

Top-Down-Konstruktion bei Vogelfedern

Reinhard Junker, Rosenbergweg 29, 72270 Baiersbronn

Stand: 22. 10. 2026



Studiengemeinschaft Wort und Wissen

www.wort-und-wissen.org/wp-content/uploads/vogelfedern-top-down.pdf



Feder eines Eichelhäfers. (Smileus, AdobeStock)

Top-Down-Konstruktion bei Vogelfedern

Vogelfedern sind äußerst komplexe Gebilde. Vom Nanometer- bis zum Zentimeterbereich weisen sie ein „einzigartiges multifunktionales hierarchisches Design“ auf. Ein aktueller Überblick über die Kenntnisse des Aufbaus der Federn zeigt eine Fülle von ausgeklügelten Details. Dabei erweist sich das Federkeratin als universeller, vielseitig einsetzbarer Baustein. Die Frage drängt sich auf, ob ein evolutiver Bottom-Up-Prozess solche Federstrukturen bilden kann, die top-down-designt erscheinen.

Reinhard Junker

Evolution: bottom-up – Planung: top-down

Welche Mechanismen und Prozesse führen zu Veränderungen der Lebewesen? Klassisch darwinistisch verweist man hier auf das Wechselspiel von Zufallsmutation und Selektion (Auslese).¹ Dieser Prozess kennt kein Ziel, denn er wird als reiner Naturprozess angesehen, der zukunftsblind auf der Basis von Zufall, Randbedingungen und Gesetzmäßigkeiten verläuft. Es handelt sich um einen *Bottom-Up*-Vorgang, also von den Einzelbausteinen ausgehend zu immer komplexeren Gebilden, jedoch ohne jede Steuerung und Zielorientierung.

Eine größer werdende Zahl von Biologen hält diesen Mechanismus mindestens für nicht ausreichend, um auch *evolutionäre Innovationen* (*Makroevolution*) zu erklären. Sie diskutieren Prozesse, bei denen die Fähigkeit der Arten zur

individuellen Anpassung ins Kalkül gezogen und den Organismen *agentenhafte* Fähigkeiten zugeschrieben werden (CORNING et al. 2023; vgl. JUNKER 2024). Dabei geht es letztlich um in den Lebewesen bereits vorhandene Programme, die abgerufen werden und z. B. durch Umweltreize ausgelöst werden können und individuelle Variation erzeugen. Doch auch solche Variationsprogramme mussten irgendwann zuvor erst einmal evolutiv aufgebaut worden sein. Es ist also eine klassisch-darwinistische Erklärung zu ihrer erstmaligen Entstehung vonnöten. Das Problem der Entstehung von Neuheiten wird mit solch neueren agentenbezogenen Ansätzen letztlich nur weiter in

¹ DARWIN kannte Mutationen im Erbgut noch nicht, es war aber wohlbekannt, dass es Variation innerhalb von Arten gibt, und dass der Mensch gezielt in der Pflanzen- und Tierzucht daraus auswählen kann.

die Vergangenheit verschoben, ohne es zu lösen. Evolution verläuft aufs Ganze gesehen letztlich doch immer „von unten nach oben“.

Ein zielloser Bottom-Up-Mechanismus steht in starkem Kontrast zum Aufbau biologischer Strukturen.

Dieser evolutionäre, ziellose Bottom-Up-Mechanismus steht in starkem Kontrast zum Aufbau biologischer Strukturen. Jedes funktional-komplexe Gebilde, ob im technischen Bereich oder als Teil eines Lebewesens, kann nämlich nur verstanden werden, wenn man das Ganze ins Auge fasst – also durch eine *Top-Down*-Betrachtung. In der Technik, Programmieretechnik oder auch in der Kunst ist klar, dass man ohne eine – wenigstens ungefähre – Vorstellung darüber, was entstehen soll, gar nicht mit der Arbeit anfangen kann. Auch für den *Entstehungsprozess* komplexer Strukturen ist also eine *Top-Down*-Vorgehensweise nach aller unserer Erfahrung unerlässlich. Dies gilt umso mehr, je mehr Komplexitätsgrade eine Struktur, wie z. B. eine Feder, aufweist.

Vogelfedern – genial konstruiert

Ein faszinierendes Gebilde von Lebewesen, anhand dessen man das *Top-Down*-Prinzip sehr gut nachvollziehen kann, ist die Vogelfeder. Das gilt insbesondere für flugtaugliche Konturfedern. HENDRICKX-RODRIGUEZ & LENTINK (2025) haben kürzlich einen detaillierten Überblick über den

heutigen Stand des Wissens um den Aufbau von Vogelfedern veröffentlicht. Die Autoren beschreiben Details in fünf Größenstufen, von den Nanostrukturen ausgehend bis zum Zentimeterbereich. Dabei wird deutlich, dass die Eigenschaften der feineren Strukturen von den Eigenschaften der größeren Strukturen zu verstehen sind, deren Funktion gewährleistet werden muss. In jedem Größenbereich gibt es fein abgestimmte Strukturen und Schlüsselmerkmale, und die Vogelfedern weisen ein „*einzigartiges multifunktionales hierarchisches Design*“ auf, so die Autoren in ihrer Zusammenfassung. Federn vereinen gegensätzliche Eigenschaften: Sie sind robust, biegsam, drehbar, knickfest und ausgesprochen leicht. Es ist klar, dass diese Kombination von Eigenschaften besondere Anforderungen an die Materialeigenschaften stellt.

Erstaunlicherweise können Federn 26 verschiedene Funktionen erfüllen, wobei diese Funktionen von sechs verschiedenen Federtypen ermöglicht werden (TERRILL & SHULTZ 2023; **Abb. 1**).

Trotz dieser Multifunktionalität entstehen alle Federn in der Individualentwicklung (Ontogenese) nach dem gleichen Grundmuster und unter Verwendung eines universellen Bausteins: des Federkeratin-Proteins. Die Vielfalt der Federn beruht eher auf subtilen Unterschieden in der strukturellen Anordnung einiger weniger (universeller) Bestandteile als auf Variationen in der chemischen Zusammensetzung oder durch Einsatz neuer Bauteile. „Feine Unterschiede in der Anordnung dieser universellen Einheiten auf größeren Skalen, ab dem Mikrometerbereich aufwärts [...] führen zur multifunktionalen Vielfalt

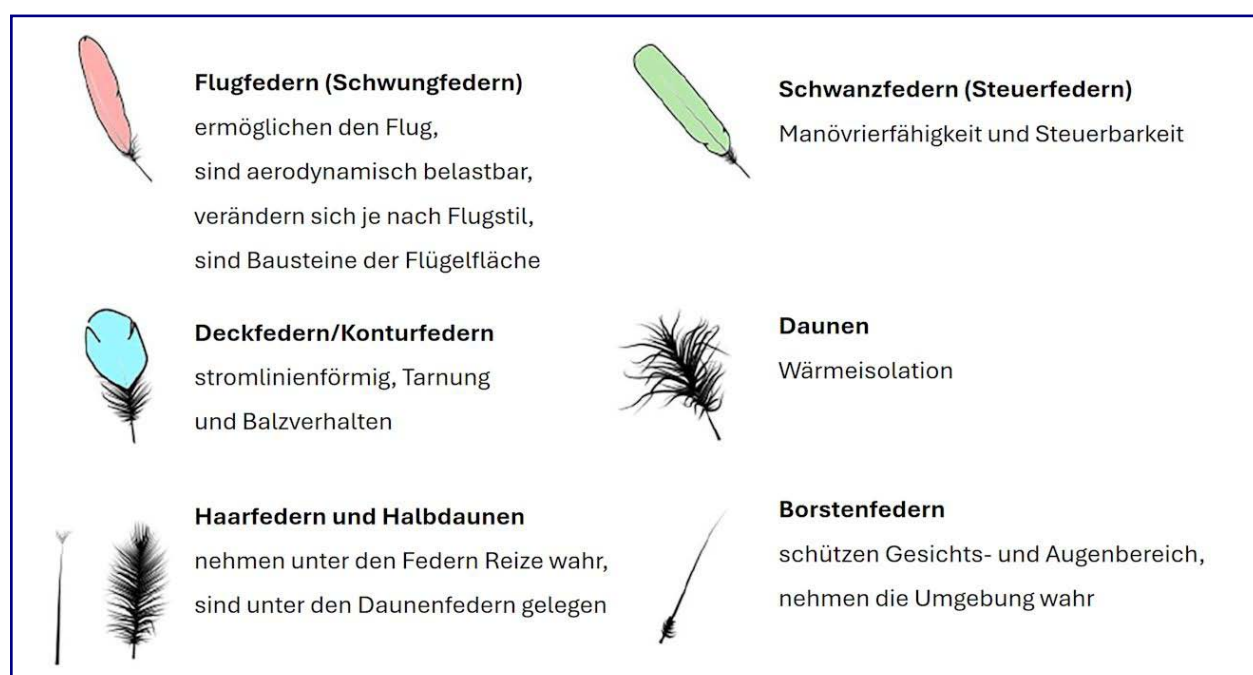


Abb. 1 Sechs Typen von Vogelfedern. (Nach HENDRICKX-RODRIGUEZ & LENTINK 2025, CC BY-SA 4.0)

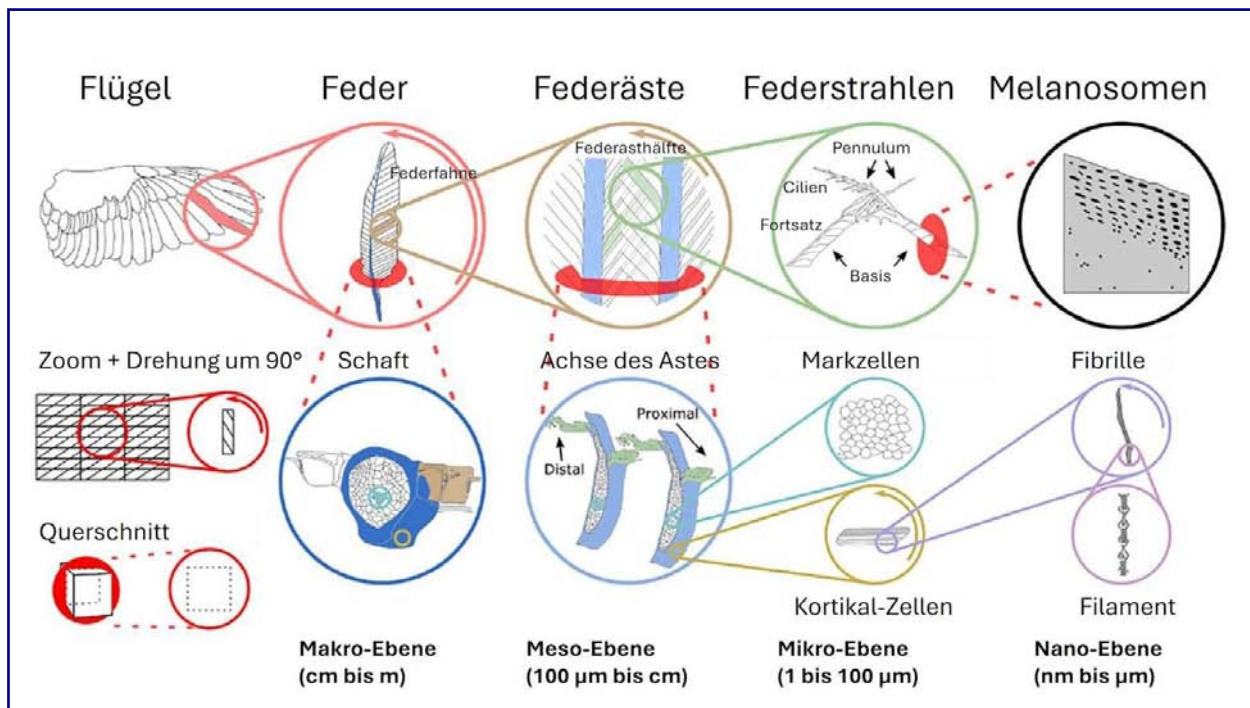


Abb. 2 Federn sind hierarchisch aufgebaute, multifunktionale Strukturen. (Nach HENDRICKX-RODRIGUEZ & LENTINK 2025, CC BY-SA 4.0) Auf der *Makroebene* bestehen Konturfedern aus zwei aerodynamischen Flächen, die durch einen tragenden Schaft voneinander getrennt sind. Der Schaft verzweigt sich auf beiden Seiten in Federäste, die zusammen die beiden Flächen der Feder bilden. Auf der *Mesoebene* sehen die Federäste wie Miniaturfedern aus, die aus zwei Hälften bestehen, die durch einen zentralen Schaft, den Ramus, voneinander getrennt sind. Der Federast verzweigt sich auf beiden Seiten des Ramus in Federstrahlen, die gemeinsam die beiden Hälften des Federastes bilden. Auf der *Mikroebene* sind die Federstrahlen, säulenartige Auswüchse aus den Ästen, die aus einer Basis und einem sog. Pennulum mit kleinen Auswüchsen an der Spitze bestehen. Federstrahlen auf der dem Schaft zugewandten Seite (die Bogenstrahlen) bestehen aus einer Art Stachel, während Federstrahlen auf der anderen Seite Haken aufweisen (Hakenstrahlen). Darüber hinaus zeigen Querschnitte des Schafts und des Ramus einen markartigen Kern mit Markzellen, die von Kortezellen umgeben sind („Rinde“). Markzellen sind vakuolisiert und haben eine kreisförmige Gestalt. Im Gegensatz dazu flachen sich die Rindenzellen ab und bilden strangartige Strukturen. Im *Nanobereich* ist das Innere der Federstrahlen häufig mit Pigmenten wie Melanin gefüllt. Im Gegensatz dazu bestehen die Zellen des Kortex sowie der Randbereich der Markzellen aus Fibrillen, die aus nanometergroßen Filamenten des Federkeratin-Proteins aufgebaut sind.

der Federn“ (HENDRICKX-RODRIGUEZ & LENTINK 2025, 1f; vgl. **Abb. 2**). Die Autoren stellen weiter fest: „Dieser ganzheitliche Designansatz, bei dem das Ganze mehr ist als die Summe seiner Teile, zieht sich wie ein roter Faden durch alle natürlichen Materialien.“

Trotz Multifunktionalität entstehen alle Federn ontogenetisch nach dem gleichen Grundmuster und unter Verwendung eines universellen Bausteins.

Aus der Fülle der Eigenschaften der Federstrukturen der verschiedenen Skalengröße seien beispielhaft einige nachfolgend genannt.

Nanometerbereich. Vogelfedern sind aus Federkeratin aufgebaut. Es handelt sich um ein β -Keratin, das ausschließlich in Geweben von Vögeln und Reptilien vorkommt. Wie auch α -Keratin der Säugetiere ist β -Keratin langlebig, widerstandsfähig und reagiert nicht mit der na-

türlichen Umgebung. Es bildet sowohl kristalline Filamente (Fasern) als auch die formlose Matrix des Federschafts und der Federäste.² Dabei werden keine anderen Proteine benötigt.

Die Aminosäurekette von β -Keratinen besteht aus drei *Domänen* (Struktureinheiten eines Proteins): Ein β -Faltblatt bildet die zentrale Domäne, die sich zum Filamentgerüst faltet, während zwei an den beiden Enden befindliche Domänen den Großteil der Matrix ausmachen (N-terminale und C-terminale Domäne). Es wird vermutet, dass in der N-terminalen Domäne die dort vorhandene hohe Konzentration der Aminosäure Cystein an den Disulfidbrücken beteiligt ist, die sich innerhalb und zwischen den Filamenten befinden und die Federn widerstandsfähig gegen Abbau machen. Darüber

² „Importantly, β -keratins form both the crystalline and amorphous halves of this composite without the need of other proteins—the same amino acid chain forms the filaments and the matrix“ (S. 2).

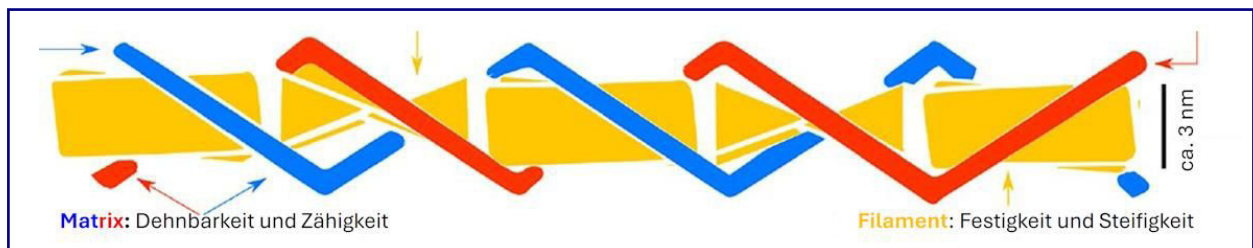


Abb. 3 Quartärstruktur des Federkeratins. Das Keratin-Filament wird als steife, gelbe Säule dargestellt, die durch die Matrix aus den Enddomänen des Keratins stabilisiert wird, die als rote und blaue Stränge dargestellt sind. In der schematischen Darstellung beträgt der Verdrehungswinkel 90° , was bedeutet, dass sich vier Dimere (Bausteine aus zwei Teilen) aneinander lagern, bevor sie wieder in die Ausgangskonfiguration zurückkehren. Weiteres im Text. (Nach HENDRICKX-RODRIGUEZ & LENTINK 2025, CC BY-SA 4.0)

hinaus wird angenommen, dass der Reichtum an Aminosäuren wie Cystein und Glycin am N-Ende den Wassergehalt der Feder erhöht, ohne ihre Unlöslichkeit zu beeinträchtigen, wodurch die Feder weicher und flexibler wird. Diese Eigenschaften tragen zur Einzigartigkeit des Federkeratins bei.

Zwei β -Faltblatt-Stücke verdrehen sich und „schieben“ sich wie ein Sandwich zusammen und bilden ein sog. Dimer (aus zwei Teilen zusammengesetzt), sodass die hydrophoben (wasserabweisenden) Oberflächen einander zugewandt sind, während geladene Aminosäurereste an der Außenfläche liegen, wo sie leicht Wasser binden. Diese Dimere aus einem „eingeklemmten“ Paar verdrehter β -Faltblätter wechselwirken mit anderen Dimeren, um β -Keratin-Filamente aufzubauen. Die hydrophoben Seitenketten am oberen Rand eines Dimers binden an die hydrophoben Seitenketten am unteren Rand eines anderen Dimers. Diese ‚Kopf-Schwanz‘-Wechselwirkung wiederholt sich mehrmals, wodurch die für Federn charakteristischen Filamente mit einem Durchmesser von gerade einmal 3 Nanometern entstehen (**Abb. 3**).³

Diese Keratinfilamente und ihre Struktur bestimmen die grundlegenden mechanischen Eigenschaften von Federn (HENDRICKX-RODRIGUEZ & LENTINK 2025, 4). Sie sind widerstandsfähig gegenüber fast allen eiweißspaltenden Enzymen, Chemikalien und Abbaubedingungen.

Das Federkreatin ist widerstandsfähig gegenüber fast allen eiweißspaltenden Enzymen, Chemikalien und Abbaubedingungen.

Unterer Mikrometerbereich. Die Federn bestehen aus zwei Zelltypen: lange, faserartige Zellen der harten äußeren Hornschicht (Kortex) und kreisförmige, vakuolisierte Zellen, die den markartigen inneren Kern des Federschafts und der Federäste bilden. „Die Kombination beider Zelltypen, die zu einem Verbundwerkstoff in Sandwich-Struktur integriert sind, erklärt, warum Federn sowohl fest als auch leicht sind“ (HENDRICKX-RODRIGUEZ & LENTINK 2025, 5).⁴

Die Seitenwände des Kortex sind von einer dehnbaren Schicht bedeckt, dem sogenannten Epikortex, der aus Lagen diagonal gekreuzter Makrofibrillen besteht. Die Faserverbindungen werden durch verdickte Knoten vermittelt. Diese Knoten sind im Kortex dreidimensional versetzt angeordnet, was zu einer komplizierten Struktur⁵ führt, die Rissausbreitungen verlangsamt. Diese Knoten haben hakenförmige Enden, um sich an anderen Fasern festzuheften, wodurch ein „Herausziehen“ der Fasern aus der umgebenden Matrix verhindert wird (HENDRICKX-RODRIGUEZ & LENTINK 2025, 6).

Ein sehr interessantes Bauprinzip besteht darin, dass die Längsfasern im Kortex des Federschafts ununterbrochen in die Federäste hineinlaufen (**Abb. 4**), wodurch eine durchgehende Verankerung gewährleistet und die Belastung von den schlanken Haken auf den Schaft verteilt wird. Von Federast zu Federast nimmt dadurch der Durchmesser des Schafts zur Spitze hin allmählich ab. Dadurch werden abrupte Faserenden vermieden, wodurch ein potenziell katastrophaler Rissdefekt kaum auftreten kann.

Die Längsfasern im Kortex des Federschafts laufen ununterbrochen in die Federäste hinein.

Der Epikortex enthält keine großen Fasern, sondern besteht aus abwechselnden Schichten

³ „Um ‚Kopf-Kopf‘-Wechselwirkungen zu vermeiden, die den Filamentbildungsprozess beeinträchtigen würden, ist ein konserviertes Arginin nach außen gerichtet, um zu verhindern, dass die freiliegende Kante eines Dimers ungewollt an die freiliegende Kante eines anderen Dimers bindet.“ (S. 4)

⁴ „Der dorsale (obere) und ventrale (untere) Rachis-Kortex ... besteht aus drei Schichten langer (mehrere zehn Mikrometer) Fasern, die als synzytiale Barbulae bezeichnet werden und von einer Matrix umgeben sind Dies unterscheidet sich vom Filament-Matrix-Nanokomposit des Federkeratinproteins.“ (S. 6).

⁵ „‚brick-bridge-mortar‘ structure“.

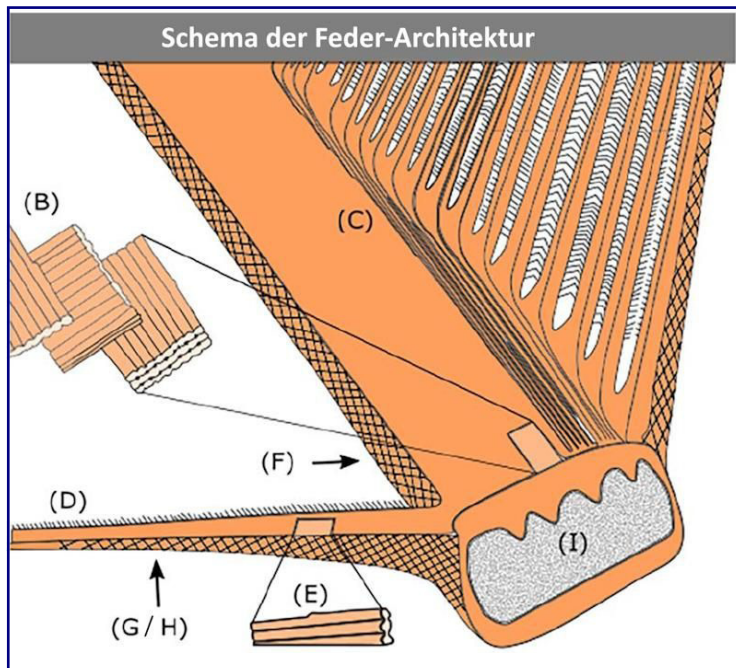


Abb. 4 Schematische Darstellung einer Feder, die die verschiedenen Strukturen des Kortex und des Markes hervorhebt. Der dorsale (obere) und der ventrale (untere) Kortex der Federachse bestehen aus drei Faserschichten unterschiedlicher Dicke und Faserausrichtung. Die in Längsrichtung angeordneten Fasern zweigen von der Federachse ab und verlaufen entlang des Federastes vom Zentrum der Feder weg. (Nach HENDRICKX-RODRIGUEZ & LENTINK 2025, CC BY-SA 4.0)

entgegengesetzt ausgerichteter Makrofibrillen (mit einem Durchmesser von 100–1000 nm), die in einem Winkel von etwa 45° zur Längsachse des Schafts oder der Federäste verlaufen, wodurch er weniger spröde ist als der Kortex. Die Ausrichtung dieser Makrofibrillen trägt dazu bei, mechanischen Belastungen durch Scherbeanspruchungen zu widerstehen (HENDRICKX-RODRIGUEZ & LENTINK 2025, 7).

Das Mark wirkt als Energieabsorber bei Verformungen quer zur Belastungsrichtung des Federasts, da 96 % der elastischen Energie in einer Schaumstoffstruktur gespeichert sind.

Oberer Mikrometerbereich. Größenordnungsmäßig noch im Mikrometerbereich sind die Federstrahlen. Als lange, säulenartige Fortsätze setzen sie an den Federästen an und bestehen aus einer Basis und einem *Pennulum*. Das Pennulum ist der äußerste fadenförmige Teil der Federstrahlen. Die Federstrahlen, die zum Schaft hin orientiert sind, werden Bogenstrahlen genannt und besitzen einen langen Fortsatz (Stachel) an ihrer Basis. Die Federstrahlen auf der anderen Seite des Federastes weisen hakenförmige Mini-Fortsätze an ihrem Pennulum auf und werden als Hakenstrahlen bezeichnet. Die Flugfedern erhalten ihre Geschmeidigkeit, wenn sich die hakenförmigen Fortsätze an der Spitze eines Bogenstrahls verhaken und

so dazu beitragen, die Feder zusammenzuhalten (HENDRICKX-RODRIGUEZ & LENTINK 2025, 9; vgl. Abb. 5A).

Das Bogenstrahl-Hakenstrahl-Paar „fungiert als reparierbares, mehrstufiges Gleitschlosssystem“.

Das Bogenstrahl-Hakenstrahl-Paar „fungiert als reparierbares, mehrstufiges Gleitschlosssystem, das aus Häkchen und einer Gleitschiene oder einem Flansch besteht. Die Häkchen gleiten frei und reversibel entlang dieses Flansches, bis sie auf sägezahnförmige Erhebungen stoßen, die als Rückenfortsätze bezeichnet werden, und die Häkchen arretieren, wodurch die Federfahnen verbunden bleiben. Wird genügend Kraft ausgeübt, um einen Haken von dem ersten Rückenstachel zu lösen, befinden sich entlang des Flansches weitere Fortsätze, die ihn wieder arretieren“ (HENDRICKX-RODRIGUEZ & LENTINK 2025, 9).⁶

Einige Hakenstrahlen weisen auf ihrer Rückseite lappenartige Fortsätze auf (Abb. 5B), die mit dem Ast anderer Federn in Wechselwirkung treten und so mechanische Befestigungszonen zwischen zwei benachbarten, sich überlappenden Federn bilden, wodurch eine durchgehende Tragfläche entsteht: eine Art Klettverschluss, der sicher und reversibel ist und wiederholt benutzt werden kann. Dabei entsteht jedoch ein Geräusch. Den Eulen, die geräuschlos fliegen können, fehlt dieser „Klettverschluss“ (Abb. 5C). Stattdessen bilden längliche Pennulen eine samtartige Federoberfläche, die den Flug von Eulen extrem leise macht.

Die Struktur der Federstrahlen variiert zwar zwischen verschiedenen Vogelarten erheblich und kann so eine breite Palette von Funktionen passend zum Lebensraum erfüllen. Typischerweise liegt der Abstand zwischen benachbarten Federstrahlen oft nur zwischen 8 und 16 µm. Das ist offenbar notwendig, damit die Luftdurchlässigkeit durch die Federfahne begrenzt wird (HENDRICKX-RODRIGUEZ & LENTINK 2025, 10).

Ein besonders wichtiger Aspekt der Federstrahlen ist ihre Wechselwirkung mit Luft und Wasser. Bei Wasservögeln schließen die Federstrahlen Luft zwischen sich ein und bilden so eine dünne Schicht, das sogenannte *Plastron*, das die

⁶ „Die Trennkraft, die erforderlich ist, um einen distalen Federstrahl vollständig von seinem Platz neben einem proximalen Federstrahl zu verschieben – ein Vorgang, der als ‚Entzippen‘ bezeichnet wird –, blieb nach 1000 Zyklen des Trennens und Wiederherstellens nahezu unverändert (ca. 44 ± 9 mN) ... Die federartigen Federstrahlen von Daunenfedern weisen diese detaillierte Struktur nicht auf und rasten daher nicht ineinander ein“ (S. 9).

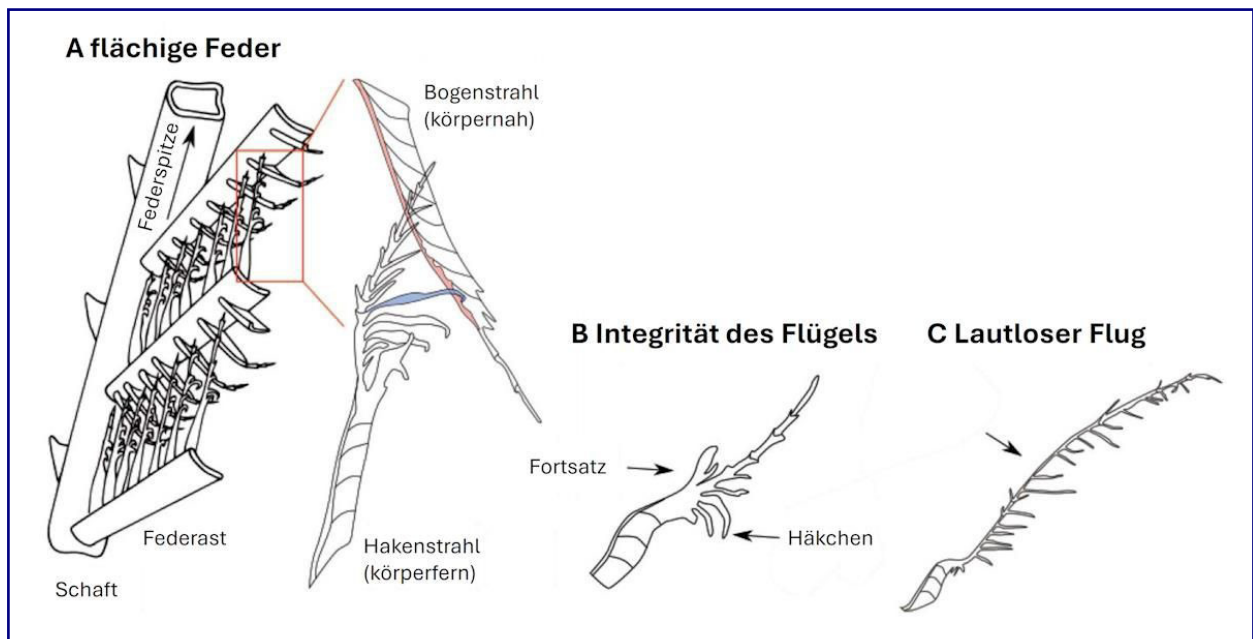


Abb. 5 **A** Bei fiederförmigen Federn, bei denen sich die Federäste von einer zentralen Federachse aus erstrecken, gibt es zwei verschiedene Arten von Federstrahlen, je nachdem, von welcher Seite des Asts sie ausgehen. Die Hakenstrahlen sind von der Federbasis zur Federspitze hin orientiert („oben“) und besitzen Häkchen (blau dargestellt). Zur Federbasis orientierte Bogenstrahlen besitzen keine Erhebungen (rot dargestellt).

B Die rückseitigen gelappten Fortsätze tragen durch ihre Wechselwirkung mit den Ästen anderer Federn dazu bei, die Flügelform aufrecht zu erhalten.

C Die langen Pennulae an den Federn von Eulen tragen dazu bei, das Geräusch beim Aneinandergleiten der Federn während des Fluges zu dämpfen. (Nach HENDRICKX-RODRIGUEZ & LENTINK 2025, CC BY-SA 4.0)

Benetzung verhindert. Diese Schicht verbessert zudem die Isolierung und verleiht den Vögeln zusätzlichen Auftrieb.

Millimeterbereich. Im Millimeterbereich gelangen wir zu den Federästen. Hunderte von Federästen fügen sich zu einer Federfahne zusammen, die dem Vogel eine starke Tragfläche zum Fliegen bietet. HENDRICKX-RODRIGUEZ & LENTINK (2025, 11)



Abb. 6 Oben: Natürliche Winglets beim Kondor (gefächert) für den Langsamflug (Attribution: Ester Inbar, available from <https://commons.wikimedia.org/wiki/User:ST>), unten: Winglets am C-17-Transportflugzeug (U.S. Air Force photo/Tech. Sgt. Shane A. Cuomo; Gemeinfrei).

betonen, dass zum Verständnis der Eigenschaften der Federfahne eine ganzheitliche Analyse von Form und Struktur der Federäste erforderlich ist, einschließlich der Art und Weise, wie sie aus dem Federschaft herausragen und wie dieser Aufbau die mechanischen Eigenschaften der Federäste beeinflusst.

Der Abgangswinkel und die Länge der Federäste bestimmen die Form der Federfahne und haben dadurch Einfluss auf die aerodynamischen Eigenschaften der Feder. Die Federäste werden an der Federbasis zunächst länger, dann bleibt die Länge konstant und nimmt an der Federspitze wieder ab. Aufgrund der Asymmetrie der Länge der Federäste auf den beiden Seiten der Federfahnen einer Flugfeder liegt der Federschaft näher an der Vorderkante der Feder, die zuerst mit der Luft in Kontakt kommt (sog. „leading edge“). Diese Asymmetrie stabilisiert die Position der Feder während des Fluges und verhindert so ein Flattern. Darüber hinaus verringern die Ausbuchtungen an den Flügelspitzen, die durch schnelle Änderungen der Astlänge entstehen, den Luftwiderstand am Flügel. Diese sog. „Tip-Sail“-Funktion ist vergleichbar mit den einzelnen Winglets an modernen Passagierflugzeugen (HENDRICKX-RODRIGUEZ & LENTINK 2025, 11; vgl. Abb. 6).

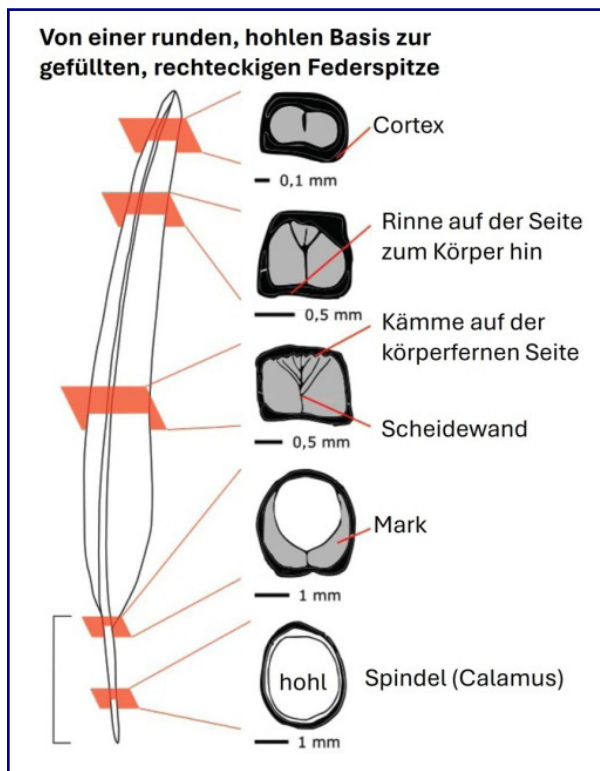


Abb. 7 Die Form des Federschafts variiert innerhalb der Federlänge und zwischen verschiedenen Arten und ermöglicht so eine abgestufte Belastbarkeit. Die Basis des Federschafts, die sich aus dem hohlen, in den Körper eingesenkten Calamus fortsetzt, ist kreisförmig, während die Spitze rechteckig ist. Der Formwechsel erfolgt dabei allmählich und spiegelt die unterschiedlichen Anforderungen in den verschiedenen Bereichen des Schafts wider. Für die Verankerung ist ein runder Querschnitt günstig, während weiter oben ein rechteckiger Querschnitt die Stabilität erhöht. (Nach HENDRICKX-RODRIGUEZ & LENTINK 2025, CC BY-SA 4.0)

Zentimeterbereich. Mit dem Federschaft sind wir im Zentimeterbereich angelangt. Der Federschaft ist weit mehr als nur eine Plattform, die die aerodynamischen Federn mit dem Körper des Vogels verbindet. Vielmehr verleihen detaillierte Strukturen dem Schaft seine mechanischen Eigenschaften, wobei winzige Unterschiede in der Architektur dem Flugstil und Ökotyp (= Lebensweise) eines Vogels entsprechen (S. 12).

Der Querschnitt des Schafts ändert sich ab etwa 20 % der Schaftlänge von kreisförmig zu rechteckig (Abb. 7). Durch die Verjüngung wird der Luftwiderstand verringert und Gewicht gespart. Die Querschnittsänderung trägt dazu bei, die Steifigkeit anzupassen und die für den Flug in turbulenten Windböen erforderliche Biegesteifigkeit über die gesamte Feder hinweg aufrechtzuerhalten. Gleichzeitig nimmt der Elastizitätsmodul⁷ des Kortex entlang der Federachse von der Basis bis zur Spitze tendenziell zu, da sich die Keratinfilamente dichter anordnen und parallel zur Längsachse der Federachse ausrichten. HENDRICKX-RODRIGUEZ & LENTINK (2025, 13) weisen darauf hin, dass sich hier zeigt, wie sich

der hierarchische Aufbau der Feder über alle Skalen erstreckt.

Kommentar

Abschließend heben die Autoren hervor, dass die Vogelfeder eine komplexe biologische Struktur ist, die Vögeln eine Vielzahl von Eigenschaften verleiht. „Diese beeindruckende Komplexität baut sich hierarchisch aus einem einfachen Baustein auf, der in allen Federn aller Vögel vorhanden ist: Federkeratin“ (HENDRICKX-RODRIGUEZ & LENTINK 2025, 17). Der enorme Gestaltungsspielraum von Vogelfedern beruht somit nicht auf Variationen in der chemischen Zusammensetzung, sondern auf den genialen Eigenschaften dieses besonderen Proteins.

Der enorme Gestaltungsspielraum von Vogelfedern beruht auf den genialen Eigenschaften eines besonderen Proteins, des Federkeratins.

Betrachtet man den hierarchischen Aufbau des Federkeratins aus evolutionstheoretischer Perspektive unter Berücksichtigung seiner überragenden Bedeutung und seines vielfältigen Einsatzes, muss man wohl zum Schluss kommen, dass die Existenz dieses erstaunlichen Strukturproteins ein sehr außergewöhnlicher Glücksfall war – um Größenordnungen unwahrscheinlicher als ein Sechser im Lotto. Ein großer Teil der zentralen Domäne ist bei allen β -Keratinen *hochkonserviert*, das heißt, bei einer Vielzahl von Tierarten und Keratin-Gewebe kommt nahezu dieselbe Aminosäuresequenz (mit einer Länge von ca. 34 Resten) vor. Beim Federkeratin weisen auch die beiden am Ende befindlichen Domänen eine „hohe Homologie“ auf, „was die Allgegenwart dieser einzigartigen Aminosäuresequenz weiter untermauert“ (HENDRICKX-RODRIGUEZ & LENTINK 2025, 2). Die Proteinstruktur war unter evolutionstheoretischen Voraussetzungen also schon da, bevor irgendwelche Dinosaurier sich am Fliegen versuchten. *Wie aber konnte ein derart universell einsetzbarer Baustein bottom-up ohne Plan vor der Entstehung von Federn verschiedener Typen in einer Weise entstehen, dass er später in ganz neuen funktionellen Zusammenhängen für verschiedenste Zwecke nutzbar ist?*

Während ein solcher Glücksfall den Zufall deutlich überstrapaziert und eine Erklärung durch

⁷ Der Elastizitätsmodul beschreibt den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bei der elastischen Verformung eines festen Körpers.

bekannte evolutionäre Mechanismen nicht in Sicht ist, sind die heute bekannten Eigenschaften des Federkeratins ein starkes Indiz für Planung. Ein geniales multifunktionales Strukturprotein wurde top-down erfunden.

Bei alledem ist auch noch zu bedenken, dass Federn sich – wie alle Strukturen des Lebens – ontogenetisch selbst aufbauen. Das ist zweifellos der Gipfel der Ingenieurskunst. Der Schöpfer, dessen konkretes schöpferisches Handeln natürlich ein Geheimnis bleibt, stellt alle menschlichen Planungen und ingenieurstechnischen Leistungen weit in den Schatten.

Literatur

- CORNING PA et al. (eds., 2023) Evolution „on purpose“. Teleonomy in living systems. The Vienna Series in Theoretical Biology. MIT Press Cambridge, Mass.
- HENDRICKX-RODRIGUEZ S & LENTINK D (2025) The feather's multi-functional structure across nano to macro scales inspires hierarchical design. J. R. Soc. Interface 22: 20240776, <https://doi.org/10.1098/rsif.2024.0776>.
- JUNKER R (2024) Rezension „Evolution ‘on purpose’“. Stud. Integr. J. 31, 143–145.
- TERRILL RS & SHULTZ AJ (2023) Feather function and the evolution of birds. Biol. Rev. 98, 540–566.