

# Die Gefiederfarben der Vögel



Das Federkleid der Pfauen, Papageien und Kolibris gewinnt seine lebhaften, changierenden Farben außer durch Farbpigmente auch dank reflektierender Federstrukturen, die Interferenzen erzeugen.

VON MAURICE POMARÈDE

Als größte Zier der Vögel schätzen wir ihre Gesangkunst und ihr farbenprächtiges Gefieder. Doch selten tritt beides gemeinsam auf. Gerade Vogelarten mit besonders buntem oder farbstarkem Federkleid, wie Papageien, Pfauen oder Paradiesvögel, besitzen meist wenig melodische Stimmen. Und umgekehrt sind die größten Sänger, wie Grasmücken oder Nachtigallen, äußerlich völlig unscheinbar. Mit Farben und Gesang zugleich schmücken sich nur ganz wenige Arten, etwa der Stieglitz.

In der Natur besteht nur das biologisch Nützliche: Wie mit einem schmetternden Gesang, so demonstrieren Vögel auch mit einem farblich auffallenden Federkleid ihre Identität. Besonders bei Balztänzen stellen viele Arten ihr Gefieder zur Schau. Lebhaftige Farben besitzen merklich oft Vögel tropischer Wälder.

Für die Schautänze sucht das Männchen sonnige Stellen auf, wo seine Farbenpracht zur Geltung kommt. Zu anderen Zeiten hält es sich im tiefen Schatten versteckt, in dem sein Gefieder die Leuchtkraft einbüßt.

## Pigmente von Vogelfedern

Bei aller Vielfalt im Erscheinungsbild basiert die Farbigekeit dieser Vögel immer auf zwei Komponenten: einerseits auf Farbpigmenten, andererseits auf einfachen Strukturen der Federn, in denen das Licht spielt. Darum unterscheiden Fachleute Pigmentfarben und Strukturfarben. Während der Mauser werden Pigmente in die neu wachsenden Federn eingelagert. Sie tragen direkt oder indirekt zur Farbgebung bei – indem sie Licht bestimmter Wellenlängen absor-

bieren beziehungsweise indem sie reflektiertes Licht streuen.

Federn enthalten hauptsächlich zwei Arten von Pigmenten. Zum einen sind dies verschiedene „Carotinoide“, die ursprünglich aus Pflanzen stammen. Bekannt ist die Farbe der Karotten, die von Beta-Carotin herrührt. Aber die Farbpalette reicht von Gelb über Rot bis Purpur. Manche Vögel fressen nicht die Pigment bildende Pflanze selbst, sondern Kleintiere, die ihrerseits das Pigment aus dem Futter eingelagert haben. Zum Beispiel stammt die Rotfärbung des Flamingoflügels von Algen der Gattung *Dunaliella*, die in flachen salzhaltigen Gewässern wachsen, welche sie rötlich färben. Kleine Salinenkrebse der Gattung *Artemia* vertilgen diese Algen, und die Flamingos seihen die Krebse aus. Der Vogel modifiziert die Carotinoide und lagert sie in die Federn ein. Solche Pigmente erzeugen je nach chemischer Struktur und Konzentration in der Feder rote, orange, gelbe oder cremefarbene Töne.

Als weitere Pigmente sind für die Gefiederfarben gewöhnlich „Melanine“ verantwortlich. Diese erscheinen in Brauntönen oder als Schwarz. Melanine werden von spezialisierten Zellen, den Melanocyten, aus Aminosäuren synthetisiert und während des Wachstums der Feder in ihr Gewebe eingebaut. Von der Verteilung der Pigmentpartikel hängt die oft sehr präzise Musterung der einzelnen Federn und des Gesamtgefieders ab.

Biochemisch ist die Melaninsynthese gut untersucht. Ausgangssubstanz ist die Aminosäure Tyrosin. Eine Abfolge chemischer Reaktionen führt letztlich zur Bildung eines Polymers: Das ergibt „Eumelanin“ oder schwarzes Melanin. Ohne die abschließende Polymerisation entstehen die weniger komplexen „Phäomelanine“, die braune bis rote Töne erzeugen.

Ohne schwarzes Melanin erscheint ein Pfau weiß. Das schwarze Pigment erzeugt die normale Farbenpracht im Verein mit besonderen Federstrukturen



FOTOS: MAURICE POMARÈDE

Melanine geben auch unseren Haaren und dem Fell der Säugetiere Farbe. Wird das Pigment nicht gebildet oder abgebaut, wirken die Haare oder Federn weiß. In Verbindung mit anderen Molekülen bilden die Melanine die Grundlage für ein ganzes Spektrum verschiedener Farben. So steckt das gleiche Melanin in den langen Prachtfedern, die der Pfauhahn als Rad zur Schau stellt, im irisierenden Nackengefieder der Tauben und im changierenden Federkleid der Rabenvögel. Wenn die Melaninsynthese durch eine einzige Mutation ausfällt, sind Pfauen, Tauben und Raben weiß.

### Die Strukturfarben der Sittiche

Die Färbung eines Vogels beruht immer auf einer spektralen Zerlegung von Licht. Das kann aber auf verschiedenen Wegen geschehen, und mehrere dieser Vorgänge können zusammentreffen. Farbpigmente erwähnte ich schon: Sie schlucken – absorbieren – bestimmte Wellenlängen des auftreffenden Lichts. Ein „roter“ Farbstoff absorbiert zum Beispiel die blauen und grünen Anteile des Spektrums und reflektiert die roten. Im Gegensatz dazu entstehen die „Strukturfarben“ durch Brechung der Lichtstrahlen an mikroskopisch kleinen Strukturen in den Federn. Deswegen erscheinen Pigmentfarben immer gleich und wirken oft matt. Strukturfarben hingegen scheinen zu leben: Sie verändern sich, wenn die Richtung des Lichteinfalls wechselt. Eine solche Vogelfeder ändert die Farbe, wenn man sie zwischen den Fingern dreht. Sie changiert von blau nach vio-



Bei einem blauen Wellensittich entsteht die blaue Farbe in den (vom Schaft ausgehenden) Ästen der Federn. Diese Feder stammt von einem hellblauen Vogel. An sich enthalten die Äste als Farbpigment schwarzes Melanin. Die feinen Federstrahlen sind farblos. Wellensittiche von dunklerem Blau tragen schwarzes Melanin auch in den Strahlen

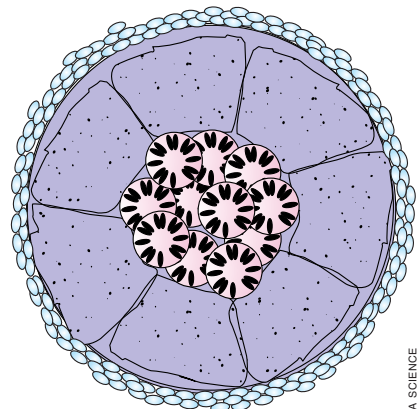
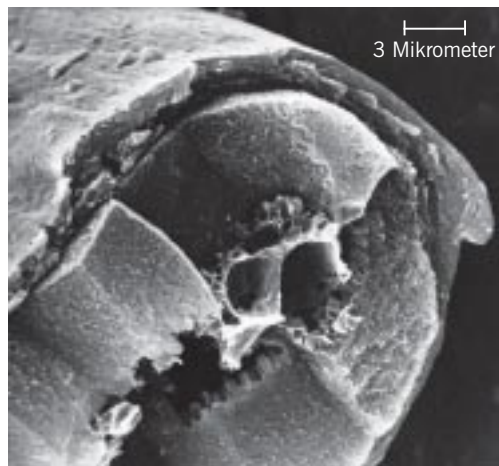
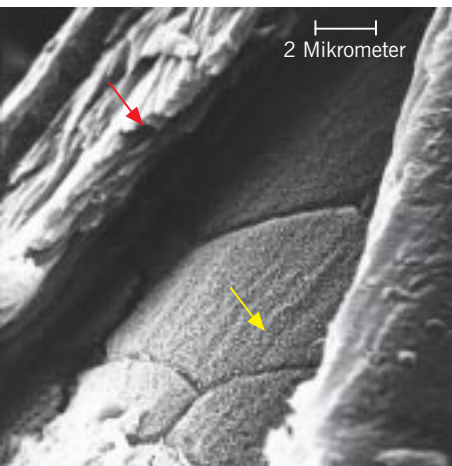
lett, von rot nach orange. Das Gelb des Kanarienvogels rührt allein von einer Pigmentfarbe her. Das Blau eines Wellensittichs erzeugen hingegen Mikrostrukturen. Die Tönungen des Pfauengefieders sind allesamt Strukturfarben. Insgesamt gibt es bei den Vögeln drei Arten solcher farberzeugender Strukturen.

Wellensittiche kommen aus Australien. Die wild lebenden Vögel sind in ihrer Grundfarbe grün, mit einer grauschwarzen Zeichnung an Flügeln und Schwanzfedern durch Melanineinlage-

rung. In Gefangenschaft werden auch blaue, graue, gelbe und violette Tiere gezüchtet. Ihre abweichende Färbung beruht auf Mutationen, die sich auf die Pigmentierung auswirken.

Wie die Farbe eines Wellensittichs zu Stande kommt, lässt sich am besten an einer blauen Feder erklären (Bilder auf dieser Seite). Betrachtet man eine solche Feder unter dem Lichtmikroskop und beleuchtet sie dabei vor schwarzem Hintergrund, dann ist klar zu erkennen, dass der blaue Effekt von ihren „Ästen“ herührt (sozusagen die ersten Verzweigungen, die vom Federschaft entlang der Mitte der Feder abgehen; die noch feineren Abzweigungen von den Seitenästen heißen „Strahlen“). In die Äste ist aber nur Melanin eingelagert, das schwarz oder braun erscheinen müsste. ▶

Ast einer Wellensittichfeder mit künstlich geöffneter Außenschicht (linkes Bild, roter Pfeil). Darunter liegt eine Schicht aus Riesenzellen (gelber Pfeil). Deren Körnung beruht auf winzigen Pigmentkörpern. Am unteren Bildrand sind Membranreste erkennbar. Der in der Mitte abgebildete Schnitt durch einen Federast zeigt die Außenschicht, die aus sehr kleinen Zellen besteht (hellblau im Schema rechts), die Schicht aus konzentrisch orientierten Riesenzellen (im Schema violett) und das Mark aus runden Zellen (rosa), in die schwarze Eumelanin-Makromoleküle eingelagert sind



POUR LA SCIENCE

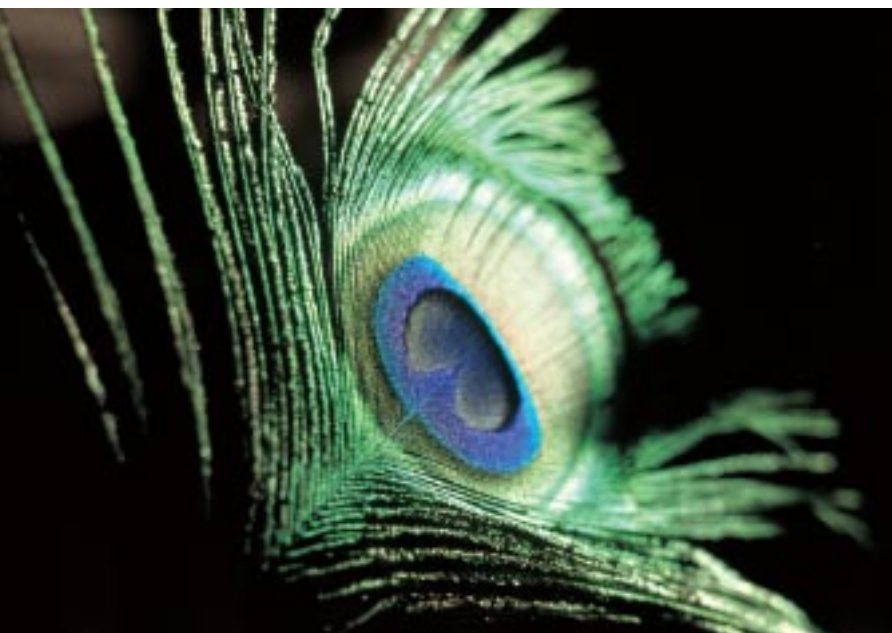
Wieso der Vogel trotzdem blau aussieht, enthüllt das Rasterelektronenmikroskop (Bild auf Seite 37 unten). Im Querschnitt durch einen Federast ist zu sehen, dass sich ein solcher Ast von außen nach innen aus mehreren Schichten zusammensetzt. Er wird außen von einem dünnen Häutchen aus abgeflachten Zellen, der Epidermis, überzogen. Darunter liegt eine Schicht aus im Kreis angeordneter Riesenzellen, die mit winzigen Körnchen von schwarzem Melanin gefüllt sind, das sich fein über die Zellen verteilt. Die Riesenzellen begrenzen das innere Mark des Federastes. Dieses besteht aus kleineren rundlichen Zellen, die ebenfalls Eumelanin enthalten, aber in ganz anderer Verteilung. In ihnen bildet das Pigment riesige längliche Moleküle, die sich an der Peripherie der Zellen strahlenförmig nach außen nebeneinander sortieren.

Das Mark selbst ist durch die großen Melaninmoleküle schwarz. Die blaue Farbe entsteht in den Riesenzellen. Dort streuen die fein verteilten winzigen Pigmentkörnchen das Licht. Und zwar sind sie so winzig, dass sie nur kurzwelliges, also blaues Licht ablenken – ähnlich wie mikroskopische Partikel im Zigarettenrauch diesen im Gegenlicht bläulich erscheinen lassen. Falls die Federstrahlen im Gegensatz zu den Ästen kein Pigment enthalten – wie bei der unten abgebildeten Feder – dann sieht der Vogel hellblau aus. Enthalten die Strahlen aber ebenfalls schwarzes Melanin, entsteht ein dunkleres Blau, da dann mehr von dem nicht gestreuten Licht absorbiert wird. Der Vogel sieht hingegen violett aus, wenn in den Ästen und Strahlen der Feder zusätzlich Phäomelanin eingelagert ist. Ein gelbes Carotinoid an der Oberflä-

che der Federäste wiederum verwandelt das Blau in Grün – wie beim Wildvogel. Der Beweis dafür sind Wellensittiche, die durch Mutation bedingt Carotinoide, die durch Mutation bedingt Carotinoide nicht in ihre Federn einlagern. Diese Vögel sind tatsächlich nicht grün, sondern blau. Und Wellensittiche, die kein Eumelanin produzieren, aber das Carotinoid einbauen, sind gelb. Erst ganz ohne Pigmente erscheinen sie weiß.

Dieses Prinzip der Farbgebung ist für alle Papageien charakteristisch – also für die Psittaciden, zu denen der Wellensittich gehört. Wenn bei ihnen Farbpigmente mutationsbedingt ausfallen, zeigen die verschiedenen Arten stets ein in ähnlicher Weise verändertes Farbleid. Auch viele andere Vögel verdanken demselben Prinzip ihre leuchtenden Farben: zum Beispiel der Eichelhäher oder die australische Gouldamadine, eine Prachtfinkenart. Bei manchen von ihnen bilden die Riesenzellen im Federast ein Rad, bei anderen nicht.

**Die Farben einer Pfauenfeder beruhen auf ihrer komplexen Feinstruktur. Sie verändern sich mit dem Einfallswinkel des Lichts – ein Charakteristikum der Strukturfarben, die durch Mikrolamellen entstehen**

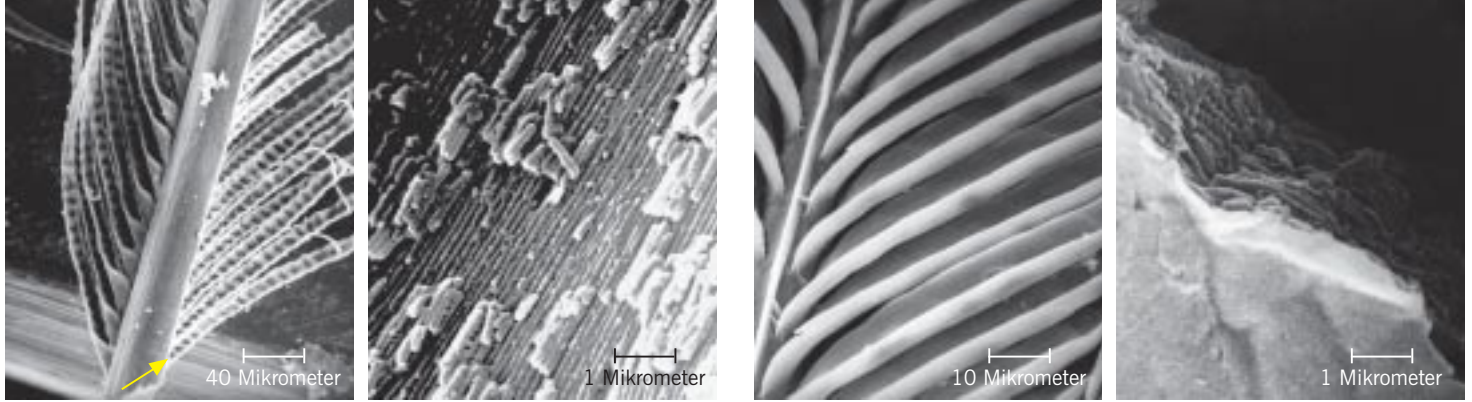


## Lamellen lassen schillern

Der Pfau aber verdankt sein tausendfältig schillerndes Gefieder einem besonderen Prinzip. Der Blick ins Mikroskop offenbart, dass die Farben nicht in den Federästen, sondern sämtlich in deren feineren Seitenstrahlen entstehen. Ein Ausschnitt eines weiß angeleuchteten Pfauenauges vor schwarzem Hintergrund erinnert an ein Kirchenfenster (Bild Seite 39 Mitte). Auf jedem Federstrahl ist eine Kette leuchtender Flecken zu sehen. Die einzelne Farbe hängt von der Position des Flecks auf dem Federstrahl und vom Einfallswinkel des Lichtes ab.

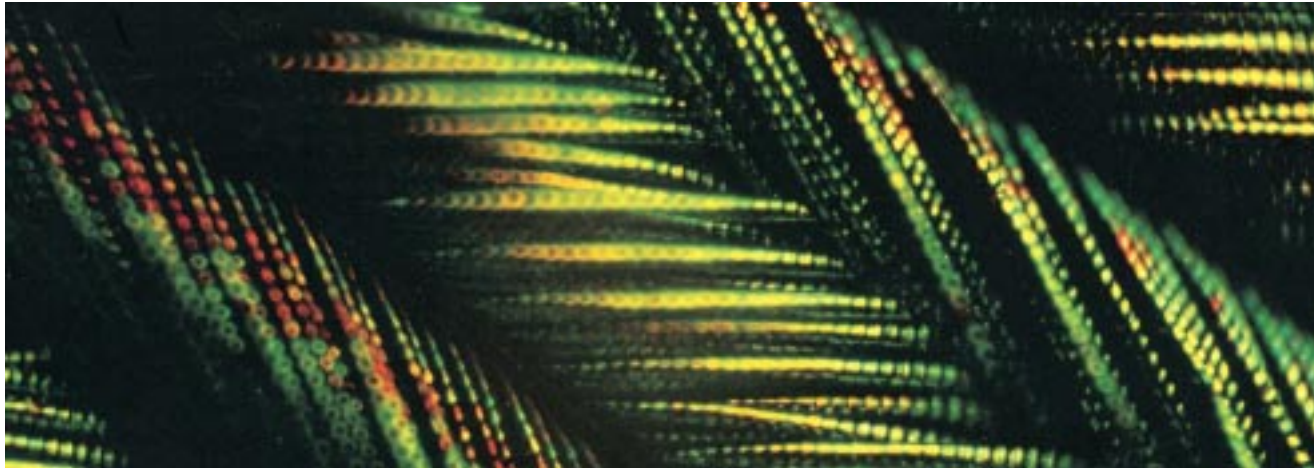
Die Strahlen der Pfauenfeder sind flach geformt und tragen, wo die Flecken erscheinen, winzige napfförmige Vertiefungen. Diese sitzen in Längsrichtung des Strahls aneinander gereiht, jeweils durch eine Querwand getrennt (Bild Seite 39 oben links). Wie eine noch stärkere Vergrößerung erkennen lässt, stehen auf dem Boden einer solchen Vertiefung parallel dicht bei dicht winzige Lamellen (Seite 39 oben links, zweites Bild).

Diese Lamellen erzeugen die schillernden Farben des Pfaus. Durch ihre regelmäßige Anordnung entstehen optische Interferenzen, sodass die Vertiefungen im Sonnenlicht verschiedenfarbig leuchten. Die an benachbarten Lamellen reflektierten Lichtwellen sind nämlich phasenverschoben (ihre Wellenberge sind leicht gegeneinander versetzt). Entspricht die Phasenverschiebung einem ungeraden Vielfachen der halben Wellenlänge, so wird die entsprechende Spektralfarbe ausgelöscht und die komplementäre Farbe verstärkt.



Federstrahl einer Pfauenfeder von der Unterseite. Jeder Strahl trägt entlang seiner Längsachse eine Reihe rundlicher Vertiefungen (Pfeil). Von der Oberseite erscheinen sie als winzige Vorwölbungen. Im rechten Bild die Mikrolamellen auf dem Boden der Vertiefungen.

Die Federstrahlen der Kolibrifeder (links) sind entlang ihrer Längsachse gefaltet und liegen versetzt (im Bild die Unterseite einer Feder). Auch sie tragen Mikrolamellen, die das einfallende Licht zerlegen und so die Farben erzeugen (rechts).



Ausschnitt einer Pfauenfeder unter dem Lichtmikroskop vor dunklem Hintergrund im weißen Streiflicht. Die farbigen Flecken entsprechen den kleinen Vertiefungen auf den Federstrahlen. Die Mikrolamellen am Boden dieser Vertiefungen verursachen farberzeugende Interferenzen

Die Entfernung, die das Licht von einer Lamelle zur anderen zurücklegen muss, hängt von der Richtung des Lichteinfalls ab. Daher ändert sich die Phasenverschiebung und damit die Farbe mit dem Beleuchtungs- und Betrachtungswinkel. Eingelagertes Melanin absorbiert das nicht reflektierte Licht und mindert Reflexionen innerhalb der Lamellen. Deshalb liegen auch jeweils farbige Strahlen auf schwarzen Strahlen, und die Federäste sind generell schwarz. Fehlt das absorbierende Melanin, so werden die Farben unterdrückt, und die Feder erscheint weiß, da das neutrale Licht aus seinen spektralen Komponenten wieder zusammengesetzt wird.

Eine Farberzeugung durch Mikrolamellen ist nicht nur für die Fasanenartigen oder Phasianiden charakteristisch, eine große Familie der Hühnervögel, sondern auch für viele andere lebhaft gefärbte Vögel, so die Paradiesvögel, die Trogons und die Nektarvögel. Wie übrigens auch beim Hahn entsteht das irisierende Glänzen der Halsfedern von Tauben und der Schwingen von Rabenvö-

geln an Mikrolamellen in abgeflachten und parallel stehenden Federstrahlen.

Mikrolamellen findet man auch in den Federn der Kolibris. Die Federstrahlen haben bei ihnen aber eine grundsätzlich andere Struktur als bei den übrigen Vögeln. Sie sind nicht abgeflacht, sondern in sich der Länge nach gefaltet und versetzt angeordnet (siehe Bilder rechts oben). Die Mikrolamellen auf dem oberen Blatt des Federstrahls erzeugen die Farben, die Unterseite verteilt und verstärkt sie, offensichtlich nach dem Prinzip eines Rückstrahlers. Je nach Einfallswinkel des Lichtes können zwei verschiedene Farben entstehen – die Brust eines Kolibris kann zum Beispiel von Rubinrot nach Smaragdgrün changieren. Auch hierbei ist Eumelanin unverzichtbar. Der Abstand zwischen den Mikrolamellen richtet sich präzise nach den entsprechenden Wellenlängen sichtbaren Lichts, auf ein zehntausendstel Millimeter genau. Bei den Pfauen wird die exakte Distanz der Lamellen von einer farblosen Substanz aufrechterhalten, bei den Kolibris sind es extrem dünne Querwände.

Die Welt der Gefiederfarben ist noch weitgehend unerforscht, und immer wieder entdecken die Wissenschaftler überraschende neue Strukturen, die oft für eine geradezu berauschende Kolorierung sorgen. Die Tangaren zum Beispiel sind kleine, äußerst farbenprächtige amerikanische Vögel mit zahlreichen Arten, die vor allem die bunte Vogelwelt der Tropen bereichern. Der Türkisnasenvogel etwa besitzt ein intensiv blaues Gefieder. Die Blaufärbung entsteht wie beim Wellensittich in den Federästen, nur auf völlig andere Weise. Das System basiert in diesem Fall auf Hohlräumen, die von einer Wabenstruktur umschlossen sind. Schwarzes Melanin liegt im Zentrum der Federstrahlen.

Die Verhältnisse zwischen den Wandstärken und den Abständen der Wände sind ähnlich wie bei den Kolibris. Die Wabenstruktur stellt demnach eine Art konzentrisches System aus Mikrolamellen dar, die durch Querstreben genau so stehen, dass sie blaues Licht reflektieren. ■

*Maurice Pomarède ist emeritierter Biologe und Ornithologe.*