

Reinhard Junker

extra

 rigatio

Schöpfung oder Evolution

Was lernen wir
aus Wissenschaft und Bibel?

Online-Zusätze



rigatio

rigatio.com

Reinhard Junker

Schöpfung oder Evolution

Was lernen wir aus Wissenschaft und Bibel?

Zusatzmaterial

ONLINE-ZUSÄTZE



ONLINE-Zusatz 1

Weitere Infos über die empirische Methode der Naturwissenschaft

Naturwissenschaftler ...

- untersuchen *Aufbau* und *Verhalten* von Naturgegenständen wie Sterne, Steine und Steinböcke.
- arbeiten empirisch, d. h. erfahrungsbasiert, mittels Beobachtungen im Freiland oder gezielt experimentell im Labor.
- führen Experimente durch, um eine Hypothese zu testen.
- sammeln zielorientiert Indizien („Daten“), um die beste Erklärung für einen Sachverhalt zu finden.
- wollen herausfinden, welche Vorgänge auf welche Weise gesetzmäßig funktionieren. Solche Gesetzmäßigkeiten kann man in „Wenn-dann“-Sätzen formulieren: Immer *wenn* X (X = Gesetze und Randbedingungen) gegeben ist, *dann* folgt das Resultat Y. Sehr gut belegte Gesetzmäßigkeiten werden auch als Naturgesetze bezeichnet. (Naturgesetze fußen auf ausnahmslos bestätigenden Beobachtungen. Ob sie unumstößlich immer gelten oder gegolten haben, kann der Naturwissenschaftler nicht beantworten.)
- Einen Sachverhalt naturwissenschaftlich zu erklären bedeutet: Diesen Sachverhalt auf Gesetzmäßigkeiten (Naturgesetze) zurückzuführen. (Warum fällt ein bestimmter Stein zu Boden? Weil es das Gravitationsgesetz gibt und weil ich ihn loslasse.)
- Woher diese Gesetzmäßigkeiten bzw. Naturgesetze kommen, ist nicht mehr Gegenstand der Naturwissenschaft. Naturwissenschaftler *finden* Naturgesetze, *erklären* sie aber nicht.

Aufgrund des Gesagten gibt es prinzipielle Grenzen der Naturwissenschaft:

- Der Ursprung der Naturgesetze und ihr Gültigkeitsbereich **können nicht ermittelt werden.**

- Geistige (willentliche, kreative) Verursachung (Schöpfung) ist kein Gegenstand der Naturwissenschaft (z. B. die Entstehung eines Kunstwerks, einer Maschine oder eines Computerprogramms). Naturwissenschaftler können aber *Merkmale* kreativ gestalteter Gegenstände untersuchen und anhand dieser Merkmale auf Schöpfung oder Gestaltung schließen.
- Die einmalige Geschichte (Ursprungsfragen) kann durch Naturwissenschaft nur indirekt erschlossen werden. Hier sind keine regelhaften Wenn-dann-Aussagen möglich. Das gilt für „Schöpfung“ prinzipiell (da kreativ durch Handlung verursacht), aber auch für Evolution als Ganzes (da in der Vergangenheit liegend). Die Rolle der Naturwissenschaft in Ursprungsfragen ist das Erforschen relevanter Indizien.

Fazit

In Ursprungsfragen (Schöpfung oder Evolution) liegt der Vorgang, der ermittelt werden soll, in der Vergangenheit und kann *nicht direkt* empirisch (naturwissenschaftlich) untersucht werden.

Er kann nur anhand von Indizien erschlossen werden.

Naturwissenschaftliche Forschung liefert dafür viele Indizien.

Bei der Deutung (Interpretation) dieser Indizien ist Ergebnisoffenheit (Schöpfung / natürliche Evolution) unverzichtbar.

„Schöpfung“ ist genauso wie „Evolution“ eine grundsätzlich mögliche Erklärung für die vorliegenden Indizien.



ONLINE-Zusatz 2

Sachinfos: Zahnräder bei den Larven der Käferzikade *Issus coleoptratus*

Zahnräder sind bereits in einfacher Form seit der Antike bekannt. Damals wurden Holzstücke von außen in Radreifen aus Holz gesteckt. Sogenannte „Göpel“ bildeten einfache Kraftübertragungs-Getriebe. Diese wurden z. B. im Mittelalter bei Mahlwerkzeugen angewandt und besaßen oft einen „Pferdeantrieb“. Leonardo da Vinci experimentierte im 15. Jhd. mit Zahnrädern und entwickelte entsprechende Getriebe, die seiner Zeit weit voraus waren. Zahnräder sind eine ideale Form der Kraftübertragung bei sich drehenden Wellen. Unterschiedliche Durchmesser ermöglichen bei komplexeren Getrieben unterschiedliche Drehzahlen. Zahnräder und deren Weiterentwicklungen finden sich in unzähligen Anwendungsbereichen. Besonders hochwertig sind mechanische Uhrwerke als Meisterwerke der Zahnradtechnik. Das Entscheidende beim Zahnrad ist die Kraftübertragung möglichst ohne Spiel. Dazu müssen die einzelnen Zähne eine spezielle abgerundete Form aufweisen, um den Kraftschluss permanent aufrecht zu erhalten. Die abgerundete Form verhindert außerdem, dass sich die ineinander greifenden Zähne verklemmen. Dadurch werden Abrieb und Materialermüdung minimiert.

Die einfache Form der Zahnrad-Funktion, die Synchronisation von Bewegungen wurde im Jahr 2013 bei der Käferzikaden-Larve *Issus coleoptratus* in Form zweier Zahnkränze nachgewiesen – damit ist diese Mechanik nachweislich keine Erst-Erfindung des Menschen. Der Deutsche Klaus Sander hatte zwar bereits in den 1950er Jahren zahnradähnliche Strukturen bei Zikaden-Larven entdeckt, doch wurde erst durch die Beobachtungen und Hochgeschwindigkeits-Zeitlupenaufnahmen von Malcolm Burrows von der University of Cambridge und Gregory Sutton von der University of Bristol die genaue Funktion sichtbar gemacht und nachgewiesen. Die „Zahnräder“ sitzen an den Innenschenkeln der Zikaden-Larve und synchronisieren beim Absprung die Bewegung der Beine. Erstaunlicherweise handelt es sich um nahezu perfekt abgerundete „moderne“ Zahnräder. Sowohl die Zahnenden als auch deren Basis weisen statisch optimierte Abrundungen auf. Unklar bleibt, wie sich ein solcher Mechanismus inklusive der für den Funktionserhalt notwendigen Optimierungen im Laufe einer Evolutionsgeschichte ergeben haben sollen. Unklar bleibt auch, warum nur Jungtiere diesen Mechanismus aufweisen. Es wird vermutet, dass bei erwachsenen Exemplaren

das Risiko für einen Totalausfall des Systems zu hoch wäre, wenn ein Zahn bricht. Sie koordinieren die Sprungbewegung über Nerven-Impulse. „Zahn“-Brüche könnten bei heranwachsenden Zikaden durch weitere Häutungen repariert werden, vermuten die Forscher. Nicht nur die Zahnräder sind ausgeklügelt konstruiert, sondern – wie es scheint – auch der Zeitraum ihrer Nutzung im Laufe der individuellen Entwicklung.

Quelle: Burrows M & Sutton G (2013) Interacting gears synchronize propulsive leg movements in a jumping insect. Science 341, 1254–1256.



ONLINE-Zusatz 3

Der Bau der Vogelfeder als weiteres Beispiel für funktionale Komplexität



Foto von Mathew Schwartz auf Unsplash

Vogelfedern und Vogelflug

Was eine Evolutionshypothese erklären müsste



Im Rahmen evolutionsbiologischer Ansätze wird die Entstehung von Vogelfedern und Vogelflug nach wie vor kontrovers diskutiert. Den Grund dafür bringen PROCTOR & LYNCH (1993, 88) so auf den Punkt: „Federn sind ein bisschen zu perfekt – das ist das Problem.“ Diese Perfektion zeigt sich nicht nur in den Einzelteilen der Vogelfeder, sondern in den komplexen Wechselbeziehungen der Teile des gesamten Flugapparats – für evolutionäre Hypothesen eine harte Nuss.

Reinhard Junker

Einleitung

Die Entstehung der Vogelfeder und des Vogelzugs gehört zu den prominentesten Themen der Ursprungsforschung in der Biologie (PRUM & BRUSH 2003). Im Rahmen evolutionsbiologischer Ansätze ist die Entstehungsweise bis heute umstritten. Die Mehrheit der Forscher sieht die hypothetische evolutionäre Entstehung der Feder nicht im Kontext der Entstehung des Fluges. Vielmehr sollen Federn ursprünglich andere Aufgaben gehabt haben (Wärmedämmung, Balz u. a.) und erst später zusätzlich für den Flug verwendet worden sein. Nur wenige Forscher sind der Auffassung, dass Federn von Beginn an für den Flug evolviert seien.

Sowohl neuere Befunde aus der Embryologie und Entwicklungsgenetik als auch zahlreiche neue Funde von Dinosauriern mit faserigen oder fiederigen Körperbedeckungen haben in

den letzten etwa 20 Jahren die Datenbasis für Modellierungen der Entstehung von Vogelfedern und Vogelflug erheblich erweitert. Theoretische Szenarien zur Entstehung von Federn und Flug können daher einem sehr viel umfangreicheren und detaillierteren „Faktencheck“ unterworfen werden. Ob damit auch mehr Klarheit über die Entstehung dieser hervorstechendsten Merkmale der Vögel erreicht wurde, soll in diesem Artikel und nachfolgenden Beiträgen untersucht werden. In vielen Fachartikeln und noch mehr in populären Darstellungen wird einerseits häufig der Eindruck erweckt, als sei mit den zahlreichen Funden „befiederter“ Dinosaurier der evolutive Weg zur Vogelfeder und zum Vogelflug in Grundzügen geklärt. Andererseits hat in den letzten Jahren auch die Anzahl der unterschiedlichen Modelle zur Entstehung des Vogelzugs zugenommen – ein ziemlich sicheres Symptom dafür, dass diese Frage nicht beantwortet ist.

Hinweis zu den Anmerkungen:

Die Anmerkungen enthalten Belegzitate und weitere Informationen; sie können als Zusatzmaterial zum Artikel unter www.si-journal.de/jg23/heft2/feder-und-flug.pdf heruntergeladen werden.

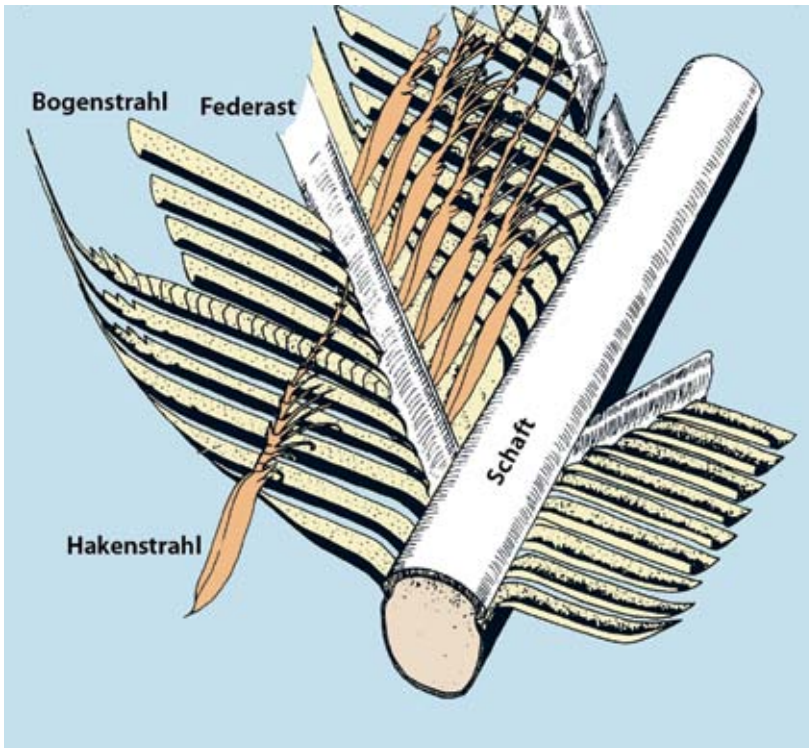


Abb. 1 Schaft, Federäste, Haken- und Bogenstrahlen. (AUS JUNKER & SCHERER 2013)

Wenn aufgeklärt werden soll, auf welchem Weg Vogelfeder und Vogelflug entstanden sein könnten, dann müssen das Erklärungsziel und die Anforderungen an eine gültige Erklärung klar beschrieben sein. Das heißt: Grundlegende Voraussetzungen hinsichtlich der strukturellen Anforderungen an Federn, einschließlich ihrer Verankerung im Körper, ihrer Beweglichkeit und Steuerung, ihrer Ontogenese, aber auch an das gesamte Federkleid und die Anatomie des Tieres als notwendige Bedingungen für die Flugtauglichkeit von Federn bzw. die Flugfähigkeit des Vogels allgemein müssen definiert und beachtet werden. Im Folgenden werden dazu einige Punkte detailliert betrachtet.

Kompakt

Vogelfedern sind die komplexesten Integumentstrukturen (Körperbedeckung) des Tierreichs und erfüllen vielfältige Funktionen. In diesem Beitrag steht ihre Funktion als Teil des Flugapparats im Fokus. Bei aller Perfektion ermöglichen Federn alleine jedoch bei weitem nicht die Flugfähigkeit. Neben geeignetem Federmaterial und detailliertem Feinbau ist auch eine passende Verankerung der Federn in der Haut unabdingbar, ebenso ein komplexes Geflecht von Federmuskulatur und Sinnesorganen für die Bewegung der Federn. Außerdem muss insgesamt ein funktionsfähiges Federkleid ausgebildet sein, vielfältige Steuerungsmechanismen und Koordination der Bewegungen sind erforderlich, eine entsprechende Gehirnorganisation und anderes mehr. Entscheidend für die Funktionsfähigkeit von Federn sind auch Struktur und Komplexität des Follikels, insbesondere in der ontogenetischen Entwicklung und bei der Mauser. Da Federn durch verschiedene äußere Einflüsse abgenutzt werden, muss ihr Austausch in der Mauser geregelt sein – ebenfalls ein komplizierter Vorgang. Schließlich muss eine beständige Gefiederpflege mit den dafür erforderlichen Pflegemitteln und Verhaltensweisen garantiert sein.

Aus diesen Gründen weisen viele Forscher auf den Aspekt der Synorganisation bei Federn hin. Die einzelnen Module und Ebenen (Baumaterial bis Verhalten) können nicht isoliert voneinander verstanden werden und auch nicht isoliert entstanden sein. In Summe haben wir mit dem Federkleid eine Gesamtorganisation vor uns, die bezüglich der Flugfähigkeit nichtreduzierbar komplex erscheint und ein klares Design-Indiz darstellt.

Aufbau, Material, Pflege

Federn erfüllen gleichzeitig mehrere Funktionen, vor allem ermöglichen sie im Zusammenwirken mit vielen anderen morphologischen und verhaltensbiologischen Voraussetzungen die Flugfähigkeit, dienen aber auch der Thermoregulation, dem Tastsinn, der Brutpflege, dem physikalischen Schutz und der Wasserabstoßung und besitzen Signalfunktion (z. B. hinsichtlich Balz, Territorialverhalten). „Mehr als 20 Funktionen werden von Federn maßgeblich oder teilweise bestritten“ (KÄMPFE 2003, 42). Dafür müssen der Aufbau und das Material besondere Anforderungen erfüllen. Federn sind sehr filigrane Gebilde und trotz ihrer Leichtigkeit höchst robust und flexibel (PRUM & BRUSH 2003, 34). Der Leichtbau ist unverzichtbar für die Flugfähigkeit. Der Federschaft ist dementsprechend im ausgewachsenen Zustand hohl und die Federproteine (beta-Keratine, eine bedeutende Klasse der Strukturproteine) ermöglichen ein geringes Gewicht. Die Federkeratine sind faserig und bilden untereinander feste Strukturen (PRUM & BRUSH 2003).

Jede Feder besteht aus über 1 Million Haken- und Bogenstrahlen (BERGMAN 2003, 34; vgl. Abb. 1–3). Ohne Haken an den Hakenstrahlen (wie zum Beispiel beim Vogel Strauß) sind die Federn nicht flugtauglich. Die Verhakung der Hakenstrahlen mit den gegenüberliegenden Bogenstrahlen kann bei Bedarf (z. B. bei mechanischer Beanspruchung) gelöst und in einer Art Reißverschlussverfahren wieder verknüpft werden. Aufgrund des Verhakungsmechanismus verhalten sich Schwungfedern trotz feiner Untergliederung der Federfahne wie eine geschlossene Tragfläche und sind erstaunlicherweise kaum luftdurchlässig. Eventuelle Risse können aufgrund dieses Bauprinzips mit Hilfe des Schnabels schnell repariert und die Geschlossenheit der Fläche wiederhergestellt werden.¹ „Nur durch diese Eigenschaft ist eine Feder als Element eines effizienten Flugapparats überhaupt tragbar“ (PETERS 1994, 404). „Gegenüber einer tatsächlichen Festfläche hat die Technologie einer Federfahne einen beträchtlichen Vorteil. Sie besitzt sozusagen vorgefertigte Trennlinien, an denen sie bei Extrembelastungen oder beim Anstoßen an irgendwelche Hindernisse aufreißen kann. Durch diesen Effekt des ‚eingebauten Nachgebens‘ wird verhindert, daß sich die Feder bei jeder akuten Überbelastung selbst zerstört“ (NACHTIGALL 1985, 38).

Das Bogen-Hakenstrahlen-System als strukturelle Voraussetzung würde allerdings noch nicht eine dauerhafte Flugtauglichkeit der Feder garantieren. Es sind auch Instandhaltung, Wartung und Pflege durch eine Art Schmieröl erforderlich, damit die Gelenke an den Bogen- und Hakenstrahlen intakt bleiben, Unebenheiten geglättet

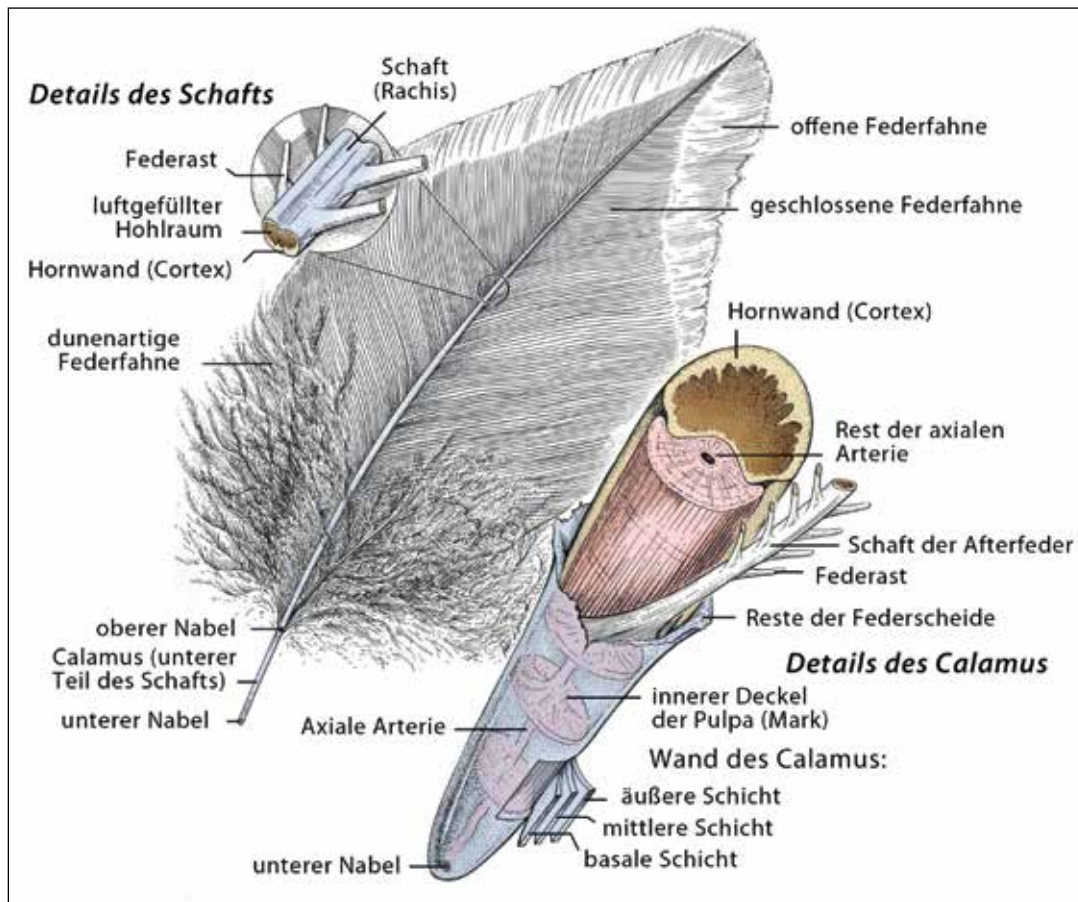


Abb. 2 Aufbau einer Konturfeder. (Nach PROCTOR & LYNCH 1993 bzw. LUCAS & STETTENHEIM 1972)

werden und somit die Funktionalität der Federn erhalten bleibt. Das Gefiederfett entnehmen die Vögel aus der im Bereich des Steißes befindlichen Bürzeldrüse. Mit Hilfe des Schnabels verteilen die Vögel das Fett, was gleichzeitig der Imprägnierung dient und die Federn geschmeidig erhält. Für die Gefiederpflege benötigen Vögel viel Zeit², denn Federn müssen ständig einzeln von Schmutz und Parasiten gereinigt werden, damit sie in gutem Zustand bleiben und gegen Bakterien und Pilze geschützt sind.³

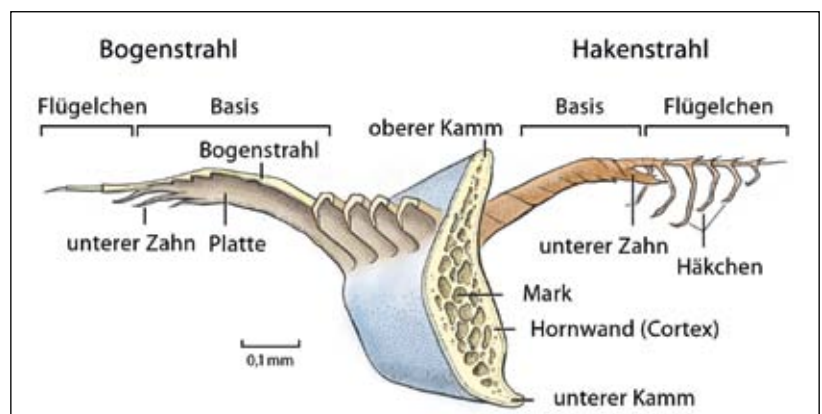
Bei flugunfähig gewordenen Vögeln gehen die Asymmetrie und der Verhakungsmechanismus der Federn schnell verloren.

Mikrostruktur. LINGHAM-SOLIAR & MURUGAN (2013) und LINGHAM-SOLIAR (2014) haben die Mikrostruktur von Federn detailliert untersucht und ein komplexes, verschachteltes System von überkreuzten Keratinfasern mit einem Durchmesser von 100–800 nm in der Proteinmatrix im Federschaft und in den Federästen entdeckt. Die Fasern sind in verschiedenen Lagen des Epicortex (seitliche Wände des Schafts) gegenständig angeordnet, und sie bilden eine ununterbrochene strukturelle Verbindung zwischen dem Cortex der Rachis und der Federstrahlen. Die seitlichen Wände, von denen die Federstrahlen (Bogen-

und Hakenstrahlen) ausgehen, sind sehr viel dünner als die Ober- und Unterseite. Dieses ausgeklügelte System im Bau und in der Anordnung der Keratinfasern ermöglicht die paradoxen, aber unabdingbaren mechanischen Qualitäten von Federn: Starrheit und Festigkeit einerseits und Leichtigkeit, Biegsamkeit und Elastizität andererseits.⁴ Die Fasern des beta-Keratin kombinieren Bruchsicherheit, Steifheit, Dehnbarkeit und Stauchbarkeit, Drehbarkeit und Reißfestigkeit (LINGHAM-SOLIAR 2014, 329).

Federform. Eine weitere notwendige Voraussetzung für die Flugtauglichkeit von Federn ist ihre äußere Form (Umriss). Um Auftrieb zu ermöglichen, muss die Luft oberhalb der Oberfläche der Feder schneller strömen als unterhalb (Bernoulli-Effekt). Dies wird dadurch erreicht, dass die Außenfahne, die gegen die Luftströmung steht, schmaler und steifer ist als die Innenfahne.⁵

Abb. 3 Details eines Federastes. (Nach PROCTOR & LYNCH 1993 bzw. LUCAS & STETTENHEIM 1972)



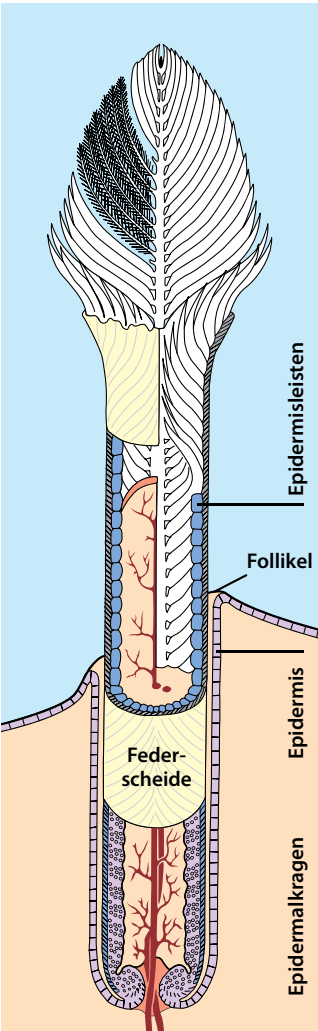


Abb. 4 Schema einer fortgeschrittenen Federanlage, teilweise aufgeschnitten (nach PETERS 2001). Der Follikel entsteht durch Einsenkung einer Papille in die Haut. Dabei vermehren sich Zellen in einem Ring um die Federanlage herum. Vom Epidermalkragen werden Zellen nach oben abgegeben, die zu Teilen der Feder werden. Die Feder entwickelt sich zunächst als Zylinder in der anfänglich noch geschlossenen Federscheide. Der Epidermalkragen teilt sich beim Hochwachsen gleich in Säulen, aus denen später die Federäste werden. Die Federentwicklung verläuft fast komplett anders als die Entwicklung von Reptilschuppen. (Aus JUNKER & SCHERER 2013)

Nur asymmetrische Federn sind flugtauglich. Bei flugunfähig gewordenen Vögeln gehen die Asymmetrie und der Verhakungsmechanismus der Federn schnell verloren.

Beweglichkeit und Steuerung

Zur Funktionalität der Federn gehört auch ihre Beweglichkeit. Sie wird dadurch ermöglicht, dass Federn in die Körperoberfläche eingesenkt sind (Abb. 4, 8). An einer eingesenkten Tasche, dem Federfollikel, setzt ein komplexes Geflecht von Muskeln und elastischen Sehnen an (Abb. 5, 6). Dabei sind mehrere benachbarte Follikel (und damit die Federspulen, Calami, die eingesenkten Teile der Federn) miteinander verbunden (BOCK 2000a, 479).⁶ KÄMPFE (2003, 41f.) beschreibt diese Muskeln wie folgt: „Zur Beweglichkeit der Federn heften sich am Federfollikel glatte Muskeln an und verbinden benachbarte Follikel. Die Faserzüge kreuzen sich und bilden Netzwerke. Hinzu treten quergestreifte Hautmuskeln. Dabei ist interessant, dass die Hebermuskeln der Feder weniger kräftig sind als die Depressormuskeln. Letztere werden nicht nur als Antagonisten der Heber, sondern vor allem zum Stabilisieren bei Luftströmungen benötigt. Ein gut entwickelter Fettkörper in den Vertiefungen der Körperoberfläche wirkt bei der Bewegung der Federn wie ein hydraulisches Kissen und trägt zur optimalen Federbewegung und -stellung bei.“ Durch dieses Geflecht von kräftigen Muskelsträhnen können die Einzelfedern aufgerichtet, gedreht und wieder niedergezogen werden (BURCKHARDT et al. 1979, 13). Bei Konturfedern (nicht bei Daunenfedern) ist somit ein komplexes hydraulisches skeleto-muskuläres System mit Fettkörper ausgebildet (HOMBERGER & DE SILVA 2000, 560). PETERS (2001, 397) beschreibt dieses System so: „Die Follikel der Konturfedern heutiger Vögel sind durch ein sinnvolles System glatter Muskeln verbunden. Die Bewegungen der Federn ergeben sich aus einem komplexen Zusammenwirken dieser Muskeln mit einem Hydroskelett aus elastischen Faszien und inkompressiblen Fettpolstern.“ Jeder Federfollikel ist „von 2-6 solcher glatten Muskeln gehalten, wobei jeder Muskel jeweils in mehreren Bündeln zwischen 2 Federfollikeln liegt und mit diesen Follikeln verbunden ist“ (BURCKHARDT et al. 1979, 13).

Lediglich den Fadenfedern fehlt die Muskulatur (MADERSON et al. 2000, 705).⁷ Deren Rezeptoren informieren den Vogel über die Stellung der Federn (BOSSERT 2000). „Die Federn sitzen normalerweise sehr fest in ihren Follikeln, sowohl in der Wachstumsphase als auch nachher: Die Federfollikel werden durch die Federmuskeln und ihre elastischen Sehnen zusammengezogen ...“ (BURCKHARDT et al. 1979, 13).

Muskeln benötigen Innervierung und Energiezufuhr über das Blut; die Steuerung der Muskeln bedarf auch der Information über die Stellung der Federn; dafür sorgen besondere Tastsinnesorgane: „Zu seiner Steuerung ist die nervliche Ausstattung des befiederten Integumentes optimal: An den Muskeln und Federbälgen sitzen zahlreiche Sensoren: Tastkörperchen sind besonders zahlreich. Sie registrieren vor allem die Bewegungen der Konturfedern (Abb. 7). Die Erregungsmuster werden in Rückenmark und Kleinhirn verarbeitet“ (KÄMPFE 2003, 42). HOMBERGER & DE SILVA (2000, 564) sprechen von einem Feedbackmechanismus durch ein kompliziertes Nerven-Netzwerk mit Tastrezeptoren und Innervation für die Bewegung.⁸

Federkleid

Flugtaugliche Federn mit den beschriebenen Bewegungs- und Steuermöglichkeiten würden aber noch keine Flugfähigkeit ermöglichen. Die Federn müssen auch sinnvoll auf der Körperoberfläche verteilt sein. Dementsprechend sind Federn nicht wahllos auf der Körperoberfläche angeordnet.

Befiederte Bezirke der Körperoberfläche werden als Federfluren bezeichnet, die unbefiederten als Federraine (Abb. 9); die Federn stehen relativ weit auseinander (MARTIN 2008, 46⁹). Neben den an den Follikeln ansetzenden Muskeln sind auch Muskelbezirke aus willkürlich beherrschten Hautmuskeln zur Bewegung der Federfluren notwendig. Weitere Hautmuskeln dienen als Spanner der Flughäute, als Spreizmuskeln der Flügelschwingen und als Aufrichter der Schwanzfedern (BURCKHARDT et al. 1979).¹⁰

Ontogenese

Federn wachsen ganz anders als Reptilschuppen. Schuppen bilden sich aus Hautfalten, Federn dagegen erheben sich aus einer röhrenförmigen Hauteinsenkung (PRUM & BRUSH 2003, 35). Nur die ersten Stadien der Schuppen- bzw. Federontogenese – die Bildung einer Papille (Aufwölbung der Haut; Abb. 8) – sind vergleichbar. Die Federanlagen bilden sich bereits etwa ab dem 5. Lebenstag im Ei.

Die Papille wächst zu einem Zapfen aus, um den sich in der Folge ein tiefes Ringfeld bildet, wodurch der Zapfen eingesenkt wird – der Follikel (bzw. Federbalg) entsteht. In der weiteren Folge stellt sich der Zapfen schräg. Die Epidermis im Zapfen differenziert sich in die Federscheide (äußere Malpighische Schicht, sie fungiert als verhornende Schutzschicht) und in die Federanlage (innere dreiteilige Schicht). Der innere Teil des Zapfens – die Pulpa (das Mark) aus Hautgewebe – versorgt die wachsende Feder mit Nährstoffen und wird später hohl.

Nun bilden sich die Rachis und die Federfahne sowie ggf. die Federstrahlen in einem komplizierten Prozess. „Die Wachstumsmuster folgen ... einer besonders komplizierten Choreografie“ (PRUM & BRUSH 2003, 35); „eine komplexe Abfolge von Ereignissen vermittelt der Feder ihren Charakter als entweder weiche Daunenfeder oder als Flugfeder mit einer steifen Fahne“ (PROCTOR & LYNCH 1993, 86). Die Federn wachsen von der Basis her; im dort befindlichen Epidermalkragen (Bildungszone) teilen sich Keratinzellen und schieben ältere Zellen nach oben, die zu Teilen der Feder werden. Die am weitesten differenzierten Teile der wachsenden Feder befinden sich also oben. Die Feder entwickelt sich zunächst als Zylinder in der anfänglich noch geschlossenen Federscheide. Der Epidermalkragen teilt sich beim Hochwachsen gleich in Säulen (innerer Ring), aus denen später die Federäste werden. Bei den Konturfedern entsteht der Schaft dadurch, dass „die unteren Säulenenden an einer Seite der Röhre eine nach der anderen miteinander verschmelzen. Gleichzeitig schieben sich an einer Stelle der Gegenseite von unten neue Säulen nach. Sie drücken dabei die schon vorhandenen Säulen schräg zur Seite, sodass sich diese spiralg um die Röhre legen“

„Federwachstum ähnelt mehr der Art, wie ein Bildhauer eine Statue aus einem Marmorblock herausmeißelt.“

(PRUM & BRUSH 2003, 36). Schließlich reißt die schützende Federscheide oben auf und entlässt die Feder.

Steve HUNTER beschreibt den Vorgang der Federbildung durch ein interessantes Bild: „Federwachstum ähnelt mehr der Art, wie ein Bildhauer eine Statue aus einem Marmorblock herausmeißelt – die Statue von David war schon im Felsen, Michelangelo entfernte lediglich alles, was nicht David war. In ähnlicher Weise startet eine Feder nicht als Schaft, aus dem Zweige sprießen, sie beginnt vielmehr als sich verjüngender Zylinder, und Zelltod formt die Strukturen.“¹¹

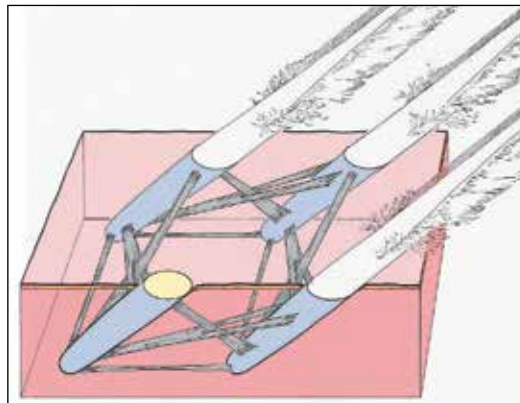
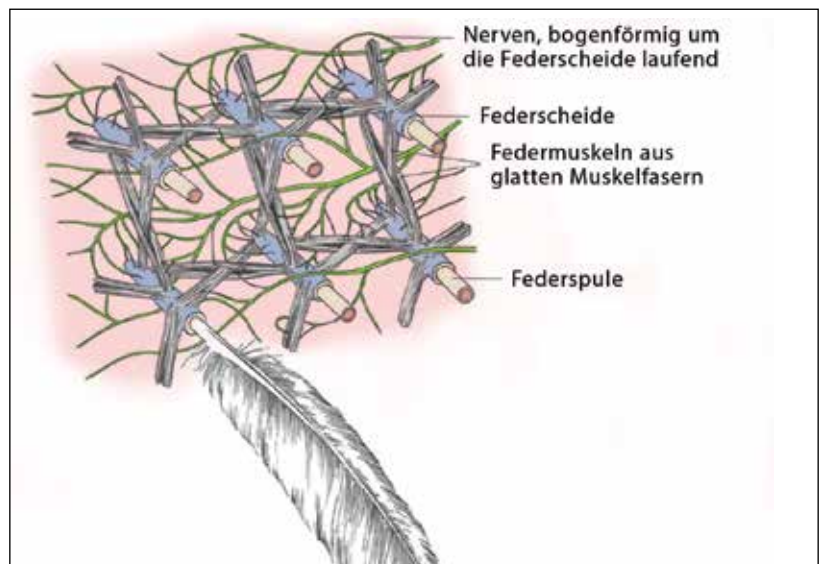


Abb. 5 Quervernetzte Muskulatur setzt an den Follikeln an. (Aus PETERS 2001; in Anlehnung an OSBORNE 1968)



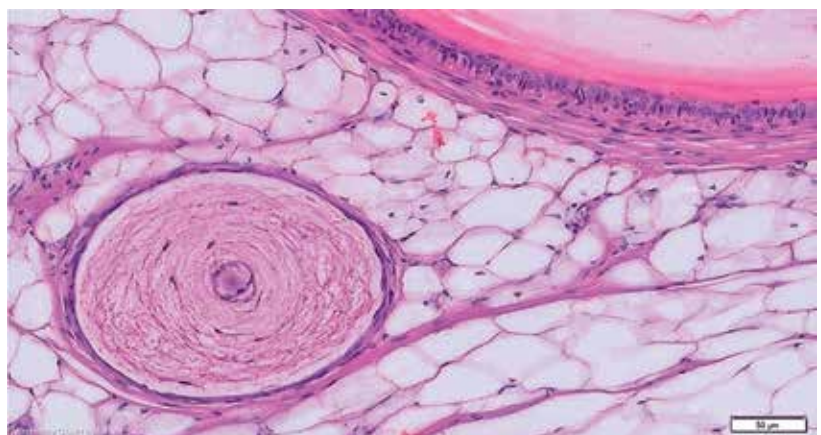
LIN et al. (2006) unterscheiden bei der ontogenetischen Federbildung fünf Prozesse, in denen allesamt komplexe molekulare Vorgänge beteiligt sind: Bildung der Makrostrukturen, Bildung der Feinstrukturen, Formbildung innerhalb der Einbuchtung, Formbildung des Follikels, Regeneration.¹²

Abb. 6 Muskel- und Fasergeflecht im Bereich der Follikel. (Aus BURCKHARDT et al. 1979)

Mauser

Federn nutzen sich im Laufe eines Jahres ab und müssen daher regelmäßig erneuert werden; diesen Vorgang nennt man Mauser. Die alten Federn fallen aus den Follikeln heraus, und es wachsen aus den gleichen Follikeln neue Fe-

Abb. 7 Herbst'sches Körperchen, Tastsinnesorgan im Bereich der Follikel. (www.histology-of-birds.com)



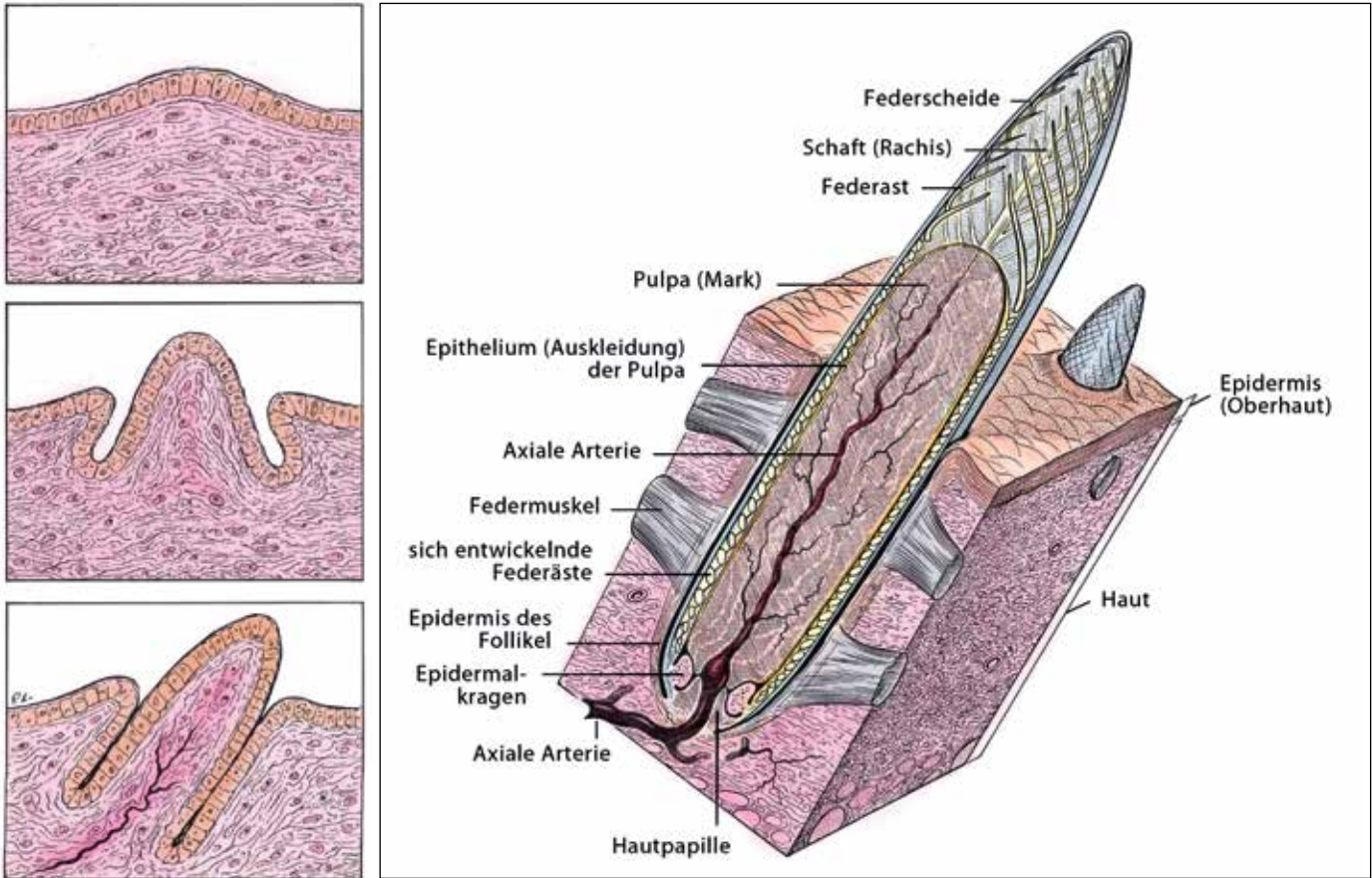


Abb. 8 Vier ontogenetische Stadien der Federentwicklung. Näheres im Text. (Aus PROCTOR & LYNCH 1993)

dern nach. Die Bildungszone wird dabei wieder aktiv. Die Mauser erfordert einen periodischen Wachstumsstillstand und eine Desorganisation des Epidermalkragens (Wachstumszone, vgl. Abb. 8), anschließend die Reorganisation des Kragens und Wiederaufnahme des Wachstums der neuen Feder (PRUM 1999, 301).¹³ Es ist offensichtlich, dass dieser Vorgang hohe Programmierkunst erfordert. Wann die Mauser erstmals entstand, ist unbekannt (PRUM 1999, 301).¹⁴

Nicht nur der Ersatz der einzelnen Federn erfolgt koordiniert, sondern auch die Abfolge des Austausches der Federn: „Wenn sich Vögel mausern, ersetzen sie ihre Flugfedern gewöhnlich nach einem festgelegten Schema, das von Art zu Art variiert. Die meisten wechseln ihre Arm- und Handschwingen beiderseits in Paaren, um während der Mauser flugfähig zu bleiben. Viele Wasservögel jedoch mausern alle Handschwingen gleichzeitig und sind dann für einige Wochen flugunfähig“ (KAMPHUIS 2008, 29).

plexe Federstruktur (PRUM & BRUSH 2002, 265; vgl. STETTENHEIM 2000, 471).¹⁵ Dabei hat der Follikel besondere Bedeutung. Er ist ein komplexes Organ, dessen Aufbau die Bildung und das Wachstum der Federn ermöglicht. Die Positionierung des Follikels und die Regulation der Entwicklung innerhalb des Follikels werden durch eine komplexe Abfolge von Induktionen und Kommunikation zwischen Haut und Epidermis festgelegt. Mit wenigen Ausnahmen werden alle Follikel, die die Federn im Laufe des Lebens eines Vogels hervorbringen, während der ersten 12 Lebenstage noch im Ei angelegt (PRUM 1999, 293).¹⁶ Dabei entwickeln sich die verschiedensten Federtypen aus derselben Grundstruktur des Follikels; dieses Organell kann somit sehr vielseitige Strukturen hervorbringen (PRUM 1999, 301).¹⁷ Obwohl also der Aufbau der Follikel (abgesehen von ihrer Größe) sehr einheitlich ist, kann daraus eine enorme Vielfalt von Federtypen hervorgehen.

Federn als neuartige Gebilde

Der Vergleich der Ontogenesen von Reptilschuppen und Vogelfedern lässt heute kaum einen Zweifel daran zu, dass Federn neuartige Gebilde sind – im Rahmen des Evolutionsparadigmas wird von einer evolutionären Neuheit gesprochen. Genauer gesagt kommen mehrere Neuheiten zusammen: der Follikel, die röhrenförmige Federanlage und die kom-

Synorganisation

Führende Wissenschaftler weisen darauf hin, dass Federn nicht als isolierte Strukturen betrachtet werden dürfen, sondern als Teil eines komplexen Organs, des Integuments (BOCK 2000, 479).¹⁸ Überlegungen zur Federevolution müssen daher auch die Verankerung der Federn in der Körperoberfläche und ihre Steuerung berücksichtigen (HOMBERGER & DE SILVA 2000, 554).¹⁹ Die

Körperhülle besteht in federtragenden Bezirken aus drei Schichten: einem hydraulischen skeleto-muskulären Apparat der Federn, einem System von Muskeln in der Unterhaut und einem hydraulischen System aus Fettgewebe (HOMBERGER & DE SILVA 2000, 556).²⁰ Die Haut- und Unterhautmuskeln bilden ein integriertes Muskelsystem, in welchem jeder Muskel eine spezifische Rolle spielt, um die korrekte Position und Anordnung der Federfluren auf der Oberfläche des sich bewegenden Körpers sicherzustellen, was notwendig für die einwandfreie Funktionsweise des hydraulischen skeleto-muskulären Apparats der Federn ist (HOMBERGER & DE SILVA 2000, 560).²¹

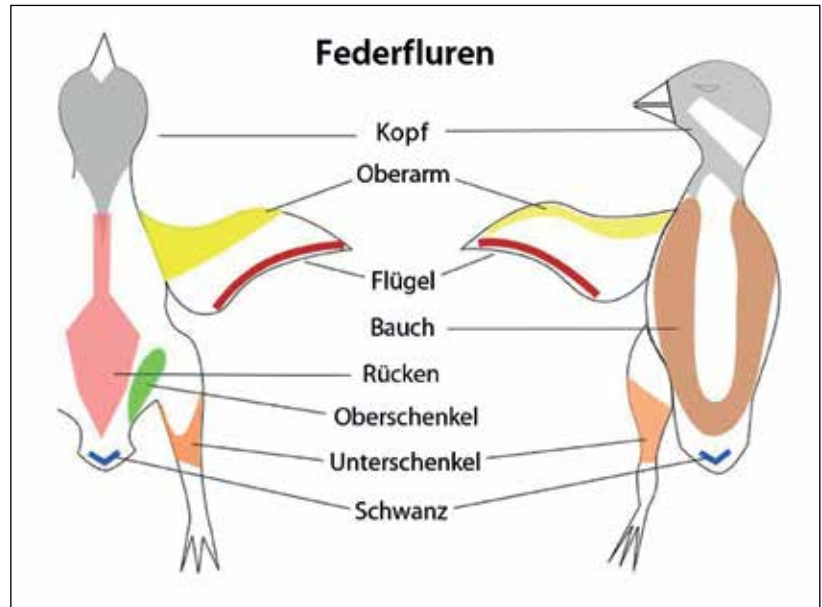
Den Aspekt der Synorganisation stellt auch BOCK (2000, 479) heraus: „Federn existieren nicht als isolierte Strukturen auf der Oberfläche des Vogelkörpers, sondern sind zusammen mit anderen Strukturen miteinander verbunden, um das Federkleid zu bilden. Das Gefieder bildet zusammen mit der Haut, einschließlich einer Fettschicht, Haut- und Unterhautmuskeln, Bändern und Sinnesorganen ... eine vernetzte Folge verschiedener Merkmale – ein Organ.“²²

Aus diesen Gründen ist es nicht realistisch, eine Evolution der Federn unabhängig von der Evolution des Vogelepithels und aller seiner quervernetzten Strukturen zu diskutieren (BOCK 2000, 479).²³ Die Evolution der Vogelfedern sei von größeren damit verbundenen Innovationen ihrer Körperverankerung, Färbung, Anordnung, Betätigung, Wachstum und Mauser begleitet, so STETTENHEIM (2000, 461).²⁴ Struktur und Komplexität des Follikels sind dabei ebenfalls zu

Es ist nicht realistisch, eine Evolution der Federn unabhängig vom Vogelepithel und aller seiner quervernetzten Strukturen zu diskutieren.

berücksichtigen, wie PRUM (1999, 292) bemerkt: „... jede vollständige Theorie über den Ursprung der Federn muss nicht nur die Struktur der Feder selbst erklären, sondern auch die Struktur und Komplexität des Follikels.“ Ähnlich argumentieren MADERSON et al. (2000, 705): „Der Follikel und die Feder evolvierten zusammen, sie entwickeln sich zusammen und der Follikel ist eine genauso wichtige Erfindung wie die Feder.“ Die interstrukturellen Zusammenhänge der Federorganisation bzw. -funktionalität müssen letztlich im Kontext der Gesamtentwicklung des Organismus gedeutet werden: „Darüber hinaus muss die Erklärung der Körperhülle der Vögel und der Federn in einer ähnlich ganzheitlichen Weise im Zusammenhang der Evolution des ganzen Tieres betrachtet werden“ (BOCK 2000, 480).

Die Anordnung der Federn auf der Körperoberfläche bei Vögeln kann selektiv kaum



vorteilhaft sein ohne Steuerung durch ein effektives Kontroll- und Regulationssystem. Ebenso wenig können Federn als individuelle Strukturen evolviert sein, sondern müssen von Anfang an als gesamte Körperbedeckung entstanden sein, da der skeleto-muskuläre Apparat nicht als isolierte Einheit funktionieren kann, so HOMBERGER & DE SILVA (2000, 561). Aus demselben Grund – so diese beiden Autoren – konnten Federn nicht in isolierten Reihen von Flugfedern an den Vorderextremitäten oder am Schwanz von postulierten reptilartigen Vogelvorläufern entstanden sein, wie manchmal angenommen wird.²⁵

Für die Flugfähigkeit sind weiterhin Körperkontrolle und gute Manövrierbarkeit sehr wichtig. Diese Fähigkeiten müssen bereits von Anfang an vorhanden gewesen sein, dazu gehört auch die Landung (CAPLE et al. 1983, 456, 466).²⁶

Die vorstehenden Ausführungen machen deutlich, dass die Strukturen, die als Mindestvoraussetzungen für die Flugfähigkeit erforderlich sind, vielfach und über mehrere Ebenen vernetzt sind. Man kann daher im Falle von Vogelfedern (inklusive ihrer Verankerung und Steuerung) von „nichtreduzierbarer Komplexität“ sprechen.

Synorganisation spielt beim Bau der Feder somit eine wichtige Rolle: „Unser Verständnis der funktionalen Biologie der Feder und ihrer Rolle in der Evolution des Vogelflugs erfordert implizit eine Integration der Befunde über ihre faserige Mikrostruktur und die besser erkennbare grobe Anatomie“ (LINGHAM-SOLIAR & MURUGAN 2013, 2). „Biologische Materialien wie die Feder sind hierarchisch organisiert und detailliert konstruiert, so dass das endgültige Design es schwierig macht, die einzelnen Aspekte ihrer Funktionen vom Ganzen zu trennen. Es ist eine Art Fluidität zwischen den Funktionen und ihren Teilen (Multifunktionalität), die eine größere Anpassungsfähigkeit an verschiedene Stressfaktoren ermöglicht“ (LINGHAM-SOLIAR 2014, 324).

Abb. 9 Federfluren: Befiederte Bereiche der Haut. (Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0)

Zusammenfassung des Erklärungsbedarfs und Fazit

Eine Erklärung der Entstehung der Vogelfeder muss folgende Aspekte berücksichtigen:

- Die Vogelfeder ist eine komplexe Neuheit aus mehreren Innovationen: Follikel (Art des Federwachstums), röhrenförmige Federanlage, Federstruktur mit Haken- und Bogenstrahlen.
- Federmaterial, Federbau, Federkleid, Steuerungssysteme u. a. sind vielfach verschachtelt synorganisiert, wobei ganz verschiedene Ebenen aufeinander abgestimmt sein müssen: vom passenden Baumaterial über die Form von Konturfedern, deren Feinbau, Verankerung, Bewegung, Steuerung, Koordination im Verbund des ganzen Federkleids, der Skelettanatomie bis zum Verhalten und der Gehirnorganisation. Daher ist eine Diskussion zur Evolution der Vogelfeder ohne Berücksichtigung des Integuments unrealistisch (BOCK 2000, 479).
- Die Struktur und Komplexität des Follikels, auch im Zusammenhang mit ihrer ontogenetischen Entwicklung (PRUM 1999, 292);
- die Entstehung der Gefiederpflege mit den dafür erforderlichen Pflegemitteln und Verhaltensweisen;
- die komplexen und koordinierten Vorgänge bei der Mauser, gerade auch in Bezug auf die perfekte zeitliche Koordination mit saisonal bedingten Verhaltensweisen der Vögel (Brutzeit, Migration).

Man kann im Sinne der Evolutionstheorie argumentieren, dass für die Flugfähigkeit nicht alle genannten Fähigkeiten ausgebildet sein müssen. Sofern es dafür aus der rezenten Vogelwelt keine Analogie gibt, wäre das aber spekulativ. Aber selbst wenn dies zugunsten evolutionärer Ansätze zugestanden wird, ändert das nichts daran, dass auch die einzelnen Strukturen hochkomplex sind und nach allem unserem Wissen auch sein müssen, um zu funktionieren. So ist beispielsweise die Mauser ein hochkomplexer, koordinierter Vorgang, der nur in seiner Gesamtheit funktional und selektierbar ist und als nichtreduzierbares Subsystem gelten kann.

Es wird somit deutlich, dass die einzelnen Module und Ebenen (vom Baumaterial bis zum Verhalten) nicht isoliert voneinander verstanden werden und auch nicht isoliert entstanden sein können. In Summe haben wir mit dem Federkleid eine vielfach verschachtelte und vernetzte Gesamtorganisation vor uns, die insgesamt in Bezug auf die Flugfähigkeit nichtreduzierbar komplex erscheint und ein klares Design-Indiz darstellt. Denn nach allem unserem Wissen

wird eine top-down-Organisation benötigt, für welche einerseits natürliche Prozesse weit überfordert sind, die andererseits ein typisches Kennzeichen für Planung ist.

Literatur

- BERGMAN J (2003) The evolution of feathers: a major problem for Darwinism. *TJ* 17, 33–41.
- BOCK WJ (2000) Explanatory history of the origin of feathers. *Amer. Zool.* 40, 478–485.
- BURCKHARDT C, FÖLSCH DW & SCHEIFELE U (1979) Das Gefieder des Huhnes. *Animal Management / Tierhaltung* Volume 9.
- CAPLE G, BALDA RP & WILLIS WR (1983) The physics of leaping animals and the evolution of preflight. *Am. Nat.* 121, 455–476.
- HOMBERGER DG & DE SILVA KN (2000) Functional micro-anatomy of the feather-bearing integument: implications for the evolution of birds and avian flight. *Amer. Zool.* 40, 553–574.
- JUNKER R & SCHERER S (Hg, 2013) *Evolution – ein kritisches Lehrbuch*. Gießen, 7. Aufl.
- KÄMPFE L (2003) Federentstehung und Vogelflug – neue evolutionsbiologische Gesichtspunkte. *Praxis Nat. – Biol. in der Schule* 6, 40–46.
- KAMPHUIS A (2008) *Vögel: Die große Bild-Enzyklopädie*. München.
- LIN CM, JIANG TX, WIDELITZ RB & CHUONG CM (2006) Molecular signaling in feather morphogenesis. *Curr. Opin. Cell Biol.* 18, 730–741.
- LINGHAM-SOLIAR T (2014) Feather structure, biomechanics and biomimetics: the incredible lightness of being. *J. Ornithol.* 155, 323–336.
- LINGHAM-SOLIAR T & MURUGAN N (2013) A new helical crossed-fibre structure of β -keratin in flight feathers and its biomechanical implications. *PLoS ONE* 8(6): e65849.
- LUCAS AM & STETTENHEIM PR (1972) *Avian anatomy. Integument*. Agriculture Handbook 362, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- MADERSON PFA, HOMBERGER D et al. (2000) Symposium on evolutionary origin of feathers: Panel discussion. *Amer. Zool.* 40, 695–706.
- MARTIN LD (2008) Origins of avian flight – a new perspective. *Oryctos* 7, 45–54.
- NACHTIGALL W (1985) *Warum die Vögel fliegen*. Hamburg – Zürich.
- PETERS DS (1994) Die Entstehung der Vögel. Verändern die jüngsten Fossilfunde das Modell? In: *Morphologie & Evolution. Symposien zum 175jährigen Jubiläum der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft*. Frankfurt/M., S. 403–423.
- PETERS DS (2001) Probleme der frühen Vögel. *Nat. Mus.* 131, 387–401.
- PROCTOR NS & LYNCH PJ (1993) *Manual of ornithology. Avian structure & function*. Yale Univ. Press.
- PRUM RO (1999) Development and evolutionary origin of feathers. *J. Exp. Zool.* 285, 291–306.
- PRUM RO & BRUSH AH (2002) The evolutionary origin and diversification of feathers. *Quart. Rev. Biol.* 77, 261–295.
- PRUM RO & BRUSH AH (2003) Zuerst kam die Feder. *Spektr. Wiss.* 10/03, 32–41.
- STETTENHEIM PR (2000) The integumentary morphology of modern birds – an overview. *Amer. Zool.* 40, 461–477.

Anschrift des Verfassers:

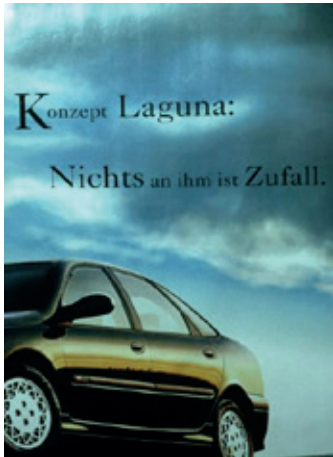
Reinhard Junker, Rosenbergweg 29,

72270 Baiersbronn; E-mail: sg@wort-und-wissen.de



ONLINE-Zusatz 4

„Nichts an ihm ist Zufall“



Der Werbespruch zeigt sehr schön, worauf es ankommt, damit ein funktionierendes, zweckmäßiges Gebilde entstehen kann. Der Zufall muss weitgehend ausgeschaltet werden. Das geht natürlich nur mit Planung und zielorientierter Vorgehensweise, Fehlerkontrolle, Tests usw. – Dinge, die bei natürlichen Prozessen **nicht** wirksam sind.

Und: **Erst wenn alles einwandfrei funktioniert, kommt das Produkt auf den Markt.** Man kann nichts während der Entwicklungsphase verkaufen. Lebewesen sind dagegen „immer auf dem Markt“, d. h. der Umwelt und Konkurrenten jederzeit ausgesetzt, müssen in jeder Generation überleben, können nicht „wegen Umbau schließen“. Das heißt: Der evolutive Umbau muss bei laufendem Betrieb erfolgen.

Laut Evolution gibt es zum einen keinen Plan und kein Ziel; nur richtungslose Änderungen, zum anderen müssen sich alle Änderungen jederzeit bewähren, während der Aufbau oder Umbau erfolgt. **Beide Aspekte sind sehr grundlegend verschieden von einem planvollen Vorgehen** – sprich zur Entstehung durch einen Schöpfer (oder Urheber oder Konstrukteur): Ein Konstrukteur kann planen, das passende Baumaterial aussuchen, ausprobieren, kann schrittweise gezielt aufbauen, ohne bereits auf dem Markt zu sein, kann Testläufe machen, Fehler ausbessern usw. Und er wird erst dann auf den Markt und sein Produkt anbieten, wenn alles funktioniert und gründlich getestet ist. All das geht bei der Evolution nicht. Da sind die Lebewesen sozusagen immer auf dem Markt, auch während aller evolutionären „Umbauten“ **bei laufendem Betrieb.**



ONLINE-Zusatz 5

Zweites anschauliches Beispiel - neben den Käferzikaden-Zahnrädern (S. 32) - für spielerische Komplexität beim Schlagbaummechanismus des Wiesen-Salbei.

Dem Wanderer sind sie bestens vertraut – sie versperren Unbefugten den motorisierten Zugang in den Wald: Schlagbäume. Ein langes und ein kurzes Ende sind über ein Gelenk mit einem Pfosten verbunden. Das kurze Ende ist mit einem Eisen- oder Betongewicht beschwert, damit das lange Ende trotz der ungünstigen Hebelwirkung durch Bewegung des kurzen Endes in die gewünschte Stellung gebracht werden kann.

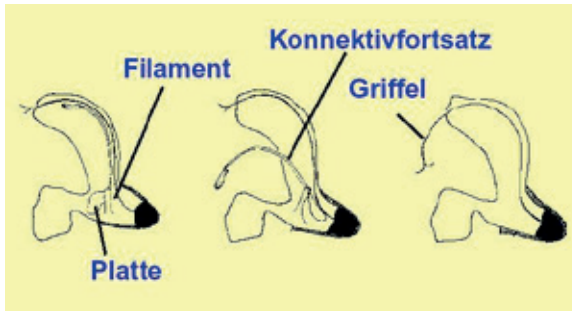


Wiesen-Salbei .

1) Blüten mit ausgeprägt helmförmiger Blütenoberlippe.



2) Merkwürdige „Innereien“ der Salbei-Blüte.



3) Schematischer Längsschnitt durch die Salbei-Blüte. Links: junge Blüte; Mitte: die Platte ist nach hinten gedrückt, das Konnektiv (s. Text) nach unten geschnellt (= das Senken des „Schlagbaumes“); rechts alte Blüte mit herunterhängendem Griffel (vgl. 5).



4) Eine Biene hat den Schlagbaum heruntergedrückt.



5) Der Griffel ist lasch geworden und hängt wie ein Vorhang vor dem Blüteneingang.



6) Mit einem Grashalm kann man den Schlagbaummechanismus in der Salbei-Blüte auch auslösen.

Der Schlagbaum ist nämlich keine Erfindung eines Försters – allenfalls eine „Wiedererfindung“! In miniaturisierter Form ist nämlich jede Blüte verschiedener Salbei-Arten mit dieser zweckmäßigen Vorrichtung ausgestattet, so z. B. der prächtige Wiesensalbei (Abb. 1), der hier und da Böschungen und Magerwiesen schmückt. Auch der wesentliche seltenere gelbblühende Klebrige Salbei besitzt den Schlagbaum.

Was aber hat es mit dem Schlagbaum in der Blüte auf sich? Schauen wir uns eine Salbei-Blüte im Querschnitt einmal an (Abb. 2 und 3). Die typische Lippenblüte besteht aus Ober- und Unterlippe. Erkennbar sind zwei lange, gebogene Staubblätter, die direkt unter dem „Helm“ der Oberlippe liegen; dahinter befindet sich eingekeilt der Griffel, dessen beiden Narbenspitzen vorne aus der Oberlippe herausschauen.

Die Staubfäden – auf die kommt es jetzt besonders an – sind ganz eigenartig gebaut. Die Filamente (die Stiele, an denen die Staubbeutel sitzen), sind nur ganz kurz und ragen nicht einmal über die Blütenröhre hinaus. Der lange, gebogene Stiel unter dem „Helm“ ist ein Teil des sog. Konnektivs, des Verbindungsstücks zwischen den beiden Staubfächern. Dieses *Konnektiv* ist hier extrem in die Länge gewachsen, und zwar nach zwei Seiten: sehr lang nach oben, mit einem intakten Staubbeutel an der Spitze; und wesentlich kürzer nach unten, wo sich der zweite Staubbeutel befinden müsste. An dessen Stelle sitzt jedoch ein zu einer Platte umgewandeltes Organ. Die beiden Auswüchse (der lange mit dem Staubbeutel und der plattenförmige kurze) sind am Staubblatt mit einem Gelenk verbunden. Da haben wir es ja! Alle Bestandteile des Schlagbaums sind somit beisammen (und zwar zweimal, nebeneinander). Fragt sich nur noch, wozu das Ganze eigentlich gut ist und wer den Schlagbaum betätigt.

Nun, jedes Kind weiß, dass Bienen oder Hummeln und Blumen zusammengehören. Sie landen auf der für sie passend gestalteten Blütenunterlippe, die eine regelrechte „Landebahn“ darstellt. Zielsicher steuern die Insekten auf den Blütengrund zu, wo sich Nektar befindet. Doch dabei stoßen sie schnell auf ein Hindernis. Die oben beschriebenen beiden Platten (die übrigens noch verwachsen sind), also die kurzen Enden der Staubblätter, versperren den Weg zum Blütengrund. Doch das ist kein Problem für das Insekt. Die Platte wird nach hinten gedrückt – und was passiert? In dem Moment, wo das Insekt ans Ziel (den Blütenboden) gelangt, schnellen die

langen Staubblattenden mit den Staubbeuteln nach unten (Abb. 3 und 4). Dabei wird der Pollen aus den Fächern regelrecht auf den Rücken des Insekts herausgeklopft. Beim Verlassen der Blüte schnellen die Platten wieder in die ursprüngliche Stellung zurück – und die Staubfächer kommen wieder in ihre ursprüngliche Position unter der Blütenoberlippe. Die Botaniker haben diesen erstaunlichen Vorgang naheliegenderweise als „Schlagbaummechanismus“ bezeichnet. Das Insekt verlässt also mit Pollen eingepudert die Blüte. Kleine Insekten, die auf diese Weise nicht bestäubt werden können, sind zu schwach, um den Hebel zur Seite zu drücken; sie gelangen also nicht zur süßen Nektarquelle. Das Ganze ist auf gegenseitigen Nutzen angelegt.

Die „Geschichte“ ist damit aber noch nicht zu Ende. Der Pollen muss ja nicht nur *abgeholt*, sondern auch wieder an der richtigen Stelle *abgegeben* werden, nämlich auf der Narbe des Griffels einer anderen Pflanze. Wir sahen bereits, dass durch den Schlagbaummechanismus verhindert wird, dass der Pollen den naheliegenden, kürzesten Weg zur Griffelspitze der *eigenen* Blüte nimmt (was Selbstbestäubung mit ungünstigen Inzuchtfolgen zur Folge hätte). Der Pollen kommt erst an, wenn das Insekt eine Blüte besucht, die schön älter ist. Nach einigen Tagen der Blüte wird der Griffel lasch (das Gewebe verliert Wasser) und hängt aus dem „Helm“ heraus (Abb. 3 und 5). Jetzt „versperrt“ er den Zugang zur Blüte und muss gleich einem Vorhang weggeschoben werden. Das tut das Insekt mit seinem Körper, und dabei wird der mitgebrachte Pollen abgestreift – er ist angekommen.

Alles passt zusammen: Der ausgetüftelte Blütenbau und der Körperbau des Insekts; mehr noch: die zeitliche Abfolge stimmt auch: Es ist genau programmiert, *wann* welche Vorgänge ablaufen, z. B. wann der Griffel lasch wird. Wir sehen: die Sache ist durchdacht.

Man muss übrigens nicht Biene oder Hummel sein, um den Schlagbaum in der Blüte betätigen zu können. Ein Grashalm genügt, um mit ihm in der Blüte zu stochern (Abb. 6). Der Blütenboden ist durch die Platte so effektiv versperrt, dass das Hineinstochern fast immer zum Erfolg führt: nämlich zur Betätigung des Mechanismus. Den Staubbeutel kann man auf diese Weise beliebig oft herunter- und wieder hinaufschnellen lassen. Der Mechanismus wird dabei nicht zerstört, die Blüte nicht unnötig geschädigt. Das einmal auszuprobieren, macht übrigens nicht nur Kindern Spaß!

Seltsamerweise besitzen nicht alle Salbeiarten diesen ungewöhnlichen Schlagbaummechanismus. Beim Gartensalbei oder beim Quirlblättrigen Salbei (Abb. 7) beispielsweise fehlt er; hier sind die Staubblätter einfacher gebaut, ebenso bei den verbreitet vorkommenden Taubnesseln (Abb. 8). Diese Pflanzen existieren und gedeihen trotzdem genauso gut.

So gesehen ist der Schlagbaummechanismus überflüssig. Warum gibt es diesen komplizierten Mechanismus dann überhaupt? Ein natürlicher Evolutionsvorgang scheint damit überfordert zu sein, diesen Luxus hervorzu- bringen. Dafür hat Evolution keinen „Sinn“, bei ihr ist Luxus nur unnötige Verschwendung, die schnellstmöglich wieder eingespart würde. Unter dem Gesichtspunkt der Evolution zählt nur Überlebens- und Konkurrenz- fähigkeit und Erfolg in der Produktion von Nachkommen. Aber dafür bringt der Schlagbaummechanismus offenbar keinen Vorteil. Es gab demzufolge keinen Anlass und keine Triebfeder zur evolutionären Entstehung dieses kunstvollen Gebildes. Und doch ist es da. Beispiele dieser Art gibt es in der Natur in Hülle und Fülle.

„Warum also kompliziert, wenn es auch einfach geht?“, könnte man fragen. Aus der Perspektive eines Schöpfers sind phantasie- und kunstvolle „Extras“ aber durchaus bedeutungsvoll. Hat unser Schöpfer damit einen kleinen Gruß hinterlassen? Vielleicht sagt er uns damit ja: „Ich war's! Und ich erschaffe nicht nur Nützliches, gerade genug zum Funkti- onieren und Überleben, sondern ich mache noch reichliche Zugaben an Schö- nem, Spielerischem und Phantasievollem. Ich gebe und schaffe weit über das Existenzminimum hinaus.“

Mit diesem Blick für die Schöpfung können wir die Anzeichen von Gottes „unnötigem“ Phantasieichtum an allen Ecken und Enden in der heimi- schen Flora entdecken.



ONLINE-Zusatz 6

Weitere Beispiele von Regelkreisen bei Pflanzen

Wald-Sauerklee

Der Wald-Sauerklee (*Oxalis acetosella*) verdankt seinen Namen seinem säuerlichen Geschmack (Oxalsäure und Kleesalz) und den dreiteiligen kleeblattähnlichen Blättern. Mit dem Wiesenklee ist er aber nicht verwandt, seine Blüten sind ganz anders gebaut. Er blüht relativ früh im April, vor allem im Nadelwald, wo er nur selten von der Sonne beschienen wird. Tatsächlich ist er die schattenverträglichste heimische Blütenpflanze und kommt notfalls mit nur 1/160 des Tageslichts aus.



typische weiße Blüte



farbige Blüte mit ausgebreitetem Laubblatt



zusammengefaltetes Laubblatt
(Fotos: R. Junker; rechts R. Wiskin)



Detailaufnahme von den Blattgelenken

Da nur wenig Licht aufgenommen und folglich wenig Pflanzenmasse produziert werden kann, muss die Pflanze mit den zur Verfügung stehenden Mitteln besonders sparsam umgehen. Entsprechend ist sie sehr zart gebaut und kleinwüchsig, die Blätter sind dünn und besitzen wenig Verdunstungsschutz (Abb. 10). Den brauchen sie ja auch kaum. Allerdings sorgen

feine Härchen an Stängel und Blättern dafür, dass ein windstillter Raum die Pflanze umgibt und so mit sparsamen Mitteln einer Austrocknung durch Wind entgegengewirkt wird. Doch das reicht nicht aus, wenn es kalt wird oder wenn doch mal ein Sonnenstrahl länger auf die Pflanze fällt und diese dadurch relativ stark erwärmt wird. Für diesen Fall ist der Sauerklee mit einem besonderen Mechanismus zur Herabsetzung der Verdunstung ausgerüstet. An der Basis der Fiedern befinden sich Gelenke, die durch einen Zelldruckmechanismus (*Turgor*) verstellt werden können. Im Normalfall stehen die Blätter waagrecht, bei sehr niedrigen Temperaturen und in der Nacht sowie bei Überbelichtung (zu große Wärme) klappen die Fiedern jedoch nach unten und falten sich auch noch ein, so dass sie alle eng am Stängel und aneinander liegen (Abb. 10–12). Wie geht das? „Ganz einfach“: Auf der Unterseite der Gelenke nimmt der Zelldruck (*Turgor*) ab, und somit klappen die Blätter nach unten. Durch das Herunterklappen werden besonders die Spaltöffnungen geschützt, denn sie befinden sich nur auf den Blattunterseiten, die zusammengelegt werden. (Spaltöffnungen dienen dem Gasaustausch; dadurch kann die Pflanze das benötigte Kohlendioxid aus der Luft aufnehmen. Andererseits sind die Spaltöffnungen auch eine Quelle des Wasserverlusts, da hier die Verdunstung von Wasserdampf wenig behindert ist.) Durch diesen Mechanismus wird die Oberfläche und damit die Verdunstungsfläche der Pflanze stark verkleinert, so dass der Wasserverlust entsprechend herabgesetzt wird.

Und woher „wissen“ die Gelenke, wann sie ihre Stellung verändern müssen? Die Forscher vermuten, dass linsenförmige Zellen der Blattoberseite als Messgeräte dienen, deren Messergebnisse und darauf beruhende Signale zu den Blattbewegungen führen.

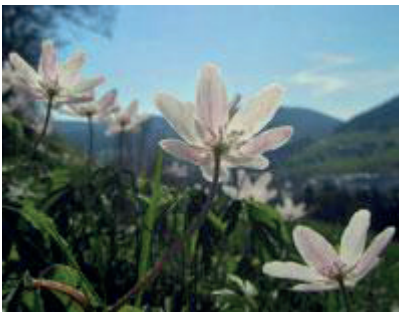
Wir haben hier ein typisches Beispiel von „Design“ vor uns. Bauteile und Lebensweise sind so aufeinander abgestimmt, dass man einen Urheber vermuten möchte, der diese Konstruktion und die besondere Fähigkeit der Blattbewegung ausgeklügelt hat.

Ein Regelkreis ist auch beim Sauerklee verwirklicht:

- Ein Fühler (Messinstrument), der feststellt, wie viel Wasser im Pflanzengewebe vorhanden ist.
- Ein Sollwert-Istwert-Vergleich: Gibt es eine Abweichung vom Sollwert? Wird das Wasser im Gewebe zu knapp? Scheint die Sonne zu stark auf die Blätter? Der Sollwert muss auch hier programmiert sein, eine Abweichung des Istwerts (zu wenig Wasser im Gewebe) vom Sollwert muss erkannt werden.
- Reaktion, um den Sollwert wiederherzustellen: Die drei Teilblättchen werden heruntergeklappt, was die Verdunstung herabsetzt, so dass auf diese Weise der Sollwert wieder erreicht werden kann. Ist das Blatt wieder im Schatten und die Wasserversorgung wieder günstiger, kann der Vorgang wieder rückgängig gemacht werden.

Buschwindröschen

Das Buschwindröschen öffnet seine weißen Blüten bei Wärme und Sonnenschein, kann sie aber nachts und bei kühler Witterung zum Schutz der Staubblätter schließen. Dies geschieht durch Wachstumsbewegungen: Die Außenseite der *Perigonblätter* (Blütenblätter) wächst schneller als die Innenseite. Ein ähnlicher Vorgang spielt sich beim Blütenstiel ab, was dazu führt, dass dieser abwärts gebogen werden kann. Übrigens ist das keine Kleinigkeit. Die Pflanze benötigt drei Dinge *gleichzeitig*: 1. Sollwerte passend zur Witterung, 2. die Fähigkeit, Ist- und Sollwert zu vergleichen (ist die Blütenstellung passend für die Witterung?), also eine Art Messfühler, und 3. passende Reaktionen und deren Steuerung. Fehlt davon eine Fähigkeit bzw. Vorgabe, kann der Mechanismus nicht funktionieren. Alles oder nichts – eine „harte Nuss“ für blinde Naturprozesse und ein typisches Schöpfungsindiz.



Buschwindröschen können ihre Blüten in zweifacher Weise bewegen: Sie können sie je nach Witterung schließen und öffnen und sie können dem Stand der Sonne folgen.

Bei strahlendem Sonnenschein „strahlen“ die Buschwindröschen auch und öffnen ihre Blüten, und zwar so weit, dass die Perigonblätter eine Art Hohlspiegel bilden und so die Wärme zu den inneren Blütenorganen hin konzentrieren. Dabei folgen sie dem Lauf der Sonne – ein weiterer Mechanismus, der auf einem Regelkreis beruht. Die Position der Sonne wird registriert und die Stellung der Blüte kontinuierlich nachgeführt. Woher kommen Sollwerte, Messfühler und die zugleich erforderliche Fähigkeit zur Nachführung? Wir haben ein zielorientiertes System vor uns – jeder Regelkreis ist das. Übrigens kann man den Vorgang leicht selbst beobachten, denn Buschwindröschen sind häufig anzutreffen. Aber auch viele andere Blüten reagieren auf die Witterung, auch im Sommer.



ONLINE-Zusatz 7

Weitere Beispiele zum Baukastensystem

Ein Baukastensystem zeigt sich bei vielen anderen Ausprägungen von Früchten oder Samen von Blütenpflanzen, die jeweils sehr ähnlich gestaltet sind, obwohl die betreffenden Arten nicht näher verwandt sind, z. B. Federschweifflieger, behaarte Samen oder Kapselfrüchte. Das heißt: Die betreffenden Arten bzw. Gattungen sind im System der Blütenpflanzen so weit voneinander entfernt, dass sie nicht durch Abstammung von einem gemeinsamen Vorfahren erklärbar sind und auch von Evolutionstheoretikern nicht so erklärt werden – diese sprechen in diesen Fällen von Konvergenz. Aus der Sicht der Schöpfungslehre kann man diese Beispiele wie die im Heft beschriebenen Fälle als einmalige Erfindungen des Schöpfers interpretieren, die mehrfach frei und unabhängig voneinander verwirklicht wurden (Baukastensystem).

Federschweifflieger



Links: Berg-Nelkenwurz (*Geum montanum*), Familie Rosengewächse
Rechts: Berg-Küchenschelle (*Pulsatilla montana*), Familie Hahnenfußgewächse

Behaarte Samen



Links: Kraut-Weide (*Salix herbacea*), Familie Weidengewächse
Rechts: Kurzfrüchtiges Weidenröschen (*Epilobium brachycarpum*), Familie Nachtkerzengewächse

Kapseln

mit Zähnchen, die sich bei Fruchtreife nach außen aufbiegen und bei Feuchtigkeit wieder schließen; in den Kapseln befinden sich viele Samenkörner.



Links: Kornrade (*Agrostemma githago*), Familie Nelkengewächse

Rechts: Hohe Schlüsselblume (*Primula elatior*), Familie Primelgewächse

Beeren

(fleischige Früchte)



Links: Schattenblümchen (*Maianthemum*), Familie Spargelgewächse

Rechts: Rote Heckenkirschen (*Lonicera xylosteum*), Familie Geißblattgewächse;
und viele andere bekannte Beispiele, die häufig nicht näher verwandt sind.