

University of Groningen

The Colouration of Bird Feathers explained by Effective-Medium Multilayer Modelling

Freyer, Pascal

DOI:
[10.33612/diss.150815549](https://doi.org/10.33612/diss.150815549)

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:
2021

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):
Freyer, P. (2021). *The Colouration of Bird Feathers explained by Effective-Medium Multilayer Modelling*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. University of Groningen.
<https://doi.org/10.33612/diss.150815549>

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

Summary

Many birds have fascinating colours thanks to feathers with nanoscopic structures made of keratin and melanin (and sometimes air). These structures, with a periodicity in the order of 100-200 nm, are also called biophotonic crystals. The special optical properties of these structures, such as those in the feathers of peacocks, are as yet not fully understood. This thesis presents an in-depth study of the relationship between the structures and colours of a number of bird species, thus contributing to a better understanding of the relationship between the nanoscopic structures and their spectral properties.

In order to understand the optics of the so-called structural colours in bird feathers better, I applied unique optical methods for measuring the scattering of light by microscopic objects, especially imaging scatterometry and spectrophotometry. The measured reflectance spectra could be explained with an accessible transfer-matrix calculation method, because an important component of the colour formation, the melanosomes, organelles that contain melanin, are arranged in layers. I approximated the photonic structures in the feathers as a multilayer, *i.e.* a stack of layers. The multilayer calculations yielded a good match with the reflectance spectra measured as a function of the angle of illumination in the feathers of the different studied birds.

After a general introduction of pigmentary and structural colours, chapter 1 presents the theory of optical thin films and multilayers. This theory was used for the multilayer calculations in the following chapters.

In chapter 2, I analyse the structural colours of two starling species, the European starling, *Sturnus vulgaris*, and the Cape starling, *Lamprotornis nitens*. The feathers of both species only have one layer of keratin, followed by one layer of rod-shaped melanosomes. In the European starling, the melanosomes are solid, but those of the Cape starling are hollow (filled with air). Comparison of the measured reflectance spectra of the feathers of the European starling and the calculated spectra yielded important insight into how the reflectance spectra are created, namely that the thickness of the first keratin layer crucially determines the shape of the final reflectance spectrum. Importantly, this is the case when a multilayer consists of less than three layers. With an increase in the number of layers, such as in the Cape Starling, the contribution of the first keratin layer to the colour formation becomes less important.

In chapters 3 and 4, I study the structural colours of the feathers of the peacock

(*Pavo cristatus*). These feathers have the most complex photonic structures of all birds: two-dimensional-ordered lattices of solid melanosome rods and air channels in keratin. The four most prominent colours of the peacock feathers can be seen in the well-known ring-shaped patterns of the tail feathers. First of all, I demonstrate that a simple multilayer calculation is well able to describe the optics of these very complex structures. Secondly, the photonic structures of the peacock feather show an interesting diversity in the number of layers. Depending on the number of layers, the reflectance spectra have either a complex shape, with double peaks, or a prominent simple shape, with a single peak. A double peak will create mixed colours in the eye of the observer, with a possibility for greater colour variation. For a small number of layers (up to about 5), the keratinous cortex layer is of primary importance for the shape of the reflectance spectrum, which can have a single peak or a double peak, dependent on the thickness value. With a large number of layers (more than 7), always a single spectral peak occurs. Together with the insights from chapter 2, I therefore show here more specifically how the number of layers and their specific structure determine the shape of the reflectance spectrum, and thus the colour.

Chapter 5 shows that the colours of the feathers of the aforementioned starlings and of the duck *Anas platyrhynchos*, the magpie *Pica pica*, and also the peacock, change when exposed to water. To understand the spectral changes, I again applied the approved multilayer calculation method. The conclusion is that the water causes the feather structures to expand, so that the reflectance spectrum shifts towards longer wavelengths, and thus the colour changes.

Thanks to the accessible effective-medium multilayer method described in this thesis, the colours of many bird feathers can now be calculated and understood in detail.

Samenvatting

De kleuren van vogelveren, verklaard met een effective-medium-multilagen model

Veel vogels hebben fascinerende kleuren dankzij veren met nanoscopische structuren. Deze structuren, met een periodiciteit in de orde van 100-200 nm, zijn gemaakt van keratine en melanine (en soms ook lucht), en worden ook wel biofotonische kristallen genoemd. De bijzondere optische eigenschappen van deze structuren, zoals bijvoorbeeld die van pauwen, zijn tot op heden nog weinig begrepen. Er is dus behoefte aan een diepgaande bestudering van het verband tussen de structuren en de kleuren; in het bijzonder hoe de verscheidenheid aan structuren en kleuren (reflectantiespectra) zich tot elkaar verhoudt. In dit proefschrift dragen wij bij aan een beter begrip voor deze verhouding tussen bepaalde nanoscopische structuren en de spectrale eigenschappen. Tegelijkertijd maken wij gebruik van een veel toegankelijker methode om de reflectantiespectra te kunnen berekenen en te begrijpen.

Om de optica van deze zo genoemde structurele kleuren in vogelveren beter te begrijpen is het belangrijk om gedetailleerde metingen en berekeningen uit te voeren. Door het toepassen van unieke optische technieken waarmee de verstrooiing van licht door microscopisch kleine objecten kan worden gemeten en met behulp van verschillende microscopie- en spectrofotometrie-methodes zijn de hoekafhankelijke spectrale eigenschappen van de veren bestudeerd. De gemeten reflectantiespectra konden worden verklaard met een toegankelijke matrix-berekeningsmethode door de fotonische structuren in de veren te beschouwen als een multilaag, oftewel een stapeling van lagen. Een belangrijke component van de kleurvorming zijn de melanosomen, organellen die melanine bevatten, die in lagen geordend zijn. De multilaagberekeningen gaven een goede overeenkomst met de gemeten reflectiespectra als functie van de belichtingshoek bij de veren van verschillende vogels.

Na een algemene introductie van pigmentkleuren en structurele kleuren wordt in Hoofdstuk 1 de theorie van optische dunne-lagen en multilagen uiteengezet. Deze theorie wordt in latere hoofdstukken voor de multilaagberekeningen gebruikt.

In Hoofdstuk 2 analyseer ik de structurele kleuren van twee spreeksoorten, de Europese spreek, *Sturnus vulgaris*, en de Kaapse spreek, *Lamprotornis nitens*. Deze hebben allebei maar één laag keratine, gevolgd door één laag met staafvormige melanosomen. Bij de

Europese spreeuw zijn de melanosomen massief, maar die van de Kaapse spreeuw zijn hol, gevuld met lucht. Vergelijking van de gemeten reflectantiespectra van de veren van de Europese spreeuw en de berekende spectra leverde een belangrijk nieuw inzicht op, namelijk dat de eerste keratinelaag bepalend is voor de vorm van het uiteindelijke reflectantiespectrum. Dit is het geval als de multilaag uit minder dan drie lagen bestaat. Bij een toename van het aantal lagen, zoals in de Kaapse spreeuw, wordt de bijdrage van de eerste keratinelaag aan de kleurvorming steeds minder belangrijk.

In Hoofdstuk 3 en 4 bestudeer ik de structurele kleuren van de veren van de pauw (*Pavo cristatus*). Deze veren hebben de meest complexe fotonische structuren van alle vogels: twee dimensionaal-geordende roosters van massieve melanosoom-staafjes en luchtkanalen in keratine. De vier meest prominente kleuren van de pauwenveren zijn te zien in de goed bekende, ringvormige patronen van de staartveer. Hierbij toon ik ten eerste aan dat een simpele multilaagberekening goed in staat is om de optica van deze zeer complexe structuren te beschrijven. Ten tweede, de fotonische structuren van de pauwenveer tonen een interessante diversiteit in het aantal lagen. Afhankelijk van het aantal lagen hebben de reflectantiespectra een complexe vorm, met dubbele pieken, of een prominente eenvoudige vorm met een enkele piek. Een dubbele piek zal gemengde kleuren tot stand brengen in het oog van de waarnemer, met een mogelijkheid voor grotere kleur variatie. Bij een gering aantal (tot ca. 5) lagen is de dikte van de eerste laag, bestaand uit keratine, van primair belang voor de vorm van het reflectantiespectrum, die dan vaak dubbele pieken vertoont. Bij een groot aantal (meer dan 7) lagen resulteert altijd slechts een enkele spectrale piek. Samen met de inzichten uit hoofdstuk 2, toon ik hier aan dat het aantal lagen en de specifieke structuur ervan bepalend zijn voor de vorm van het reflectantiespectrum, en dus voor de kleur.

Hoofdstuk 5 laat zien dat de kleuren van de veren van de hiervoor genoemde spreeuwen en van de eend *Anas platyrhynchos*, de ekster *Pica pica*, en ook de pauw, veranderen wanneer ze blootgesteld worden aan water. Om de spectrale veranderingen te begrijpen heb ik weer de beproefde multilaagberekeningmethode toegepast. De conclusie is dat het water de veerstructuren doet uitzetten, zodat het reflectantiespectrum verschuift en de kleur verandert.

Dankzij het onderzoek beschreven in dit proefschrift kunnen de kleuren van veel vogelveren nu met de toegankelijke effective-medium-multilagen methode gedetailleerd, kwantitatief begrepen worden.

Zusammenfassung

Farben der Vogelfedern erklärt durch einen Effektives-Medium Multilagenansatz

Viele Vögel haben faszinierende Farben dank nanoskopischen Strukturen in ihren Federradien. Die Nanostrukturen befinden sich an der Oberfläche der Radien, besitzen eine Periodizität in der Größenordnung von 100-200 Nanometern, und bestehen aus Keratin und Melanin (und manchmal auch Luft). Solche Strukturen werden oft als bio-photonische Kristalle bezeichnet. Die besonderen optischen Eigenschaften dieser Strukturen, welche beispielsweise in den Federn des Pfau anzufinden sind, sind noch nicht vollkommen verstanden. Mit dieser Doktorarbeit trage ich zu einem besseren Verständnis des Zusammenhangs zwischen bestimmten nanoskopischen Strukturen und deren spezifischen, optischen Eigenschaften bei. Gleichzeitig benutze ich eine einfache und sehr zugängliche Methode zur Berechnung und zum Verständnis der Reflektionsspektren.

Um die Optik dieser so genannten Strukturfarben in Vogelfedern besser zu verstehen, habe ich eine einzigartige optische Technik angewandt um die Streuung des Lichts an mikroskopischen Objekten zu studieren. Des Weiteren habe ich verschiedene Mikroskopie- und Spektrophotometrie-Methoden eingesetzt um aus diesen Abbildungen in Kombination mit der quantitativen Messung der Reflektions-, Absorptions- und Transmissionspektren neue Einsichten zu gewinnen. Diese optischen Messungen konnten durch Berechnungen mit Hilfe der Transfer-Matrix Methode erklärt werden bei der die photonischen Strukturen als Multilagen, d.h. als ein Stapel von Schichten verschiedener Brechungsindizes, approximiert wurden. Ein wichtiger Bestandteil der Farbgebung sind die Melanosomen, melaninhaltige Organellen, die in Schichten in einer Matrix aus Keratin angeordnet sind. Die Multilagenberechnungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Reflektionsspektren der verschiedenen Vogelfedern, welche als Funktion des Beleuchtungswinkels gemessen wurden.

Nach einer allgemeinen Einführung zu Pigmentfarben und Strukturfarben wird im ersten Kapitel die Theorie optischer Dünnschichten und Multilagen vorgestellt. Diese Theorie formt die Basis der Multilagenberechnungen, welche in den übrigen Kapiteln ausgiebig verwendet wird.

In Kapitel 2 analysiere ich die Strukturfarben von zweier Stare, dem europäischen Star,

Sturnus vulgaris, und dem südafrikanischen Glanzstar, *Lamprotornis nitens*, auch bekannt als Blaustar. Die Federn beider Vögel enthalten eine Schicht aus Keratin, unter der eine einzelne Lage stabförmiger Melanosomen anzutreffen ist. Beim europäischen Star sind die Melanosomen massiv, die des Glanzstars sind dagegen hohl. Der Vergleich der gemessenen Reflektionsspektren der Federn mit den berechneten Spektren erlaubt die Einsicht wie die Reflektionsspektren entstehen. Bei dem europäischen Star ist es massgeblich die erste Keratinschicht, die die Form des endgültigen Reflektionsspektrums bestimmt. Dies ist insbesondere der Fall, wenn die Multilagenstruktur aus weniger als drei Schichten besteht. Mit zunehmender Schichtanzahl, wie z.B. bei den Federn des Glanzstars, verliert der Beitrag die erste Keratinschicht zur Farbbildung zunehmend an Bedeutung.

In den Kapiteln 3 und 4 untersuche ich die Strukturfarben von Pfauenfedern (*Pavo cristatus*). Diese Federn haben eine der komplexesten photonischen Strukturen, welche in Vogelfedern angetroffen werden kann: zwei-dimensional angeordnete Dualgitter aus massiven Melanosomenstäbchen und Luftkanälen, eingebettet in eine Keratinmatrix. Die vier markantesten Farben der Pfauenfedern formen das ringförmigen Muster der Schwanzfedern. Zunächst einmal zeige ich, dass eine einfache Multilagenberechnung die Optik dieser komplexen Strukturen gut beschreiben kann. Zweitens zeigen die photonischen Strukturen in den Pfauenfedern eine interessante Vielfalt in der Anzahl der Einzellagen. Abhängig von dieser Anzahl haben die Reflektionsspektren eine komplexe Form mit zwei dominanten Intensitätsmaxima oder eine einfache Form mit nur einem dominanten Maximum. Im Falle der Doppelmaxima werden gemischte Farben im Auge des Beobachters erzeugt, so wie bei der braunen und lilanen Farbe der Pfauenfeder. Bei einer kleinen Anzahl von bis zu etwa fünf Einzellagen ist die Dicke der Keratin-Kortexschicht von primärer Bedeutung für die Form des Reflektionsspektrums, welches in der Regel Doppelmaxima zeigt. Bei einer grossen Anzahl von mehr als sieben Einzellagen entsteht nur ein einziges Intensitätsmaximum. Zusammen mit den Erkenntnissen aus Kapitel 2 erkläre ich genauer, wie die Anzahl der Schichten und ihre spezifische Struktur die Form des Reflektionsspektrums und damit die zu beobachtende Farbe bestimmen.

In Kapitel 5 zeige ich, dass sich die Farben der Federn der Stare, der Stockente *Anas platyrhynchos*, der Elster *Pica pica* und auch des Pfaus verändern, wenn sie mit Wasser in Berührung kommen. Um die spektralen Veränderungen zu verstehen, habe ich wieder die bewährte Multilagen-Berechnungsmethode angewandt. Die Schlussfolgerung ist, dass das Wasser eine Ausdehnung der Strukturen bewirkt, welches wiederum das Reflektionsspektrum

verschiebt und somit auch die Farbe verändert.

Dank der Erkenntnisse dieser Dissertation, können nun viele andere Vogelfederfarben mit der zugänglichen Effektiv-Medium-Multilagenmethode berechnet werden.

