterne und weisen komplexe Details auf, die nur teilweise verstanden sind.

Aktuelle Fragestellungen. 1. Bisherige Modelle weisen auf eine Diskrepanz in der Gesamtenergiebilanz hin: Der Staub gibt im Infraroten mehr Energie in Form von Wärmestrahlung ab, als er von den Sternen seiner Umgebung erhält. Als mögliche Erklärung dafür wird angegeben, dass eine vom Staub verdeckte, diesen aber aufheizende Gruppe von jungen Sternen die fehlende Energie liefert (DE LOOZE et al. 2012).

2. Interstellares Gas und die Bestandteile des Staubes sind der Stoff, aus dem sich Sterne bilden, weshalb es nicht verwundert, gerade im spekta-



Abb. 1 Die rund 30 Millionen Lichtjahre entfernte Sombrero-Galaxie NGC 4594 mit ihrem ausgeprägten Staubband. (Bild: gemeinfrei)

kulären Staubring junge Sterne zu finden. Staub dient der effektiven Ableitung von Energie, was den Bildungsprozess eines Sterns entscheidend stützt. Da aber das sogenannte Urknallereignis nur leichte Elemente bis hin zu Spuren von Lithium erzeugt haben soll, stellt sich die Frage nach dem Energieabtransport erster Sternengenerationen. Zusätzlich ist molekularer Wasserstoff für die Bildung von Sternen unverzichtbar, dessen Entstehungsort die Oberfläche wiederum von Staubeilchen ist.

Es gibt zwar heute in diesem sehr aktiven Forschungsgebiet Modelle, die die Bildung großer Sterne mit 100 bis 1000 Sonnenmassen nahelegen, für kleinere und damit langlebige

Kompakt

Untersuchungen von interplanetarem und interstellarem Staub ist ein relativ junges Forschungsgebiet. Das Thermalverhalten, die Chemie und das allgegenwärtige Auftreten von Staub im Kosmos bringen dieses Phänomen auf die Hitliste moderner Forschung. Beispiele aktueller Fragestellungen sind:

- Thermalverhalten: Wärmeabfuhr bei Sternentstehung geschieht effektiv über Staub; erste Sternengenerationen mussten in einem Urknallszenario jedoch auf ihn verzichten.
- Chemie: Insbesondere bei Staubeilchen, freigesetzt von Kometen, wurden organische Moleküle nachgewiesen, was die Panspermie-Hypothese beflügelte. Sie behauptet, dass der Erde erste Lebenskeime von außen zugetragen wurden (ohne zu beantworten, wie sie dort als (zuverlässige) Lebensspender entstanden sein sollen).
- Allgegenwärtiges Auftreten: Je genauer hingeschaut werden konnte, desto häufiger wurden Staubumgebungen oder Staubringe um verschiedenste Objekte entdeckt, wohl wissend, dass sie grundsätzlich Kurzzeitphänomene sind. Ihr vermehrtes Auftreten überrascht.

Weshalb hat der Stern Fomalhaut noch einen Staubring bestehend aus wenige Mikrometer großen Staubeilchen, die doch schon lange aufgrund des Strahlungsdrucks weggeblasen sein müssten? Nun wird die Mikrostruktur der Teilchen für deren besonderes Verhalten verantwortlich gemacht.

Rätselhaft ist die außergewöhnlich große Helligkeit des um Fomalhaut umlaufenden Exoplaneten Dagon, was hypothetisch mit einem gewaltigen Ringsystem um denselben zusammengebracht wird.

Dagon selbst wirft durch seine außergewöhnliche Bahn Fragen auf: Ist sie das Ergebnis eines Zusammenstoßes mit einem weiteren Exoplaneten?

Da ferne Staubgebiete für in-situ-Messungen nicht erreichbar sind, hat man große Hoffnungen auf Beobachtungen des Saturnsystems gesetzt. Immerhin untersuchte die *Cassini-Huygens*-Mission dieses Objekt zusammen mit seinen Ringen zwölf Jahre lang. Trotz aller Erfolge dieser phantastisch zu nennenden Planetenmission ließ sie manche Fragen offen und es tauchten neue Fragen auf. Z. B. war Saturn – für uns – schon immer der Ringplanet. Neue Messungen widersprechen dem. Danach gab es vor einigen Hundert Millionen Jahren für ihn keinen Ring.

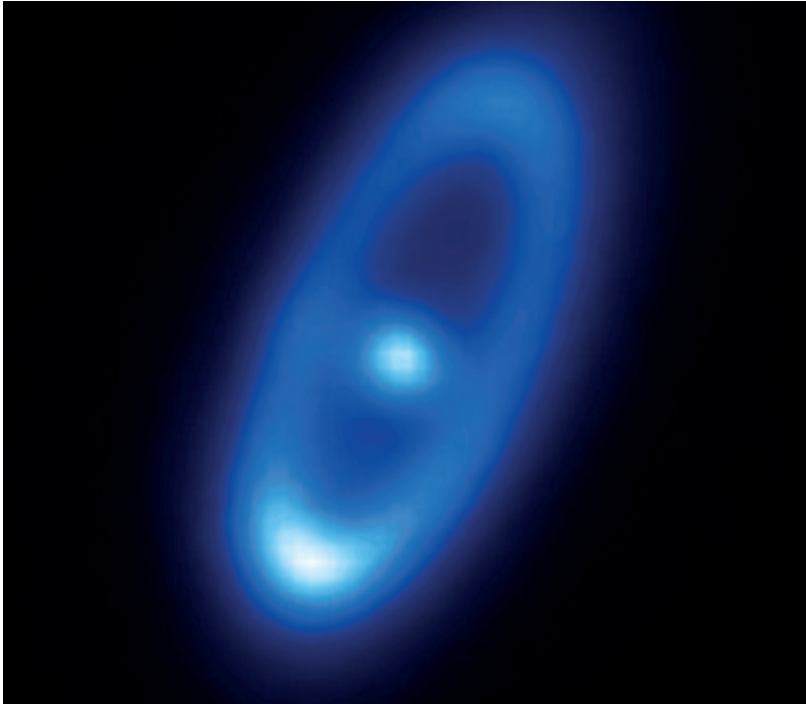


Abb. 2 Der Stern Fomalhaut ist 25 Lichtjahre von unserer Sonne entfernt und wird von einem 40 Milliarden Kilometer Durchmesser großen Staubring umgeben, an dessen innerem Rand im Jahr 2008 der Exoplanet Dagon entdeckt wurde. Das Bild wurde vom Weltraumteleskop *Herschel* aufgenommen. (Bild: ESA)

Sterne, die heute die überwiegende Mehrheit bilden, ist die Anwesenheit von Staub jedoch unabdingbar.

Staubringe um Sterne

Im Allgemeinen werden Staubringe um Sterne als „Rest“ aus Gas und Staub aus dem Sternbildungsprozess verstanden. Typischerweise entstehen nach allgemeinem Verständnis aus einem solchen „Steinbruch“ Planeten: In unserem Sonnensystem sehen wir folgerichtig kleine silikatische Körper nahe der Sonne (innere Planeten), gefolgt von den Gasgiganten der äußeren Planeten, an die sich die Eiskörper im Kuipergürtel und der postulierten Oort'schen Wolke anschließen.

Als Beispiel sei der Stern Fomalhaut genannt. Er ist 25 Lichtjahre von uns entfernt und beherbergt einen bemerkenswerten Staubring (Abb. 2).



Abb. 3 „Planet in der Mache“: In der Lücke der protoplanetaren Scheibe des Sterns PDS 70 ist erstmals ein Exoplanet im Prozess seines Entstehens zu beobachten; jedenfalls legen dies die Beobachtungen nahe. (ESO)

Physikalischer Kontext. Die Rede ist von einem relativ nahen Stern, dessen Masse etwa doppelt so groß ist wie die unserer Sonne. Er ist in der großen Entfernung von 133 astronomischen Einheiten, also mehr als viermal so weit, wie Neptun von der Sonne entfernt ist, von einem Staubring umgeben, der am ehesten mit dem Kuipergürtel unseres eigenen Sonnensystems vergleichbar ist.

Der scharfe Rand an der Innenseite des Staubrings legte die Vermutung nahe, dass sich dort ein größeres Objekt befinden müsse, das den Ring gravitativ beeinflusst (KALAS et al. 2005). Ein weiterer Hinweis darauf ergab die Beobachtung, dass sich der Staubring nicht exakt kreisförmig um Fomalhaut anordnet, sondern leicht elliptisch ist. Aufnahmen des Weltraumteleskops *Hubble* in den Jahren 2004 und 2006 ergaben einen Lichtpunkt, der sich offenbar auf einer Kepler'schen Bahn um Fomalhaut bewegte. Im November 2008 wurde dann mit Dagon der erste direkt nachgewiesene Exoplanet bekanntgegeben (KALAS et al. 2008).

Früher sah man Staub im Weltall eher als eine lästige Komponente an, während sich tatsächlich fast alle Typen von Objekten in irgendeiner Form mit ihm zieren.

Aktuelle Fragestellungen. 1. Für die Untersuchung bildete das Weltraumteleskop *Herschel* den Fomalhaut umgebenden Staubring in fünf Spektralbereichen des fernen Infrarotlichtes bei Wellenlängen zwischen 70 und 500 Mikrometern ab. Anhand des sich so ergebenden Infrarotspektrums gelangten die an der Auswertung der Daten beteiligten Wissenschaftler um Bram ACKE vom Astronomischen Institut der Universität Leuven/Belgien zu dem Ergebnis, dass die Staubkörner lediglich wenige Mikrometer groß sein können (ACKE et al. 2012). Daraus ergibt sich ein Problem: Der von Fomalhaut ausgehende Strahlungsdruck müsste derart kleine und entsprechend massearme Staubpartikel relativ schnell aus der Umgebung des Sterns „wegblasen“ und so den Staubring auflösen. Zur Auflösung des Widerspruchs wird als Erklärung angeboten, dass die Staubpartikel aus einer Vielzahl von jeweils nur mikrometergroßen Teilchen zusammengesetzt sind, wobei das Strahlungsverhalten von diesen kleinen Einzelkörnern dominiert sein soll.

2. Der Exoplanet Dagon erscheint eine Milliarde Mal lichtschwächer als der Stern Fomalhaut. Das ist immer noch viel heller, als die Oberfläche des Planeten allein erwarten lassen würde. Eine mögliche Erklärung ist, dass Dagon

von einem gewaltigen Ringsystem aus Eis und Staub umgeben ist, das den Dimensionen der Bahnen der Galilei'schen Monde um Jupiter entsprechen dürfte.

3. Aufgrund von Computersimulationen konnten die Astronomen darauf schließen, dass die Staubpartikel durch die Schwerkraft zweier Planeten in der Scheibe gehalten werden, wobei einer der Planeten den Stern Fomalhaut innerhalb und der andere außerhalb der Staubscheibe umläuft. Beide Exoplaneten sollten dabei als „Schäferplaneten“ fungieren, welche den Staubring durch ihre Schwerkraft zusammenhalten. Gesichtet wurde der zweite Schäferplanet bisher aber noch nicht. Nach BEUST et al. (2014) ist dieser hypothetische zweite Planet maßgeblich für die Erhaltung des Rings.

4. Die Mindestdistanz zwischen Exoplanet und Stern liegt Berechnungen zufolge bei rund sieben Milliarden Kilometern, während die größte Auslenkung seiner Bahn bei über 40 Milliarden Kilometern liegt. Die Bahn von Dagon ähnelt damit also viel mehr der Wanderung eines Kometen als der typischen Kreisbahn eines Planeten. Wurde das durch einen Zusammenstoß verursacht? Hat eine Kollision von Dagon mit einem weiteren Exoplaneten diesen auf die ungewöhnlich exzentrische Bahn gezwungen?

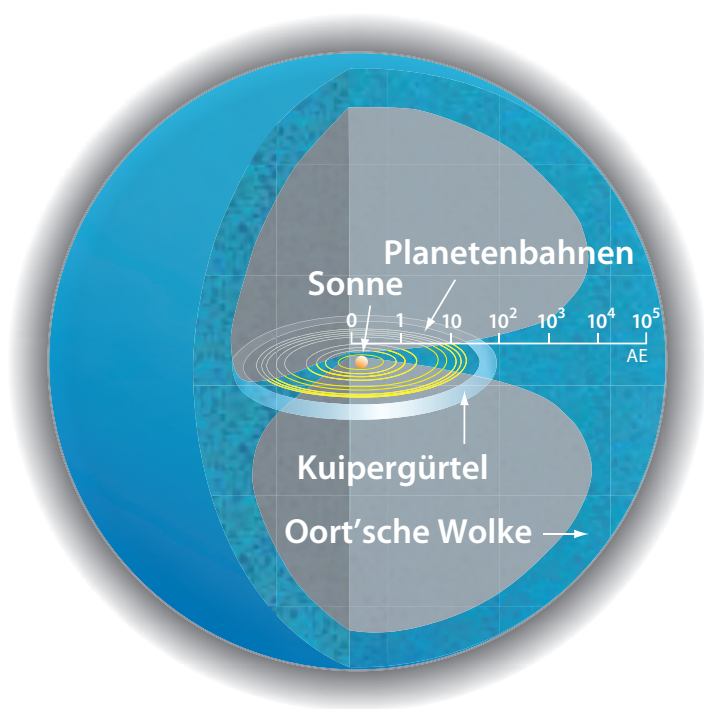
Die Suche nach Exoplaneten förderte laut Max-Planck-Institut für Astronomie MPIA in Heidelberg bislang etwa 3.800 Objekte mit unterschiedlichen Größen, Massen sowie Abständen von ihrem Mutterstern zutage. Zu deren Entstehung wurden zwar Theorien und Modelle möglicher Entstehungsszenarien entwickelt, die jedoch bisher mangels Beobachtungsmöglichkeiten nicht überprüfbar waren. Das hat sich nun geändert:

Das Konsortium des „Sphere“-Instruments am Very Large Telescope VLT der Europäischen Südsternwarte ESO in Chile entdeckte jüngst den Planeten PDS 70b, der sich in einer Entfernung von 22 Sonne-Erde-Abständen von seinem Zentralgestirn PDS 70 befindet.

Der Stern PDS 70 ist ein junger Stern und mit einer protoplanetaren Scheibe umgeben. Diese weist eine große Lücke auf. Im Fall des rund 370 Lichtjahre entfernten Sterns konnte nun in dieser Lücke ein sich bildender Planet entdeckt werden (KEPLER et al. 2018, MÜLLER 2018). Er beinhaltet wohl eine mehrfache Masse des Jupiter und soll noch im Wachsen begriffen sein. Abb. 3 zeigt die Szene.

Damit sollte man in der Lage sein, Planeten direkt bei ihrer Entstehung zu beobachten und erstmals die theoretischen Modelle zu prüfen.

Fazit. Es gibt offensichtlich kaum einen Objekttyp im Kosmos, der sich nicht mit Staubringen schmückt. Staubzonen oder Staubringe



sind aber auch gleichzeitig wie geheimnisvolle Schleier, die das bedecken und verdecken, was Astronomen gerne ungeschützt eingesehen hätten: zum Beispiel die Bildung von Planeten und Monden. So bleibt – bei allen bemerkenswerten neuen Einsichten – vieles im Ungefähren, das dann auch Freiheiten beim Einbau ins klassische, naturalistische Verständnis bietet. Der Aktualität der Messungen ist es geschuldet, dass gültige Schlüsse heute noch nicht gezogen werden können. Bisher gibt es eine Reihe von Modellen und nun geht es um deren Auswahl bzw. Korrektur anhand neuer Daten.

Staubringe um Planeten

Staubkugeln, Staubbürtel und Staubringe

Wenn man sich vom interstellaren Raum ausgehend unserer Sonne nähert, sollte man zunächst auf eine christbaumkugelähnliche Anordnung von Eiskörpern oder inaktiven Kometenkernen (typischerweise kilometergroße Eiskörper) stoßen. Aufgrund verschiedener Indizien wie Bahnparameter von Kometen schloss Jan OORT 1950 auf eine Population von Eiskörpern, die unser Sonnensystem am äußersten Rand umgeben soll. Wie angedeutet ist diese Population bisher nicht direkt nachgewiesen, sondern aufgrund gewisser Indizien postuliert worden. Weiter innen soll die Oort'sche Wolke in den sogenannten Kuiper Gürtel übergehen, dessen Ebene sich in der Bahnebene der Ekliptik (Bahnebene der Erde um die Sonne) befindet (Abb. 4). Der bekannteste Vertreter dieser Eiskörperpopulation ist der ehemalige Planet Pluto, der aufgrund ähnlicher

Abb. 4 Schematische Darstellung unseres Sonnensystems; die Dimensionen sind in einer Skala grob angedeutet, wobei AE Astronomische Einheit bedeutet und den Abstand zwischen Sonne und Erde (von außen kommend):

- Christbaumkugelförmige Anordnung der postulierten Oort'schen Wolke in einer Entfernung von bis zu 100.000 AE von der Sonne
- Übergang in den ringförmigen Kuiper Gürtel, der die sog. Zwergplaneten beherbergt
- Äußere Gasplaneten (Neptun, Uranus, Saturn, Jupiter)
- Zwischen Jupiter und Mars: Asteroidengürtel
- Innere Planeten (Mars, Erde, Venus, Merkur)

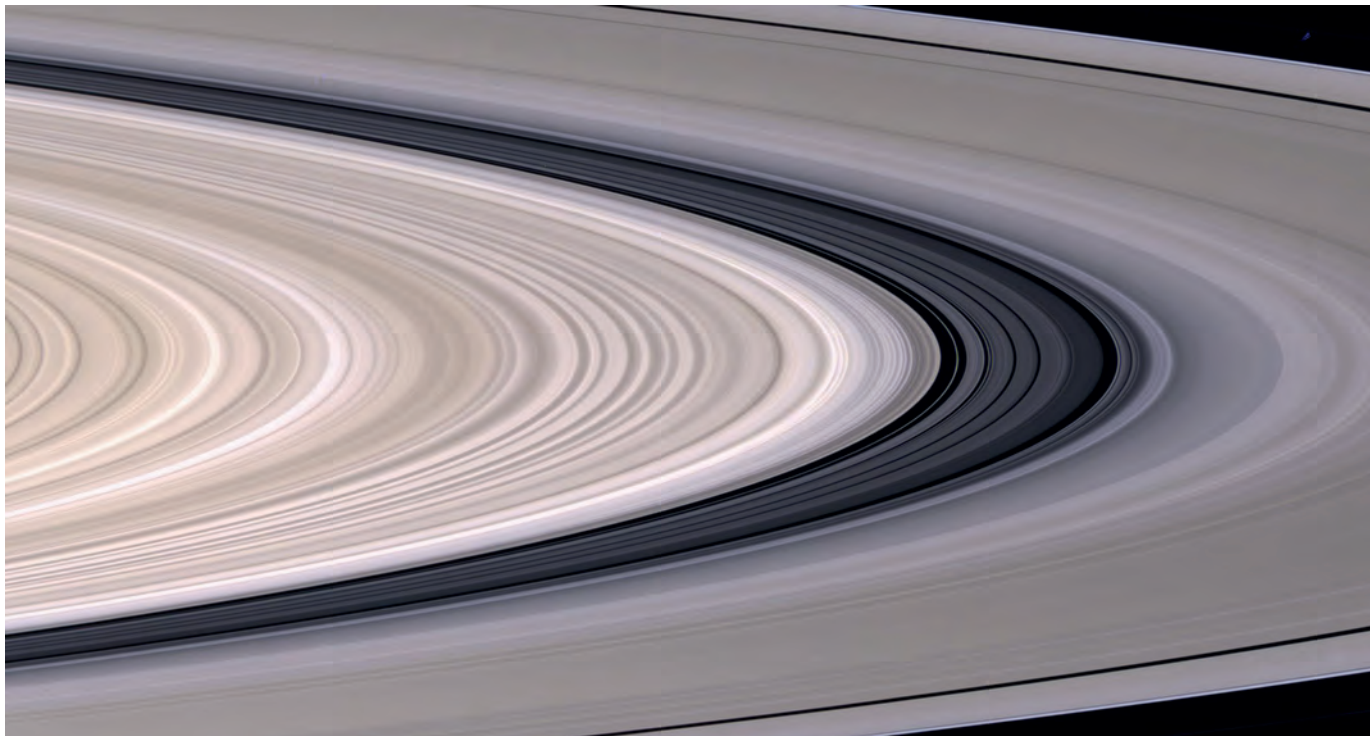


Abb. 5 Saturns „Langspielplatte“ in Form seines ausgeprägten, fein strukturierten Staubrings, der insbesondere durch die *Cassini-Huygens*-Mission 12 Jahre intensiv untersucht wurde. (NASA)

Objekte in seiner näheren Umgebung im Jahre 2006 zum Zwergplaneten „degradiert“ wurde. Und ausgerechnet aus diesem Eiskörpergürtel ist nun ein weiterer Zwergplanet entdeckt worden, bei dem erstmals ein Staubring nachgewiesen wurde (s.u.).

Staubringe bestehen aus einer Ansammlung mineralischer und eishaltiger Komponenten von typischerweise Sandkorn- bis Berggröße, die ein astronomisches Objekt in stabilen Bahnen umkreisen und zahlreich genug sind, um in ihrer Gesamtheit als ringscheibenförmiges Gebilde beschreibbar zu sein. Ihre Entdeckung verdanken sie Bedeckungen durch vorbeiziehende Sterne. Oft enthalten sie interne Strukturen, wie sie z.B. bei Neptun als „Ringwürste“ und bei Saturn eher als „Langspielplatte“ bekannt geworden sind. Ausmaße, Zusammensetzungen, Flächen- und Gesamthelligkeiten können dabei sehr unterschiedlich ausgeprägt sein.

Die Entstehungsgeschichte von Ringsystemen um Planeten ist nach wie vor Gegenstand vieler Spekulationen.

Während mittlerweile eine Menge über Eigenschaften dieser Ringsysteme erforscht werden konnte, ist deren Entstehungsgeschichte nach wie vor Gegenstand vieler Spekulationen:

1. Ein kleiner Mond könnte einem Planeten zu nahe gekommen und dort innerhalb der Roche-Grenze (s. Kasten S. 73) auseinandergerissen worden sein. Seine Bruchstücke mögen sich im Wechselspiel mit der Gravitation des Planeten zu einem Ring geformt haben.

2. Ringsysteme mögen auch Ergebnis der „Resteverwertung“ aus einem Planetenbildungsprozess sein, wobei innerhalb der Roche-Grenze sich kein einzelnes Objekt (Mond) bilden konnte.

3. Ein Planet mag von einem weiteren astronomischen Objekt getroffen worden sein und die dadurch freigesetzten Teilchen mögen sich um einen Planeten als Staubring formiert haben.

Staubringe um unsere Planeten haben eine lange Entdeckungsgeschichte. Zunächst wurden sie bei Saturn entdeckt: Galileo GALILEI sah sie erstmals im Juli 1610 mit einem der ersten Teleskope. Er erkannte die Ringe jedoch nicht als isolierte Objekte, sondern deutete sie als Henkel (*ansae*). Christiaan HUYGENS beschrieb die Ringe 45 Jahre später korrekt: „Der Saturn ist von einem dünnen, flachen Ring umgeben, der ihn nirgends berührt und der zur Ekliptik geneigt ist.“ Inzwischen wurden bei allen Gasplaneten Staubringsysteme entdeckt, wenn auch in recht unterschiedlichen Ausprägungen. Aus aktuellem Anlass soll das Ringsystem des Saturn auf der Basis neuester von *Cassini-Huygens* gewonnener Daten diskutiert werden.

Der Saturn-Staubring

Der Planet Saturn, sein Staubringsystem (Abb. 5) und seine Monde sind ausführlich in dem Buch „Der vermessene Kosmos – Ursprungsfragen kritisch betrachtet“ (PAILER & KRABBE 2016) diskutiert. In der gigantischen Eis- und Staubscheibe seiner Ringe waren ansatzweise die gleichen Prozesse der Strukturbildung durch Aufdickung von Material im Äquatorbereich zu erkennen, die

auch bei der Bildung unseres Sonnensystems eine Rolle gespielt haben sollen. Damit verbinden die Wissenschaftler die Hoffnung, auch Prozesse entdecken zu können, die bei fernen Planeten ablaufen: Es geht um den Aufbau von Planetenkörpern durch Akkumulation von Staubteilchen.

Das Ringsystem erschien bisher als der charakteristische Bestandteil eines Planeten namens Saturn in unserem Sonnensystem und hat die Phantasie von Dichtern und Denkern seit seiner Entdeckung gleichermaßen befeuert. Nun zeigen neueste Daten offensichtlich, dass dieses Ringsystem ausnahmsweise einmal nicht in das Bild einer Resteverwertung eines Planetenbildungsprozesses passt. Nach neuesten Daten von der *Cassini-Huygens*-Mission ist das Ringsystem dafür viel zu jung.

Die neu gewonnenen Daten stammen vom letzten riskanten Manöver, das der in die Jahre gekommenen Saturn-Mission *Cassini-Huygens* zugemutet wurde: ein erstmaliger Flug durch die Lücke des Planetenstaubtrags von Nord nach Süd am 26. April 2017, bis die Sonde am 15. September 2017 in den dichten Wolken des Saturn durch Reibungshitze in der Saturnatmosphäre verglühte. Auf die neuen Ergebnisse werden wir weiter unten zu sprechen kommen.

Bereits erste in-situ-Messungen durch die *Voyager*-Sonde 1980 hatten einerseits zahlreiche Details zu Tage gebracht, andererseits viele Rätsel hinterlassen. Hier brachte nun *Cassini-Huygens* mehr Klarheit. Die offenen Fragen betreffen die Intensität des Staubeinfalls auf das Saturnsystem, die Gesamtmasse des Ringsystems und die Helligkeit des Ringsystems.

Aktuelle Fragestellungen

1. Intensität des Staubeinfalls auf das Saturnsystem. Ein konstanter Regen interplanetarer Mikrometeorite vom äußeren Rand unseres Planetensystems sollte seit Milliarden von Jahren auf das Saturn-Ringsystem fallen. Erwartungsgemäß sollten diese dunklen Teilchen die ursprünglichen hellen und gut reflektierenden Wassereisteilchen des Ringsystems im Laufe ihres Bombardements dunkel färben.

Wie schnell sich dieser Prozess auswirkt, hängt natürlich von der Einfallsrate des Staubes ab, die bisher nicht viel mehr war als „best guess“.

Nach etwa zwölf Jahren intensiven Messens und Analysierens hat nun der *Cosmic Dust Analyzer CDA* – eines der zwölf Instrumente an Bord von *Cassini-Huygens* – für diese Abschätzung eine solide Basis gebracht – und das Ergebnis ist „inconsistent with an old ring“, wie es Sascha KEMPF von der University of Colorado in Boulder kommentierte. Der Staubfluss von außen auf den Ring ist etwa zehn Mal höher als zuvor gedacht und legt aufgrund erster und soweit bester Abschätzungen ein Ringalter von

Roche-Grenze

Zur Entstehung der Saturnringe gibt es trotz vieler Erklärungsversuche noch keine ausgewiesene Theorie. Nach der von Édouard Albert ROCHE bereits im 19. Jahrhundert vorgeschlagenen Theorie entstanden die Ringe durch einen Mond, der sich dem Saturn so weit genähert hatte, dass er durch Gezeitenkräfte auseinander gebrochen ist. Der kritische Abstand wird als Roche-Grenze bezeichnet.

Der Unterschied der Anziehungskräfte durch den Saturn auf beiden Seiten des Mondes überstieg in diesem Fall die mondinternen Gravitationskräfte, sodass der Mond nur noch durch seine innere Festigkeit zusammengehalten worden wäre, welche aber zu schwach war. Unter diesen Bedingungen wird ein Objekt zerlegt.

150 Millionen bis maximal 300 Millionen Jahren nahe. „Our measurements is the most direct way you can measure it“, fügt KEMPF hinzu. „There is not much you can do about it. It has to be young“ (KEMPF et al. 2017).

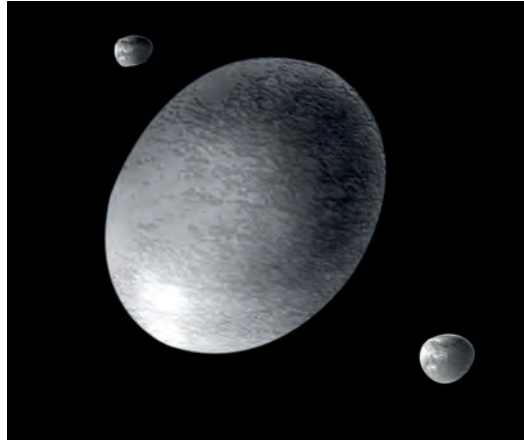
Demnach existierte vor einigen Hundert Millionen Jahren kein Ring. Saturn hat dieses Juwel (wie es genannt wird) erst sehr spät in seinem „Leben“ bekommen. Sollten Astronomen – nach den üblichen Altersvorstellungen – zur Zeit der Dinosaurier den Himmel geblickt haben, so hätten sie nur einen „nackten“, eher langweiligen Saturn ohne seinen „Heiligenschein“ gesehen.

So sollte vor noch nicht langer Zeit eine („schöne“) Katastrophe Saturn erreicht haben: Ein streunender Komet oder Asteroid mag einen Eismond gerammt haben, um besagte Brösel der Katastrophe in je einer Umlaufbahn unter Einhaltung gravitativer Gegebenheiten gleichmäßig zu verteilen. Oder hat ein anderer, bisher unbekannter Vorgang die Umlaufbahn eines Saturnmonds so sehr gestört, dass momentan wirkende Kräfte stärker waren als dessen innere Festigkeit? Jedenfalls müsste etwas Katastrophales passiert sein, was eine Entstehung des Saturnrings zugleich mit der Bildung des Planeten ausschließt.

2. Gesamtmasse des Ringsystems

In der Frühzeit des Planetensystems war die Anzahl der Objekte deutlich höher. Damit stieg auch die Zahl der Kollisionen untereinander. Diesem Verständnis folgend sollte ein Mond größer als der Saturnmond Mimas von einem Planetesimal (mutmaßlicher Vorläufer eines Planeten) getroffen und so der Ursprung des Ringsystems gewesen sein. Seit vielen Jahren war dies die Erklärung des Ursprungs des Saturn-Ringsystems. Als Hinweis galt die Dichte des B-Ringes (Teil des Ringsystems an der inneren Kante der von Giovanni Domenico CASSINI entdeckten und nach ihm benannten Lücke). Bereits die Raumsonde *Voyager* deutete durch die unerwartet detaillierte Struktur des Ringsystems an, dass dieses nicht sehr alt sein kann, da durch Kollisionsprozesse im Laufe der Zeit Störungen der Ordnung zu erwarten seien. Allerdings

Abb. 6 Künstlerische Darstellung des Zwergplaneten Haumea mit seinen Monden. Haumea ist der erste Zwergplanet, bei dem überraschenderweise ein Staubring entdeckt wurde. (A. FEILD, Space Telescope Science Institute)



wurde auch festgestellt, dass Schäfermonde gewisse „Ordnungshüter“ sind. Nun sollte *Cassini-Huygens* mehr Klärung in die Verwirrung um die Altersfrage bringen.

Während fünf von 22 *Cassini-Huygens*-Passagen durch die Ringebene rückte die Masse des B-Rings in den Fokus der Untersuchungen. Ein Radio-Experiment bestimmte aufgrund der minimalen Dopplerverschiebung die Gravitationskraft und damit die Masse des Rings, die nur das 0,4-Fache der Masse von Mimas zeigte. Dies ist um einiges weniger, als man vor dieser Messung vermutet hatte. Die Ringe sind sehr hell und bestehen zu über 90 % aus Wassereis. Mit dem *Cosmic Dust Analyser*, einem anderen *Cassini*-Messgerät, bestimmte man die Einfallsrates von dunklem Meteoritenstaub auf die Ringe. Diese Rate ist so hoch, dass die Ringmasse zu einem großen Anteil aus diesem Staub bestehen müsste und die Ringe sehr dunkel wären, wenn sie so alt wie der Saturn sein sollten (RACIOPPA et al. 2017).

3. Helligkeit des Ringsystems

Der zuvor genannte Schluss wird durch eine weitere Evidenz gestützt: Ein konstanter Regen dunkler Mikrometeorite fällt auf Saturn, der erwartungsgemäß die pristinen (= ursprünglichen) Wassereisteilchen im Ringsystem nachdunkelt. Die Schnelligkeit des Prozesses hängt von der Rate des Bombardements von außen ab, die bisher nur sehr unsicher bestimmt war.

Nach zwölf Jahren akribischer Suche hat das CDA-Experiment diese Unsicherheit durch sorgfältige Messungen aufgelöst. Und die Analyse ist inkonsistent mit einem alten Ring. Denn der gemessene einfallende Staubfluss ist satte zehn Mal höher als der zuvor abgeschätzte.

Wissenschaftler haben nun erst begonnen, Ring-formende Kollisionen neu zu denken. „It’s time for new ideas. The solar system could be full of surprises like this“, kommentierte Jeff CUZZI, ein Staubringexperte vom NASA Ames Research Center in Mountain View, Kalifornien, die neu entstandene Situation.

Erster Staubring um einen Zwergplaneten

Bis vor wenigen Jahren waren lediglich Ringe um die großen Gasplaneten Saturn, Uranus, Jupiter und Neptun bekannt. Dann entdeckten Astronomen gleich zwei Ringe um den Asteroiden Chariklo und später auch ein mögliches Ringsystem um den Asteroiden Chiron. Beide kreisen zwischen Saturn und Uranus um die Sonne. Mit der weiteren Entdeckung eines Rings um den Zwergplaneten Haumea (Abb. 6) haben die Astronomen nun einen Ring um einen nochmals gänzlich anderen Himmelskörper gefunden, der außerdem noch viel weiter von der Sonne entfernt ist.

Eigentlich war es ein eher hoffnungsloses Unterfangen, als in der Nacht vom 21. Januar 2017 der ferne Zwergplanet Haumea (aus der irdischen Perspektive) an einem Stern vorbeizog: Was sollte hier schon zu entdecken sein? Aber wenn sich schon einmal eine solche Konstellation ergibt, so sollte man zumindest genau hinschauen. Deshalb wurden zwölf Teleskope von zehn unterschiedlichen Observatorien zusammengeschlossen, um Daten zu sammeln. Vor allem ging es um Haumeas genauere Form, die Frage nach einer möglichen Atmosphäre – und um etwas, das nicht zu erwarten war (ORTIZ et al. 2017).

Physikalischer Kontext. Haumea ist einer von nur vier bisher bekannten Zwergplaneten, also von Objekten jenseits der Neptunbahn als Mitglieder des Kuipergürtels, einer von tausenden, die noch zu entdecken sind. So viel ist von ihm bekannt:

- Er hat eine lange Umlaufzeit um die Sonne von 285 Jahren.
- Er ist 50 Mal weiter von der Sonne entfernt als unsere Erde.
- Er hat eine außergewöhnliche Form, die einem langgezogenen Ei ähnelt, und ist nur halb so breit wie lang (Abb. 6).
- Seine Rotation benötigt weniger als vier Stunden; damit dreht sich Haumea schneller als jeder andere Himmelskörper im Sonnensystem.
- Seine Oberfläche ist – im Gegensatz zu anderen transneptunischen Objekten – von einer Schicht kristallinen Wassereises bedeckt.

Und nun zeigten die Beobachtungen der Sternbedeckung das Unerwartete: Haumea ist von einem Staubring umgeben.

Aktuelle Fragestellungen. Für die Entstehung des Staubrings haben die Forscher unterschiedliche Erklärungsversuche, so könnte er bei einer Kollision entstanden sein, die allerdings bei der großen Leere im äußeren Raum unseres Planetensystems große Zielgenauigkeit verlangen würde und damit eher unwahrscheinlich ist.

Vielleicht könnte aufgrund der außergewöhnlich hohen Rotationsgeschwindigkeit loses

Die Überraschung, dass der Saturn-Planetenkörper erst in jüngerer Zeit seine „Hutkrempe“ erhalten haben soll, ist für uns alle gewöhnungsbedürftig.

Material von der Oberfläche in die Umlaufbahn geschleudert worden sein, was aber bereits eine exotische Annahme wäre.

Schluss

„Mit der Entdeckung eines beringten Objekts im äußeren Sonnensystem und in einer völlig anderen Umgebung als die Gasplaneten wird die fundamentale Frage, wie sich solche Ringe bilden und entwickeln, noch spannender“, sagt Amanda SICKAFOOSE vom Südafrikanischen Astronomischen Observatorium in einem begleitenden Kommentar.

Bei aller Vielzahl verbliebener Rätsel hat sich bestätigt, dass Ringe junge Gebilde sind. Ähnlich wie bei Schwarzen Löchern, die zunächst eine Erfindung der Science-Fiction-Literatur waren und heute offensichtlich allgemeines „Zubehör“ jeder Galaxie sind, so sind offensichtlich Staubringe allgemeines Accessoire kosmischer Objekte, da sie bei zunehmend verschiedenen Objekten gefunden werden. Bei allen vorliegenden Erklärungsversuchen ist für sie bislang keine befriedigende Lösung gefunden; sie sind nach wie vor für Überraschungen gut.

„Durch die Entdeckungen der *Voyager*-Sonden haben sich Planetenringe als üblicher Bestandteil der Gasplaneten herausgestellt. Obwohl sie ziemlich unterschiedlicher Natur sind und unterschiedliche Ursachen haben mögen; eines ist ihnen gemeinsam: Es sind allesamt Kurzzeitphänomene, was durch ihren filigranen Charakter evident ist und durch ihre Entstehungsgeschichte plausibel gemacht wird. Umso erstaunlicher ist es, dass sie alle gleichzeitig auftreten“ – wenn wir technisch in der Lage sind, sie zu untersuchen. Dies ist ein Zitat aus einer alten Veröffentlichung („Neues aus der Planetenforschung – unerwartete Ergebnisse durch Raumsonden“) des Autors aus dem Jahre 1993. Diese Einschätzung gilt nach wie vor.

Versuchen wir, die eher jungen Alter – z. B. von Staubringen – mit den eher hohen Altern von Objekten in einem beschleunigt expandierenden Kosmos zu vergleichen, so stoßen wir auf eine Vielzahl von uns alt bzw. jung erscheinenden Phänomenen, was typisch ist für Schöpfung und in einer kontinuierlich verlaufenden Natur grundsätzlich nur schwer einzuordnen ist. Allerdings müssen wir nun lernen, dass ein zum (alten) Saturn gehöriger Ring wohl jüngeren Datums ist, was so keiner erwartet hat.

Dank

Ich möchte mich sehr herzlich bei Reinhard JUNKER für die gezeigte Akribie bei der Durchsicht des Manuskripts bedanken. Alfred KRABBE hat mit seinem profunden Wissen sorgfältig Inhalt und Aussage geprüft, während Albrecht EHREMANN mir entscheidend bei der Zusammenstellung der Originalquellen behilflich war. Allen danke ich für den beigesteuerten Mehrwert zu diesem Artikel!

Literatur

- ACKE B, MIN M et al. (2012) Herschel images of Fomalhaut – An extrasolar Kuiper belt at the height of its dynamical activity. *Astronomy & Astrophysics* 540, A125.
- BEUST H, AUGEREAU JC et al. (2014) An independent determination of Fomalhaut b's orbit and the dynamical effects on the outer dust belt. *Astronomy & Astrophysics* 561, id. A43, 16 pp.
- BRADLEY JP, ISHII HA et al. (2014) Detection of solar wind-produced water in irradiated rims on silicate minerals. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111, 1732–1735.
- DE LOOZE I, BAES M, JACOPO F & VERSTAPPEN J (2012) Panchromatic radiative transfer modelling of stars and dust in the Sombbrero galaxy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 419, 895–903.
- HANSLMEIER A (2002) Einführung in Astronomie und Astrophysik. Spektrum Akad. Verlag, Berlin.
- KALAS P, GRAHAM JR & CLAMPIN M (2005) A planetary system as the origin of structure in Fomalhaut's dust belt. *Nature* 435, 1067–1070.
- KALAS P, GRAHAM JR et al. (2008) Optical images of an exosolar planet 25 light-years from earth. *Science* 322, 1345–1348.
- KEPLER M, BENISTY M, MÜLLER A, HENNING T et al. (2018) Discovery of a planetary-mass companion within the gap of the transition disk around PDS 70. arxiv:1806.11568 [astro-ph.EP], accepted by *Astronomy & Astrophysics*.
- KEMPFF S, ALTABELLI N, SRAMA R, CUZZI JN & ESTRADA PR (2017) The Age of Saturn's Rings Constrained by the Meteoroid Flux Into the System. P. R., American Geophysical Union, Fall Meeting 2017, abstract #P34A-05, 12/2017.
- KUAN YJ, CHARNLEY SB, HUANG HC, TSENG WL & KISIEL Z (2003) Interstellar Glycine. *Astrophys. J.* 593, 848.
- MÜLLER A, KEPLER M et al. (2018) Orbital and atmospheric characterization of the planet within the gap of the PDS 70 transition disk, arXiv:1806.11567 [astro-ph.EP], submitted to *Astronomy & Astrophysics*
- ORTIZ JL, SANTOS-SANZ P et al. (2017) The size, shape, density and ring of the dwarf planet Haumea from a stellar occultation. *Nature* 550, 219–223.
- RACIOPPA P, DURANTE D & IESS L (2017) The mass of Saturn's B-ring from Cassini's Grand Finale orbits. 19th EGU General Assembly, EGU2017, Proceedings from the conference held 23–28 April, 2017 in Vienna, Austria., p.17150; 04/2017
- VOOSEN P (2017) Saturn's rings are a recent addition to the solar system, Cassini observations show. <http://www.sciencemag.org/news/2017/12/saturn-s-rings-are-recent-addition-solar-system-cassini-observations-show>

Anschrift des Verfassers:

Dr. Norbert Pailer, Landstr. 24, 88719 Meersburg-Stetten; E-Mail: norbert.pailer@amazingspace.com

Vogelfedern und Vogelflug

5. Selektion von Feder-Vorstufen – Schlüssel zur Erklärung der Entstehung von Federn?

Vogelfedern und ihre Verankerung im Körper sind äußerst kompliziert konstruiert. Nur dadurch können Federn flugtauglich und Teil des Flugapparats von Vögeln sein. Aufgrund dieser Komplexität wird evolutionstheoretisch kaum noch angenommen, dass Federvorstufen ursprünglich auf Flugfähigkeit hin selektiert worden seien. Vielmehr sollen sie anfangs andere Funktionen ausgeübt haben. Dazu gibt es zahlreiche Vorschläge, die kontrovers diskutiert werden. In allen Fällen bleibt ein großer Sprung von der hypothetischen Vorläuferfunktion bis zur Flugfunktion.

Reinhard Junker

Die bisherigen vier Teile dieser Artikelserie handelten von Bau und Feinbau der Vogelfedern und ihrer Verankerung, es wurden Modelle zu ihrer Entstehung erläutert und bewertet, fossile Funde vorgestellt, die Hinweise zur Entstehung von Federn geben könnten, und Flugentstehungstheorien besprochen. Zur Frage eines

hypothetischen evolutiven Entstehungsprozesses wurde gezeigt, dass sowohl die Modelle zur Entstehung von Federn als auch Flugentstehungsmodelle recht „grob gestrickt“ sind und kaum die zahlreichen für Federn und Flug erforderlichen Details beachten und dass sie große Schritte beinhalten, die von einer selektierbaren Fortbewegungsweise zur nächsten überwunden werden müssten.

Heute wird in evolutionstheoretischen Modellierungen kaum noch die Auffassung vertreten, dass Vogelfedern von Anfang an Teil eines Flugapparates waren. Vielmehr sollten sie zunächst andere Funktionen erfüllt haben und später für den Flug kooptiert worden sein. Es soll also Zwischenstufen mit anderer Funktion als der Flugfunktion gegeben haben. Hilft dieser Ansatz bei der Frage nach einer evolutiven Entstehung von Vogelfedern weiter?

Kompakt

In evolutionstheoretischen Modellierungen der Entstehung von Neuheiten wie Vogelfeder und Vogelflug müssen außer einem plausiblen Mechanismus auch Selektionsdrücke angegeben werden können. Welche Umwelteinflüsse (äußere Faktoren) oder konstruktiven Gegebenheiten (innere Faktoren) haben die Entstehung angetrieben? Vogelfedern müssen sehr ausgefeilt sein, um als Teil des Flugapparats geeignet zu sein. Es ist klar, dass umfangreiche Änderungen von Vorläuferstrukturen erforderlich sind, um zu flugtauglichen Federn zu gelangen, noch abgesehen davon, dass Federn nur eines von mehreren notwendigen Teilen des Flugapparats sind. Aus diesem Grund wird heute von fast niemandem mehr die Auffassung vertreten, dass Körperanhänge von mutmaßlichen Vogelvorläufern von vornherein auf Flugtauglichkeit selektiert worden seien. Vielmehr werden andere Erstfunktionen von Zwischenstationen vermutet. Dafür wurden zahlreiche Vorschläge gemacht: Thermoregulation, Hitzeschild, Schauapparat, Wasserabweisung, Fangnetz, Entsorgung, Unterstützung beim Brüten oder Vermittlung von Berührungseizen. Diese Erstfunktionen tragen jedoch allesamt allenfalls nur unwesentlich zur Lösung des Problems der evolutiven Entstehung von Federn bei. Der Hauptgrund für das Scheitern dieser Ansätze ist, dass der Sprung von der hypothetischen Erstfunktion zur Flugtauglichkeit kaum gegenüber der direkten Selektion auf Flugtauglichkeit verkleinert wird. Ein Großteil der für das Fliegen erforderlichen Einrichtungen wird für alle anderen diskutierten Zwecke nicht benötigt. Außerdem muss erklärt werden, warum und wie der Wechsel zu geänderten Selektionsbedingungen erfolgt ist statt zu einer weiteren Optimierung der hypothetischen Erstfunktion. Die Diskussion über Selektionsfaktoren, die die Entstehung von Federn angetrieben haben sollen, wird seit über einem Jahrhundert ohne überzeugendes Ergebnis und ohne Konsens geführt. Dies kann neben anderen Aspekten als Indiz gewertet werden, dass die Entstehung der Federn nur im Kontext einer Schöpfung verstanden werden kann.

Die mutmaßliche Rolle der Selektion

Evolutionäre Hypothesen müssen neben den Mechanismen und Abläufen auch plausible Selektionsfaktoren beinhalten, jedenfalls wenn es sich um darwinistische Hypothesen handelt, in denen Anpassung und Selektion wesentliche Faktoren sind. In jüngerer Zeit werden auch nicht-darwinistische Evolutionstheorien diskutiert: im Zusammenhang mit der Entstehung von Federn vor allem der Evo-Devo-Ansatz (Evoluti-

onäre Entwicklungsbiologie). Im Rahmen dieses Ansatzes wird diskutiert, dass Änderungen von Regulationsgenen sprunghaft große Auswirkungen haben könnten. Es gibt jedoch keinerlei experimentelle Belege dafür, dass auf diesem Wege konstruktive Neuheiten entstehen können – im Gegenteil: Mutationen von Regulationsgenen führen fast immer zu schweren Missbildungen (DAVIDSON 2011, 40).

Hin und wieder wird auch mit „Konstruktionszwängen“ argumentiert. Federn beinhalten jedoch mehrere Innovationen (vgl. JUNKER 2016), bauen also nicht auf Vorkonstruktionen auf, die als „Zwangsführungen“ für weitere evolutive Entwicklungen und evolutionäre Neuheiten in Anschlag gebracht werden könnten. Von einer evolutionären Kanalisierung durch Konstruktionszwänge kann bei Federn keine Rede sein.

Fragen zu Selektionsfaktoren werden in der Literatur zur Evolution des Vogelflugs öfter aufgeworfen. Beispielsweise schreiben PRUM & BRUSH (2003, 41) über ihr Federentstehungsmodell (JUNKER 2017): „Anzunehmen ist aber, dass jede der einzelnen Neuerungen, die bei dieser Evolution aufeinander aufbauten, einen eigenen Zweck erfüllt hat. Schon die allereinfachsten Röhrenfedern müssen einen Überlebensvorteil haben.“ Obwohl der ursprüngliche funktionelle Vorteil der ersten Federn ein Geheimnis bleibe, müsse die letztgültige Erklärung für den Ursprung der Feder einen Selektionsvorteil beinhalten. Das sind eigentlich triviale Aussagen, denn wenn neutrale Evolution oder Konstruktionszwänge keine Erklärung liefern, muss es notwendigerweise irgendwelche Selektionsdrücke und Selektionsvorteile gegeben haben; die Zitate machen aber deutlich, dass hier ein Problem gesehen wird.

Die meisten Biologen halten den Weg direkt zur Flugtauglichkeit für viel zu weit.

Meistens wird heute angenommen, dass Federn ursprünglich nicht auf Flugtauglichkeit selektiert wurden, denn die meisten Biologen halten den Weg *direkt* zur Flugtauglichkeit für viel zu weit. Es müssten einfach zu viele Änderungen erfolgt und Neuheiten entwickelt worden sein, damit eine anfangs einfach gebaute Integumentstruktur Teil eines Flugapparats sein kann. Folglich sollen „Protofedern“ zunächst eine andere Funktion gehabt haben. Dazu wiederum gibt es verschiedene Auffassungen, und ein Konsens zeichnet sich bis heute nicht ab, was als Symptom dafür gelten kann, dass diese Frage nicht geklärt ist. Weiter unten werden hypothetische Anfangsfunktionen zusammengestellt und diskutiert.

Widersprüchliche Selektionsdrücke

Ein generelles Problem bezüglich der Selektionsfaktoren ist, dass für verschiedene Funktionen der Federn bzw. „Vorfedern“ teilweise widersprüchliche Erfordernisse gegeben sind. Deshalb muss angenommen werden, dass es im Verlaufe der Federevolution einen oder mehrere Wechsel des Selektionsregimes gegeben hat. Beispielsweise erfordert Selektion auf Wärmedämmung andere Eigenschaften der Federn als Selektion auf Flugfähigkeit. Heutige Vögel besitzen für diese beiden Funktionen *gleichzeitig* verschiedene Federtypen. Die wärmedämmenden Daunenfedern sind als eigene „Schicht“ den Konturfedern unterlagert und entfalten ihre Wirkung bei Nässe auch nur unter dem Schutz der darüber liegenden Konturfedern; ohne diese wären sie als isolierende Schicht sogar kontraproduktiv.

Im Laufe der Federevolution müsste es einen oder mehrere Wechsel des Selektionsregimes gegeben haben.

Als weitere Beispiele für widersprüchliche Selektionsdrücke aus der Fachliteratur werden genannt:

- Für ein zweibeiniges Wirbeltier wäre es kein Vorteil, seine Vorderextremitäten auszubreiten, während es rennt. Denn für ein Flattern wäre das zwar günstig, jedoch kontraproduktiv in Bezug auf Luftwiderstand (HOMBERGER & DE SILVA 2000, 568).¹
- Es ist schwer vorstellbar, wie die Feder- und Hakenstrahlen der Konturfedern aus entsprechenden Fiederungen der Daunenfedern entstanden sein könnten oder umgekehrt, da beide für verschiedene Zwecke spezialisiert sind, im einen Fall dafür, dass sie verhaken können und dadurch einen Zusammenhalt ermöglichen, im anderen Fall, um die Federstrahlen auseinanderzuhalten (STETTENHEIM 2000, 469).²
- Es ist höchst unwahrscheinlich, dass eine Hand, die nur nach innen abgewinkelt werden kann, für Laufen oder Klettern genutzt werden kann; die Einschränkung bestimmter Handbewegungen ist dagegen sehr praktisch für das Fliegen (PETERS 2002, 350).³

Allgemein haben Modelle zur Entstehung von Federn mit dem Dilemma zu kämpfen, dass Federn, die nicht fürs Fliegen selektiert werden, sozusagen in eine falsche Richtung evolvieren, die für die Flugfähigkeit kontraproduktiv ist. Daher ist auch fraglich, ob das vor allem im Rahmen von Evo-Devo-Ansätzen beliebte Konzept der Kooption (Neuverwendung in anderem als dem bisherigen Zusammenhang) einen Erklärungsansatz bieten kann. Es wird deutlich, dass Abstimmungen des ganzen Flugsystems

Hinweis zu den

Anmerkungen: Die Anmerkungen enthalten Belegzitate; sie können als Zusatzmaterial zum Artikel unter www.si-journal.de/jg25/heft2/feder-und-flug-5.pdf heruntergeladen werden.

(angefangen vom „Material“ bis zum Verhalten) und zahlreiche andere Synorganisation erforderlich sind. Zukunftsblinde Selektion und zufällige Mutationen scheinen dafür hoffnungslos überfordert zu sein.

Im Folgenden sollen nun Vorschläge für Erstfunktionen von Federn oder „Protofedern“ zusammengestellt und kommentiert werden.

Erstfunktionen von Federn oder „Protofedern“

Flug

Die Auffassung, Federn seien direkt für Flugfähigkeit evolviert, wird von manchen Forschern im Zusammenhang mit der Baumtheorie vertreten (Entstehung des Vogelflugs ausgehend von Sturzflügen von Bäumen herab; vgl. JUNKER 2018). Als Begründung wird angeführt, dass die ganze Struktur der Konturfedern auf eine aerodynamische Funktion hin ausgebildet sei und dass andere primäre Funktionen unplausibel seien (FEDUCCIA 1996, 130; RUBEN & JONES 2000, 592; FEDUCCIA 2016, 24f.).⁴ Ähnlich hat sich bereits STEINER (1917) geäußert: „Der morphologische Bau der Vogelfeder ist derart an die Flugfunktion angepaßt, daß es eigentlich selbstverständlich sein sollte, daß nur unter Berücksichtigung dieses Hauptmomentes alle ihre Eigentümlichkeiten erklärt werden können“ (zitiert in STEPHAN 1979, 111).

Die große Mehrheit der Forscher hält es dagegen für ausgeschlossen, dass Federn direkt – von Anfang an – auf Flugfähigkeit hin evolvierten und entsprechende Selektionsdrücke herrschten. PETERS (2001, 393) weist darauf hin, dass „Schwungfedern und Steuerfedern nur dann als solche tauglich“ sind, „wenn sie schon so konstruiert sind, wie wir sie kennen“; der direkte Weg dahin sei viel zu weit. Es würden daher Zwischenstationen mit anderen Funktionen benötigt.⁵

Fliegen ist energetisch extrem „teuer“, was sich auch daran zeigt, dass diese Fähigkeit bei negativer Selektion sehr schnell wegfallen kann, was zahlreiche sekundär flugunfähige Formen beweisen (WRIGHT et al. 2016). Da dies auf effizient flugfähige heutige Vögel zutrifft, stellt sich die Frage, wie eine *noch nicht* flugfähige Form diese negative Selektion überhaupt überwinden konnte, um die Flugfähigkeit zu erwerben.⁶ Dieses Problem stellt sich nicht nur für den Ansatz, dass Selektion von Anfang an auf Flugfähigkeit „zielte“, sondern generell, also auch dann, wenn man annimmt, dass Federn zuerst für andere Zwecke evolviert sind und später für Flugfähigkeit kooptiert wurden.

Thermoregulation

Eine der zahlreichen Funktionen der Federn heutiger Vögel ist Thermoregulation. Diese Funktion wird häufig als Erstfunktion in der Evolution von Federn genannt. Das ist insofern naheliegend, als zu diesem Zwecke sehr viel einfachere Strukturen genügen als flugtaugliche Konturfedern. Doch auch gegen die „Wärmedämmung zuerst“-Hypothese gibt es Einwände.

Zum Zwecke der Wärmedämmung würden Haare genügen, und für deren Verzweigung, Fiederung oder Büschelung gäbe es keinen Anlass (vgl. TARSITANO et al. 2000, 683; PETERS 2001, 397).⁷

Einfache Haare bieten Säugetieren einen effektiven Kälteschutz.

Daunenfedern sind bei heutigen Vögeln den Konturfedern unterlagert und entfalten wie erwähnt ihre wärmedämmende Wirkung nur in dieser Anordnung; und in diesem Fall ist Verzweigung der Federn auch nützlich. Ungeschützt sind Daunenfedern sogar kontraproduktiv, weil sie leicht durchnässt werden können (leichter als unverzweigte Haare) und dann ihre isolierende Wirkung verlieren (FEDUCCIA 2012, 121f.). Die Nestlingsdaunen, das Federkleid der Jungvögel, sind keine echten Daunen, sondern modifizierte Konturfedern. Sie schützen ebenfalls vor Kälte, sind im Nest aber vor Durchnässung geschützt.

Da Daunenfedern anders als Konturfedern kein komplexes hydraulisches skeleto-muskuläres System in der Haut besitzen und ein solches auch nicht brauchen (MADERSON et al. 2000, 695), müsste dieses System in der weiteren hypothetischen Evolution zu Konturfedern evolvierten – angesichts seiner Komplexität (vgl. JUNKER 2016) ein enorm großer Schritt.

Für ein ektothermes (wechselwarmes) Tier wäre ein Federkleid kontraproduktiv für den Wärmehaushalt, da die Wärme von außen abgeschirmt würde (RUBEN & JONES 2000, 590; PETERS 2001, 394). Andererseits ist Endothermie (gleichwarme Körpertemperatur) ohne Behaarung wiederum problematisch. Der Erwerb einer wärmedämmenden Körperbedeckung wird daher im Zusammenhang mit Endothermie gesehen. PETERS (1985, 244) sieht das Problem, dass Endothermie und Körperbedeckung einander bedingen, ja sich sogar nur „parallel und in einem peniblen Zusammenspiel entwickelt haben“ konnten (PETERS 2001, 394). Endothermie aber wiederum erfordert einen erheblichen anatomischen und kybernetischen Aufwand (BOCK & BÜHLER 1995, 8).

PERSONS & CURRIE (2015, 859) weisen darauf hin, dass einfache, haarartige „Federn“ nur dann für die Thermoregulation genutzt werden können, wenn sie in großer Zahl angelegt werden, um ein dichtes Kleid zu ermöglichen. Daher



Abb. 1 *Psittacosaurus* mit langen, borstenartigen Auswüchsen im Schwanzbereich. (Senckenberg-Museum, VINTHER et al. 2016, CC BY 4.0)

könne Thermoregulation nicht die Erstfunktion gewesen sein, der evolutive Schritt dahin sei zu groß gewesen.⁸

Hitzeschild

Eine weitere Funktion von Federn ist Hitzeschutz. Diese Erstfunktion wird diskutiert im Zusammenhang mit REGALS Modell (REGAL 1975), wonach Vogelfedern aus umgewandelten, zunächst verlängerten Reptilschuppen entstanden sind. Verlängerte Reptilschuppen können eine Hitzeschild-Funktion ausüben. Allerdings wäre eine weitere Evolution zur Flugtauglichkeit kaum denkbar. Denn die verlängerte Schuppe müsste zu diesem Zweck zerschlitzt werden, was keinen Selektionsvorteil bringen würde, sondern eher nachteilig wäre. Bis zur Flugtauglichkeit wären enorme Umgestaltungen erforderlich, womit fast alle Probleme bewältigt werden müssten, die auch die Flugfähigkeit-direkt-Hypothese aufwirft.

Schauapparat, Schmuck, Balz

Federn dienen vielfach auch der Kommunikation, etwa als Schauapparat und bei der Balz. Diese Funktion als Primärfunktion von Federn wird heute von vielen Bearbeitern angenommen (z.B. COWEN & LIPPS 1982; ZHANG et al. 2008, 1107; DIMOND et al. 2011; KOSCHOWITZ et al. 2014a; FOTH et al. 2015⁹; BRUSATTE 2017). Mittlerweile sind fossile Gattungen entdeckt worden, die zwar flächige Federn mit zentralem Schaft besaßen, aber höchstwahrscheinlich flugunfähig waren (z.B. *Zhenyuanlong*; LÜ & BRUSATTE 2015). Einige Gattungen hatten möglicherweise kein komplettes Federkleid (*Beipiaosaurus*, *Ornithomimus*¹⁰), sondern waren nur an einigen Körperregionen befiedert, was ebenfalls zu einer Deutung als Schmuckfunktion passen würde. Da einige dieser Gattungen zu den ältesten bekannten befiederten Formen zählen, würde diese Erklärung auch relativ gut zur mutmaßlichen Phylogenese passen (KOSCHOWITZ et al. 2014b).

Die genannten Argumente sind jedoch wenig aussagekräftig und besagen insbesondere nichts über den Modus der Entstehung flächiger Federn. Unklar sind auch die Selektionsdrücke: Warum sollten zum Zwecke der Balz oder eines Imponiergehabes überhaupt Federn erstmals entstehen? Dafür genügen mit sehr viel weniger Aufwand entsprechend gefärbte und ggf. geformte Schuppen. Federfeinstruktur, Verankerung im Körper und Beweglichkeit der Federn u.a. müssten erst noch hinzukommen, um zur Flugtauglichkeit zu gelangen.

PETERS (1985, 246) wirft ein, dass eine Schaufunktion als primärer Selektionsfaktor nur Größerwerden der Schuppen erkläre, nicht aber deren weitere Ausarbeitung. Ein Beispiel dafür könnte *Psittacosaurus* (Abb. 1) sein, der im Schwanzbereich ganz eigenartig verlängerte Anhänge besaß, die vielleicht eine Signalfunktion hatten (MAYR et al. 2002, 364). Als Federvorstufen waren diese speziellen Anhänge jedoch kaum geeignet.

Heutige Signalfedern sind spezialisiert und auf einen kleinen Bereich des Körpers beschränkt.

MAYR (2014) gibt als Argument gegen „eine Schauwirkung“ als Selektionsfaktor zur Entstehung von Federn zu bedenken, dass bei den meisten sekundär flugunfähigen Vögeln die Federn ihre Fahne verlieren, was unterstreiche, dass die Fahne für die aerodynamische Funktion evolvierte (s. o.). Bei heutigen Vögeln sind Signalfedern auf einen kleinen Bereich des Körpers beschränkt, was ebenfalls dagegen spreche, dass die anfängliche Funktion von Federn eine Signalfunktion gewesen sei. Zudem haben Schmuckfedern oft keine flächige Form, sondern bestehen aus losen Federbündeln oder aus aufwändigen Ornamentstrukturen. Und sie sind fast ausschließlich auf ein Geschlecht, meistens das Männchen, beschränkt (MAYR 2014).¹¹

Für bandartige Federn wie die PRP-Federn (proximately ribbon-like pennaceous feathers)

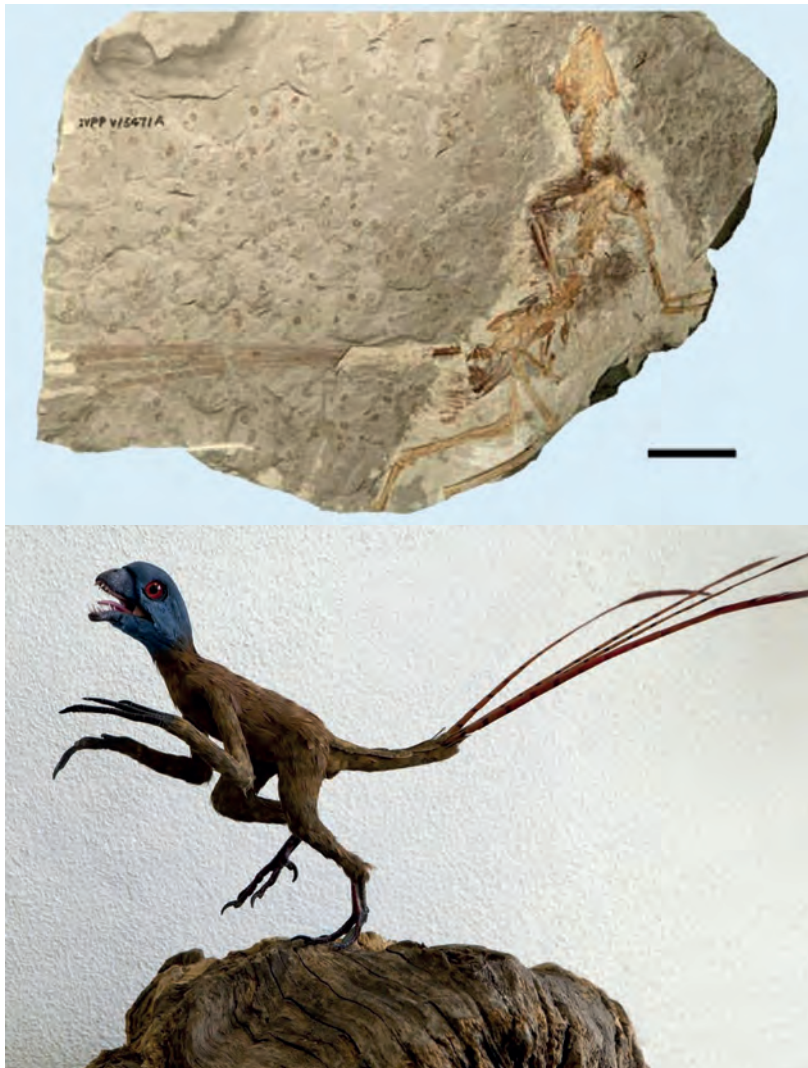


Abb. 2 Oben: *Epidexipteryx*-Fossil; die bandartigen Federn sind gut zu sehen. Balken: 5 cm (aus Xu & Guo 2009; mit freundlicher Genehmigung); unten: Rekonstruktion (Foto: LWL-Museum für Naturkunde)

bei den fossilen Gattungen *Similicaudipteryx* oder *Epidexipteryx* (Abb. 2) und die breit-fadenförmigen EBF-Federn (elongated broad filamentous feathers) bei *Beipiaosaurus* (Abb. 3) ist eine Schaufunktion zwar naheliegend, diese Federtypen sind aber ausgesprochen spezialisiert, ihre Entstehungsweise ist unbekannt und zur Klärung der Entstehung flugtauglicher Federn und der dafür nötigen Einrichtungen inklusive eines Federkleids tragen sie nichts bei.

Wasserabweisung

Die Eigenschaft der Wasserabweisung als ursprüngliche Funktion von Federn wird von DYCK (1985) vertreten. Er betrachtet Federn als homolog mit Reptilschuppen und als umstrukturierte

Abb. 3 Rekonstruktion des ca. 2 m großen *Beipiaosaurus inexpectatus* mit breit-fadenförmigen „Federn“. (Matt MARTYNIUK, CC BY-SA 3.0)



Schuppen. Die Fähigkeit der Wasserabweisung habe sich durch Bildung von Furchen auf der Schuppenoberfläche, die später zu Spalten wurden, entwickelt (DYCK 1985, 146). Die Wasserabweisung habe einige Selektionsvorteile. Bei Nässe seien die Tiere leichter als ohne diese Fähigkeit, weniger anfällig gegen Mikrobenbefall und Salzbelastung und sie bräuchten weniger Energie für das Verdunsten des Wassers (DYCK 1985, 148).

PETERS (2001, 394) hält diesen Weg der Federentstehung nicht für möglich, weil diese Funktion erst ab einer bestimmten Struktur von Federn möglich sei, die die Federn nicht von Anfang an gehabt haben können. Wie und warum daraus ein System von Bogen- und Hakenstahlen werden konnte, ist DYCK (1985, 147) selber unklar.¹² Der Selektionsvorteil ist eben erst im fertigen funktionalen Zustand gegeben, wie DYCK selber feststellt.¹³

PETERS (2001, 394) hält DYCKs Szenario auch deshalb für unglaublich, weil Federn erst durch ihre Pflege mit dem öligen Sekret aus der Bürzeldrüse wasserabweisend würden, das die Vögel mit dem Schnabel verteilen (vgl. BURCKHARDT et al. 1979, 20).¹⁴ DYCK (1985, 149) bestreitet das allerdings unter Hinweis auf einige Experimente, wonach für eine gewisse Zeit auf die Bürzeldrüse verzichtet werden könne.

Völlig unklar ist, wie aus Federn, die für Wasserabweisung optimiert wurden, flugtaugliche Federn wurden, da der Follikel und die daran anhängenden Strukturen nicht im Blickfeld sind.

Beute schlagen („Fangnetz“)

Während die bisher für die Erstfunktion vorgeschlagenen Funktionen von Federn bei heutigen Federn vorkommen, beinhalten zwei weitere Vorschläge Funktionen, die heute nicht ausgeübt werden. OSTROM (1974) schlug vor, dass die Federn im Kontext des Beuteerwerbs evolvierten (Abb. 4). Die Vorderextremitäten könnten zum Fang von Insekten eingesetzt worden sein; zu diesem Zweck seien eine Ausstattung mit Federn und die dadurch erzielte Vergrößerung der Fangfläche vorteilhaft gewesen (vgl. OSTROM 1979, 54–56).

Auch dieses Szenario ist nicht glaubhaft. Die Federn müssten schon recht gut entwickelt sein, damit sie den Beuteerwerb unterstützen konnten. Die Vorderextremitäten hätten luftdurchlässig sein müssen, um als Fangorgan genutzt werden zu können, weil die Beute sonst durch die Luftbewegung vertrieben worden wäre (BOCK 1986, 68; MARTIN 1985, 182; CHATTERJEE 1997, 153). Das aber würde Flügel für den Flug untauglich machen. Auch sonst sind die Erfordernisse fürs Fliegen ganz andere als für das Fangen; Selektion hätte nicht zur Verbesserung der Flugfähigkeit

geführt, da das Fangen dem Fliegen abträglich ist (PADIAN 1982, 13f). COWEN & LIPPS (1982, 111) halten das Modell für unbrauchbar, weil es keine Vorbilder dafür in der heutigen Tierwelt gibt, weil ein Insektennetz beim Laufen bremsend wirken würde und weil der Flügelschlag beim Fangen anders sein müsste als beim Fliegen (vgl. auch CHATTERJEE 1997, 153).

OSTROM hat die Fangnetztheorie in vielen Beiträgen vertreten, später aber aufgegeben.

Entsorgung

Eine sehr ausgefallene Idee für eine mögliche Erstfunktion von Federn publizierte REICHHOLF (1996; 2011; 2014, 184ff.). Federn sollen demnach ursprünglich eine Art Mülldeponie gewesen sein und dazu gedient haben, überschüssige Eiweiße mitsamt ihren schwefelhaltigen Bestandteilen sowie giftige Farbstoffe aufzunehmen. „Die Feder ist ein Produkt des Stoffwechsels, und zwar entstanden aus Eiweißbestandteilen, die Schwefel enthalten. Würden die, wie bei Säugetieren, im Körper abgebaut werden müssen, entstünde giftiger Schwefelwasserstoff“ (REICHHOLF 2011). Die Abfallprodukte entstünden bei Vögeln wegen ihrer hohen Stoffwechselintensität in so großen Mengen, dass eine besondere Entsorgung nötig wurde und anders als bei Säugetieren die Ausscheidung nicht ausreichte. REICHHOLF (1996, 29) weist darauf hin, dass bei der Mauser die Mehrzahl der Federn in gutem Zustand ist und auch diese gemausert werden; das spreche dafür, dass die Mauser auch eine Rolle bei der Entsorgung spiele.

REICHHOLFS Idee zur Entsorgung ist originell, aber in Bezug auf die Entstehung späterer Flugtauglichkeit ist sie ohne jeden Erklärungswert, da weder die filigrane Struktur noch die Verankerung und Beweglichkeit der Federn auch nur ansatzweise erklärt werden. Für die Entsorgungsfunktion ist nicht einmal erforderlich, dass die gleichsam als Mülleimer dienenden Anhänge speziell strukturiert sein müssten. Es ist daher verständlich, dass REICHHOLFS Idee in der Diskussion um die Entstehung der Vogelfeder nie eine nennenswerte Rolle gespielt hat. Wenn die Mauser wirklich auch eine Rolle für die Entsorgung spielt, wäre dies ein weiteres Indiz für die Synorganisation und die komplexen Zusammenhänge verschiedenster Aspekte beim Vogelbauplan.

Unterstützung beim Brüten

Als Erstfunktion von Federn vermuten HOPP & ORSEN (2004) eine Unterstützung beim Brüten. Schon kurze Körperanhänge hätten hierfür einen Selektionsvorteil geboten und sie hätten zur

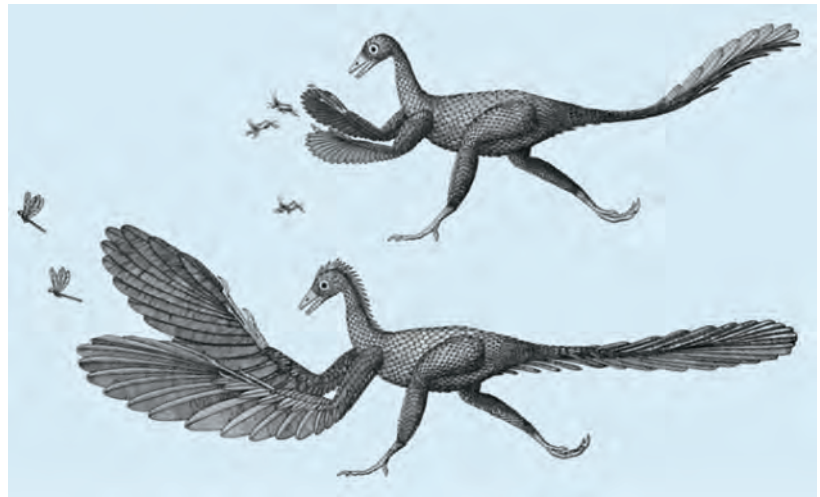


Abb. 4 Vom Insektenfangnetz zum Flügel? (Aus OSTROM 1979; mit freundlicher Genehmigung)

Verbesserung des Brütens schrittweise länger und komplexer werden können. Dabei seien auch ein Schaft und flächige Form entstanden, ebenso ihre Bewegungsfähigkeit, die die optimale Positionierung der Federn beim Brüten ermöglicht habe. Die Asymmetrie sei entstanden, weil kürzere Unterseiten der Federn in der Brutposition sinnvoll gewesen seien. Auch die Fähigkeit zum Einklappen der Vorderextremitäten sei auf diese Weise entstanden. All das sei später für den Flug kooptiert worden.

Der Schaft sei entstanden, damit die Federn in die passenden Positionen beim Brüten gebracht werden konnten (HOPP & ORSEN 2004, 241). Das Bogen-/Hakenstrahlen-System habe den Federn Stabilität verliehen, die nötig ist aufgrund von Beanspruchung und Beschädigung z.B. durch Nestbaumaterial.

Die Idee von HOPP & ORSEN (2004) ist zweifellos originell, aber gleichermaßen spekulativ und nicht prüfbar. Die Autoren verweisen auf Nester von Oviraptoriden als fossile Belege (Abb. 5), doch das ist kein klarer Beleg, zumal bei den betreffenden Oviraptoriden keine Federn entdeckt wurden (HOPP & ORSEN 2004, 236).¹⁵ Die Annahme, das Bogen-/Hakenstrahlensystem sei entstanden, um Beschädigungen zu vermeiden, ist weit hergeholt und unwahrscheinlich, da dieser Effekt auf einfachere Weise erreicht werden könnte, und es ist vom Ziel einer späteren Kooption für den Flug her gedacht, was für eine evolutionstheoretische Erklärung tabu ist. Ähnliches gilt für die Entstehung des Schafts.

Taktile Borsten

PERSONS & CURRIE (2015) schlagen vor, dass die Erstfunktion von Federn die Vermittlung von Berührungsreizen durch Borsten war. Borsten mussten zu diesem Zweck weder dicht stehen noch besonders lang gewesen sein. Borsten seien hypothetischen ersten Federstrukturen ähnlicher als Daunenfedern.¹⁶ Ein einfacher Beginn wäre

Ratlosigkeit auf einem Symposium

Die Teilnehmer eines Symposiums wurden im Rahmen einer Diskussionsrunde gefragt, wie ihrer Meinung nach die ursprüngliche Feder aussah. Die von MADERSON et al. (2000, 704f.) dokumentierten Antworten sind durchweg ausweichend und vage oder drücken Unkenntnis aus: „Probably there were all kinds of feathers right away when they first appeared, ...“ (HOMBERGER). „I choose not to reveal my ignorance“ (FARLOW). „I do not think there was an original kind of feather. In fact, I think maybe what we had happen [sic!] was hundreds, maybe thousands of phenotypes, and out of those we had the selection of some very highly

sophisticated, very highly specialized kind of structures. I think the original feathers were probably the whole landscape of them“ (PORTER). „I choose to demonstrate my ignorance. ... I can tell you what I do not think it will look like“ (SUMIDA). „[I]t depends where you look on the body. ... So the issue is not what was the original morphology of a feather, because there was no single, individual morphology, but the potential to produce a whole series of morphologies with some constraints“ (BRUSH). „It is a very difficult question to comment upon. ... ‘I don’t know, you tell me.’“ (TARSITANO).

damit denkbar. Einfache Borstenfedern gebe es auch bei heutigen Vögeln. Diese werden allerdings als rückgebildete Federn interpretiert; die Autoren halten diese Deutung jedoch nicht für zwingend. Der Übergang zur Thermoregulationsfunktion habe vonstattengehen können, sobald genügend Tasthaare sich entwickelt hätten (PERSONS & CURRIE 2015, 860). Der dafür notwendige Selektionsdruck würde jedoch in eine ganz andere „Richtung“ weisen als die Sinnesfunktion. Wie erfolgte der Übergang?

Kritisch anzumerken ist auch, dass eine Sinnesfunktion eine erhebliche evolutive Neuheit darstellt, da eine solche Funktion gleichzeitig Reizaufnahme (mittels an der Basis sitzenden Mechanorezeptoren), Reizübersetzung und -weiterleitung sowie die Fähigkeit zu passenden Reaktionen erfordert (ein Regelkreissystem). Das zu erreichen ist kein kleiner Schritt, auch wenn mutmaßlich schon auf vorhandene Tastsinnessysteme zurückgegriffen werden konnte.

Abb. 5 Mehrfach wurden Nester von Dinosauriern gefunden. Funde von auf ihren Nestern sitzenden Oviraptoren (A; B Kopf eines Tieres) lieferten Hinweise auf schnelle, gewaltsame Verschüttung. Selbst in den Eiern wurden Embryonen fossilisiert (C). (Nach NORELL et al. 1994; PAUL in WEISHAMPEL 1995 und NORELL et al. 1995, mit freundlicher Genehmigung, © American Association for the Advancement of Science)



Fossile Belege für das Vorkommen von Tasthaaren bei Dinosauriern fehlen laut PERSONS & CURRIE (2015, 861), doch meinen sie, dass sie schwer nachweisbar seien (was allerdings angesichts der häufigen Erhaltung von Dino-Flaum bezweifelt werden kann).

Schlussfolgerungen

Bis auf wenige Ausnahmen sind die Wissenschaftler der Auffassung, dass Federn nicht von Anfang an auf Flugfähigkeit selektiert wurden, sondern zunächst eine andere Funktion erfüllten und später für Flugzwecke kooptiert wurden. Über die mögliche Erstfunktion (und damit zusammenhängend anfängliche Selektionsdrücke) gibt es verschiedene Auffassungen, ein Konsens ist nicht in Sicht und Fossilien ermöglichen dazu keine Klärung. „Early fossil feathers also fail to provide relevant information“ (XU & GUO 2009, 312). So resümiert CHIAPPE (2009, 252), dass wir schlussendlich die ursprüngliche Funktion einfach nicht kennen, aber immerhin könne man die Flugfähigkeit als Erstfunktion ausschließen.¹⁷ SHIPMAN (1998, 159) stellt fest, dass jeder Aspekt bei jedem Argument auch als Gegenargument gebracht werden könne; die Sachlage sei unbefriedigend.¹⁸

Die Begründungen für alle Vorschläge sind relativ vage und gehen kaum oder überhaupt nicht in die Details. Letztlich wird mit dem Umweg über eine andere Erstfunktion von Federn als die der Flugtauglichkeit nicht viel gewonnen. Der Grund dafür ist, dass ein Großteil der für das Fliegen erforderlichen Einrichtungen (vgl. JUNKER 2016) für alle anderen diskutierten Zwecke nicht benötigt wird. Hinzu kommt bei der Kooptions-Hypothese noch die Schwierigkeit, dass ein Wechsel des Selektionsregimes angenommen werden muss, da die Selektion auf die Erstfunktion einer Weiterentwicklung Richtung Flugtauglichkeit abträglich ist.

„Feathers are a little too perfect – that’s the problem.“ (Proctor & Lynch)

PROCTOR & LYNCH (1993, 88) bringen das Problem treffend auf den Punkt: „Ironischerweise sind Vögel so gut an ihre Lebensweise in der Luft angepasst, dass nur wenige Spuren ihrer Evolution zurückgeblieben sind, die uns zeigen, wie ihre vielen Anpassungen an das Fliegen evolviert sind. ... Federn sind ein bisschen zu perfekt – das ist das Problem.“

In einem nicht-evolutionären Deutungsrahmen entfällt die Frage nach Selektionsdrücken, die eine erstmalige Entstehung von Federn oder deren mutmaßlichen Vorstufen begünstigt

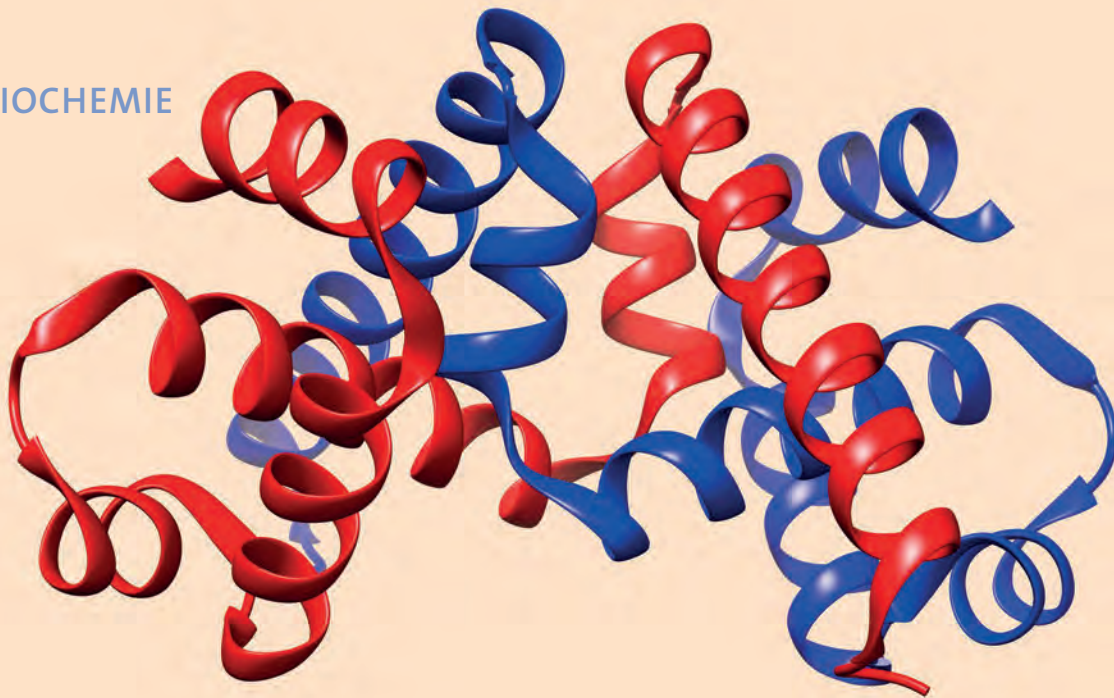
haben könnten. Arten müssen zwar überlebensfähig sein, nicht aber hypothetische Vor- oder Zwischenformen, weil diese nicht benötigt werden. Außerdem müssen nicht alle Merkmale unbedingt unter dem Zweckmäßigkeitsaspekt gesehen werden, es können auch Schönheit oder Phantasieerichtum eine Rolle spielen. Das nachhaltige Scheitern in der Suche nach einer testbaren und nachweislich plausiblen Antwort auf die Frage nach evolutionären Mechanismen der Federentstehung ist ein Indiz dafür, dass an der falschen Stelle gesucht wird. Schließlich wird diese Diskussion schon mehr als ein Jahrhundert lang geführt. Die Hürden für eine evolutionäre Erklärung sind zudem sehr viel höher geworden als früher, weil heute viel mehr ausgeklügelte Details des Feinbaus der Federn bekannt sind, die auf vielfache Abstimmungen hinweisen. Damit sind natürliche Mechanismen nach allem, was wir aus der Empirie wissen, überfordert.

Literatur

- BOCK WJ (1986) The arboreal origin of avian flight. Mem. Calif. Acad. Sci. 8, 57-72.
- BOCK WJ & BÜHLER P (1995) Origin of birds: Feathers, flight and homiothermy. *Archaeopteryx* 15, 5-13.
- BRUSATTE S (2017) Taking wing. *Sci. Am.* 316, 48-55.
- BURCKHARDT C, FÖLSCH DW & SCHEIFELE U (1979) Das Gefieder des Huhnes. *Animal Management / Tierhaltung* Volume 9.
- CHATTERJEE S (1997) The rise of birds. Baltimore, Maryland: John Hopkins Univ. Press.
- CHIAPPE LM (2009) Downsized dinosaurs: The evolutionary transition to modern birds. *Evo. Edu. Outreach* 2, 248-256.
- COWEN R & LIPPS JH (1982) An adaptive scenario for the origin of birds and of flight in birds. Proc. Third North Amer. Paleontol. Convention 1, 109-112. Montreal, Canada, August 5-7, 1982.
- DAVIDSON EH (2011) Evolutionary bioscience as regulatory systems biology. *Dev. Biol.* 357, 35-40.
- DIMOND CC, CABIN RJ & BROOKS JS (2011) Feathers, dinosaurs, and behavioral cues: defining the visual display hypothesis for the adaptive function of feathers in non-avian theropods. *Bios* 82, 58-63.
- DYCK J (1985) The evolution of feathers. *Zool. Scripta* 14, 137-154.
- FEDUCCIA A (1996) The origin and evolution of birds. Yale University Press, New Haven.
- FEDUCCIA A (2012) The riddle of the feathered dragons. New Haven & London: Yale Univ. Press.
- FEDUCCIA A (2016) FANTASY VS REALITY: A Critique of Smith et al.'s Bird Origins. *Open Ornithol. J.* 9, 14-38.
- FOTH C, RAUHUT O & TISCHLINGER H (2015) Als die Federn fliegen lernten. *Spektr. Wiss.* 4/2105, 28-33.
- HOMBERGER DG & DE SILVA KN (2000) Functional microanatomy of the feather-bearing integument: implications for the evolution of birds and avian flight. *Amer. Zool.* 40, 553-574.
- HOPP TP & ORSEN MJ (2004) Dinosaur brooding behavior and the origin of flight feathers. In: CURRIE PJ, KOPPELHUS EB, SHUGAR MA & WRIGHT JL (eds) Feathered dragons: studies on the transition from dinosaurs to birds. Bloomington: Indiana University Press, pp. 234-250.
- JUNKER R (2016) Vogelfedern und Vogelflug. 1. Was Evolutionshypothesen erklären müssten. *Stud. Integr. J.* 23, 75-82.
- JUNKER R (2017) Vogelfedern und Vogelflug. 2. Modelle zur Entstehung von Federn. *Stud. Integr. J.* 24, 4-11.
- JUNKER R (2018) Vogelfedern und Vogelflug. 4. Modelle zur Entstehung des Vogelflugs. *Stud. Integr. J.* 25, 20-27.
- KOSCHOWITZ MC, FISCHER C & SANDER M (2014a) Beyond the rainbow. *Science* 346, 416-418.
- KOSCHOWITZ MC, LAMBERTZ M, FISCHER C & SANDER PM (2014b) On the origin of feathers. Reply. *Science* 346, 1466-1467.
- LÜ J & BRUSATTE SL (2015) A large, short-armed, winged dromaeosaurid (Dinosauria: Theropoda) from the Early Cretaceous of China and its implications for feather evolution. *Sci. Rep.* 5:11775.
- MADERSON PFA, HOMBERGER D et al. (2000) Symposium on evolutionary origin of feathers: Panel discussion. *Amer. Zool.* 40, 695-706.
- MARTIN LD (1985) The relationship of *Archaeopteryx* to other birds. In: HECHT MK, OSTROM JH, VIOHL G & WELLNHOFFER P (Hg) The beginnings of birds. Eichstätt: Freunde des Jura-Museums, pp 177-183.
- MAYR G (2014) On the origin of feathers. *Science* 346, 1466.
- MAYR G, PETERS DS, PŁODOWSKI G & VOGEL O (2002) Bristle-like integumentary structures at the tail of the horned dinosaur *Psittacosaurus*. *Naturwissenschaften* 89, 361-365.
- OSTROM JH (1974) *Archaeopteryx* and the origin of flight. *Quart. Rev. Biol.* 49, 27-47.
- OSTROM JH (1979) Bird flight: How did it begin? *American Scientist* 67, 46-56.
- PADIAN K (1982) Running, leaping, lifting off. *The Sciences* 22, 10-15.
- PERSONS WS & CURRIE PJ (2015) Bristles before down: A new perspective on the functional origin of feathers. *Evolution* 69, 857-862.
- PETERS DS (1985) Functional and constructive limitations in the early evolution of birds. In: HECHT MK, OSTROM JH, VIOHL G & WELLNHOFFER P (eds) The beginnings of birds. Eichstätt: Freunde des Jura-Museums, pp 243-249.
- PETERS DS (2001) Probleme der frühen Vogelevolution. I. Die Sache mit den Federn. *Nat. Mus.* 131, 387-401.
- PETERS DS (2002) Anagenesis of early birds reconsidered. *Senckenbergiana lethaea* 82, 347-354.
- PROCTOR NS & LYNCH PJ (1993) Manual of ornithology. Avian structure & function. Yale Univ. Press.
- PRUM RO & BRUSH AH (2003) Zuerst kam die Feder. *Spektr. Wiss.* 10/03, 32-41.
- REGAL PJ (1975) The evolutionary origin of feathers. *Quart. Rev. Biol.* 50, 35-66.
- REICHHOLF JH (1996) Die Feder, die Mauser und der Ursprung der Vögel. Eine neuere Sicht zur Evolution der Vögel. *Archaeopteryx* 14, 27-38.
- REICHHOLF JH (2011) Der Ursprung der Schönheit: Darwins größtes Dilemma. München.
- REICHHOLF JH (2014) Ornith. Das Leben der Vögel. München.
- RUBEN JA & JONES TD (2000) Selective factors associated with the origin of fur and feathers. *Amer. Zool.* 40, 585-596.
- SHIPMAN P (1998) Taking Wing: *Archaeopteryx* and the evolution of bird flight. New York: Simon and Schuster.
- STEPHAN B (1979) Urvögel. Wittenberg-Lutherstadt.
- STETTENHEIM PR (2000) The integumentary morphology of modern birds – an overview. *Amer. Zool.* 40, 461-477.
- TARSITANO SF et al. (2000) On the evolution of feathers from an aerodynamic and constructional view point. *Amer. Zool.* 40, 676-686.
- WRIGHT NA, STEADMAN DW & WITT CC (2016) Predictable evolution toward flightlessness in volant island birds. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 113, 4765-4770.
- XU X & GUO Y (2009) The origin and early evolution of feathers: Insights from recent paleontological and neontological data. *Vertebrata Palasiatica* 47, 311-329.
- ZHANG F, ZHOU Z, XU X, WANG X & SULLIVAN C (2008) A bizarre Jurassic maniraptoran from China with elongate ribbon-like feathers. *Nature* 455, 1105-1108.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Reinhard Junker, Rosenbergweg 29, 72270 Baiersbronn; E-mail: sg@wort-und-wissen.de



Intrinsisch unstrukturierte Proteine

Fast ein halbes Jahrhundert lang galten Proteine als biologische Makromoleküle mit stabiler 3D-Struktur und eindeutig definierter biochemischer Funktion. Die Entdeckung der intrinsisch unstrukturierten Proteine (IUP) brachte dieses Paradigma zu Fall und förderte ein neues Forschungsgebiet zutage. Darüber hinaus hat die Entdeckung dieser Proteine auch Konsequenzen für die Evolutionstheorie. Die komplexe Bauweise vieler Proteine, die intrinsisch unstrukturierte Regionen (IUR) enthalten, die ungewöhnlich hohe Informationsdichte von IUP und auffällige Unterschiede in der Ausstattung der Lebewesen mit IUP stellen äußerst sperrige Befunde für den Darwin'schen Mechanismus dar. Handelt es sich bei dieser überaus wichtigen Entdeckung um ein weiteres Schöpfungsindiz?

Boris Schmidtgall

Abb. 1 Bändermodell eines Tryptophan-Repressors aus *E. coli*.

IUP – sensationell späte Entdeckung von großer Bedeutung

Für ein gründliches Verständnis des Phänomens Leben ist die Kenntnis von Vorgängen auf molekularer Ebene unverzichtbar. Dabei kommt Proteinen (neben Nukleinsäuren) eine Schlüsselrolle zu, da sie an praktisch allen physiologischen Prozessen beteiligt sind bzw. diese steuern. Das Prinzip der Wirkungsweise von Proteinen beruht auf deren Wechselwirkungen mit anderen Biomolekülen, wodurch u. a. chemische Reaktionen katalysiert* werden, Signalübertragung

stattfindet oder fehlgefaltete Moleküle wiederhergestellt (in ihre funktionale Form gebracht) werden. Es ist daher nicht überraschend, dass Proteine bereits vor über 100 Jahren Gegenstand umfangreicher wissenschaftlicher Studien waren. Schon 1894 veranschaulichte der Zuckerchemiker Emil FISCHER die Wechselwirkung zwischen Zuckermolekülen und Enzymen anhand der „Schlüssel-Schloss“-Analogie – ein einprägsames Modell, das für viele Generationen von Forschern richtungsweisend war. Demnach können Enzyme nur dann eine chemische Reaktion auslösen, wenn die Geometrie des Substrats*

genau zu derjenigen des Enzyms passt – wie bei einem Schloss, welches sich nur durch den genau passenden Schlüssel öffnen lässt (Abb. 1). Über die genaue Beschaffenheit der dreidimensionalen Struktur der Proteine war damals allerdings nichts bekannt. Es wurde jedoch allgemein angenommen, dass Proteine flexible Makromoleküle seien. Dies änderte sich in den 1950er-Jahren, als die Röntgenstrukturanalyse zu einer bewährten Methode der 3D-Strukturbestimmung von Molekülen wurde. Die Ergebnisse deuteten darauf hin, dass Proteine eine kompakt gefaltete und stabile 3D-Struktur aufweisen mit unterschiedlichen Strukturelementen wie α -Helix oder β -Faltblatt (Abb. 1). Daher war seit den 1960er-Jahren die Ansicht vorherrschend, dass eine stabile dreidimensionale Struktur eine notwendige Voraussetzung für die Funktion eines Proteins darstellt. Später wurde diese Auffassung als „Struktur-Funktions-Paradigma“ von ANFINSEN (1973) formuliert. ANFINSEN hatte am Beispiel einer Ribonuklease* experimentell nachgewiesen, dass Proteine sich von selbst aus einer denaturierten, funktionslosen Form in die ursprüngliche funktionale Form zurückfalten (Abb. 1). Genau genommen besagt das Struktur-Funktions-Paradigma, dass die Aminosäuresequenz eines jeden Proteins dessen 3D-Struktur festlegt und diese wiederum die Funktion des Proteins bestimmt:

1 Sequenz → 1 3D-Struktur → 1 Funktion

Diese Auffassung hielt sich bis Ende der 1990er-Jahre, als vermehrt Proteine nachgewiesen wurden, die sich nicht entsprechend dem Struktur-Funktions-Paradigma verhielten. Diese Proteine waren zwar hochgradig funktional, besaßen aber dennoch keine stabile 3D-Struktur. Dies bedeutet, dass die Position von Untereinheiten der Proteine ständig wechselt. Sie wurden deshalb von einem ihrer Entdecker als intrinsisch unstrukturierte Proteine (IUP) bezeichnet (DUNKER 1997). Die Tragweite dieses Befunds kommentierten P. WRIGHT und H. J. DYSON (1999) mit den Worten: „Es wird deutlich, dass die Annahme, eine gefaltete 3D-Struktur sei für die Funktion eines Proteins unabdingbar, neu bewertet werden muss.“

Diese Entdeckung löste eine Lawine an Publikationen auf dem Gebiet der Protein-Biochemie aus. Dabei wurden den IUP immer wieder unterschiedliche Bezeichnungen verliehen, die im Hinblick auf ihre Eigenschaften aufschlussreich sind. So wurden IUP als „schlaff“, „flexibel“ oder „dehnbar“ bezeichnet, um die Plastizität ihrer 3D-Struktur zum Ausdruck zu bringen (Abb. 2). IUP wurden mit dem Attribut „verletzlich“ versehen, da sie gegenüber dem Abbau durch Proteasen* in der Zelle wesentlich

Kompakt

Vor ungefähr 20 Jahren sind neuartige Proteine entdeckt worden, die sich von den bisher bekannten Proteinen dadurch unterscheiden, dass sie keine stabile 3D-Struktur aufweisen, sondern schnell zwischen verschiedenen Strukturen fluktuieren. Diese Proteine wurden von DUNKER, einem der Entdecker dieses Phänomens, als „intrinsisch unstrukturierte Proteine“ (IUP) bezeichnet. Aufgrund dieser Entdeckung wurde der bis dahin allgemein akzeptierte Leitgedanke relativiert, dass eine stabile 3D-Struktur für die Funktion eines Proteins unverzichtbar ist. Denn ungeachtet der fehlenden Festlegung auf eine 3D-Struktur sind IUP häufig sogar multifunktional. Sie erfüllen in Organismen Funktionen, die die Funktionen rigider Proteine ergänzen. Häufig sind IUP an Vorgängen wie Signalübertragung, dem Zusammenbau und der Faltung von Proteinen (Chaperone) oder der Steuerung der Transkription (Transkriptionsfaktoren) beteiligt. Der Grund für die späte Entdeckung dieser Proteine war die mangelnde Eignung traditioneller biochemischer Methoden zur Isolierung und Charakterisierung von IUP. So konnten IUP erst mit dem Aufkommen der genetischen Methoden Ende der 1990er-Jahre entdeckt werden. Ungeachtet ihrer späten Entdeckung handelt es sich bei dieser Proteinklasse nicht um eine marginale Erscheinung. Bei Eukaryoten sind sogar laut zuverlässigen Abschätzungen ca. 30 % des Proteoms intrinsisch unstrukturiert. Diese Entdeckung hat aber nicht nur zu einer Neubewertung eines zentralen Paradigmas der Biochemie geführt, sondern stellt das bisher gängige Erklärungsschema der Proteinevolution auf den Prüfstand. Es bedarf einer Erklärung für die Entwicklung hochspezifisch aufgebauter modularer Proteine mit langen unstrukturierten Sequenzen und kurzen Einheiten mit stabiler Faltung. Ebenso ist die z.T. deutlich höhere Informationsdichte (mehrere überlappende Funktionen in einer Sequenz) in multifunktionalen IUP aus Sicht der Evolutionstheorie schwer zu plausibilisieren. Schließlich deuten Abschätzungen darauf hin, dass die Zusammensetzung der Proteome der verschiedenen Domänen des Lebens sehr verschieden sind (Eukaryoten: 30 % IUP, Bakterien: 2-4 % IUP). Diese Diskontinuität der Proteinausstattung passt nicht zu einer Höherentwicklung, die in unmerklich kleinen Schritten zustande gekommen sein soll. Zudem deuten Sequenzvergleiche von IUP darauf hin, dass sie trotz erhöhter Aminosäure-Austauschraten (Mutationen) sich bezüglich ihrer Funktion kaum ändern. Aus Sicht der Schöpfungslehre sind die Befunde dagegen besser einzuordnen. Die erhöhte Informationsdichte, die in multifunktionalen IUP realisiert ist, ermöglicht eine im Hinblick auf Kompaktheit und Materialeffizienz optimierte Zelle – ein deutliches Schöpfungsindiz. Schließlich lassen sich hochgradig artspezifische IUP-Anteile an den jeweiligen Proteomen der Spezies (wie sie für einige Archaea-Arten gefunden worden sind) ebenfalls besser aus der Perspektive der Schöpfungslehre verstehen.

empfindlicher sind als Proteine mit stabiler 3D-Struktur. Weitere originelle Beschreibungen wie „tanzende Proteine“, „4D-Proteine“ (die Zeit als vierte Dimension) oder „Proteinwolken“ verdeutlichen die schnelle Fluktuation ihrer Sekundär- und Tertiärstrukturen (UVERSKY 2011). Und da sie aufgrund dieser Fluktuationen auf Röntgenstrukturaufnahmen unsichtbar sind, wurde auch von „unbeobachteten“ oder „dunklen“ Proteinen gesprochen.

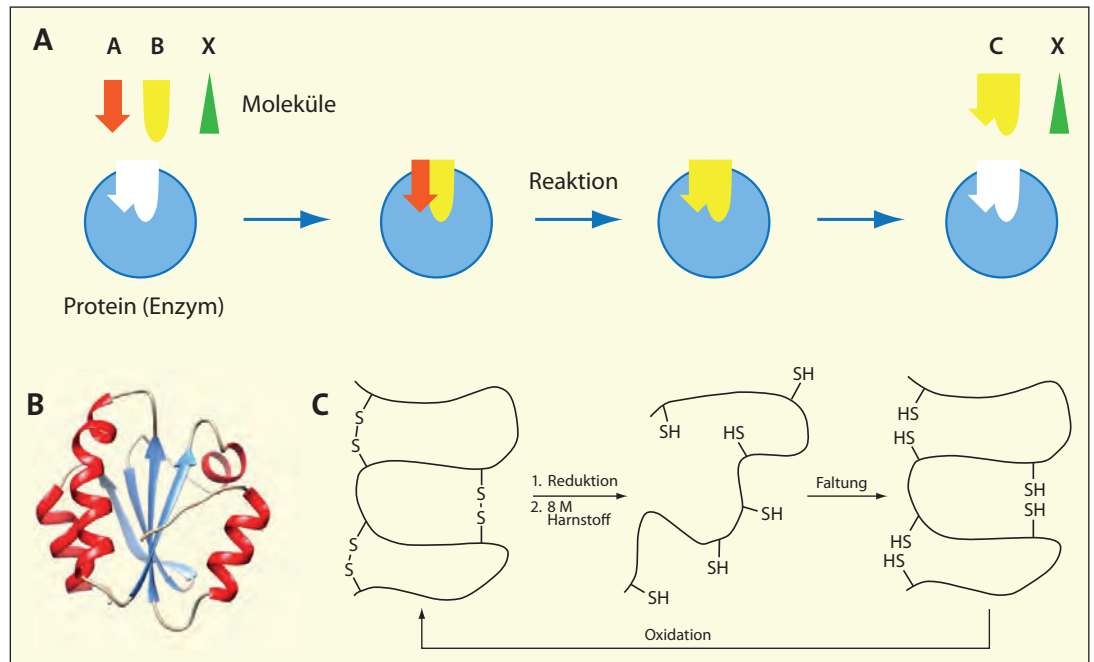
Ungeachtet ihrer späten Entdeckung handelt es sich bei IUP nicht um eine Randerscheinung, sondern um Makromoleküle mit zentralen Funktionen in der Zelle (s. u.). Zudem wird der Anteil der IUP am Proteom* von Eukaryoten auf etwa 30 % geschätzt (LIU et al. 2009). Dabei können Proteine entweder komplett unstrukturiert sein oder neben geordneten Domänen intrinsisch unstrukturierte Regionen (IUR) enthalten.

Wie kann es sein, dass ungefähr ein Drittel des Proteoms von Eukaryoten bis Ende der 1990er-Jahre übersehen wurde? Es liegt hauptsächlich daran, dass biochemische Methoden zur Isolation

Abb. 2 A Veranschaulichung des Schlüssel-Schloss-Prinzips anhand einer enzymkatalysierten Reaktion. Die Moleküle A und B werden in das aktive Zentrum aufgenommen und dort zur Reaktion gebracht, sodass Produkt C entsteht. Nach Freisetzung des Produkts kann ein neuer Katalysezyklus beginnen. Das Molekül X bleibt unverändert, da es von seiner Geometrie her nicht ins aktive Zentrum passt.

B Das bakterielle Redox-Enzym Thioredoxin ist ein typischer Vertreter der klassischen Proteine mit fester 3D-Struktur. Die rot gefärbten Bereiche repräsentieren α -Helices, während die blauen Bereiche β -Faltblätter darstellen.

C Schematische Darstellung des Experiments von ANF-INSSEN. Zu Beginn liegt die Ribonuklease in der funktionalen, gefalteten Form vor, die durch Reduktion (Spalten der S-S-Brücken durch Elektronenübertragungsreaktionen) und hohe Harnstoff-Konzentration in eine ungefaltete, funktionslose Form überführt wird. Anschließend werden Bedingungen (z. B. pH, Salzgehalt der Lösung) eingestellt, unter denen das Molekül sich wieder zurückfalten kann. Durch Oxidation kann das Molekül wieder in die ursprüngliche, funktionale Form zurückgeführt werden.



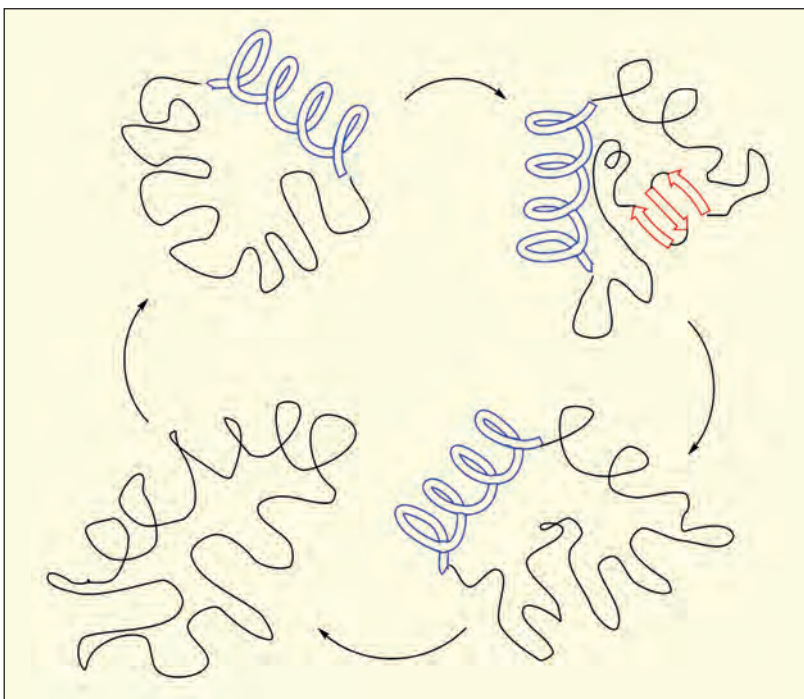
und Charakterisierung von Proteinen zur Entdeckung der IUP ungeeignet waren. Üblicherweise wurden Proteine durch Zellaufschluss^{*} und verschiedene Fällungsmethoden^{*} gewonnen. Bei diesen Operationen wird die natürliche Struktur der Zelle zerstört und es resultiert eine homogene Mischung der Zellbestandteile. Dabei werden die häufig vorkommenden Proteasen unkontrolliert freigesetzt. IUP werden von Proteasen sehr viel schneller abgebaut als strukturierte Proteine. Zudem liegen unstrukturierte Proteine aufgrund ihrer Anfälligkeit für Aggregation^{1*} häufig in sehr niedrigen Konzentrationen in der Zelle vor. Diese Umstände verhinderten über einen langen Zeitraum die Entdeckung von IUP. Stattdessen wurden unter Verwendung der üblichen biochemischen Methoden selektiv strukturierte

Proteine isoliert. Erst als zunehmend mit Hilfe gezielter Expression^{*} bestimmter Gene Proteine hergestellt wurden, stieß man auf IUP.

Funktionen von IUP

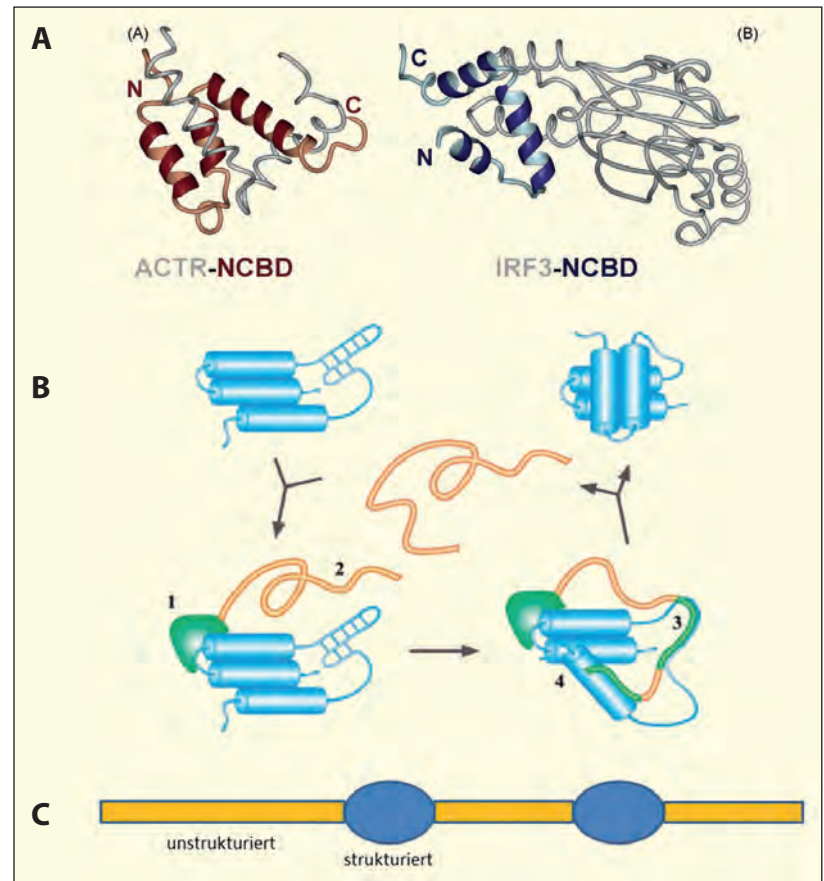
IUP unterscheiden sich aber nicht nur im Hinblick auf ihre Beschaffenheit von klassischen strukturierten Proteinen, sondern auch bezüglich ihrer typischen Funktionen in der Zelle. Während strukturierte Proteine hauptsächlich als Enzyme (Katalyse chemischer Reaktionen), Rezeptoren (Wahrnehmung) sowie Transport- und Transmembranproteine fungieren, sind IUP vorwiegend für ergänzende Aufgaben verantwortlich, wie im Folgenden ausgeführt wird (Tab. 1). Durch ihre Flexibilität vermögen IUP viele unterschiedliche 3D-Formen anzunehmen, weshalb sie mit vielen, überaus verschiedenen Biomolekülen spezifisch wechselwirken können. Die Plastizität der IUP ist unverzichtbar für die molekulare Erkennung. Aus diesem Grund sind Proteine, die die Transkription^{*} auslösen oder steuern (Transkriptionsfaktoren), häufig sehr „weich“². Ein in der aktuellen Literatur häufig behandeltes Beispiel sind die Proteindomänen NCBD (nuclear coactivator binding domain) und ACTR (activator for thyroid and retinoid receptors), die miteinander und mit anderen Proteinen interagieren. Die kleine NCBD-Domäne (etwa 50 Aminosäuren lang) ist u. a. verantwortlich für das Auslösen der unspezifischen Immunantwort, der Proliferation^{*} und der Differenzierung. Bei seiner Interaktion mit ACTR bildet NCBD eine annähernd tetraedrische Form, während es sich zu einem planaren Dreieck formt, wenn es zum Kontakt mit dem Protein IRF-3 kommt (Abb. 3) (WRIGHT & DYSON 2009).

Abb. 3 Schematische Darstellung der schnell wechselnden 3D-Strukturen eines IUP.



Die Flexibilität der IUP ermöglicht es ihnen auch, als Chaperone zu fungieren. Chaperone sind Proteine, die die richtige Faltung anderer biologischer Makromoleküle (Proteine, RNA) katalysieren oder fehlerhaft gefaltete Moleküle in die richtige Form bringen. Dies ist notwendig, da viele biologische Makromoleküle nicht von sich aus dazu in der Lage sind, die korrekte 3D-Form (Faltung) anzunehmen. Die Katalyse der Faltung oder Faltungskorrektur verläuft über den sogenannten Entropie-Transfer-Mechanismus (Abb. 3) (TOMPA & CSERMELY 2004): Vor der Interaktion liegt das Chaperon (IUP) ungefaltet vor – ein Zustand hoher Entropie*. Dagegen liegt beim fehlerhaft gefalteten Makromolekül ein Zustand geringer Entropie vor. Bei der Interaktion der beiden Moleküle kommt es zu einem Faltungsvorgang des Chaperons und zugleich einer Entfaltung des zu korrigierenden Moleküls. Im Fall des Chaperons sinkt die Entropie, während sie beim anderen Molekül steigt – ein Vorgang, der als „Entropietransfer“ bezeichnet wird. Anschließend löst sich das Chaperon von dem Makromolekül, welches sich dann in die korrekte Form falten kann. Abgesehen von anspruchsvollen Funktionen wie im Fall der Chaperone sind auch recht simple Beispiele bekannt: In vielen großen Proteinen kommen lange, unstrukturierte Regionen vor, die schlicht flexible Verknüpfungen zwischen funktionalen, strukturierten Domänen darstellen. Dieser „modulare“ Aufbau (kleine, strukturierte, funktionale Einheiten; lange, flexible Verknüpfungen) ermöglicht es Proteinen, komplexe molekulare Einheiten wie z.B. das Chromatin* „abzutasten“ und die genau richtige Stelle für die Interaktion aufzufinden (Abb. 3).

Viele Entdeckungen in diesem Forschungsbereich sind allerdings noch unverstanden. Dazu gehören die rätselhaften membranlosen Organellen, die offenbar unverzichtbar für zahlreiche physiologische Vorgänge sind (z.B. die Proteinbiosynthese) und ausschließlich aus IUP bestehen (UVERSKY 2017). Schließlich wurden auch faszinierende Entdeckungen gemacht, wo IUP nicht im Zusammenhang mit typischen biochemischen Funktionen stehen. Eine sehr eigenartige Aufgabe übernehmen IUP in den mikroskopisch kleinen Bärtierchen. Diese Lebewesen können selbst lange Dürreperioden mit einer Dauer von über zehn Jahren überstehen – dank glasartiger Strukturen, die aus IUP gebildet werden und den Austritt von Wasser verhindern (KNAPP 2017). Wie bereits erwähnt, sind IUP aufgrund ihrer späten Entdeckung ein noch relativ wenig erforschtes Phänomen. Es ist also damit zu rechnen, dass auch künftig weitere unerwartete und wichtige Befunde im Zusammenhang mit den flexiblen Proteinen gemacht werden.



Fragestellungen in Bezug auf die Evolutionstheorie

Die überaus wichtige Entdeckung der IUP und ihrer Funktionen hat aber nicht nur weitreichende Auswirkungen auf unser Verständnis rein funktionaler biochemischer Aspekte. Sie stellt auch, wie im Folgenden gezeigt wird, neue Fragen an die Darwin'sche Evolutionstheorie (bzw. neodarwinistische Varianten).

1. Evolutive Entstehung modular aufgebauter Proteine. Vor der Identifizierung von IUP galten Proteine als Makromoleküle mit einer festen 3D-Struktur. Die Existenz der oben erwähnten, modular aufgebauten Proteine (kurze strukturierte Funktionseinheiten, lange unstrukturierte Verknüpfungen) erhöht bedeutend die Anforderungen an Erklärungen eines evolutiven Zustandekommens dieser Makromoleküle. Es hat sich nämlich gezeigt, dass die 20 kanonischen Aminosäuren in zwei Typen unterteilt werden können: solche, die Strukturlosigkeit fördern, und andere, die typischerweise in geordneten Proteinen vorgefunden werden. Um modulare Proteine aufzubauen, müssten also Aminosäuren auf sehr sorgfältige Weise „sortiert“ werden (Tab. 1). Wie eine solche Sortierung durch einen zukunftsblinden, natürlichen Prozess zustande gekommen sein soll, ist völlig unklar.

2. Evolutive Entstehung multifunktionaler* Proteine. Eine weitere Fragestellung ergibt sich aus der oft vorkommenden

Abb. 4 A In Kristallstrukturen beobachtete, unterschiedliche geometrische Formen der Proteindomäne NCBD. Bei der Interaktion mit ACTR nimmt NCBD eine nahezu tetraedrische Form an (A), während es bei Kontakt mit IRF-3 eine planardreieckige Form annimmt (B). Aus WRIGHT & DYSON 2009.

B Schematische Darstellung der Wirkungsweise eines Chaperons durch den Entropie-Transfer-Mechanismus. Bei der Interaktion mit dem fehlerhaft gefalteten Molekül (blau) nimmt das IUP eine lokale Sekundärstruktur (grün) an (1), während ein anderer Teil (2) zunächst ungefaltet vorliegt. Im nächsten Schritt interagiert der andere Teil des IUP mit dem fehlerhaft gefalteten Bereich des anderen Biomoleküls, dadurch nimmt das IUP auch hier eine definierte Sekundärstruktur an (3 und 4). Gleichzeitig wird das andere Molekül entfaltet (Entropie-Transfer). Schließlich trennen sich beide Moleküle und es kann ein neuer Reparaturzyklus beginnen. (Aus TOMPA & CSERMELY 2004)

C Schematische Darstellung eines modular aufgebauten Proteins. Die unstrukturierten Verknüpfungen sind als orange Balken dargestellt und die strukturierten Bereiche als blaue Ellipsen.

Glossar

Aggregation: Unlösliches Haften von Proteinen aneinander oder an anderen Biomolekülen.

Chaperone: Proteine, die die korrekte Faltung anderer Proteine oder RNA-Moleküle katalysieren oder fehlerhaft gefaltete Biomoleküle „reparieren“.

Chromatin: Das Material, aus dem Chromosomen bestehen. Es handelt sich dabei um DNA, die auf komplexe Weise um verschiedene Proteine gewunden ist.

Entropie: In der Thermodynamik bezeichnet dieser Begriff das Maß an Unordnung eines Systems. Übertragen auf Biomoleküle kann gesagt werden, dass gefaltete Moleküle eine geringere Unordnung aufweisen als ungefaltete.

Fällungsmethoden: Generell werden in der Chemie bestimmte Moleküle aus einer Lösung isoliert, indem sie durch das Einstellen bestimmter Bedingungen unlöslich gemacht werden und sich am Gefäßboden absetzen. Bei Proteinen werden üblicherweise der Lösung Salze (z. B. Ammoniumsulfat) abgestuft hinzugesetzt, sodass verschiedene Fraktionen von Proteinen sich am Gefäßboden absetzen.

Katalyse: Beschleunigung chemischer Reaktionen.

multifunktional: Mehrere unterschiedliche Funktionen ausübend.

Proliferation: Allgemeiner Begriff für das Wachstum von Gewebe oder Zellen.

Proteasen: Enzyme, die Proteine in kleinere Fragmente spalten. Die Spaltung erfolgt an der Peptidbindung durch das Einlagern eines Wassermoleküls (Hydrolyse).

Proteom: Gesamtheit aller Proteine einer Spezies.

Ribonuklease: Enzym, das die Spaltung von RNA-Molekülen katalysiert.

Substrat: Allgemeiner Begriff für ein Molekül, das mit einem Protein interagiert bzw. von einem Enzym zur Reaktion gebracht wird.

Transkription: Übersetzung der DNA in messenger-RNA (mRNA), der erste Schritt bei der Bildung von Proteinen in den Zellen.

Zellaufschluss: Durch bestimmte Chemikalien hervorgerufene Zerstörung der Membran (Außenwand) einer Zelle.

Multifunktionalität unstrukturierter Proteine. Lange Zeit war das oben erwähnte Struktur-Funktions-Paradigma ein Leitgedanke in der Erforschung der Proteine. Dies bedeutet, dass jedem Protein nur eine einzige Funktion eigen ist, die sich aus der spezifischen Faltung des Proteins ergibt – also letztlich eine Folge der Vorgabe durch die Information auf der DNA ist. Da jedoch die Selektion ausschließlich auf der Ebene der Proteine stattfindet, ist es ohnehin schwer zu erklären, wie ein zukunftsblinder Vorgang sinnvoll koordinierte Veränderungen auf der DNA herbeiführt, sodass über mehrere Schritte ein monofunktionales Protein hervorgebracht wird. Durch die Entdeckung von IUP wird der Anspruch an die Erklärung wesentlich erhöht, denn in diesem Fall sind in einer Proteinsequenz zugleich mehrere überlappende Funktionen „gespeichert“. Das gilt folglich auch für die zugrundeliegende DNA-Sequenz. Dabei ist zu

Tab. 1 Zusammensetzung und Eigenschaften von IUP und strukturierten Proteinen im Vergleich.

Aminosäuren	unstrukturiertes Protein		strukturiertes Protein	Aminosäuren
Arg, Gly, Gln, Ser, Glu, Lys, Pro, Thr, Ala, Asp	Struktur-störende Aminosäuren	Zusammensetzung	Struktur-fördernde Aminosäuren	Ile, Leu, Val, Trp, Tyr, Phe, Cys, Asn, Met, Hi
	hohe Ladung, hydrophil, labil gegenüber Proteasen	Eigenschaften	geringe Ladung, hydrophob, stabil gegenüber Proteasen	
	Regulierung, Chaperon, Signalübertragung, flexible Verknüpfung	Funktionen	Enzym, Katalyse, Rezeptoren, Transport, Transmembranprotein	
	1 Sequenz → keine Struktur → viele Funktionen		1 Sequenz → 1 Struktur → 1 Funktion	

beachten, dass IUP mit mehreren, strukturell sehr unterschiedlichen Bindungspartnern (z. B. Proteinen und Nukleinsäuren) selektiv interagieren und keineswegs zufällig.

3. Große Diskrepanzen hinsichtlich des IUP-Anteils im Proteom verschiedener Spezies. Da IUP keine Randerscheinung sind, sondern in nicht wenigen Organismen über 30 % des Proteoms ausmachen, wurden Algorithmen erstellt, um vorhersagen zu können, ob eine gegebene Aminosäuresequenz strukturiert oder unstrukturiert ist. Diese Algorithmen werden im Allgemeinen als sehr zuverlässig eingeschätzt. Überraschenderweise ergaben sich große Unterschiede hinsichtlich des Anteils der IUP am jeweiligen Proteom zwischen den verschiedenen Domänen des Lebens (Eukaryoten, Prokaryoten, Archaeobakterien). Besonders auffällig ist der markante Unterschied zwischen höheren Organismen (30 % IUP) und Bakterien (2–4 % IUP). Andererseits gibt es auch einige Organismen (z. B. Halobakterien: 34 % IUP), die für ihre Domäne einen ungewöhnlich hohen Anteil an IUP im Proteom aufweisen (VAN DER LEE et al. 2014). Auch diese Befunde stellen eine immense Herausforderung für evolutionstheoretische Erklärungen dar, da eine kontinuierliche, in sehr kleinen Schritten erfolgende Höherentwicklung derart ausgeprägte Diskontinuitäten in der Proteinausstattung der verschiedenen Domänen des Lebens nicht erwarten ließe.

Können für das Phänomen IUP und die daraus resultierenden Fragen plausible Erklärungen im Sinne der Darwin'schen Theorie gegeben werden? Dabei ist zu berücksichtigen, dass solche Erklärungen nur auf natürliche Gesetzmäßigkeiten, d. h. Zufall und Randbedingungen, nicht aber auf Planung und Zielsetzung in irgendeiner Form Bezug nehmen dürfen.

Erklärungsversuche für IUP im Rahmen der Evolutionslehre

Bevor potenzielle evolutionstheoretische Erklärungen für IUP angeführt werden, seien einige generelle Aspekte in Bezug auf das Variationspotential der Proteinstruktur erwähnt. Abgesehen

von der völlig ungelösten Frage nach der evolutionen Entstehung einfacher funktionaler Proteine sind für die Entwicklung neuer biochemischer Funktionen (Makroevolution) häufig umfangreiche Veränderungen der Proteinstruktur nötig. Im Sinne einer evolutionstheoretischen Erklärung wäre eine Höherentwicklung primitiver kleiner Proteine hin zu größeren komplexeren Proteinen durch viele kleine Veränderungen (Mutationen) denkbar. Allerdings dürfte der Spielraum für solche Veränderungen generell nicht besonders groß sein. Nahezu alle bekannten Proteine, ob groß oder klein, sind für ihre biochemische Funktion optimal beschaffen und reagieren oft schon auf kleine Veränderungen wie Punktmutationen* sehr empfindlich. Proteine interagieren mit anderen biologischen Makromolekülen über bestimmte Oberflächen, die aus hydrophilen (wasserliebenden), hydrophoben (wasserabweisenden) und geladenen Aminosäuren (negativ oder positiv) zusammengesetzt sind. Dabei müssen die Oberflächen eine ausgewogene Mischung der Aminosäuren aufweisen, damit die Balance zwischen Aggregation (unlösliches Haften) und zu schwachem Kontakt gehalten werden kann. Überdies würden zu starke Wechselwirkungen selektive Kontakte unmöglich machen, während zu schwache Wechselwirkungen ungenügend sind für einen signifikanten biologischen Effekt (z.B. Signalübertragung). Brauchbare Erklärungen für die Entwicklung von neuen Proteinfunktionen müssen diese Einschränkungen berücksichtigen. Welche Hypothesen wurden für die Makroevolution von hypothetischen Vorläufern von Proteinen hin zu IUP vorgeschlagen?

Das Zustandekommen neuer Merkmale und Funktionen bei Lebewesen, sei es auf biochemischer oder auf biologischer Ebene, wird im Rahmen der Evolutionstheorie durch Extrapolation mikroevolutiver Mechanismen auf hypothetische makroevolutive Vorgänge erklärt. Insbesondere Mutationen kommt dabei eine zentrale Rolle zu. Dieser Ansatz wird auch für die evolutive Herkunft von IUP herangezogen. Da IUP sich in ihrer Struktur und den biochemischen Eigenschaften deutlich von strukturierten Proteinen unterscheiden, wird angenommen, dass auch die evolutionen Mechanismen, die zu ihrer Entstehung geführt haben sollen, verschieden sein müssten. TOMPA (2003) formulierte diese Problemstellung nicht lange nach der Entdeckung der IUP wie folgt: „Da die Evolution globulärer Proteine und IUP verschiedene Strategien der Evolution repräsentieren, wirft dieser Anstieg³ die Frage auf, wie das neue genetische Material, das für IUP codiert, erzeugt wird.“ Ungeachtet des damals noch sehr wenig fortgeschrittenen Forschungsstadiums und der äußerst dünnen Datenmenge stellt der Autor voreilig in derselben Publikation schon eine Hypothese zur

Beantwortung dieser Frage auf: „Insgesamt ist es die wesentliche Aussage dieser Publikation, dass die Labilität repetitiver genetischer Regionen in Kombination mit der Toleranz von Proteinen gegenüber strukturellen und funktionalen Modifikationen die Ausweitung und funktionale Ausdehnung ermöglicht haben.“ Demnach werden also IUP von besonders labilen genetischen Sequenzen codiert und sind hinsichtlich ihrer Struktur und Funktion generell weniger beständig als strukturierte Proteine.

Nur wenige Jahre später sollte sich zeigen, dass TOMPA'S Hypothese nicht haltbar ist. Es wurde zwar bestätigt, dass die mutationsbedingten Austauschraten der Aminosäuren bei IUP bzw. IUR bedeutend höher sind als im Fall strukturierter Proteine (BROWN et al. 2010). Aber mit zunehmender Datenmenge wurde der überraschende Befund gemacht, dass diese Fluktuation der Aminosäure-Sequenz kaum zu einer Änderung der biochemischen Eigenschaften bzw. der Funktion von IUP führt. Dies ging aus mehreren vergleichenden Analysen von IUP/IUR-Sequenzen hervor (Datenbankanalyse). Die Befunde wurden von BROWN et al. (2010) wie folgt kommentiert: „Verschiedene Studien individueller Proteinfamilien haben erwiesen, dass die Funktion dieser unstrukturierten Regionen ungeachtet der schnellen Evolution erhalten bleibt.“ Ebenso schreiben die Autoren dieser Studie, dass bei Substitutionen Ordnung vermittelnde Aminosäuren bevorzugt durch ihresgleichen ersetzt würden und Aminosäuren, die Strukturlosigkeit vermitteln, ebenfalls bevorzugt durch ihresgleichen ersetzt würden. Diese Beobachtungen werden ferner gestützt von DYSON und WRIGHT (2005): „Ein charakteristisches Merkmal dieser [flexiblen] Linker⁴ ist es, dass sie über verschiedene Arten hinsichtlich der Aminosäurezusammensetzung hochgradig konserviert sind, aber nicht bezüglich der Sequenz.“ Dies bedeutet, dass der prozentuale Anteil bestimmter Typen von Aminosäuren (polar, wasserabweisend, geladen) unverändert bleibt, auch wenn sich die Reihenfolge der Aminosäuren in der Sequenz ändert. Nach den Aussagen von BROWN et al. (2010) sowie DYSON & WRIGHT (2005) ändert sich überraschenderweise auch nichts an den biochemischen Eigenschaften und der Funktion der IUP – im Gegensatz zu strukturierten Proteinen, bei denen schon geringe Sequenzänderungen massive Unterschiede hinsichtlich der physikochemischen Eigenschaften bewirken können. Die trotz häufiger Mutationen gegebene Beständigkeit der Funktionen von IUP stellt eine erhebliche Barriere für die Makroevolution von IUP dar. Eine plausible Hypothese für den Verlauf der Entwicklung von primitiven Urproteinen hin zu modular und somit hochgradig spezifisch aufgebauten Proteinen erscheint

nach derzeitigem Kenntnisstand unerreichbar. Vielmehr bestätigen die Befunde die Existenz der oben beschriebenen engen Grenzen für das Veränderungspotenzial von Proteinen.

Wenn die Veränderung der simplen Linker-Funktion selbst bei schnellerer Evolution kaum zu beobachten ist, dürfte dies bei multifunktionalen IUP generell noch schwieriger zu realisieren sein. Es besteht nämlich ein prinzipieller Unterschied zwischen multifunktionalen Proteinen, die eine feste 3D-Struktur aufweisen, und multifunktionalen IUP: Bei geordneten Proteinen sind unterschiedliche Funktionen an verschiedenen Sequenzabschnitten realisiert, während bei IUP ein und derselbe Abschnitt verschiedene Funktionen beinhaltet. Bei IUP ist also eine deutlich höhere Informations- bzw. Funktionsdichte in einem Abschnitt gegeben. Mutationen würden somit zugleich mehrere Funktionen betreffen. Daher ist in der Literatur auch hier die Rede davon, dass die Evolution „verschiedene Strategien“ befolgt haben müsse, um zu diesen verschiedenen Typen von Proteinen zu gelangen.

Ein Beispiel hierfür ist eine weitere Hypothese von TOMPA (2005) in Bezug auf den Ursprung der Multifunktionalität bei IUP: „Im Hinblick auf Evolution wurde angenommen, dass multifunktionale Proteine ursprünglich nur eine Funktion hatten und dann für weitere rekrutiert wurden, da sie über große ungebrauchte und evolutionär uneingeschränkte Domänen verfügten. IUP müssen einen anderen Weg verfolgt haben. Diese Proteine weisen überlappende oder gar identische Interaktionsoberflächen auf. Daher ist es eher wahrscheinlich, dass ihre Funktionen co-evolviert sind, wobei keine der anderen voraus war.“ Diese Behauptung wird von TOMPA allerdings nicht weiter begründet und ist derzeit wegen der immensen Komplexität der Fragestellung möglicherweise gar nicht prüfbar. Wie ein solcher Vorgang konkret durch natürliche Vorgänge abgelaufen sein soll, bleibt daher unklar. Seine Aussage wirkt eher wie ein Ausweichen und nicht wie eine Erklärung.

In einem anderen Artikel gibt derselbe Autor indirekt zu, dass ein evolutiver Weg hin zu multifunktionalen IUP (mit überlappenden Funktionen) eine sehr anspruchsvolle Angelegenheit ist: „Die Funktion von Chaperonen ist strukturell und mechanistisch eher anspruchsvoll, da Chaperone⁵ den Faltungsvorgang einer großen Vielzahl an sehr unterschiedlichen RNA/Protein-Molekülen in einem sehr dichten zellulären Milieu unterstützen müssen. Es ist daher nicht verwunderlich, dass diese hochgradig ausgeklügelten Proteinmaschinen eine entscheidende frühe Erfindung der Evolution darstellen.“ In diesem Fall umgeht der Autor die erforderliche evolutive Erklärung mit der unbegründeten Annahme, die IUP (hier: Chaperone)

seien einfach früh entstanden. Dabei ist diese ad-hoc-Hypothese in keiner Weise plausibel, da normalerweise davon ausgegangen wird, dass große Komplexität das Resultat langer evolutiver Vorgänge ist. Zudem charakterisieren Ausdrücke wie „hochgradig ausgeklügelte Proteinmaschinen“ und „Erfindung“ keinesfalls einen ungeordneten, evolutiven Vorgang, sondern vielmehr das Werk eines intelligenten Urhebers.

Ein sprunghafter IUP-Anstieg setzt überaus komplexe Proteinnetzwerke voraus. Dies ist für die Evolutionstheorie ein sehr sperriger Befund.

Wenn das Vorhandensein der IUP bereits ein weiteres Rätsel für die Evolutionstheorie ist, dürfte es umso schwieriger sein, für die überaus unterschiedlichen Zusammensetzungen der Proteome der drei Domänen des Lebens (s. o.) eine Erklärung zu finden. Da es keinen kontinuierlichen Übergang bezüglich des prozentualen Anteils von IUP zwischen den Domänen des Lebens gibt, muss die Sprunghaftigkeit des Übergangs plausibel gemacht werden. Ein Sachverhalt, der das Problem verschärft, ist die große Empfindlichkeit vieler IUP gegenüber Aggregation und Mutationen. Fehlfunktionen von IUP sind die Ursache einer Vielzahl an Erkrankungen bei Menschen, die mit der Aggregation dieser Proteine im Zusammenhang stehen (u. a. Krebs, Herz- und Blutgefäß-Erkrankungen, Diabetes und neurodegenerative Krankheiten wie Parkinson oder Alzheimer, UVERSKY 2008). WRIGHT und DYSON (2015) fassen diese Problematik wie folgt zusammen: „Die Konzentration von IUP in Zellen ist sehr eng kontrolliert, um eine exakte Signalübertragung in Zeit und Raum zu gewährleisten. Und Mutationen in IUP sowie Veränderungen ihrer Konzentration ziehen häufig Krankheiten nach sich.“ IUP sind also auf ein gut ausgebautes Netzwerk an Proteinen angewiesen. Ein sprunghafter Anstieg des IUP-Anteils im Proteom muss daher auch mit einem sprunghaften Anstieg der gesamten Komplexität der regulatorischen Proteinnetzwerke einhergehen. Dies ist für die evolutionstheoretischen Modelle, die nur unmerklich kleine Schritte der Höherentwicklung zulassen, ein weiterer überaus sperriger Befund.

IUP – Indizien für die Plausibilität der Schöpfungslehre

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das spät entdeckte und überaus wichtige Phänomen IUP ein weiteres schwerwiegendes Problem für evolutionstheoretische Modellierungen darstellt.

Auch wenn dieses Forschungsgebiet der Biochemie noch relativ jung ist und weitere interessante Details künftig hinzukommen mögen, werden die hier diskutierten evolutionstheoretischen Probleme vermutlich noch verschärft. Es deutet nämlich einiges darauf hin, dass IUP eine optimale Funktionsweise der Zelle ermöglichen. WRIGHT und DYSON (2005) beziehen sich darauf in einer Betrachtung der Multifunktionalität dieser Proteine: „In der Tat wurde neulich darauf hingewiesen, dass ohne gekoppeltes Binden und Falten intrinsisch unstrukturierter Domänen die Proteine etwa die 2–3-fache Größe haben müssten, um solch ausgedehnte Bindungsflächen zu bilden. Dies würde entweder zu einer noch dichter gepackten Zelle oder zu größeren Zellen führen.“ Dieser Aussage ist zu entnehmen, dass die IUP ein weiterer Beleg für die optimale Kompaktheit und Materialeffizienz der Zelle sind – ein deutliches Schöpfungsindiz.

IUP sind ein weiterer Beleg für die Optimalität und Effizienz der Zelle – ein deutliches Schöpfungsindiz.

Im Hinblick auf Mutationen (den „Motor“ der Evolution) gibt es Hinweise, dass die Mutationsraten von IUP von ihrer Funktion abhängig sind und nicht ungeregt verlaufen (COLAK et al 2013). Zudem sind Mutationen sogar laut VAN DER LEE (2014) zum Erhalt der Konkurrenzfähigkeit des Immunsystems nützlich: „In diesem Sinne ermöglicht die evolutionäre Flexibilität unstrukturierter Regionen Proteinen des Immunsystems des Wirts mit schnell variierenden Viren zu konkurrieren und dabei ihre Funktion aufrechtzuerhalten.“ Dies klingt allerdings eher nach Fitnesserhalt als nach Höherentwicklung. Schließlich konnten erste Belege dafür gefunden werden, dass der IUP-Gehalt der Proteome von Archaea-Arten hochgradig artspezifisch ist (VAN DER LEE et al. 2014). Ein hohes Maß an Optimalität, Mutationen als fitnesserhaltender Faktor und artspezifische Merkmale sind allerdings gute Indizien für Schöpfung. Es wird also einmal mehr deutlich, dass die Untersuchung der Zelle, die lange Zeit eine „Black Box“ war (BEHE 1996), für weitere Überraschungen sorgt.

Anmerkungen

- 1 Die Aggregation von Proteinen ist die Ursache für die Bildung unlöslicher Niederschläge, die Zellfunktionen behindern und so gefährliche Krankheiten auslösen können.

- 2 Dies umschreibt ein Protein, das zu einem prozentual hohen Anteil (> 50 %) intrinsisch unstrukturierte Regionen (IUR) aufweist.
- 3 Gemeint ist hier der markante Unterschied hinsichtlich des IUP-Anteils am Proteom von Prokaryoten (2–4 %) und Eukaryoten (30 %).
- 4 Verknüpfende flexible Einheit zwischen zwei rigiden Untereinheiten in einem multifunktionalen Protein.
- 5 In diesem Fall sind Chaperone mit hohem Anteil an unstrukturierten Sequenzen gemeint.

Literatur

- ANFINSEN CB (1973) Principles that govern the folding of protein chains. *Science* 181, 223–230.
- BEHE M (1996) *Darwin's Black Box*. New York.
- BROWN CJ et al. (2010) Comparing models of evolution for ordered and disordered proteins. *Mol. Biol. Evol.* 27, 609–621.
- COLAK R (2013) Distinct types of disorder in the human proteome: Functional implications for alternative splicing. *Plos Comp. Biol.* 9, e 1003030.
- DUNKER AK et al. (1997) Identifying disordered regions in proteins from amino acid sequence, IEEE International Conference on neural networks 1, 90–95.
- LIU J et al. (2009) Toward a quantitative theory of intrinsically disordered proteins and their functions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106, 19819–19823.
- KNAPP B (2017) Bärtierchen: Geheimnis ihrer Widerstandskraft gelüftet, *Spektrum der Wissenschaften*, www.spektrum.de/news/warum-baertierchen-so-robust-sind/1441596.
- POWERS ET (2009) Biological and chemical approaches to diseases of proteostasis. *Deficiency* 78, 959–951.
- TOMPA P (2003), Intrinsically unstructured proteins evolve by repeat expansion, *BioEssays* 25, 847–855.
- TOMPA P & CSERMELY P (2004), The role of structural disorder in the function of RNA and protein chaperones, *FASEB J.* 18, 1169–1175.
- TOMPA P et al. (2005) Structural disorder throws new light on moonlighting. *Trends Biochem. Sci.* 30, 484–489.
- UVERSKY VN (2008) Intrinsically disordered proteins in human diseases: Introducing the D2 concept. *Annu. Rev. Biophys.* 37, 215–246.
- UVERSKY VN (2011) Intrinsically disordered proteins from A to Z. *Int. J. Biochem. Cell Biol.* 43, 1090–1103.
- UVERSKY VN (2017) Intrinsically disordered proteins in overcrowded milieu: Membraneless organelles, phase separation, and intrinsic disorder. *Curr. Opin. Struct. Biol.* 44, 18–30.
- VAN DER LEE R et al. (2014) Classification of intrinsically disordered regions and proteins, *Chem. Rev.* 114, 6589–6631.
- WRIGHT PE & DYSON HJ (1999) Intrinsically unstructured proteins: Re-assessing the protein structure-function paradigm, *J. Mol. Biol.* 293, 321–331.
- WRIGHT PE & DYSON HJ (2009) Linking folding and binding, *Curr. Opin. Struct. Biol.* 19, 31–38.
- WRIGHT PE & DYSON HJ (2015) Intrinsically disordered proteins in cellular signaling and regulation, *Nature Reviews – Molecular Cell Biology* 16, 18–29.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Boris Schmidt Gall, Rosenbergweg 29,

72270 Baidersbronn;

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

Neues vom Gesundheitssystem der Ameisen

In *Studium Integrale Journal* wurde bereits von Ameisen berichtet, die verletzte Kameraden in Sicherheit bringen. Weitere Beobachtungen enthüllen nun interessante Details der gegenseitigen Gesundheitsfürsorge dieser sozialen Insekten.

Hans-Bertram Braun

Abb. 1 Eine durch Termitenbisse verletzte *Megaponera*-Ameise wird durch eine Kameradin in ihrem Jagdgebiet untersucht.
(© Erik T. FRANK, mit freundlicher Genehmigung;
Bild: ETF89, CC BY-SA 4.0)

Wie berichtet tragen räuberische Ameisen der afrikanischen Art *Megaponera analis* Artgenossen, die bei Kämpfen mit Termiten verletzt wurden, zurück ins heimische Nest (FRANK et al. 2017; vgl. BRAUN 2017). Später konnte man dann beobachten, dass frische Angriffskolonnen einen signifikanten Anteil genesener „Veteranen“ aufweisen. Forscher der Universität Würzburg um E. T. FRANK haben im Detail untersucht, was die Ameisen unternehmen, um ihren Kameraden wieder auf die nunmehr oft nicht mehr vollzähligen 6 Beine zu helfen (FRANK et al. 2018). Sie konnten dabei zeigen, dass im Nest Ameisen die Wunden (in diesem Fall die Beinstümpfe) ihrer verletzten Artgenossen zumeist 30–60 Minuten, aber auch bis zu 180 Minuten lang intensiv ableckten, wonach nur 10 % der Verletzten starben, während unbehandelte Verletzte zu bis zu 80 % die nächsten 24 Stunden nicht überlebten, obwohl die Wunde selbst bei unbehandelten Individuen innerhalb 10 Minuten durch einen Wundpfropf geschlossen war. Durch geschickte Kontrollexperimente, in denen sie z. B. verletzte Tiere auf sterilisiertem und unbehandeltem Untergrund hielten, konnten die Forscher zeigen, dass Infektionen zum Tod der verletzten Kämpfer führten, sodass einiges dafür

spricht, dass der Speichel der Wundversorger desinfizierend wirkt.

Die Würzburger Wissenschaftler untersuchten auch genauer, unter welchen Umständen der Rücktransport der verletzten Artgenossen erfolgte. Sie fanden heraus, dass „leicht“ Verletzte (zwei Beine abgetrennt) regelmäßig nach kurzer Inspektion zurück transportiert wurden, während Schwerverletzte (5 Beine abgetrennt) zwar lange inspiziert, aber kaum zurücktransportiert wurden, sogar teilweise vom Nest weg gebracht und abgelegt wurden. Schwerverletzte zeigten auch ein anderes Verhalten als das typische Verhalten der Leichtverletzten. Letztere nahmen eine Haltung an, die den Transport erleichterte, dagegen bewegten sich die Schwerverletzten chaotisch. Die Wichtigkeit der Transporthaltung konnte auch dadurch untermauert werden, dass Ameisen, deren Beine nicht gekappt, sondern nur gebrochen waren, dadurch aber die Transporthaltung verhinderten, zwar häufig aufgenommen, aber dann doch nicht erfolgreich zum Nest transportiert wurden. Die Ergebnisse der ersten Studie wurden durch weitere Untersuchungen bestätigt. Dabei zeigte sich, dass Ameisen, die mit den in der ersten Studie identifizierten zwei Pheromonen (Duftstoffen) Dimethyl-Disulfid und

Dimethyl-Trisulfid bestrichen waren, sehr häufig aufgenommen und zurücktransportiert wurden. Damit wurde ihre Wirkung als „Hilfe-ich-bin-verletzt“-Pheromone bestätigt. Dies unterstreicht, dass sowohl chemische Signalstoffe als auch ein bestimmtes Verhalten am Entscheidungsprozess für das Engagement der Sanitäter beteiligt sind.

Außerdem beobachteten die Forscher, dass Leichtverletzte ein deutlich anderes Verhalten an den Tag legten, wenn die zurückkehrende Angriffskolonie noch in der Nähe war (sie bewegten sich weit langsamer und überschlugen sich, wohl in der Hoffnung, aufgenommen und transportiert zu werden), als wenn die Kolonie nicht mehr in Sicht war. Dann bewegten sie sich selbst relativ schnell auf der Pheromonspur der Kolonie Richtung Nest, in Ermangelung eines Rücktransports per Sanitäter. Da die Ameisen tatsächlich verletzt waren, kann man schwerlich von „versuchter Täuschung“ sprechen, trotzdem fühlt man sich an manche Szene „schwer verletzter“ Spieler während der vergangenen Fußball-WM erinnert.

Hilfen für Artgenossen bei Infektionsgefahr

Einen weiteren Aspekt planvoller Gesundheitsvorsorge bei sozialen Insekten konnte eine österreichische Arbeitsgruppe dokumentieren (KONRAD et al. 2018): Bei friedfertigen Gartenameisen der Art *Lasius neglectus* spielen Pilzsporen eine große Rolle als Krankheitserreger (Pathogene). Sporen werden passiv aus der Umgebung aufgenommen und haften leicht am Panzer der

Soziale Insekten beeindrucken mit kompliziertem, planvoll erscheinendem Verhalten.

Ameisen. In diesem Stadium können sie noch selbst oder durch Artgenossen abgelesen und entfernt werden. Oder die betroffenen Ameisen werden durch Besprühen mit Ameisensäure desinfiziert. Nach längerer Anhaftung am Panzer allerdings dringen die Sporen in die Körperhöhle der Insekten ein und verursachen eine Infektion. Leichte Infektionen können vom Immunsystem der Insekten unter Kontrolle gebracht werden, die Ameisen sind dann vor einer Re-Infektion mit demselben Pathogen besser geschützt. Werden sie allerdings von einer anderen Pilzart bedroht, sind sie weit anfälliger für Infektionen. Erstaunlicherweise scheinen die Ameisen nun erkennen zu können, ob eine angeschlagene Artgenossin mit demselben oder einem anderen Pathogen infiziert ist als dem, das bei Infektion von der potentiellen Helferin schon unter Kontrolle



Abb. 1 Eine Ameise der Art *Megaponera* behandelt die Wunde eines Kameraden im Nest. (© Erik T. FRANK, mit freundlicher Genehmigung; Bild: ETF89, CC BY-SA 4.0)

gebracht wurde. Handelt es sich um ein anderes Pathogen, sind die helfenden Ameisen sehr vorsichtig, vermeiden direkten Kontakt, sammeln Sporen nicht mit ihren Mundwerkzeugen ab, sondern besprühen die erkrankten Artgenossen lieber aus der Entfernung mit desinfizierender Ameisensäure. Man könnte diese angepasste Verhaltensweise mit dem planvollen Verhalten eines menschlichen Arztes vergleichen, der im Fall einer gefährlichen Infektion des Patienten sich mit Mundschutz, Handschuhen und Labormantel schützt und direkten Körperkontakt vermeidet.

Wieder einmal beeindrucken uns hier soziale Insekten mit kompliziertem, planvoll erscheinendem Verhalten. Obwohl der Nutzen für die Gemeinschaft leicht erkennbar ist, fällt es doch schwer, sich einen ungeplanten Mechanismus für die genetische Fixierung als Entstehung solcher Verhaltensweisen vorzustellen, die ja nur in einzelnen Individuen geschehen sein muss, aber erst im sozialen Zusammenspiel effektiv werden kann. Die Autoren äußern sich dazu nicht, aber entsprechende Fragen drängen sich angesichts der neuen Befunde und der allgemein behaupteten Erklärungskraft von Evolutionstheorien auf.

Literatur

- BRAUN HB (2017) Sanitäter bei Ameisen. Stud. Integr. J. 24, 98–99.
- FRANK ET, SCHMITT T, HOVESTADT T, MITESSER O, STIEGLER J & LINSNEMAIR KE (2017) Saving the injured: Rescue behavior in the termite-hunting ant *Megaponera analis*. Sci. Adv. 2017, 3, doi: 10.1126/sciadv.1602187
- FRANK ET, WEHRHAHN M & LINSNEMAIR KE (2018) Wound treatment and selective help in a termite-hunting ant. Proc. R. Soc. B 20172457, <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2017.2457>
- KONRAD M, PULL CD, METZLER S, SEIF K, NADERLINGER E, GRASSE AV & CREMER S (2018) Ants avoid superinfections by performing risk-adjusted sanitary care. Proc. Natl. Acad. Sci. 115, 2782–2787.

Landpflanzen bereits im Kambrium?

Der hypothetische evolutionäre Ursprung der Landpflanzen liegt im Dunkeln – und das in mehrerer Hinsicht. Eine neue umfangreiche Studie bestätigt eine deutliche Diskrepanz zwischen der Fossilüberlieferung und dem Entstehungszeitpunkt, der durch Vergleiche molekularer Daten erschlossen wird. Die Merkmalsbeziehungen der Hauptgruppen der ersten Landpflanzen stellen sich netzartig dar. Ihre Darstellung in einem Stammbaum ist nicht eindeutig möglich und würde am ehesten passen, wenn von einem relativ komplexen Vorfahren und teilweisen Merkmalsverlusten ausgegangen wird. Alle diese Befunde widersprechen mehr oder weniger deutlich evolutionstheoretischen Vorhersagen und stellen Evolution als Leitidee der naturhistorischen Forschung in Frage.

Reinhard Junker

Einleitung

Wie kann man den vermuteten evolutionären Ursprung von Tier- und Pflanzengruppen aufklären? Als erstes wird man an Fossilien denken. Jedenfalls geben Fossilien ein stratigraphisches Mindestalter an (das den geologischen Schichten entspricht, in denen sie entdeckt werden). Allerdings kann es viele Umstände geben, aufgrund derer ganze Gruppen fossil nicht in Erscheinung treten, obwohl sie existieren, z.B. schlechte Erhaltungsfähigkeit oder auch ökologische Gründe (Art des Lebensraums). Hier behelfen sich Evolutionstheoretiker mit Merkmalsvergleichen; seit einigen Jahrzehnten bevorzugt mit dem Vergleich molekularer Merkmale in Form von Sequenzen der Bausteine von Makromolekülen (Proteine, DNS). Dabei wird argumentiert, dass, je länger zwei Linien evolutionär seit der Aufspaltung eines gemeinsamen hypothetischen Vorfahren getrennt sind, desto stärker sie sich in den Sequenzen der Makromoleküle aufgrund von Mutationen unterscheiden sollten. Wenn man anhand von Fossilien und auf der Basis des Altersmodells der „geologischen Zeitskala“ eine Eichung vornehmen kann, lässt sich theoretisch der ungefähre Entstehungszeitpunkt einer Organismengruppe ableiten. Allerdings gibt es in der Praxis zahlreiche Schwierigkeiten, auf die hier nicht eingegangen werden soll. Und das Prinzip der molekularen Uhr funktioniert nur, wenn Evolution vorausgesetzt wird. Es sei außerdem angemerkt, dass weder Fossilien noch molekulare Uhren Auskunft über den *Modus* bzw. die Mechanismen der mutmaßlichen evolutionären Entstehung geben können.

ist ein Beispiel, bei dem sich die Wissenschaftler aufgrund teils dürftiger Fossilüberlieferung Antworten mithilfe des Prinzips der molekularen Uhr erhoffen. Es tritt zwar in den Schichten des oberen Silurs (ab 420 Millionen radiometrische Jahre, MrJ) und vor allem in den Schichten des Unterdevons sprunghaft eine Fülle von Fossilien von Gefäßpflanzen auf (zu denen Farne, Schachtelhalme, Bärlappgewächse und Samenpflanzen gehören), aber die fossile Überlieferung von Moosen ist relativ dürftig und setzt erst im Unterdevon zaghaft ein (MORRIS et al. 2018, 7).

Kürzlich veröffentlichten Philip DONOGHUE und Mitarbeiter von der Universität Bristol eine umfangreiche Studie auf der Basis der (theoretischen) molekularen Uhr und analysierten dazu Gensequenzen von etwa 100 unterschiedlichsten heute lebenden Algen, Moosen und Gefäßpflanzen (MORRIS et al. 2018). Sie kamen zum Ergebnis, dass aufgrund dieser Daten der älteste gemeinsame Vorfahre aller Landpflanzen viel früher als bisher angenommen gelebt haben müsse, nämlich wahrscheinlich bereits im mittleren Kambrium und damit 95 Millionen radiometrische Jahre früher, als durch die ersten Fossilfunde angezeigt wird. Spätestens mit Beginn des Silurs hatte sich demnach bereits die moderne Linie der Gefäßpflanzen differenziert. Über das Aussehen dieser Pflanzen kann allerdings nichts Sicheres gesagt werden, es wird angenommen, dass sie klein und sehr einfach gebaut waren.

Der Fortschritt der Leistungsfähigkeit von Computern erlaubte es den Wissenschaftlern, die Analysen mit allen denkbaren Verwandtschaftsbeziehungen von Algen, Moosen und

Neue Befunde

Der evolutionäre Ursprung der Landpflanzen (Moose und Gefäßpflanzen = Embryophyten)

In evolutionärer Perspektive ergibt sich eine deutliche Diskrepanz zwischen Fossilüberlieferung und den molekularen Daten.

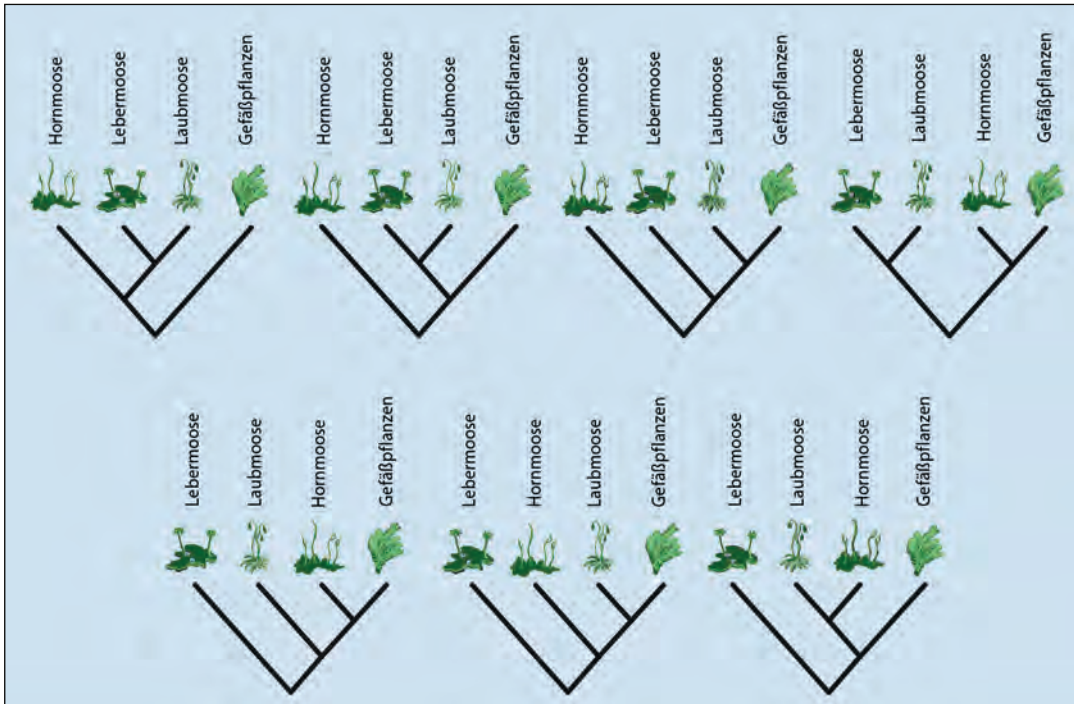


Abb. 1 Sieben konkurrierende Verwandtschaftsverhältnisse zwischen Hornmoosen, Lebermoosen, Laubmoosen und den Gefäßpflanzen, die in den letzten Jahrzehnten vorgeschlagen wurden. PUTTICK et al. (2018, 1) bemerken dazu: „Ohne phylogenetische Auflösung ist es nicht möglich, die Abfolge zu rekonstruieren, in welcher die Bauplanmerkmale der Embryophyten, Moose und die Gefäßpflanzen zusammengekommen sind.“ (Nach PUTTICK et al. 2018, CC BY-Lizenz)

Gefäßpflanzen durchzuführen. Es zeigte sich, dass das Ergebnis in Bezug auf den Entstehungszeitraum nur wenig variierte. Damit ist in evolutionärer Perspektive die Diskrepanz zwischen Fossilüberlieferung und den molekularen Daten gut begründet.

Die Verwandtschaftsbeziehungen von Horn-, Leber- und Laubmoosen sowie Gefäßpflanzen sind bis heute ungeklärt. In den letzten Jahrzehnten wurden fast alle denkbaren Verwandtschaftsverhältnisse vorgeschlagen (MORRIS et al. 2018; PUTTICK et al. 2018, 1, 8) und ein Konsens zeichnet sich nicht ab (Abb. 1). Darüber hinaus ist evolutionstheoretisch auch nicht geklärt, welche Algengruppe als Vorläufer der Landpflanzen gelten kann (PUTTICK et al. 2018, 2).

Aus den Analysen folgt in evolutionstheoretischer Perspektive ein weiteres bemerkenswertes Ergebnis. Der Urahn der drei Moosgruppen und der Gefäßpflanzen müsste bereits die Schlüsselmerkmale der Landpflanzen besessen haben: einen Embryo, in der Luft verbreitete widerstandsfähige Sporen, eine Kutikula (Außenhaut für den Verdunstungsschutz) und Spaltöffnungen sowie die biochemischen Wechselwirkungen zur Gewinnung von Nähr- und Mineralstoffen aus dem Boden (PUTTICK et al. 2018).

Diskussion

Das Beispiel der Landpflanzen reiht sich in zahlreiche ähnliche Fälle von Diskrepanzen zwischen „Fossilien und Molekülen“ ein. In evolutionstheoretischer Sicht muss man daher auch hier mit umfangreichen fossil nicht überlieferten Lebensräumen rechnen. Dies mag in diesem Fall teilweise plausibel sein, da die betreffenden

Pflanzen mutmaßlich wenig erhaltungsfähig waren (was besonders für Moose gilt) und da es zum Teil keine terrestrischen Ablagerungen gibt, in denen ggf. diese Taxa hätten fossilisiert gefunden werden können (MORRIS et al. 2018, 7). Allerdings ist eine Spanne von mehreren Zehner Millionen Jahren für die Gefäßpflanzen und von über 100 Millionen Jahren bei Moosen (Mittelkambrium bis Unterdevon) ohne fossile Spuren vielleicht doch auch im evolutionären Langzeitrahmen problematisch.

Schon früher war eine noch größere Diskrepanz mit einer Entstehung der Landpflanzen anhand von Aminosäuresequenzen von 119 Proteinen gefolgert worden (HECKMAN et al. 2001), was in einer Folgearbeit jedoch bestritten wurde (SANDERSON 2003). Die neue sehr viel umfassendere Untersuchung bestätigt nun (evolutionstheoretisch) eine deutliche, wenn auch geringere Abweichung.

Ein ganz ähnlicher Befund zeigt sich bisher auch bei der Bewertung von Sporen- und Sporangienfunden (Sporenbehälter), die bis ins mittlere Ordovizium zurückreichen und Landpflanzen unklarer Art, teilweise wahrscheinlich Lebermoosen, zugeordnet werden müssen (MORRIS et al. 2018, 7; vgl. EDWARDS et al. 2014).

Evolutionstheoretisch unerwartet ist zudem, dass hier wie in vielen anderen Fällen ein relativ komplexer Vorfahr angenommen werden muss, wenn man die molekularen Daten im Rahmen des Evolutionsparadigmas interpretiert. PUTTICK et al. (2018, 1, 8f.) schließen aus einer Analyse des Transkriptoms (Summe aller zu einem bestimmten Zeitpunkt in einer Zelle von DNA in RNA umgeschriebenen Gene) von 103 Arten von Algen und Embryophyten, dass der relativ einfache Bau der Lebermoose durch

Merkmalsverluste ausgehend von einem komplexeren Vorfahren entstanden ist.

Wie in vielen anderen Fällen muss ein relativ komplexer Vorfahr angenommen werden, wenn man die molekularen Daten im Rahmen des Evolutionsparadigmas interpretiert.

Und ebenfalls entgegen evolutionären Prognosen ist der Befund, dass die Merkmalverteilungen der vier Landpflanzengruppen kaum (wenn überhaupt) eine Interpretation in Form einer klaren Abfolge mit Verzweigungen in einem Stammbaum zulassen. Man würde evolutionstheoretisch das Gegenteil erwarten. Angesichts der Hartnäckigkeit dieses Befundes scheint eine netzförmige statt baumförmige Merkmalsbeziehung weder auf mangelhafte Daten noch auf fehlerhaften Methoden zu beruhen, sondern

eine Realität widerzuspiegeln. Eine Realität, die nicht nur dem hypothetischen evolutionären Ursprung der Landpflanzen, sondern auch dem Paradigma „Evolution“ als Schlüssel zur Deutung historischer Befunde widerspricht.

Literatur

- EDWARDS D, MORRIS JL, RICHARDSON JB & KENRICK P (2014) Cryptospores and cryptophytes reveal hidden diversity in early land floras. *New Phytol.* 202, 50–78.
- HECKMAN DS, GEISER DM et al. (2001) Molecular evidence for the early colonization of land by fungi and plants. *Science* 293, 1129–1133.
- MORRIS JL, PUTTICK MN et al. (2018) The timescale of early land plant evolution. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 115, E2274–E2283.
- PUTTICK MN, MORRIS JL et al. (2018) The Interrelationships of land plants and the nature of the ancestral embryophyte. *Curr. Biol.* 28, 1–13.
- SANDERSON MJ (2003) Molecular data from 27 proteins do not support a Precambrian origin of land plants. *Am. J. Bot.* 90, 954–9566.

Neues von Bernstein-Inklusen

Unerwartete Einsichten zur Geschichte von Gliederfüßern

Bernstein-Inklusen stellen eine einzigartige Form der fossilen Überlieferung aus der Erdgeschichte dar. Funde aus Lagerstätten in Myanmar erfahren in jüngerer Zeit besondere Aufmerksamkeit. Nachfolgend werden einige aktuelle Beschreibungen sowie deren Einordnung durch die jeweiligen Autoren vorgestellt. Dabei wird deutlich, dass die bisher gedachten und erwarteten Abfolgen und Entwicklungslinien von diesen Fossilien nicht belegt werden. Die Fossilien dokumentieren im Gegenteil eine zunehmend komplexere Situation in der Erdgeschichte.

Harald Binder

Gespensschrecken – Mimikry: Ästchen und Blätter als Tarnung

Gespensschrecken (Phasmatodea) sind ungewöhnliche Insekten, die eine sehr auffällige Formenvielfalt aufweisen. Stabschrecken gehören auch zu dieser Insektenordnung und besitzen einen langen dünnen Körperbau; sie sind aufgrund der Ähnlichkeit mit Ästchen und Zweigen in ihrem Lebensraum nur schwer auszumachen (Abb. 1). Frühe fossile Belege der Ordnung Phasmatodea stammen aus der Trias (Australien). Jugendstadien verschiedener Arten sind als Inklusen in Bernstein aus dem Baltikum und der Karibik (Dominikanische Republik) bekannt. Diese Vorkommen werden ins Tertiär (Eozän und Miozän) gestellt. Zu den Stabschrecken werden auch die sogenannten Wandelnden

Blätter als Unterfamilie (Phyllinae) gezählt. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie seitlich ausgehende flächige Strukturen an Beinen, Brustkorb, Flügel und Hinterleib aufweisen, die in Form und Farbgebung den Blättern der Büsche und Bäume ähneln, in denen sie leben. (Abb. 2) Dadurch sind sie in ihrem typischen Lebensraum schwer von den dortigen Blättern zu unterscheiden und gut getarnt. Diese Form der Tarnung wird als Mimese („Nachahmung“) bezeichnet. In der Fossilüberlieferung der Phasmatodea waren bisher zunächst Stabschreckenartige, also dünne, lange Insekten bekannt. Später wurden in jüngeren geologischen Systemen auch solche Formen entdeckt, die das typische Erscheinungsbild von Wandelnden Blättern zeigen. Bisher war im Rahmen evolutionärer Modellierungen unbekannt, wann und in welcher Weise die seit-



lichen Körpervbreiterungen aufgetreten sind. CHEN et al. (2018) beschreiben eine neue Art, die in Bernstein eingeschlossen ist und aus einer Lagerstätte im Norden Myanmars stammt, die in die Mittlere Kreide (ca. 100 Millionen radiometrische Jahre, MrJ) gestellt wird. Die Autoren gaben der neuen Art den Namen *Elasmophasma stictum*, wobei sich der Name aus den griechischen Begriffen elamos (Platte) und phasma (Gespenst) zusammensetzt. „Elamos“ steht für die seitlichen lamellenartigen Strukturen, die an Beinen, Brust und Hinterleib zu erkennen sind. Bei dem eingeschlossenen Insekt handelt es sich um eine noch nicht geschlechtsreife Larve, die ein stabschreckenartiges Erscheinungsbild aufweist. Die Körperlänge beträgt (ohne Antennen) 11,7 mm, die Fühler überragen die Körperlänge mit 21 mm deutlich. Die seitlichen flügelartigen Auswölbungen im Oberschenkelbereich, an den Segmenten im Bereich von Brust und Hinterleib, erscheinen wie ein dünner, schmaler und durchsichtiger Streifen aus Chitin (Abb. 3). Da bei heutigen Gespenstschrecken (wie z.B. *Extatosoma tiaratum*) die Larvenstadien ebenfalls seitliche flügelartige Verbreiterungen ausbilden, die im Verlauf der Reifung ebenfalls weiterwachsen, vermuten CHEN et al. (2018), dass auch bei *E. stictum* die seitlich abstehenden Lamellen bis zum Imago (Erwachsenenstadium) wachsen würden. Für das älteste fossile Wandelnde Blatt, *Eophyllium messelensis* aus der Grube Messel (Eozän), zeigen WEDMANN et al. (2007), dass die blattartigen Verbreiterungen sowohl von der Chitinhülle, die den Rücken (Tergum) umgibt, als auch von der entsprechenden bauchseitigen Schicht (Sternum) gemeinsam gebildet werden. In der von CHEN et al. (2018) beschriebenen Gespenstschreckenlarve *E. stictum* werden diese Strukturen nur von der Chitinhülle des Rückens (Tergum) gebildet und weisen besondere Merk-

male wie z.B. dunkle unregelmäßige Linien auf. Die Autoren gehen davon aus, dass die schmalen blattartigen Verbreiterungen am Körper der Gespenstschrecke ihre Tarnung verbessert haben. Weil diese aber im Vergleich zu heute bekannten Wandelnden Blättern auf andere Weise gebildet werden und andere Strukturen zeigen, sehen CHEN et al. darin keine frühe evolutive Etappe auf dem Weg zur blattartig verbreiterten Form der Wandelnden Blätter. Der Fossilbefund zeigt also bisher, dass sich Körperstrukturen, die auffällige Ähnlichkeit mit Pflanzenteilen (Ästchen oder Blättern) zeigen, bereits sehr früh nachweisen lassen und den Gespenstschrecken in ihren Lebensräumen eine gute Tarnung ermöglichen. Die Quelle der „Erfindungen“ (contrivances), die aus Sicht der Autoren den Gespenstschrecken im weiteren Verlauf der Erdgeschichte das erfolgreiche Verbergen in ihrem Lebensraum in Büschen und Bäumen ermöglichte, liegt wissenschaftlich betrachtet noch im Dunkeln.

Abb. 1 Stabschrecke *Ctenomorpha marginipennis* (links) und Annam-Stabschrecke (*Medauroidea extradentata*), zwei Vertreter der Familie Phasmatidae. Aus Myanmar wurde ein Vertreter dieser Familie beschrieben, der als Bernsteininkluse gefunden worden war. (CC BY-SA 3-0)

Abb. 2 Weibchen von *Phyllium mabantai*. Diese Art gehört ebenfalls zu den Phasmatidae und weist an ihrem Körper seitliche Verbreiterungen auf, die sie als „Wandelnde Blätter“ bestens tarnen. Die beschriebene Inkluse weist vergleichbare Körpervbreiterungen auf. (CC BY-SA 3-0)



Abb. 3 Mikroskopische Details der membranartigen seitlichen Ausstülpungen an verschiedenen Körpersegmenten der in Bernstein eingeschlossenen Phasmatide *E. stictum*. (Aus CHEN et al. 2018, Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Ren DONG)



Tarnung durch moosähnliches Aussehen

Eine andere Form der Tarnung beschreiben LIU et al. (2018) an in Bernstein erhaltenen Larven von Florfliegen (*Chrysopidae*) aus der Kreide (ca. 100 MrJ). Das fossile Harz wurde ebenfalls im Norden Myanmars gefunden und die Stücke wurden zur Beobachtung und Charakterisierung der Inkluden entsprechend geschnitten und poliert. Während sich die Imagines meist von Pollen, Nektar und Honigtau ernähren, leben die Larven typischerweise räuberisch von erbeuteten kleineren Insekten. Die Larven profitieren von Tarnung also sowohl hinsichtlich ihres Jagderfolgs als auch im Blick auf ihr Verborgensein für Jäger, zu deren Beutespektrum sie selbst gehören.

Heute lebende Florfliegenlarven weisen an ihrer Körperseite hakenförmige Borsten auf, mit deren Hilfe sie verschiedenste Materialien aus ihrem Lebensraum und auch Beutereste fixieren und zur Tarnung nützen. Diese Form der Tarnung ist auch an fossilen Florfliegenlarven seit der frühen Kreide nachgewiesen. Die beschriebenen fossilen Larven weisen allerdings keine solchen Borsten zur Fixierung von Material auf; sie nutzen Mimikry, indem ihre Körpererscheinung auffallende Ähnlichkeit mit Lebermoosen zeigt. LIU et al. schreiben, dass die Imitation des Lebensraums durch Körperstruk-

Die eingeschlossenen Florfliegenlarven zeigen, dass auch neue spezifische Konstruktionsmerkmale „plötzlich“ auftauchen und auch wieder verschwinden können.

turen bei heute lebenden Florfliegenlarven nicht bekannt sei. Die Autoren verwenden das Bild vom „Wolf im Schafspelz“ für die fossilen Florfliegenlarven, die Lebermoosen ähnlich sehen. Die Fossilüberlieferung bezeugt also die Bedeutung der Tarnung für die Larven der Florfliegen seit deren erstem Nachweis im mittleren Jura (ca. 165 MrJ). LIU et al. (2018) zitieren zwei Arbeiten, in denen interessanterweise aufgezeigt wird, dass die frühen nachgewiesenen Larven von *Chrysopidae*, die gezielt irgendwelche Partikel aus ihrem Lebensraum an der Körperoberfläche fixieren und präsentieren, eine größere anatomische Vielfalt aufweisen, als sie bei den heutigen Vertretern der Florfliegen zu beobachten ist (PÉREZ-DE LA FUENTE et al. 2012 und WANG et al. 2016). Die von LIU et al. (2018) beschriebenen fossilen Florfliegenlarven zeigen erstmalig, dass Mimikry auch in der Familie der Netzflügler (*Neuropterida*) genutzt wird. Die dokumentierten Larven weisen seitliche blattartige Ausstülpungen auf, welche der Larve ein Erscheinungsbild verleihen, das auffallende Ähnlichkeit zu in derselben Ablagerung vorkommenden (noch nicht beschriebenen) Lebermoosen zeigt (Abb. 4). Diese Larven sind damit nach Aussagen der Autoren das erste Beispiel von direkter Mimikry bei Florfliegenlarven. Sie interpretieren das als evolutionäre Innovation, die im weiteren Verlauf dieser Linie wieder verloren ging. Verzichtet man zunächst einmal auf diese Einordnung in ein Evolutionsschema, dann zeigen diese in fossilem Harz eingeschlossenen Florfliegenlarven, dass auch in dieser Familie neue spezifische Konstruktionsmerkmale „plötzlich“ auftauchen und auch wieder verschwinden können. Ein Trend in Richtung zunehmender Komplexität ist in diesem Fall nicht zu beobachten.

Urtümlich erscheinende Spinnentiere in Bernstein aus Myanmar

Während eine Vielzahl heute noch bekannter, aber auch rezent nicht beschriebener Spinnen als Inkluden in fossilem Harz beschrieben sind, stammt der derzeit älteste fossile Hinweis auf Spinnen aus versteinerten Überresten aus dem Oberen Karbon aus Russland. Von anderen „Urspinnentieren“ sind Fossilien aus dem Devon und Perm beschrieben. Diese ähneln Spin-

Glossar

Imago (Pl.: Imagines): reifes und fortpflanzungsfähiges Insekt, das in der Regel durch mehrere Häutungsprozesse aus den entsprechenden Larven- bzw. Jugendstadien entsteht.
Pedipalpen: Im Kopfbereich bei Spinnentieren vorhandene Struktur mit beinartigem Bau, die als umgewan-

delte Extremität interpretiert wird. Bei Webspinnen (Araneae) weist das Endglied (Bulbus) einen Hohlraum und oft eine komplex strukturierte Außenwand auf. Darin kann das Spinnenmännchen direkt oder indirekt über ein Spermanetz Spermien aufnehmen und auf die Weibchen übertragen.

nen, unterscheiden sich aber durch ein geiselartiges Ende des Hinterleibs sowie dadurch, dass sie zwar Spinnndrüsen besitzen, aber keine beweglichen Spinnwarzen zur genauen Positionierung des Spinnfadens. WANG et al. (2018) haben zwei Exemplare von männlichen Spinnentieren beschrieben, die in Bernstein vorliegen und aus der Kreide von Myanmar stammen. Die Autoren gehen davon aus, dass die beiden fossilen Spinnenartigen trotz kleinerer Unterschiede, die z.T. auf Fossilisationsprozesse zurückgeführt werden, der gleichen Art angehören. Sie gaben dieser neuen Art den Namen *Chimerarachne yingi* (chimera: Mischwesen in der griechischen Mythologie; arachne: Spinnen), womit zum Ausdruck gebracht wird, dass in diesen Tieren auffällig unterschiedliche Merkmale kombiniert vorliegen. Dies führt auch dazu, dass den Autoren keine klare phylogenetische Einordnung anhand von Merkmalsvergleichen gelingt. WANG et al. gehen davon aus, dass die neu beschriebenen Spinnentiere eine Entwicklungsphase repräsentieren, in der die Männchen Pedipalpen* entwickelten, deren letztes Glied (Bulbus) die Spermien aufnimmt und in die weibliche Geschlechtsöffnung einführt. Weiter besitzen sie einen zumindest teilweise modernen Spinnapparat, während sie gleichzeitig einen als eher urtümlich eingestuften geißelartigen Abschluss des Hinterleibs zeigen. Die Autoren betonen abschließend, dass es im Verlauf der Entwicklung zu modernen Spinnen einen kontinuierlichen Verlust von Merkmalen und ebenso eine Aneignung neuer Merkmale gegeben haben müsse. Die von ihnen beschriebenen Fossilien erweisen sich aber zur Klärung dieser Fragen aufgrund der sonderbaren Kombination aus als ursprünglich und modern gedachten

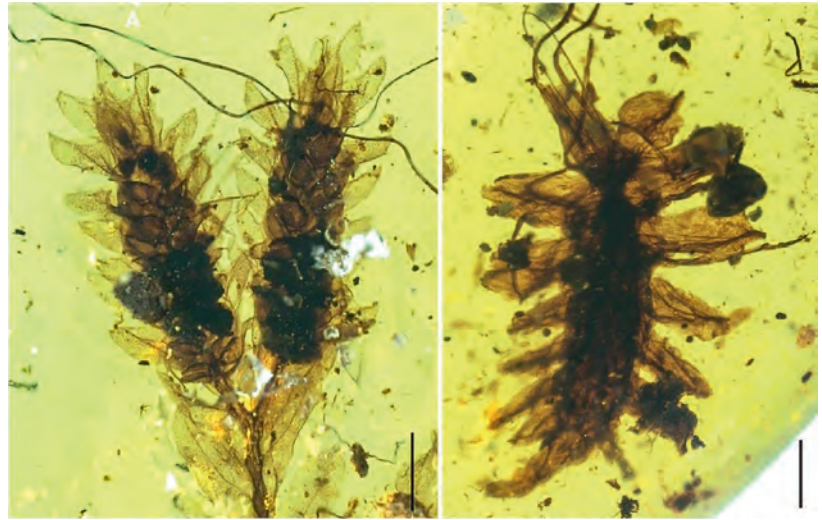


Abb. 4 Teil eines noch nicht beschriebenen Lebermooses (links) und die Larve der Florfliege *P. huangi* (rechts). Die auffällige Ähnlichkeit der Bernsteininklusen veranschaulicht den Tarneffekt. (Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Xinyue Liu)

Merkmale nicht als hilfreich. HUANG et al. (2018) beschreiben zwei weitere Exemplare der von WANG et al. erstmals bestimmten begeißelten Spinnentiere, *Chimerarachne yingi*. Auch diese waren in Bernstein eingeschlossen und stammten aus Lagerstätten in Myanmar, die in die Kreide gestellt werden (Abb. 5). Auch diese Autoren beschreiben die auffällige Merkmalskombination und diskutieren die evolutionäre Einordnung der Spinnentiere. HUANG et al. ordnen *Chimerarachne yingi* ebenfalls den Urspinnentieren (Uraneida) zu und betonen die einzigartige Koexistenz von eigentlichen Spinnen mit diesen ausgestorbenen Spinnentieren im Lebensraum auf Myanmar in der Kreide. Damit ist dokumentiert, so betonen die Autoren, dass die Urspinnentiere und die eigentlichen Spinnen parallel gelebt und sich als unabhängige Linien entfaltet haben. Uraneida können nach HUANG et al. (2018) nicht als evolutionäre Vorfahren der eigentlichen Spinnen betrachtet werden.



Abb. 5 Eines der als Bernsteineinschlüsse gefundenen Exemplare von *Chimerarachne yingi* mit einer erstaunlichen Kombination von Merkmalen. Balken: 0,5 mm. (Aus HUANG et al. 2018, Online-Zusatz, Abdruck mit freundlicher Genehmigung)

Ist die Vielfalt der in fossilem Harz eingeschlossenen Insekten repräsentativ?

Im Zusammenhang mit den hier wiedergegebenen Beschreibungen von Bernsteininklusionen und deren Interpretation ist die Frage von Bedeutung, wie gut diese Fossilien die Lebensräume der Vergangenheit wiedergeben, wie repräsentativ sie sind. Auf der Suche nach Antworten auf diese Frage haben SOLÓRZANO KRAEMER et al. (2018) eine Untersuchung in den Küstenwäldern Madagaskars durchgeführt (eine bereits 2015 veröffentlichte Studie in Chiapas, Mexiko, an *H. courbaril* hatte vergleichbare erste Ergebnisse geliefert [SOLÓRZANO KRAEMER et al. 2015]). In diesem Lebensraum mit *Hymenaea*-Bäumen (*Hymenaea verrucosa*) – einem für Bernsteininklusionen bedeutenden Harzproduzenten – haben sie die Häufigkeit und Zusammensetzung der in Harz festgehaltenen Insekten mit denjenigen verglichen, die sie im selben Lebensraum mit anderen Klebefallen dokumentieren konnten. Dabei zeigte sich, dass von den untersuchten Gliederfüßern (Arthropoden) – hauptsächlich Insekten und Spinnen – diejenigen, die direkt an den harzproduzierenden Bäumen oder in deren unmittelbarer Nähe leben, gut repräsentiert sind. Die im Harz gefangenen Tiere spiegeln aber nicht die ganze Artenvielfalt wider, die im entsprechenden Waldökosystem lebt. Aber auch bei den an den Bäumen lebenden Insekten und Spinnen gab es deutliche Einschränkungen; z.B. führten unterschiedliche Verhaltensweisen der Tiere dazu, dass im Harz gefangene Arten unter- oder überrepräsentiert waren. Abwehrverhalten der Pflanzen gegen Schädlinge kann deren Vorkommen im Harz ebenfalls deutlich beeinflussen. So stellen die Inklusionen eine bedeutende Informationsquelle über Insekten in der Erdgeschichte dar, ihre Merkmale, geographische Verteilung und andere Aspekte. In einem begleitenden Kommentar bringt BRIGGS (2018) die Hoffnung zum Ausdruck, dass durch ähnliche Untersuchungen an Bernstein anderer Lokalitäten und aus anderen geologischen Systemen unser Verständnis darüber verbessert wird, welcher Teil der jeweiligen Lebensgemeinschaft im Wald darin dokumentiert ist.

Resümee

Diese Zusammenstellung von Insekten und Spinnen in Bernstein (Inklusionen) aus Lagerstätten in Myanmar, die der Kreide zugeordnet werden, stellen uns faszinierende Einsichten in die Erdgeschichte durch diese besondere Art der fossilen Überlieferung vor Augen. Die zuletzt genannten Studien machen darauf aufmerksam, dass die

Die nach evolutionärem Erklärungs-schemata erwarteten zeitlichen Abfolgen des Auftretens werden ebensowenig belegt wie die erwarteten Abfolgen der Merkmalskombinationen.

Fossilien zwar Informationen darüber liefern, welche Tiere in dem entsprechenden Lebensraum vorgekommen sind, diese Auskunft aber unvollständig und im Blick auf ihre Häufigkeit und Verteilung möglicherweise verzerrt ist. Ein vollständiges Bild aus der Erdgeschichte können die Fossilien nicht bieten, zumal vergleichende Untersuchungen wie in der Gegenwart (Pflanzenharze – synthetische Klebefallen) nicht möglich sind. Die Diskussionen der hier vorgestellten Einzelfunde belegen nicht die nach evolutionärem Erklärungsschema erwarteten zeitlichen Abfolgen des Auftretens und ebensowenig die erwarteten Abfolgen der Merkmalskombinationen. Sie zeigen vielmehr, dass neue Fossilien etablierte Evolutionslinien und damit verbundene Vorstellungen in Frage stellen und neue Zugänge zu einem Verständnis erforderlich machen.

Literatur

- BRIGGS DEG (2018) Sampling the insects of the amber forest. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 115, 6525–6527.
- CHEN S, XIN X, LIN X, SHIH C, ZHANG R, GAO T & REN D (2018) Stick insect in Burmese amber reveals an early evolution of lateral lamellae in the Mesozoic. *Proc. R. Soc. B* 285: 20180425.
- HUANG D, HORMIGA G, CAI C, SU Y, YIN Z, XIA F & GIRIBET G (2018) Origin of spiders and their spinning organs illuminated by mid-Cretaceous amber fossils. *Nat. Ecol. Evol.* 2, 623–627.
- LIU X, SHI G, XIA F, LU X, WANG B & ENGEL MS (2018) Liverwort mimesis in a Cretaceous lacewing larva. *Curr. Biol.* 28, 1–7.
- PÉREZ-DE LA FUENTE R, DELCLÓS X, PENALVER E, SPERANZA M, WIERZCHOS J, ASCASO C & ENGEL MS (2012) Early evolution and ecology of camouflage in insects. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 109, 21414–21419.
- SOLÓRZANO KRAEMER MM, DELCLÓS X, CLAPHAM ME, ARILLO A, PERIS D, JÄGER P, STEBNER F & PENALVER E (2018) Arthropods in modern resins reveal if amber accurately recorded forest arthropod communities. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 115, 6739–6744.
- SOLÓRZANO KRAEMER MM, KRAEMER AS, STEBNER F, BICKEL DJ & RUST J (2015) Entrapment bias of arthropods in Miocene amber revealed by trapping experiments in a tropical forest in Chiapas, Mexico. *PLoS ONE* 10:e0118820.
- WANG B, XIA F, ENGEL MS, PERRICHOT V, SHI G, ZHANG H, CHEN J, JARZEMBOWSKI EA, WAPPLER T, & RUST J (2016). Debris-carrying camouflage among diverse lineages of Cretaceous insects. *Sci. Adv.* 2, e1501918.
- WANG B, DUNLOP JA, SELDEN PA, GARWOOD RJ, SHEAR WA, MÜLLER P & LEI X (2018) Cretaceous arachnid *Chimerarachne yingi* gen. et sp. nov. illuminates spider origins. *Nature Ecol & Evol.*, doi: 10.1038/s41559-017-0449-3.
- WEDMANN S, BRADLER S & RUST J (2007) The first fossil leaf insect: 47 million years of specialized cryptic morphology and behavior. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104, 565–569.



„Schneeball-Erde“: Total-Vergletscherung der Erde in nur 1000 Jahren?

Als die Erde noch ein Schneeball war!? Für eine totale Vergletscherung der Erde wird ein schnell ablaufender geologischer Prozess postuliert – aber gab es diese Vergletscherung überhaupt? Es wird das Beispiel der „durchmischten“ Gesteine der Negash-Formation in Äthiopien diskutiert.

Michael Kotulla

Kürzlich erschien in *Spektrum.de* der Artikel *Erde gefror in kürzester Zeit* (LINGENHÖHL 2018). Wird die dort angegebene Minimalzeit von 1000 Jahren für eine erstmals totale Vergletscherung der Erde in Betracht gezogen, mag dies im Kontext der Beobachtungen zum aktuellen Klimawandel und zahlreicher diesbezüglicher Prognosen Erstaunen, Besorgnis oder gar Unglaube ausgelöst haben. LINGENHÖHL (2018) hatte für seinen Beitrag eine aktuelle Publikation von MACLENNAN et al. (2018) in der Fachzeitschrift *Geology* aufgegriffen und vorgestellt. Darin präsentieren die Autoren hauptsächlich ihre Ergebnisse von Isotopenanalysen von neoproterozoischen („oberpräkambrischen“) Sedimentgesteinen, insbesondere die Erstellung und Korrelation eines ^{13}C -Profils* sowie die Ermittlung von $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -Verhältnissen von Zirkonen und deren Altersinterpretation.

Lithologie und Stratigraphie

Die von MACLENNAN et al. (2018) untersuchte „oberpräkambrische“ Sedimentfolge ist Teil des Samre-Faltendecken-Gürtels (Nordäthiopien, nach der Ortschaft Samre), der strukturell zum Arabisch-Nubischen Schild gehört. Stratigraphisch* bildet sie den oberen Teil der

Tambien-Gruppe und umfasst bei Samre von unten nach oben dolomitisierte Kalkgesteine mit zwischengeschalteten Siltsteinen (Didikama-Formation), fein- und grobkörnige Karbonatgesteine (Matheos-Formation, MF), hauptsächlich karbonatische (teilweise mit dolomitisierten Stromatolithen) oder hauptsächlich feinkörnige, siliziklastische* Gesteine (Mariam-Bohhahko-Formation, MBF) und Diamiktite (Negash-Formation, Abb. 1). Die ursprüngliche Mächtigkeit des Diamiktit-Körpers ist nicht bekannt; in der Negash-Mulde (etwa 120 km NNO) erreicht er im Muldenkern eine Mächtigkeit von mehr als 150 m (BEYTH 1972). Die insgesamt bis zu 5 km mächtige Schichtenfolge der Tambien-Gruppe in Nordäthiopien (vgl. SWANSON-HYSELL et al. 2015) zeugt von der Auffüllung eines ehemals begrenzten, sich rasch absenkenden Beckens.

Ein Diamiktit ist ein wenig oder nicht sortiertes, „durchmisches“ Gestein mit eckigen und/oder runden Gesteinsfragmenten (Klasten) in einer feinkörnigen Grundmasse (Matrix). Der Diamiktit bei Samre setzt abrupt ein (Abb. 2-3). Der Kontakt zum Liegenden ist MACLENNAN et al. (2018) zufolge scheinbar konkordant* („seemingly conformable“). Nur punktuell bildet die Basis des Negash-Diamiktits ein Karbonat-Konglomerat; für MACLENNAN et al.

Glossar

$\delta^{13}\text{C}$ -Profil: Verhältnis von ^{13}C zu ^{12}C in Relation zu einem Standard; die ermittelten $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Sedimentproben der Sedimentfolge werden grafisch als Profil dargestellt.

Glazigen: Vom Gletscher- oder Inlandeis geschaffene Formen und abgelagerte Sedimente, z. B. Till (Geschiebemergel).

Konkordant: Gleichsinnige, ungestörte Lagerung von Schichten übereinander; Konkordanz „ist in den meisten Fällen ein Hinweis auf mehr oder weniger ununterbrochene Sedimentation“ (MURAWSKI 1977).

Marin: Hier: im Meer gebildet.

Massenstrom (engl.: mass flow): Mischungen aus Sediment und Flüssigkeit, die sich unter dem Einfluss der Schwerkraft hangabwärts bewegen; es werden mehrere Typen unterschieden.

Siliziklastisch: Klastisch: aus den Trümmern anderer Gesteine bestehend; „silizi“ bezieht sich auf siliziumreiche Komponenten bzw. Minerale (z. B. Tonminerale, Feldspäte, Quarz) in Abgrenzung zu karbonatischen Gesteinen.

Stratigraphisch: Hier: Die (relative) Altersfolge der (Schicht)gesteine betreffend; auf Grundlage einer formalen Gliederung und Klassifikation.

(2018) ein Hinweis auf Erosion des Untergrundes und möglicherweise fehlende Zeit.

Interpretation der Sedimentgesteine

MACLENNAN et al. (2018) interpretieren den Negash-Diamiktit als glazigene*, das Karbonatgestein dagegen als warm-marine* Ablagerung; Ersteres mit Verweis auf MILLER et al. (2003). Demnach wäre der Diamiktit ein Tillit, ein verfestigter Geschiebemergel, also eine Gletscherablagerung. Der Karbonat/Diamiktit-Kontakt (Abb. 2) würde klimatisch einen abrupten und extremen „Warm/Kalt“-Umschlag anzeigen; dahinter stehen angenommene Temperaturabfälle von bis zu 50° C. Mit dieser Interpretation folgen MACLENNAN et al. (2018) einem weit verbreiteten Muster. Neoproterozoische Diamiktit-Körper sind auf allen Kontinenten verbreitet. Häufig werden sie auch von Karbonatgesteinen unmittelbar überlagert (vgl. KOTULLA 2016, Abb. 7); dies würde umgekehrt einen abrupten und extremen „Kalt/Warm“-Umschlag anzeigen.

Abb. 1 Geschiefter, massiger Diamiktit der Negash-Formation. Die unterschiedlich großen, eckigen und gerundeten Gesteinsbruchstücke (Klasten) „schwimmen“ in einer feinkörnigen Grundmasse. BEYTH (1972) hatte das Gestein in der nordöstlich gelegenen Negash-Mulde als kiesigen Schiefer („pebbly slate“) bezeichnet; dort erreicht es eine Mächtigkeit von mindestens 150 m. Lokalität: nahe der Ortschaft Samre (Nordäthiopien). Foto: Scott MACLENNAN (freundliche Zurverfügungstellung).



Mit dem Kryogenium (gr.: *kryos* – Frost)¹ hat die *Internationale Stratigraphische Kommission* ein neoproterozoisches System klassifiziert (s. KOTULLA 2016, Abb. 3), dessen Bezeichnung sich nicht nur von einer glazigenen Interpretation von Ablagerungen herleitet, sondern „glazigene Ablagerungen“ faktisch konstituiert. Das Kryogenium-System umfasst physisch u. a. zwei teils mehrere hundert Meter mächtige neoproterozoische Diamiktit-Körper. Sie werden – dem Konzept zufolge – als Produkte einer „frühen Kryogenium-Vergletscherung“ und einer „späten Kryogenium-Vergletscherung“ betrachtet (SHIELDS-ZHOU et al. 2012); sie heißen in Australien nach Lokalnamen „Sturt-Vergletscherung“ und „Eladina-Vergletscherung“. Im Deutschen sind die Begriffe „Sturtische Vereisung“ und „Marionische Vereisung“ verbreitet (vgl. ROTHER & MESCHKE 2015).

Kryogenium: vom Konzept zum Faktum, erdgeschichtliche Periode mit globaler Vereisung.

Zum Ausmaß der vermeintlichen Vergletscherungen gibt es unterschiedliche Vorstellungen. Sie reichen von einer partiellen bis vollständigen (globalen) Vereisung der Erde; letztere Vorstellung ist erneut von KIRSCHVINK (1992) aufgegriffen und als „Schneeball-Erde“ bezeichnet worden. Für eine Total-Vergletscherung werden paläomagnetische Messungen angeführt, wonach einige der Regionen mit Diamiktit-Folgen zum Zeitpunkt der Ablagerung sich in Äquatornähe (< 30° Breite) befunden haben sollen.

Als Hauptindiz für eine glazigene Ablagerung nennen MACLENNAN et al. (2018, 540; ihre Abb. 4C im data repository) Klasten im Negash-Diamiktit, deren Oberflächen mit Striemen versehen sind; implizit werden diese als Gletscherschrammen aufgefasst. Diese scheinen aber nur sehr vereinzelt aufzutreten. Oberflächenstriemen können beispielsweise auch tektonisch entstehen. Vereinzelt „gestriemten Oberflächen“ von Klasten kann keine spezifische Bedeutung beigemessen werden; sie treten auch in Konglomeraten auf.

EYLES & JANUSZCZAK (2004) zeigen systematisch auf, dass zahlreiche Phänomene, die als Indizien für glazigene Ablagerungen bzw. glazigene Ablagerungsräume in der Literatur aufgeführt werden, allgemeiner Natur sind und nicht spezifisch und ausschließlich als glazigen klassifiziert werden können. Die meisten neoproterozoischen Diamiktite seien Massenströme* in tieferem Wasser, die auf tektonisch aktive Becken hinweisen würden. Als Kriterien nennen sie u. a. – im Vergleich und im Gegensatz zu pleistozänen

Pos.	Tuff-Probe	Abstand zu Diamiktit [m]	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U-Alter Ca.-Spanne [Millionen Isotopenjahre]	Anzahl Körner (Subpopulation)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U-Alter Subpopulation (gewogenes Mittel)	± 2 σ	Ø Sedimentationsrate [mm/Isotopenjahr]	
					[Millionen Isotopenjahre]		Basis	Rate
1	SAM-ET-04	74	801-718	8 von 29	719,68	0,46	Pos. 1 zu Diamiktit	0,029
2	SAM-ET-03	85	865-698	3 von 11	719,58	0,56		
3	T46-102_ZZ	524 (-623)	739-734	5 von 11	735,25	0,88	Pos. 3 zu Pos. 2/1	0,028

Tab. 1 Ausgewiesene U-Pb-Alter von Tuffen der oberen Tambien-Gruppe, Äthiopien. Zusammengestellt aus MACLENNAN et al. (2018); die Sedimentationsraten sind vom Verfasser errechnet worden (daher kursiv). Die 2σ-Unsicherheit bezieht sich lediglich auf den Analyseteil.

glazigenen Ablagerungen – ihre stratigraphische Inkomplexität und hohe Mächtigkeit. Diese zwei Kriterien treffen auch auf den Negash-Diamiktit zu. Folglich wird der Negash-Diamiktit vom Verfasser – abweichend zu MACLENNAN et al. (2018) – als ein Produkt von Massenströmen interpretiert.

Vulkanische Zwischenlagen und U-Pb-Zirkonalter

Der Sedimentfolge sind tuffitische Siltsteine bzw. Tuffe zwischengeschaltet, die primär durch Einträge (Niederschläge) vulkanischer Aschen entstanden. Von drei solcher Horizonte hatten MACLENNAN et al. (2018) Zirkonminerale extrahiert, deren ²⁰⁶Pb/²³⁸U-Verhältnisse bestimmt und als [radiometrische] Alter interpretiert.

Bei den Tuff-Proben SAM-ET-03 und SAM-ET-04 (MBF) streuen die ²⁰⁶Pb/²³⁸U-Verhältnisse und demzufolge die ermittelten ²⁰⁶Pb/²³⁸U-Alter der Zirkonkörner erheblich. Für die jeweils ausgewählten Cluster von Zirkonkörnern (Subpopulationen) sind die bestimmten U-Pb-Alter (jeweils gewogene Mittel) von 719,58 ± 0,56 und 719,68 ± 0,46 Millionen [radiometrischen] Jahren im Rahmen ihrer 2σ-Unsicherheit nicht unterscheidbar (Tab. 1, Pos. 2 und 1). Für ausgewählte Zirkonkörner der stratigraphisch über 400 m tieferen Tuffprobe T46-102_ZZ (Basalteil der MF) wird ein Alter von 735,25 ± 0,88 Millionen [radiometrischen] Jahren ausgewiesen (Tab. 1, Pos. 3). Die Alter sollen das Eruptionsdatum und folglich das Sedimentationsdatum repräsentieren. Die Isotopenalter passen in das etablierte geochronologische Rahmenwerk (die Internationale Chronostratigraphische Tabelle wird mit einem radiometrischen Altersmodell numerisch geeicht; s. KOTULLA 2016, Abb. 3). Implizit setzen die Autoren radiometrische Jahre und Realjahre gleich (s. hierzu KOTULLA 2014).

Des Weiteren ermittelten MACLENNAN et al. (2018) mit dem Isotopenalter (Tab. 1, Pos. 3 zu Pos. 2/1) eine durchschnittliche Sedimentationsrate, die sie auf den Abschnitt zwischen Tuff SAM-ET-04 und der Basis des Diamiktits (74 m) übertrugen. Mit dieser Extrapolation wurde schließlich der Beginn der Ablagerung des Diamiktits mit 717,1 Millionen [radiometrischen] Jahren bestimmt. Mit diesem Alterswert weisen sie den Negash-Diamiktit der „Sturtischen Vergletscherung“ (s. o.) zu; Grundlage

ist eine Alterskorrelation mit Diamiktiten in Nordwestkanada. Dort setzt die „Sturtische Vergletscherung“ nach MACDONALD et al. (2017) zwischen ca. 716,9 ± 0,4 und 717,4 ± 0,2 Millionen [radiometrischen] Jahren ein.

1000 Jahre: Turbo-Vergletscherung?

Nach MACLENNAN et al. (2018, 542) war es „warm genug, dass die Flachwasser-Karbonatproduktion bis unmittelbar vor der Ablagerung der glazigenen Diamiktite andauerte“ (Abb. 2). Diese Interpretation – so die Autoren weiter – impliziert, dass der Übergang zu einer „Vergletscherung in den niedrigen Breiten“ (s. o.) rasch war; eine konkrete Zeitdauer geben sie in ihrem Artikel aber nicht an.

Eine Zeitdauer nannte Scott MACLENNAN allerdings gegenüber *Science*, die in ihrer Online-Rubrik News mit der Überschrift *Frühere Erde fror in einem geologischen Augenblick zu* (JOEL 2018) von den Ergebnissen der Studie berichtete. MACLENNAN sagt in diesem Beitrag unter Bezugnahme auf den gleichmäßigen Karbonat/Diamiktit-Übergang, dass „möglicherweise wenig oder keine fehlende Zeit zwischen den warmen und gefrorenen Episoden war“, und erklärt, dass die Zeitdauer vom Anfang bis zum Ende der Vereisung „irgendwo zwischen 1000 und 100.000 Jahren“ gelegen haben könnte. Die hier angegebenen Zeiten sind dann von LINGENHÖHL (2018) aufgegriffen worden.

Mit anderen Worten: Zwischen der Dachfläche der Karbonate und der Sohlfläche des Diamiktits (Abb. 2-3) wird eine Unterbrechung der geolo-

Abb. 2 Markanter Wechsel in der Sedimentation: Karbonatgestein wird von Diamiktit überlagert. Der hier abgebildete Negash-Diamiktit wird von MACLENNAN et al. (2018) als eine glazigene Bildung interpretiert. Der Kontakt (gestrichelte Linie) ist konkordant. Der dolomitisierte Kalkstein ist mittel- bis grobkörnig (Grainstone); die Korngröße lässt auf eine rasche Sedimentation schließen (Schuttkalk). Der Diamiktit ist massig; wird er als Ablagerung eines Massenstroms interpretiert, muss es sich um ein großdimensioniertes, rasches Schüttungsereignis gehandelt haben. Lokalität: nahe der Ortschaft Samre (Nordäthiopien). Foto: Scott MACLENNAN (freundliche Zurverfügungstellung).





Abb. 3 Markanter Wechsel in der Sedimentation: Feinsandsteine werden von Diamiktit überlagert (vgl. Abb. 1). Der Kontakt (gestrichelte Linie) ist relativ eben und konkordant. Eine sedimentäre Primärstruktur ist bei den Feinsandsteinen nicht erkennbar, bei dem planaren Gefüge handelt es sich um Schieferung. Von einer anderen Stelle berichten MACLENNAN et al. (2018; data repository, Fig. 4d) von Kletterrippeln im Feinsandstein, ein Hinweis auf schnelle Sedimentation. Der massige Diamiktit enthält ein größeres Bruchstück (über dem Hammer rechts). Foto: Scott MACLENNAN (freundliche Zurverfügungstellung).

gischen Überlieferung von ≥ 1000 Jahren angenommen; es soll sich um die Wartezeit handeln, bis das lokale Klima bezogen auf die damalige Lage vollends „umgesprungen“ war und die vermeintlichen Gletscher ihre ersten Geschiebe subaquatisch ablagerten. Die Zeitangabe für den abrupten „Warm/Kalt“-Umschlag leitet sich wohl von Modellrechnungen ab, wonach „eine Eisexpansion zum Äquator in einer Zeitspanne von Tausenden von Jahren eintreten sollte, wenn zuvor einmal die Breite von etwa 30° erreicht worden sei“ (MACLENNAN et al. 2018, 539; mit Verweis auf BAUM & CROWLEY 2001). Die Wartezeit wird also durch die Hypothese selbst und die gewählten Modellparameter vorgegeben.

Sedimentationsunterbrechung: nicht Jahrtausende, sondern möglicherweise nur Stunden.

Beide Kontakte – Karbonat/Diamiktit (Abb. 2) und Sandstein/Diamiktit (Abb. 3) – sind konkordant und lassen nicht auf eine größere Sedimentationsunterbrechung schließen. Möglicherweise liegen nur Stunden zwischen den Sedimentationsereignissen. Die Interpretation des Diamiktits als Produkt eines Massenstroms könnte auch die punktuelle Ausbildung eines Konglomerats an der Basis erklären, nämlich aufgrund einer lokal unterschiedlichen Sedimentkonzentration und Sedimentzusammensetzung des Stroms selbst.

„Schneeball-Erde“: von einer Hypothese zu einer Tatsache

LINGENHÖHL (2018) schreibt: „Doch im Präkambrium vor 750 bis 580 Millionen Jahren fror die Erde tatsächlich mehrfach komplett

zu – von den Polen bis zum Äquator. Ein Phänomen, das Geologen heute als ‚Schneeball-Erde‘ bezeichnen.“ Hier zeigt sich, wie schnell durch Verwendung einer faktischen Aussage und des Wortes „tatsächlich“ in verkürzter Weise eine Transformation von einer Hypothese zu einer Tatsache geschieht. Dabei wird u.a. der Diamiktit als „unproblematisch produziert“ angesehen (vgl. KOTULLA 2016, 92); denn der Diamiktit ist – so LINGENHÖHL (2018) weiter – eine „Mischung aus zahlreichen unterschiedlichen Gesteinsbruchstücken, die in eine ehemals tonige oder schluffige Grundmasse eingebettet sind, und die im lokalen Fall nur durch Gletscher geformt worden sein können“ (Unterstreichungen durch den Verfasser).

An dieser Transformation von „Hypothese“ zu „Tatsache“ haben MACLENNAN et al. (2018) sowie PARK et al. (2016, Co-Autor ist MACLENNAN) ihren Anteil. In einer Vorab-Vorstellung einiger ihrer Ergebnisse beginnen PARK et al. (2016) ihre Zusammenfassung zwar mit „Die Schneeball-Erde-Hypothese besagt (...)“, doch alle anderen verwendeten Formulierungen wie „Der Beginn der Sturtischen Schneeball-Erde“ (Überschrift), „die neoproterozoische Sturtische Schneeball-Erde-Vergletscherung“ und „Übergang in die Schneeball-Erde“ sind faktischer Natur. MACLENNAN et al. (2018) beginnen ihren Artikel mit „Um den Beginn der Schneeball-Erde-Ereignisse zu verstehen (...)“ und verwenden im Verlauf zahlreiche weitere faktische Aussagen, obwohl sie andererseits ihre Ergebnisse in Beziehung zur „Schneeball-Erde-Hypothese“ setzen. MACLENNAN et al. (2018) und PARK et al. (2016) sind an der Konstruktion wissenschaftlicher Fakten (KOTULLA 2016) aktiv Beteiligte; und gegenüber der interessierten Öffentlichkeit können Aussagen wie die von LINGENHÖHL (2018, s. o.) oder auch JOEL (2018, z.B. Überschrift) eine enorme Hebelwirkung entfalten.

Schluss

Die Interpretation der neoproterozoischen Diamiktite als ausschließlich glazigene Ablagerungen ist irreführend: bis hin zu einer Totalvergletscherung der Erde („Schneeball-Erde“). Die „Schichtfuge“ zwischen Karbonatgestein und Diamiktit (Abb. 2) repräsentiert möglicherweise nur eine kurzfristige Sedimentationsunterbrechung (Stunden?) und nicht 1000 bis 100.000 Jahre, wie es durch die Schneeball-Erde-Hypothese und unterstützende Modellrechnungen vorgegeben wird. Der Negash-Diamiktit ist aufgrund seiner stratigraphischen Inkomplexität und hohen Mächtigkeit – im Vergleich und im Gegensatz zu pleistozänen, glazigenen Ablagerungen – keine glazigene Ablagerung. Er ist wahrscheinlich das Produkt von mächtigen Massenströmen.

Anmerkung

¹ Die formale Definition der Basis des Kryogenium-Systems steht noch aus. Die zuständige Kommission hat durch Mehrheitsbeschluss festgelegt, dass die Basis unmittelbar „unterhalb der ältesten eindeutigen glazigenen Ablagerung in einer neoproterozoischen Sedimentfolge gesetzt werden sollte“ (SHIELDS-ZHOU et al. 2012).

Literatur

- BAUM SK & CROWLEY TJ (2001) GCM response to late Precambrian (~590 Ma) ice-covered continents. *Geophys. Res. Lett.* 28, 583–586.
- BEYTH M (1972) To the Geology of Central-Western Tigre. PhD thesis, Bonn.
- EYLES N & JANUSZCZAK N (2004) ‘Zipper-rift’: a tectonic model for Neoproterozoic glaciations during the breakup of Rodinia after 750 Ma. *Earth-Science Reviews* 65, 1–73.
- JOEL L (2018) Ancient Earth froze over in a geologic instant. *Science* (sciencemag.org), 7. Juni 2018.
- KIRSCHVINK JL (1992) Late Proterozoic Low-Latitude Global Glaciation: the Snowball Earth. In: SCHOPF JW & KLEIN C (Eds.) *The Proterozoic Biosphere*. New York, 51–52.
- KOTULLA M (2016) Erdgeschichte als Tatsache. *Stud. Integr. J.* 23, 83–93.
- LINGENHÖHL D (2018) Erde gefror in kürzester Zeit. *Spektrum.de*, 10. Juni 2018.
- MACDONALD FA, SCHMITZ MD, STRAUSS JV, HALVERSON, GP, GIBSON TM, EYSTER A, COX G, MAMROL P & CROWLEY JL (2017) Cryogenian of Yukon. *Precambrian Research*, <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.08.015> (in press).
- MACLENNAN S, PARK Y, SWANSON-HYSELL N, MALOOF A, GEBRESLASSIE M, ANTILLA E, TESEMA T, ALENE M & HAILEAB B (2018) The arc of the Snowball: U-Pb dates constrain the Islay anomaly and the initiation of the Sturtian glaciation. *Geology* 46, 539–542.
- MILLER NR, ALENE M, SACCHI R, STERN RJ, CONTI A, KRÖNER A & ZUPPI G (2003) Significance of the Tambien Group (Tigrai, N. Ethiopia) for Snowball Earth events in the Arabian-Nubian Shield. *Precambrian Research* 121, 263–283.
- MURWASKI H (1977). *Geologisches Wörterbuch*. Stuttgart.
- PARK Y, MACLENNAN S, SWANSON-HYSELL N, MALOOF A, SCHOENE B, ALENE M, TREMBLAY MM, ANTILLA E & HAILEAB B (2016) The Onset of the Sturtian Snowball Earth: New Geochronology and Chemostratigraphy from the Tambien Group of Ethiopia. *American Geophysical Union, Fall General Assembly 2016*, abstract id. PP31A-226.
- ROTHER H & MESCHÉDE M (2015) Schneeball-Erde – die größte Vereisung der Erdgeschichte. In: LOZÁN JL, GRASSL H, KASANG D, NOTZ D & ESCHER-VETTER H (Hrsg.) *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde*. Hamburg, 37–42.
- SHIELDS-ZHOU GA, HILL AC & MACGABHANN BA (2012) The Cryogenian Period. In: GRADSTEIN FM, OGG JG, SCHMITZ M & OGG G (Eds.) *The Geologic Time Scale 2012*. Volume 1, 393–411.
- SWANSON-HYSELL NL, MALOOF AC, CONDON DJ, JENKIN GRT, ALENE M, TREMBLAY MM, TESEMA T, ROONEY AD & HAILEAB B (2015) Stratigraphy and geochronology of the Tambien Group, Ethiopia: Evidence for globally synchronous carbon isotope change in the Neoproterozoic. *Geology* 43, 323–326.

Muschelaugen – Hightech im Kleinen

Zwei Netzhäute und ein Spiegelteleskop aus quadratischen Minikristallen in einem Millimeter-Auge

Wie sehen Muscheln im trüben Wasser? Lange schon war bekannt, dass Kammmuscheln über spezielle Reflexionsspiegel in ihren nur 1 mm großen Linsenaugen verfügen, um die Lichtausbeute zu optimieren. Neue Mikroskopiertechniken legen weitere geniale Details des Aufbaus und der Funktion dieser Augen offen, die unerwartet große Ähnlichkeiten mit Augen anderer Tierklassen aufweisen.

Henrik Ullrich

Organismen verfügen in Abhängigkeit von ihrem Lebensraum und ihrer Lebensweise über eine faszinierende Vielfalt von optischen Apparaten und Einrichtungen, um das Licht und die damit übertragenen Informationen aus der Umgebung ihres Lebensraums wahrnehmen und verarbeiten zu können. Zentrale Elemente in der Kette biologischer Bausteine stellen Linsen und bei wenigen Tieren auch hinter der Netzhaut gelegene Spiegel dar, mit denen das ankommende Licht gebündelt und punktgenau auf die Netzhaut (Retina) mit ihren Lichtsinneszellen (Rezeptoren) reflektiert und fokussiert wird.

Das der biologischen Forschung bereits bekannte eindrucksvolle Repertoire entsprechender optotechnischer Lösungen ist nun um ein weiteres Highlight erweitert worden. Gefunden wurde es bei der Großen Pilgermuschel (*Pecten maximus*) aus der Ordnung der Kammmuscheln, zu deren bekanntesten Arten auch die Jakobsmuscheln gehören. Am Rand ihrer Gehäuse finden sich bis zu 200 Augen, die eine Größe von jeweils 1 mm aufweisen. Damit ist ein Sichtumfeld von ca. 250° abgedeckt. Seit den 1960er-Jahren wusste man bereits, dass in diesen Augen ein biologischer Hohlspiegel

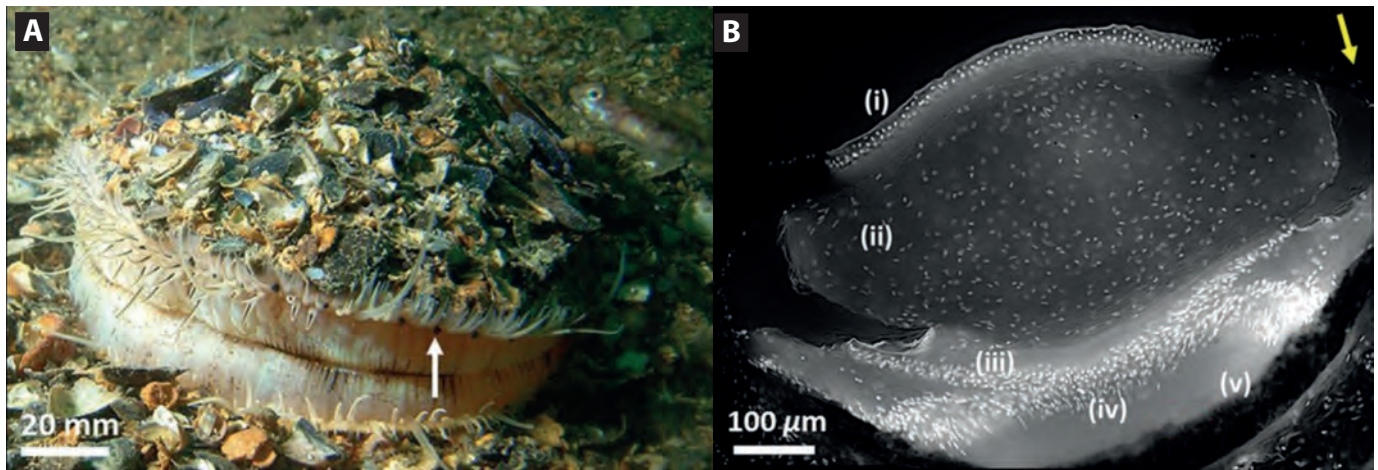


Abb. 1 A Kammmuschel (*Pecten maximus*) mit zahlreichen Augen am Mantelrand; der Pfeil zeigt auf eines davon. B Fluoreszenzmikroskopie des Linsenauges der Kammmuschel. (i) Hornhaut, (ii) Linse, (iii) vordere Netzhaut, (iv) hintere Netzhaut, (v) Reflektorspiegel; gelber Pfeil: gerader Lichteinfall. (Aus PABNER et al. 2017, mit freundlicher Genehmigung)

Abb. 2 Kryo-Elektronen-Mikroskopie der Netzhaut und des Spiegels des *Pecten*-Auges. Linse (blau), vordere Netzhaut (gelb), hintere Netzhaut (braun), Reflektorspiegel (grün). Gelber Pfeil: gerader Lichteinfall. (Aus PABNER et al. 2017, mit freundlicher Genehmigung)

genutzt wird, der hinter der Netzhaut gelegen ist, um das in das Auge eintretende und die Netzhaut zunächst durchscheinende Licht auf die Netzhaut zurückzuwerfen und zu fokussieren. Die meisten Organismen, z.B. Wirbeltiere oder Tintenfische, nutzen für die Bündelung der Lichtstrahlen dagegen Linsen, die vor der Netzhaut gelegen sind. Einige Krustentiere und wenige Tiefseefische nutzen wie die Kammmuscheln zusätzlich zu ihren Linsen noch solche Spiegel.

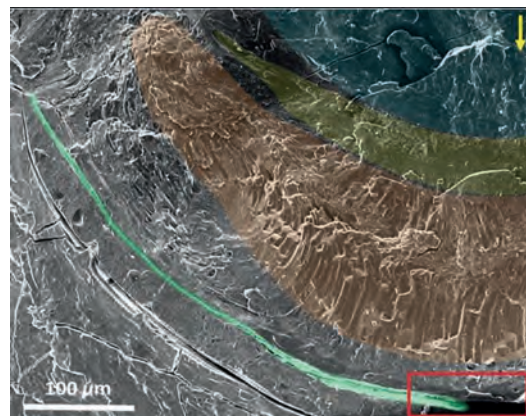
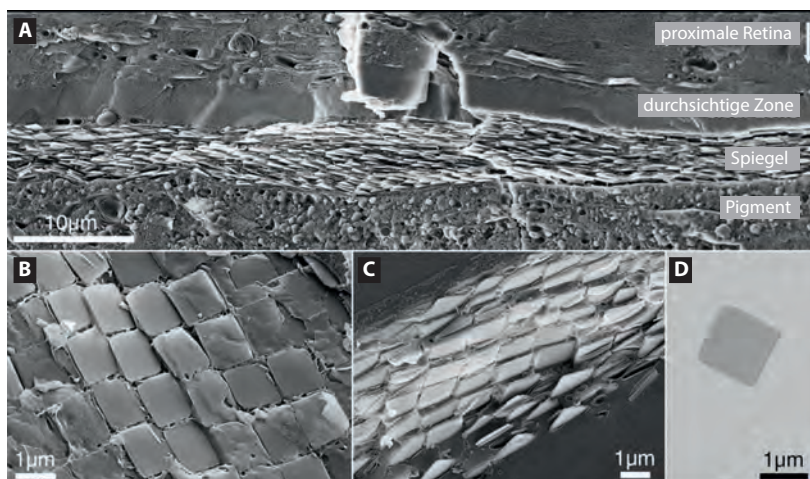


Abb. 3 Hochaufgelöste Kryo-Elektronen-Mikroskopie des Spiegels im Auge der Muschel. Beachte Maßstabsbalken! A 20-30 übereinandergelagerte Schichten von Guaninkristallen, B, C fliesenartige Anordnung der Guaninkristalle in einer Schicht, D einzelnes quadratisches Guaninkristall. (Aus PABNER et al. 2017, mit freundlicher Genehmigung)

Ein Einzelauge der Kammmuschel besteht aus einer schwach lichtbrechenden Linse, dem Hohlspiegel und einer höchst ungewöhnlich aufgebauten, zweischichtigen Netzhaut. Die molekulare Feinstruktur des Spiegels und damit auch dessen Funktion im Zusammenspiel mit der doppelschichtigen Netzhaut bei diesen



Muscheln konnte durch die Arbeitsgruppe von PABNER et al. (2017) unter Nutzung der CEM (cryo-electron microscopy) – einer Variante der Elektronenmikroskopie – aufgedeckt werden. Ihre Ergebnisse sorgten in mehrfacher Hinsicht für großes Erstaunen.

Der Spiegel – wir reden hier von einem Auge mit der Größe von 1 Millimeter – besteht aus 20-30 übereinander gelagerten Einzelschichten, deren biochemische Substanz aus Guaninkristallen gebildet wird. Dieses Molekül wird in der Zelle an anderer Stelle als Baustein der DNA, des molekularen Trägers der genetischen Information, verwendet. Die einzelnen flachen Kristalle sind quadratisch und lagern sich flächig aneinander und übereinander. Es ist ungeklärt, welche intrazellulären und biochemischen Mechanismen dafür verantwortlich sind, dass Guanin erstens diese flächigen exakten Quadratkrystalle mit einer Kantenlänge von ca. 1,23 µm und einer Dicke von 74 ± 9 nm ausbildet, und zweitens, wie sie sich – wie Fliesen in einem Bad – flächig anordnen und bis zu 30 mal übereinander dicht gepackt werden (gesamte Dicke ca. 2,5 µm). Ein einzelnes Guaninkristall ist durchsichtig. Übereinander geschichtet reflektieren diese Kristallverbände jedoch ausgewählte Wellenlängen des ankommenden Lichts (nach den Prinzipien der Interferenz) mit einer Wellenlänge von ca. 500 nm im Bereich der Farben grün und blau, was dem Hauptanteil des ankommenden Lichts im Lebensraum der Muscheln entspricht. Besonders zu erwähnen ist noch, dass diskrete Abweichungen von einer exakten sphärischen Ausformung des Hohlspiegels dazu führen, dass die reflektierten Lichtanteile nicht auf einen, sondern zwei Brennpunkte zurückgeworfen werden. Die Autoren fassen diesen Teil der Ergebnisse

Der Spiegel besteht aus Kristallen von Guanin, das in der Zelle an anderer Stelle als Baustein der DNA verwendet wird – eine ausgefallene Mehrfachnutzung eines Moleküls.

wie folgt zusammen: „Die hierarchische Organisation des Spiegels der Pilgermuschel ist fein abgestimmt für die Bildgebung, angefangen von den Guaninkristallen, den Komponenten im Nanobereich, bis zur gesamten Form der Spiegel im Millimeterbereich.“

Ungewöhnlich: zwei Netzhautschichten

Die Netzhaut des einzelnen Muschelauges verfügt, wie bereits angesprochen, in ungewöhnlicher Weise über zwei Schichten von Sinneszellen, die jeweils in exakter Distanz zum Spiegel entsprechend den beiden Brennweiten angeordnet sind. Unter Nutzung einer röntgenbasierten Mikro-Computertomographie des gesamten Auges mit zusätzlicher 3D-Modellierung und mathematischer Analyse der möglichen Lichtachsen wurde gezeigt, dass die komplexe 3D-Morphologie des gesamten Auges dazu beiträgt, dass Bilder auf beiden Netzhautschichten entstehen. Dabei zeichnet sich auch eine funktionelle Differenzierung der Netzhautanteile in Abhängigkeit vom Eintrittswinkel, der Helligkeit des Lichtes und der Position des Lichtobjektes in Bezug zur Muschel ab.

Die proximale (vordere) Netzhaut bildet besser Lichtobjekte unterhalb, die distale (hintere) Netzhaut besser Lichtobjekte oberhalb der Muschel ab. Das schärfste Sehen gelingt mittels der proximalen Netzhaut in ihren äußeren Anteilen und mittels der distalen Netzhaut in ihren zentralen Anteilen. Die Sinneszellen der letzteren reagieren auch deutlich schneller auf dunkle und sich bewegende Objekte. Die proximale Retina hingegen reagiert langsamer, aber dafür sensitiver auf sehr lichtschwache Objekte.

Der Mythos, Augen seien evolutionäre Fehlkonstruktionen, kann durch ungezählte Untersuchungsergebnisse als widerlegt gelten.

Diese funktionelle Aufteilung der Netzhautregionen erinnert an ähnliche Befunde der funktionsspezifischen Differenzierung der Netzhaut bei vielen anderen Organismen (z.B. spezialisierte Reihen von Ommatiden bei Insektenaugen zur Wahrnehmung von polarisiertem Licht oder die Verteilung von Stäbchen und Zapfen auf der Netzhaut der Säugetiere für das Hell-Dunkelsehen bzw. das Farbsehen).

Die Autoren fassen zusammen: „Auf der höchst möglichen hierarchischen Ebene erscheint der komplexe 3D-Aufbau des Augenspiegels der Muschel so abgestimmt zu sein, dass das Licht aus einem weiten Sichtfeld auf

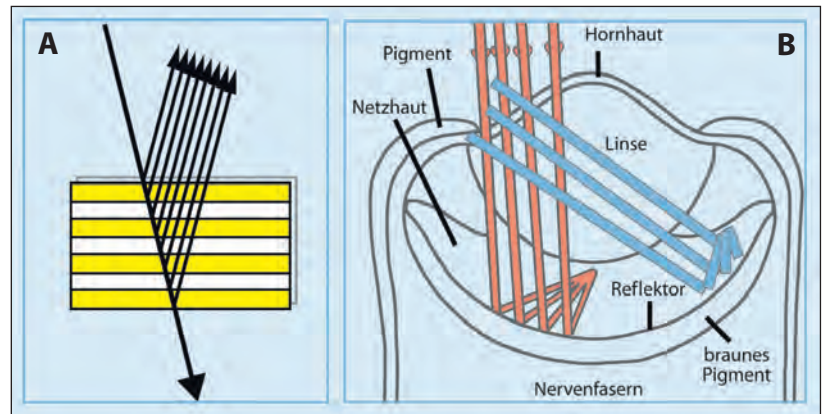


Abb. 4 **A** Prinzip der Interferenz: Die auf eine Multilayer-Schicht eines Reflektors eintreffenden Lichtwellen mit unterschiedlichen Wellenlängen werden an den einzelnen Schichten reflektiert und übereinander gelagert. Dabei werden in Abhängigkeit vom Abstand der einzelnen reflektierenden Schichten bestimmte Wellenlängen verstärkt, andere werden ausgelöscht. **B** Schema der Reflexion und der Interferenz von Lichtwellen in Abhängigkeit vom eintreffenden Winkel der Lichtwellen auf die Multilayer-Schicht des Reflektorspiegels der Kammuschel. Es konnte eine funktionelle Differenzierung der vorderen und hinteren Netzhaut sowie der jeweiligen zentralen und peripheren Anteile der Netzhaut in Abhängigkeit vom Eintrittswinkel, der Helligkeit des Lichtes und der Position des Lichtobjektes in Bezug zur Muschel nachgewiesen werden. Weitere Details siehe Text. (Nach Wikimedia commons, geändert)

zwei Netzhäute in unterschiedlichem Abstand zu deren Oberflächen fokussiert werden kann. ... Die Kristallmorphologie, die Mehrschichtstruktur und der 3D-Aufbau des Augenspiegels der Muschel sind fein abgestimmt, um funktionelle Bilder auf ihren beiden Netzhäuten zu erzeugen.“

Diskussion

Der Mythos, dass Augen evolutionäre Fehlkonstruktionen seien und die Narben ihrer evolutionären Geschichte trügen, kann durch die ungezählten Untersuchungsergebnisse zur Physiologie und zum Aufbau der Augen zahlreicher Organismen, einschließlich des Menschen, als widerlegt gelten. Eine evolutionäre Erklärung der Entstehung von Augen und der in ihnen verwirklichten optotechnisch, biochemisch und anatomisch raffinierten Baupläne ist bislang nicht einmal in Ansätzen möglich. Dazu kommt, dass es ein enormes Ausmaß an morphologischen und funktionellen Konvergenzen gibt – teils nahezu identische Lösungen für den Bau und die Funktion von Augen nicht verwandter Arten (z.B. JONASOVA & KOZMIK 2008). Auch dieser Befund spricht deutlich für einen intelligenten und damit schöpferischen Ursprung dieser Organe als vernünftige Alternative zur ziellosen und flickwerkartigen Evolution.

Literatur

- JONASOVA K & KOZMIK Z (2008) Eye evolution: Lens and cornea as an upgrade of animal visual system. *Seminars in Cell & Dev. Biol.* 19, 71–81.
 PABNER BA, TAYLOR GJ, BRUMFELD V, GUR D & SHEMES M (2017) The image-forming mirror in the eye of the scallop. *Science* 358, 1172–1175.

Das „Phosphat-Problem“ in der präbiotischen Chemie

Phosphate sind in biochemischen Systemen lebender Zellen allgegenwärtig. Aufgrund ihrer Reaktionsträgheit scheinen Phosphate allerdings für eine Verwendung im Stoffwechsel ungeeignet zu sein. Zudem sind Phosphate unter geologischen Bedingungen kaum verfügbar. Folglich stellt sich im Rahmen der Abiogeneseforschung* die Frage, wie Phosphate erstmals in biochemische Systeme integriert werden konnten. Ein neuer Vorschlag zur Lösung des „Phosphat-Problems“ erweist sich als unrealistisch und das eigentliche, grundsätzliche Problem bleibt erneut unerwähnt.

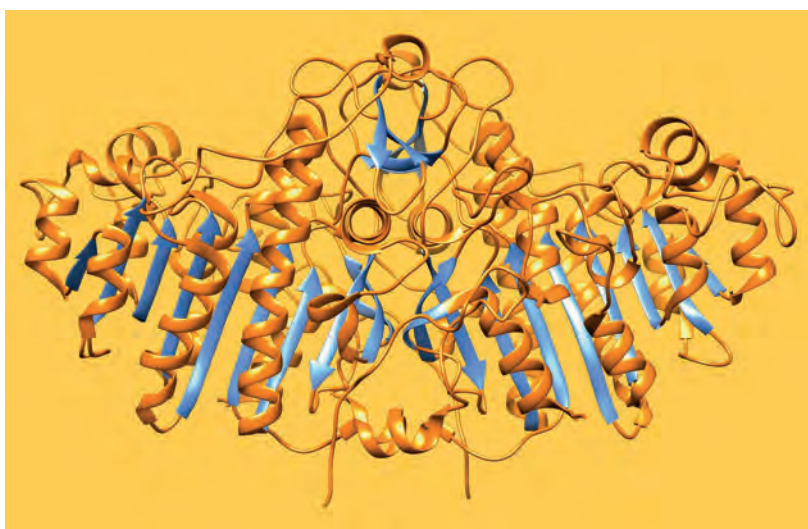
Boris Schmidtgal

Phosphatgruppen sind unverzichtbar in bekannten biochemischen Systemen

Nicht selten wird das Phänomen Leben mit komplexer Technik verglichen, denn in beiden Fällen liegen ein modularer Aufbau und eine umfangreiche Vernetzung der Module vor. Für letzteres sind kompatible, und damit einhergehend auch einheitliche Anschlüsse unabdingbar. So wäre ein Computernetzwerk ohne einheitliche Anschlüsse nicht funktionsfähig. Ein auffälliges Beispiel für ein einheitliches molekulares Merkmal der zellulären Biochemie sind Phosphateinheiten (Abb. 1).

Phosphate sind in allen physiologischen Vorgängen unverzichtbar. Als Rückgrat der genetischen Moleküle DNA und RNA stellen Phosphate ein essenzielles konstitutives Element dieser biologischen Makromoleküle dar. Das Anbringen und Entfernen von Phosphorylgruppen^{1*} an einer Vielzahl von Biomolekülen (z.B. Lipide, Zucker, Proteine) durch bestimmte Enzyme (Kinasen bzw. Phosphatasen) ist ein wesentliches Grundprinzip der Steuerung physiologischer Vorgänge (Abb. 2).

Abb. 1 Bändermodell der alkalischen Phosphatase aus *E.coli*.



Darüber hinaus erfolgt die Umwandlung und Übertragung von Energie in Organismen mittels der „Energiewährung“ ATP (Adenosin-1-triphosphat) durch Aufbau bzw. Spaltung der Triphosphateinheit. Es ist daher kaum übertrieben, wenn WESTHEIMER (1987) in der renommierten Wissenschaftszeitschrift *Science* schreibt: „Es ist eine Gegebenheit, dass Phosphate in der Biochemie ubiquitär sind, aber was tun sie eigentlich? Die Antwort ist, dass sie fast alles tun können.“ Das Erstaunen des Autors rührt daher, dass Phosphate aus chemischer Perspektive für diese Aufgabe denkbar ungeeignet erscheinen. Phosphate sind überaus reaktionsträge, d.h. sie sind – zumindest mit Hilfe organisch-chemischer Methoden – schwer in andere organische Moleküle einzuführen oder daraus zu entfernen. Organische Moleküle, die Phosphateinheiten enthalten, werden vereinfachend als „Organophosphate“ bezeichnet. Bei annähernd neutralem pH-Wert tragen Organophosphate zwei negative Ladungen ($pK_s2 = 7,2$), sodass sie für andere Lösungsmittel als Wasser kaum geeignet sind. Aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften werden Organophosphate in Laboratorien der organischen Chemie sehr selten verwendet, obwohl sie in der Biochemie des Lebens allgegenwärtig sind. Eine Ausnahme stellt die chemische Synthese von Nukleinsäuren (in der Laborchemie) dar. Hier werden allerdings recht labile Reagenzien, eine komplexe Synthesestrategie und von Wasser und Sauerstoff befreite, hochreine Lösungsmittel verwendet (REESE 2005).

Wie wurden Phosphate erstmals in biochemische Systeme integriert?

Die angeführten Tatsachen führen direkt zu der Frage, die auch WESTHEIMER (1987) schon unter naturalistischer Prämisse zu beantworten suchte: Wie ist es dazu gekommen, dass ausgerechnet die

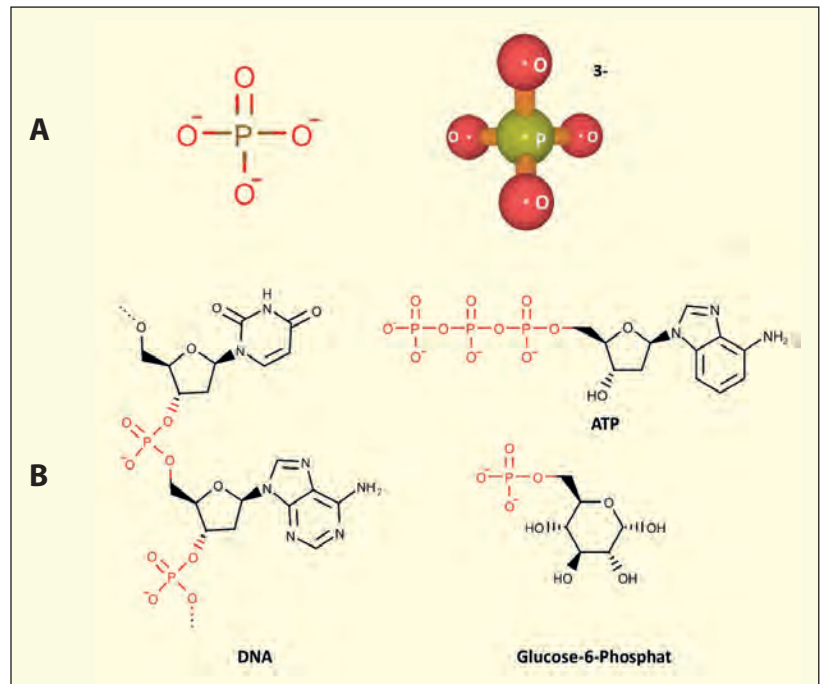
aus chemischer Perspektive ungeeigneten Phosphate zu einer Schlüsseleinheit in der Biochemie geworden sind?²

In Laboratorien der organischen Chemie werden Organophosphate sehr selten verwendet, obwohl sie in der Biochemie des Lebens ubiquitär sind.

Zu erklären wäre demnach, welche chemischen Prozesse dazu geführt haben könnten, dass hypothetische primitive biochemische Systeme in der Anfangszeit der mutmaßlichen Abiogenese Phosphateinheiten *systemisch** integriert haben konnten. WESTHEIMER legt zwar durchaus überzeugend dar, wozu Phosphate in biologischen Systemen nötig sind: Zum einen müssen Biomoleküle geladen sein, da neutrale Moleküle dazu neigen, die Membran zu passieren und die Zelle zu verlassen. Zum anderen sind Phosphate gegenüber der Spaltung durch Wasser ausgesprochen widerstandsfähig, sodass sie dem biologischen System die für Langlebigkeit unverzichtbare Stabilität verleihen. Die Frage nach einem konkreten chemischen Vorgang zur erstmaligen Einführung der Phosphate in biochemische Systeme ließ WESTHEIMER allerdings unbeantwortet, indem er vage auf „historische Gründe“, also letztlich auf irgendwelche zufälligen Ereignisse, als Ursache verwies.

Phosphat ist unter geologischen Bedingungen kaum verfügbar, da es in unlöslichen Mineralien vorliegt.

Eine wesentliche Hürde für naturalistische Erklärungen der WESTHEIMER'schen Fragestellung stellt die bereits erwähnte Reaktionsträgheit der Phosphatgruppen dar. Zudem ist Phosphat unter geologischen Bedingungen kaum verfügbar, da es sehr häufig in praktisch unlöslichen Kalzium-Mineralien wie Hydroxylapatit³ gebunden vorliegt. Aus diesem Grund haben viele Forschungsgruppen schon vor fast fünfzig Jahren chemische Versuche unter verschiedenen Bedingungen und dem Einsatz von sog. Kondensations-Reagenzien* durchgeführt, um die Einführung von Phosphatgruppen in die molekularen Bausteine der ersten Organismen zu plausibilisieren. LOHRMANN & ORGEL (1973) schlugen vor, dass zuerst Adenosin in Gegenwart von anorganischen Phosphaten, Mg^{2+} und Harnstoff zunächst zu Adenosintriphosphat (ATP), der „Energiewährung“ der Organismen, umgesetzt wurde, sodass die Phosphorylierung anderer Biomoleküle ermöglicht wurde – ein Ansatz, der aufgrund des Voraussetzens von Adenosin nicht plausibel ist. Die Verfügbarkeit von Ade-



nosin unter präbiotischen Bedingungen ist ein eigenständiges, ungelöstes Problem.

Weitere Versuche wie die Verwendung von Cyanaten zur Aktivierung von Phosphaten (YAMAGATA 1999) waren aufgrund der hochspezifischen Bedingungen und nur sehr geringen Ausbeuten auch nicht überzeugend. Daher kam ESCHENMOSER (1999) etwa 30 Jahre nach den ersten Experimenten auf diesem Gebiet zu folgender Einschätzung: „[...] Während die groben Muster des Zusammenbaus der RNA-Struktur aus solchen Bausteinen klar zu sein scheinen, fehlt es an überzeugenden experimentellen Beweisen, dass solche Prozesse tatsächlich unter präbiotischen Bedingungen auftreten können. Dies trifft insbesondere auf entscheidende Schritte wie die Bildung von Nukleotiden oder die *Aktivierung von Phosphateinheiten* zu.“⁴

Abb. 2 A Strukturformel der Phosphateinheit (links) und ihre räumliche Darstellung (rechts). B Strukturformeln einiger biologisch relevanter Moleküle mit Phosphatgruppen.

Glossar

Abiogeneseforschung: Der Begriff „Abiogenese“ bezeichnet die erstmalige Entstehung von Organismen aus unbelebter Materie (sog. Urzeugung), also nicht durch Fortpflanzung. Die Abiogeneseforschung ist die Erforschung chemischer Vorgänge, die von einfachen Molekülen zu den Bausteinen des Lebens (Nukleinsäuren, Proteine, Lipide etc.) geführt haben könnten.

Kondensations-Reagenzien: Chemische Verbindungen, die das freigesetzte Wasser bestimmter Reaktionen binden (z. B. bei Veresterungen oder Bildungen von Peptidbindungen) und so die Reaktion in Richtung der Produkte verschieben (auch bei Phosphorylierungen, die zu den Veresterungen zählen).

Oligomer: Ein Kettenmolekül aus weni-

gen Bausteinen, d. h. dass es aus ca. 3-30 strukturell einheitlichen Kettengliedern besteht.

Phosphorylgruppe: PO_3^{2-} -Einheit, die durch Kinasen von ATP auf Biomoleküle übertragen wird und von Phosphatasen wiederum entfernt werden kann.

primitiv: wenig komplex. Damit sind im Kontext des Artikels hypothetische, einfachere Vorläufer heutiger Organismen gemeint.

reduktive Bedingungen: Bedingungen, unter denen einem Molekül Elektronen zugeführt werden.

systemisch: das ganze betrachtete System betreffend

Vesikel: kleine Bläschen, die von einer Doppelmembran aus Lipiden umgeben sind.

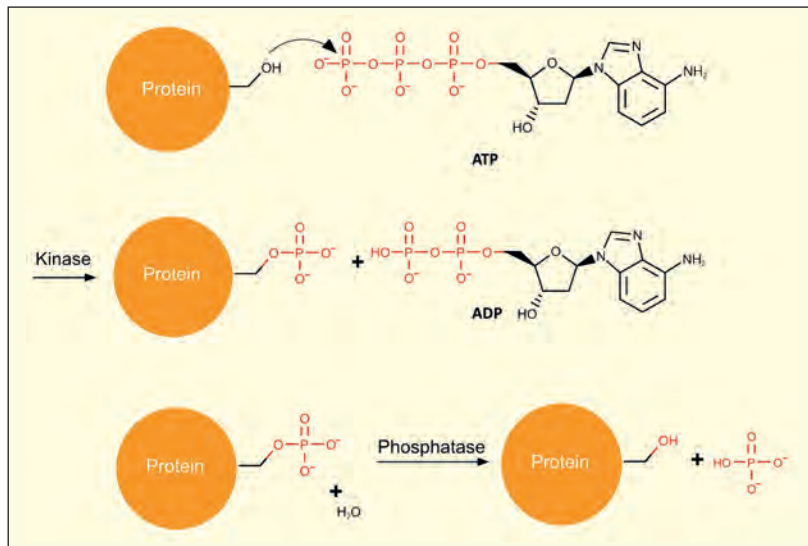


Abb. 3 Schematische Darstellung der Phosphorylierungs-Übertragung in Organismen. Phosphorylierungen werden durch Kinasen in Biomoleküle unter Verbrauch von ATP eingeführt. Phosphatasen spalten Phosphorylierungen von Biomolekülen ab.

Auch neuere hypothetische Ideen, wie etwa die von BENNER et al. (2012) vorgeschlagene Phosphitylierung unter reduktiven* Bedingungen mit nachfolgender Oxidation zu Phosphaten, helfen nicht weiter, solange keine überzeugenden experimentellen Belege für die Plausibilität eines solchen Vorgangs vorgestellt werden. Eine aktuelle Übersicht zahlreicher experimenteller Bedingungen (GULL 2014) zeigt, dass die Suche nach einer realistischen Variante der präbiotischen Phosphorylierung bisher zu keinem zufriedenstellenden Resultat geführt hat.

Diaminophosphat (DAP) – die Lösung des Phosphat-Problems?

Vor dem Hintergrund der bisherigen Resultate heißt es in einer kürzlich erschienenen Publikation (GIBARD et al. 2018): „Präbiotische Phosphorylierungen (prä)biologischer Substrate in wässrigem Milieu stellen hinsichtlich der Frage nach der Lebensentstehung einen kritischen Schritt dar. Frühere Untersuchungen hatten einen beschränkten Erfolg oder benötigten spezifische Bedingungen, welche mit der nachfolgenden

Entstehung entsprechender Oligomere* oder übergeordneter Strukturen inkompatibel sind.“ Daher versuchten die Autoren um GIBARD ihrerseits ein plausibles Modell für die präbiotische Phosphorylierung auf der Grundlage experimenteller Daten aufzustellen. Dabei führen die Autoren als Verbesserung gegenüber früheren Versuchen an, dass ein chemischer Vorgang gefunden worden sei, der in wässriger Lösung abläuft und ohne Kondensations-Reagenzien auskommt. Außerdem, so die Autoren, ließen sich verschiedene biologisch relevante Moleküle (Fettsäuren, Nukleotide, Aminosäuren) unter den gleichen Bedingungen phosphorylieren (Abb. 3).

Im Mittelpunkt der Argumentation steht die chemische Verbindung „Diaminophosphat“ (DAP) – ein Molekül, das sich vom Phosphat dadurch unterscheidet, dass zwei Sauerstoffatome durch jeweils eine Aminogruppe ersetzt sind (s. Abb. 3). Die Reaktionen von DAP mit verschiedenen Biomolekülen wurden bei neutralem oder leicht saurem pH-Wert (5,5) durchgeführt und wahlweise Imidazol, Zinkchlorid oder Magnesiumchlorid dazugegeben. In einigen Fällen wurden die Verbindungen in trockener Form vermischt und nur wenige Tropfen Wasser zugesetzt, sodass eine Paste entstand („paste conditions“). Die Autoren konnten nachweisen, dass unter den gewählten Reaktionsbedingungen auch Polymerisationsreaktionen stattfinden, sodass kurze Ketten aus bis zu vier Nukleotiden bzw. acht Aminosäuren gebildet werden konnten. Des Weiteren konnte im Rahmen der Studie gezeigt werden, dass eine Mischung aus Glycerin, einer Fettsäure (Nonansäure), Imidazol, DAP und einigen Tropfen Wasser zur Bildung eines Cyclophospholipids führte, welches bei Zugabe einer wässrigen, leicht alkalischen Lösung (pH ~8,5) zur Bildung von Vesikel*-artigen Strukturen führte.

Phosphorylierung mit DAP: ausgefeilte Experimentierkunst, aber keine präbiotische Chemie

Auch wenn die Ergebnisse von GIBARD et al. zunächst durchaus beeindruckend erscheinen, wird bei näherer Betrachtung der Publikation einschließlich der im Experimententeil geschilderten Bedingungen deutlich, dass auch hier keine Lösung des präbiotischen „Phosphat-Problems“ präsentiert wurde. Schon die Bedingungen, unter denen das DAP erhalten werden kann, sind keineswegs realistisch für ein präbiotisches Szenario (Abb. 4).

Das geben die Autoren fairerweise selbst zu – wenn auch sehr vorsichtig: „Obwohl DAP bereits als plausibles präbiotisches Reagenz ver-

Aktueller Kommentar zum Problem der Verfügbarkeit von Phosphaten unter präbiotischen Bedingungen

Dass das Problem der äußerst geringen Verfügbarkeit von Phosphaten unter präbiotischen Bedingungen Wissenschaftlern durchaus bewusst ist, zeigt auch ein Zitat von HARRER (2018) aus einem kürzlich in *Chemie in unserer Zeit* erschienenen Artikel: „Eine sehr wichtige Komponente für die lebende Zelle ist das Phosphat. Das Ion stammt wohl *einfach* aus dem umliegenden Gestein und konnte durch die Chemikalienmischung herausgelöst werden; *der genaue Mechanismus dafür ist jedoch unbekannt.*“⁵ Hier wird einmal mehr deutlich, wie für die Möglichkeit einer Urzeugung argumentiert wird. Es wird schlicht behauptet, dass für das eigentliche Problem eine einfache Lösung zur Verfügung stünde. Anschließend wird auf unbekannte Mechanismen oder irgendwelche undefinierten Chemikalienmischungen verwiesen. Auf diese Weise werden Probleme, die ausdrücklich gegen die Möglichkeit der Urzeugung sprechen, umgangen oder verharmlost.

wendet wurde, ist es aus dem präbiotisch verfügbaren Trimetaphosphat durch Reaktion mit Ammoniak bei sehr hohem pH-Wert hergestellt worden.“ Die Annahme, dass Trimetaphosphat unter präbiotischen Bedingungen entstehen kann, ist nicht abwegig. Dagegen dürfte das Vorkommen von konzentriertem Ammoniak (hoher pH-Wert) unter geologischen Bedingungen aufgrund seiner hohen Reaktivität und Flüchtigkeit praktisch ausgeschlossen sein. Auch das Mineral Schreibersit, das von GIBARD et al. als mögliche natürliche DAP-Quelle vorgeschlagen wurde, scheidet aus, da es sich um ein seltenes, hauptsächlich auf Meteoriten vorkommendes Mineral handelt (LEITMEIER 1926). Es handelt sich eben nicht um ein „Allerweltsgestein“, wie OSTERKAMP (2017) in einem Online-Beitrag von *Spektrum* fälschlich unterstellte. Aber selbst wenn DAP unter natürlichen Bedingungen entstanden sein sollte, ist es sehr unwahrscheinlich, dass es im wässrigen Milieu dauerhaft verfügbar gewesen sein kann, da Phosphor-Stickstoff-Bindungen in Wasser generell labil sind, umso mehr in Gegenwart von geologisch häufig vorkommenden Zinkionen (Zn^{2+}).

Ein weiteres gravierendes Problem hängt mit den typischen Synthesebedingungen zusammen, die in der Publikation geschildert werden. Da das DAP selbst ausgesprochen basisch ist, steigt bei dessen Zugabe zum Reaktionsgemisch der pH-Wert erheblich. Brauchbare Ergebnisse konnten aber nur im pH-Bereich zwischen 5,5 und 8 erhalten werden. Daher war es stets erforderlich, zu Beginn der Reaktion den pH-Wert mittels relativ hoch konzentrierter Salzsäure nach unten zu korrigieren – ein Eingriff, der unter präbiotischen Bedingungen nicht zu erwarten ist.

Ein weiteres Problem, das gar nicht diskutiert worden ist, stellt die fortwährende, dosierte Zugabe von DAP während der gesamten Reaktionszeit dar. Dies war erforderlich, da sich das labile DAP in der wässrigen Lösung allmählich durch Reaktion mit Wasser zersetzt (Hydrolyse). Durch Zugabe von Zinkchlorid wurde diese Zersetzung wesentlich beschleunigt. In den Protokollen der Experimente heißt es oft: „Zusätzliches DAP wurde in Abhängigkeit des Reaktionsverlaufs und des DAP-Verbrauchs, der anhand von NMR-Spektroskopie überprüft wurde, hinzugefügt.“ Der Reaktionsverlauf wurde also *stets beobachtet* und die Zusammensetzung *im Sinne eines guten Resultats* verändert. Das allein ist schon alles andere als präbiotisch. Erschwerend kommt hinzu, dass bei fortgesetzter Zugabe von DAP auch wiederholt konzentrierte Salzsäure dazugegeben werden musste, da sonst der pH-Wert gestiegen und die Reaktion zum Erliegen gekommen wäre. Die Autoren geben an, dass dieses Problem durch Zusetzen von Imidazol abgemildert wurde, da auf diese Weise

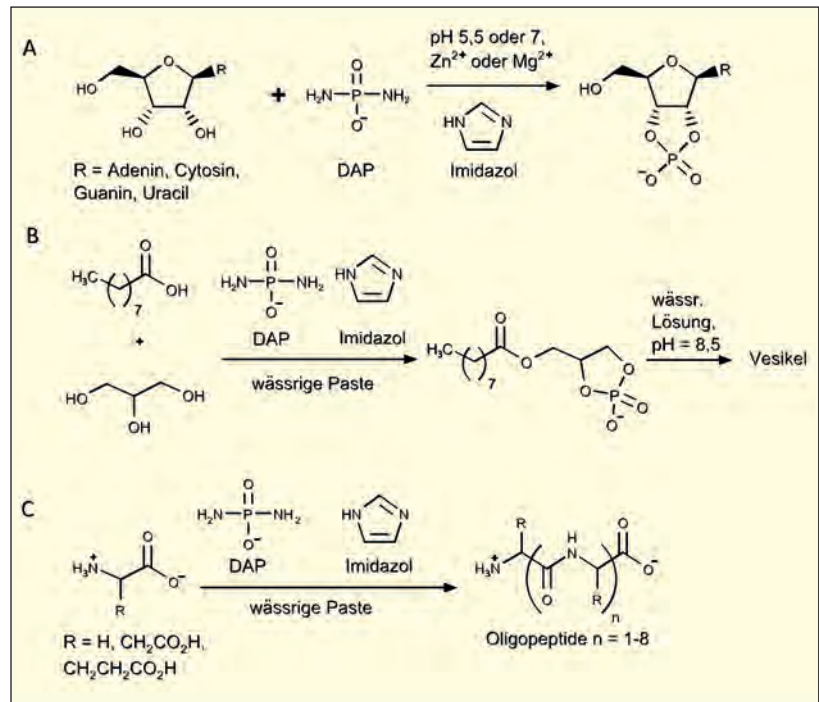
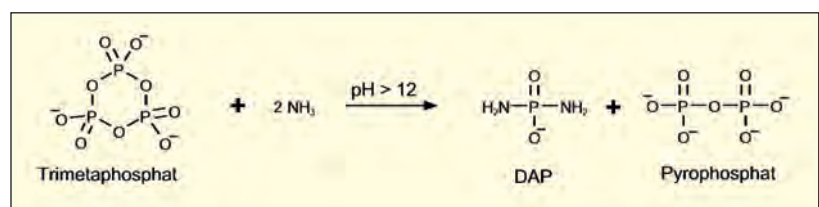


Abb. 4 Reaktionen von DAP mit A.) Nukleosiden, B.) Carbonsäure und Glycerin, C.) Aminosäuren.

der pH-Wert im annähernd neutralen Bereich stabilisiert werden konnte. Allerdings ergäbe dies bereits vier Komponenten, die richtig dosiert vorliegen müssen, damit die Reaktion zu dem erhofften Ergebnis führt – unter präbiotischen Bedingungen eine äußerst unwahrscheinliche (im Grunde unmögliche) Konstellation. Eine selbstkritische Bemerkung zu diesen Kunstgriffen in der Publikation von GIBARD et al. wäre wünschenswert gewesen.

Ein anderes wichtiges Argument, das die Autoren der Studie für die Plausibilität ihres Ansatzes anführen, ist die angebliche Kompatibilität der Bedingungen mit der spontanen Bildung von biologischen Oligomeren und komplexeren biologischen Strukturen, wie z.B. Vesikeln. Hierzu ist aber zu sagen, dass die erhaltenen Oligomere mit vier Nukleotiden bzw. acht Aminosäuren viel zu kurz waren, als dass sie eine wesentliche funktionelle Rolle hätten spielen können. Die kleinsten bekannten Proteine, die Funktionen ausüben können, bestehen aus ca. 40 Aminosäuren und die Genome der kleinsten Organismen sind sogar mehrere Hunderttausend Nukleotide lang. Auch die Bildung von Vesikeln unter den verwendeten Bedingungen ist kaum von Relevanz, wenn nicht gezeigt werden kann, dass dabei zugleich funktionelle Moleküle eingeschlossen werden und z.B. Reaktionszyklen etabliert werden. Ebenso ist es nicht überzeugend, wenn vermutet wird, dass alle biologischen

Abb. 5 Reaktion zur Synthese von DAP aus Trimetaphosphat und Ammoniak bei hohem pH-Wert.



Moleküle in einem Gefäß unter einheitlichen präbiotischen Bedingungen phosphoryliert werden können, bloß weil die Reaktionen getrennt unter den gleichen Bedingungen erfolgten. Es wäre nicht sehr aufwändig gewesen, einen solchen Versuch durchzuführen, dennoch fehlt er in der besprochenen Arbeit von GIBARD et al.

Das wirkliche Phosphat-Problem ist weitaus größer

Insgesamt wird deutlich, dass es sich bei der Studie von GIBARD et al. um ein weiteres Beispiel von Experimentierkunst handelt, die fälschlicherweise als präbiotische Chemie ausgegeben wird. DAP, das ein in wässriger Lösung ein labiles Reagenz ist und dessen mögliche geologische Quelle nicht überzeugend aufgezeigt werden kann, eignet sich nicht als Ausgangsmaterial für eine Simulation chemischer Prozesse, die zur *systemischen* Ausstattung nahezu aller Biomoleküle mit Phosphateinheiten geführt haben sollen. Für Reaktionen, die überwacht und im Sinne eines brauchbaren Ergebnisses gesteuert werden, ist in keiner Weise die Bezeichnung „präbiotische Chemie“ angebracht.

Damit ein biochemisches System läuft, braucht es alle drei Komponenten zugleich: phosphorylierte Biomoleküle, Kinasen und Phosphatasen.

Das größte Rätsel jedoch wird von all den hier zitierten Autoren nicht einmal erwähnt: Selbst wenn die molekularen Bausteine unter präbiotischen Bedingungen mit Phosphat-Einheiten versehen werden konnten, stellt sich die Frage, wie sich ein *dynamisches* System herausbildete, in welchem Phosphorylgruppen *ausreichend schnell* übertragen werden konnten. In bekannten Organismen werden diese Vorgänge durch zwei Sorten von Enzymen vermittelt. Enzyme mit der Sammelbezeichnung „Kinasen“ übertragen Phosphorylgruppen von ATP auf andere Biomoleküle, während Phosphatasen die Phosphorylgruppen wieder entfernen. Im Lehrbuch „Stryer Biochemie“ (2007) heißt es: „Es ist wichtig festzuhalten, dass Phosphorylierung und Dephosphorylierung nicht einfach die Umkehr voneinander sind. Unter physiologischen Bedingungen sind beide Reaktionen grundsätzlich irreversibel. Darüber hinaus finden beide Reaktionen ohne Enzyme so gut wie nicht statt.“

Wie aber kann ein effektives Übertragungssystem angesichts der Reaktionsträgheit der Phosphate unter präbiotischen Bedingungen

beschaffen gewesen sein, wo komplexe Enzyme fehlten? Denn ein biochemisches System ohne funktionierende Phosphorylgruppen-Übertragung ist vergleichbar einem Computernetzwerk ohne passende Kabelanschlüsse – es läuft nicht. Damit also ein biochemisches System läuft, braucht es *alle drei* Komponenten *zugleich*: eine Reihe phosphorylierter Biomoleküle und zwei Sorten von Enzymen: Kinasen und Phosphatasen (Abb. 2). Eine schrittweise Entstehung eines solchen Systems im Sinne eines naturalistischen Modells erscheint abwegig, da jede Komponente für sich alleine in keinem funktionellen Zusammenhang steht. Vielmehr erscheint es als ein ausgeklügeltes und erstaunlich stabiles System, das sinnvoll als eine *nichtreduzierbar komplexe Einheit* bezeichnet werden kann, die auf der Basis unserer Kenntnisse über chemische Reaktionen nur als intelligent angelegte Entität verstehbar ist.

Anmerkungen

- ¹ Das Anbringen einer Phosphorylgruppe (PO_3^{2-}) resultiert üblicherweise in der Bildung einer Phosphat-einheit (Abb. 2).
- ² WESTHEIMER selbst formulierte die Frage: „Warum hat die Natur Phosphate gewählt?“ und versuchte Antworten sowohl auf das „Warum“ als auch das „Wie“ zu geben.
- ³ Aus diesem Mineral bestehen die Zähne von Menschen. Wenn es auch nur geringfügig wasserlöslich wäre, hätten wir ein schwerwiegendes Problem.
- ^{4,5} Hervorhebung B. S.

Literatur

- BENNER SA et al. (2012) Asphalt, water, and the prebiotic synthesis of ribose, ribonucleosides, and RNA. *Acc. Chem. Res.* 45, 2025–2034.
- BERG JM, TYMOZCKO JL & STRYER L (2007) Stryer Biochemie. 6. Aufl. Elsevier Verlag, S. 317.
- ESCHENMOSER A (1999) Chemical etiology of nucleic acid Structure. *Science* 284, 2118–2123.
- GIBARD C et al. (2018) Phosphorylation, oligomerization and self-assembly in water under potential prebiotic conditions. *Nat. Chem.* 10, 212–217.
- GULL M (2014) Prebiotic phosphorylation reactions on the early earth. *Challenges* 5, 193–212.
- JOYCE et al. (1984) Non-enzymatic, template-directed synthesis on RNA random copolymers, *J. Mol. Biol.* 176, 279–306.
- LEITMEIER H (1926) Phosphornickeleisen. In: *Handbuch der Mineralchemie*. Band III, zweite Hälfte. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 810–825.
- LOHRMANN R & ORGEL LE (1973) Prebiotic activation processes. *Nature* 244, 418–420.
- OSTERKAMP J (2017) Kickstarter des Lebens in der Ursuppe, <https://www.spektrum.de/news/kickstarter-des-lebens-in-der-ursuppe/1516153>.
- REESE CB (2005) Oligo- and poly-nucleotides: 50 years of chemical synthesis, *Org. Biomol. Chem.* 3, 3851–3868.
- WESTHEIMER FH (1987) Why nature chose phosphates, *Nature* 235, 1173–1178.
- YAMAGATA Y (1999) Prebiotic formation of ADP and ATP from AMP, calcium phosphates and cyanate in aqueous solution. *Orig. Life Biosphere* 29, 511–520.

Neue Experimente zur RNA-Welt

Bringt ein zyklischer Wechsel nass – trocken den Durchbruch?

Die Idee der RNA-Welt ist in der präbiotischen Chemie eine etablierte Vorstellung, die viele Forscher als grundlegenden Baustein einer naturalistischen Lebensentstehungstheorie für vielversprechend halten. Die bisher vorgeschlagenen Synthesen für RNA – also die Frage, wie RNA-Moleküle für einfachste lebensähnliche Systeme entstehen könnten – nutzen allesamt chemisches Knowhow und sorgfältig ausgewählte Rahmenbedingungen. In einer jüngst erschienenen Arbeit wird der Eindruck erweckt, als wäre einfach aufgrund zyklischer Temperaturwechsel eine RNA-Synthese durchgängig von einfachsten Ausgangsstoffen bis zur RNA selbst plausibel erklärt. Werden diese Erwartungen erfüllt?

Harald Binder

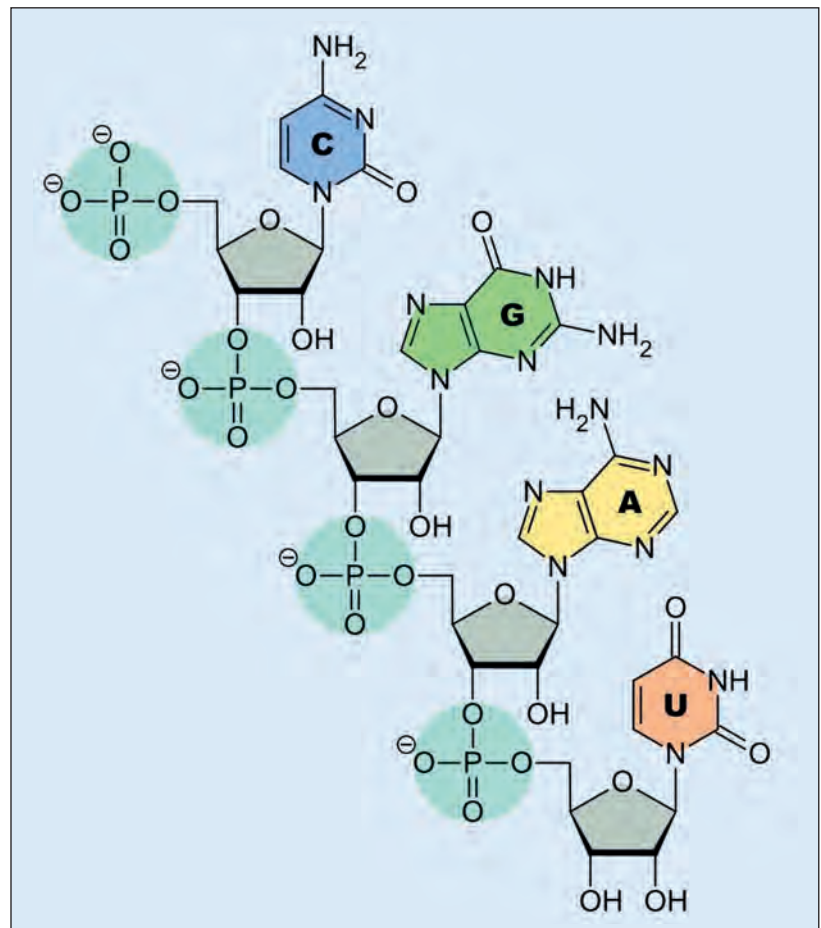
Die RNA-Welt und ihre mögliche Entstehung

Dem RNA-Makromolekül (Abb. 1) sprechen viele Wissenschaftler, die sich mit hypothetischen frühen Etappen zu einer Entstehung des Lebens beschäftigen, eine zentrale und bedeutsame Rolle zu. Dieser Denkansatz wird mit dem Schlagwort „RNA-Welt“ bezeichnet. Das RNA-Polymer besteht aus einem Rückgrat aus Ribosephosphat und den vier typischen Stickstoffbasen (N-Heterozyklen): Adenin, Cytosin, Guanin und Uracil. RNA liegt im Gegensatz zur DNA-Doppelhelix typischerweise als Einzelstrang vor, in dem sich durch komplementäre Verknüpfung von Adenin und Guanin bzw. Cytosin und Uracil Abschnitte mit einem Doppelstrang bilden können. Dadurch werden in RNA-Einzelsträngen Schleifen und damit spezifische räumliche Strukturen (z.B. Kleeblatt*) ausgebildet. RNA-Moleküle werden z.B. von vielen Viren (RNA-Viren) als Informationsspeicher anstelle von DNA benutzt. Darüber hinaus können sie enzymatische Aktivität entfalten und werden in Zellen zu vielen Regulationszwecken eingesetzt. Wegen dieser gut charakterisierten und vielfältigen Funktionen stellt die RNA für viele Fachleute, die sich mit Modellen zur Lebensentstehung beschäftigen, einen elementaren Baustein in diesen hypothetischen Prozessen dar. Die der RNA zugeordnete Bedeutung hängt in grundlegender Weise von ihrer Verfügbarkeit, also von robusten und ergiebigen Synthesen ab, die einer ersten Nutzung von RNA vorausgehen, also schon lange vor der Etablierung erster zellähnlicher Systeme erfolgen müssten. Leslie E. ORGEL, einer der Pioniere der präbiotischen Chemie, hat in einem Beitrag vor 50 Jahren (ORGEL 1968) aufgrund der damals vorliegenden experimentellen Erfahrungen eine ungesteuerte

RNA-Synthese sehr skeptisch beurteilt. Seitdem Walter GILBERT (1986) den Begriff „RNA-World“ eingeführt hat, sind viele Konzepte zu den dafür notwendigen Synthesen entwickelt und experimentelle Studien zu ihrer Prüfung durchgeführt worden.

RNA-Moleküle können von Chemikern in entsprechend ausgerüsteten Labors synthetisiert werden. Dabei sind neben den entsprechend reinen Ausgangsverbindungen und der Nutzung der optimierten Reaktionsbedingungen die

Abb. 1 Ausschnitt aus einem RNA-Molekül mit dem Rückgrat aus Ribose (grau) und Phosphat (türkis), sowie den vier typischen Basen: Cytosin, Guanin, Adenin und Uracil. (wikipedia.org)



Bei chemischen Synthesen muss auf reine Ausgangsverbindungen, optimierte Reaktionsbedingungen, passende Abfolgen und darauf abgestimmte Schutzgruppenstrategien geachtet werden.

verschiedenen Aktivierungsschritte und die jeweils darauf abgestimmten Schutzgruppenstrategien* zu beachten. Große Herausforderungen für ein naturalistisches ateleologisches (nicht zielgerichtetes) Konzept der präbiotischen RNA-Synthese bestehen u. a. darin, dass sie ohne Planung und auf chemischer Erfahrung basierender Steuerung ablaufen muss. Die nötigen Ausgangsverbindungen müssen schon in möglichst reiner Form vorliegen, d. h. ohne störende weitere Chemikalien. Bei mehrstufigen Synthesen werden im Labor die Zwischenstufen isoliert und vor weiteren Reaktionsschritten gereinigt. Es ist völlig unklar, wie Entsprechendes in einem ungesteuerten natürlichen Ablauf aussehen könnte. Einzelne Komponenten, die unter verschiedenen Bedingungen erzeugt werden und dann für weitere Schritte zusammengeführt und miteinander verknüpft werden müssen, machen sehr komplexe Rahmenbedingungen in einem präbiotischen Szenario erforderlich, die dessen Wahrscheinlichkeit und damit seine Erklärungskraft stark verringern.

Ein neuer Vorschlag

In einem jüngst erschienenen Beitrag der Arbeitsgruppe von Thomas CARELL, LMU München, zur Synthese verschiedener RNA-Basen (BECKER et al. 2018) stellen die Autoren einleitend zunächst einmal fest, dass alle bisher vorgestellten vielstufigen Synthesemodelle auf eng

kontrollierten Laborbedingungen, der Isolierung und Reinigung wichtiger Zwischenprodukte durch ausgeklügelte Methoden beruhen. Sie zitieren in diesem Zusammenhang auch eine eigene Publikation (BECKER et al. 2016), obwohl dort behauptet worden war, dass die darin vorgestellte Purinsynthese einen möglichen Zugang zu den entsprechenden Nukleosiden darstellt, der mit den Bedingungen der frühen Erde verträglich sei. Daraufhin führen sie ihr aktuelles Szenario ein, mit dem sie nach eigenen Angaben einen robusten Syntheseweg vorstellen, der nur auf Änderungen von physikalisch-chemischen Randbedingungen beruht wie pH-Wert, Konzentration und Temperatur. Die Fluktuationen werden durch Nass-Trocken-Zyklen angetrieben. Einen solchen Nass-Trocken-Zyklus stellen sich die Autoren durch zyklische Temperaturschwankungen verursacht vor. Dadurch soll ggf. das Lösungsmittel Wasser weitgehend entfernt und so das Produkt als Feststoff für einen nächsten Reaktionsschritt bereitgestellt werden. Später wird dann die neue Verbindung wieder in Wasser gelöst. Die Autoren stellen ihr Szenario mit dem Bild eines komplexen Flusssystems in einer geothermisch geprägten Landschaft dar. Verschiedene mäandrierende Flüsse, die an verschiedenen Orten entspringen, vereinigen sich in ihrem Lauf und münden dann in einem Pool mit Nukleosiden, die nach Phosphorylierung als RNA-Bausteine dienen können.

Experimentelle Details – wirklich ungeplant und nicht gesteuert?

Schaut man sich die experimentellen Details der Arbeit an, so fällt zunächst auf, dass die ersten Syntheseschritte, die zu wasserlöslichen Salzen aus kleinen organischen Verbindungen führen, nicht wie im Überblick dargestellt aus vermuteten gasförmigen Bestandteilen der hypothetischen Atmosphäre gebildet, sondern im Labor durch geeignete Chemikalien synthetisiert werden. Die ersten Synthesestufen werden unter Verweis auf andere Arbeiten vorausgesetzt. Es wird also von der Verfügbarkeit der erforderlichen Substanzen ausgegangen, ohne auf die dabei gezielt ausgewählten Reaktionsbedingungen und Ausbeuten bei deren Herstellung einzugehen. Sie werden als reine Ausgangsstoffe benutzt. Also sind bereits die verwendeten Ausgangsstoffe nicht auf einem Weg zustande gekommen, bei dem man auf chemische Kompetenz verzichtet hätte.

BECKER et al. (2018) heben in der Titelformulierung ihrer Arbeit hervor, dass der von ihnen vorgeschlagene Syntheseweg die typischen und gleichzeitig auch die untypischen, sogenannten nichtkanonischen* Purin-Nukleoside liefert. Dabei soll die mehrstufige Synthese fort-

Glossar

Kleeblattstruktur: in der sogenannten Transfer-RNA (tRNA) sind in dem einzelsträngigen RNA-Molekül in bestimmten Abschnitten die komplementären Stickstoffbasen zusammengelagert, sodass sich partiell Doppelstränge bilden. Die dadurch entstehenden Schleifen können so dargestellt werden, dass sie gewisse Ähnlichkeiten zu Kleeblättern zeigen.

Schutzgruppen: Die verschiedenen Zwischenstufen, die bei der Synthese von RNA-Nukleotiden auftreten, können in den Folgeschritten an unterschiedlichen Positionen reagieren. Um sicherzustellen, dass die gewünschte Reaktion genau an der beabsichtigten Stelle erfolgt, müssen andere reaktive Positionen mit Schutz-

gruppen blockiert werden. Diese müssen später wieder entfernt werden können, ohne dass das gewünschte Molekül bzw. die jeweilige Vorstufe zerstört wird. Zum Aufbau eines RNA-Bausteins ist eine ausgeklügelte Schutzgruppenstrategie erforderlich.

Kanonische und nichtkanonische RNA-Basen: Typischerweise kommen in RNA-Molekülen die Stickstoffbasen Guanin, Adenosin (Purinbasen) sowie Cytidin und Uridin (Pyrimidinbasen) vor. Daneben spielen in der RNA von heutigen Lebewesen auch seltenere Basen, eben weniger typische oder nichtkanonische, eine biochemisch bedeutsame Rolle.

laufend – also ohne Isolierung und Reinigung der Zwischenprodukte – erfolgen und dadurch vorangetrieben werden, dass im weiteren Verlauf physikalische Größen wie z. B. Temperatur, pH-Wert und Konzentration verändert werden.

Als Ursache für solche Änderungen auf der frühen hypothetischen Erde schlagen die Autoren z. B. Tag-Nacht- oder saisonale Temperaturzyklen vor. Im experimentellen Teil der Veröffentlichung aber wird demonstriert, dass die einzelnen Schritte durchaus definierte Voraussetzungen erfordern. Es laufen nicht nur zyklische Abfolgen von Temperaturerhöhung und -erniedrigung ab, in deren Folge durch verdampft Wasser die Konzentrationen der gelösten Stoffe erhöht werden kann und diese nach Abkühlung ggf. auskristallisieren können. Darüber hinaus sind im gesamten Reaktionsverlauf auch Änderungen des pH-Werts und weitere spezifische Einstellungen der Rahmenbedingungen erforderlich. Die Temperaturzyklen führen im Szenario der Autoren an zwei Schlüsselstellen dazu, dass die gewünschten Stoffe in einer anderen Phase, nämlich in kristalliner Form, anfallen und so vergleichsweise einfach von den in Lösung verbliebenen Begleitstoffen abgetrennt werden könnten. Die angenommenen Temperaturschwankungen sind nicht beliebig und dürfen bestimmte Grenzen nicht überschreiten. Bei zu hohen oder zu lang anhaltenden erhöhten Temperaturen verdampft das Lösungsmittel (Wasser) komplett und alle gelösten Stoffe liegen in fester Form vor. Unerwünschte Reaktionen finden beschleunigt statt und komplexere Verbindungen werden zerstört. Für viele Reaktionen muss der pH-

Chemische Umsetzungen auf dem Weg zum RNA-Nukleosid

Unter sauren Bedingungen bilden sich aus dem eingesetzten Malonsäuredinitril (**1** in Abb. 2) und vier verschiedenen Amidinverbindungen (**2**) bei Zugabe von Natriumnitrit (NaNO_2) organische Salze. Im Labor wurde das Volumen der wässrigen Lösung bei leicht erhöhter Temperatur verringert. Durch Kühlung dieser konzentrierten Lösung bilden sich Salzkristalle, die abfiltriert werden können. Mit den so gewonnenen Salzen erzielen die Autoren Ausbeuten von 40-60 %, wenn Amidinverbindungen jeweils einzeln, also in jeweils getrennten Experimenten, eingesetzt werden. Eine Filtration, bei der der Überstand mit Nebenprodukten und nicht umgesetzten Ausgangsprodukten vom kristallinen Produkt abgetrennt wird, ist natürlich mehr als nur ein Nass-Trocken-Zyklus, bei dem die Verunreinigungen mit dem Produkt vermischt blieben und die weiteren Schritte entsprechend weniger aussichtsreich wären.

Erhitzt man die gewonnenen Salze, bis sie schmelzen (108-159 °C), so bilden sich gelbliche Kristalle (teilweise bereits als Feststoffe), und unter deutlicher Farbänderung bilden sich Stickstoffheterozyklen (Nitrosopyrimidinverbindungen,

4). Wenn die Umwandlungen jeweils separat durchgeführt werden, geben die Autoren die Ausbeuten mit 60-85 % an. Die Nitrosopyrimidinverbindungen (**4**) werden in weiteren Reaktionsschritten zunächst in verdünnter Salzsäure hydrolysiert. (Hydrolysiert man die Verbindung **4** mit einer Methylthiogruppe [$\text{R} = \text{SMe}$] in Gegenwart von Aminen, so entstehen Zwischenstufen, die zu nicht typischen RNA-Bausteinen führen, sondern zu sogenannten nicht kanonischen* RNA-Basen.) Die durch Hydrolyse erzeugten Aminogruppen können in verdünnter Ameisensäure (HCOOH) in Gegenwart von metallischem Nickel (Ni)- oder Eisenpulver (Fe) durch Anhängen einer Formylgruppe aktiviert werden. Ni und Fe bilden unter den Reaktionsbedingungen Ni^{2+} - bzw. Fe^{2+} -Ionen. Die so erhaltenen Zwischenstufen können als Feststoffe mit Ribose umgesetzt werden. Unter basischen Bedingungen kann der Ringschluss zum Purinsystem erfolgen. Auf diese Weise können im Labor Nukleoside synthetisiert werden. Dafür sind sehr viel leistungsfähigere Synthesen als die hier beschrieben bekannt, aber diese sind sehr weit davon entfernt, als Beispiele für präbiotische Vorgänge gelten zu können.

Wert passend eingestellt werden. Einmal wird als Lösungsmittel Wasser verwendet, für einen der folgenden Schritte verdünnte Ameisensäure; für einen weiteren Reaktionsschritt sollte von

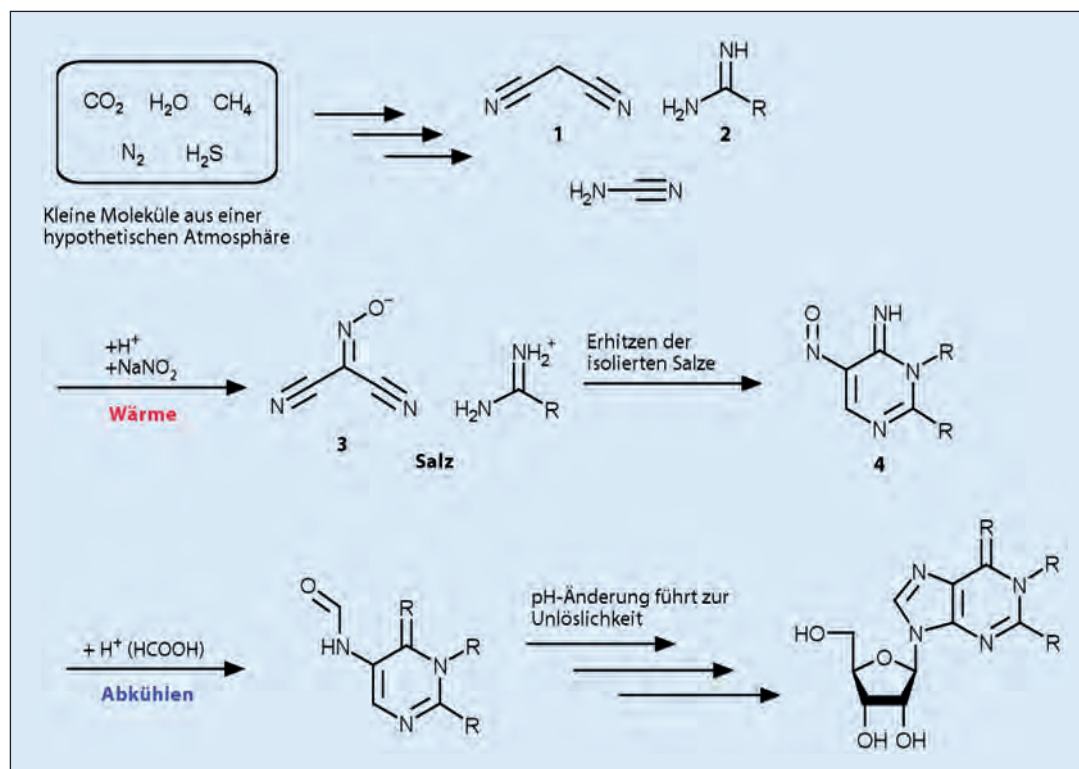


Abb. 2 Ausschnitte aus dem von BECKER et al. (2018) skizzierten Szenario. Die angegebenen Nummern finden sich im Textkasten „Chemische Umsetzung auf dem Weg zum RNA-Nukleosid“. (Bild: B. SCHMIDTGALL)

irgendwoher wässrige Ammoniaklösung dazu kommen. Auch für die selektiven Ausfällungen müssen die Bedingungen so eingestellt sein, dass der gewünschte Stoff als Feststoff anfällt; wie dieser dann unter natürlichen Bedingungen „filtriert“, d. h. von den in Lösung vorliegenden nicht umgesetzten Ausgangsverbindungen und Nebenprodukten getrennt werden kann, bleibt zu zeigen.

Die angegebenen Ausbeuten der einzelnen Reaktionen wurden im Labor durch Operationen erzielt, in denen ausschließlich die gewünschten Ausgangsstoffe zur Herstellung einer bestimmten Variante der Zielverbindungen eingesetzt worden sind. Wenn man die Synthesereaktionen parallel, d. h. in einem einzigen Ansatz durchführt, sinken die Ausbeuten vermutlich dramatisch und die Zahl der Nebenprodukte nimmt erheblich zu. Die Nebenprodukte machen die „gewünschte“ Reaktion mindestens weniger effizient und führen zweitens zur Entstehung ganz anderer Produkte, die für den weiteren Gang der ateleologischen Biogenese destruktiv sind.

BECKER et al. (2018) betonen, dass durch ihren Vorschlag nicht nur die Synthese der kanonischen RNA-Purin-Nukleoside erklärt würde, sondern auch die der nicht kanonischen. Die Bedeutung der letzteren ist für die Autoren dadurch belegt, dass diese in der RNA vieler rezenter Lebewesen vorkommen und dort u. a. auch die 3-dimensionale Anordnung der RNA-Moleküle prägen.¹ Diesen Befund interpretieren die Autoren so, dass diese untypischen RNA-Bausteine schon für die ersten und einfachsten Lebewesen, aus denen sich die komplexeren entwickelt haben müssten, verfügbar gewesen sein müssen. Ob eine größere Anzahl an Strukturvarianten der RNA-Bausteine für die Entstehung erster und einfachster lebensähnlicher Systeme tatsächlich förderlich und hilfreich oder aber störend und hinderlich ist, bleibt noch zu zeigen. Jedenfalls kann man aus der Bedeutung, die untypische RNA-Basen heute – bei ihrem vergleichsweise geringen Anteil (daher „nicht-kanonisch“) – haben, nicht automatisch auf deren Bedeutung in einer mutmaßlichen präbiotischen Synthese schließen.

Resümee

BECKER et al. (2018) haben in der Einleitung erfreulicherweise einen von mehreren bereits wiederholt genannten Schwachpunkten von

Szenarien zu präbiotischen Synthesen von Bausteinen für erste einfachste lebensähnliche Systeme aufgenommen. Sie bezeichnen ihren Vorschlag als fortlaufende Synthese und erwecken damit den Eindruck, die vielstufigen Synthesen für die RNA-Nukleoside ohne Isolierung und Reinigung der Zwischenprodukte durchführen zu können. Das bestätigen die experimentellen Daten jedoch nicht. Zudem ist das von ihnen skizzierte Szenario hochkomplex, und die vorgestellte Flusslandschaft in geothermischer Umgebung muss eine Fülle von Voraussetzungen erfüllen wie z. B. richtige Temperaturen und pH-Werte an den entsprechenden Positionen. Die verschiedenen Arme des Flusssystems mit

Das skizzierte Szenario ist hochkomplex und die Einstellung aller notwendigen Bedingungen basiert auf der chemischen Erfahrung.

ihrer spezifischen Fracht müssen sich an den richtigen Stellen und in der richtigen Abfolge vereinigen. Die Einstellung aller dieser Bedingungen basiert auf der chemischen Erfahrung. Dem angegebenen Ziel, ein System zu etablieren, in dem präbiotische Synthesereaktionen Nass-Trocken-Zyklen benötigen und keiner weiteren Voraussetzungen bedürfen, um RNA-Moleküle verfügbar zu machen, ist man mit den bisherigen Ergebnissen nicht näher gekommen.

Anmerkung

¹ Die Bedeutung von untypischen, nichtkanonischen Basen in der DNA haben CARELL et al. (2018) kürzlich vorgestellt.

Literatur

- BECKER S, THOMA I, DEUTSCH A, GEHRKE T, MAYER P, ZIPSE H & CARELL T (2016) A high-yielding, strictly regioselective prebiotic purine nucleoside formation pathway. *Science* 352, 833–836.
- BECKER S, SCHNEIDER C, OKAMURA H, CRISP A, AMATOV T, DEJMNEK M & CARELL T (2018) Wet-dry cycles enable the parallel origin of canonical and non-canonical nucleosides by continuous synthesis. *Nat. Comm.*, doi: 10.1038/s41467-017-02639-1
- CARELL T, KURZ MQ, MÜLLER M, ROSSA M & SPADA F (2018) Nichtkanonische Basen im Genom: die regulative Informationsebene in der DNA. *Angew. Chem.* 130, 4377–4394; *Angew. Chem. Int. Ed.* 57, 4296–4312.
- GILBERT W (1986) The RNA World. *Nature* 319, 618.
- ORGELE LE (1968) Evolution of the genetic apparatus. *J. Mol. Biol.* 38, 381–393.

Geologisches Weltbild: Aktualismus von Wiederbelebung der Katastrophentheorie gefährdet?

Michael Kotulla

Prof. Jan BEHRMANN ist Präsident der Deutschen Geologischen Gesellschaft – Geologische Vereinigung (DGGV). In einem Wort an die Mitglieder der DGGV stellte BEHRMANN im Juni d. J. heraus, dass bereits Geowissenschaftler wie James Hutton oder Charles Lyell den Weg zu einem prozesshaften Verständnis von geologischen Vorgängen gebahnt hätten, aber dass es Karl Ernst Adolf von Hoff (1822–1841) gewesen sei, der unabhängig und vor Charles Lyell das Aktualitätsprinzip¹ in der Geologie begründet hatte. Der dann von Lyell vollständig entwickelte Aktualismus² habe die Überwindung der Katastrophentheorie in den Geowissenschaften bedeutet. Mit diesen Vorbemerkungen zeigt BEHRMANN schließlich eine aus seiner Sicht zu bedenkende Situation auf: „Ironisch ist, dass im öffentlichen Diskurs und in den Medien beinahe zwei Jahrhunderte später so gut wie jede Veränderung im Erdsystem als ‚Katastrophe‘ apostrophiert wird. Wir³ waren in unserem

Weltverständnis schon einmal weiter, möchte man denken“ (BEHRMANN 2018).

Nach ENGELHARDT & ZIMMERMANN (1982, 354) hat das regulative Prinzip der Uniformität „insbesondere in der Form des *Aktualismus* in der Entwicklung der geowissenschaftlichen Disziplinen eine sehr bedeutende Rolle gespielt und wird auch heute noch als die wichtigste Grundlage der geowissenschaftlichen Forschung angesehen“. Das „heute“ mag sich auf die 1960er- und 1970er-Jahre beziehen. Dass inzwischen zahlreiche Phänomene nicht-aktualistisch interpretiert werden, ist nicht zuletzt auch dem gesunden Menschenverstand geschuldet. Drei Tendenzen sind zu beobachten:

1. Eine zunehmende Prozess-orientierte, Ereignis-fokussierte Analyse (über alle Raum-Skalen). AGER (1993, 70) schreibt: „Insbesondere müssen wir folgern, dass *die Sedimentation in der Vergangenheit tatsächlich häufig sehr rasch und sehr stoßartig war*. Dies kann als das ‚Phänomen von der



Paläozäne Sedimentfolge in Zumaia, Nordspanien. (Foto © alfernec – fotolia.com)

katastrophischen Natur des größten Teils der stratigraphischen Überlieferung‘ bezeichnet werden.“

2. Ein zwischenzeitlich in Teilen durch Empirie gestütztes, besseres Verständnis geologischer Prozesse; z.B. experimentelle Sedimentologie, zuletzt insbesondere zur Entstehung von Tonsteinen (SCHIEBER et al. 2007, 2010, 2013; KOTULLA 2017).

3. Die Erkenntnis, dass es für die meisten Phänomene bzw. Gesteinskörper der Erdkruste (auch unter Berücksichtigung ihrer räumlichen Dimension) keine heutigen Analoga gibt, z.B. Salzlager, Fossilienlager, Sedimentfolge der Buntsandstein-Gruppe oder des kohlenführenden Karbons, Kollision von Lithosphären-Platten (FRANKE 2002, KOTULLA 2015), Impakte größerer Meteoriten, Megafluten.

Anscheinend führt ein mehr wissenschaftlicher Ansatz zunehmend häufiger zu anderen, zum Aktualismus gegensätzlichen Interpretationen und Ergebnissen (nämlich „katastrophischer“ Natur) und zwangsläufig zu einem Ausbruch aus dem Prinzip „Aktualismus“; vgl. hierzu beispielsweise die Diskussion über Megafluten (BAKER 2002, 2009; KOTULLA 2014). Der Begriff „Katastrophe“ steht ja stellvertretend für eine geologische Aktivität oder Dynamik höherer oder hoher Magnitude (oder Energie); er wird nicht erst im „öffentlichen Diskurs“ und „in den Medien“ (s. o.) eingeführt, sondern wird von den Wissenschaftlern selbst direkt oder in Umschreibung verwendet.

Die Befolgung des Lyell'schen Aktualismus hat in der geowissenschaftlichen Forschung eine bedeutende Fehlentwicklung eingeleitet.

Die Einführung und strikte Befolgung des Lyell'schen Aktualismus als regulatives Prinzip hat dem Fortschritt der geowissenschaftlichen Forschung wohl mehr geschadet als genutzt und eine bedeutende Fehlentwicklung eingeleitet. Ein regulatives Prinzip (aktuell Aktualismus) sollte aber nicht durch ein anderes regulatives Prinzip (z.B. Katastrophismus) ersetzt werden; vielmehr sollte auf regulative Prinzipien dieser Art generell verzichtet werden. Denn es gilt: „Geowissenschaftliche Theorien – so gewiss sie zu sein scheinen – können ebenso wenig wie die ihnen zugrunde liegenden regulativen Prinzipien ein ‚geologisches‘ Weltbild als gesicherte Abbildung der Realität in Raum und Zeit konstituieren“ (ENGELHARDT & ZIMMERMANN 1982, 367).

Wenn nicht nur das „geologische“ Weltbild, sondern gar das „Weltverständnis“ alleine auf

den Aktualismus gründet (s. o.), wird das ganze Ausmaß der Fehlentwicklung deutlich. Als ein bedeutendes Element ist Aktualismus (Uniformitarismus) an der Konstitution der Geschichte der Erde und des Lebens beteiligt. Die so begründete und geschriebene „Erdgeschichte“ ist aber gemacht; sie ist faktisch, aber sicher nicht real (vgl. KOTULLA 2016).

Anmerkungen

- ¹ Erkenntnistheoretisch besagt das Aktualitätsprinzip (Uniformitarismus), dass für die Deutung der Vergangenheit im Sinne wissenschaftlich verlässlicher Schlussfolgerungen als einzige Erfahrungsquelle nur die gegenwärtigen, durch menschliche Beobachtung nachweisbaren, geologisch langsam wirkenden und niedrig-energetischen Prozesse zuzulassen sind (nach BAKER 2002, 2379).
- ² William Whewell bezeichnete Lyells Prinzipienwerk 1832 als Uniformitarismus.
- ³ Die „Wir“-Gruppe wird nicht konkretisiert. Es können z.B. die Mitglieder der DGGV, die „geowissenschaftliche Gemeinschaft“ oder die Allgemeinheit gemeint sein.

Literatur

- AGER DV (1993) The nature of the stratigraphical record. 3rd ed., Chichester.
- BAKER VR (2002) The Study of Superfloods. *Science* 295, 2379–2380.
- BAKER VR (2009) The Channeled Scabland – a retrospective. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences* 37, 6.1–6.19.
- BEHRMANN J (2018) Wort des Präsidenten. *Geowissenschaftliche Mitteilungen (GMIT)* 72, 53.
- ENGELHARDT W FRH V & ZIMMERMANN J (1982) Theorie der Geowissenschaft. Paderborn, München, Wien, Zürich.
- FRANKE W (2002) Die vereinigten Platten von Europa. In: WEFER G (Ed.) *Expedition Erde*, Berlin, S. 30–34.
- KOTULLA M (2014) Megafluten. *Stud. Integr. J.* 21, 4–11.
- KOTULLA M (2015) Island: Eine Insel, zwei „Kontinente“. 2. Geodynamische Phänomene und Zeit. *Stud. Integr. J.* 22, 4–15.
- KOTULLA M (2016) Erdgeschichte als Tatsache. *Stud. Integr. J.* 23, 83–93.
- KOTULLA M (2017) Sedimentologie: Paradigmenwechsel zum Ablagerungsmechanismus von Ton und Silt. *Stud. Integr. J.* 24, 78–87.
- SCHIEBER J, SOUTHARD JB, KISSLING P, ROSSMANN B & GINSBURG R (2013) Experimental deposition of carbonate mud from moving suspensions: importance of flocculation and implications for modern and ancient carbonate mud deposition. *Journal of Sedimentary Research* 83, 1025–1031.
- SCHIEBER J, SOUTHARD J & SCHIMMELMANN A (2010) Lenticular Shale Fabrics Resulting from Intermittent Erosion of Muddy Sediments – Comparing Observations from Flume Experiments to the Rock Record. *Journal of Sedimentary Research* 80, 119–128.
- SCHIEBER J, SOUTHARD J & THAISEN K (2007) Accretion of Mudstone Beds from Migrating Floccule Ripples. *Science* 318, 1760–1763.

Streiflichter

„Metaplastizität“: Pflanzen können „wählen“

Eine der vielen faszinierenden Fähigkeiten der Lebewesen ist es, passend auf Umweltreize und Umweltänderungen durch Änderungen in Anatomie, Physiologie oder Verhalten reagieren zu können. Man spricht von *Plastizität*. Darunter wird die Fähigkeit von Organismen verstanden, auf der Basis desselben Genotyps (Erbguts) mehrere Phänotypen (äußere Form, Physiologie u.a.) als Reaktion auf Umweltreize ausbilden zu können. Beispiele wie die Erhöhung der Anzahl der Roten Blutkörperchen im Blut abhängig vom Sauerstoffgehalt der Luft oder die Bildung einer dickeren Hornhaut bei mechanischer Beanspruchung sind allgemein bekannt.

Plastizität ermöglicht angepasste Reaktionen bei regelmäßig, gelegentlich oder nur ausnahmsweise auftretenden Umweltänderungen. Drei Fähigkeiten sind dafür unverzichtbar: Messung von Umweltreizen, Vergleich mit Sollwerten und passende Reaktionen. WHITMAN & AGRAWAL (2009, 20) stellen zum erforderlichen Aufwand für plastische Reaktionen fest: „Zwischen der Reizaufnahme und der Ausprägung des Phänotyps können *Dutzende von Schritten* liegen, die durch *Hunderte von Genen* und zahllose Umweltfaktoren und physiologische Faktoren beeinflusst werden“ (Hervorhebung hinzugefügt). Fehlt eine von den drei genannten Voraussetzungen, ist eine plastische Reaktion nicht möglich. Jede dieser drei Fähigkeiten ist anspruchsvoll (z.B. werden „Messinstrumente“ benötigt). Die Fähigkeit zur plastischen Reaktion ist kein gewöhnliches Merkmal wie etwa die Form eines Knochens oder die Anzahl von Blütenblättern, sondern erfordert die Existenz eines Variations- und Anpassungsprogramms sowie geeignete Effektorsysteme, die im Wesentlichen in fertiger Form vorhanden sein müssen. Es ist daher gerechtfertigt, das Vorkommen von

Plastizität als Design-Indiz, also als Hinweis auf einen Schöpfer, zu interpretieren (JUNKER 2014).

Eine schon länger bekannte plastische Fähigkeit bei Pflanzen sind Strategien zur Vermeidung bzw. Verringerung von Beschattung bzw. passende Reaktionen bei unvermeidbarer Beschattung. Drei Strategien werden beobachtet: Konfrontation, Toleranz und Konkurrenzvermeidung. So erkennen Pflanzen an der Lichtmenge und an den Anteilen verschiedener Wellenlängen des Lichts sowie ggf. durch Berührungssreize und chemische Stoffe die Anwesenheit und Position von konkurrierenden Pflanzen. Reaktion durch Konfrontation erfolgt durch verstärktes Höhenwachstum, um über die Konkurrenten hinauszuwachsen. Eine „tolerante“ Reaktion besteht in der Veränderung der Blattstruktur, z.B. in der Vergrößerung der Blattfläche auf Kosten der Blattdicke, wodurch bei gleichem Materialaufwand das einfallende Licht effektiver genutzt werden kann. Zur dritten Strategie sind Pflanzen in der Lage, die Ausläufer bilden können, wie sie besonders bei der Erdbeere bekannt sind. Dadurch können die Pflanzen einfach seitlich aus dem engeren Umfeld ihrer Konkurrenten herauswachsen und somit die Konkurrenz vermeiden.

Ein Team von Forscherinnen der Universität Tübingen hat nun anhand

des Kriechenden Fingerkrauts (*Potentilla reptans*) untersucht, ob Pflanzen zwischen diesen Reaktionsmöglichkeiten je nach Situation wählen und damit passend auf Größe und Dichte der Konkurrenz reagieren können (GRUNTMAN et al. 2017). Wie der Artnamen andeutet, sind diese Pflanzen in der Lage, seitlich zu wachsen und Ausläufer zu bilden, sodass ihnen alle drei Reaktionsmöglichkeiten bei veränderter Beschattung zur Verfügung stehen. Die Wissenschaftlerinnen konstruierten verschiedene Umgebungen und variierten diese, um unterschiedlichen Lichteinfall und unterschiedliche vorrangig vorhandene Wellenlängen und auch deren Änderung zu simulieren. Ihre Ergebnisse zeigten, dass die Pflanzen zwischen den drei verschiedenen Strategien hin und her springen können, je nachdem, welche plastische Reaktion gerade aufgrund der Veränderung des Lichteinfalls am passendsten war. Das Kriechende Fingerkraut ist also gleichsam in der Lage, Entscheidungen zu treffen.

In einer Pressemeldung der Universität Tübingen werden die Ergebnisse zusammengefasst: „Es investierte ins Längenwachstum, wenn die Simulation kurz- und dichtwachsende Nachbarspflanzen vorgab – also Konkurrenten, die sich nicht seitwärts umgehen ließen, aber klein genug waren, um in der Höhe über-



Abb. 1 Das Kriechende Fingerkraut (*Potentilla reptans*). (CC BY-SA 3.0)

wachsen zu werden. Wurden hoch- wie auch dichtwachsende Nachbarnpflanzen simuliert, bei denen weder Flucht noch Konfrontation möglich war, entwickelten die Testpflanzen die höchste Schattentoleranz. Bei hohen, aber licht wachsenden Nachbarpflanzen war die häufigste Reaktion ein seitwärts gerichtetes Wachstum mit Hilfe von Ausläufern“ (https://www.uni-tuebingen.de/uploads/media/17-12-21_Pflanzen_Entscheidungen_dt_02.pdf).

Aus diesen Beobachtungen kann man schließen, dass über die an sich schon bemerkenswerten plastischen Fähigkeiten hinaus die Pflanzen auch einschätzen können, wie dicht und hoch ihre Nachbarn stehen und welche Reaktion daher am besten passt. In Anlehnung an A. NOVOPLANSKY sprechen die Autorinnen von „Metaplastizität“, also eine „Plastizität der plastischen Reaktionen“ (GRUNTMAN et al. 2017, 5), und vermuten, dass es eine solche Entscheidungsfähigkeit auch bei anderen Organismen und auch in Bezug auf andere Umweltfaktoren gibt.

Die Fähigkeit, unter verschiedenen Reaktionsmöglichkeiten wählen zu können, ist in einer Umgebung, in der die Konkurrenzverhältnisse sich schnell ändern können, besonders nützlich. Sie kann kaum unterschätzt werden, denn die Pflanzen müssen zunächst über eine genetische, entwicklungsbiologische und biochemische Grundausstattung

verfügen, welche die verschiedenen Reaktionen erlauben. Darüber hinaus müssen sie zum einen in der Lage sein, komplexe Informationen über verschiedene Aspekte ihrer Umgebung aufzunehmen und zu verarbeiten, zum anderen müssen sie optimal darauf reagieren und die Reaktionen bei Bedarf immer wieder neu anpassen können. Es ist keine Frage, dass dies einen erheblichen Programmieraufwand erfordert. Die Pflanzen reagieren gleichsam intelligent, als könnten sie verschiedene Einflüsse und ihre Folgen abwägen und somit zukunftsorientiert reagieren: „Sie könnten zu alternativen plastischen Reaktionen übergehen, die entweder Toleranz oder Vermeidung von leichtem Wettbewerb bewirken, und so ihre Reaktion auf die vorherrschenden und zukünftigen Wettbewerbsbedingungen anpassen“ (GRUNTMAN et al. 2017, 2). Da man ihnen keine Denkfähigkeit unterstellen kann, sind diese programmierten und abrufbaren komplexen Fähigkeiten ein klares Design-Indiz. [GRUNTMAN M, GROSS D, MÁJEKOVÁ M & TIELBÖRGER K (2017) Decision-making in plants under competition. Nat. Comm. 8:2235, doi:10.1038/s41467-017-02147-2 • JUNKER R (2014) Plastizität der Lebewesen: Baustein der Makroevolution? Internetartikel, <http://www.wort-und-wissen.de/artikel/sp/b-14-2-plastizitaet.pdf> • WHITMAN DW & AGRAWAL AA (2009) What is Phenotypic Plasticity and Why is it important? In: WHITMAN DW & ANANTHAKRISHNAN TN (eds) Phenotypic Plasticity of Insects: Mechanisms and Consequences. Science Publishers.] R. Junker

Beide Aspekte sind mittlerweile infrage gestellt, da es starke Indizien dafür gibt, dass Artbildung auch ohne räumliche Trennung und auch in wenigen Generationen möglich ist. Da Artbildung oft auf Spezialisierung beruht, ist es fraglich, ob dieser Prozess auf lange Sicht zu weitergehenden evolutiven Änderungen bis hin zur Entstehung neuer Baupläne führen kann (JUNKER & SCHERER 2017, III.5.1). Vieles spricht dafür, dass Artbildung letztlich in evolutive Sackgassen führt bzw. auf einem Ausschöpfen einer anfangs großen Variationsbreite innerhalb einer Art beruht, was auch sehr gut zum Grundtypmodell der Schöpfungslehre passt.

Besonders gut im Freiland erforscht sind evolutive Prozesse bei den berühmten Darwinfinken der Galapagos-Inseln. Vor einigen Jahren konnte durch Langzeitbeobachtungen eine beginnende Artbildung dokumentiert werden (GRANT & GRANT 2009; vgl. JUNKER 2012). Es konnte dabei gezeigt werden, dass die Veränderungen auf dem Ausschöpfen vorhandener Variabilität beruhen.

Nun berichten LAMICHHANEY et al. (2018) über eine weitere Langzeitstudie bei Darwinfinken, durch die Artbildung durch Hybridisierung nachgewiesen werden konnte (vgl. WAGNER 2018). Von 1981 bis 2012 wurde zunächst ein Neuankömmling des Großen Kaktusfinks *Geospiza conirostris* und in den Jahren danach seine Nachkommen auf der Insel Daphne Major während sechs Generationen beobachtet und deren DNA untersucht. Die Forscher fanden heraus, dass der ungewöhnlich große eingewanderte Vogel von der über 100 km entfernten Insel Española stammen musste. Auf Daphne Major verbandelte er sich mit einem Weibchen des Mittleren Grundfinken (*Geospiza fortis*). Der daraus entstandene Mischling paarte sich erneut mit *G. fortis*, und alle weiteren Paarungen erfolgten nur noch unter den neu entstandenen Hybriden (Endogamie) (vgl. Abb. 1).

Der Grund dafür, dass die Hybridenpopulation unter sich blieb, war die ungewöhnliche Körpergröße der Mischlinge, ihr großer und spitzer Schnabel sowie ihr Gesang,

■ Artbildung live bei Darwinfinken

Einer der Grundmechanismen der Evolution ist Artbildung, also die Aufspaltung einer Art in zwei Tochterarten. Lange Zeit galt im Anschluss an Ernst MAYR als Lehrbuchwissen, dass Artbildung in der Regel eine geographische Trennung (Separation) der Elternart erfordert, damit die getrennten Populationen sich unterschiedlich verändern können, bis sie sich bei späterer Überlappung nicht mehr kreuzen und damit eine Fortpflanzungsisolierung erreicht ist. Dieser Prozess soll zudem so langsam verlaufen, dass er auch über mehrere Forschergenerationen nicht beobachtet werden kann (WAGNER 2018, 157).



Abb. 1 Die Hybride (rechts) – Big Birds – aus *Geospiza fortis* und *G. conirostris* (links). (Aus WAGNER 2018, Abdruck mit freundlicher Genehmigung)

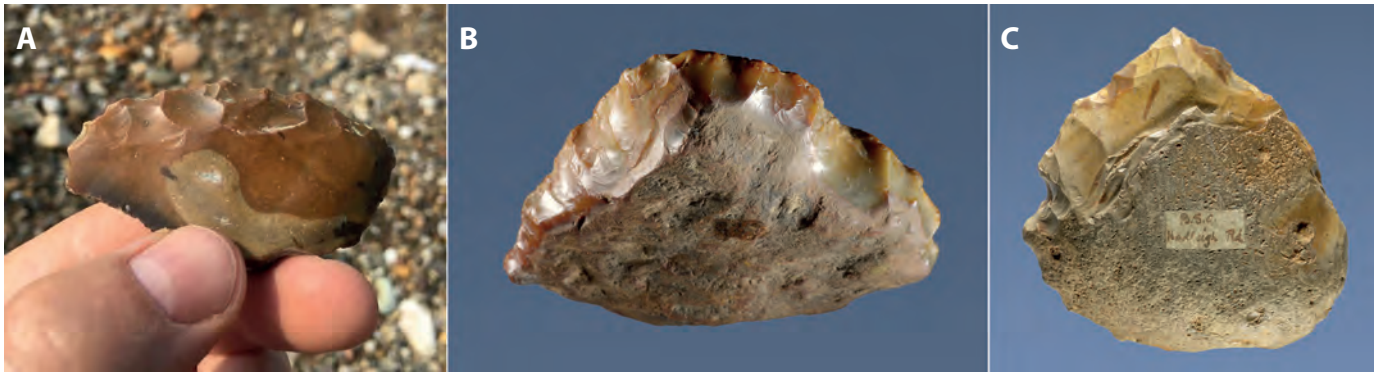


Abb. 1 A Schaber aus dem Altpaläolithikum von Schladebach, Sachsen-Anhalt, B Schaber aus dem Pliozän vom Kent-Plateau, England, C Querschaber oder eine gedrungene Spitze aus einem Abschlag aus dem Pliozän von Ipswich, England. (A aus LAUER & WEISS 2018, Supplementary Information, B, C aus BRANDT 2011)

der sich deutlich vom Gesang der einheimischen drei Finkenarten unterscheidet. Aufgrund der Fortpflanzungsisolation handelt es sich damit definitionsgemäß um eine neue Biospezies. Die Forscher bemerken, dass die Mischlinge als eigenständige Art betrachtet worden wären, wenn man ihre Vorgeschichte nicht kennen würde.

Die Mischlingspopulation wuchs bis zu acht Brutpaaren und über 30 Individuen an. Trotz Entstehung durch Inzucht weist die neu entstandene Population eine hohe Fitness auf (gemessen an Nachkommenzahl und Überlebensfähigkeit). Aufgrund ihres großen Schnabels sind die Mischlingsvögel in der Lage, die holzigen Früchte der Burzeldorne *Tribulus cistoides* zu nutzen. Sowohl die Schnabelform als auch der Gesang ermöglichen der neuen Art somit, im Gebiet bereits ansässiger Darwinfinkenarten eine eigene ökologische Nische zu besetzen. Da bei den Darwinfinken der Nachwuchs den Gesang vom Vater lernt, war es entscheidend, dass die Besiedlung von Daphne major durch ein Männchen erfolgte, dessen abweichender Gesang von den Nachkommen unverändert übernommen und erlernt wurde. Dadurch war eine wichtige Voraussetzung für die Abgrenzung von den heimischen Arten erfüllt. Dass aufgrund der besonderen Schnabelform zugleich eine neue ökologische Nische vorhanden war, begünstigte zusätzlich die Entstehung der reproduktiven Isolation und damit die Entstehung einer neuen Art.

Bisher ist der Modus der sog. *homoploiden Artbildung* (d.h. Artbildung ohne Verdopplung des Chro-

mosomensatzes) kaum beobachtet worden. WAGNER (2018) findet deshalb die Studie von LAMICHHANEY et al. bahnbrechend; sie sei aber auch bedeutsam, weil gezeigt wurde, dass Artbildung sehr schnell innerhalb weniger Generationen erfolgen kann. Wie oft Artbildung durch Hybridisierung vorkommt, kann derzeit nicht abgeschätzt werden; möglicherweise spielt sie eine wichtige Rolle beim Aufbau der Vielfalt innerhalb eines Grundtyps. Es ist gut möglich, dass auch andere der mittlerweile 19 bekannten Darwinfinkenarten aus Hybridisierungen hervorgegangen sind.

[GRANT PR & GRANT BR (2009) The secondary contact phase of allopatric speciation in Darwin's finches. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106, 20141-20148 • JUNKER R (2012) Schnelle Artbildung live bei Darwinfinken. *Stud. Integr. J.* 19, 45-47 • LAMICHHANEY S, HAN F, WEBSTER MT, ANDERSSON L & GRANT BR (2018) Rapid hybrid speciation in Darwin's finches. *Science* 359, 224-228 • WAGNER CE (2018) Improbable big birds. *Science* 359, 157-159] R. Junker

■ Steinwerkzeugfunde allein reichen als Hinweis auf die Anwesenheit des Menschen

Die beiden Wissenschaftler Tobias LAUER und Marcel WEISS vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig haben neue Daten zum zeitlichen Ablauf der Elster- und Saale-Eiszeit in Mitteleuropa gewonnen. Die Forscher fanden heraus, dass die erste Vergletscherung vor ca. 450 000 radiometrischen Jahren (rJ) und damit ca. 100 000 rJ früher als bisher angenommen stattgefunden hat. Außerdem zeigten die beiden Wissenschaftler, dass

die ersten Menschen Mitteldeutschland bereits vor ca. 400 000 rJ und damit früher als bisher allgemein anerkannt besiedelten (LAUER & WEISS 2018). Ein ähnlich hohes Alter könnte aber auch der Fundplatz Bilzingsleben in Thüringen haben (siehe kurze Diskussion bei LAUER & WEISS 2018).

Hinweis auf diese Besiedlung sind zehn einfache Abschlagskerne, 16 Abschläge und drei Werkzeuge, wobei an den Artefakten Kantenschäden und Zeichen der Verrollung nachweisbar sind. LAUER & WEISS (2018) hatten diese kleine Artefaktkollektion im Rahmen von Probeentnahmen für Lumineszenz-Datierungen in den Ablagerungen an der Basis der Saale-Hauptterrasse in Schladebach, Sachsen-Anhalt, entdeckt. Allerdings hatte man aus diesem geologischen Horizont zuvor schon seit der Mitte des 20. Jahrhunderts in Schladebach und Wallendorf mehr als 6.700 Steinartefakte geborgen.

Die neu entdeckten Artefakte von Schladebach sind primär altpaläolithischer Natur, d.h. sie weisen typische Merkmale von Artefakten aus dem Unteren Paläolithikum auf. Nur ein Abschlag weist eine leicht facettierte (bearbeitete) Schlagplattform als Hinweis auf einen (geringen) Trend zu einer mittelpaläolithischen Technologie auf. Außer diesen relativ wenigen Artefakten, die zudem wie schon erwähnt nicht mehr im ursprünglichen Zustand gefunden wurden, gab es keine weiteren Hinweise auf die Existenz der damals lebenden Menschen wie Schlagplätze, Überreste anderer Tätigkeiten des Menschen oder menschliche Knochenüberreste. LAUER & WEISS schreiben

nicht, dass man die neu entdeckten Artefakte nur deshalb als Artefakte und nicht als mögliche Geofakte (Naturprodukte) werten kann, weil zuvor schon mehr als 6.700 Artefakte aus diesem geologischen Horizont geborgen wurden. Vielmehr reicht den Archäologen eine kleine Steinkollektion mit Artefaktmerkmalen als Hinweis auf die Existenz von Menschen. Wenn gelegentlich behauptet wird, es würden für den Nachweis menschlicher Tätigkeit zusätzliche Indizien benötigt, so wird dies durch die Forschungspraxis widerlegt.

Schaut man sich die von LAUER & WEISS (2018) publizierten Artefakte an, so wird der Betrachter an die sogenannten Eolithen erinnert. Eolithen sind Steine aus dem Tertiär mit typischen Artefaktmerkmalen. Sie passen aufgrund ihres hohen Alters nicht in die evolutionären Entstehungsmodelle des Menschen und werden deshalb als Hinweis auf die Existenz von Menschen abgelehnt. Diese Thematik wurde von BRANDT (2011) ausführlich thematisiert. In Abb. 1 ist ein von LAUER & WEISS (2018) entdecktes Artefakt zwei Eolithen zur Seite gestellt. Der Leser kann anhand des Vergleichs selbst ein Urteil fällen, ob es sich bei den Eolithen um Steine mit typischen Artefaktmerkmalen handelt.

BRANDT M (2011) Vergessene Archäologie. Steinwerkzeuge fast so alt wie Dinosaurier. Holzgerlingen • LAUER T & WEISS M (2018) Timing of the Saalian and Elsterian glacial cycles and the implications for Middle-Pleistocene hominin presence in central Europe. Sci. Rep. 8:5111. Eine populärwissenschaftliche Zusammenfassung des Originalartikels findet sich unter <https://www.mpg.de/11983253/mittelpleistozan-eiszeiten> (Zugriff am 26.3.2018)] M. Brandt

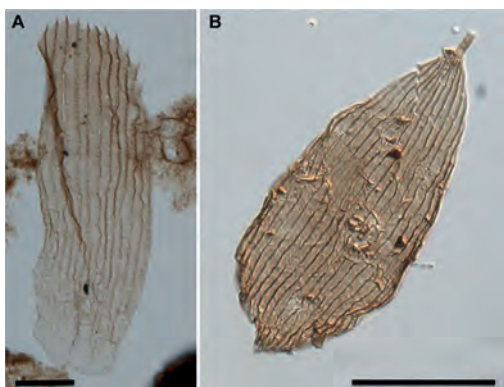


Abb. 1 Präparierte Schmetterlingsschuppen **A** aus dem Hettangium (Obertrias), **B** aus dem Rhaetium (Unterjura). Balken: 20 µm. (Aus VAN ELDIJK et al. 2018; CC BY-NC 4.0)

■ Paradebeispiel für Co-Evolution infrage gestellt

Bisher galt als Lehrmeinung, dass Schmetterlinge und bedecktsamige Blütenpflanzen „Hand in Hand“ evolvierten. Doch nun zeigen fossile Reste von Schmetterlingsschuppen, dass die einen Saugrüssel tragenden Schmetterlinge sehr viel früher existiert haben. Der Fall zeigt beispielhaft: Stimmige „Geschichten“ sind keine Erklärungen und es muss mit umfangreichen geologisch nicht überlieferten Lebensräumen gerechnet werden.

Schmetterlinge (Lepidoptera) sind der Inbegriff für Symbiose, d.h. eine Vergesellschaftung von Individuen zweier verschiedener Arten, die für beide Partner vorteilhaft ist. Die nektarsaugenden Falter nehmen mit ihrem Saugrüssel beim Blütenbesuch auch Pollen auf bzw. geben ihn ab und ermöglichen auf diese Weise bei vielen Pflanzen die Bestäubung. Sie selber erhalten nahrhaften Nektar aus den Blüten. Was liegt im Rahmen einer evolutionären Weltsicht näher als die Annahme, dass die Entstehung von Schmetterlingen und nektarproduzierenden Blütenpflanzen (Angiospermen) Hand in Hand gingen? Diese Geschichte war bisher Lehrmeinung und mit den bekannten Fossilfunden vereinbar. Allerdings ist der Fossilbericht dieser Insektengruppe sehr dürftig. Der bislang älteste Fund stammte aus der Unterkreide und wird auf 129 Millionen radiometrische Jahre (MrJ) datiert. Molekulare Studien sprechen unter evolutionstheoretischen Voraussetzungen jedoch dafür, dass die Lepidopteren schon sehr viel früher entstanden sind als die Angiospermen, nämlich (je nach verwendeter Methode) im Perm oder in der oberen Trias (> 200 MrJ), während eindeutige Angiospermen-(Makro-) Fossilien erst ab der Unterkreide bekannt sind.

Nun wurden in der Nähe von Braunschweig in einem Sedimentbohrkern aus dem Bereich der Grenze Trias / Jura unter anderen Mikrofossilien zarte, schuppenähnliche Gebilde entdeckt (VAN ELDIJK et al. 2018). Etwa 70 Schuppen konnten genauer analysiert werden. Die

Untersuchung ergab, dass einige von diesen Schuppen Merkmale besaßen, die typisch sind für Flügelschuppen der Gruppe der Glossata, der Motten und Schmetterlinge mit Saugrüssel. Der Besitz solcher Schuppen, die Flügel, Beine und den Körper bedecken, ist das namensgebende Merkmal der Lepidoptera – „Schuppenflügler“ (gr. *lepis*, Schuppe). Besonders die auf den Flügeln sitzenden Schuppen sind taxonomisch informativ, d.h. sie erlauben eine recht genaue Zuordnung zu einer bestimmten Gruppe. Damit ist nun der fossile Nachweis erbracht, dass Schmetterlinge 70 MrJ früher existiert haben als bisher bekannt und ca. 50 MrJ vor dem ersten Nachweis von Angiospermen. Die Geschichte von der Co-Evolution von zwittrigen, nektarführenden Blüten und Insekten mit Saugrüssel passt also nicht mehr zum fossilen Befund.

Wie könnte eine neue „Geschichte“ aussehen? Die Forscher mutmaßen, dass der Saugrüssel anfangs als Trinkwerkzeug evolvierte, mit dem Tropfen von pflanzlichem Saft aufgenommen werden könnten (z.B. Bestäubungstropfen von Nadelbäumen, mit denen Pollen aufgefangen werden, oder bei Verletzungen von Pflanzen austretende Flüssigkeit). Es gibt Hinweise auf große Trockenheit in jener Zeit, weshalb der Besitz eines Saugrüssels vorteilhaft war. Der Nutzen war zuerst einseitig nur beim Insekt. Erst später sei der Saugrüssel dann für die Aufnahme von Nektar mit gegenseitigem Nutzen (Bestäubung) verwendet worden.

Diskussion. Die Umwandlung der zuvor beißenden Mundwerkzeuge in ein Saugorgan wird von VAN ELDIJK et al. (2018) als evolutionäre Antwort auf Trockenheit beschrieben. Wie die Umwandlung erfolgte, wird nicht thematisiert. Es ist einfach eine neue Geschichte, die an die Stelle der alten getreten ist. Solche Geschichten sind keine Erklärungen, sie können sich jederzeit durch neue Funde als falsch erweisen. Sie sind vage, gehen nicht in Details und wirken geradezu „undarwinistisch“, weil der Eindruck erweckt wird, dass als Folge veränderter Bedürfnisse (hier Trockenheit) passende Reaktionen zielgerichtet

möglich seien. Das erinnert sehr an LAMARCKs hypothetischen Ansatz, wonach Umweltreize einen direkten Einfluss auf den optimalen und angepassten Gestaltwandel der Organismen ausgeübt haben sollen. Die neue Geschichte ist zudem wenig glaubwürdig, da viele andere Insekten zur gleichen Zeit ohne saugende Werkzeuge auskamen. Warum also sollte sich gerade in der Linie, die die Lepidopteren hervorbrachte, ein Saugrüssel bilden? Das ist völlig unklar, zumal Angebote von Flüssigkeit zum Saugen auch schon vorher vorhanden waren. Sowohl die bisherige als auch die neue Geschichte sind typische Beispiele von „adaptivem Storytelling“. Die bisherige Geschichte ist im Übrigen gar nicht widerlegt, wie behauptet wird. Würde man nämlich in Schichten der Trias Angiospermen finden, würde sie wieder passen. Dafür gibt es sogar Hinweise (HOCHULI & FEIST-BURKHARDT 2013; vgl. KUTZELNIGG 2014), auf die die Autoren selber hinweisen (VAN ELDIJK et al. 2018, 5).

In jedem Fall zeigen die neuen Funde, dass mit umfangreichen fossil nicht überlieferten Lebensräumen gerechnet werden muss, da es eine Lücke von 70 MrJ zwischen den stratigraphisch ältesten und zweitältesten fossilen Nachweisen der Lepidopteren gibt. Auch der große zeitliche Versatz zwischen dem erstmaligen fossilen Auftreten von angiospermenartigem Pollen und dazu passenden Makrofossilien deutet auf fossil nicht überlieferte Lebensräume hin. Die Daten laden darüber hinaus auch dazu ein, über einen prinzipiell anderen Deutungszugang bezüglich der geologischen Überlieferung nachzudenken, der u. a. ohne Evolution und lange Zeiträume als paradigmatischem Rahmen auskommt. Der Autor ist sich bewusst, dass dazu im Rahmen der Schöpfungsforschung bisher nur sehr wenig vorgelegt werden konnte.

[HOCHULI PA & FEIST-BURKHARDT S (2004) A boreal early cradle of Angiosperms. Angiosperm-like pollen from the Middle Triassic of the Barents Sea (Norway). J. Micropalaeontol. 23, 97-104 • KUTZELNIGG H (2014) Sind Blütenpflanzen 100 Millionen Jahre älter als bisher angenommen? Stud. Integr. J. 21, 41-43 • VAN ELDIJK TJB, WAPPLER T et al. (2018) A Triassic-Jurassic window into the evolution of Lepidoptera. Sci. Adv. 2018;4: e1701568] R. Junker



Abb. 1 Das Londoner Exemplar von *Archaeopteryx* mit gut erhaltenen Federn. (Bild: Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, Nachbildung, gemeinfrei)

■ *Archaeopteryx* – definitiv ein aktiver Flieger

Es dürfte kaum eine fossile Art geben, über die so viel und so kontrovers publiziert wurde wie über *Archaeopteryx*, den berühmten „Urvogel“. Bis heute gehen die Meinungen über seine Flugfähigkeit auseinander, insbesondere bezüglich der Frage, ob *Archaeopteryx* aktiv fliegen konnte. Einerseits spricht der Besitz modern anmutender asymmetrischer Federn dafür, dass *Archaeopteryx* ein aktiver Flieger war, andererseits scheinen einige anatomische Gegebenheiten nicht dazu zu passen, zum Beispiel das Fehlen eines Brustbeinkiels oder die Anatomie des Schultergelenks.

Seit kurzem kann mithilfe einer speziellen Form der Röntgen-Mikrotomographie die Struktur fossiler Knochen auf eine neue Weise untersucht werden, die bisher unzugängli-

che Einsichten in die histologischen Strukturen ermöglichen. Dennis VOETEN und sein Team vom European Synchrotron in Grenoble (ESRF) untersuchten mit dieser Methode drei *Archaeopteryx*-Fossilien und verglichen die virtuellen Querschnitte der Knochen mit der Knochenstruktur anderer fossiler Arten (auch von Flugsauriern) und heute lebender Formen. Es stellte sich heraus, dass ein zuverlässiger Zusammenhang zwischen der Knochenarchitektur und dem Flugstil hergestellt werden kann. Dies wiederum konnte genutzt werden, um die Flugfähigkeit von *Archaeopteryx* einzuschätzen. Dessen Flügelknochen, insbesondere der mittlere Teil der Armknochen, zeigen große Gemeinsamkeiten mit den betreffenden Strukturen bei modernen Vögeln und sind deutlich verschieden von den Knochen landlebender Dinosaurier; so ist die Knochenwand

bei *Archaeopteryx* viel dünner als bei letzteren. Besonders gut vergleichbar sind die Knochenstrukturen mit der Situation bei Fasanen. Die Forscher schließen daraus, dass *Archaeopteryx* ähnlich wie heutige Fasanen gelegentlich aktiv hochflattern konnte, um Hürden zu überwinden oder Feinden auszuweichen. Dagegen waren sie vermutlich keine ausdauernden Flieger.

Andererseits gibt es markante anatomische Unterschiede zu heutigen Vögeln. Hier bleiben für das Verständnis der Art des Fluges bei *Archaeopteryx* Fragen für die Wissenschaftler offen. Sie vermuten, dass *Archaeopteryx* auf eine bislang nicht geklärte Weise mit anderer Haltung und anderer Art des Flügelschlags unterwegs war als heutige Vögel.

Die neuen Befunde reihen sich in die Liste neuerer Untersuchungen ein, die gezeigt haben, dass die geologisch (bzw. genauer stratigraphisch) ältesten Vögel bessere Flieger waren als bisher angenommen (vgl. Literatur am Ende). Je mehr Details aufgeklärt werden können, desto eher scheinen Anzeichen von Primitivität zu verschwinden. Das gilt für die sogenannten Gegenvögel (NAVALÓN et al. 2015), für den „Konfuziusvogel“ (*Confuciusornis*) (FALK et al. 2016) oder auch für die Gattung *Anchiornis* (WANG et al. 2017), die möglicherweise zu Unrecht zu Dinosauriern statt zu den Vögeln gestellt wird (JUNKER 2017). Die Aufklärung der mutmaßlich evolutionären Entstehung des Vogelflugs rückt damit in größere Ferne als bisher. Primitive

Flugvorstufen sind bisher nicht sicher nachweisbar.

[FALK AR, KAYE TG, ZHOU Z & BURNHAM DA (2016) Laser fluorescence illuminates the soft tissue and life habits of the Early Cretaceous bird *Confuciusornis*. PLoS ONE 11(12): e0167284. doi:10.1371/journal.pone.0167284 • JUNKER R (2017) *Anchiornis* – nur „fast ein Vogel“? Stud. Integr. J. 24, 102-104 • 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 • VOETEN DFAE, CUBO J, DE MARGERIE E, RÖPER M, BEYRAND V, BURE S, TAFFOREAU P & SANCHEZ S (2018) Wing bone geometry reveals active flight in *Archaeopteryx*. Nat. Comm. 9:923, doi: 10.1038/s41467-018-03296-8 • WANG X, PITTMAN M, ZHENG X, KAYE TG, FALK AR, HARTMAN SA & XU X (2017) Basal paravian functional anatomy illuminated by high-detail body outline. Nat. Comm. 8:14576, doi: 10.1038/ncomms14576] R. Junker

■ Lebensspuren unter extremen Wüstenbedingungen – auch auf anderen Himmelskörpern?

In den Medien erregen Meldungen mit Hinweisen auf Leben irgendwo im All große Aufmerksamkeit. Die Lektüre offenbart dann, dass die Hinweise auf sehr optimistischen Interpretationen von wenigen Befunden beruhen und somit eher Wunschträumen oder Erwartungshaltungen der Öffentlichkeit entspringen. Hier einige aktuelle Forschungsergebnisse und deren Einordnung und Bewertung.

Gebiete in der Atacama-Wüste im Westen Südamerikas (im Süden Perus und in Chile) zählen zu den trockensten Lebensräumen der Erde. Nach den äußerst seltenen Niederschlägen zeigt sich, dass sich auch hier Leben entfalten kann, wenn die entsprechenden Wüstenregionen für begrenzte Zeit aufblühen. Die meiste Zeit aber stellt diese Region enorme Herausforderungen an jegliche Art von Lebewesen.

Ein umfangreiches internationales Wissenschaftlerteam hat nun untersucht, ob unter den in der Atacama-Wüste vorherrschenden Bedingungen wie extreme Trockenheit, sehr salzige Böden und ausgeprägter Nährstoffmangel mikrobielles Leben dauerhaft möglich ist. Die Forscher sammelten Proben im Jahre 2015

– nach dem letzten nennenswerten Niederschlagsereignis – sowie in den beiden darauffolgenden Jahren (2016 und 2017), in denen keine Niederschläge verzeichnet worden waren. Sie konnten anhand von Proben an verschiedenen geographischen Regionen zeigen, dass sowohl die Biomasse als auch die Vielfalt der Mikroorganismen mit zunehmender Trockenheit abnimmt. Unter den extremen Lebensbedingungen ist es schwierig, Leben überhaupt zuverlässig nachzuweisen. Daher verwendeten die Autoren unterschiedliche Kriterien für den Nachweis von mikrobiellem Leben. Sie konnten vier verschiedene Hinweise auf dauerhaft lebende Mikroben (neben den sehr robusten Sporen, die manche Bakterien bilden) aufzeigen: (a) die physikalisch-chemische Beschaffenheit des Bodens, der durch Pflanzen nach einem der sehr seltenen Regenereignisse nutzbar ist; (b) den Nachweis von Biomolekülen, die auf aktive Zellen hinweisen, wie ATP, Phospholipide, Stoffwechselprodukte und enzymatische Aktivität; (c) messbare Verdopplungsraten von Genomen in Bodenproben und (d) spezifische Zusammensetzung der Mikrobengemeinschaften, abhängig von der Qualität des Bodens und der Tiefe, aus der die Proben genommen wurden.

Aus ihren Befunden leiten die Autoren ein Arbeitsmodell für den Mars ab, obwohl sie davon ausgehen, dass die dort herrschenden Bedingungen noch extremer sind. Sie gehen davon aus, dass, wenn sich je Leben auf dem Mars entwickelt haben sollte, Überreste davon in Nischen unter der Oberfläche zu finden sein könnten. Für die Erde wissen wir, dass es hier Lebewesen gibt, die uns immer wieder mit erstaunlichen Eigenschaften überraschen. Belege dafür, dass es auf dem Mars jemals Leben gegeben hat, fehlen allerdings bisher!

Über die Möglichkeiten außerirdischen Lebens wird nicht nur im Zusammenhang mit dem vergleichsweise erdnahen Planeten Mars spekuliert, auch andere Himmelskörper werden unter astrobiologischen Fragestellungen ins Blickfeld genommen. In einer NASA-Mission

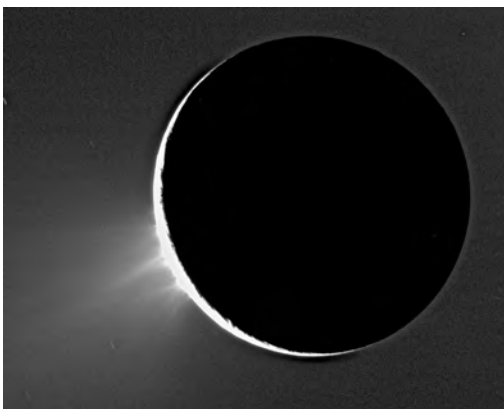


Abb. 1 Enceladus, ein großer Saturnmond, ist ein Eismond. Die Aufnahme lässt die vulkanische Aktivität erkennen. Die Fontänen bestehen aus Wassereis. Hinweise auf flüssiges Wasser nähren Spekulationen über günstige Bedingungen zur Lebensentstehung. (Bild: NASA)

(2004–2017) wurden mit der Raumsonde *Cassini* (und *Huygens*) Saturn und seine Monde untersucht. Im Rahmen dieser Mission wurden am Südpol des Saturnmondes Enceladus Wasserdampf-Fahnen dokumentiert. Diese Befunde führten bereits 2008 zu Spekulationen über Leben auf diesem Mond (McKAY et al. 2008). Weitere Daten wurden als Hinweise auf hydrothermale Prozesse interpretiert, die unter der Eisdecke dieses Himmelskörpers ablaufen könnten. In jüngeren Publikationen werden neben Wasser auch Methan (CH_4), Kohlenstoffdioxid (CO_2), Ammoniak (NH_3), molekularer Stickstoff (N_2) und Wasserstoff (H_2) nachgewiesen (WAITE et al. 2017) und damit die Vermutung hydrothormaler Vorgänge auf Enceladus erhärtet.

TAUBNER et al. (2018) haben jetzt unter der Annahme, dass zwischen dem als steinern angenommenen Kern und der vereisten Oberfläche des Saturnmondes in flüssigem Wasser geochemische Prozesse bei gemäßigten Temperaturen ($< 100^\circ\text{C}$) ablaufen, die Idee geprüft, ob ein Teil des Methans biologischen Ursprungs sein könnte. Sie konnten im Labor unter simulierten Enceladus-Bedingungen zeigen, dass Methan produzierende Archaeobakterien unter den dort angenommenen Drücken CO_2 in CH_4 umwandeln. Damit könnte, so schlussfolgern die Autoren, ein Teil des nachgewiesenen CH_4 biologischen Ursprungs sein und damit auf Leben hinweisen.

Auch dieser indirekte Hinweis, dass es auf Enceladus möglicherweise Lebewesen geben könnte, ist stark von der Überzeugung geprägt, dass biologische Systeme auch an anderen Orten im Universum unter geeigneten Bedingungen zu erwarten sind, ohne Absicht und entsprechende Steuerung. Für diese Überzeugung gibt es jedoch keinen Anlass und bisher liegt auch kein empirischer Beleg für extraterrestrisches Leben vor.

[McKAY CP, PORCO CC, ALTHEIDE T, DAVIS WL & KRAL TA (2008) The possible origin and persistence of life on Enceladus and detection of biomarkers in the plume. *Astrobiology* 8, 909–919 • SCHULZE-MAKUCH et al. (2018) Transitory microbial habitat in the hyperarid Atacama desert. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*; doi: 10.1073/pnas.1714341115 • TAUBNER R-S, PAPPENREITER P, ZWICKER J, SMRZKA D, PRUCKNER C, KOLAR P, BERNACCHI S, SEIFERT AH, KRAJE

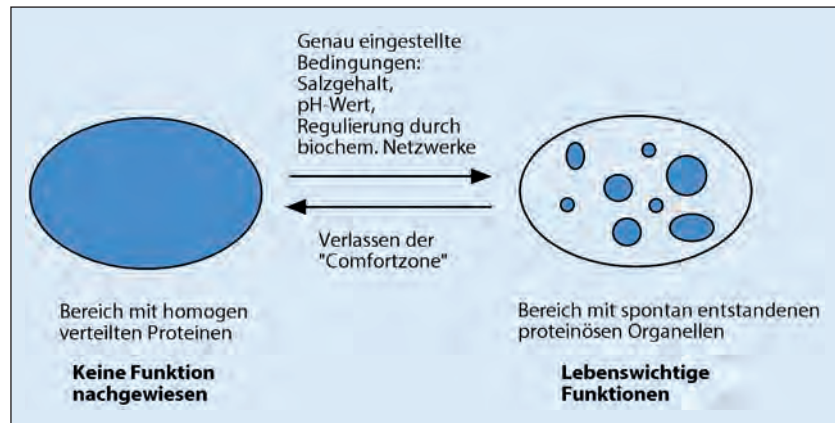


Abb. 1 Schematische Darstellung der Bildung membranloser Organellen.

A, BACH W, PECKMANN J, PAULIK C, FIRNEIS M, SCHLEPER C & RITTMANN SK-MR (2018) Biological methane production under putative Enceladus-like conditions. *Nat. Comm.* 9, 748; doi: 10.1038/s41467-018-02876-y • WAITE JH et al. (2017) Cassini finds molecular hydrogen in the Enceladus plume: evidence for hydrothermal processes. *Science* 356, 155–159.] H. Binder

■ Jetzt siehst du mich, jetzt nicht mehr – rätselhafte Organellen ohne Membran

Das Phänomen Leben ist auf allen erforschten Ebenen überaus komplex. Selbst die kleinste Einheit des Lebens, die Zelle, besteht aus einer Vielzahl an eng verwobenen und aufeinander angewiesenen Organellen. Als Organellen (kleine Organe) werden zelluläre Untereinheiten bezeichnet, die verschiedene Aufgaben im Haushalt der Zelle übernehmen. In tierischen Zellen sind z.B. Mitochondrien für die Energieversorgung zuständig, Peroxisomen für den Abbau giftiger Nebenprodukte des Sauerstoffs und Lysosomen für den Abbau einer Vielzahl an natürlichen Stoffgruppen, die entweder von außen in die Zelle gelangen oder innerhalb der Zelle erzeugt werden (Nukleinsäuren, Proteine, Fette etc.). In pflanzlichen Zellen sind Chloroplasten für die Energiespeicherung durch Photosynthese unverzichtbar. Alle bisher genannten Organellen haben ungeachtet ihrer hochgradig unterschiedlichen Funktionen eines gemeinsam: Sie weisen alle nach außen eine Abgrenzung auf – eine Membran. Es sind zwar auch einige Organellen ohne Membran bekannt, wie die als

„Proteinfabriken“ bezeichneten Ribosomen, doch weisen auch sie eine wohldefinierte, feste Form auf. Eine weitere Gemeinsamkeit aller bisher bekannten Organellen ist die relativ komplexe Zusammensetzung aus vielen verschiedenen Molekültypen.

Anders sieht es dagegen bei einem vor wenigen Jahren entdeckten Typ von Organellen aus, den proteinösen membranlosen Organellen („proteinaceous membrane-less organelles“, PMLO, UVERSKY 2017). Im Unterschied zu den meisten bisher bekannten zellulären Funktionseinheiten zeichnen sich die PMLO nicht nur durch das Fehlen einer Membran aus, sondern sie sind häufig flüssig. Sie werden als kleine Tröpfchen beschrieben, die sich beim Auftreffen auf Hindernisse stark und umkehrbar verformen können. PMLOs können darüber hinaus Wasser aufnehmen und miteinander fusionieren. Wie es der Begriff „proteinös“ schon andeutet, bestehen die PMLOs hauptsächlich aus Proteinen, wobei sie in einigen Fällen auch Nukleinsäuren enthalten. Von besonderem Interesse ist hierbei die Art der Proteine, die für PMLOs konstitutiv sind: Es handelt sich ausschließlich um intrinsisch unstrukturierte Proteine (IUP); das sind Proteine ohne feste 3D-Struktur, die sich aber häufig durch Multifunktionalität auszeichnen (SCHMIDTGALL 2018). Neben der auffällig selektiven Zusammensetzung der PMLOs sind auch andere Eigenschaften erstaunlich. PMLOs stellen eine bisher ungeahnte Verdichtung biologischer Makromoleküle dar. Im Vergleich zum ohnehin sehr dichten zellulären Milieu (je nach Kompartiment

80-400 g/l Gesamtkonzentration) beträgt die gesamte Konzentration der Makromoleküle innerhalb der PMLOs das 10-300-fache.

Die reversible Entstehung dieser äußerst dichten Tröpfchen geschieht allerdings nur unter ganz präzise eingestellten Bedingungen und einer exakten Kontrolle durch Phasentrennung – vergleichbar der Trennung von Öl und Wasser. Diesen Vorgang beschreibt UVERSKY in einem kürzlich erschienenen Übersichtsartikel mit folgenden Worten: „Typischerweise ist ein solcher Vorgang komplett umkehrbar, hochgradig kontrolliert und in hohem Maße von den Bedingungen abhängig, d.h. dass die Phasentrennung nicht geschieht, solange die spezifischen Bedingungen dafür nicht eingestellt sind. Hingegen führt ein Verlassen der Komfortzone zu einem kompletten Verschwinden der kondensierten Phase. [...] ein ‚jetzt siehst du mich, jetzt nicht mehr‘-Phänomen.“

Zu den Faktoren, von denen die beschriebenen Phasenübergänge abhängig sind, zählen nicht nur physikalische Parameter wie der pH-Wert, die Salz- und Makromolekülkonzentration und die Temperatur, sondern auch biochemische Eigenschaften der beteiligten Proteine wie Aminosäuresequenz und die Anzahl an Phosphorylgruppen (PO_3^{2-}), die erst nach der Translation (Übersetzung der mRNA in Proteine) eingefügt werden.

Ungeachtet ihrer hohen Empfindlichkeit sind PLMO zahlreich und gelten als überaus wichtige Organellen, die in vielen verschiedenen Formen vorkommen und spezifische Funktionen ausüben, die in hohem Maße mit den jeweiligen Prozessen korrelieren. Zu den wenigen bisher bekannten Funktionen gehören die Stressantwort, der Transport von RNA-Molekülen innerhalb des Zellkerns, das Spleißen von mRNA-Molekülen, die Regulierung der Genexpression und die Reaktion auf Schäden an der DNA.

Zusammenfassend kann also konstatiert werden, dass ein neuer Typ von zellulärer Funktionseinheit entdeckt worden ist, der trotz seiner außergewöhnlichen Spezifität und Empfindlichkeit gegenüber einer Vielzahl an Parametern sehr wichtige Funktionen ausübt. Im Hinblick auf evolutionstheoretische Modelle stellt sich die Frage, wie solche empfindlichen Zellbestandteile auf Mutationen reagieren und wie ein derart fein abgestimmtes System durch ein zukunftsblindes Zusammenspiel von Zufall und Notwendigkeit („trial and error“) zustande gekommen sein kann. Bisher deuten jedenfalls einige Befunde darauf hin, dass Mutationen, die die konstitutiven Proteine von PMLO betreffen, zum Verklumpen der dichten, flüssigen Kügelchen führen können. Dies wäre nicht überraschend, da IUP schon öfter im

Zusammenhang mit schweren Erkrankungen gebracht worden sind, die aus Protein-Verklumpungen resultieren (z.B. neurodegenerative Erkrankungen). Auch der Umstand, dass die PMLO einer intensiven Regulierung durch die biochemischen Netzwerke der Zelle bedürfen, spricht gegen die Möglichkeit einer schrittweisen, ungerichteten Entwicklung der rätselhaften proteinösen Organellen. Es erstaunt jedenfalls nicht, wenn UVERSKY (2017) im Hinblick auf die PMLO von „einer Magie der biologischen flüssig-flüssig-Phasenübergänge“ spricht.

[SCHMIDTGALL B (2018) Intrinsisch unstrukturierte Proteine. Stud. Integr. J. 25, 84-91 • UVERSKY VN (2017) Intrinsically disordered proteins in overcrowded milieu: membrane-less organelles, phase-separation and intrinsic disorder. Curr. Opin. Struct. Biol. 44, 18-30.] B. Schmidtgall

■ Fledermäuse mit „Long Life“-Garantie

Eines der rätselhaften Phänomene des Lebens ist das Altern. Die Hoffnung ist, dass durch ein Verständnis der Alterungsprozesse auch Einfluss auf deren Geschwindigkeit genommen werden könnte. Möglichst lange jung zu bleiben, ist ein uralter Traum der Menschheit. Bibelleser kennen die hohen „biblischen“ Alter der Urväter mit dem Altersrekord von 969 Jahren des auch sprichwörtlich genutzten Methusalem. Könnten solche hohen Alter realistisch sein oder sind sie eine biologische Unmöglichkeit?

Von überraschender Seite wurden zu dieser Frage kürzlich hochinteressante Befunde publiziert. Eine Forschergruppe (FOLEY et al. 2018) berichtete über Untersuchungen des Alterns bei verschiedenen Arten von Fledermäusen und fand dabei heraus, dass der Vorgang des Alterns beim Großen Mausohr (*Myotis myotis*, Abb. 1) sehr viel langsamer als bei anderen Fledermausarten verläuft. Bekanntlich gibt es bei Säugetieren einen ungefähren Zusammenhang zwischen Körpergewicht und Lebenserwartung. Je geringer das Körpergewicht, desto geringer das Lebensalter. So haben Mäuse eine Lebenserwartung von wenigen Jahren, Hunde werden bis zu ca. 15 Jahre



Abb. 1 Großes Mausohr (*Myotis myotis*) im Quartier in einer Brücke. (Foto: MissMhisi, CC BY-SA 4.0)



Abb. 1 Stahlkopfforelle, auch als Regenbogenforelle bezeichnet. (National Digital Library of the United States Fish and Wildlife Service, gemeinfrei)

alt, große Säugetiere ca. 50 Jahre. Der Mensch fällt somit deutlich aus dem Rahmen. Aber im Vergleich zum Körpergewicht ist das noch nichts gegen das Große Mausohr. Obwohl es nur wenige Gramm schwer wird und entsprechend nur wenige Lebensjahre zu erwarten hätte, erreichen die Tiere oft ein Lebensalter von 35 Jahren, ungefähr zehnmal so viel, wie aufgrund ihres Gewichts zu erwarten wäre.

Was ermöglicht diesen enormen Ausreißer? Schon lange wird ein Zusammenhang zwischen dem Altern und der Länge der Endstücke der Chromosomen, der Telomere, vermutet. Bei jeder Zellteilung werden die Telomere verkürzt, bis schließlich keine Zellteilungen mehr möglich sind. Allerdings verzögert die Tätigkeit des Enzyms Telomerase die Verkürzung, indem es die Telomere in beschränktem Maße wiederherstellen kann, was jedoch mit zunehmendem Alter nachlässt. Entsprechend können Mutationen der Telomerase zu vorzeitigem Altern führen. Beim berühmten Klon-Schaf Dolly waren die Telomere schon bei

der Geburt verkürzt. Die geringe Lebensspanne und der früh einsetzende Altersprozess von Dolly dürften damit zusammenhängen und dieser Befund wird auch als Stütze für die Telomer-Hypothese des Alterns angesehen.

Die Verhältnisse bei den Fledermäusen erwiesen sich allerdings als komplizierter. Zwar konnte ein Zusammenhang mit dem Ausbleiben der Telomerverkürzung bestätigt werden, doch die Ursachen dafür sind vielfältig und bestehen nicht nur in der Tätigkeit der Telomerase. Vielmehr erwiesen sich 21 andere Gene als bedeutsam, die an der DNA-Reparatur und an der Wartung der Telomere beteiligt sind. Diese Gene sind spezifisch bei *Myotis myotis* aktiv. Die Aktivität zweier Gene, ATM und SETX, ist besonders wichtig. Offenbar spielen also neben Telomerschutzprogrammen auch besondere Vorgänge in der DNA-Reparatur bei der erheblichen Verzögerung der Alterung eine Rolle.

Weshalb gerade das Große Mausohr der normalen Alterung entkommt, ist nicht bekannt. Jedenfalls

zeigt dieses Beispiel, dass es bezüglich des Alterns sehr weit reichende Ausreißer geben kann. Vor diesem Hintergrund scheint auch ein sehr viel größeres individuelles Alter von Menschen nicht im Widerspruch zu biologischen Sachverhalten zu stehen. [FOOLEY NM, HUGHES GM et al. (2018) Growing old, yet staying young: The role of telomeres in bats' exceptional longevity. *Sci. Adv.* 2018;4: eaao0926] R. Junker

■ Vom Salzwasser- zum Süßwasserfisch?

In Nordamerika von Alaska bis Kalifornien beheimatete Stahlkopfforellen (*Oncorhynchus mykiss*, Abb. 1) leben normalerweise sowohl in Süßwasser als auch zeitweise in Salzwasser und können ihre Osmoregulation entsprechend umschalten. Eine Population hat sich binnen 100 Jahren auf das Leben ausschließlich im Süßwasser spezialisiert. Die damit einhergehenden Änderungen des Erbguts erfolgten in kurzer Zeit, was nur auf der Basis einer ursprünglich großen Variationsbreite möglich war.

Die Fische schlüpfen in Süßwasser, verbleiben 1-2 Jahre dort, wandern dann über Flüsse in den pazifischen Ozean und verbringen dort 1-3 Jahre, um zur Laichzeit ins Süßwasser zurückzukehren.

Die Erfordernisse bezüglich der Osmoregulation (Gleichgewicht zwischen Salzen und Ionen innerhalb der Zellmembranen) sind im Süß- und Salzwasser gegensätzlich. Im Süßwasser müssen die Fische in der Lage sein, aktiv Ionen aus ihrer Umwelt aufzunehmen, um so den Salzverlust durch passive Diffusion auszugleichen, während im Salzwasser Ionen abgegeben werden müssen, um die Salzaufnahme durch ihren Körper auszugleichen. Fische, die in beiden Medien leben, benötigen also beide Mechanismen zur Aufrechterhaltung der erforderlichen Salzkonzentration in den Zellen und können zwischen ihnen umschalten. Darüber hinaus unterscheidet sich der Lebensraum im Süßwasser von der Salzwasserumgebung auch in der Wassertemperatur, in der Art der Strömung und in der Zusammensetzung der sonstigen Fauna.

Vor 120 Jahren wurden einige Stahlkopfforellen im Lake Michigan ausgesetzt. Nach anfänglichen Schwierigkeiten konnten die Fische eine stabile Population aufbauen. Für diese Fische war der große See gleichsam ein Ozean-Ersatz; sie wanderten nicht ins Meer, sondern verblieben dauerhaft im Süßwasser. Nun haben Forscher das Genom (komplettes Erbgut) von 264 Exemplaren der Stahlkopfforelle genetisch untersucht und eine Reihe von Unterschieden zwischen den Süßwasserformen und den in den Pazifik wandernden Formen entdeckt (WILLOUGHBY et al. 2018). Dabei zeigte sich, dass zwei veränderte Chromosomenregionen in einer direkten Verbindung mit der Osmoregulation stehen: Die Carboanhydrase (katalysiert die Hydratisierung von Kohlenstoffdioxid zu Kohlensäure und umgekehrt) und ein Transportprotein (SLC 26) sind in einer Weise verändert, dass die Ionenaufnahme aus dem Wasser erleichtert ist. Die oben erwähnte Fähigkeit, die Osmoregulation bei Süß- und Salzwasser umschalten zu

können, ist energetisch kostspielig, sodass der Verlust dieser Fähigkeit bei dauerhafter Existenz im Süßwasser zudem von Vorteil ist (WILLOUGHBY et al. 2018, 8).

Die dritte veränderte Genregion betrifft das Enzym Ceramid-Kinase, das im Zusammenhang mit dem Stoffwechsel bei der Wundheilung der Tiere steht. Die im Süßwasser lebenden Tiere sind vermehrt Verletzungen durch Neunaugen ausgesetzt und Wunden heilen im Süßwasser schlechter; durch die Veränderung wird vermutlich der Heilungsprozess verbessert (WILLOUGHBY et al. 2018, 8).

Wie konnten sich die Gene aber so schnell verändern? Die Forscher fanden heraus, dass die Veränderungen weder auf Hybridisierungen mit anderen Stahlkopfforellen-Populationen noch auf Mutationen zurückgeführt werden konnten. Vielmehr sprechen die Befunde dafür, dass die anfangs überlebenden Individuen bereits die passenden Ausprägungen der relevanten Gene besaßen und daher am ehesten überleben konnten. Die spezialisierten Forellen des Lake Michigan „leben“ also von einer ursprünglichen genetischen Vielseitigkeit ihrer Vorläufer.

Bemerkenswert ist eine weitere Beobachtung: Die Wissenschaftler stellten fest, dass die genetische Vielfalt der Stahlkopfforellen im neuen Lebensraum in allen 29 Chromosomen deutlich niedriger liegt als bei den Populationen, die in den angestammten Gewässern leben, was auf einen Gründer-Effekt zurückgeführt wird. Spezialisierung ist wie in vielen anderen Fällen mit genetischer Verarmung verbunden.

Diskussion. Das Beispiel der Osmoregulation bei den Stahlkopfforellen reiht sich in eine lange Liste von Fällen ein, in denen von einer ursprünglich genetisch vielseitigen (polyvalenten) Ausgangssituation ausgegangen werden muss – soweit diese rekonstruiert werden kann – und in denen eine schnelle Veränderung beobachtet wurde (im Verlauf von Jahren bis Jahrzehnten). Die beobachteten Veränderungen und Spezialisierungen gehen mit Einschränkung der genetischen Vielfalt einher. Die ursprüngliche Vielseitigkeit kann enorm sein; immerhin

ist es keine Kleinigkeit, sowohl im Süßwasser als auch im Salzwasser leben zu können.

Auf der Basis dieser Befunde kann man spekulieren, dass nach einer ursprünglich großen Toleranz bezüglich des Salzgehalts des Wassers bei heute weniger toleranten Arten sozusagen eine eingefrorene Spezialisierung erfolgt ist (verbunden mit genetischer Verarmung). Eine große Toleranzbreite könnte auch bei den umwälzenden Prozessen während der Sintflut eine wichtige Voraussetzung für das Überleben gewesen sein. [WILLOUGHBY JR, HARDER AM, TENNESSEN JA, SCRIBNER KT & CHRISTIE MR (2018) Rapid genetic adaptation to a novel environment despite a genome-wide reduction in genetic diversity. *Mol. Ecol.*, doi:10.1111/mec.14726] R. Junker

■ Das Geheimnis der Verformbarkeit roter Blutzellen

Rote Blutzellen (Erythrozyten) sind bekanntlich verantwortlich für den Transport von Sauerstoff im Blut und für den Rücktransport von Kohlendioxid zu den Lungen. Diese Funktion basiert hauptsächlich auf der chemischen Struktur des roten Blutfarbstoffes Hämoglobin und den besonderen Eigenschaften ihres Zellskeletts. Die Abgabe von Sauerstoff beziehungsweise die Aufnahme von Kohlendioxid erfolgt in Kapillaren der Lungen bzw. des Zielgewebes; die Kapillaren sind die kleinsten Blutgefäße des Organismus. Sie sind etwa 0,5 mm lang und haben einen Durchmesser von 5 bis 10 µm. Der maximale Durchmesser der Erythrozyten beträgt ca. 7,5 µm und an ihren Rändern sind sie ca. 2 µm dick (Abb. 1). Diese frisbeeähnliche Form garantiert eine große Kontaktfläche für den Gasaustausch. Würde man die Oberflächen aller Erythrozyten nebeneinanderlegen, würde man bei einem gesunden Erwachsenen auf eine Fläche von ca. 4000-4500 m² kommen, das entspricht etwa 75 % eines Fußballfeldes. Wie gelangen aber die 7,5 µm „dicken“ Blutzellen durch die teilweise nur 5 µm großen Kapillaren, ohne zu zerplatzen bzw. die Kapillaren zu verstopfen?

Elektronenmikroskopisch konnte bislang an toten Erythrozyten gezeigt werden, dass ihre Membran (äußere Hülle) und ihr Zellskelett hochflexibel und sehr robust sind. Diese Untersuchungen beantworteten aber nicht alle Fragen. Eine neue innovative Mikroskopietechnik mit einer örtlichen Auflösung von 25 nm (nm = Millionstel Millimeter) (STORM – Stochastic Optical Reconstruction Microscopy) erlaubte es dem Team um L. PAN von der University of California in Berkeley, die Ultrastruktur des Zellskeletts lebender Blutzellen zu entschlüsseln. Dabei wiesen sie in den Membranen der Erythrozyten ein netzförmig aufgebautes Protein nach, das Spektrin, welches aus zu Dreiecken verknüpften, elastischen Molekülketten mit einer Kantenlänge von 80 nm besteht (Abb. 1b und c). Vergleichbare netzförmige Proteinverbände wurden bereits in den Zellwänden von neuronalen Zellen (Zellen, die zum Nervensystem gehören) gefunden; dort zeigen die einzelnen Molekülketten eine Kantenlänge von 180–190 nm. Dieser Unterschied erklärt sich daraus, dass die Molekülketten bei Letzteren durch andere Zellbestandteile (Mikrotubuli, Neurofilamente) unter ständiger Spannung gehalten werden, die in den Erythrozyten fehlen, weshalb dort die Molekülketten entspannt bzw. relaxiert vorliegen. Das ist funktionell höchst sinnvoll. Die in den Erythrozyten angeordneten entspannten Molekülketten lassen eine Dehnung bis auf 190 nm zu und bilden damit ein hochflexibles federndes Maschenwerk. Daraus erklärt sich einerseits die hohe Verformbarkeit und Elastizität und andererseits die Robustheit der Erythrozyten, wenn sie durch die Kapillaren „gequetscht“ werden. Überrascht wurde die Forschergruppe durch den Befund, dass innerhalb des hochelastischen Netzwerkes große Lücken klaffen. Diese stellen keine Defekte und keine Fehlkonstruktion dar, sondern erlauben den Erythrozyten eine sehr schnelle Formänderung – so die Interpretation der Forscher. Die Löcher wirken hier wie Beugpunkte und garantieren ein noch größeres Potenzial für eine kurzfristige erforderliche

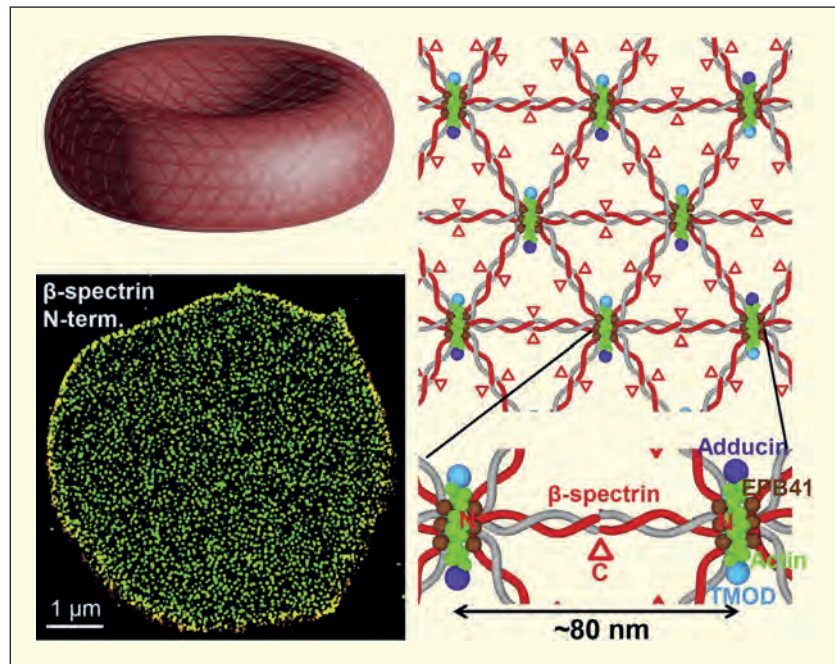


Abb. 1 Oben links: Erythrozyt (rotes Blutkörperchen) mit seiner typischen frisbeeähnlichen Form, Durchmesser 7,5 µm, Dicke am Rand 2 µm. Unten links: Darstellung der für die Elastizität verantwortlichen Proteine (Spektrin) in der Membran von Erythrozyten (grüne Punkte), einzelne schwarze Lücken in dem Proteinteppich sind keine Defekte, sondern dienen einer schnellen Formänderung. Rechts: Schema der Anordnung der Proteinketten des Spektrins als Netzwerk, entspannt haben die einzelnen Knotenpunkte einen Abstand von 80 nm, unter Spannung kann der Abstand der Knotenpunkte bis auf 180–190 nm vergrößert werden. (Aus PAN et al. 2018, Abdruck mit freundlicher Genehmigung)

Verformbarkeit in den Kapillaren. Diese Erkenntnisse sind auch für die medizinische Erforschung der Malaria von größtem Interesse, da bekannt ist, dass die Malaria-Erreger mit dem Zellskelett der roten Blutkörperchen interagieren. Blutzellen, die ihre Flexibilität und damit die Funktionalität des oben beschriebenen elastischen Netzwerkes der Zellmembran aufgrund von Veränderungen der chemischen Struktur des Hämoglobins verloren haben (sogenannte Sichelzellen), sind bekanntlich resistent gegenüber den Malariaerregern.

Diskussion. Der von der Arbeitsgruppe um L. PAN beschriebene Merkmalskomplex ist ein herausforderndes Design-Merkmal. Das elastische maschenartige Netzwerk ist nicht genetisch codiert (nur dessen Eiweißbausteine), aber höchst präzise in die physiologischen Wechselwirkungen sowie anatomischen Gegebenheiten eingepasst, und das über mehrere hierarchische Stufen, von der molekularen Ebene im Nanometerbereich bis zur Organebene. Ein evolutionärer Mechanismus, der unabhängig von Veränderungen

der genetischen Grundlagen kreativ agiert und, wie hier gezeigt, die beste stereochemische Konfiguration von Proteinen in Korrelation zu den lokal erforderlichen funktionellen Anforderungen ermöglicht, ist unbekannt. Rote Blutzellen sind Abkömmlinge von Stammzellen der Blutbildung, in denen ein riesiges Potential an Entwicklungsprogrammen angelegt ist (z.B. für die bekannte Vielzahl weißer Blutzellen oder für Thrombozyten). Diese Entwicklungsprogramme werden unter dem Einfluss hochkomplexer biochemischer Steuermechanismen aktiviert oder unterdrückt. Die evolutionäre Ableitung roter Blutkörperchen und des speziell hier beschriebenen elastischen Netzwerkes innerhalb der Zellmembranen ist ohne koordinierte und korrelierende Veränderungen des ursprünglichen Blutbildungssystems undenkbar und deshalb auf der Basis bisher diskutierter Evolutionsmechanismen nicht einmal in Ansätzen zu verstehen.

PAN L, YAN R, LI W & KU K (2018) Super-Resolution Microscopy Reveals the Native Ultrastructure of the Erythrocyte Cytoskeleton. *Cell Reports* 22, 1151–1158.]
H. Ullrich

