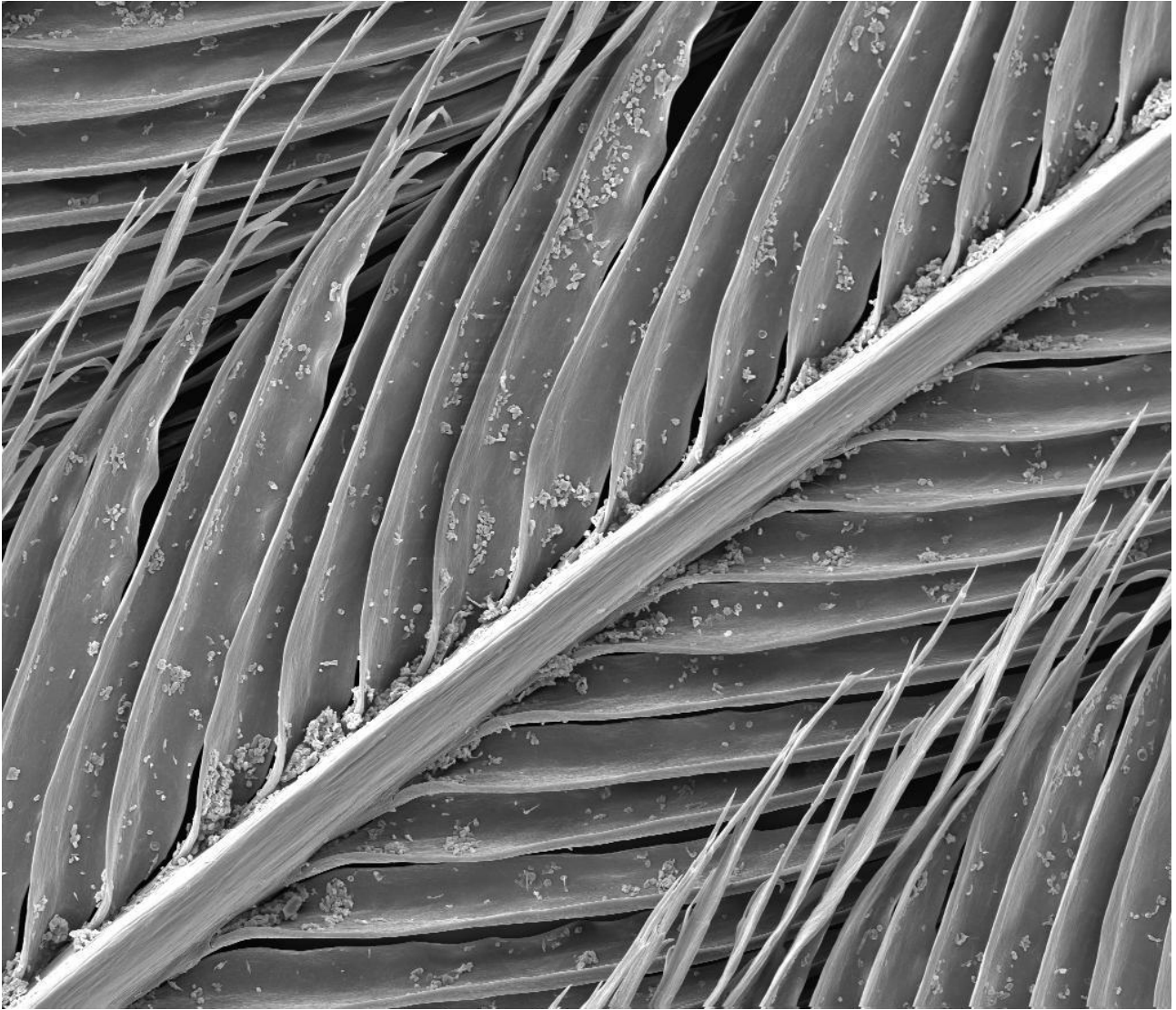


Strukturfarben bei einheimischen Vogelfedern



Xenia Hunter, 4a, Wettbewerbsarbeit für Schweizer Jugend forscht,

Betreuungsperson: Christoph Wüthrich

Koreferent: Martin Schläpfer

Gymnasium Bäumlhof

Basel, 31.10.2021

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
Danksagung.....	4
Zusammenfassung.	5
1. Einleitung.....	6
1.1 Hypothese.....	6
1.2 Anatomie Vögel.....	7
1.2.1 Gefiedertopografie.	7
1.2.2. Grundbau Feder.....	7
1.3 Licht und Lichtbrechung.	7
1.4 Pigmentfarben und Haftfarben.	9
1.5 Strukturfarben.	10
1.5.1 Diffuse Reflexion (ungeordnet).....	10
1.5.2 Dünnschichtinterferenz (geordnet).	11
1.5.3 Photonische Kristalle oder Gitterfarbe (geordnet).....	13
1.5.4 Multischichtinterferenz oder eindimensionale photonische Strukturen.....	14
1.5.5 Zweidimensionale photonische Strukturen.	14
1.5.6 Dreidimensionale photonische Strukturen.	16
1.5.7 Amorphe Strukturen.	16
1.6 Zusammenwirken von Struktur- und Pigmentfarben.....	17
1.6.1 Mischfarben aus Struktur- und Pigmentfarben.....	17
1.6.2 Intensivierung von Strukturfarben durch Melanin.....	18
2. Material und Methoden.	19
2.1 Federn.	19
2.1.1 Kriterien und Eigenschaften.	19
2.1.2 Materialbeschaffung.....	19
2.1.3 Federtypen.....	19
2.2 Kamera.	20
2.3 Mikroskopentypen.....	20
2.4 Untersuchung der Federn.	20
2.4.1 Eigenschaften der Federn.....	20
2.4.2 Bildaufnahmeprozess.....	21
2.4.3 Datenauswertung.	22
3. Resultate.....	23
3.1 Elster (weiss).	23
3.1.1 Elster (weiss) LM und LSM.....	23
3.1.2 Elster (weiss) REM.....	24
3.2 Elster (schimmernd).....	25

3.2.1 Elster (schimmernd) LM und LSM.	25
3.2.2 Elster (schimmernd) REM.	27
3.3 Eichelhäher.	28
3.3.1 Eichelhäher LM und LSM.	28
3.3.2 Eichelhäher REM.	29
3.4 Stockente.	30
3.4.1 Stockente LM und LSM.	30
3.4.2 Stockente REM.	32
3.5 Eisvogel.	32
3.5.1 Eisvogel LM und LSM.	32
3.5.2 Eisvogel REM.	34
3.6 Blaumeise.	34
3.6.1 Blaumeise LM und LSM.	34
3.6.2 Blaumeise REM.	36
3.7 Grünspecht.	37
3.7.1 Grünspecht LM und LSM.	37
3.7.2 Grünspecht REM.	38
4 Diskussion	39
4.1 Schwierigkeiten beim Mikroskopieren.	39
4.2 Vergleiche zur Hypothese.	39
4.2.1 Unterschiede.	39
4.2.2 Gemeinsamkeiten.	39
4.3 Probleme bei der Datenauswertung.	40
4.4 Einordnung der Federn in die verschiedenen Farbentstehungsweisen.	40
4.5 Weitere potentielle Untersuchungspunkte.	44
5 Quellen- und Literaturverzeichnis.	45
6 Ehrlichkeitserklärung.	48
7 Anhang.	49

Vorwort

Auf das Thema Strukturfarben wurde ich aufmerksam, da mich schillernde Farben wie sie bei vielen Käfern und Schmetterlingen auftreten faszinierten. Ich wusste, dass diese Farben aufgrund von Strukturen entstehen und deshalb auch Strukturfarben genannt werden. Doch wie sind diese Strukturen aufgebaut und wieso entstehen die verschiedenen Farben?

Ursprünglich wollte ich meine Maturaarbeit über die Entstehungsweise von Strukturfarben bei Chamäleons schreiben. Dies stellte sich als schwierig heraus, da Hautpräparate von Chamäleons aufgrund von Regelungen zum Schutz gefährdeter Arten der CITES (Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora) nicht abgegeben werden dürfen.

Auf die Idee, mich auf Strukturfarben bei Vögeln zu fokussieren, hat mich schliesslich meine Betreuungsperson Christoph Wüthrich gebracht. Ich entschied mich ausserdem dazu, mich auf Schweizer Vögel zu fokussieren, da die Entstehungsweisen oft weniger gut erforscht sind als bei farbenprächtigeren Vögeln wie dem Pfau.

Erst durch meine Arbeit fiel mir auf, wie häufig wir im Alltag auf Strukturfarben treffen und lernte über die Farbentstehung von Dingen, die mich täglich umgeben. So erfuhr ich beispielsweise, wie die Farbe des Himmels entsteht und warum sie sich Verlauf des Tages von rötlich bis blau verändert. Aber auch, wieso sind manche Augen blau, und Rotwein rot ist. Heute achte ich viel öfters darauf, welche Farben mich umgeben und wie diese entstehen.

Ausserdem lernte ich viel über die wissenschaftliche Arbeitsweise. Konnte kleine Einblicke hinter die Kulissen eines Labors und eines Museums werfen und über technische Möglichkeiten im Bereich der Mikroskopie lernen.

Das Thema fasziniert mich weiterhin sehr stark und ich bin überzeugt davon, in Zukunft mehr im Bereich der Wissenschaft zu machen!

Danksagung

Gerne möchte ich mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die mir beim Schreiben dieser Maturaarbeit geholfen haben.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meiner Betreuungsperson Christoph Wüthrich, welcher allfällige Fragen immer beantworten konnte und mich im Falle von Zweifeln an meiner Arbeit stets unterstützt und ermutigt hat.

Eine Arbeit in diesem Rahmen wäre ohne die grosszügige Unterstützung des «Nano Imaging Labs» des «Swiss Nanoscience Institutes» der Universität Basel und deren Mitarbeiter*innen nicht möglich gewesen. Insbesondere bedanken möchte ich mich bei Daniel Mathys für die Hilfe bei der Präparation der Proben, die Einführung in die Benutzung des REMs und die Betreuung meiner Arbeit im Allgemeinen. Auch Dr. Monica Schöneberger möchte ich meinen herzlichen Dank für die Hilfe bei der Bedienung des LSM zusprechen. Ich habe die Zeit im Nano Imaging Lab sehr genossen und viel Neues dazugelernt!

Beim Naturhistorischen Museum Basel möchte ich mich für die grosszügige Bereitstellung der Federn bedanken. Vielen Dank an David Marques und Raffael Winkler für die Betreuung meiner Arbeit!

Zuletzt möchte ich mich noch bei meinem Vater, Mario Zulauf, bedanken, welcher meine Arbeit gegenlas und stets interessiert am Verlauf der Arbeit war.

Zusammenfassung

Farben bei Vogelfedern entstehen aufgrund von Pigmenteinlagerungen, Haftfarben oder Strukturfarben. Die Strukturfarben können weiter in folgende drei Grundprinzipien von Entstehungsweisen unterteilt werden:

Ungeordneten Strukturen: Es werden alle Wellenlängen des Lichts ungeordnet reflektiert. Die entstehende «Farbe» ist weiss. Es kommt nicht zu konstruktiver oder destruktiver Interferenz.

Quasi-geordnete Strukturen: Amorphe, schwammartige Keratinnetze führen zu kohärenter Streuung. Durch Interferenzeffekte verstärken sich gewisse Wellenlängen und andere schwächen sich ab.

Geordnete Strukturen: Das eintreffende Licht wird an periodischen Strukturen gezielt gestreut. Auch hier verstärken sich durch Interferenz gewisse Wellenlängen und andere schwächen sich ab.

In dieser Arbeit wurde die Oberflächenstruktur einheimischer Vogelfedern (Eichelhäher (*Garrulus glandarius*), Eisvogel (*Alcedo atthis*), Stockente (*Anas platyrhynchos*), Grünspecht (*Picus viridis*), Blaumeise (*Cyanistes caeruleus*) und Elster (*pica pica*)) unter dem Rasterelektronen-, Laser- und Lichtmikroskop untersucht und verglichen. Dabei konnte kein Zusammenhang zwischen oberflächlich sichtbaren Strukturen und den daraus resultierenden Farben erkannt werden.

Durch Vergleiche mit bestehender Literatur, bei welcher auch die Querschnitte der Federn untersucht wurden, konnte bei allen untersuchten Federn auf die Entstehung von Farben aufgrund von Strukturfarben geschlossen werden. Des Weiteren konnten die Federn in die verschiedenen Entstehungsweisen eingeteilt werden.

1. Einleitung

Das Sehen spielt für den Menschen, aber ganz allgemein in der Natur, wie auch bei Vögeln, eine wichtige Rolle in der Informationsbeschaffung und -übermittlung. Farbe kann dabei verschiedene Zwecke erfüllen: Sie wird einerseits zur Tarnung, andererseits zur Warnung oder bei der Balz gezielt eingesetzt. Die kräftigsten und hellsten Farben entstehen dabei meist aufgrund von optischen Effekten an Nanostrukturen (Kolle, 2011), so genannten Strukturfarben. Auch bei Vögeln fallen gewisse Arten, wie beispielsweise der Pfau (*Pavo cristatus*), durch ihr farbenprächtiges Gefieder auf. Die Nanostrukturen befinden sich in den Federn. Die Farben sind auf verschiedene optische Phänomene zurückzuführen, weshalb sich die Strukturen je nach Vogelart stark unterscheiden.

In dieser Arbeit wird auf die verschiedenen Entstehungsweisen von Farben und die dahintersteckenden optischen Phänomene eingegangen. Dafür wurden verschiedene einheimische Vogelarten unter dem Mikroskop auf den Aufbau der Strukturfarben untersucht. Durch einen Vergleich mit der aktuellen Literatur konnte so ein Einblick in die Entstehungsweise der Strukturfarben gewonnen werden.

1.1 Hypothese

(1) Die Farben der von mir untersuchten Federn entstehen aufgrund von Strukturfarbe. (2) Es beruhen vor allem Grün- und Blautöne, aber auch schillernde Farben auf Strukturfarben. (3) Schillernde- und Nicht-schillernde-Strukturfarben unterscheiden sich im Aufbau.

(4) Bei schillernden Farben (Stockente, schimmernde Elsterfeder) entsteht die Farbe in den Federstrahlen. Die Strukturen sind aus Zellen aufgebaut. (5) An der äussersten Schicht («den Wänden») dieser Zellen bricht sich das Licht und es kommt zur Interferenz. (6) Die Dicke dieser Zellwände variiert nach Farbe. (7) Dabei entspricht die Grösse der Nanostruktur, an der sich das Licht bricht (also der «Zellwand»), in etwa der Grösse der daraus resultierenden Wellenlänge. (8) Die Grösse der Zellen korreliert, aufgrund der Grössenunterschiede der Nanostrukturen, mit der resultierenden Wellenlänge. (9) Zellen violetter Federn (kurze Wellenlänge) sind also kleiner als Zellen blauer Federn (längere Wellenlänge).

(10) Nicht-schillernde Farben (Eisvogel, Eichelhäher, Grünspecht, Blaumeise) entstehen in den Federästen (10) aufgrund von amorphen Keratinnetzwerken. (11) Unterschiede in der Grösse der Lufteinschlüsse führen zu Unterschieden im entstehenden Farbton. (12) Es ist ein Zusammenhang zwischen Grösse der Federäste und der entstehenden Wellenlänge feststellbar.

1.2 Anatomie Vogel:

1.2.1 Gefiedertopographie

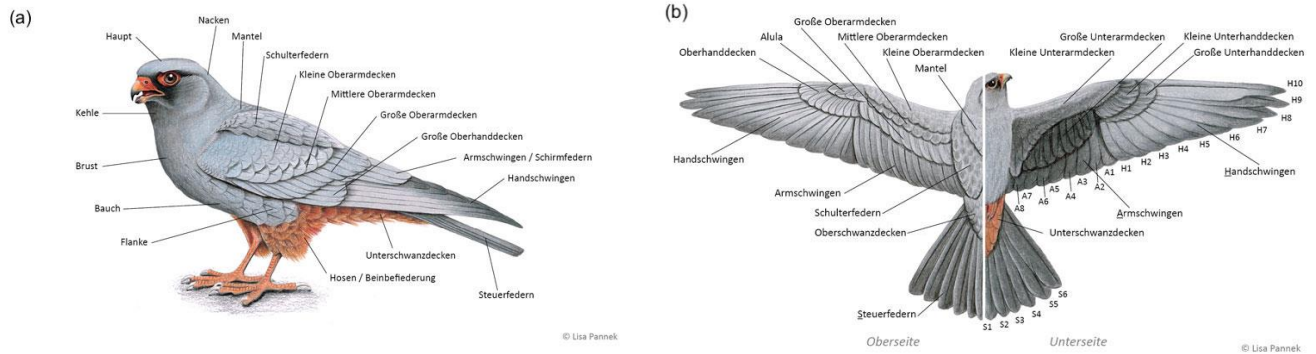


Abbildung 1: Schematische Vogeltopografie mit (a) Seitenansicht; (b) Ober- und Unterseitenansicht, @featherbase

1.2.2 Grundbau Feder

Eine Konturfeder ist aus einem langen Federkiel aufgebaut, an dem beidseitig die Federfahne befestigt ist. Die Federfahne ist aus Federästen aufgebaut, von welchen wiederum Federstrahlen entspringen. Federstrahlen werden weiter in distale Haken- und proximale Bogenstrahlen unterteilt (Abbildung 2). Dabei sind Haken- und Bogenstrahlen durch feine Hähchen verhakht, was für mehr Stabilität sorgt (Zobl, 2018).

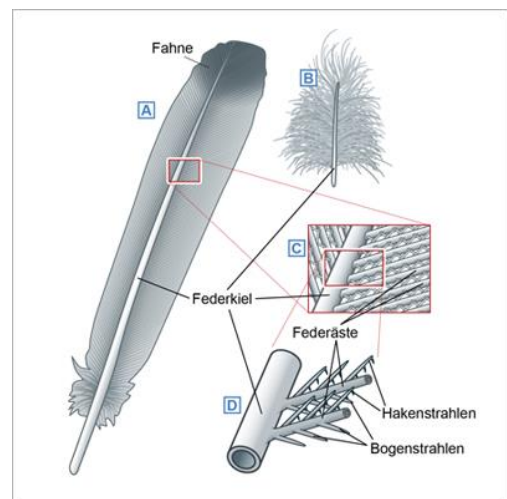


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Konturfeder @Emde Grafik

1.3 Licht und Lichtbrechung

Licht wird in dieser Arbeit in der Wellenoptik betrachtet und als elektromagnetische Welle behandelt. Dabei ist die Farbe des Lichts von seiner Wellenlänge abhängig und kann so in das elektromagnetische Spektrum eingeteilt werden (Abbildung 3). Die Unterteilung in Farbtöne ist dabei nicht klar definiert und die Bereiche gehen ineinander über (Tilley, 2011). Für das menschliche Auge ist dabei ungefähr ein Bereich zwischen 380 nm (Violett) und 780 nm (Rot) sichtbar (Wikipedia: Elektromagnetisches Spektrum, 3.4.2021). Dieser Bereich wird als Lichtspektrum oder Farbspektrum bezeichnet (Wikipedia: Elektromagnetisches Spektrum, 3.4.2021).

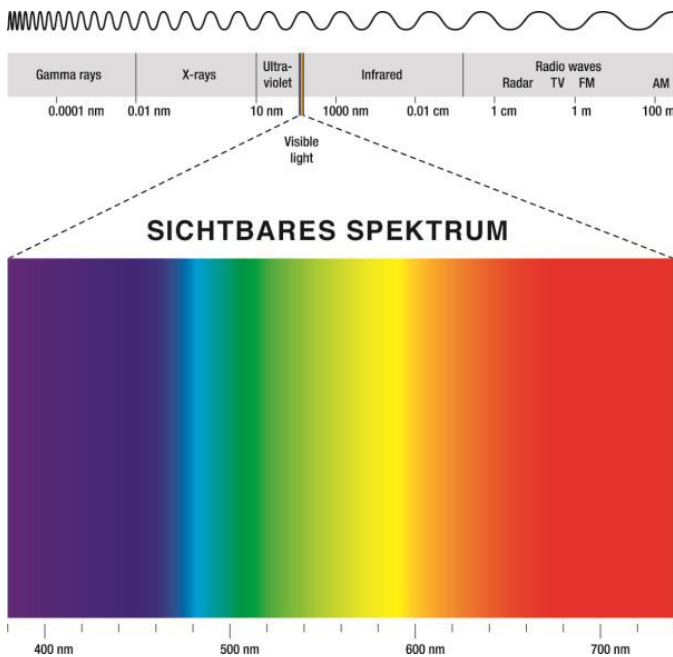


Abbildung 3: Für menschliches Auge sichtbares Licht im elektromagnetischen Spektrum @Peter Hermes (Furian/Shutterstock)

höherem Brechungsindex, kommt es zum Phasensprung (Abbildung 4) (Schmidt, 1955). Das heisst, dass die an der Grenzfläche reflektierte Welle im Vergleich zur an der Grenzfläche eintreffenden Welle um eine halbe Wellenlänge verschoben ist. Das entspricht einer Phasenverschiebung von 180° .

Dabei gilt:

- Von grösserem zu kleinerem Brechungsindex: Licht wird zum Material hin gebrochen (Tilley, 2011, S. 27).
- Von kleinerem zu grösserem Brechungsindex: Licht wird vom Material weg gebrochen (Tilley, 2011, S. 27).
- Der Brechungsindex steigt bei abnehmender Wellenlänge (Tilley, 2011)
→ Rotes Licht wird beispielsweise weniger stark gebrochen als violettes Licht.

Man unterscheidet zwischen monochromatischem Licht, welches aus nur einer Wellenlänge besteht und weissem Licht, welches aus mehreren Wellen unterschiedlicher Längen zusammengesetzt ist (Wikipedia: Elektromagnetisches Spektrum, 3.4.2021).

Trifft Licht auf eine Grenzfläche wird es reflektiert, absorbiert, gestreut oder gebeugt. (Tilley, 2011). Streuung und Beugung können dabei, aufgrund ihres geringen Einflusses auf Strukturfarben, vernachlässigt werden (Tilley, 2011).

Treffen die Lichtstrahlen auf eine Grenzfläche zu einem optisch dichteren Medium, also einem stärker lichtbrechenden Medium mit

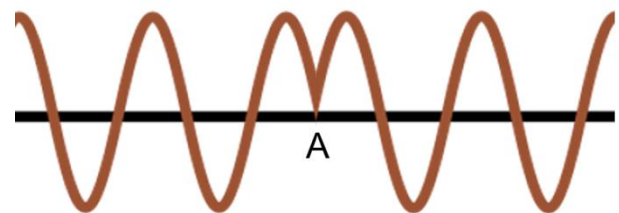


Abbildung 4: Schematische Darstellung einer Wellenverschiebung.
A: Ort des Phasensprungs um 180°

Treffen dabei mehrere Wellen aufeinander kommt es zur Interferenz und deren Abweichungen in der Phase addieren sich. Dies geschieht nach dem Prinzip der Superposition (Tilley, 2011). Dabei unterscheiden sich die aufeinandertreffenden Wellen in ihrer Schwingungsphase, nicht aber in ihrer Amplitude (Schmidt, 1949).

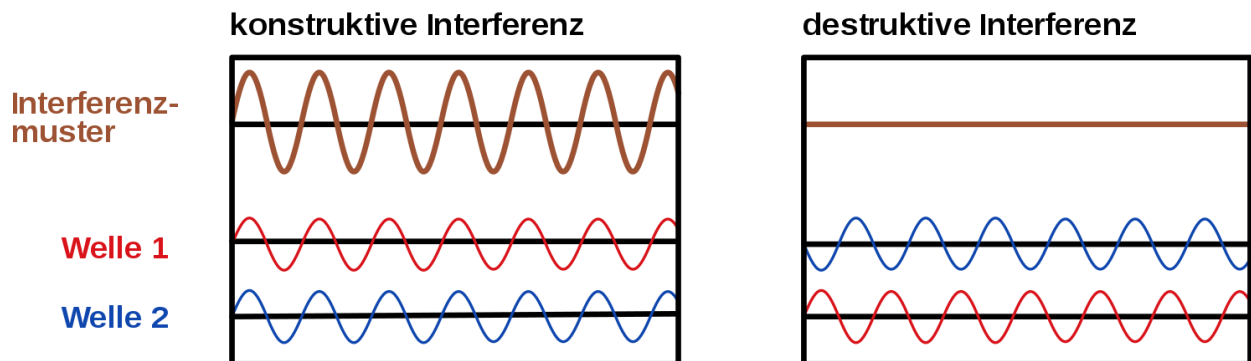


Abbildung 5: Schematische Darstellung von konstruktiver und destruktiver Interferenz @Wikipedia: Interferenz (Physik), 2016

Es wird zwischen konstruktiver und destruktiver Interferenz unterschieden (Abbildung 5). Bei konstruktiver Interferenz ist der Gangunterschied, also der Unterschied in der Phase zwischen den Wellen, gleich einer ganzen Wellenlänge (Grundwissen-physik: Wellenoptik, 2018). Dabei verstärken sich die Wellen. Destruktive Interferenz tritt auf, wenn der Gangunterschied gleich der Hälfte oder einem ungradzahligen Vielfachen der Wellenlänge entspricht. Die Lichtwellen verlaufen in entgegengesetzten Phasen und löschen sich gegenseitig aus (Grundwissen-physik: Wellenoptik, 2018).

1.4 Pigmentfarben und Haftarben

Pigmente sind farbgebende Substanzen, welche selektiv bestimmte Anteile des Lichts absorbieren. Die übrigen Teile des Lichts (also die Komplementärfarbe) werden reflektiert, gestreut oder transmittiert und sind als Mischfarbe sichtbar. Pigmentfarben beruhen auf den chemischen Eigenschaften von Stoffen (Tilley, 2011).

Längere Wellenlängen werden weniger stark absorbiert (Stavenga et al., 2018). Aufgrund dessen können durch Pigmente fast nur Farben in längerem Wellenlängenbereich wie rot oder gelb produzieren (Eliason et al., 2012). Dabei weisen Vögel verschiedene Klassen von Pigmenten auf (Hill and McGraw, 2006). Die wichtigsten sind Melanine (Stavenga et al., 2011) (bräunlich bis schwarze Färbung) und Karotinoide (gelblich bis rötliche Färbung). Ausnahmen bilden dabei grüne Pigmente wie zum Beispiel beim Blutfasan (*Ithaginis cruentus*) (Frank, 1939, Auber, 1965).

Haftarben oder auch Kontaktfarben beruhen entweder auf körpereigenen Substanzen wie beispielsweise beim Alpenschneehuhn durch Aufrieb des Bürzeldrüsensekrets (Jacobi, 1918, Bergmann, 1998) oder sie beruhen auf exogenen Farbstoffen (Berthold, 1967; Bergmann 1998; Delhey 2017; Zobl, 2019). Diese exogenen Farbstoffe lagern sich beispielsweise bei Sandbädern

wie beim Alpenschneehuhn (Bergmann, 1998) auf dem Gefieder ab und führen so zu einer Veränderung der Färbung des Tieres. Ein weiteres bekanntes Beispiel für exogene Farbstoffe ist die typische rote Färbung von Bartgeiern, welche diese durch Baden in eisenoxidhaltigem Wasser erhalten (Berthold, 1967).

1.5 Strukturfarben

Bei Strukturfarben handelt es sich um Farben, welche aufgrund von optischen Effekten an Nanostrukturen entstehen. Die Mechanismen von Strukturfarben beruhen auf physikalischen Prinzipien (Kinoshita et al., 2008). Die verschiedenen Strukturfarben können in drei Grundprinzipien eingeteilt werden:

1. Ungeordnete Strukturen

- Diffuse Reflexion

(Kapitel 1.5.1)

3. Geordnete Strukturen

- Dünnschichtinterferenz

(Kapitel 1.5.2)

- Photonische Kristalle

(Kapitel 1.5.3 - 1.5.5)

2. Quasi-geordnete Strukturen

- Amorphe Strukturen

(Kapitel 1.5.7)

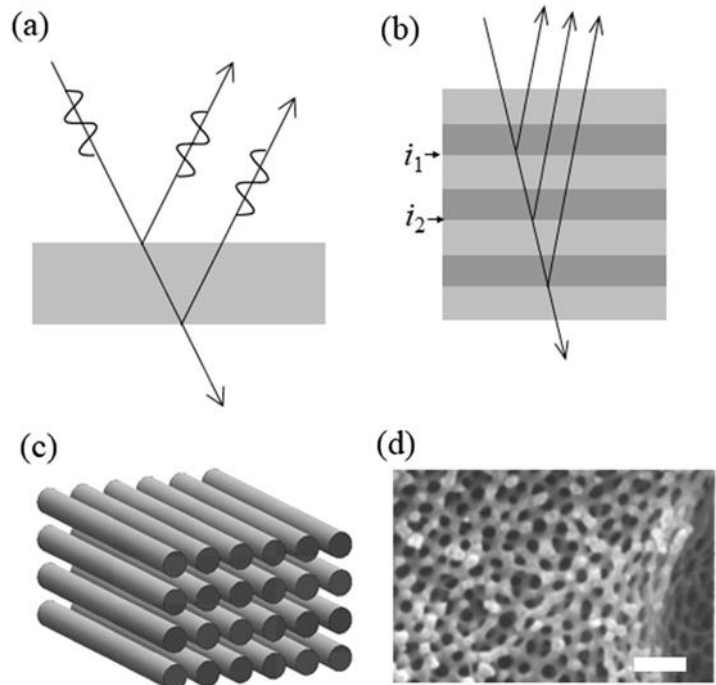


Abbildung 6: Verschiedene Entstehungsweisen von Strukturfarben schematisch dargestellt (a, b, c) und als Aufnahme (d) (Yoshioka et al., 2021), (a) Dünnschichtinterferenz, (b) Multischichtinterferenz und (c) zweidimensionale photonische Kristalle zusammengefasst als photonische Kristalle, (d) amorphe Strukturen (REM-Aufnahme eines Querschnitts eines Federasts einer Eisvogelfeder)

Die verschiedenen Grundprinzipien variieren je nach Vogelart und auch innerhalb der Feder je nach Farbe. Dabei wirken oft Pigment- und Strukturfarben zusammen (Kapitel 1.6) (Kinoshita et al., 2008).

1.5.1 Diffuse Reflexion (ungeordnet):

Weiss entsteht aufgrund von ungeordneter Reflexion aller Wellenlängen des Lichts an den Strukturen (Frank, 1939, Igic, 2018). Es kommt nicht gerichtet zu konstruktiver oder destruktiver Interferenz und somit auch nicht zur Intensivierung gewisser Wellenlängen. Durch die Absenz von Pigmenten werden nicht gewisse Lichtanteile absorbiert. Auf diese Weise entsteht beispielsweise auch die weiße Farbe bei Milch, Schnee oder weissem Haar (Schmidt, 1949).

Bei der Feder bricht das Licht an den Luftporen im stärker lichtbrechenden umliegenden Gewebe aus Keratin (Schmidt, 1949). Die Helligkeit (Intensität) des Weiss ist dabei davon abhängig,

wie viel Licht gestreut wird (Ilgic, 2018). Dies wird durch die Grösse, Komplexität, Distanz und Form der Federäste und -strahlen beeinflusst. Je grösser, länger und dichter zusammenstehend die Federäste und -strahlen, desto stärker die Streuung und desto heller das Weiss (Ilgic, 2018).

1.5.2 Dünnschichtinterferenz (Geordnet)

Sie entstehen aufgrund von Interferenz der Lichtstrahlen, welche an einer dünnen Schicht reflektiert werden. Die dünne Schicht (Abbildung 7 (grau)) weist einen anderen, meist höheren Brechungsindex auf als das umliegende Medium (Abbildung 7 (weiss)). Deshalb kommt es zum Phasensprung des an der Unterseite reflektierten Lichtstrahls (siehe Kapitel 1.3 (Phasensprung an der Grenzfläche zu niedrigerem Brechungsindex)). Die an der Ober- und Unterseite reflektierten Lichtstrahle interferieren. Daraus resultiert eine Verstärkung gewisser Wellenlängen und eine Auslöschung anderer (Schmidt, 1949). Dünnschichtfarben sind meist irisierend.

Da bei der Reflexion stets ein Teil des Lichts transmittiert wird und somit an der Interferenz unbeteiligt bleibt, sind diese Farben weniger intensiv als die anderer Farbentstehungsweisen.

Durch stark pigmentierte, Licht absorbierende

Strukturen im Hintergrund kann dieser Effekt ausgeglichen und die Farben intensiviert werden (Kinoshita et al., 2008 (siehe Kapitel 1.6)).

Man sieht im Querschnitt der Bogen- und Hakenstrahlen eine dünne Kortex-Schicht, welche ungeordnet verteilte Melaningranula umschliesst (Abbildung 8).

Es wurde sowohl rechnerisch als auch experimentell festgestellt, dass die Farben durch Interferenz an dieser Kortexschicht entsteht. Die Farbe entsteht dabei nur in der oberen dünnen Schicht (Liu,

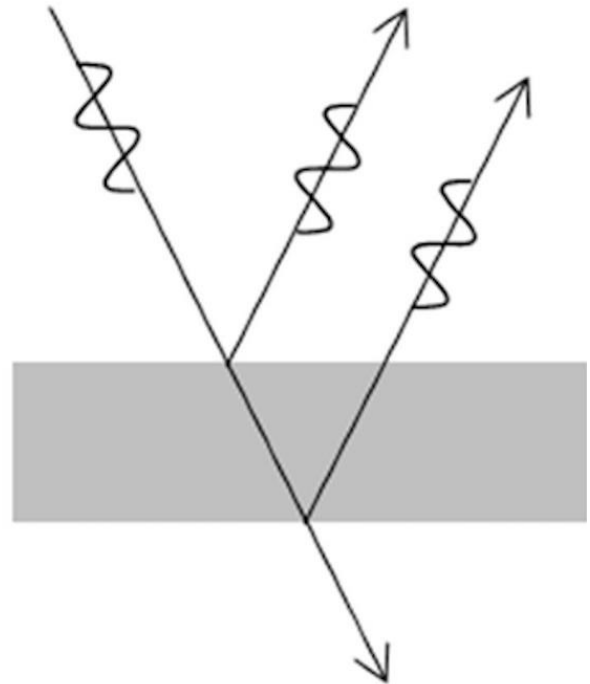


Abbildung 7: Schematische Darstellung von Dünnschichtinterferenz. Ein Lichtstrahl trifft auf eine dünne Schicht (grau). Ein Teil des Strahles wird an der Oberseite reflektiert, ein Teil an der Unterseite und ein Teil transmittiert. @Yoshioka et al., 2021

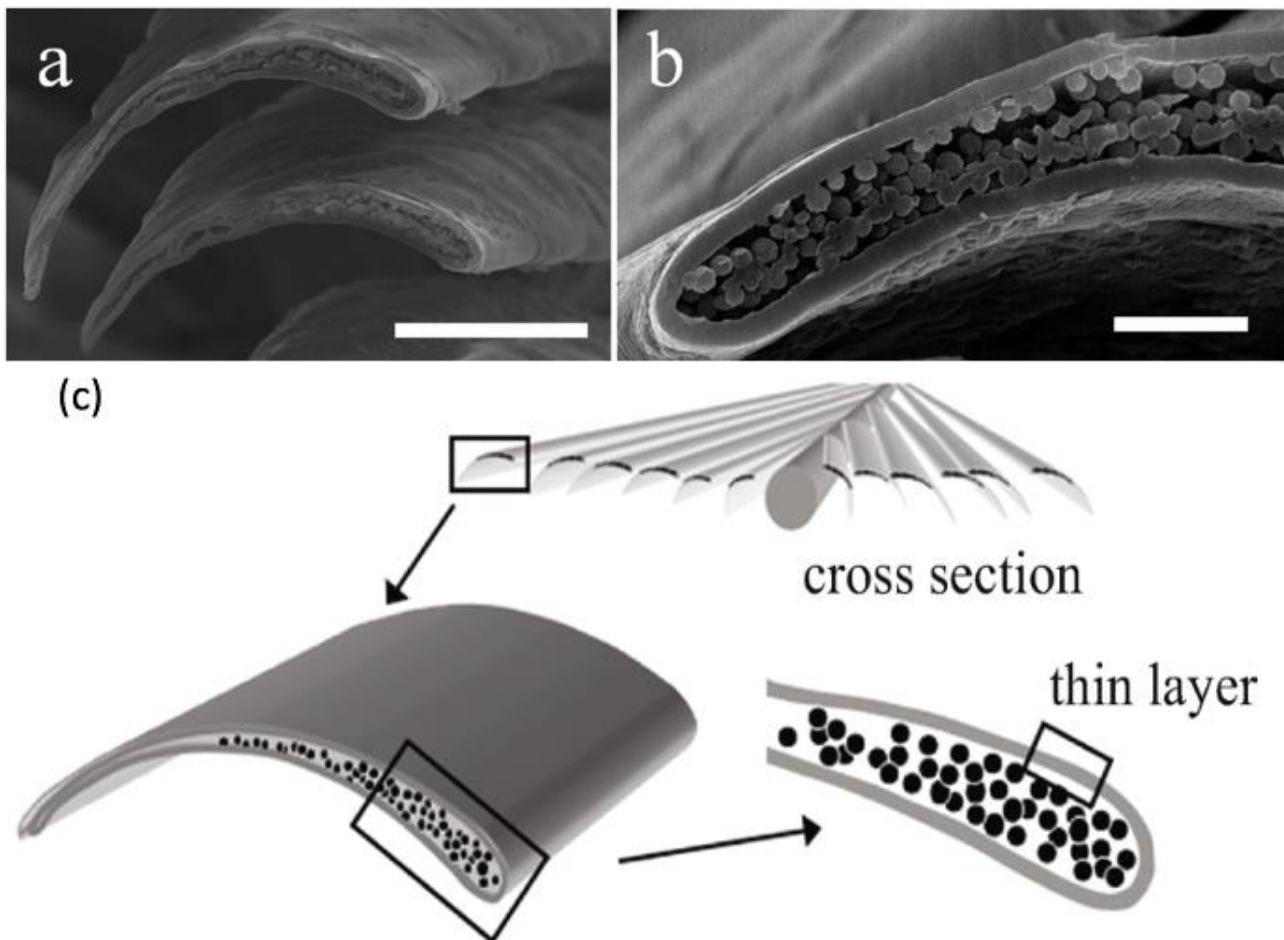


Abbildung 8: Aufnahme des Querschnitts einer Halsfeder einer Felsentaube mit dem REM (Yoshioka et al., 2007).
 (c) Schematische Darstellung des Querschnitts der Federstrahlen einer Halsfeder einer Felsentaube (Nakamura et al. 2008).

Massstab: (a) 20 μm ; (b) 3 μm ,

2012). Dabei variiert die entstehende Farbe je nach Dicke der Schicht (Yin et al., 2006). Die Granula sind unregelmässig angeordnet und nicht ausschlaggebend für die Interferenz (Yin et al., 2006; Yoshioka et al., 2021). Da die Farben, welche durch Dünnschichtinterferenz entstehen weniger intensiv sind, ist anzunehmen, dass die Melaningranula im Inneren der Struktur zu einer Verstärkung des Effekts führen, da ungewollt gestreutes Licht absorbiert wird und die Struktur als schwarzer, kontrastreicher Hintergrund dient (Nakumara et al., 2008, Liu, 2012).

1.5.3 Photonische Kristalle oder Gitterinterferenz (geordnet)

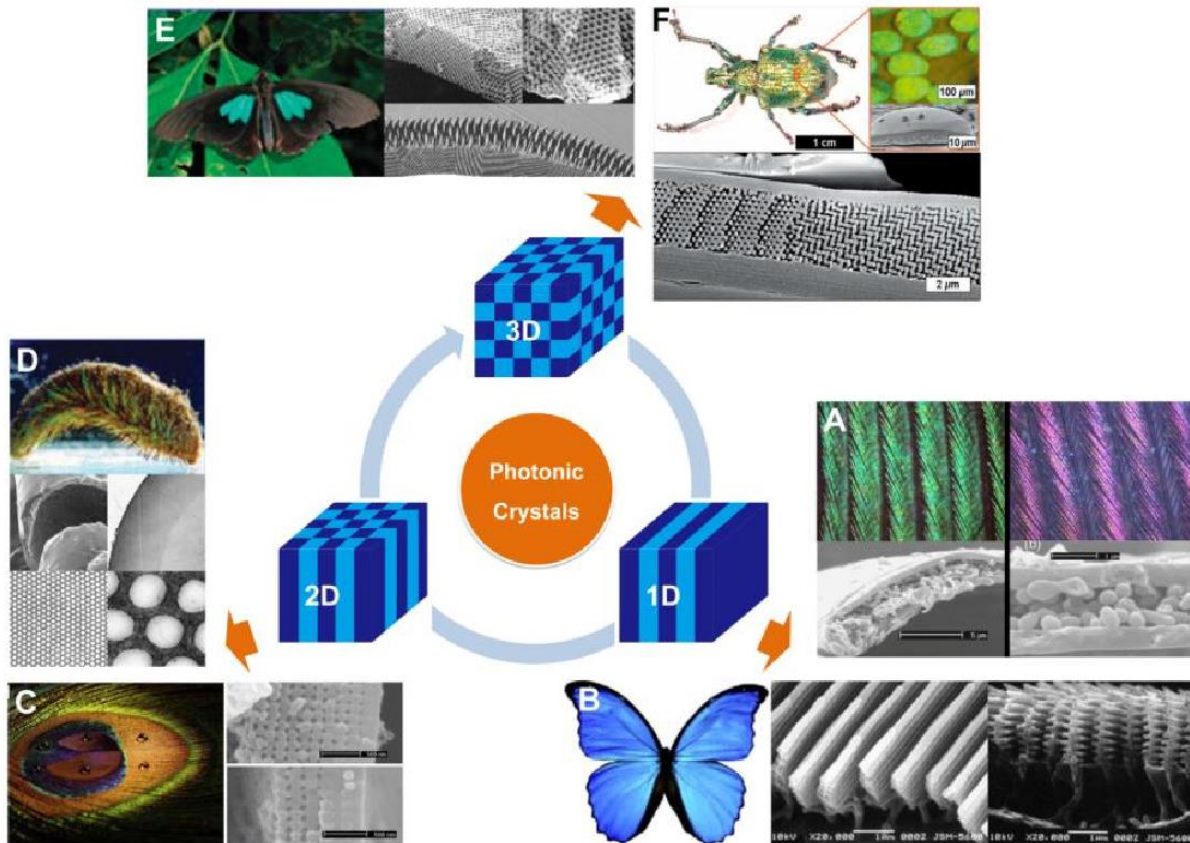


Abbildung 9: Schematische Darstellung mit Beispielen von ein-, zwei und dreidimensionalen photonischen Kristallen @Wang et al., 2013

Beispiele für eindimensionale Kristalle sind (A) pinke und grüne Nackenfedern von Felsentauben (*Columbia livia*) und (B) beim blauen Morphoschmetterling (*Morpho peleides*).

Beispiele für zweidimensionale photonische Kristalle sind (C) „Pfaunaugen“ bei Pfauen (*Pavo cristatus*) und (D). Beispiele für dreidimensionale Kristalle sind (E) der Schmetterling *Parides sesostris* und (F) der Käfer *L. Augustus*.

Farben, welche aufgrund von photonischen Kristallen entstehen sind meist irisierend und winkelabhängig (Liu, 2012). Währenddem Farben bei der Dünnschichtinterferenz Farben aufgrund von Interferenzmustern an einer dünnen Schicht entstehen, sind photonische Kristalle deutlich komplexer aufgebaut. Man unterscheidet zwischen ein-, zwei und dreidimensionalen photonischen Kristallen (Abbildung 9). Photonische Kristalle werden also klassifiziert nach der Anzahl Dimensionen, in denen die Periodizität auftritt (Yoshioka et al., 2021). Wie auch bei der Dünnschichtinterferenz handelt es sich bei photonischen Kristallen um Farbentstehung aufgrund von geordneten Strukturen. Dabei kann mit photonischen Kristallen eine deutlich kräftigere und hellere Farbe erreicht werden als mit Dünnschichtinterferenz (Zobl 2018, Yoshioka et al., 2021, Liu, 2012). Das liegt daran, dass durch die periodische(n) Struktur(en) eine Beziehung zwischen den gestreuten Lichtstrahlen hergestellt und der Reflexionseffekt somit verstärkt wird (Yoshioka et al., 2021). Welche Farbe aus den Kristallen resultiert ist dabei abhängig von den Abständen der periodische(n) Struktur(en). Dabei entsprechen die Abstände zwischen den Strukturen ungefähr der daraus resultierenden Wellenlänge (Kolle, 2011). Lichtstrahlen, welche eine kleinere Wellenlänge aufweisen als die Abstände der Struktur, werden beim Auftreten auf den Kristall reflektiert. Bei

Die Funktionsweise ist dabei wie bei der Multischichtinterferenz (Kapitel 1.5.4), aber in zwei Dimensionen. Die Lichtstrahlen welche auf den photonischen Kristall, also die Melaninstruktur, auftreffen, können je nach Wellenlänge in den Kristall eindringen oder werden daran reflektiert. Dabei interferieren Lichtstrahlen, welche an unterschiedlichen Orten am Kristall reflektiert wurden. Es entsteht ein komplexes Interferenzmuster. Gewisse Wellenlängen werden durch destruktive Interferenz ausgelöscht und gewisse durch konstruktive Interferenz verstärkt.

Je nach Vogelart unterscheidet sich die Form der photonischen Kristalle. Bei Enten ist die Form der Melaninstäbchen eher hexagonal und länglicher als bei Pfauen ((Eliason et al., 2012) Vergleich Abbildung 11a und c).

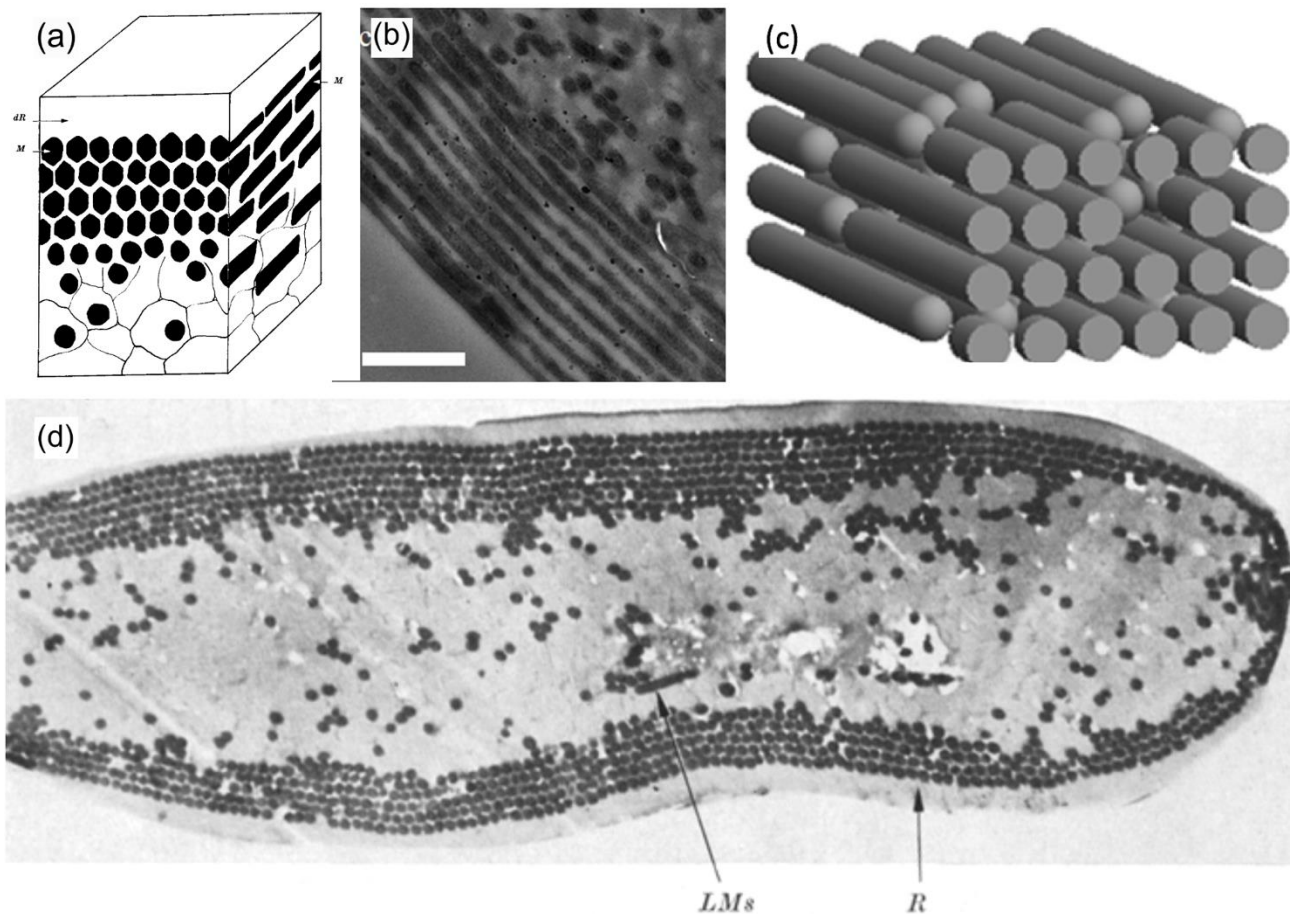


Abbildung 11: Zweidimensionale photonische Kristalle aufgrund von kästchenartig angeordneten Melaninstäbchen

(a) Schematische Darstellung des Federstrahls einer Entenfeder, dR= dorsale Rinde, M=Melaninstäbchen @Rutschke, 1966

(b) Längsschnitt der Federstrahlen eines Pfaus unter dem REM. Sichtbar sind die längsgeschnittenen Melaninstäbchen und der Kern mit ungeordnet verteiltem Melanin @Yoshioka et al., 2021

(c) Schematische Darstellung der Melaninstäbchen einer Pfauenfeder @Yoshioka et al., 2021

(d) Querschnitt eines kupfer schimmernden Federstrahls einer Entenfeder,

R=Rinde (Keratinschicht), Lm= Längsgeschnittenes Melaninstäbchen @Rutschke, 1966

Massstab: (b) 1µm, Vergrößerung: (d) 4800-fach

1.5.6 Dreidimensionale photonische Strukturen

Diese Strukturen sind in drei Dimensionen periodisch. Bis jetzt wurden sie nicht bei Vögeln nachgewiesen. Beispiele dafür sind die Strukturen bei gewissen Schmetterlingsarten (Abbildung 9 (*Parides sesostris*)) oder Käfern (Abbildung 9 (*L. Augustus*)).

1.5.7 Amorphe Strukturen (quasi-geordnet)

Auf amorphen Strukturen (Abbildung 12) beruhende Farben sind meist nicht schillernd (Auber, 1965).

Bei Federn ist die Farbe gewöhnlich nur in den Federästen und nicht in den Federstrahlen sichtbar (Prum et al., 1998). Die Unterseite der Federn ist meist schwarz, was zu einer Intensivierung der Farbe führt, aufgrund der Absorption von gestreutem Licht anderer Wellenlängen (Schmidt, 1949).

Bei amorphen Strukturen handelt es sich um schwammartige, unperiodische Strukturen,

welche optisch zwar heterogen ungeordnet erscheinen, aber quasi-geordnet sind (Prum et al., 1999, Stravenga et al., 2011). Das heisst, dass die Strukturen zwar optisch zufällig scheinen, aber in alle Richtungen quasi-identisch aufgebaut sind. Die kohärent streuenden Elemente führen zu konstruktiver Interferenz der Lichtstrahlen bestimmter Wellenlängen. Andere Wellenlängen, welche nicht der Grösse der Struktur entsprechen löschen sich gegenseitig durch destruktive Interferenz aus (Prum et al., 1999). Die Grösse der Strukturen ist dabei kleiner oder vergleichbar der Grösse der Wellenlänge der resultierenden Farbe (Kinoshita, 2005). Die Farbe wird folglich durch die Grösse der Lufteinschlüsse reguliert.

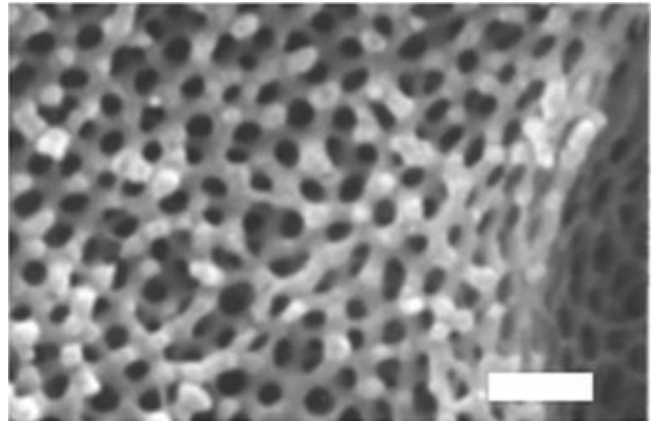


Abbildung 12: REM-Aufnahme des amorphen Netzwerks des Querschnitts des Federstrahls einer Eisvogelfeder (Yoshioka et al., 2021) Masstab: 0.5 μm

Lange wurde angenommen, die Farbe entsteht aufgrund von inkohärenter Lichtbrechungseffekte wie der Rayleigh¹- oder Mie-Streuung² (siehe Begriffserklärung (Kapitel 7)). Diese führen beispielsweise zur Farbentstehung in blauen Augen oder dem Himmel (Lockwood, 2016). Allerdings zeigt sich bei der Untersuchung der Farbspektren der amorphen Strukturen, dass das Licht nicht einheitlich gestreut wird, sondern dass es Reflexionshöchstwerte, gibt (Prum et al., 1999). Der Struktur muss also eine gewisse Ordnung zugrunde liegen.

Am Rand des Federastes ist eine Schicht aus Zellen (als Kästchenzellen oder Schwammzellen bezeichnet), welche aus schwammartig aufgebautem Keratin bestehen ((Stravenga et al., 2011; Yoshioka et al., 2021) Abbildung 13b). Diese Schicht reflektiert unter dem LM (Abbildung 13c). Im

Zentrum des Federastes unterhalb der Schwammzellen hat es Hohlräume und an deren Rand Melaningranula (Abbildung 13b). Das Melanin sorgt durch Absorption für eine Intensivierung der Farbe. Die Keratinschicht ist wiederum von einer Schicht Kortex überzogen (Abbildung 13b).

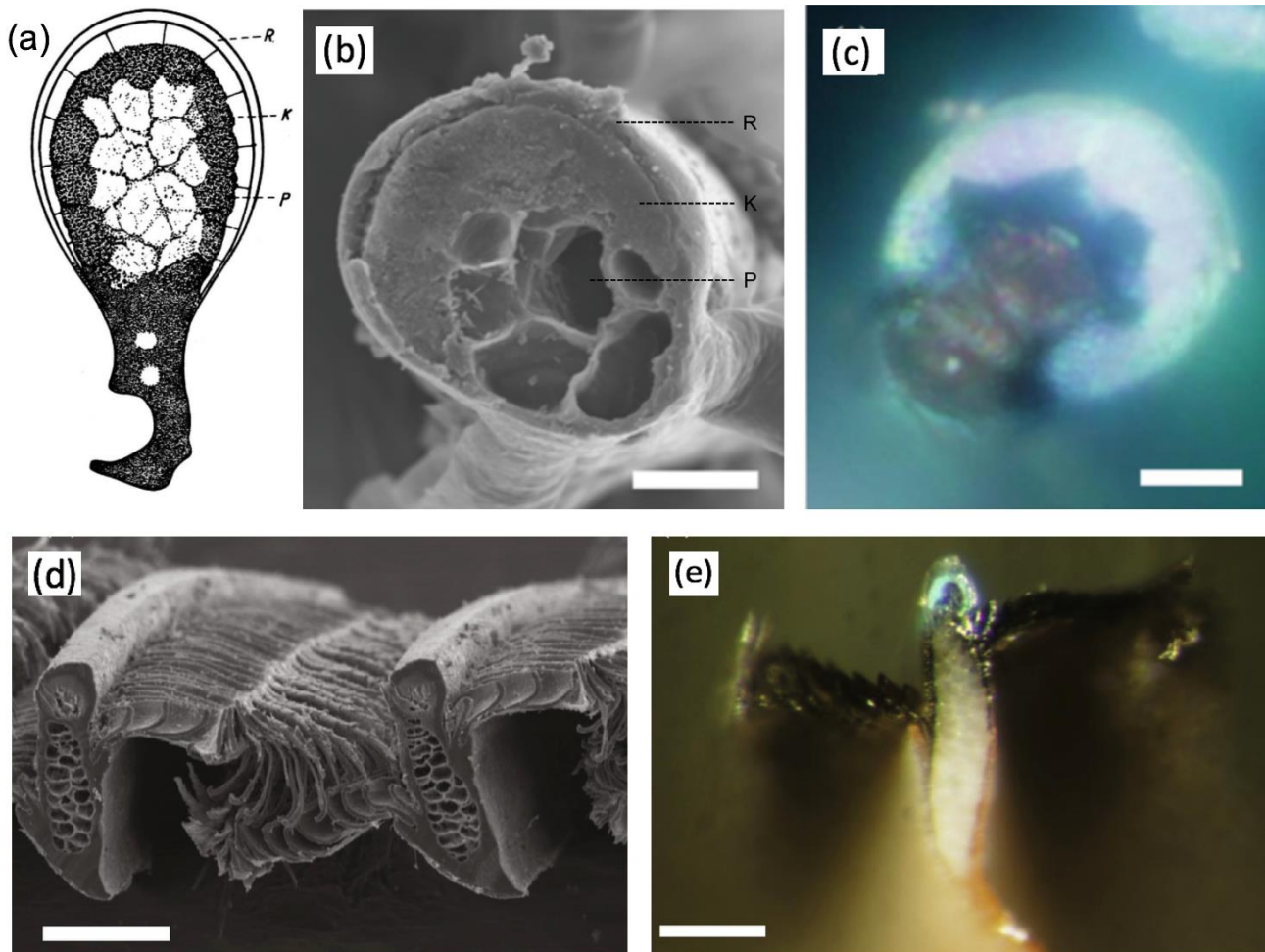


Abbildung 13: Querschnitt des Federastes eines Eichelhähers (a) als schematische Darstellung (Schmidt, 1949), Aufnahme einer Eisvogelfeder (b) mit dem REM (Yoshioka et al., 2021) und (c) mit dem LM (Yoshioka et al., 2021). Mit R = Rinde, K = Kästchenzelle, P = Markzelle, Querschnitt einer Feder eines rot-grünen Aras (d) mit dem REM, (e) mit dem LM
 Maßstab: (b) 6 μm , (c) 4 μm , (e) 100 μm , (f) 100 μm

1.6 Zusammenwirken von Struktur- und Pigmentfarben

1.6.1 Mischfarben aus Struktur- und Pigmentfarben

Die Farbe, die wahrgenommen wird, ist oft eine Mischfarbe aus Struktur- und Pigmentfarben (Kinoshita, 2008). Bei Grün, Gold und Violett handelt es sich um Farben, welche meistens aufgrund einer gemischten Wahrnehmung von Struktur- und Pigmentfarben entstehen (Frank, 1939).

Beim Beispiel von Grün wird dabei eine Mischung aus gelblichem Pigment (z.B. Zooanthin oder gelbliches Melanin) und blauer Strukturfarbe wahrgenommen. Dabei absorbiert das Pigment die kürzeren Wellenlängen (Stavenga et al. 2018). Bei amorphen Strukturen befinden sich diese Einlagerungen des Pigments in der Hornschicht ((Abbildung 13a und b) Schmidt, 1949). In der

Netzhaut wird nun eine Mischform aus dem Gelb des Lipochroms und dem Blau, resultierend aus den amorphen Strukturen, wahrgenommen.

1.6.2 Intensivierung von Strukturfarben durch Melanin

Durch das Zusammenwirken von Pigment- und Strukturfarben verändert sich die Helligkeit und Intensität der Strukturfarben (Kinoshita et al., 2008). Das liegt, unter anderem daran, dass transmittiertes Licht von der schwarzen, melaninhaltigen Struktur absorbiert wird und durch Abwesenheit der anderen Wellenlängen die Intensität der Strukturfarbe erhöht wird.

So kann beispielsweise Melanin in amorphen Strukturen den Effekt verstärken, da inkohärenten gestreuten Lichts absorbiert wird (Auber, 1956, Shawkey et al., 2006). Auch bei Dünnschichtfarben hat Melanin einen starken Einfluss. Die Unterseite der Federn ist meist schwarz gefärbt.

Besonders interessant ist auch, dass die zweidimensionalen photonischen Strukturen (Abbildung 11) aus Melaninstäbchen, also Pigmenten, aufgebaut sind. Damit ist das absorbierende und reflektierende Element der Struktur kombiniert (Yoshioka et al., 2002). Dies im Vergleich zu anderen photonischen Strukturen wie beispielsweise beim Paradiesvogel (*Parotia lawesii*) oder dem blauen Morpho-Falter (*Morpho peleides*), bei denen die Strukturen getrennt sind (Yoshioka et al., 2002).

2 Material und Methoden

2.1 Federn

2.1.1 Kriterien und Eigenschaften

Für diese Arbeit sollen alle Federn aus der Schweiz stammen und Strukturfarben aufweisen. Da die meisten Schillerfarben, Grün- und Blautöne auf Strukturfarben beruhen (Bagnara et al., 2007), wurde eine Liste Schweizer Vogelarten zusammengestellt, bei deren Gefieder aufgrund der Farben Strukturfarben vermutet wurden (siehe Anhang). Die Liste ist in verschiedene Farben unterteilt und es sollen Federn aus möglichst allen Farbgruppen erhalten sein. Für das Zusammenstellen dieser Liste wurde die Website „Featherbase“ verwendet.

2.1.2 Materialbeschaffung

Das Naturhistorische Museum Basel (NMB) hat zwar eine grosse wissenschaftliche Sammlung, allerdings werden keine Objekte aus dieser Sammlung verliehen und es sind nur Untersuchungen vor Ort möglich, welche nicht-invasiv sind. Das NMB besitzt aber auch einzelne Federn, welche nicht Teil der Sammlung sind und auch für invasivere Eingriffe abgegeben werden können. Von diesen Federn konnten einige untersucht werden.

2.1.3 Federtypen

Es wurden Federn von Eichelhäher (*Garrulus glandarius*), Eisvogel (*Alcedo atthis*), Stockente (*Anas platyrhynchos*), Grünspecht (*Picus viridis*), und Blaumeise (*Cyanistes caeruleus*) untersucht. Von einer Elster (*Pica pica*) wurde einerseits die weisse Innenfahne einer Handschwinge (H6), aber auch schimmernde Steuerfedern untersucht (Abbildung 14).

Von der Blaumeise und dem Grünspecht untersuchte ich Deckfedern, von allen anderen Vogelarten untersuchte ich Konturfedern.



Abbildung 14: Aufnahme einer Elster (*Pica pica*) ©Stein Arne Jensen

2.2 Kamera

Von jeder Feder wurde zusätzlich eine Aufnahme mit der Kamera gemacht. Dafür wurde die Kamera Sony ILCE-7RM3 genutzt. Für die Gesamtaufnahmen der Federn (beispielsweise Abbildung 25b und -c) wurde das Objektiv FE 24-105 mm F4 G OSS verwendet. Für die Makroaufnahmen wurde das Objektiv Sony FE 90mm F2,8 Macro G OSS verwendet.

2.3 Mikroskopentypen

Beim Lichtmikroskop (LM) handelte es sich um ein Auflichtmikroskop. Die Aufnahmen wurden mithilfe einer integrierten Kamera gemacht.

Beim Laserscanningmikroskop (LSM) handelt es sich das LSM Keyence VK-X1100.

Es wurden zwei verschiedene Rasterelektronenmikroskop (REM) benutzt:

- Am ersten Untersuchungstag wurden Federn von Eichelhäher und Eisvogel mit dem FEI Nova NanoSEM 230 untersucht.
- Am zweiten Untersuchungstag wurden Federn von Stockenten, Grünspecht, Blaumeise und die weissen und die schimmernden Elsterfeder mit dem Philips XL30 ESEM untersucht.

2.4 Untersuchung der Federn

2.4.1 Vorbereitung der Federn

Von allen Federarten wurde jeweils zwei Objektträger vorbereitet (Abbildung 16). Eines für das LSM/LM und eines für das REM.

Dazu wurden zwei ungefähr zwei auf ein Zentimeter grosse Stücke der Feder zurechtgeschnitten und mit Kohlenstoffkleber auf Objektträger aus Metall geklebt (Abbildung 15). Unter dem LSM und Lichtmikroskop konnten die Federn so direkt untersucht werden.

Für das REM mussten die Präparate zusätzlich gesputtert, das heisst mit einer dünnen Schicht Gold bedampft, werden. Das

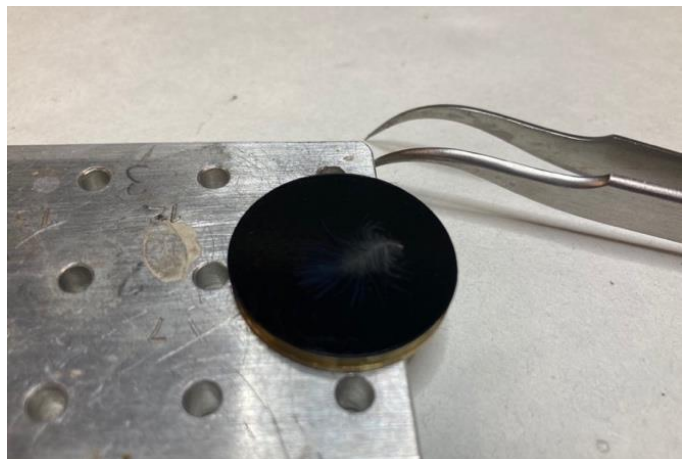


Abbildung 15: Mit Kohlenstoffkleber auf Metallträger aufgeklebte Blaumeisenfeder

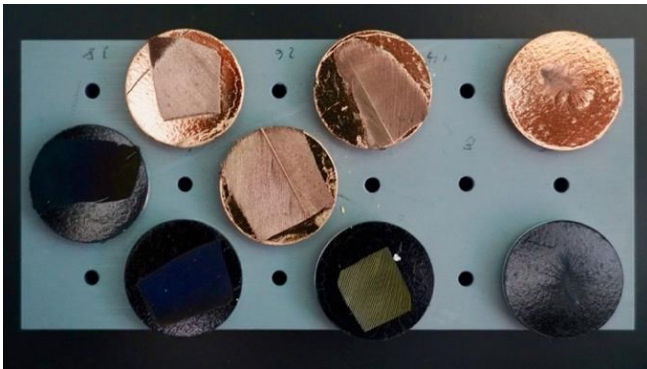


Abbildung 16: Auf Metallträger aufgeklebte Federn, gesputtert (goldig) und ungesputtert (schwarz)

liegt daran, dass der auf das Objekt auftreffende Primärelektronenstrahl eine hohe Energie aufweist, was bei isolierenden Materialien, wie der Feder, zu Aufladungen führt. Diese Aufladungen führen zu Veränderungen (Rissen, Spannungen, Bewegungen) des Objekts und sind als Streifen oder dunkle Flecken auf den Aufnahmen sichtbar. Um dies zu verhindern muss die Oberfläche des Objektes leiten, damit die Energie abgeführt wird.

Dafür wurden die Präparate mit dem „BalTec MED020 Sputter Coating Unit“ mit einer 30 nm dicken Schicht Gold überzogen.

2.4.2 Bildaufnahmeprozess

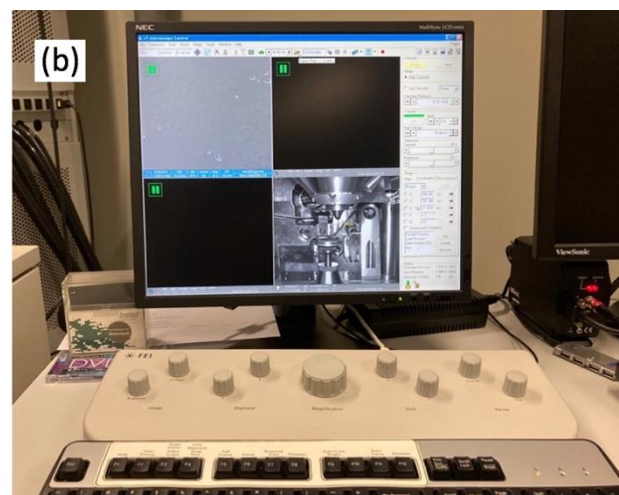
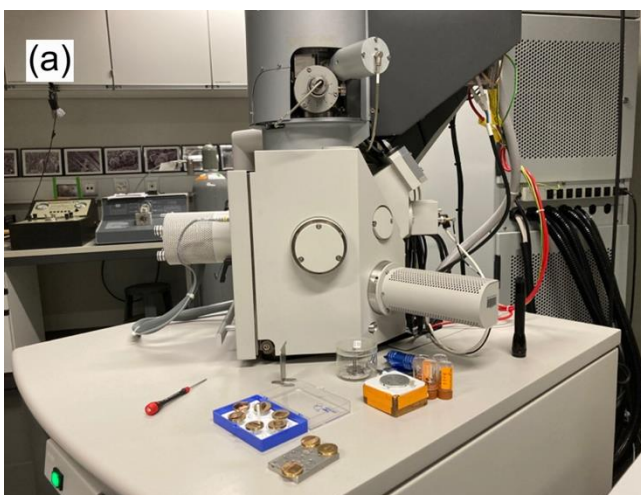


Abbildung 17: (a) REM mit gesputterten Proben, (b) Bildschirm des REMs

Zuerst wurde von den Federn mit der Kamera ein Foto gemacht. Der Bildaufnahmeprozess unterschied sich zwischen den verschiedenen Mikroskopentypen:

- Beim LM wurde jeweils eine Grossaufnahme gemacht.
- Mit dem LSM wurde Aufnahmen gemacht, welche eine Überlagerung von Laser- und Lichtmikroskop sind. Das Gerät konnte aus diesen Daten das Höhenprofil der Feder ausrechnen und darstellen.
- Beim REM musste zuerst ein Vakuum erzeugt werden, um eine Wechselwirkung der Primär- und Sekundärelektronen mit Atomen und Elektronen in der Luft zu verhindern. Dann konnten die Aufnahmen der Federn gemacht werden (Abbildung 17).

2.5 Datenauswertung

Es wurde die Grösse der Strukturen und Unterstrukturen wie Zellen vermessen oder berechnet und mit der daraus resultierenden Farbe verglichen.

Ausserdem wurde verglichen, bei welchem Teil der Feder die Farbe sichtbar ist und wo die Strukturfarbe entsteht. Mithilfe eines Vergleiches der Resultate mit verschiedenen Studien konnte so vermutet werden, um welche Art der Farbentstehung es sich bei den verschiedenen Federn handelt.

3 Resultate

3.1.1 Elster (weiss) LM und LSM



Abbildung 18: (a) Foto einer Elster von oben @naturesdoorways; (b) Handschwinge einer Elster @featherbase, mit rotem Pfeil markiert die untersuchte Handschwinge H6

Von der Elster (Abbildung 18a) wurden unter anderem die weisse Innenfahne der 6. Handschwinge (H6) untersucht (Abbildung 18b). Die Feder erscheint unter dem Lichtmikroskop weiss bis weissbräunlich. Die Struktur erscheint sowohl unter dem Lichtmikroskop (Abbildung 19), als auch unter dem REM (Abbildung 22) als sehr gleichmässig. Es sind klar die Federäste mit den daraus hervorgehenden Bogen- und Hakenstrahlen erkennbar.

Beim LSM (Abbildung 20a) ist ersichtlich, dass die dickste Stelle der Federast ist, mit einer Dicke von beinahe $40\ \mu\text{m}$ (Abbildung 20b). Auf den Aufnahmen sieht man auch, dass die Hakenstrahlen und die Bogenstrahlen sich überlappen, wobei die Hakenstrahlen über den Bogenstrahlen liegen (Abbildung 20a und 21). Die Hakenstrahlen sind gegen Ende hin gewölbt und münden in kleinen Häkchen (Abbildung 21). Diese Häkchen sind in die Bogenstrahlen verhakt.

Die Federstrahlen bestehen aus einer relativ flachen Zellstruktur mit einem verdickten Rand zur Seite hin (Abbildung 20, 22).



Abbildung 19: Elsterfeder unter dem LM
Vergrößerung: 100-fach

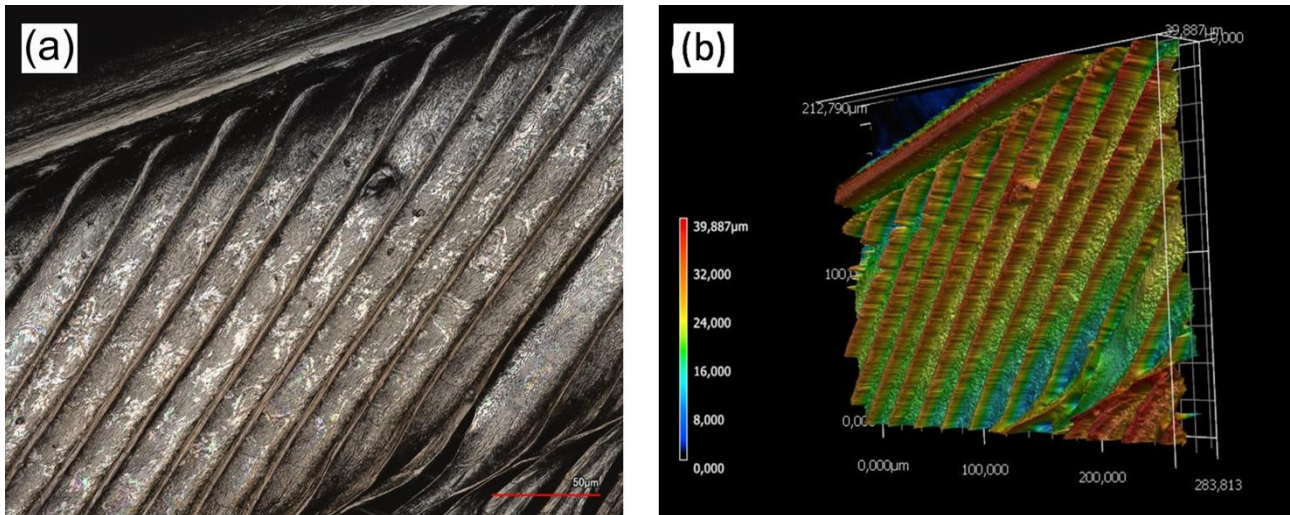


Abbildung 20: Aufnahme einer weissen Elsterfeder (H6) mit dem LSM, a) LSM im LM-Modus (Originalfarbe: Weiss), (b) Höhenprofil (rötlich=hoch, blau=tief), Vergrößerung: 700-fach

3.1.2 Elster (weiss) REM

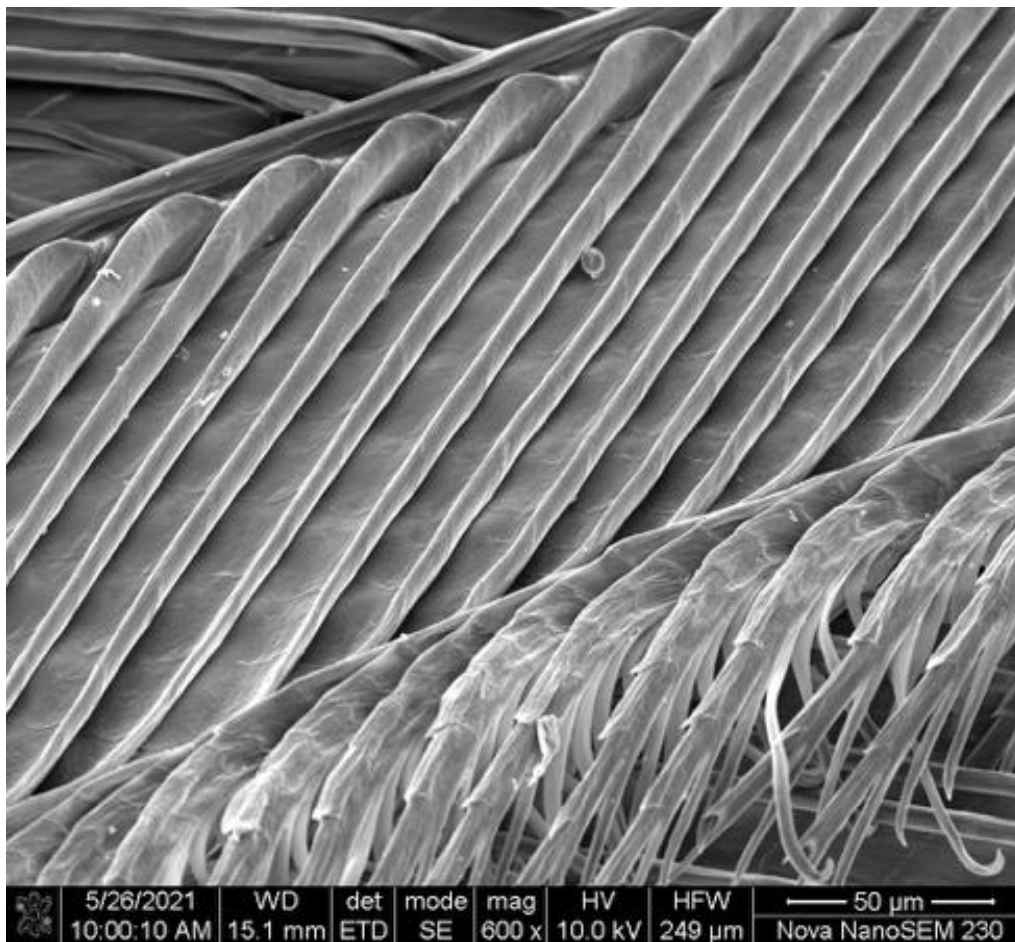


Abbildung 21: Aufnahme einer weissen Elsterfeder unter dem REM, Vergrößerung: 600-fach

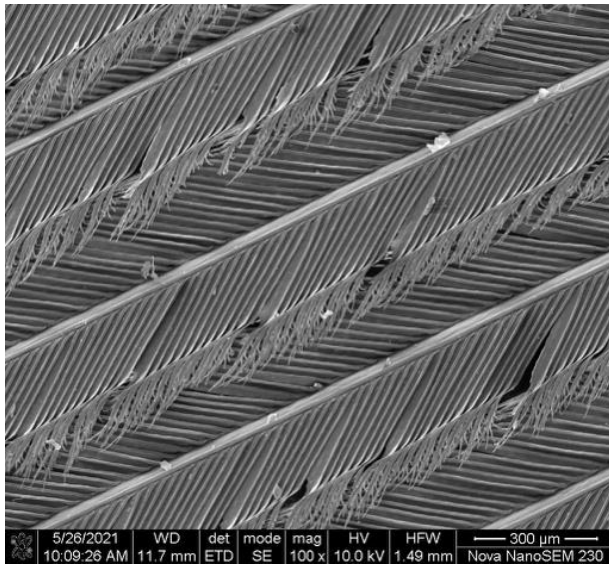


Abbildung 22: Aufnahme einer weissen Elsterfeder mit dem REM
Vergrößerung: 100-fach

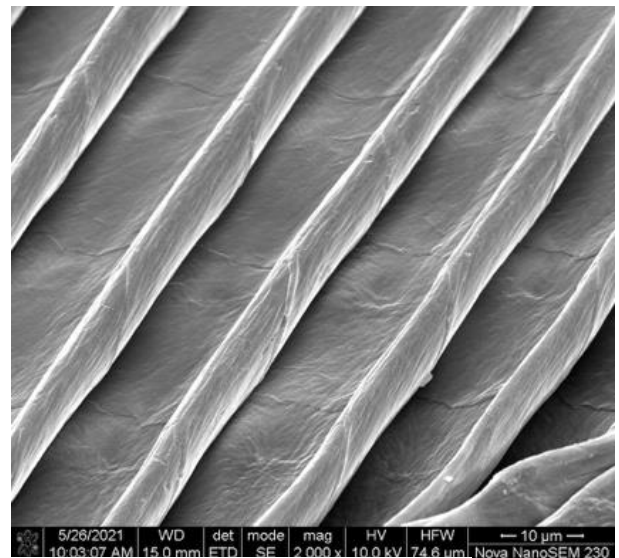


Abbildung 23: Aufnahme einer weissen Elsterfeder unter dem REM,
Vergrößerung: 2000-fach

3.2 Elster (schimmernd)

3.2.1 Elster (schimmernd) LM und LSM



Abbildung 24: Foto einer Elster von oben
@naturesdoorways, in rot markiert die untersuchten Steuerfedern

Steuerfedern der Elster (Abbildung 24) besitzen einen metallischen Schimmer und sind grossflächig dunkelgrün gefärbt (Abbildung 25a). Zur Spitze hin ist ein Übergang von Grün in Rot, Violett, Blau, Türkis zu Schwarz erkennbar (Abbildung 25b).

In dieser Arbeit werden die blaue, grüne und violette Farbe der Spitze der Feder untersucht.

Die Rückseite ist schwarz gefärbt. Nur unter Lichteinfall aus bestimmten Winkeln sind gewisse grüne Stellen sichtbar (Abbildung 25c).

Die Bogenstrahlen sind von den Hakenstrahlen grösstenteils überdeckt (Abbildung 28). Die Federäste sind gut erkennbar und nicht überlappt

(Abbildung 28). Die farbgebende Struktur sind die Federstrahlen (Abbildung 26a). Dabei ist die Struktur nicht einheitlich gefärbt und irisiert (Abbildung 26a und 27). Die Farbe scheint aus kleinen punktchenartigen Strukturen aufgebaut zu sein (Abbildung 26a).

Die Federstrahlen sind aus Zellen aufgebaut (Abbildung 26 und 27d – f) und ungefähr 25 – 30 μm dick.

Violette Zellen sind ungefähr 33 μm lang, blaue ungefähr 30-31 μm und grüne ungefähr 33-34 μm (Abbildung 27). Die Wellenlänge von violett ist kleiner als die von grün und blau. Somit korreliert die Zellgröße nicht mit der Wellenlänge.

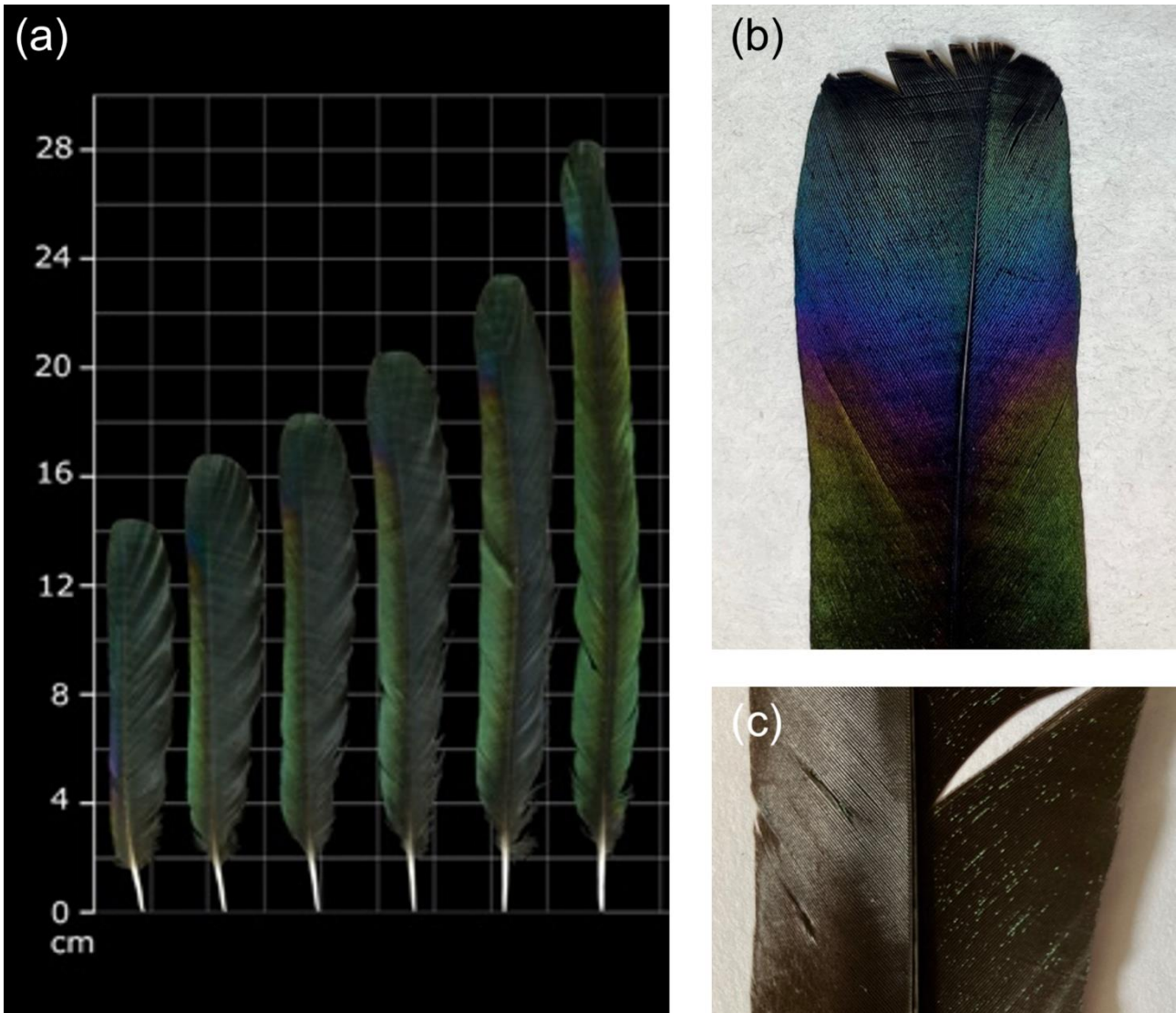


Abbildung 25: Steuerfedern einer Elster, (a) Grossaufnahme @wikimedia, (b) Vorderseite, (c) Rückseite

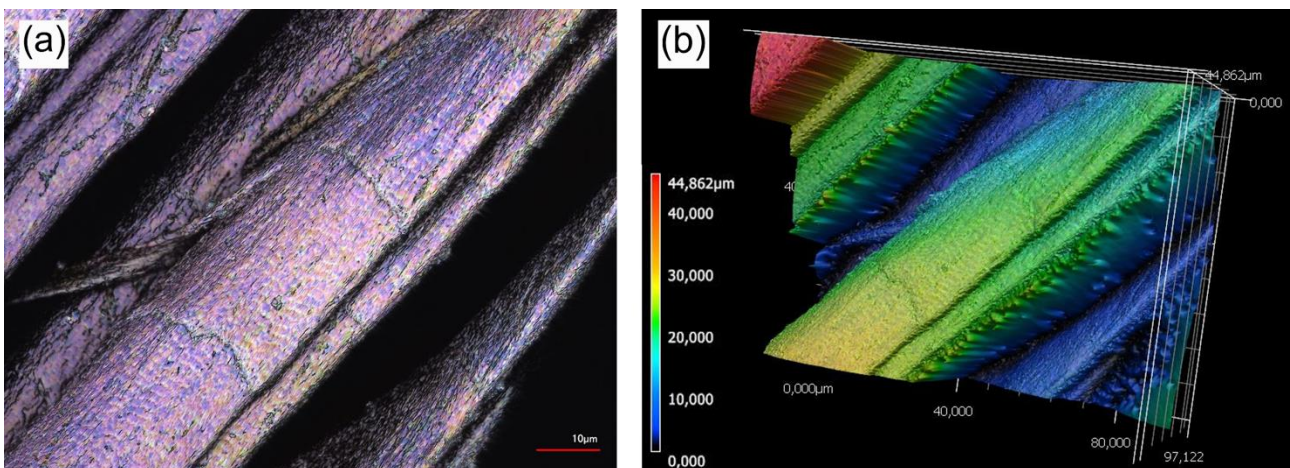


Abbildung 26: Aufnahme der Federstrahlen der Vorderseite einer Steuerfeder einer Elster mit dem LSM (a) LSM im LM-Modus, (b) Höhenprofil (rötlich=hoch, blau=tief)
 Massstab: 10 μm

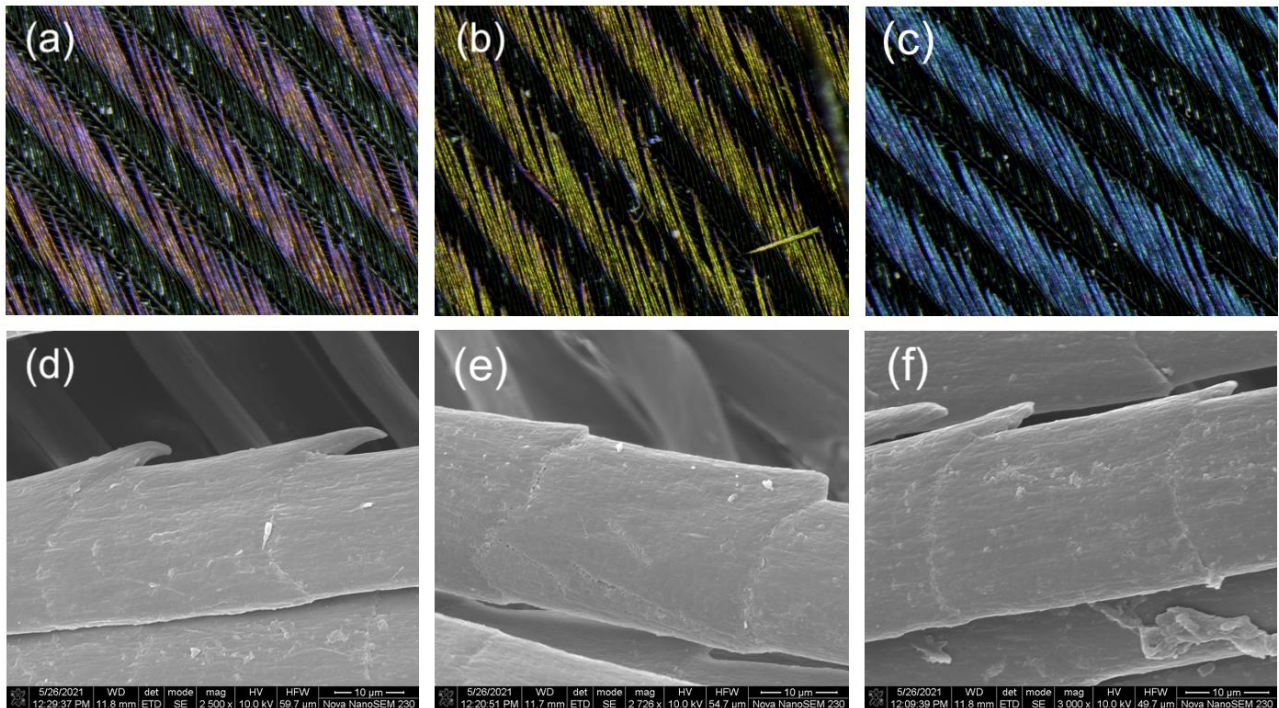


Abbildung 27: Vergleich der von Aufnahmen mit dem LSM und Zellaufnahmen mit dem REM der verschiedenen Farben einer schimmernden Elsterfeder, dabei entsprechen die REM-Aufnahmen den darüber liegenden LSM-Aufnahmen

LM: (a), violett (b), grün (c) blau: Vergrößerung: Ungefähr 100-fach
REM mit

Vergrößerungen: (d) violett (e) grün, (f) blau: Vergrößerungen: 2500-, 2725- und 3000-fach

3.2.2 Elster (schimmernd) REM

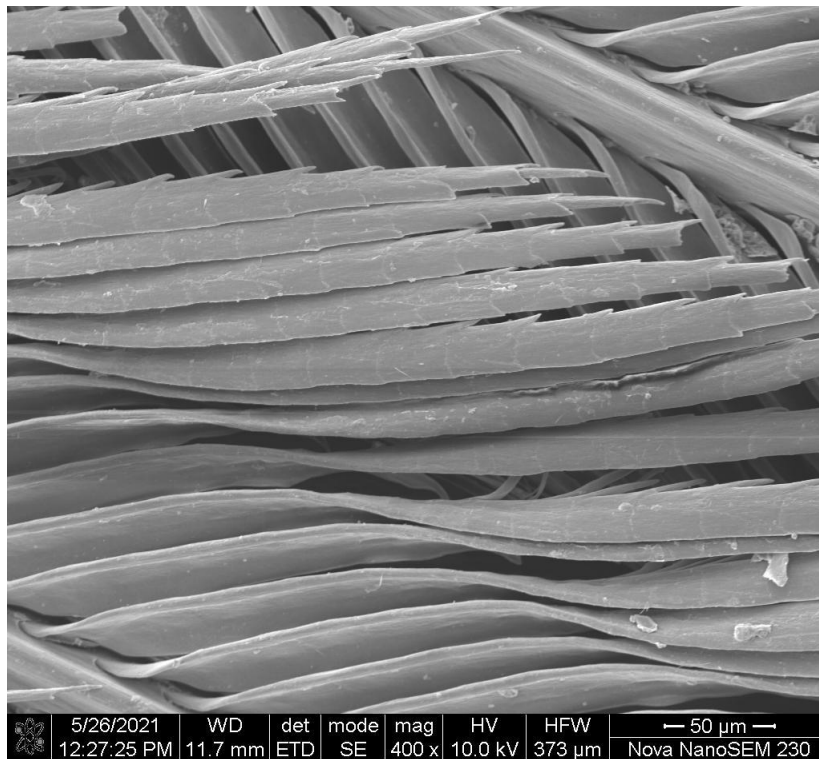


Abbildung 28: Violetter Bereich einer schimmernden Elsterfeder unter dem REM

Massstab: 50 µm

3.3 Eichelhäher

3.3.1 Eichelhäher LM und LSM



Abbildung 29: Foto eines Eichelhähers mit rot markiertem Bereich der Federentnahme @Marcus Bosch, 2018

Beim Eichelhäher (Abbildung 29) wurden grosse Handdecken oder Alulafedern untersucht. Die Federn weisen an der Aussenfahne ein sich etwa im Abstand von 4.5 mm wiederholendes Muster aus schwarzen und blauen Querstreifen auf (Abbildung 30a und b). Dabei beginnen die blauen Abschnitte jeweils mit einem bläulich-weissen Farbton, welcher zu einem dunkleren Blau übergeht (Abbildung 30). Vom dunklen Blau gibt es einen Verlauf ins

Schwarz, welches wiederum abrupt mit dem Beginn eines weiteren blau-weissen Streifens endet.

Die Rückseite der Feder ist relativ einheitlich grau gefärbt, wobei ein Übergang von weiss-grau (Beginn der Federäste) zu einem dunkleren Grauton (Spitze) erkennbar ist (Abbildung 30c). Das Streifenmuster der Vorderseite, insbesondere das kontrastreiche Ende der schwarzen Streifen, ist durch dunklere Linien erkennbar.

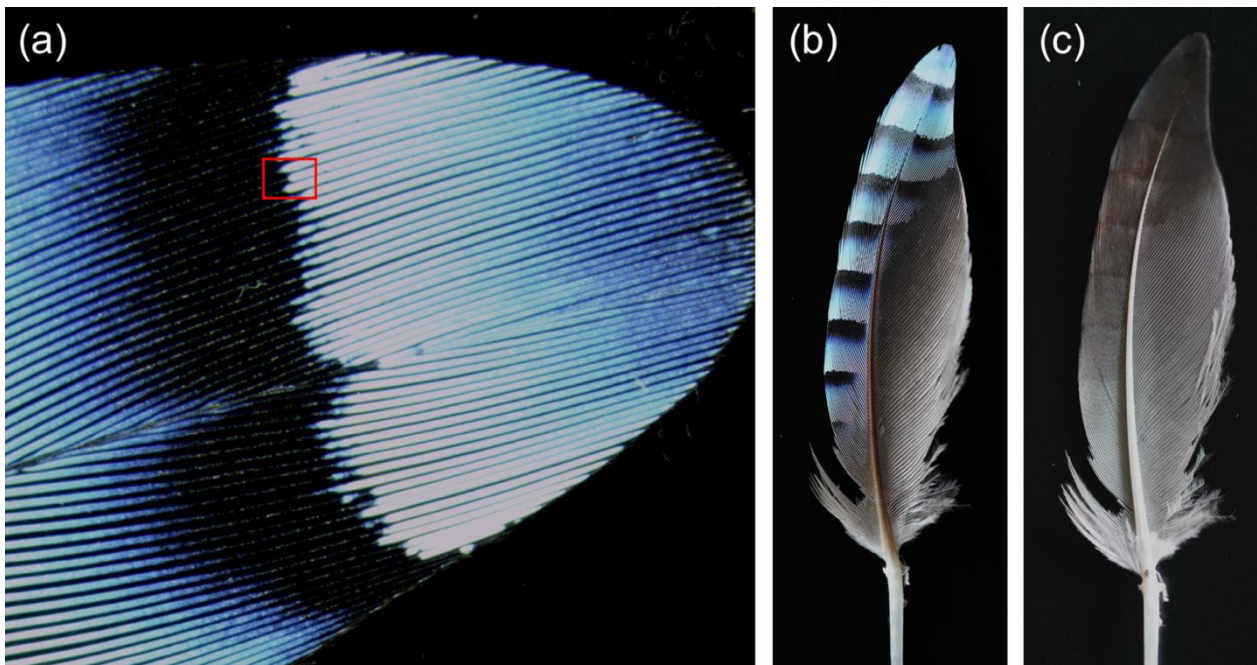


Abbildung 30: Feder eines Eichelhähers (a) Mit dem Lichtmikroskop, in rot markiert der ungefähre Aufnahmeort von Abbildungen 20-22, Foto der Feder (b) Vorderseite, (c) Rückseite
Vergrößerung: Ungefähr 20-fach

In den Mikroskopenaufnahmen sind die Federstrahlen schwarz gefärbt und liegen im Hintergrund (Abbildung 31). Sie weisen nur eine geringe Dicke auf im Vergleich zu den blau-schwarz gefärbten Federästen. In der Aufnahme (Abbildung 31 und 32) ist klar ersichtlich, dass die Federäste ein

Streifenmuster aufweisen, bei dem sich breitere (blau markierte) und schmalere (schwarz markierte) Teile abwechseln. Dabei handelt es sich bei den breiteren Abschnitten um die blauen Teile des Streifenmusters der Eichelhäherfedern und bei den schmalen Teilen um die schwarzen Streifen (Abbildung 32 und 33). Die blauen Teile des Federasts sind bis zu $143,92\ \mu\text{m}$ dick (Abbildung 33b). Die blauen Teile sind deutlich länger als die schwarzen Streifen (Abbildung 32).

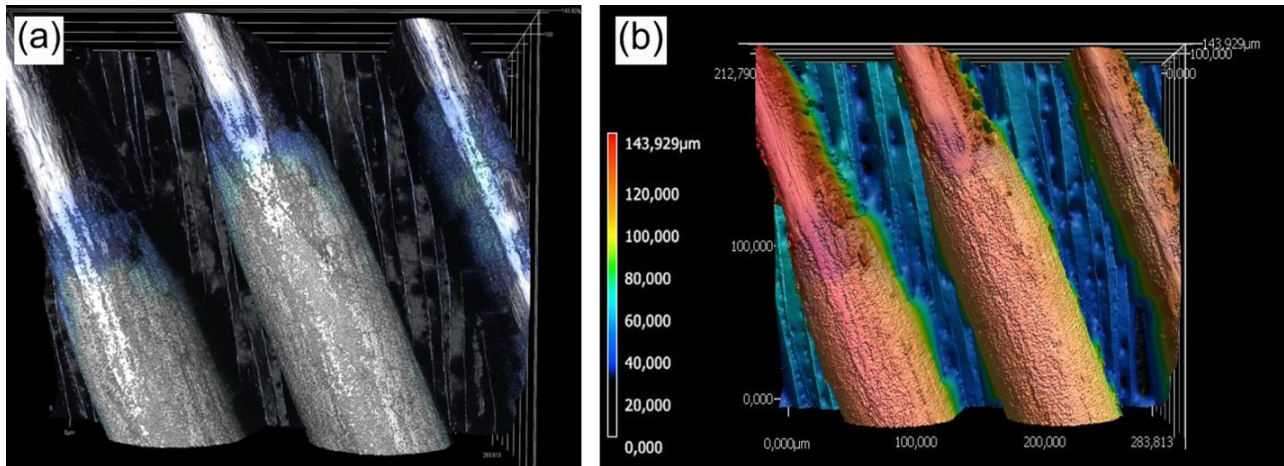


Abbildung 31: Aufnahme einer Eichelhäherfeder mit dem LSM
(a) LSM im LM-Modus
(b) Höhenprofil
Vergrößerung: Ungefähr 500-fach

3.3.2 REM

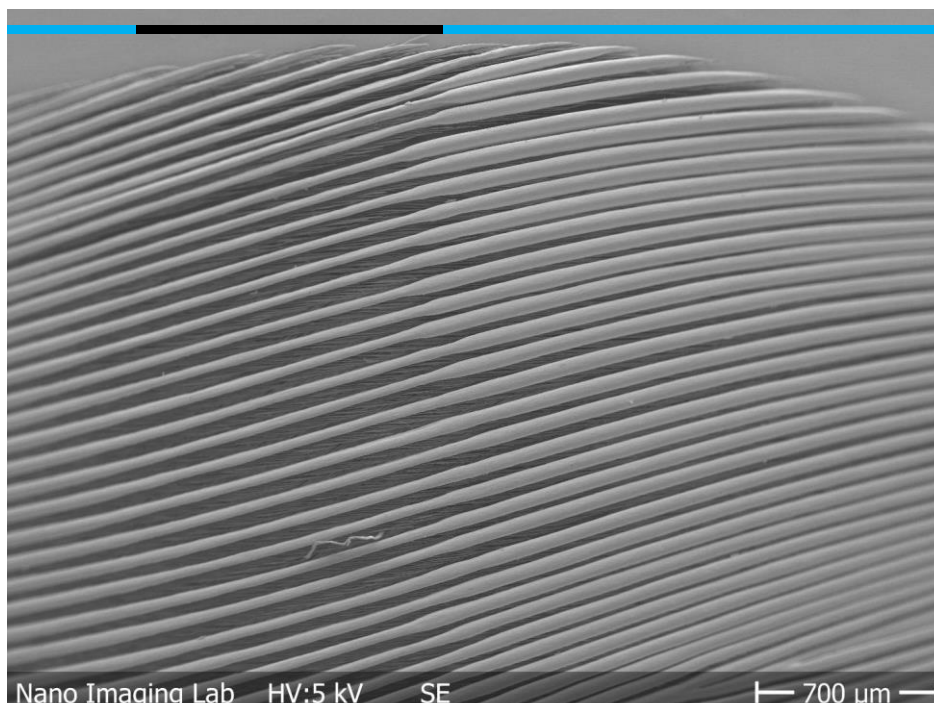


Abbildung 32 Aufnahme einer Eichelhäherfeder unter dem REM. Im Vordergrund sind dabei die von links unten nach rechts-oben verlaufenden Federäste erkennbar, welche schmalere und breitere Stellen aufweisen. Die breiteren Stellen werden dabei durch die blauen Linien markiert, die schmalen durch die schwarzen. Im Hintergrund sind die dunkler erscheinenden Federhäkchen zu erkennen.
Vergrößerung: 50-fach

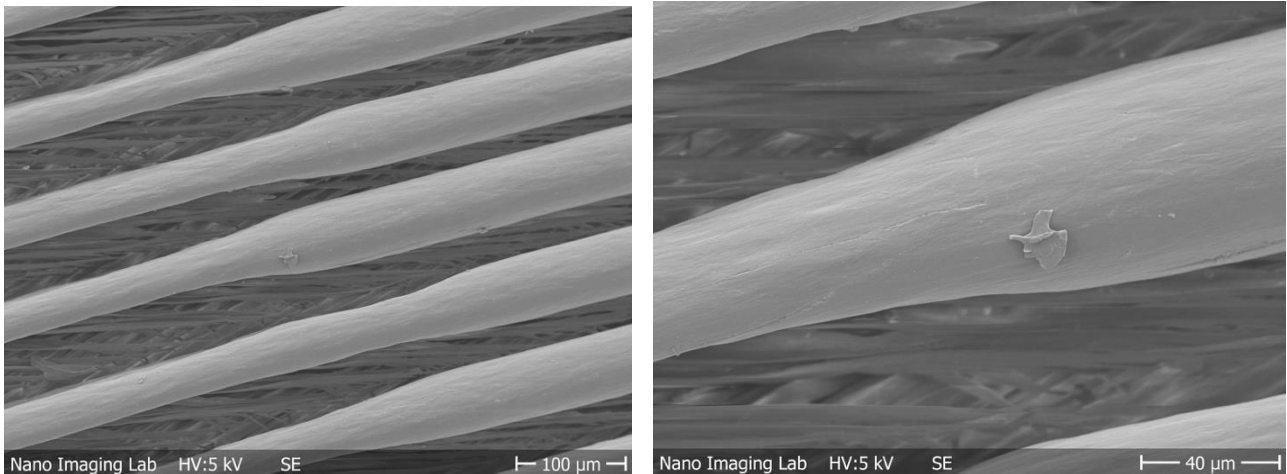


Abbildung 33: Aufnahme einer Eichelhäherfeder unter dem REM
Massstab: (a) 100 µm, (b) 40 µm

3.4 Stockente

3.4.1 Stockente LM und LSM

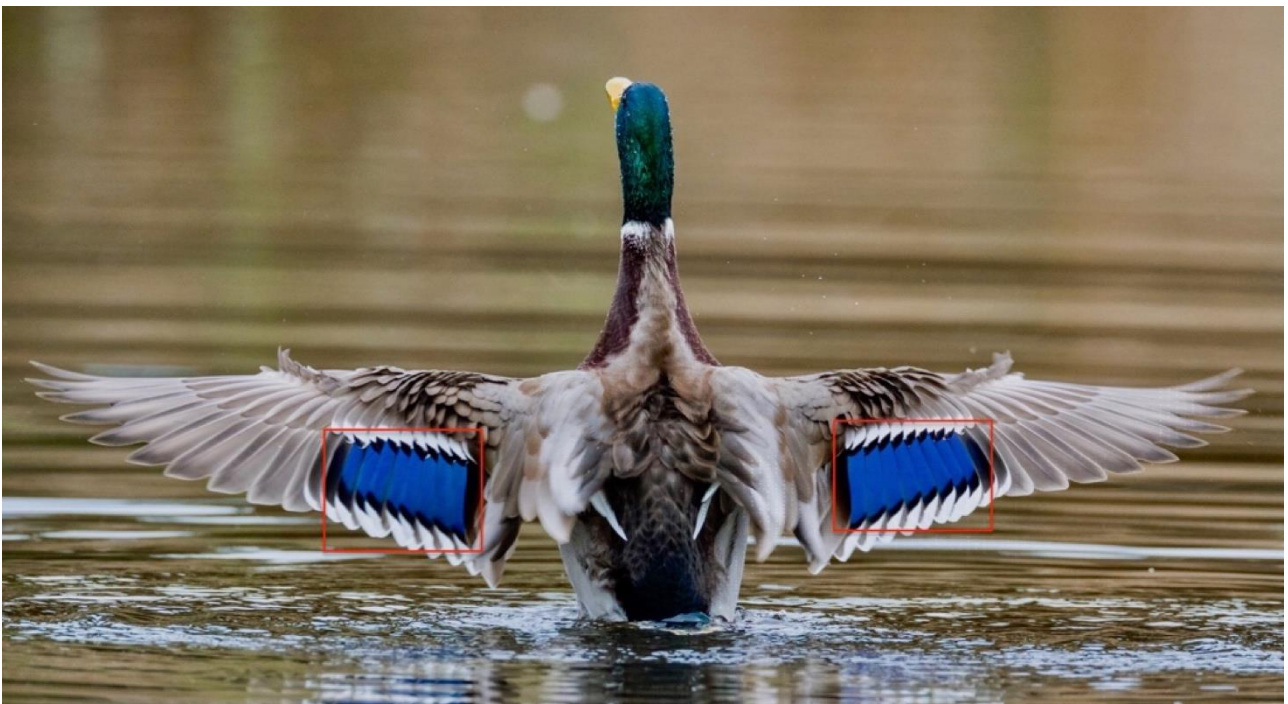


Abbildung 34: Foto einer Stockente, in Rot markiert der Bereich der entnommenen Federn @Hubert Ribi

Bei der Stockente (Abbildung 34) wurden blaue Federn untersucht. Dabei handelt es sich um den im Bild rot markierten Bereich, welcher auch als Spekulum bezeichnet wird. Die Federn erscheinen auf den Fotos (Abbildung 34 und 35a) und unter dem LM (Abbildung 35b) blau, aber unter dem LSM (Abbildung 36a) violett.

Die Federäste und Bogenstrahlen sind auf den Aufnahmen fast vollständig von den Hakenstrahlen überdeckt (Abbildung 37a-c). Auf den Aufnahmen ist klar die aus Zellen aufgebaute Struktur der

Federstrahlen zu erkennen (Abbildung 36 und 37a-c). Die Hakenstrahlen sind ungefähr 35 μm bis 73 μm dick (Abbildung 37b) und sehr flach (Abbildung 37b).

Zusätzlich wurden auch Aufnahmen des in Abbildung 36a schwarz markierten Bereichs mit dem REM gemacht (Abbildung 37 d-f). Wie im blauen Bereich sind die Federäste fast vollständig von Hakenstrahlen überdeckt und aus Zellen aufgebaut. Allerdings sind die Hakenstrahlen deutlich weniger gedreht, zur Spitze hin sieht man sie seitlich und kann zwischen den Hakenstrahlen die Bogenstrahlen und Federäste erkennen.

Die blauen Zellen sind dabei mit einer Länge von ungefähr 26 bis 27 μm . grösser als die schwarzen Zellen, welche ungefähr 18 bis 20 μm lang sind (Abbildung 37).

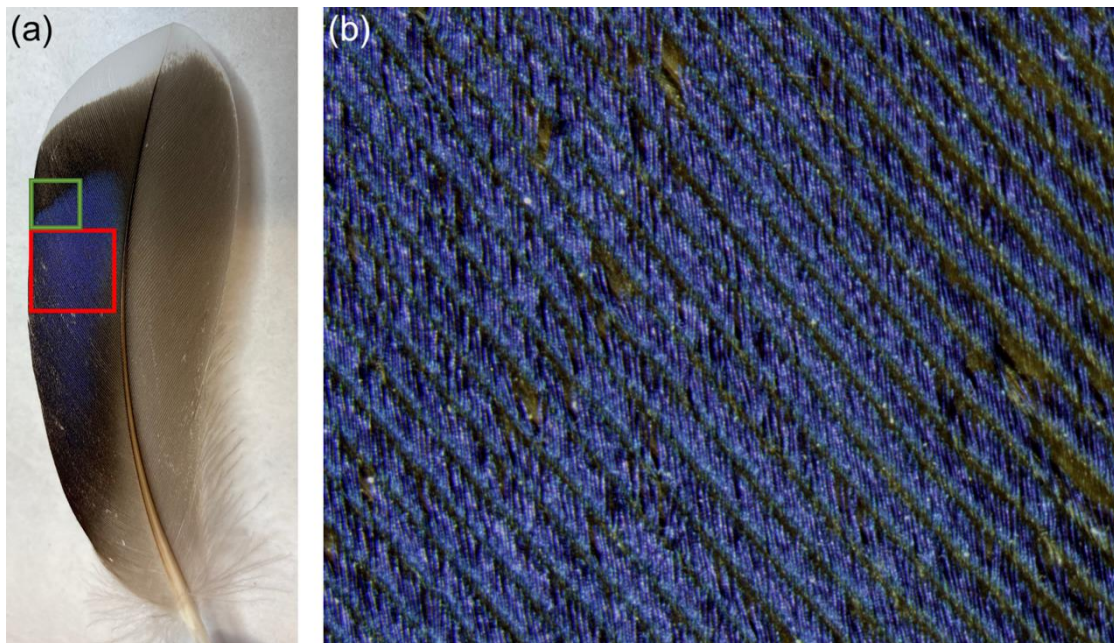


Abbildung 35: (a) Foto der untersuchten Stockentenfeder
Grün markiert: Schwarzer Bereich
Rot markiert: Blauer Bereich
(b) LM-Aufnahme des blauen Bereichs
Vergrößerung: (b) Ungefähr 50-fach

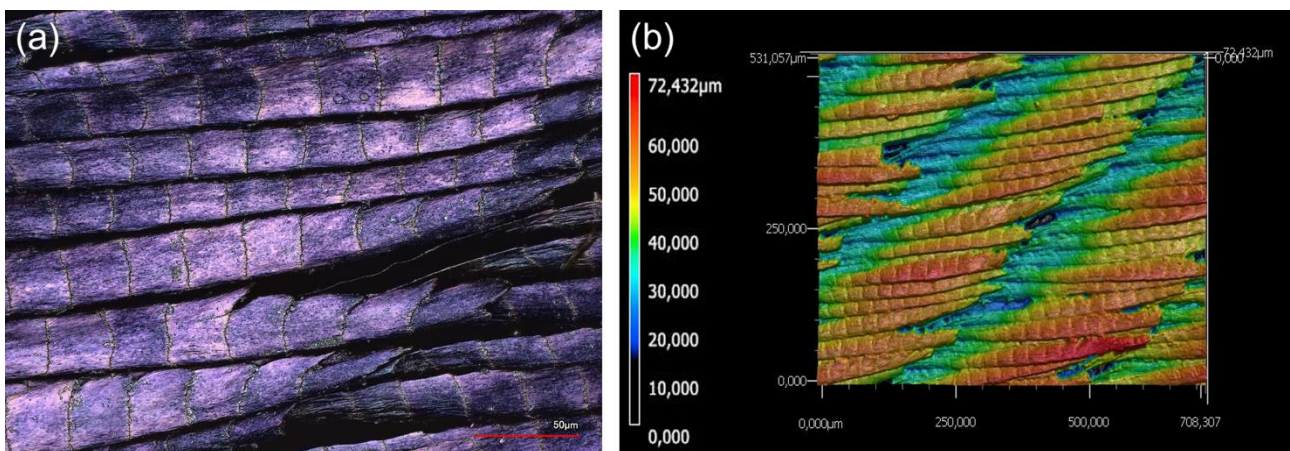


Abbildung 36: Aufnahme der Feder einer Stockente mit dem LM
(a): LSM im LM-Modus (Originalfarbe: Blau)
(b): Höhenprofil
Massstab: 50 μm

3.4.2 Stockente REM

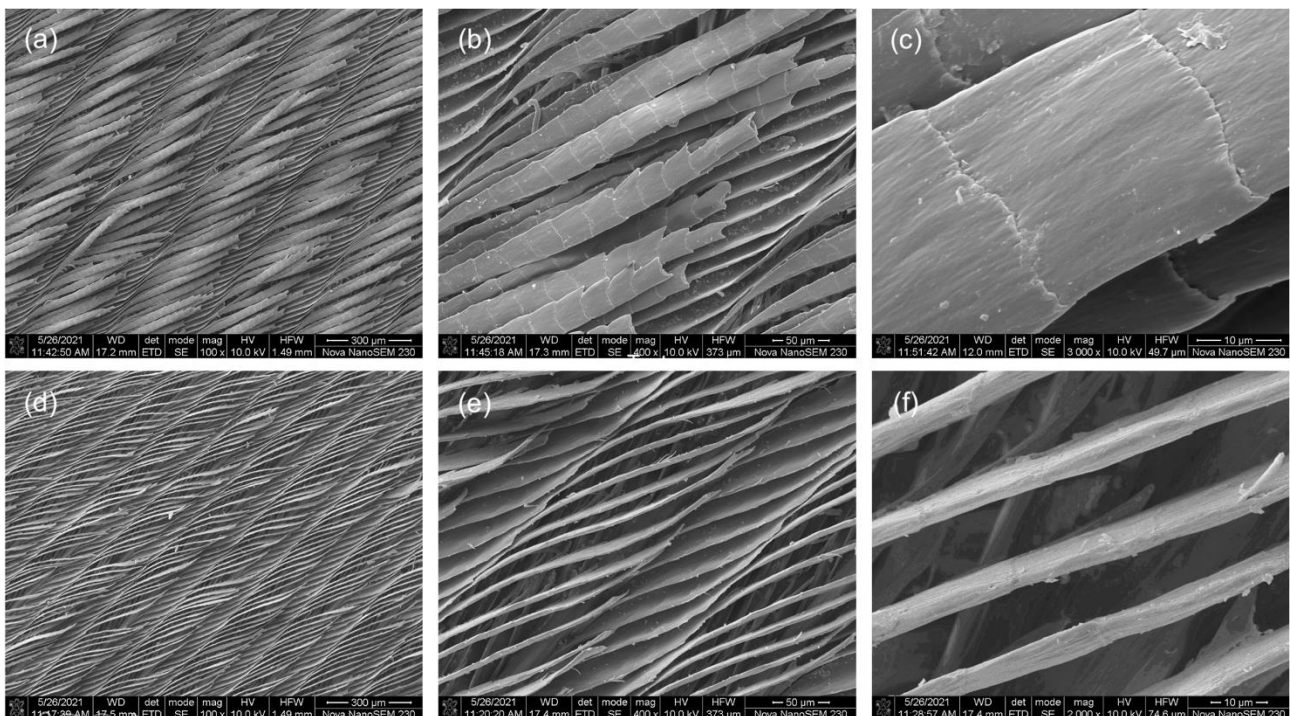


Abbildung 35: Tabelle von Aufnahmen einer Stockentenfeder mit dem REM;
 (a), (b), (c): Blauer Anteil der Feder (rote Markierung von Abbildung 35a)
 (d), (e), (f): Schwarzer Anteil der Feder (grüne Markierung von Abbildung 35a)
 Vergrößerungen: (a) und (d): 100-fach, (b) und (e) 400-fach, (f) 200-fach, (c) 300-fach

3.5 Eisvogel

3.5.1 Eisvogel LM und LSM



Abbildung 36: Foto eines Eisvogels ©Thomas Will, 2011

Beim Eisvogel (Abbildung 39) habe ich Schwanzfedern untersucht. Die Vorderseite (40a) erscheint von der Spitze an dunkelblau. Im Blauton konnte kein oder nur ein leichtes Schimmern (Schmidt, 1949) beobachtet werden. Der untere Teil der Feder ist grau. Die Rückseite (Abbildung 40b) der Feder ist hellgrau (Schaft) bis dunkelgrau (Spitze). Auf den Abbildungen 40c und 41a sind klar die

Federäste als farbgebende Struktur erkennbar. Die Federstrahlen erscheinen schwarz (Abbildung 41a). Die Bogenstrahlen liegen klar über den Hakenstrahlen, welche mit den Häkchen den höchsten Teil der Struktur darstellen (41b). Die Federäste sind dicker als die Federstrahlen (Abbildung 41b).

Die Federäste weisen eine leicht gerillte Struktur auf (Abbildung 43). Auf den Hakenstrahlen sind kleine Kügelchen und netzartige Gebilde erkennbar (Abbildung 42 und 43).

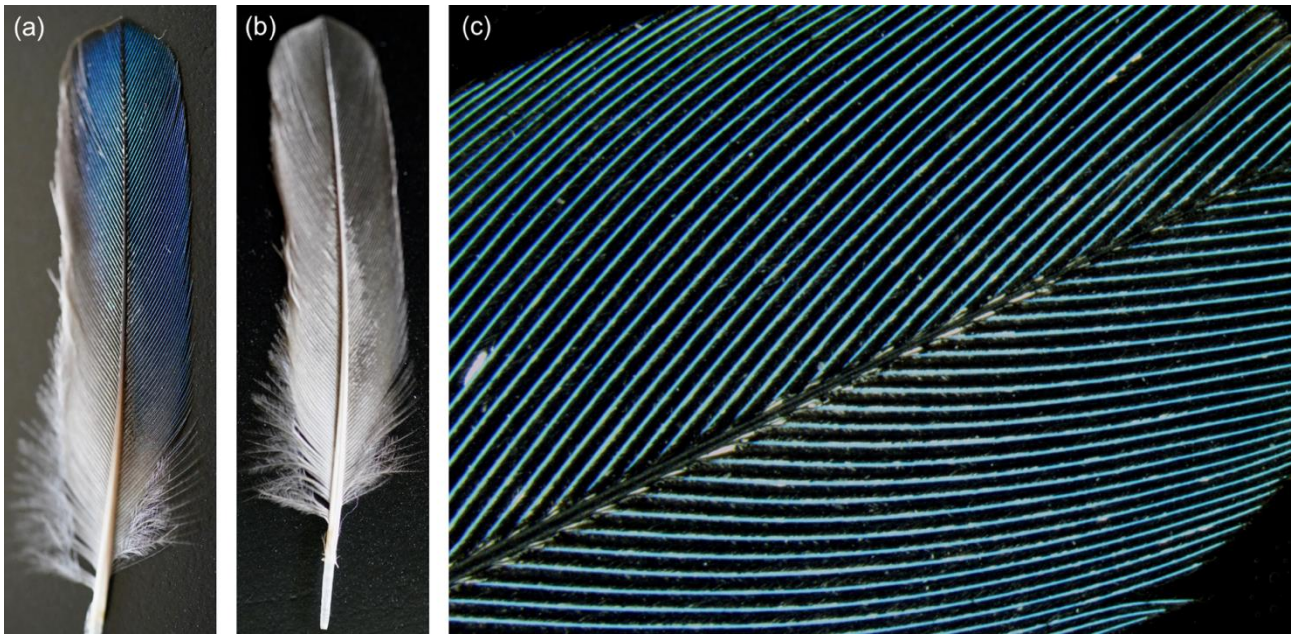


Abbildung 37: (a) Vorder- und (b) Rückseite einer Eisvogelfeder, (c) Aufnahme der Vorderseite mit einem Lichtmikroskop
Vergrößerung: (c) Ungefähr 50-fach

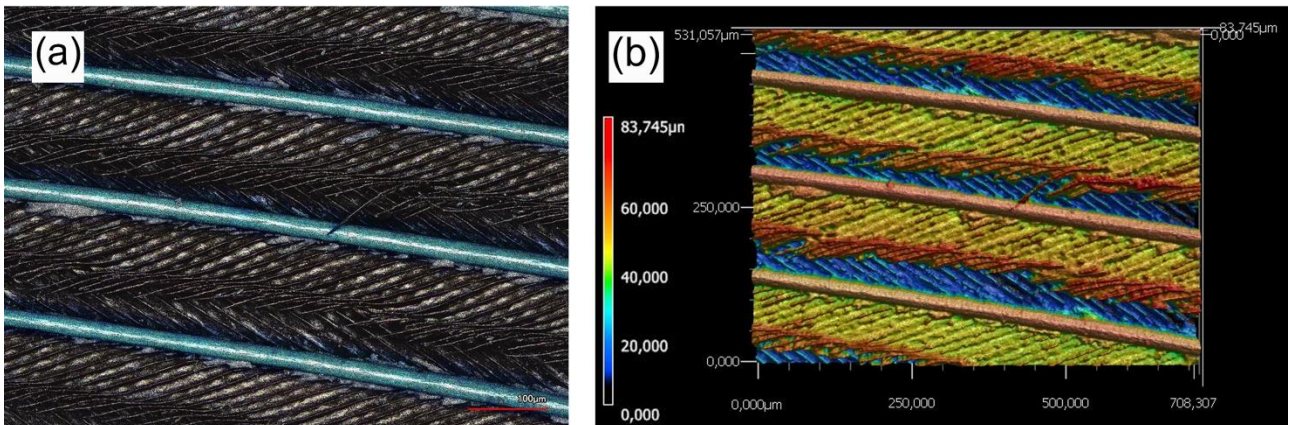


Abbildung 38: Aufnahmen einer Eisvogelfeder mit dem LSM, (a) LSM im LM-Modus, (b) Höhenprofil
Massstab: 10 µm

3.5.2 Eisvogel REM

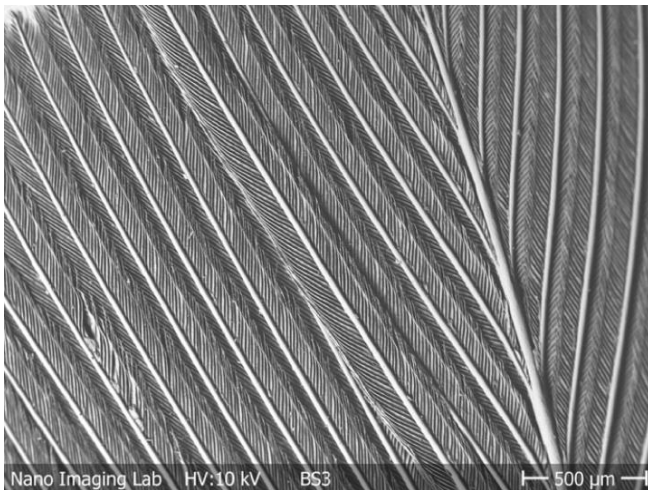


Abbildung 39: Eisvogelfeder unter dem REM,
 Masstab: 500 µm

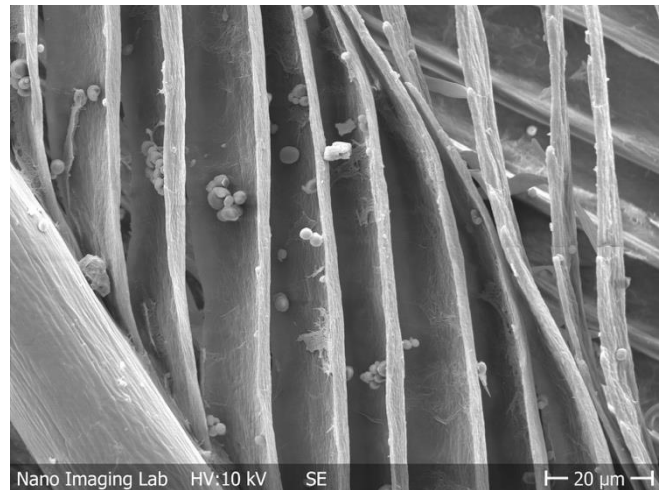


Abbildung 40: Federast und Federstrahlen einer Eisvogelfeder unter dem REM
 Masstab: 20 µm

3.6 Blaumeise

3.6.1 Blaumeise LM und LSM

Von der Blaumeise (Abbildung 44a) wurden blaue Federn vom Kopfbereich untersucht. Verglichen mit den anderen untersuchten Federn (ausser den Federn des Grünspechts) handelt es sich nicht um Steuer- oder Schwungfedern, sondern um Deckfedern. Die Federn sind deutlich weniger dicht aufgebaut und Bogen- und Hakenstrahlen nicht mit Häkchen verhakt (Abbildung 44b, 45 und 46a und c). Die Hakenstrahlen weisen an ihren Enden trotzdem Häkchen auf. Nur die Federäste sind blau gefärbt und auch nur Richtung Spitze (Abbildung 44b und c, Abbildung 46a). Der Federschaft ist ungefähr 80 µm dick, die Federäste ungefähr 26 µm (Abbildung 45b) bis 50 µm (Abbildung 46b) und die Federstrahlen zwischen 12 µm (Abbildung 45b) und 30 µm (Abbildung 46b). Die Federäste erscheinen relativ glatt, währenddem die Federstrahlen aus Zellen aufgebaut sind und uneben sind (Abbildung 47b und c).

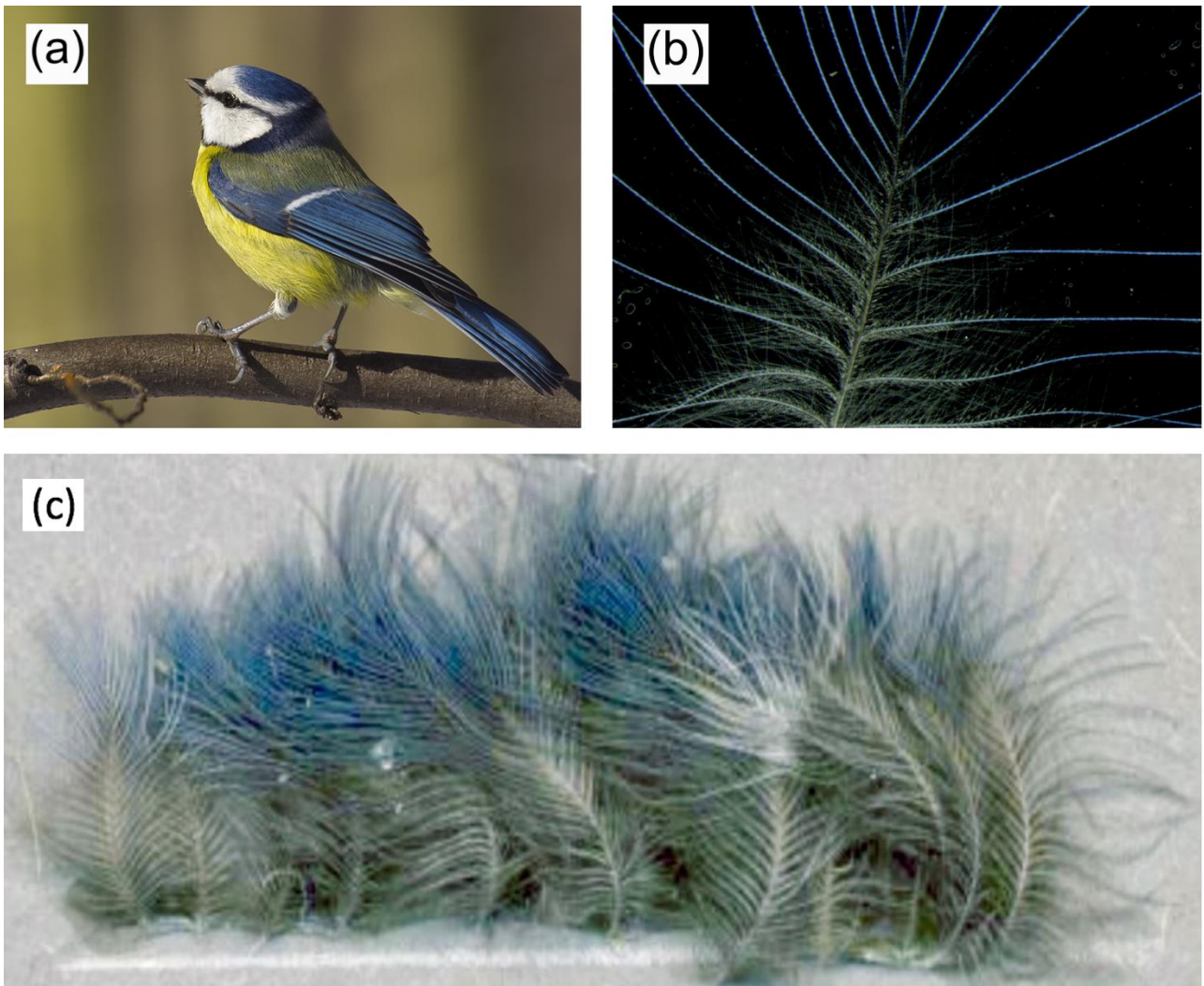


Abbildung 41: (a) Foto einer Blaumeise @wikimedia, Kopffedern einer Blaumeise (b) mit dem LM, (c) Foto mit Kamera @featherbase
Vergrößerung: (b) Ungefähr 100-fach

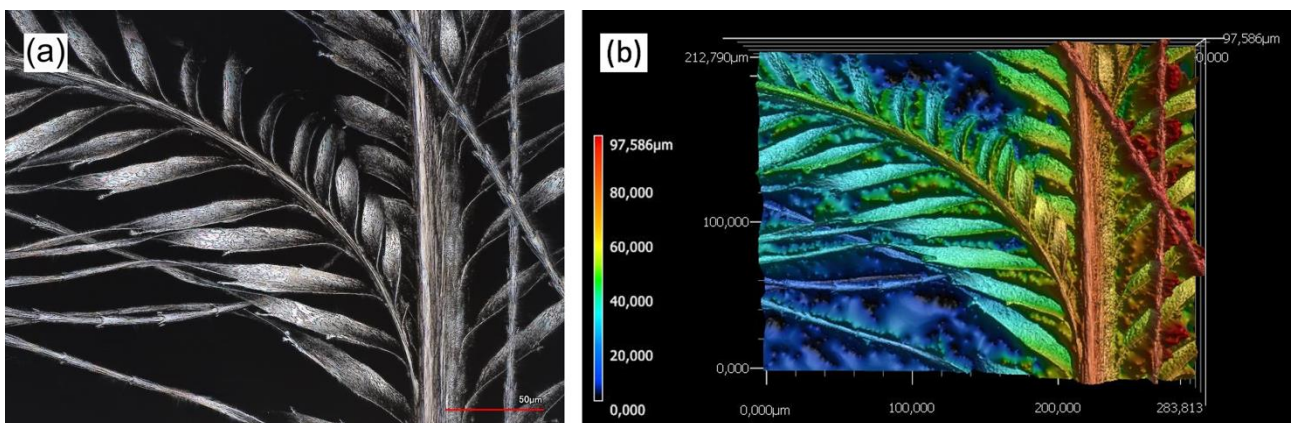


Abbildung 42: Aufnahme einer Kopffeder einer Blaumeise mit dem LSM, (a) LSM im LM-Modus, (b) Höhenprofil
Masstab: 50 µm

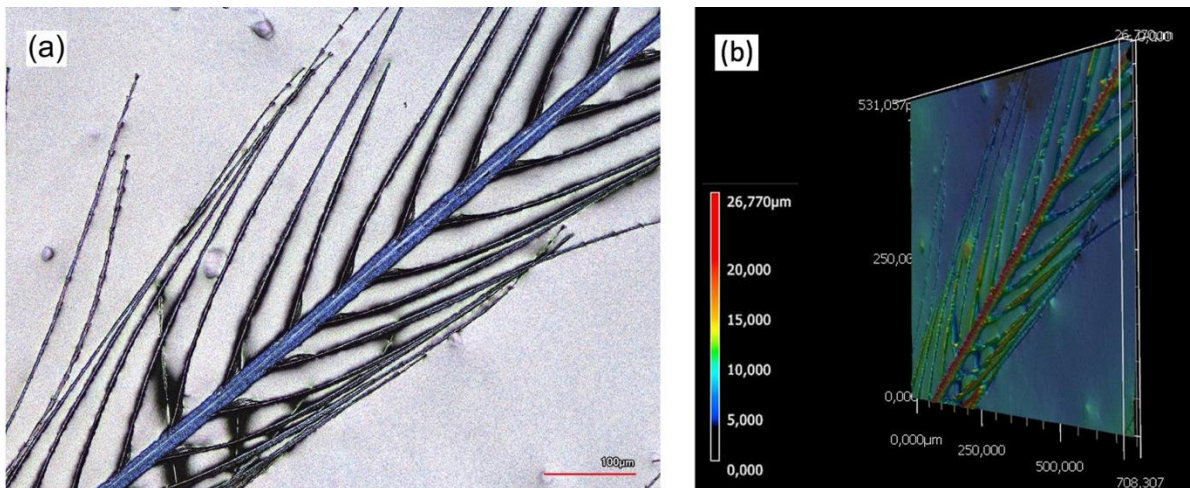


Abbildung 43: Aufnahme einer Kopffeder einer Blaumeise mit dem LSM, (a) LSM im LM-Modus, (b) Höhenprofil
 Massstab: 100 µm

3.6.2 Blaumeise REM

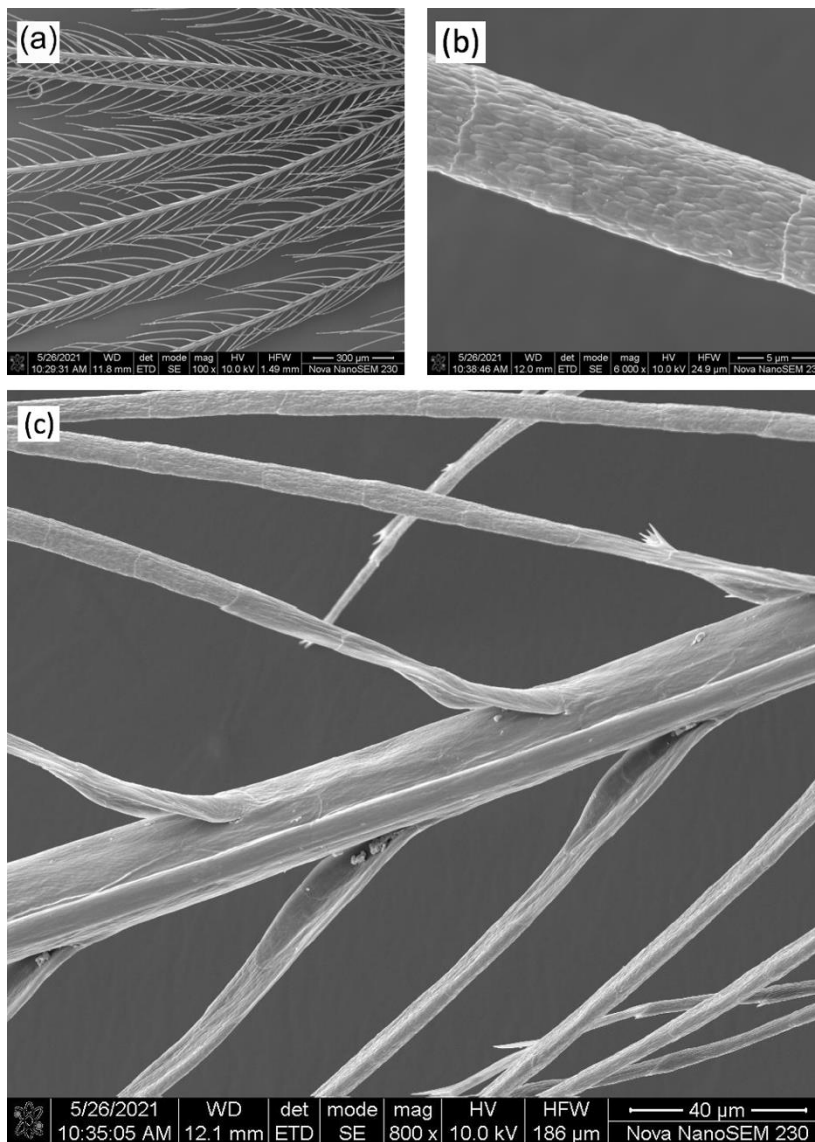


Abbildung 44: Feder einer Blaumeise unter dem REM,
 Vergrößerung: (a) 100-fach, (b) 6000-fach, (c) 800-fach

3.7 Grünspecht

3.7.1 Grünspecht LM und LSM

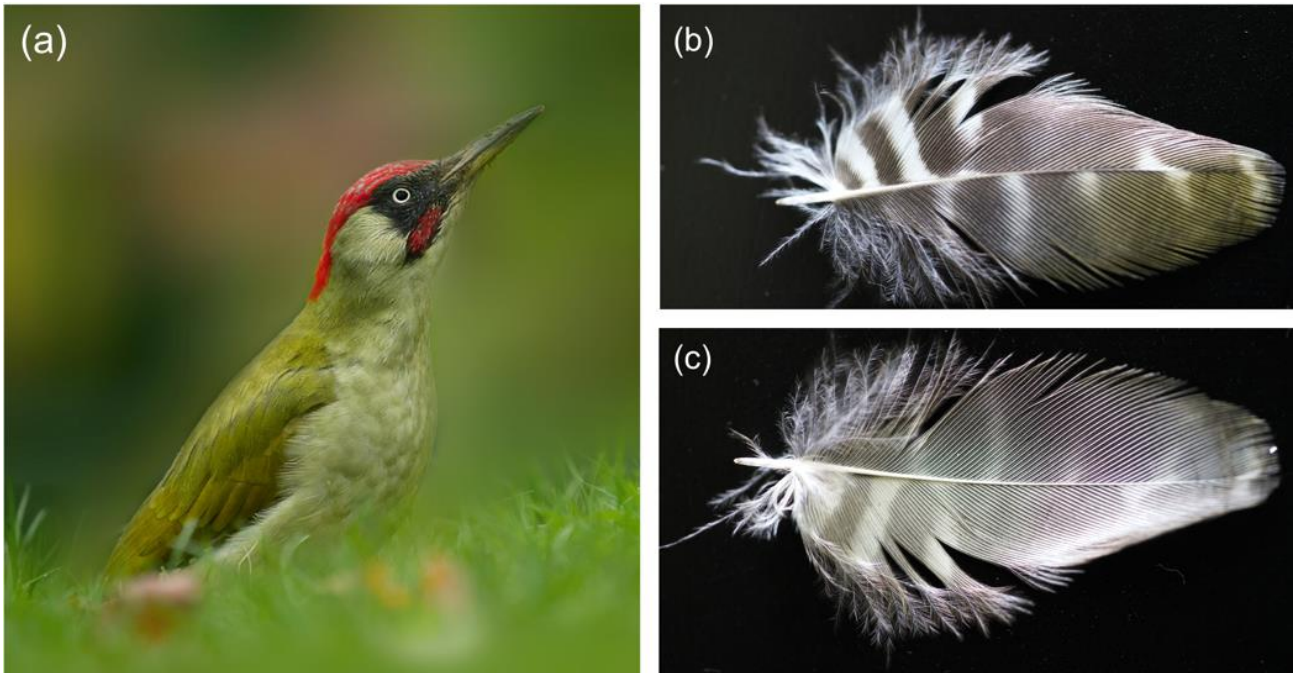


Abbildung 45: (a) Foto eines Grünspechts @featherbase, Foto der Feder (b) Vorder- und (c) Rückseite

Vom Grünspecht (Abbildung 48a) wurden grüne Teile der Körperfedern untersucht (Abbildung 48b). Die Federn weisen einen relativ grossen hellgrauen Bereich mit weissen Streifen auf. Die Spitze der Feder ist olivgrün gefärbt und ebenfalls gestreift. Auf der Rückseite (Abbildung 48c) der Feder ist die grüne Farbe nicht erkennbar. Die Federäste sind grün gefärbt und die Federstrahlen schwarz (Abbildung 49 und 50). Die Bogenstrahlen sind ungefähr $40\ \mu\text{m}$ dick, die Federäste ungefähr $110\ \mu\text{m}$ (Abbildung 50b). Die Bogenstrahlen liegen tiefer als die Hakenstrahlen und sind teilweise von ihnen überdeckt (Abbildung 50 und 51). Die Federäste sind gut sichtbar und weisen feine Rillen auf. Die Oberfläche der Federstrahlen ist nicht ganz glatt. Auf den Federn befinden sich Ablagerungen in Form von Kügelchen (Abbildung 51c).

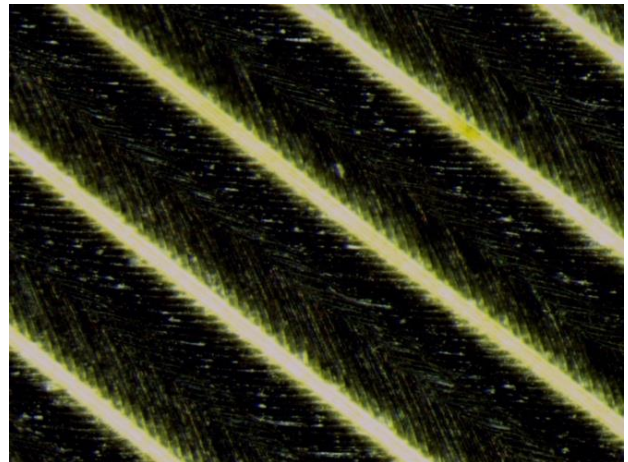


Abbildung 46: Aufnahme einer Grünspechtfeder mit dem LM, Vergrößerung: 100-fach

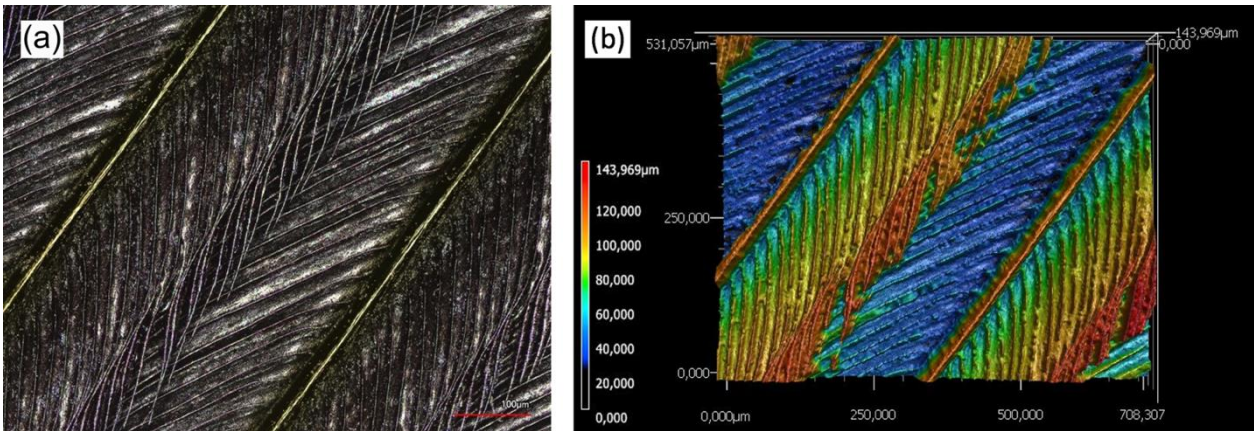


Abbildung 47: Aufnahme einer Grünspechtfeder mit dem LSM (a) LSM im LM-Modus, (b) Höhenprofil
 Masstab: 100 μm

3.7.2 Grünspecht REM

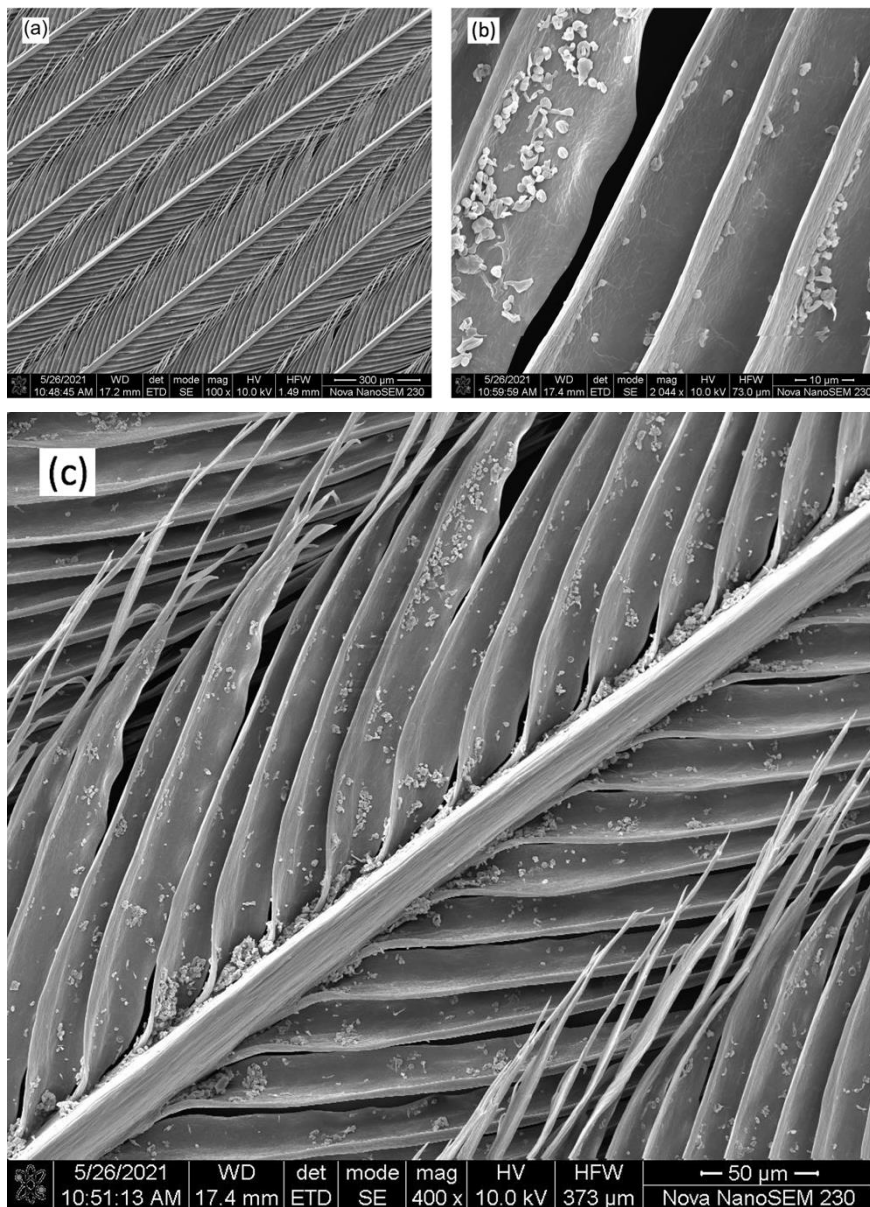


Abbildung 48: REM-Aufnahme einer Grünspechtfeder,
 Vergrößerungen: (a) 100-fach, (b) ca. 2000-fach, (c) 400-fach

4. Diskussion

4.1 Schwierigkeiten beim Mikroskopieren

Trotz dem Sputtering haben sich die Proben, insbesondere bei grösserer Vergrößerung, aufgeladen. Das sieht man anhand von dunklen Flecken, Streifen und verschwommenen Stellen auf den Bildern (Abbildung 52). Teilweise kam es zusätzlich zur Rissbildung der Strukturen (Abbildung 52b). Um dem entgegenzuwirken musste ich mich beim Aufnehmen der Bilder beeilen und konnte so die Bildschärfe teilweise nicht optimal einstellen.

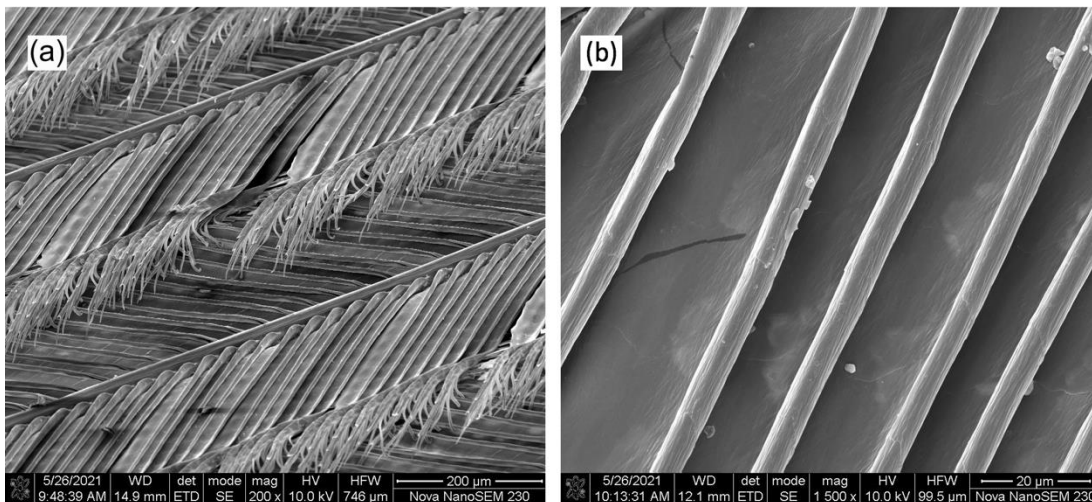


Abbildung 49: Aufnahmen einer weissen Elsterfeder unter dem REM mit Aufladungen. (a) Unschärfe Stellen und dunkle Flecken, (b) Risse in der Oberflächenstruktur.

4.2 Vergleich zur Hypothese

4.2.1 Unterschiede

(7) Es konnte kein Zusammenhang zwischen Zellgrösse und daraus entstehender Wellenlänge festgestellt werden. Dies konnte aufgrund von Berechnungen der Zellgrösse, verglichen mit der daraus resultierenden Wellenlänge, in Abbildung 27 festgestellt werden. (11) Auch zwischen der Grösse der Federäste (Durchmesser) und der Farbe konnte kein Zusammenhang festgestellt werden.

4.2.2 Gemeinsamkeiten

(1) Ob die Farben aufgrund von Strukturfarben entstehen ist anhand der Bilder nicht klar ersichtlich. Aufgrund des schillerns und der typischen Farben, ist aber anzunehmen, dass es sich um Strukturfarben handelt. Im Vergleich mit der Literatur konnten bereits bei allen untersuchten Federn Strukturfarben festgestellt werden.

(2) Schillernde und Nicht-schillernde Farben unterscheiden sich im Aufbau. Auf den Aufnahmen ist erkennbar, dass die Farbe bei schillernden Federn (3) in den Federstrahlen entsteht (beispielsweise bei Abbildung 50a) währenddem sie bei Nicht-schillernden-Farben (8) in den Federästen entsteht

(beispielsweise bei Abbildung 36a). (4) Die Federstrahlen bei schillernden Federn sind aus Zellen aufgebaut.

4.3 Probleme bei der Datenauswertung:

Es ist kein Zusammenhang zwischen den an der Oberseite der Feder erkennbaren Strukturen und der daraus entstehenden Farbe erkennbar. Da die Federn nicht im Querschnitt, betrachtet wurden, können die farbgebenden Strukturen nur von oben betrachtet werden und der Grund für die Entstehung der Farben ist nicht erkennbar.

Allerdings sind klare Unterschiede im Entstehungsort und der Ausprägung der Federäste und -strahlen sichtbar. Amorphe Strukturen konnten aufgrund der Farbentstehung im Federast auf den Aufnahmen mit dem LSM ((Grünspecht, Eichelhäher, Blaumeise, Eisvogel)) klar erkannt werden. Beim Vergleich der verschiedenen Federn fällt auf, dass bei manchen die Federäste deutlich ausgeprägter sichtbar sind. Ausserdem sind die Federäste gut erkennbar und nicht von den Federstrahlen überdeckt. Ein Beispiel hierfür ist die Eichelhäherfeder (Kapitel 3.3).

Die Federn, bei welchen die Farbe auf den Aufnahmen mit dem LSM (Stockente, schimmernde Elsterfeder) in den Federstrahlen entstehen, weisen Dünnschichtinterferenz, Multischichtinterferenz oder photonische Kristalle auf. Die Federstrahlen und deren Kästchenzellen sind stark ausgeprägt. Sie überdecken die Federäste, welche nur schwer erkennbar und im Hintergrund sind. Beispielsweise bei der Entenfeder (Kapitel 3.4).

4.4 Einordnung der Federn in die verschiedenen Farbentstehungsweisen

Durch Vergleiche meiner eigenen Ergebnisse mit der in Kapitel 1.3 bis Kapitel 1.6 dargestellten Theorie und aktueller Literatur konnten die untersuchten Federn in folgende Liste eingeteilt werden:

Pigmentfarben

- Stockente (schwarzer Bereich)

1. Ungeordnete Strukturen

- **Diffuse Reflexion:**

Elster weiss

3. Geordnete Strukturen

- **Dünnschichtinterferenz**
- **Photonische Kristalle**

Elster, Stockente

2. Quasi-geordnete Strukturen

- **Amorphe Strukturen:**

Eichelhäher, Eisvogel, Grünspecht, Blaumeise

Die Begründung für die Einteilung der Federn in diese Kategorien wird in folgendem Kapitel erläutert.

Pigmentfarben

Unter den untersuchten Federn entstand nur die schwarze Farbe der Stockentfeder ausschliesslich aufgrund von Pigmenten. In der Aufnahme ist die ausgeprägte Struktur aus Bogen- und Hakenstrahlen erkennbar (Abbildung 37d - f). Dies deutet darauf hin, dass die Federstrahlen farbgebend sind und nicht die Federäste. Wahrscheinlich entsteht die Farbe aufgrund von Anhäufungen von schwarzem Melanin in den Federstrahlen.

Diffuse Reflexion

Diffuse Reflexion konnte bei der weissen Elsterfeder (Kapitel 3.1) festgestellt werden. Sowohl die Federäste als auch -strahlen sind gut erkennbar (Abbildung 21 und 22). Das lässt darauf schliessen, dass die Farbe in beiden Strukturen entsteht. Auch Vergleiche mit der Literatur bekräftigen diese Annahme (Ilgic, 2018).

Dünnschichtinterferenz:

Diese Art der Farbentstehung konnte bei keiner der untersuchten Federn festgestellt werden. Sie tritt aber beispielsweise bei Felsentauben (Abbildung 9), Kolkraben und Rabenkrähen auf (Yoshioka et al., 2021)

Photonische Kristalle

Eindimensionale photonische Kristalle / Multischichtinterferenz

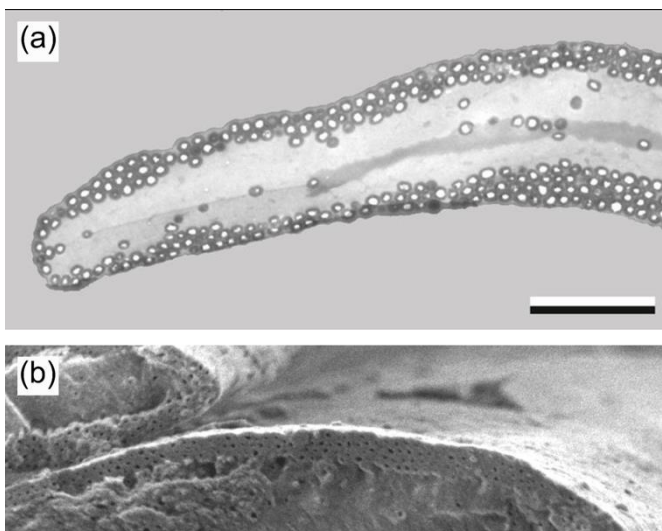


Abbildung 50: Federstrahl einer Elsterfeder mit hohlen Melanosomen an den Zellwänden (Stavenga et al., 2018), (a) Transmissionselektronenmikroskop (TEM)-Aufnahme
Schwarz: Melanin-Röhren
Weiss: Lufteinschlüsse
Dunkelgrau: Keratin-Matrix
(b) REM-Aufnahme
Massstab: (a und b) 2 μ m

Multischichtinterferenz konnte bei den bei Federn der schimmernden Elsterfeder (Kapitel 3.2) festgestellt werden.

Allerdings handelt es sich bei der Elsterfeder nicht um einen perfekten photonischen Kristall (Han et al., 2017). Melanosome in Elsterfedern (Kapitel 3.2) sind zylindrisch geformt und in zwei bis vier Schichten angeordnet (Stavenga et al., 2018, Abbildung 53). Sie sind hohl und mit Luft gefüllt, was zu einer Steigerung der Differenz in den Brechungsindizes und somit zu einer Erhöhung der Reflexion führt (Differenz der Brechungsindizes zwischen: Keratin und Melanin: 1.13 und 1.18; Luft und Melanin: 1.7 to 1.8) (Stavenga et al., 2018).

Hauptsächlich ist die Melanosomschichten an der Oberseite der Zelle ausschlaggebend für die Reflexion und Absorption und somit auch für die Farbentstehung (Stavenga et al. 2018). Die

Anordnung der Melanosome entlang der Zellwände, also in dorsaler Ebene, weist nur eine geringe Periodizität und somit nur einen geringen Einfluss auf die Farbgebung auf (Han et al., 2017).

Die Farbgebung und -sättigung ist abhängig von Anzahl Schichten, Dicke der Schicht und Grösse der Lufteinschlüsse.

Die Farbsättigung nimmt mit der Anzahl Melanosomschichten und der Erhöhung der Schichtdicke zu, wobei ab 4 Schichten kein grosser Effekt mehr messbar ist (Stavenga, et al., 2018).

Eine Vergrösserung der Lufteinschlüsse korreliert bis zu einem gewissen Punkt mit einer Intensivierung der Reflexion und somit der Farbe (Stavenga et al. 2018).

Die resultierende Farbe ist auch abhängig von der Grösse des Lufthohlraums, da dies zu einer Veränderung der Dicke der optischen Schichten führt und somit zu einer Veränderung der Strukturfarbe (Han et al. 2018). Es konnte dabei in den Untersuchungen und Berechnungen in dieser Arbeit kein Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Zellgrösse festgestellt werden (Abbildung 27). Aus den vorliegenden Ergebnissen ist ersichtlich, dass sich die Grössenunterschiede in der Dicke dieser Schichten, welche je nach Farbe variiert, sich nicht wesentlich auf die Grösse der gesamten Zellen auswirkt, sondern dass andere Faktoren für die Zellgrösse wichtiger sind.

Die Farbe ist auch abhängig von der Anzahl Melanosomschichten (Han et al., 2017). Da die Anzahl Schichten lokal variiert, (Abbildung 53) variiert auch die Farbe. Dieser Effekt konnte auch bei den hier untersuchten Federn mit den beschriebenen starken lokalen Farbunterschiede festgestellt werden (Abbildung 26a und 27). Es ist anzunehmen, dass die beschriebene gepunktet erscheinende Oberfläche (Abbildung 26a) mit der Farbentstehung durch Melanosome zusammenhängt.

Zweidimensionale photonische Kristalle

Im Vergleich zum Aufbau der eindimensional periodischen Melanosomstruktur der Elster sind die Melaninstäbchen deutlich dichter gepackt (Stavenga, et al., 2018). Es gibt Interferenzeffekte in zwei Dimensionen.

Bei den in dieser Arbeit untersuchten Federn entsteht die Farbe bei der Entenfeder (Kapitel 3.4) aufgrund von zwei hier beschriebenen optischen Phänomene. Einerseits weisen die Strukturen leichte Dünnschichtinterferenz (Kapitel 1.5.2) an einer Keratinschicht auf. Andererseits beruht die Farbe auf zweidimensionalen photonischen Kristallen (Eliason et al., 2012). Die Keratinschicht hat dabei nur einen kleinen Einfluss auf die Farbgebung, führt aber zu einer stärkeren Sättigung und Helligkeit der Farbe (Rutschke, 1966). Die in der Theorie beschriebenen Melaninstäbchen der photonischen Kristalle sind bei Enten im Vergleich zu Pfauen hexagonal und länglicher geformt ((Eliason et al., 2012) Vergleich Abbildung 11a und c).

Amorphe Strukturen

Bei den in dieser Arbeit untersuchten Feder konnten amorphe Strukturen bei der blauen Farbe bei Eichelhäher (Kapitel 3.3), Eisvogel (Kapitel 3.5) und Blaumeise (Kapitel 3.6) und beim Grünton des Grünspechts (Kapitel 3.7) festgestellt werden. Bei all diesen Federn ist bei der Aufnahme mit dem

LSM klar ersichtlich, dass die Strukturfarbe in den Federästen entsteht. Ausserdem sind bei allen Federn die Federstrahlen schwarz gefärbt. Durch Absorption und als kontrastreicher Hintergrund verstärken sie die Farben (Kapitel 1.6).

Die Farbe des Eisvogels entsteht aufgrund von zwei beschriebenen Phänomena. Einerseits aufgrund von leichter Dünnschichtinterferenz (Kapitel 1.5.2), andererseits aufgrund von amorphen Strukturen. Die Dünnschichtinterferenz entsteht an der Kortextschicht. Ähnlich wie bei der Stockente hat diese nur einen kleinen Einfluss auf die Farbe des Eisvogel (Stravenga, 2011). Bei der Feder sind leichte Schillereffekte und winkelabhängige Farbgebung sichtbar (Stravenga, 2011). Das Gefieder des Eisvogels weist dabei zwei Blautöne auf, Cyan und Mittelblau. Dabei entstehen die Farbunterschiede zwischen Cyan und Blau aufgrund von Veränderungen in der Grösse der Hohlräume der amorphen Struktur (Stavenga et al., 2011).

Auffällig ist auch der ähnliche Aufbau der Strukturen von Grünspecht und Eisvogel, weshalb in dieser Arbeit eine ähnliche Entstehungsweise beider Farben vermutet wird. Allerdings ist beim Grünspecht aufgrund von eingelagerten gelben Pigmenten in der Kortextschicht eine Mischfarbe, nämlich grün, sichtbar ((Kniesche 1914, Frank, 1939) siehe Kapitel 1.6.2). Dabei hat es Einlagerungen von gelbem Lipochrom, aber auch bräunlichem Melanin in der dünnen Hornschicht über der Kästchenschicht (Kniesche, 1914). Das Lipochrom absorbiert die kürzeren Wellenlängen, währenddem das Melanin zu Verdunklung des Grüntons (Frank, 1939) beiträgt. Als Mischform wird Olivgrün wahrgenommen.

Auch beim Eichelhäher entsteht die Farbe auf ähnliche Weise. Laut Schmidt (1949) weisen Federn leicht winkelabhängige Farben und ein leichtes Irisieren auf. Aufgrund dessen kann vermutet werden, dass auch die Kortextschicht bei Eichelhäher leichte Effekte als Dünnschichtinterferenz aufweisen. Farbunterschiede zwischen Eisvogel und Eichelhäher sind dabei auf Unterschiede in der Grösse der Lufträume zurückzuführen (Schmidt, 1949). Die schwarzen Steifen im Muster entstehen aufgrund von Melanineinlagerungen. Unklar ist, wieso die schwarzen Stellen einen deutlich geringeren Durchmesser aufweisen.

Bei der Blaumeise entsteht blaue Farbe, aber auch ultraviolette Farbe (Hunt, 1998) in den Kopffedern aufgrund von amorphen Strukturen (Anderson, 1999, Örnberg, 2008, Galván, 2011). Viele Vögel weisen ein breiteres sichtbares Spektrum auf als Menschen (Eliason et al., 2012). Viele können dabei UV-Strahlen wahrnehmen, wie beispielsweise die Blaumeise. So können durch Strukturfarben nicht nur Farben in unserem sichtbaren Bereich, sondern ein deutlich breiteres Spektrum an Farben entstehen (Eliason et al., 2012). Die Unterschiede im Farbton sind auch hier durch die kleineren Lufteinschlüsse, und die daraus entstehende Farbe mit kürzerer Wellenlänge, erklärbar. Dabei weisen männliche Blaumeisen stärker gesättigte und ultraviolettere Farben auf als weibliche (Johnsen, 2003). Das Auftreten von UV-Farbe hat einen Einfluss auf die Partnerwahl

(Sheldon, 1999, Örnberg, 2008). Es wird vermutet, dass die Farbe Auskunft über die Qualität der Federn und somit Gesundheit des Partners gibt (Glaiván, 2011).

4.5 Weitere potentielle Untersuchungspunkte

Größenunterschiede zwischen Pigment- und Strukturfarben:

Die schwarzen und blauen Bereiche der Eichelhäherfeder (Abbildung 32 und 33), aber auch bei der Stockente (Abbildung 37) weisen starke Größenunterschiede zwischen auf Pigment- und Strukturfarben beruhenden Strukturen auf. Dabei sind Strukturen mit Strukturfarben deutlich dicker. Die Ursache dafür konnte nicht geklärt werden. Ein Vergleich des Querschnitts und Aufnahmen des schwarzen Bereichs wären hilfreich.

Melaninstäbchen-Schichten in Entenfeder

In der Entenfeder sind in der Aufnahme unter dem LSM Unterschiede im Farbton zu erkennen (Abbildung 36a), auch wenn weniger stark als in der Elsterfeder (Abbildung 26a und Abbildung 27a-c). Ein möglicher Grund dafür könnte in der unterschiedlichen Anzahl an Melaninstäbchen-Schichten sein (Abbildung 11d), vergleichbar mit dem Effekt, welcher in der Elsterfeder nachgewiesen werden konnte (Han et al., 2017). Auch in der Pfauenfeder konnte bereits ein Zusammenhang zwischen Anzahl Schichten und Farbe hergestellt werden (Liu, 2012). Andere Erklärungen wären, dass die Farbunterschiede auf die Winkelabhängigkeit der Farbe zurückzuführen sind. Durch Versuche, vergleichbar mit denen von Stavenga (Stavenga et al., 2018), könnte die Ursache potentiell geklärt werden.

Farbunterschiede zwischen LM und LSM

Ungeklärt ist, wieso die Aufnahme unter dem LSM violett erscheint, währenddem die Feder unter dem LM und auf Kameraaufnahmen blau erscheint. Bei einer ungefähr 20-fachen Vergrößerung (Abbildung 54) ist bereits ein Violetton erkennbar, welcher aber bei stärkerer Vergrößerung nochmals verstärkt wird.

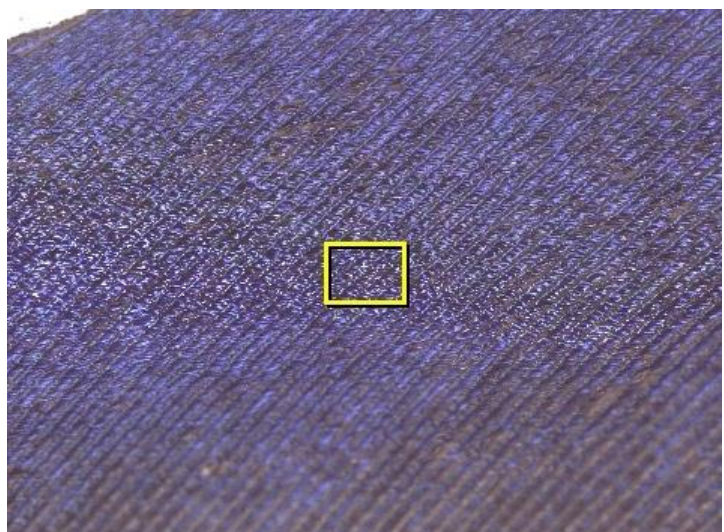


Abbildung 51: Grossaufnahme der Stockentenfeder mit dem LSM
Vergrößerung: Ungefähr 20-fach

5 Quellen- und Literaturverzeichnis

- Andersson, S. 1999. Morphology of UV Reflectance in a Whistling-Thrush: Implications for the Study of Structural Colour Signalling in Birds. *Journal of Avian Biology*, 30.2, 193.
doi:10.2307/3677129
- Auber, L. 1957. The distribution of structural colours and unusual pigments in the class Aves. *Ibis*, 99.3, 463-476.
- Bagnara, J.T., Fernandez, P.J., Fujii, R. 2007. On the blue coloration of vertebrates. 20, 14-26
- Bergmann, H.H. 1998. Natürliche Farbimprägung des Gefieders beim Alpenschneehuhn *Lagopus mutus*. in: *Der Ornithologische Beobachter*. 95, 173-176
- Berthold, P. 1967. Über Haftfarben bei Vögeln: Rostfärbung durch Eisenoxid beim Bartgeier (*Gypaetus barbatus*) und bei anderen Arten. *Zoologische Jahrbücher Abteilung für Systematik, Ökologie und Geographie der Tiere*, 93, 507-595.
- Delhey, K., Peters, A., Kempenaers, B. 2007. Cosmetic coloration in Birds: Occurrence, Function and Evolution. *The American Naturalist*. 169, 1
- Eliason, C.D., Shawkey, D. 2012. A photonic heterostructure produces diverse iridescent colours in duck wing patches. *Journal of The Royal Society Interface*. 9, 2279-2289
<https://doi.org/10.1098/rsif.2012.0118>
- Frank, F. 1939. Die Färbung der Vogelfeder durch Pigment und Struktur. *Journal für Ornithologie*, 87.3, 426-523.
- Galván, I. 2011. Ultraviolet-blue plumage colouration can be perceived as an indicator of fluctuating asymmetry by Blue Tits (*Cyanistes caeruleus*). *J Ornithol.* 152, 223–230
<https://doi.org/10.1007/s10336-010-0568-y>
- Han, C., Kim, H., Jung, H., Lee, S.I., Jablonski, P.G., Jeon, H. 2017. Origin and biomimicry of weak iridescence in black-billed magpie feathers. 4, 464-467
- Hill, G.E., McGraw, K.J. 2006. *Bird Coloration*. Harvard University Press. 1.
- Hunt, S., Bennett, A.T.D., Cuthill, I.C., Griffiths, R. 1998. Blue tits are ultraviolet tits. *Royal Society*. 265, 451-455
<https://doi.org/10.1098/rspb.1998.0316>
- Igic, B., D'Alba, L., Shawkey, M.D. 2018. Fifty shades of white: How white feather brightness differs among species. *Sci Nat*. 105, 18
- Jacobi, A. 1918. Die Schutzfärbung der Schneehühner. *Naturwissenschaften*, 6.16, 189-192.
- Johnsen, A., Delhey, K., Andersson, S., Kempenaers, B. 2003. Plumage colour in nestling blue tits: sexual dichromatism, condition dependence and genetic effects. *Royal Society*. 270, 1263-1270
- Kinoshita, S., Yoshioka S. 2005. Structural colour in nature the role of regularity and irregularity. *Wiley-VCH Verlag*. 6, 1442–1459
- Kinoshita, S., Yoshioka, S., Miyazaki, J. 2008. Physics of structural colors. *Prog. Phys.* 71.7, 076401
- Kinoshita, S. 2008. *Structural Colors in the Realm of Nature*. World Scientific.
doi: <https://doi.org/10.1142/6496>
- Kniesche, G. 1914. Die Grünfärbung auf Grundlage der Blaustruktur. In: Kniesche, G. Über die Farben der Vogelfedern. *Friedrichs-Universität, Halle-Wittenberg*. 327–356
- Kolle, M. 2011. *Photonic structures inspired by nature*. Springer Science & Business Media.
- Liu, X.Y. 2012. *Bioinspiration: from nano to micro scales*. Springer Science & Business Media. New York.
DOI 10.1007/978-1-4614-5372-7

- Lockwood, D.J. 2016. Rayleigh and Mie scattering. *Encyclopedia of Color Science and Technology*. Springer, New York, 1-12.
- Nakamura, E., Yoshioka, S., Kinoshita, S. 2008. Structural color of rock dove's neck feather. *Journal of the Physical Society of Japan*, 77.12, 124801.
- Örnberg, J., Andersson, S., Griffith, S.C., Sheldon, B.C. 2002. Seasonal changes in an ultraviolet structural colour signal in blue tits, *Parus caeruleus*. *Biological Journal of the Linnean Society*, 76, 237–245.
<https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.2002.tb02085.x>
- Prum, R., Torres, R., Williamson, S. et al. 1998. Coherent light scattering by blue feather barbs. *Nature*. 396, 28–29.
<https://doi.org/10.1038/23838>
- Prum, R.O., Torres, R., Williamson, S., Dyck, J. 1999. Two-dimensional Fourier analysis of the spongy medullary keratin of structurally coloured feather barbs. *Royal Society*. 266.1414, 13-22.
<https://doi.org/10.1098/rspb.1999.0598>
- Rutschke, E. 1966. Die submikroskopische Struktur schillernder Federn von Entenvögeln. *Z. Zellforsch.* 73, 432–443.
<https://doi.org/10.1007/BF00329021>
- Schmidt, W.J. 1949. *Altes und Neues über Strukturfarben im Tierreich*. W. Schmitz Verl., Giessen
- Shawkey, M.D., Hill, G.E. 2006. Significance of a basal melanin layer to production of non-iridescent structural plumage color: evidence from an amelanotic Steller's jay (*Cyanocitta stelleri*). *J Exp Biol*. 209.7, 1245–1250
doi: <https://doi.org/10.1242/jeb.02115>
- Sheldon, B., Andersson, S., Griffith, S., Örnberg, J., Sendecka, J. 1999. Ultraviolet colour variation influences blue tit sex ratios. *Nature*. 402, 874–877
<https://doi.org/10.1038/47239>
- Stavenga, D.G., Tinbergen, J., Leertouwer, H.L., Wilts, B.D. 2011. Kingfisher feathers – colouration by pigments, spongy nanostructures and thin films. *J Exp Biol*, 214.2, 3960–3967.
doi: <https://doi.org/10.1242/jeb.062620>
- Stavenga, D.G., Leertouwer, H.L., Wilts, B.D. 2018. Magnificent magpie colours by feathers with layers of hollow melanosomes. *J Exp Biol*. 221.4
doi: <https://doi.org/10.1242/jeb.174656>
- Tilley, R.J.D. 2011. *Colour and optical properties of materials an exploration of the relationship between light, the optical properties of materials and colour*. John Wiley & Sons, UK
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9780470974773.fmatter>
- Yin, H., Shi, L., Sha, J., Li, Y., Qin, Y., Dong, B., et al. 2006. Iridescence in the neck feathers of domestic pigeons. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*. 74. 17279948
- Yoshioka, S., Kinoshita, S. 2002. Effect of Macroscopic Structure in Iridescent Color of the Peacock Feathers. *Osaka University*. 17, 169–181
- Yoshioka, S., Nakamura, E. and Kinoshita, S. 2007. Origin of two-color iridescence in rock dove's feather. *Journal of the Physical Society of Japan*, 76.1, 013801.
- Yoshioka, S. and Akiyama, T. 2021. Mechanisms of Feather Structural Coloration and Pattern Formation in Birds. in: Hashimoto, H., Goda, M., Futahashi, R., Kelsh, R. and Akiyama, T., 2021. *Pigments, pigment cells and pigment patterns*. Springer, Singapore. 343-366
- Zobl, S. 2018. *Strukturfarben im Brennpunkt der Bionik: Zwischen Kunst und Naturwissenschaften*. Springer Spektrum.

Internetquellen

o.V. 2018. Wellenoptik.

<https://www.grund-wissen.de/physik/optik/wellenoptik.html> (3.4.2021)

Lektorat. 2021. Elektromagnetisches Spektrum.

https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum. (3.4.2021)

Ruppel, M. 2012. Rasterelektronenmikroskopie.

<https://www.bio.uni-frankfurt.de/43229358/einfuehrung.pdf> (3.4.2021)

6 Ehrlichkeitserklärung

Die eingereichte Arbeit ist das Resultat meiner persönlichen, selbstständigen Beschäftigung mit dem Thema. Ich habe für sie keine anderen Quellen benutzt als die in den Verzeichnissen aufgeführten. Sämtliche wörtlich übernommenen Texte (Sätze) sind als Zitate gekennzeichnet.

Ort, Datum Unterschrift(en)

7 Anhang

Begriffserklärung:

Rayleigh-Streuung: Streuung von elektromagnetischen Wellen an Teilchen deren Durchmesser deutlich kleiner als die Wellenlänge ist. Beispielsweise die Streuung von Licht an Molekülen in der Luft, welche die Ursache der Färbung des Himmels ist (Lockwood, 2016)

Mie-Streuung: Streuung von elektromagnetischen Wellen an Teilchen, deren Durchmesser ungefähr der Wellenlänge entspricht oder grösser ist (Lockwood, 2016).

Liste der Schweizer Vögel eingeteilt in verschiedene Farbkategorien ihres Gefieders:

Schwarzöne mit blau-grünem Schillern

- Elster (unteren Außenfahnen)
- Kiebitz (Oberflügeldecken, Armschwingen, Schirmfedern, Oberschwanzdecken)
- Auerhahn (Brustbereich)
- Birkhahn
- Schwarzstorch
- Star

Grün, irisierend

- Löffelente
- Schellente
- Stockente

Blautöne

- Blaumerle
- Blaukehlchen
- Steinrötel
- Bienenfresser
- Blauracke
- Blaumeise

Grüntöne

- Buchfink
- Grünspecht
- Grauspecht
- Grünfink
- Sommer- oder Wintergoldhähnchen

Blaugrau

- Ringeltaube

Tabelle 1: Farbe mit entsprechender Wellenlänge

(Wikipedia: Elektromagnetisches Spektrum, 3.4.2021):

Farbe	Wellenlängenbereich
Rot	640 nm-780 nm
Orange	600 nm-640 nm
Gelb	570 nm-600 nm
Grün	490 nm-570 nm
Blau	430 nm-490 nm
Violett	380 nm-430 nm

Tabelle 2: Brechungsindize verschiedener Medien

Für diese Arbeit sind vor allem die folgenden Brechungsindizes wichtig:

(Tilley, 2011, S. 27):

Medium	Brechungsindex (n)
Luft	1
Melanin	1.7-1.8
Keratin	1.54-1.55