

RESEARCH

Sigrid Zobl

Strukturfarben im Brennpunkt der Bionik

Zwischen Kunst und
Naturwissenschaften



Springer Spektrum

Strukturfarben im Brennpunkt der Bionik

Sigrid Zobl

Strukturfarben im Brennpunkt der Bionik

Zwischen Kunst und
Naturwissenschaften

 Springer Spektrum

Sigrid Zobl
Institut für Zoologie
Universität Innsbruck
Österreich

Dissertation Akademie der bildenden Künste Wien, 2017

1. Hauptbetreuer: Univ. Prof. DI Dr. Manfred Schreiner, Akademie der bildenden Künste Wien
2. Betreuerin: Associate Prof. DI Dr. Ille Gebeshuber, Technische Universität Wien
3. Betreuer: Ao. Univ.-Prof. Dr. Thorsten Schwerte, Universität Innsbruck

ISBN 978-3-658-20802-8 ISBN 978-3-658-20803-5 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-20803-5>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Meinen geliebten Kindern Aiko & Lilo gewidmet

Vorwort

Aufgrund der Komplexität und Diversität der Natur gibt es noch viele ungeklärte Forschungsfragen, im Detail ist das beispielsweise der Transfer von technisch nutzbaren Anwendungen, was Teil der hier vorliegenden Dissertation ist. Die Farben der Natur zu erforschen, fällt nicht unbedingt in den Fachbereich der Biologie, wohl eher der Physik und Chemie. Trotzdem habe ich mich als Ökologin, deren Fähigkeit es ist, vernetzend zu denken, an dieses Forschungsgebiet herangewagt, weil ich vermutlich den Umweg über die Kunst nahm. Als bildende Künstlerin beschäftigte ich mich intensiv mit Materialien und dem unermüdlichen Suchen nach dem perfekten Ausdruck von Schönheit, stoischem Sein und gleichzeitigem Nutzen für die Gesellschaft. Strukturfarben in Flora, Fauna und Mineralien weisen diese Eigenschaften auf, und um diese zu ergründen, kehrte ich zum Forschen an die Universität zurück. Strukturfarben bergen immer noch Geheimnisse, die es für die Wissenschaft aufzuklären gilt. Natürlich möchten wir diese Schönheit und ihre Funktionalitäten selbst kreieren können. Da beginnt die Bionik, die im Rahmen der Bio-Photonik ihren Fokus im Rahmen dieser Arbeit auf Strukturfarben gerichtet hat.

Danksagung

An dieser Stelle danke ich besonders O. Univ.-Prof. DI Dr. Manfred **Schreiner**, der mir die Durchführung meines Dissertationsprojektes an der Akademie der bildenden Künste in Wien ermöglichte. Associate Prof. DI Dr. Ille **Gebeshuber**, Ao. Univ.-Prof. Dr. Thorsten **Schwerte** und Herrn Willi **Salvenmoser**, die mich dabei unterstützten, sowie Em. Univ.-Prof. Dr. Helen **Ghiradella** für ihr Mentoring. Dank spreche ich auch an all jene aus, die mir die Durchführung und Fertigstellung dieser wissenschaftlichen Arbeit ermöglichen:

- Meinen Eltern, denn ohne sie wäre ich diesen Weg niemals gegangen.
- Meinen Kindern für ihre unendliche Geduld und ihr Verständnis.
- Meiner Taufpatin
- Mag. Dr. Lödl vom NHM der einen Schaukasten mit Insekten spendete.
- Em. Univ.-Prof. Dr. Christian Pfaller für die REM-Messungen an der Medizinischen Universität Innsbruck.
- Dr. Unterberger für die 3D lichtmikroskopischen Untersuchungen am MTI-Innsbruck.
- Fr. Ing. Eitenberger für die REM Messungen an der TU-Wien.
- Mag. Dr. Vetter für die Spektrometermessungen im Rahmen der Publikation (Zobl et al. 2016 a).
- Herrn Bulbius-Danek für die Programmierung eines Makro Tools zum automatischen Datenimport der Spektrometermessungen in Excel files.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	VII
Danksagung.....	IX
Inhaltsverzeichnis	XI
Abkürzungen.....	XV
Zusammenfassung	XVII
Abstract.....	XVIII
1 Zielsetzung und Problemstellung.....	1
2 Einleitung.....	3
2.1 Licht.....	4
2.2 Das menschliche Auge.....	4
2.3 Farbe.....	6
2.4 Strukturfarben, organische Farbstoffe und Pigmente.....	7
2.5 Physikalische Grundlagen von Strukturfarben	9
2.6 Bionik: Strukturfarben.....	16
2.6.1 Bionik: Strukturfarben in der Kunst.....	18
2.6.2 Bionik: Strukturfarben Material und Technik.....	25
2.7 Strukturfarben in der Natur.....	33
3 Template.....	37
3.1 CD-R	40
3.2 Fauna.....	41
3.2.1 <i>Mollusca</i> (Weichtiere).....	42
3.2.2 <i>Insecta</i> (Insekten).....	43
3.2.2.1 <i>Lepidoptera</i> (Schmetterlinge).....	47
3.2.2.2 <i>Diptera</i>	51
3.2.2.3 <i>Neuroptera</i>	51
3.2.2.4 <i>Coleoptera</i> (Käfer).....	52
3.2.3 <i>Aves</i> (Vögel).....	53
3.3. Flora	55
4 Methode - Herstellung von Replikaten.....	59
4.1 Replikationsmethode für Strukturfarben basierend auf der weichen Abdrucklithographie und Abformtechnik.....	59
4.2 Evaluierung der entwickelten Replikationstechnik	61

4.3	Materialtests	62
4.3.1	Materialuntersuchungen für die Abdrucktechnik.....	62
4.3.2	Untersuchung von Effektmaterialien	66
4.3.3	Zusatzinformation zu den Materialtests und den dafür ausgewählten Materialien	70
4.4	Ausgewählte Oberflächenstrukturen abzuförmender Template	70
5	Verwendete Analyseverfahren.....	73
5.1	Mikrospektrometermessung	73
5.2	Lichtmikroskopie	75
5.3	Rasterelektronenmikroskop (REM und eREM)	76
5.4	Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)	77
5.5	Rasterkraftmikroskop (AFM).....	78
5.6	Digitalbilder.....	79
5.7	Beleuchtung.....	79
5.8	Digitale Bildverarbeitung und Bildanalyse	80
5.9	Digitale Datenverarbeitung	80
6	Ergebnisse	83
6.1	Materialtests	83
6.1.1	CD-R-Templat.....	83
6.1.2	Materialuntersuchungen für die Abdrucktechnik.....	84
6.1.3	Untersuchung von Effektmaterialien	93
6.2	Abgeförmte organische Template	105
6.2.1	<i>Haliotis</i> sp. (<i>Haliotidae</i>)	105
6.2.2	<i>Pinctada</i> sp. (<i>Pteridae</i>)	106
6.2.3	<i>Polenia rudis</i> (<i>Caliphoridae</i>).....	108
6.2.4	<i>Calliphora</i> sp. (<i>Caliphoridae</i>)	109
6.2.5	<i>Lucilia</i> sp. (<i>Caliphoridae</i>)	110
6.2.6	<i>Chrysoperla</i> sp. (<i>Chrysopidae</i>)	113
6.2.7	<i>Thera juniperata</i> (<i>Geometridae</i>).....	114
6.2.8	<i>Morpho peleides</i> (<i>Morphinae</i>)	116
6.2.9	<i>Morpho hyacinthus</i> (<i>Morphinae</i>)	118
6.2.10	<i>Morpho achilles</i> (<i>Morphinae</i>)	119
6.2.11	<i>Morpho rhetenor</i> (<i>Morphinae</i>)	120
6.2.12	<i>Caligo memnon</i> (<i>Nymphalidae, Brassolini</i>)	122
6.2.13	<i>Eryphanis polyxena</i> (<i>Nymphalidae, Brassolini</i>).....	124

6.2.14	<i>Parides sesostris</i> (Papilionidae)	125
6.2.15	<i>Papilio memnon</i> (Papilionidae)	127
6.2.16	<i>Charanyca ferruginea</i> (Noctuidae).....	128
6.2.17	<i>Cetonia aurata</i> (Cetoniinae).....	130
6.2.18	<i>Carabus sp.</i> (Carabidae)	133
6.2.19	<i>Geronticus eremita</i> (Threskiornithidae)	134
6.2.20	<i>Pavo cristatus</i> (Phasianidae)	137
6.2.21	<i>Rosa sp.</i> (Rosaceae)	138
6.2.22	<i>Lilium sp.</i> (Liliaceae)	140
6.3	Mikrospektrometermessungen der organischen Template im Vergleich ..	141
6.4	Mikrospektrometermessungen der Abformungen der organischen Template im Vergleich.....	143
6.5	Mögliches Farbtuning in der Abform- und Abdrucktechnik.....	145
6.5.1	Theoretischer Zugang.....	145
6.5.2	Korrelation von Farbe und Trennmittelschichtdicke bei Morpho peleides Flügel Abdrücken	148
6.6	Die Instrumentalisierung der Abform- und Abdrucktechnik als Stempel ...	154
6.7	Mögliche Anwendungen der entwickelten Technik in der Kunst	155
7	Zusammenfassung und Diskussion.....	157
7.1	Materialtests	157
7.2	Template	159
7.3	Replikate	159
7.4	Stempeltechnik.....	166
7.5	Farbtuning	167
7.6	Anwendung von Strukturfarben in der Kunst.....	167
8	Ausblick	171
9	Literatur	173
10	ANNEX	199
10.1	ANNEX-I: Tabellen	199
10.2	ANNEX-II: Definitionen	203

Abkürzungen

AFM	Atomic Force Microscopy (Rasterkraftmikroskopie)
CD-R	Compact Disc Recordable
C.e.	<i>Cetonia auratia</i>
DS	Deckschuppe
EM	Elektronenmikroskopie
G.e.	<i>Geronticus eremita</i>
IR	Infrarot
KH	Ketonharz
M.h.	<i>Morpho hyacinthus</i>
M.p.	<i>Morpho peleides</i>
M.r.	<i>Morpho rhetenor</i>
PF	Pioloform
PVS	Polyvinylsiloxan
REM	Rasterelektronenmikroskopie
RGB	Rot, Grün, Blau
R _r	Relative Remission der Probe bezogen auf den Bariumsulfat Weißstandard
TS	Tiefenschuppe
TEM	Transmissionselektronenmikroskopie
UV	Ultraviolett

Mathematische physikalische Abkürzungen

λ	Wellenlänge
nm	Nanometer
n	Brechungsindex oder Stichprobe
%	Prozent

Zusammenfassung

Die hier vorliegende Arbeit beschreibt eine *low-tech-high-yield*-Abformmethode für synthetische und organische Oberflächen, die schnell, kostengünstig, mit wenig Materialaufwand und ohne aufwändiges Equipment durchführbar ist, um Strukturfarben und eventuell ihre Funktionen für eine künstlerische Anwendung zu replizieren. Für die Negativ-Abdrücke wird Polyvinylsiloxan verwendet – einsetzbar als Masterstempel – um mehrfach Positiv-Abdrücke in Epoxidharz anzufertigen. Die Oberflächenstrukturen der oberen Schuppenlamina von Schmetterlingen konnte durch die Integration einer methodischen Innovation erstmals für Negativ- und Positiv-Abdrücke dienen. Diese Methode konnte in einem renommierten Wissenschaftsjournal (peer-review) veröffentlicht werden. Die erfolgreich replizierte Struktur besteht pro abgeformter Schuppe im Detail aus Rippen, Mikrorippen und Cuticula-Ausformungen. Die Replikate (max. 3 cm²) zeigen mit bloßem Auge bei gestreutem Durchlicht schillernde Farbeffekte. Die im Rahmen dieser Arbeit abgeformten zweiundzwanzig organischen Template waren aus der Gruppe der Flora und Fauna. Die Machbarkeitsstudie, um ausgewählte Materialien aus den künstlerischen Techniken für die Abdrucktechnik zu untersuchen, erfolgte mittels Abdruck eines Beugungsgitters anhand einer CD-R. Vergleichende Materialtests mit kommerziell erhältlichen Effektpigmenten dienten als qualitativer Vergleich für die erstellten CD-R-Abdrücke. Die Untersuchung der Proben erfolgte mittels Lichtmikroskopie und Spektrometermessungen, für ausgewählte Arten kam zusätzlich das Rasterelektronenmikroskop und oder das Transmissionselektronenmikroskop sowie das Rasterkraftmikroskop zum Einsatz. Die CD-R-Positiv-Abdrücke liefern einen direkten Anwendungsbereich als künstlerisches Stilmittel, da es an Stelle der Weißhöhlungen nutzbar ist. Die positiven Epoxidharz-Abdrücke können aber auch zur Anlage einer Datenbank für biomimetische Oberfläche dienen, mit entsprechenden Angaben zu Farbe und Funktion der zu katalogisierenden Struktur. Es wäre hierfür nur ein simples Aufbewahrungssystem nötig. Ebenso wie die Abdrücke für die Grundlagenforschung neue Erkenntnisse bringen.

Abstract

The dissertation deals with a *low-tech-high-yield* method to obtain structural colours and occasionally their function for artistic applications. The method is fast and applicable at low costs with less equipment by imprinting synthetic surfaces or organic surfaces. The negative imprints are made of polyvinylsiloxane which could act as master stamp to supply multiple positive epoxy resin replicas. This study presents a novel replication method to obtain the color-causing nanostructure based on the upper laminae of numerous cover scales of some chosen butterflies obtained solely by imprinting their upperwing surfaces. The developed method was published in a well-known science journal (peer-reviewed). The imprint shows their successful replicated micro- and nanostructure. A novel integrated release agent made it possible. These replicas (max. 3 cm²) show structural coloration effects visible to the naked eye. The whole work comprises twenty-two imprinted templates coming from flora and fauna. The proof of principles concerning suitable materials for imprints which is based on the cast of the diffraction grating of a CD-R. The evaluation of the CD-R imprinting results was done by comparisons with the commercial available effect pigments. Further some fundamental experimental work was also done with them. The 23 templates and imprints were investigated by light microscopy and micro spectrometry, the nanostructures of some chosen samples by scanning and or transmission electron microscopy as well as atomic force microscopy. The CD-R imprints supplies a direct application enhancing the white heightening in art with a new technique. The positive imprints made of epoxy resin can be easily stored, archived and catalogued to be part of a big data bank containing biomimetic surfaces with completing information to color and function. As well as these imprints may gain new knowledge for fundamental research.

1 Zielsetzung und Problemstellung

Die hier vorliegende interdisziplinäre Dissertation basiert auf einer Synergie der Fachbereiche Biologie, Technik und Kunst zum Thema Strukturfarben (Abb. 1.1). Die Darlegung des Wissensstandes zeigt die betreffenden Forschungsfelder auf und präsentiert einerseits neue Materialien, andererseits neue Techniken, anwendbar in der Kunst. Die Biologie dient hier als Wissenslieferant und die Kunst ist Profiteur. Aus diesem Pool an Wissen galt es eine, für alle Teilbereiche verbindende und zu schließende Lücke zu finden. Der Wissensabgleich zeigt, dass es bisher noch keine ökologisch nachhaltige Methode gibt, um Strukturfarben künstlerisch zu erzeugen. Auch gibt es im Moment noch keine geeignete Methode, wie das Stempeln von Strukturfarben als *low-tech*-Anwendung. Beides ist von gesellschaftlichem Interesse, da es den Klimazielen, den ökologischen Fußabdruck zu reduzieren, dient und die Produktionskosten senken könnte. Die Entwicklung einer innovativen Methode aufbauend auf den Status quo um Strukturfarben zu erzeugen¹, die so einfach in der Handhabung ist, dass sie in einem Maleratelier anwendbar ist, ist noch ausständig. Im Detail fehlt es an einer geeigneten *low-tech*-Methode, um die Schuppen eines Schmetterlings abzuformen, ebenso wie bisher nur eine kleine Auswahl an Abdrücken einiger botanischer Arten^{2,3} existiert. Ziel dieser Dissertation ist es, eine bisher einzigartige Artenliste zusammenzustellen, um mögliche stempelbare Farbeffekte zu erzeugen. Die Machbarkeitsstudie erstreckt sich dabei auch auf das Testen einer Auswahl geeigneter Abdrucksmaterialien aus dem Bereich der künstlerischen Maltechniken mittels CD-R-Farbstempel-Abdruck und dem qualitativen Vergleich mit bekannten im Handel erhältlichen Effektmaterialien.

¹ Zobl et al. 2016 a

² Whitney und Kolle 2008

³ Koch et al. 2008



Abb. 1.1: Grafische Darstellung der interdisziplinären Rollenaufteilung der Fachbereiche Biologie als Wissenslieferant, der Technik als Wissenstransferierende und der Kunst als Anwender wissenschaftlicher Entwicklungen.

2 Einleitung

Strukturfarben sind die Folge von interferierenden Lichtwellen erzeugt durch Nanostrukturen unabhängig von der chemischen Zusammensetzung des Materials - jedoch bedingt durch dessen Brechungsindex - und ihren architektonischen Anordnungen im Größenbereich des sichtbaren Wellenlängenlichtes. Man spricht dabei von additiver Farbmischung, da die Spektralfarben in Summe „weißes“ Licht ergeben. Die Strukturen können dieses „zerlegen“ und oder konstruktive Interferenzen hervorrufen. Bekannte Strukturbeispiele hierfür sind der Regenbogen, Glasprismen, Ölfilme auf Wasserpflützen, schillernde Pfauenfedern oder der *Morpho*-Schmetterlingsflügel.

Der Stand des Wissens im Sinne der *Biomimetik* (neudeutsch: *Bionik*) zeigt einerseits aus der Materialwissenschaft Techniken und Materialien um Strukturfarben bereitzustellen - sowie deren zusätzliche funktionalen Anwendungen - andererseits davon bereits Angewandtes in der Kunst. Die Machbarkeitsstudie zur Herstellung von Strukturfarbenreplikaten im Rahmen eines Künstlerateliers führte zur Entwicklung einer neuartigen Anwendung der weichen Abformtechnik für Schmetterlings-Arten um einfach und schnell Replikate von der mikro- und nanostrukturierten farbgebenden Oberfläche von den Flügeln spezieller Spezies zu erhalten.

Zur Bewertung der CD-R-Stempeltechnik in unterschiedlichen Materialien, den Effektmaterialien, der 22 organischen Template aus Fauna und Flora sowie der Abdrücke dienten Mikrospektrometermessungen, lichtmikroskopische Aufnahmen, für ausgewählte Arten auch Bilder der Transmissions-, Rasterelektronen- und Rasterkraftmikroskopie.

Die Einleitung der hier vorliegenden Arbeit referiert über die Themen Licht (Kap. 2.1), das menschliche Auge (Kap. 2.2), Farbe (Kap. 2.3), Strukturfarben Pigmente und Farbstoffe (Kap. 2.4) sowie über die physikalischen Grundlagen (Kap. 2.5), welche Basis für das Verständnis dieser Arbeit sind.

Grundlegendes über die Bionik, einerseits bezüglich Strukturfarben-Anwendungen in der Kunst (Kap. 2.6.1), andererseits über bereits erfolgreich entwickelte bionische Techniken und Materialien (Kap. 2.6.2), um Strukturfarben zu erzeugen - meist basierend auf in der Natur (Kap. 2.7) vorkommenden, die anhand von Beispielen präsentiert sind - zeigt die wissenschaftlichen Grundlagen zum Thema der hier vorliegenden Dissertation auf.

2.1 Licht

Licht, eine transversale, elektromagnetische Welle (Welle-Teilchen-Dualismus) lässt sich sowohl mit der Wellennatur (z. B. Interferenz) als auch mit der Teilchennatur (z. B. Photoeffekt) beschreiben⁴. Die Welle besteht aus einem elektrischen und einem magnetischen Feld. Bei transversalen Wellen schwingen beide Felder jeweils senkrecht in Ausbreitungsrichtung zueinander⁵. Fresnel Gleichungen berücksichtigen die Gesamtheit der elektromagnetischen Eigenschaften des Lichtes⁶. Das sogenannte „weiße“ Licht besteht wiederum aus einem farbigen elektromagnetischen Wellenlängengemisch⁷. Die Photonen sind wellenlängenabhängig energiegeladenen Teilchen⁸. Bei gleichbleibender Photonenanzahl ist kurzwelliges blaues Licht energiereicher als langwelliges rotes Licht⁹. Die Wellenlänge und die Photonendichte bestimmen den Energiegehalt⁹. Der Lichtreiz wird durch den Raum, die Zeit, den Energiegehalt und die Photonendichte bestimmt¹⁰. Unterschiedliche Lichtarten wie beispielsweise Sonnenlicht oder Halogenlampe ergeben unterschiedliche Strahlungskurven, jeweils gemessen innerhalb eines Wellenlängenbereichs.

2.2 Das menschliche Auge

Voraussetzung für das Detektieren von Farbe sind entsprechende Empfänger.

⁴ Young 1802

⁵ Faraday 1838; Fresnel 1866, S. 533 – 552; Maxwell 1868, S. 137 - 143

⁶ Fresnel 1866; Kinoshita et al. 2008; Gebeshuber und Lee 2012; Zobl et al. 2011

⁷ Newton 1704

⁸ Hooke 1665, S. 54

⁹ Einstein 1905

¹⁰ Fritsche 2013, S. 85; Heldmaier und Neuweiler 2003, S. 333

Diese können durch Absorption von Lichtphotonen das Signal in eine Farbformation transformieren. Das menschliche Auge¹¹ beispielsweise entspricht einem Photorezeptor bestehend aus Stäbchen (helldunkel Rezeptor) und Zapfen (Farbrezeptor), wenn diese bei einem Säugetier vorkommen, geben ausschließlich letztgenannte Aufschluss über die wahrgenommene Farbe¹². Die Zapfen erbringen ihre maximale Leistung ab einer Leuchtdichte von $30 \text{ cd} / \text{m}^2$ ¹³. Die Stäbchen arbeiten auch im Dämmerlicht bei einer maximal wahrnehmbaren Wellenlänge von 505 nm ¹³. Beide Arten von Sinneszellen sind beim Menschen an der halbkugelförmigen Rückwand der Retina angeordnet¹⁴. Das komplexe Wirbeltierauge mit Linse ist in der Lage, ein verkehrtes Bild der Wirklichkeit auf der Retina zu erzeugen¹⁴. Das eigentliche Sehpigment Rhodopsin, das in den Membranscheibchen an der Rückwand des Auges an den Enden der Stäbchen und Zapfen in Richtung Gehirn eingelagert ist, absorbiert selektiv¹⁵ mit der größten Sensitivität bei einer Wellenlänge von 500 nm ¹⁶.

Die Zapfen und Stäbchen messen die Photonenmenge und die Veränderungen im Photonenfluss¹⁶. Der Membranstapel mit dem eingelagerten Rhodopsin wird ständig erneuert (Rhodopsinstoffwechsel)¹⁷. Das Rhodopsin besteht aus dem lichtabsorbierenden Retinal und dem Protein Opsin¹⁷.

Das menschliche Auge besitzt drei Zapfentypen (trichromatisches System) mit jeweiligen Maxima im blauen bei 440 nm , im grünen bei 535 nm und im gelben bis roten Bereich bei 570 nm ¹⁷. Das Protein Opsin ist der zweite Teil des Sehpigmentes und besteht aus mehreren Aminosäuren¹⁸. Dadurch entsteht die unterschiedliche Sensitivität der Zapfen¹⁸. Das Signal selbst liefert kein Bild¹⁸. Der für das Sehen zuständige Cortex-Bereich liefert das Bild zum Signal¹⁸.

¹¹ Wald, Granit Hartline, 1967 Nobelpreis

¹² Bowmaker und Dartnall 1980

¹³ Lang 1993, S. 668

¹⁴ Eckert et al. 2002, S. 273

¹⁵ Eckert et al. (2002)

¹⁶ Gordon 1942; Wald et al. 1950, 1964; Fliesler und Anderson 1983

¹⁷ Bowmaker und Dartnall 1980; Granit 1941; Heldmaier und Neuweiler 2003 S. 370; Rushton 1960; Tansley und Boynton 1978; Wald 1964; Wehner et al. 1990, S. 415

¹⁸ Eckert et al. 2002 S. 294; Miller und Desimone 1991; Hartline 1938; Hering 1878, S. 8 - 9

2.3 Farbe

Die reflektierten Wellenlängen des Lichtes eines nicht selbst leuchtenden Objektes bestimmen dessen Farbe. Damit eine physikalische Größe in Bezug auf die Farbe entsteht, braucht es Licht zur Beleuchtung dieses Körpers und einen Detektor, der das Signal (die remittierten Wellenlängen) von dem Gegenstand empfängt und dessen Wellenlängenbereich und Remissionsgrad bestimmen kann. Die Wellenlänge des Farbreizes für die sichtbare Strahlung des Sonnenlichtes liegt zwischen 380 bis 780 nm (ohne Ultraviolett- und Infrarot-Bereich) für das helladaptierte menschliche Auge¹⁹. Der häufig auftretende Wert von 400 – 700 nm²⁰ ist ein normierter gerundeter Wert²¹.

Licht und Detektor sind maßgeblich bei der Bewertung des Farbreizes beteiligt. Durch die Strahlung, die auf die Zapfen der Netzhaut im menschlichen Auge trifft (Kap. 2.2) entsteht der Farbreiz durch Sinnesempfindung²² erzeugt durch die Farbrezeptoren.

Eine Farbempfindung ist nicht immer eindeutig zuordenbar, wie beispielsweise Farbillusionen²³ und Simultankontrasteffekte²⁴ zeigen. Der gleiche Farbreiz muss nicht die gleiche Farbempfindung und *vice versa* erzeugen. Im Falle von Simultankontrasteffekten beeinflusst die umgebende Farbe eines Körpers die Körperfarbe selbst²⁴. Die *Farbkonstanz* besagt, dass das menschliche Auge in der Lage ist, eine Farbwahrnehmung auch unabhängig von der Beleuchtungssituation durchzuführen, bedingt durch die *Farbumstimmung* des Auges²⁵. Diese definiert den Zeitrahmen, in dem das Auge sich an die veränderte Beleuchtungssituation adaptiert²⁵. Unterschiedliche Ausgangsfarben können durch Mischen dieselbe Endfarbe erzielen²⁶. Gleiche Farbreize entstehen aus gleichen Farbvalenzen²⁸. Eine Farbvalenz entsteht durch Mischen aus den drei Farbanteilen rot, grün und blau, die sich z. B. in einem dreidimensionalen Farbraum befinden.

¹⁹ DIN 5031, Deutsches Institut für Normierung, 1984; Kaase und Serick 1993, S. 635

²⁰ Eckert und Apfelbach 2002, S. 289; Fritsche 2013, S. 89

²¹ Kaase und Serick 1993, S. 635

²² Helmholtz 1867; Lang 1993, S. 679 – 671; Young 1802, S. 18

²³ Hering 1878; Lübbe 2013; S. 49 – 57; Türr 1986; Lanner 1973

²⁴ Vitinghoff 1983, S. 22- 25; Lang 1993, S. 671

²⁵ DIN 5031: „das hell adaptierte Auge“

²⁶ Grassmann 1853: „Metamerie“

Es handelt sich hierbei um eine Vektorgrafik bestehend aus einem roten x-Vektor, einem grünen y-Vektor und einem blauen z-Vektor²⁷. Die Farbvalenz kann sich beispielsweise in einem CIE (Commission International d' Eclairage) Farbraum befinden oder den darin enthaltenen kleineren RGB-Farbraum²⁷. Die jeweiligen Vektoren sind dimensionslos und können zwischen null und eins liegen. Sind alle Anteile eins, erhält man weiß basierend auf der additiven Farbmischung (Strukturfarben)²⁷. Im Gegensatz dazu wird bei der subtraktiven Farbmischung (Pigmente) Licht absorbiert²⁸.

Der CIE-Farbraum schließt die Farbempfindung des menschlichen Auges mit ein, durch die Berücksichtigung der Sensitivität des trichromatischen Zapfensystems des menschlichen Auges²⁹.

Eine Farbe ist durch X-(rot), Y-(grün) und Z-(blau) Werte ihrer Kurve entsprechend der Erregbarkeit der jeweiligen Zapfen normiert (Normspektralwertfunktion)²⁹. Die Reizschwelle einer Farbwahrnehmung ist abhängig von der Beleuchtungsart, der Beleuchtungsstärke, der Sensitivität und den Grenzen des Detektors. Vergleichbare Werte benötigen daher die gleichen Beleuchtungs- und Detektorbedingungen.

Simultankontraste, sprich Farbtonveränderungen durch die umgebenden Farbtöne, Glanzlichter, Punkte mit maximaler Streuung ohne Eigenfarbe sind bei der Determinierung des Farbtones auszuschließen³⁰. Matte Oberflächen reflektieren das eingestrahelte Licht gleichmäßig in alle Richtungen unabhängig vom Beleuchtungswinkel im Gegensatz zu den glänzenden³¹.

2.4 Strukturfarben, organische Farbstoffe und Pigmente

Strukturfarben basieren auf lichtremittierenden Strukturen (Kap. 2). Im Gegensatz dazu können Pigmente bzw. Farbstoffe auch Lichtwellen absorbieren basierend auf chemischen Stoffen³².

²⁷ Fechner 1860, S. 82 - 96; Grassmann 1853, S. 7, S. 78 – 84; Schrödinger 1920, 1925; Lang 1993, S. 669 - 758

²⁸ Von Beer 1852

²⁹ Lang 1993, S. 669 - 758

³⁰ Vietinghoff 1983, S. 35 - 37

³¹ Lang, S. 683

Diese Stoffe, die in organischen Schichten in sogenannten Plastiden, Chromophoren, Iridophoren oder Iridosomen eingelagert sind, bezeichnet der Biologe als Pigment oder Pigmentierung, der Farbchemiker spricht hier von Farbstoffen, da sie in isolierter Form löslich sind und in geringen Korngrößen ($< \mu\text{m}$) vorliegen und somit keine Pigmenteigenschaften aufweisen³². Da das Pigment im Rahmen dieser Arbeit den vorkommenden Farbstoff als Teil von einem lebenden Organismus im biologischen Sinne beschreibt, ist eine Unterscheidung für die hier vorliegende Arbeit nicht vorzunehmen und bleibt daher in weiterer Folge unberücksichtigt.

Strukturfarben sind sogenannte Lichtfarben und unterliegen den Gesetzen der additiven Farbmischung und Pigmente bzw. Farbstoffe der subtraktiven Mischung. Dieses Wissen ist zurückzuführen auf den Physiologen Helmholtz (1852), der erkannte, dass Komplementärfarben in der additiven Mischung weiß ergeben, das sind namentlich Rot und grünliches Blau, Orange und Cyanblau, Gelb und Indigoblau, grünliches Gelb und Violett. Bei Pigmenten ergibt die subtraktive Farbmischung der Komplementärfarben Grau³³.

Pigmente absorbieren und reflektieren bestimmte Wellenlängen des Lichtes³⁴ abhängig von ihrer Molekularstruktur hauptsächlich bestehend aus konjugierten Doppelbindungen³⁵. Die polymerisierten konjugierten Doppelbindungen mit einer Kohlenstoffatomanzahl (C) von 10 zeigen einen hellen gelben Farbton, die mit ansteigender C-Zahl ($n = 14$, orange) zu dunkleren Farbtönen wechselt³⁶. Findet die Absorption in einem engen Spektralbereich statt, ist die in Durchsicht beobachtete Farbe jeweils die Komplementärfarbe³⁷.

Strukturfarben können abhängig vom Beobachtungswinkel Licht transmittieren und reflektieren. Nanostrukturierte Schmetterlingsschuppen können beispielsweise mit omni-direktionalen nicht reflektierenden Eigenschaften ausgestattet sein. Die Flügel gleichen dadurch einer Art gläsernen Scheibe³⁸.

³² Wehner und Gehring 1990; Meier 1961

³³ Maltechnische Erfahrung der Autorin

³⁴ Wood 1911

³⁵ Förster 1939, S. 549

³⁶ Köst und Champman 1975; Kuhn und Winterstein 1928; Brieskorn und Capuano 1953

³⁷ Förster 1939

³⁸ Siddique et al. 2015

Ähnliche Farbeffekte zeigen die im Rahmen dieser Arbeit abgeformten schuppenlosen Flügel der Fliegen *Polenia rudis*, *Calliphora sp.* oder *Lucilia sp.*

Eine Zunahme von farbgebender Strukturierung bewirkt einen Anstieg in der Reflexion³⁹. Strukturabhängig können diese Reflexionen auch im UV-Bereich auftreten⁴⁰. Sind farbgebende Strukturen oberhalb von Pigmentschichten anzutreffen, können sie die Leuchtkraft insgesamt erhöhen, wobei Strukturfarben höhere Intensitäten wie Pigmente erzielen können⁴¹. Bei den *Morpho*-Schmetterlings-Arten beispielsweise absorbieren die Melanine darunterliegende Schichten die Komplementärfarbe und verstärken dadurch den Kontrast der Blaufärbung⁴². Das unterhalb einer Strukturfarbe liegende Pigment absorbiert nämlich das transmittierte Licht der oberen Schicht⁴³ und wirkt daher kontrastverstärkend auf diese⁴⁴. Die farbgebende Struktur kann dabei auch die Absorption der Pigmente erhöhen, durch eine bestmögliche Weiterleitung der einfallenden Strahlen in tiefere Schichten, wobei sich die vom Untergrund kommende Lichtstreuung durch die dort eingelagerten Pigmente vermindert⁴⁵. Strukturfarben können die richtungsabhängigen Reflexionen darunterliegender pigmentierter Schichten abschwächen⁴⁶, wohingegen die eingelagerten Pigmente wiederum die Winkelabhängigkeit von Strukturfarben reduzieren können, durch Konzentration der Reflexion auf einen eng gefassten Spektralbereich⁴⁷. Eine sichtbare Polarreflexion von 0 ° bis 180 ° kann daher charakteristisch sein für Pigmente mit aufgelagerten farbgebenden Strukturen in der Fauna⁴⁸.

2.5 Physikalische Grundlagen von Strukturfarben

Strukturfarben entstehen durch Interferenz, Beugung und Streuung bedingt durch Licht (Kap. 2.1) und Struktur (Tab. 2.1). Die strahlenden Farben einiger

³⁹ Giraldo und Stavenga 2007

⁴⁰ Morehouse et al. 2006

⁴¹ Mason 1926, S. 385; Shawkey et al. 2005; Schrödinger 1920

⁴² Kinoshita 2008, S. 79

⁴³ Karlson 1972, S. 150, S. 189

⁴⁴ Yoshioka und Kinoshita 2006

⁴⁵ Vukusic et al. 2004

⁴⁶ Kinoshita 2008, S. 84

⁴⁷ Wilts et al. 2011

⁴⁸ Huxley 1976