



Centrum Humanberuflicher Schulen des Bundes Villach  
Höhere Lehranstalt für wirtschaftliche Berufe  
Richard-Wagner-Straße 8, Tel.: 0424224809, Fax: 04242 218880  
[www.chs-villach.at](http://www.chs-villach.at)

Höhere Lehranstalt für Kunst und Gestaltung

# Designed by Nature

Désirée Micheli, 5AHK

Clara Rieger, 5AHK

Betreuer/innen: Prof. Mag. Ernst Rasinger, D. ID Anne Gaudilliere

Datum der Abgabe: 22.2.2019



# I. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit setzt sich mit dem Thema Bionik und seiner Verbindung mit der Kunst auseinander.

Über die Physikerin Prof. Dipl. -Ing. Dr. techn. Ille Gebeshuber kamen wir an die Forschungsarbeit von Dr. rer. nat. Sigrid Zobl. Sie kreierte eine Technik zur Herstellung eines „Masterstempels“, mit dem es möglich ist, Strukturfarbe mehrfach auf verschiedene Oberflächen zu übertragen. Während eines Zusammentreffens mit Prof. Dipl. -Ing. Dr. techn. Ille Gebeshuber nahmen wir bei einem Workshop teil, bei dem uns die low-tech-high-yield-Abformmethode präsentiert wurde. Die Resultate dieser Diplomarbeit basieren zu einem großen Teil auf diesen Studien.

Der theoretische Teil der Arbeit beginnt mit der Erklärung des Begriffs „Bionik“ und beschäftigt sich näher mit der Strukturbionik. Außerdem stellt er Anwendungsbereiche in der Kunst, wie auch in der Wirtschaft vor. Weiters wird näher auf die Wahrnehmung von Strukturfarben und deren Vorkommen in der Natur, im Besonderen in der Tierwelt, eingegangen.

Um diese relativ unbekannte Materie der breiten Masse leicht zugänglich zu machen, entstanden im Zuge dieser Arbeit ein Sachvideo und ein Kindersachbuch. Diese praktischen Werke stellen eine Verknüpfung von naturwissenschaftlichen und künstlerischen Inhalten dar. Das Video veranschaulicht unter anderem die erwähnte low-tech-high-yield-Methode, während die Illustrationen des Sachbuchs auf die Strukturfarbe und ihr Vorkommen in der Natur eingeht.

## II. Abstract

The present document deals with bionics and its connection to art.

Because of Prof. Dipl. -Ing. Dr. techn. Ille Gebeshuber we got to know the research of Dr. rer. nat. Sigrid Zobl. She created a technique, with which it is possible to create a “master-stamp”, that can transfer structural colours onto different surfaces multiple times. During a meeting with Prof. Dipl. -Ing. Dr. techn. Ille Gebeshuber we took part in a workshop where we learned about the low-tech-high-yield-molding-technique. The results of this thesis are for a big part based on these studies.

The theoretical part of the paper starts with an explanation of the term “bionics” and deals with structural bionics. Furthermore, it presents application areas in arts and the economy. The next part is focused on perception and structural colours and their occurrence in nature, especially in wildlife.

To present this relatively unknown subject easily accessible to the broad masses, we created a documentary and a non-fictional children’s book. These practical studies build a connection between artistic and scientific contents. The video shows amongst other things the mentioned low-tech-high-yield-method, while the illustrations of the children’s book discuss structural colours and their occurrence in nature.

### III. Danksagung

Zu Beginn bedanken wir uns bei allen, die uns bei dieser Arbeit unterstützt haben. Insbesondere bei unseren Betreuungslehrern Prof. Mag. Ernst Rasinger und D. ID Anne Gaudilliere, die uns tatkräftig zur Seite standen. Außerdem bedanken wir uns bei unserem Kooperationspartner D. ID. Mag.art. Peter Piccottini, der uns mit seinem Fachwissen förderte. Besonderer Dank gebührt ebenfalls der Physikerin Prof. Dipl. -Ing. Dr. techn. Ille Gebeshuber, die für uns schon vor Beginn des Schreibens eine große Inspiration war. Ein großes Dankeschön möchten wir auch Sabine Sallfeldner und Birgit Rieger aussprechen, die bei der Korrektur halfen. Weiters war uns sehr durch die moralische Unterstützung von Familie und Freunden geholfen, denn ohne sie hätten wir es nicht geschafft.

## IV. Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorgelegte Diplomarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht. Ich habe bei Forschung und Dokumentation alle ethischen Grundsätze nachweislich beachtet und bin für das Ergebnis dieser Arbeit selbst verantwortlich.

Villach, am 19.2.2019



Désirée Micheli

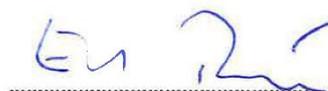


Clara Rieger

Diese Arbeit wurde gemäß der DA-Standards des CHS Villach begleitet und begutachtet von: Prof. Mag. Ernst Rasinger

Datum der Begutachtung: 19.2.2019

Unterschrift des Begutachters:



Prof. Mag. Ernst Rasinger

**Gendererklärung:**

Um eine bessere Lesbarkeit zu garantieren wird in dieser Arbeit das Maskulinum angewendet. Es wird darauf hingewiesen, dass jegliche Form geschlechterneutral zu verstehen ist.

# V. Index

1	Einleitung.....	1
2	Was ist Bionik? .....	2
2.1	Erklärung.....	2
2.2	Geschichte.....	3
2.3	Arten der Bionik.....	6
3	Strukturbionik.....	7
3.1	Allgemeines.....	7
4	Anwendungsbereiche.....	9
4.1	Verwendung in der Industrie .....	9
4.1.1	Entwicklungen .....	9
4.1.2	Sharklet Technologies.....	9
4.1.3	Lotusblüteneffekt .....	11
4.2	Verwendung in der Kunst .....	11
4.2.1	Experiment .....	11
4.2.2	Umsetzung in der Architektur .....	12
5	Praktische Arbeit.....	14
5.1	Konzept .....	14
5.2	Ausführung.....	14
5.2.1	Gestaltung .....	15
6	Überleitung.....	16
7	Farbwahrnehmung.....	17
7.1	Optik.....	17
7.2	Strukturfarbe.....	18
7.2.1	Experiment .....	20

8	Tiere und ihre Farben .....	21
8.1	Welche Farben nehmen Tiere wahr und warum? .....	21
8.1.1	Paarung.....	21
8.1.2	Warnung .....	22
8.1.3	Tarnung.....	22
8.2	Wie entstehen diese Farben? .....	23
8.3	Tiere mit Strukturfarben .....	25
8.3.1	Morphofalter .....	25
8.3.2	Kohlweißling .....	26
8.3.3	Pfau.....	26
9	Tiere, die ihre Farbe und Form ändern .....	27
9.1	Chamäleons.....	27
9.2	Tintenfische.....	28
10	Strukturfarbe in der Kunst.....	29
10.1	Franziska Schenk .....	29
10.2	Paul Evans .....	30
11	Illustration des Kinderbuches .....	31
11.1	Inspiration .....	31
11.2	Konzept .....	32
11.3	Ausführung.....	32
12	Résumé .....	34

# 1 Einleitung

Im ersten Teil dieser Arbeit wird der naturwissenschaftliche Bereich Bionik näher erklärt. Zu Beginn wird der Begriff, wie auch die Geschichte näher erläutert und es wird auf einige der diversen Unterarten der Bionik näher eingegangen. Um ein besseres Verständnis zu bekommen werden Beispiele für die industrielle Nutzung und für architektonische Entwürfe angeführt. Die Anwendung in der Kunst wird anhand eines Experiments erklärt und filmisch aufbereitet und stellt die Überleitung zum zweiten Teil der Arbeit dar.

## 2 Was ist Bionik?

### 2.1 Erklärung

Bionik ist ein wissenschaftliches Gebiet, das Biologie und Technik miteinander verbindet. Prozesse aus der Natur werden hierfür genauestens untersucht, anschließend abstrahiert und analysiert, und schlussendlich in Modelle integriert. Anwendung findet diese Wissenschaft in sämtlichen Gebieten der Industrie bis hin zur Kunst. Ziel ist es, mit Hilfe von biologischen Systemen und Strukturen nachhaltiger und billiger zu produzieren. Kurzum gesagt „besser“. Auch wenn der Mensch über Jahrtausende versucht hat sich technische Errungenschaften zuzuschreiben, ist heute klar, dass es wir sind, die die Natur lediglich zu kopieren versucht haben und dies dann als „Erfindungen“ verkauft haben. Hätte man jedoch schon früher versucht von der, oft unmittelbaren Umgebung zu lernen, wären uns viele Fehlkonstruktionen und -versuche erspart geblieben.

Der Begriff selbst lässt sich nicht, wie oftmals vermutet, aus BIOlogie und TechNIK ableiten, sondern ist ein eigenständiger Begriff. Bionik ist lediglich die eingedeutschte Version des englischen bionics, ein Gebiet, das sich ursprünglich nur mit Organismen beschäftigt hat und dem Begriff bio-mimetism. (Prof. Dr. Nachtigall & Blüchel, 2000)

Weiters kann man in der Bionik zwei Wege gehen: Der eine versucht ein bereits aufgetretenes Problem zu lösen, der andere sieht sich zuerst in der Natur um und versucht dann aus ihr Schlüsse zu ziehen, die sich in der industriellen Welt nutzen lassen können. Diese zwei Verfahren nennt man Bottom-up-Prozess und Top-down-Prozess. Ein typisches Beispiel für den Bottom-up-Prozess ist der Klettverschluss. George de Mestral, ein Schweizer Ingenieur aus dem 20. Jahrhundert, bemerkt nach dem Spazierengehen mit seinem Hund, dass sich in dessen Fell stets Klettfrüchte festgesetzt hatten. Unter dem Mikroskop erkennt er Häkchen, die so elastisch sind, dass sie sich auch nicht durch das Herausziehen beschädigen lassen. Nach einem acht-jährigen Prozess meldete er 1955 seine Entdeckung zum Patent an. (Plant Biomechanics Group Freiburg, 2016)

## Was ist Bionik?

Die Top-down-Methode beginnt mit einem technischen Problem. Es wird versucht in der Natur einen Lösungsansatz oder Verbesserungsvorschläge zu erkennen. In der Entwicklungsphase der Erde, die bereits 3,8 Milliarden Jahre andauert, gibt es meist schon ähnliche Probleme wie die, die der Ingenieur lösen möchte. So wird beispielsweise die Mohnkapsel als Vorbild genommen, um eine Fläche gleichmäßig zu bestreuen. 1920 erhält Raoul Heinrich Francé das erste Patent für eine von der Natur inspirierte Erfindung. (Plant Biomechanics Group Freiburg, 2016)

Die Fülle an reichhaltigen Ideen, die sich Mutter Natur über die Jahrtausende ausdenkt, können nun dem Menschen helfen, tagtäglich neue Technologien in allen Bereichen der Wissenschaft zu entwickeln. Ein Grundsatz der Bionik ist auch die „maximale Energieeffizienz“ zu gewinnen. Mit Hilfe von diversen Reglern und Sensoren liefern Moleküle selbst die benötigte Energie - ganz ohne, dass man von außen solche zuführen muss. Wissenschaftler rund um die Welt stoßen im Akkord auf neue, innovative, technische Umsetzungen von sogenannten „lebenden Prototypen“ und schaffen es, daraus Erfindungen jeglicher Art zu kreieren. (Prof. Dr. Nachtigall & Blüchel, 2000)

Der Mensch fühlt sich stets der Natur überlegen und braucht lange, um sie als Partner wahrzunehmen. Diese Arroganz hält uns von vielen Problemlösungen lange Zeit ab und sorgt für im nach hinein unnötige Erfindungen. Hätte man sich von Anfang an ein Beispiel an den Lösungsstrategien der Flora und Fauna unseres Planeten genommen, so hätten sich viel Aufgaben mit geringerer Erschwernis bewältigen lassen können. (Prof. Dr. Nachtigall & Blüchel, 2000)

## 2.2 Geschichte

Ein Vorreiter dieses Prinzips war das Universalgenie Leonardo da Vinci, ein angesehener Wissenschaftler und Künstler aus dem 15. Jahrhundert. Seine Studien zum Thema Vogelflug, um seinem Lebenstraum, selbst zu fliegen, näher zu kommen, machen ihn bis heute zu einem der bemerkenswertesten Wissenschaftler. Er studiert die Flügel der Tiere und konzipiert eine Flugmaschine anhand der gewonnenen Erkenntnisse. Dank seiner bemerkenswerten Beobachtungsgabe stößt er auf Wege diesem Traum näher zu kommen.

## Was ist Bionik?

Der Wunsch des Menschen zu fliegen, ist ja bekanntlich ein alter, doch so nahe wie Leonardo da Vinci ist diesem Traum vor ihm wohl niemand gekommen. Das Universalgenie studiert lange bevor er erste Selbstversuche startet Flugtiere und Thermik. Er fertigt zahlreiche Skizzen von Flügeln an und konstruiert anhand dieser diverse Flugapparate. (Prof. Dr. Nachtigall & Blüchel, 2000)

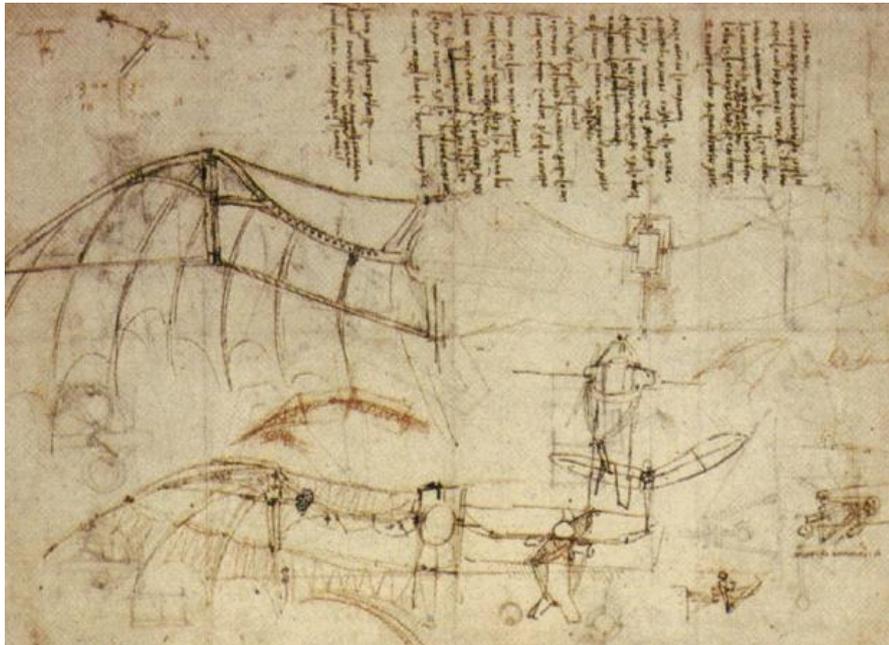


Abbildung 1: Skizze aus da Vincis Notizbuch

Auch die Legende des Ikarus fasziniert die Menschen schon lange. In der griechischen Mythologie wird von Ikarus und seinem Vater Dädalus berichtet, die sich beide in der Gefangenschaft von König Minos befinden. Der einzige Ausweg ist zu fliegen, und so beschließt Dädalus Flügel aus Wachs und Federn für seinen Sohn zu bauen, um ihn in Freiheit zu wissen. Die Schwierigkeit mit diesen Flügeln zu fliegen, liegt allerdings darin, dass das Wachs durch das ringsum liegende Meer aufgeweicht werden kann. Aber auch die Sonne kann das Wachs zum Schmelzen bringen, wenn Ikarus zu hoch fliegt. Ikarus hält sich nicht an den Rat seines Vaters und fliegt schließlich zu nahe an die Sonne, womit er sein Schicksal besiegelt und stirbt. Heute wird diese Geschichte als Beispiel für Hochmut und seine Folgen beschrieben. Aber aus der Sicht der Wissenschaft zählt sie als ein Versuch dem Menschen das Fliegen beizubringen. Jahrhunderte später schaffen es die Menschen dann, wenn auch anders als in der Mythologie. (Kühn, 2016)

## Was ist Bionik?

Einer der ersten Menschen, die erfolgreich fliegen, ist schließlich Hezarfen Ahmed Celebi, während des 17. Jahrhunderts. Er war inspiriert von da Vinci und kreiert einen Flugapparat, mit dem er vom Galataturm in Istanbul nach Uskudar fliegt und somit als erste Person den Bosphorus über den Luftweg überquert. Ein weiterer Pionier der Luftfahrt ist Sir George Cayley am Ende des 18. Jahrhunderts. Er definiert die vier aerodynamischen Kräfte: das Fluggewicht, den Auftrieb, den Luftwiderstand und den Schub. Er stellt eine Beziehung zwischen diesen Kräften her und revolutioniert somit die Luftfahrt. Cayley erstellt anhand seiner Theorien den ersten funktionstüchtigen Gleitflugapparat, welcher 130 Meter fliegt. (www.ephotozine.com, 2015)



Abbildung 2: Sagrada Família von Innen

Nur drei Jahrhunderte nach Leonardo da Vinci nutzt der Architekt Antoni Gaudí ebenfalls die Natur als Vorbild. Neben der geistlichen Komponente spielt auch die biologische eine wichtige Rolle bei der Planung der Sagrada Família, einer gigantischen Basilika in Barcelona. Als Vorbild für dieses unvollendete Meisterwerk dient ein gewöhnlicher Termitenhügel. Bereits als Kind war Gaudí fasziniert von der Vielfalt der Natur und ist derselben Auffassung wie John Ruskin, einem britischen Schriftsteller: Die Schönheit der Natur liegt nicht in ihrer Makellosigkeit, sondern in den kleinen Fehlern, die sie sich immer wieder zu leisten scheint und durch die sie erst Vollkommenheit erlangt. Sein einzigartiger Stil lässt sich auf seine Herkunft zurückführen. Im Gegensatz zu zahlreichen anderen Baukünstlern, welche einer ganzen Dynastie abstammen, lernt Antoni Gaudí an dreidimensionalen Objekten sein Handwerk. In der Schmiede seines Vaters bastelt er schon im frühen Alter Modelle und verbringt keineswegs Zeit nur hinter Papier und Zirkel. Viele seiner frühen Entwürfe lassen sich nur schwierig in der Wirklichkeit umsetzen, dies auf

## Was ist Bionik?

Grund seiner mangelnden statischen Kenntnisse. Auch bei der Sagrada Família stößt man bis heute auf Fehler in den Plänen. Gaudís Bauwerke sind jedoch nur sehr begrenzt als bionische Architektur anzusehen. Obwohl viele seiner Gebäude äußerlich zwar sehr organisch wirken, so kann man bei der Konstruktion lediglich die vielen Verstrebungen auf ein in der Natur vorkommendes Prinzip ummünzen. Das Strebenwerk erinnert an die Verzweigungen von Bäumen und Büschen. Durch diese vielen Verästelungen bekommt das Tragwerk mehr Stabilität. (Wächter, 2005)

### 2.3 Arten der Bionik

Das Gebiet der Bionik lässt sich noch in viele Teilbereiche unterscheiden. Die Struktur- und Baubionik wird später noch genauer erläutert, doch sie bilden nur einen kleinen Bereich dieser Wissenschaft. Bionik findet immer häufiger Anwendungen in den verschiedensten Abschnitten der Wirtschaft. Ob physikalisch, genannt Sensorbionik, oder aber auch bei der Datenverarbeitung, genannt Neurobionik. Jede einzelne dieser Fachrichtungen führt zu Verbesserungen und Vereinfachungen in den jeweiligen Spezialgebieten. (www.bionikforscherwoche.com, 2015)

Nach dem Zoologen Werner Nachtigall, einen der deutschen Pioniere der Bionik, kann man diese Fachrichtung in zwölf Unterkapitel teilen. Die Übergänge zwischen den einzelnen Teilgebieten sind fließend und beinhalten Biologie, Physik, wie auch das Ingenieurswesen.

An erster Stelle steht die „Historische Bionik“, in der die Entwicklung von Technik und Biologie, wie auch deren Geschichte beschrieben wird. Das Kapitel Strukturbionik bezieht sich auf die Untersuchungen von Materialien und Strukturen und auf deren Aufbau. Es werden Anwendungsbereiche und -möglichkeiten für die Technik gesucht. Die Bau- und Konstruktionsbionik setzt sich mit natürlichen Baumaterialien auseinander und findet Wege um deren Funktionen optimal einsetzen zu können. Auch hydraulische Maschinen lassen sich der einem Teilgebiet der Bionik zuordnen, genauso wie Evolutions-Strategien, die zur Optimierung von technischen Systemen dienen sollen. (Speck, 2018)

## 3 Strukturbionik

### 3.1 Allgemeines

Bereits im frühen 20. Jahrhundert stellt der Wiener Schriftsteller und Naturwissenschaftler Raoul Francé fest, wie intelligent und frei Pflanzen wachsen. Lange Zeit fallen Tatsachen wie diese nicht auf, da sie sich im Wachstumsrhythmus des Menschen sehr unterscheiden. Auch Charles Darwin sieht in den Konstruktionen der Gewächse eine Art „primitives Gehirn“ und erkennt die Überlegenheit der Natur gegenüber dem Menschen bereits sehr früh. Die Menschheit ist bis heute nicht in der Lage Materialien zu produzieren, welche die Elastizität und die Stärke von Grashalmen mit sich bringt. Ein Stoff, welcher leicht biegsam ist und dennoch den Wetterbedingungen trotzen kann, und das alles in großen Höhen. (Blüchel & Malik, 2006)

Lange bevor man Bionik als eigenen Zweig der Naturwissenschaften einstuft, beschäftigt man sich mit den Strukturen, die überall zu finden sind. Ingenieure, deren primäres Augenmerk auf den technischen Details liegt, erkennen bald, welche Effizienz und Stabilität in der Schönheit vieler Muster stecken. Der Architekt Richard Buckminster Fuller studiert den Kuppelbau der Renaissance und versucht einen Weg zu finden, Gewölbe mit noch größeren Ausmaßen zu bauen. Bislang stellt das Gewicht, welches sich an der Decke ergibt, das Hindernis dar und so laufen Kuppeln über einer Spannweite von 43 Metern Gefahr, einzustürzen. Während seiner Forschungen stößt er auf die

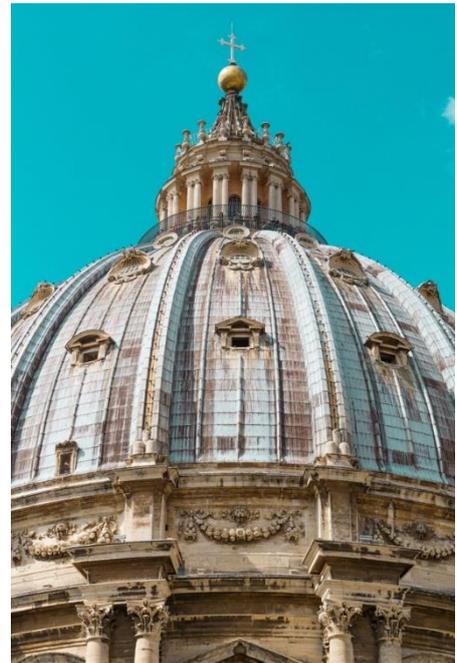


Abbildung 3: Peterskuppel

Kieselalge. Die Anatomie dieses Organismus ist so konzipiert, dass mit minimalstem Materialaufwand maximale Stabilität erreicht werden kann. Bei einem Test kann die Schalenoberfläche 700 Tonnen Gewicht auf eine Fläche von einem Quadratmeter verteilen und hält dem Druck stand. Im Mikroskop erkennt man, dass die Struktur aus gleichseitigen

## Strukturbionik

Dreiecken besteht, sogenannten Polygonen. Diese Erkenntnis revolutioniert das dreidimensionale Denken beim Kreieren von plastischen Gegenständen, denn jedes heute am Computer animierte Objekt lässt sich mit einem Polygongitter umschließen. (Blüchel & Malik, 2006)

Während des 20. Jahrhunderts setzen sich auch Kybernetiker mit diesem System auseinander. Auch bei der Kommunikationsweitergabe, ob im technischen oder sozialen Sinn, erzielt dieses System die maximale Effizienz. Stafford Beer, ein angesehener Wissenschaftler auf diesem Gebiet, stellt ein Modell dazu auf, ganz ähnlich dem, der geodätischen Kuppel Fullers. Dieses Netzwerk stellt sicher, dass jegliche Information alle Beteiligten erreicht und auch eine Diskussion im Großen möglich ist. Dies ermöglicht, dass zum Beispiel in einer größeren Gruppe von Menschen nicht nur das wahrgenommen wird, was der Lauteste unter ihnen sagt, sondern auch das aller anderen, und somit können die richtigen Entscheidungen getroffen werden. Durch Strukturen werden alle Antworten miteinander verbunden und daraus ergibt sich ein neues, optimiertes Gesamtbild mit den besten Lösungsansätzen. Somit ist jeder in der Gruppe an der Lösung des Problems, wie auch an der daraus entstandenen Diskussion, gleichermaßen beteiligt. Das System lässt eine Hierarchie nicht zu, wird aber trotzdem inzwischen in vielen internationalen und nationalen Konzernen genutzt. (Blüchel & Malik, 2006) (Quack, 2008)



Abbildung 4: Polygonverbindungen

## 4 Anwendungsbereiche

Die Bionik findet heute in vielen Bereichen der Industrie, Kunst, Medizin und in vielen mehr Anwendung. Es sind unzählige Kategorien, in denen diese Wissenschaft schon einen unentbehrlichen Platz hat. Die Vielfältigkeit der Natur und das Können des Menschen, dies in Produkten umzusetzen, vereinfacht und verbessert vieles. Da auch meist die Umsetzung sehr billig ist, werden bionische Erzeugnisse auch in der Wirtschaft immer beliebter.

### 4.1 Verwendung in der Industrie

#### 4.1.1 Entwicklungen

Wie bereits in einem der oberen Abschnitte erwähnt, trägt Leonardo da Vinci viel zu einigen unserer heutigen Verkehrsmittel bei. Jedoch brauchen manche seiner Ideen deutlich länger zur Umsetzung als andere. Über 450 Jahre dauert es zum Beispiel, um seine Theorien zum Bau eines Schiffskörpers in einer Stromlinienform richtig zu konzipieren. Nur wenige Jahre vor seinem Tod entwickelt er eine Form, welche es ermöglicht, schneller durch das Wasser zu gleiten. Der Wulstbug wird dann zunächst beim Bau von U-Booten verwirklicht, um in weiterer Folge während des Krieges zum Einsatz zu kommen. Erst einige Zeit später wird das Konzept auch auf andere Bereiche der Seefahrt übertragen. Die Pläne zu da Vincis Flugapparaten ergänzt ein anderer rund 300 Jahre später. Otto Lilienthal ist einer der wohl bekanntesten Pioniere auf dem Gebiet der Fliegerei. Er erkennt, dass die menschliche Muskelkraft nicht ausreicht, um das Problem der Erdanziehungskraft hinter sich zu lassen. Über das Beobachten von Störchen schafft er ein neues Prinzip: Wenn ein Flügel eine gewölbte Form hat, so wird der Auftrieb der Thermik gestärkt und das Gewicht des Körpers, der an ihm hängt, geschmälert. Nach etlichen Versuchen gelingt es ihm, einen faltbaren Gleitflugapparat zu bauen, der sich auch gut vermarkten lässt. (Blüchel & Malik, 2006)

#### 4.1.2 Sharklet Technologies

Sharklet ist ein industriell hergestelltes Material, welches von der Haut von Haien inspiriert wird. 2002 wird der Universitätsprofessor, Anthony Brennan an der University of Florida, von der US-Navy beauftragt, ein Material zu entwickeln, an welchem Muscheln, Algen oder

## Anwendungsbereiche

sonstige Meeresbewohner nicht haften bleiben. Die entwickelte Substanz sollte unter den Bootslack gemischt werden, um die Reibung zu minimieren, die durch die Verschmutzung entsteht. (Sharklet Technologies, 2018)

Die Besonderheit des Stoffes ist, dass keine aktive Tötung durch Schwermetalle oder Chemikalien passiert, sondern Bakterien lediglich kaum Haftung darauf finden. Für Keime ist es also viel zu schwierig, auf der Fläche Kolonien zu bilden und sie sterben dadurch, bevor die kritische Menge erreicht wird, bei der ein Mensch infiziert wird. (Sharklet Technologies, 2018)



Abbildung 5: Hai

Entdeckt wird diese Oberflächenbeschaffenheit bei Haien. Man bemerkt, dass diese Tiere, obwohl sie sich meist nur sehr langsam durchs Wasser bewegen, keine Schmutzrückstände an der Haut bekommen. Weder Algen noch Schmutz haften auf der Epidermis des Hais. Zurückführen lässt sich dies schließlich auf die Struktur der obersten Hautschicht. (Enterprise Florida, 2009)

Diese Struktur kann mit Hilfe eines Nanodruckers (normalerweise in der IT-Branche gebräuchlich (Chips)) auf eine spezielle Folie gedruckt werden und kann somit nahezu an alle Stellen geklebt werden, ohne ein Gerät oder eine Fläche zu beschädigen. Die Anwendungsbereiche liegen vor allem in Pflegeeinrichtungen, wie zum Beispiel Krankenhäusern oder Altenheimen. Die Beschichtung kann ohne große Schwierigkeiten wieder entfernt werden, und die Oberfläche ist wieder anfällig für Krankheitserreger. Die Folie ist nicht sichtbar, nicht spürbar, kann an nahezu jedem Gegenstand angebracht werden und ist noch dazu finanziell lukrativ. (Sharklet Technologies, 2016)

### 4.1.3 Lotusblüteneffekt

Eine weitere Oberflächenbeschaffenheit, deren Vorteile sich der Mensch zu Eigen gemacht hat ist der Lotusblüteneffekt. Superhydrophob. So nennt man den Zustand eines Objekts, an dem Wasser einfach abperlt. Zu beobachten ist dieses Phänomen bei Pflanzen, deren Blätter eine Schicht mit Cutin aufweisen können. In dieser Schicht sind verschiedene Fette

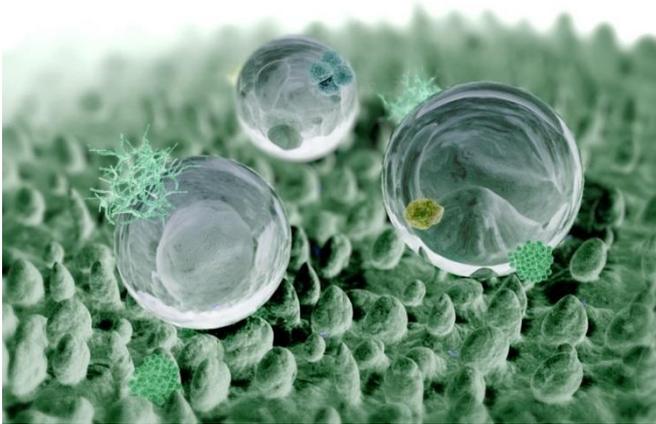


Abbildung 6: Lotusblüteneffekt

(Lipide) gelagert. Die epicularen Wachse bilden die äußerste Schicht der Epidermis der Pflanze. Die Wachskristalle haben die Eigenschaft nichts durchdringen zu lassen und schützen somit ihren Organismus. Die ausgeprägteste Form dieses Effekts findet man an der *Nelumbo nucifera*, der Lotuspflanze. In der Physik wird dieses Phänomen mit dem

Kontaktwinkel beschrieben. Der Kontaktwinkel besagt, in wie weit sich ein Tropfen Wasser auf einem festen Gegenstand verteilt. Zerläuft der Tropfen, so hat die Oberfläche den Kontaktwinkel 0. Bleibt er starr an einer Stelle, so hat er den Winkel 180. Die Lotuspflanze hat einen Kontaktwinkel von 170 Grad. Auf einer herkömmlichen wasserabweisenden Fläche wie Teflon beträgt er nur 120. (Schlößer & Rahms, 2016)

## 4.2 Verwendung in der Kunst

### 4.2.1 Experiment

Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ille Gebeshuber ist eine der führenden Physikerinnen auf dem Gebiet der Bionik. Sie sprach bereits auf einer TED-Konferenz 2012 über ihre Zeit im malaysischen Dschungel und die daraus gewonnenen Erfahrungen und wurde 2017 als Österreicherin des Jahres im Bereich Forschung ausgezeichnet. Derzeit ist sie Dozentin an der Technischen Universität in Wien und unterstützt die Dissertation von Dr. rer. nat. Sigrid Zobl. In ihrer Doktorarbeit dokumentiert sie den Prozess zur Erschaffung eines Stempels,

## Anwendungsbereiche

der Strukturfarbe überträgt. Versuchsobjekt ist hierfür eine herkömmliche Compact Disc, deren Struktur abgenommen werden soll, um sie auf andere Oberflächen übertragen zu können. Nach etlichen Versuchen gelingt es ein geeignetes Material für den Masterstempel zu finden. Polyvinylsiloxan wird hauptsächlich für Zahnabdrücke von Zahnärzten verwendet, hat jedoch auch genau die richtigen Eigenschaften zur Übertragung der Strukturen. Den gewonnenen Masterstempel kann man nun auf beliebige Stoffe drucken und überträgt somit die schimmernde Farbe. (Gebeshuber P. D.-I., 2018)



Abbildung 7: Strukturfarbe

### 4.2.2 Umsetzung in der Architektur

Der in London stehende Crystal Palast ist ein 1851 erbautes Ausstellungsgebäude. Joseph Paxton, der Architekt dieses außergewöhnlichen Bauwerks aus Glas und Eisen, findet in der Riesenseerose *Victoria amazonica* seine Inspiration. Nur wenige Jahre vor Beginn der Planung, entdeckt der Naturforscher Robert Schomburgk auf einer seiner Reisen für die Royal Geographical Society, in den bis dato relativ unerforschten Amazonasgebieten, diese bemerkenswerte Pflanze. Ihre Blätter können einen Durchmesser von drei Metern bekommen und können dabei ein Gewicht von mehreren Kilogramm tragen. Die Besonderheiten an den Blättern sind radiale Verrippungen. Durch sie wird eine maximale Tragfähigkeit garantiert und das Blatt versteift. Anhand dieses Prinzips kann nun Joseph Paxton ein neues Design kreieren. Auch hier spielt die Materialeffizienz eine wichtige Rolle. Der Architekt schafft es mit minimalstem Materialaufwand ein sich selbst tragendes Dach zu schaffen. (Kulow, 2018)



Abbildung 9: Crystal Palast, London



Abbildung 8: Victoria Cruziana

## Anwendungsbereiche

Einer der prägendsten Architekten nach dem Ende des zweiten Weltkrieges ist Frei Otto. Seine Leichtbauweise begeistert die Leute, doch von sich selbst behauptet er stets, er habe mehr Luftschlösser gebaut als reale Gebäude. Trotzdem fallen Bauwerke wie die Olympiadächer in München oder das Diplomatic Club Heart Tent in Riyadh auf ihn zurück. Charakteristisch für sein Design sind Dächer aus Seilnetzen, Schalen, Gittern und Schirmen, die oftmals auch wandelbar sind. (Decker, 2018)

Ein weiteres bekanntes Beispiel für Baubionik ist der Eiffelturm von Gustav Eiffel. Hierfür wird lange Zeit nach einer geeigneten Leichtbauweise gesucht und schließlich eine ideale im Knochen gefunden. Im Querschnitt des Knochens werden viele Hohlräume sichtbar, welche getrennt durch Knochenbalken sind. Die Knochenbalken sind dort vorhanden, wo besonders große Kräfte auf den wirken und sorgen so für die nötige Stabilität. Wenn man dieses Prinzip nun auf einen Gebäudeplan abwendet, so bekommt man ein Modell mit minimalsten Materialeinsatz. "Wenn man den Eiffelturm einschmelzen würde, wäre der gerade mal ein paar Meter groß. Das ist also wirklich ein Ultra-Leichtbau-Gebäude, das für die damalige Zeit sicher High-End-Technologie war", so Professor Thomas Speck. (Deiß, 2012)

## 5 Praktische Arbeit

### 5.1 Konzept

Ziel dieser Arbeit ist es, einer breiteren Masse ein besseres Verständnis über Bionik zu vermitteln. Die Zielgruppe umfasst all jene, die ein Interesse an naturwissenschaftlichen Themen haben und sich auf einfache Weise weiterbilden wollen. Die Schwierigkeit dahinter liegt insbesondere darin, den komplexen Inhalt des Workshops für Menschen jeden Bildungsgrades verständlich zu machen.

Das Video zeigt in detaillierten Aufnahmen wie Strukturfarbe von einem Objekt, in diesem Fall von einer CD-ROM, abgenommen wird und zu einem mehrfach verwendbaren Stempel gemacht wird. Das Videomaterial wurde während eines Kurses zur Veranschaulichung von Strukturfarbe an der Technischen Universität in Wien aufgenommen. Unterstützt werden die Aufnahmen von den Erklärungen der Leiterin des Workshops, Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ille Gebeshuber, und den zusätzlich eingeblendeten Textpassagen. Das Video ist nicht wie ein Dokumentarfilm aufgebaut, sondern präsentiert eine künstlerische Aufarbeitung des Ergebnisses von Dr. rer. nat. Sigrid Zobl's Dissertation aus dem Jahr 2017.

### 5.2 Ausführung

Im Video zu sehen sind Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ille Gebeshuber, wie sie den Teilnehmern des Seminars die physikalischen Phänomene hinter dem Versuch erklärt und auch wie die Anwesenden mit Hilfe ihrer Anleitung selbst einen Stempel herstellen. Die Videos werden mit zwei Kameras der Firma Canon aufgenommen. Die einzelnen Sequenzen werden im Programm Adobe Premiere CC 2019 bearbeitet und geschnitten. Die musikalische Begleitung und das gesprochene Wort der Professorin werden im Programm Adobe Audition CC 2019 zusammengefügt und bearbeitet.

### 5.2.1 Gestaltung

Die Szenen halten sich mit den Schnitten an den Rhythmus der Musik. Auf mehrere, kürzere Sequenzen folgen längere, um das Video spannend und informativ zu halten. Die Gestaltung des gesamten visuellen Erlebnisses ist sehr farben- und kontrastreich und die Belichtung meist direkt, um einen klaren Eindruck der Vorkommnisse zu bekommen. Auch die Aufnahmen aus verschiedenen Winkeln sorgen für mehr Klarheit. Der geschriebene Text ist entweder am oberen oder am unteren Bildrand formatiert, um den Zusammenhang zwischen den visuellen Eindrücken zu optimieren. Das Video ist bewusst kurzgehalten, um das Interesse des Zusehers für diesen Themenbereich zu wecken.

## 6 Überleitung

Im folgenden Teil der Arbeit wird zuerst die Wahrnehmung von Farben näher erläutert und dann werden die physikalischen Grundlagen für die Entstehung von Strukturfarben näher betrachtet. Außerdem wird erklärt, woher Tiere ihre Farben bekommen und warum Musterungen und Färbungen für verschiedene Tierarten wichtig sind. Es folgt eine nähere Beschreibung der besonderen Fähigkeiten von Chamäleons und Tintenfischen und es werden Kunstprojekte, die sich mit dem Thema Strukturfarbe beschäftigen, vorgestellt. Zum Schluss werden die Inspiration und Ausführung des praktischen Teils, des Schreibens und Illustrierens eines Kinderbuches, ausführlich beschrieben.

## 7 Farbwahrnehmung

Farben haben für den Menschen eine große Bedeutung, da sie in direktem Zusammenhang damit stehen, wie man die Welt wahrnimmt. Für die meisten Personen sind sie selbstverständlich und unabdingbar. Sie werden im Alltag zum Beispiel sehr häufig für praktische Zwecke genutzt, wie zum Hervorheben und Kennzeichnen von Dingen. Stoppschilder im Verkehr haben immer die Farbe Rot, die dort als „Warnsignal“ dient. Außerdem verbindet man Emotionen und Gefühle mit bestimmten Farbtönen. Rot wird im europäischen Raum beispielsweise oft mit Feuer, Blut oder Herzen in Verbindung gebracht. Dadurch werden mit ihr Emotionen wie Wut oder auch Liebe ausgedrückt. Für jede Farbe gibt es solche Bedeutungen und Assoziationen und diese können von einer Kultur zur anderen variieren.

Auch dem menschlichen Auge wurde schon seit jeher eine besondere Bedeutung zugesprochen. Es kommt in vielen Kulturen als Symbol vor und wird auch als „Fenster zur Seele“ bezeichnet - wahrscheinlich, weil es für unsere Wahrnehmung so wesentlich ist. Man nimmt mit den Augen mehr Informationen auf als mit allen anderen Sinnen zusammen. Zirka 80 % unserer Umgebung nehmen wir mit dem Sehsinn wahr. Außerdem ist er unverzichtbar beim Registrieren von Farben. (Welsch & Liebmann, Farben, 2012)

Den ersten Kontakt mit einem Objekt hat man meistens durch das „Sehen“, das primäre Registrieren des Objekts. (Zusätzlich nimmt man oft Gerüche oder Geräusche unterbewusst wahr, die die Eindrücke verstärken.) Danach erfolgen erst die bewusste Wahrnehmung und das Verstehen. Man sieht sozusagen zuerst mit den Augen und dann mit dem Gehirn. So entwickelt sich das Bild, das man von seinem Umfeld hat. Es wird ein „mentales Modell“ erstellt. (Welsch, Schwab, & Liebmann, Materie, 2013)

### 7.1 Optik

Damit man mit den Augen überhaupt etwas wahrnehmen kann, braucht es zuerst einmal Licht. Licht kann man als elektromagnetische Welle beschreiben, die aus Lichtteilchen, den Photonen, besteht. Um für das menschliche Auge sichtbar zu sein, muss die Wellenlänge

## Farbwahrnehmung

im Bereich zwischen 380 nm und 780 nm liegen. Um zu begreifen, was Farbe überhaupt ist, muss man sich die Frage stellen, welche Farbe Licht eigentlich selbst hat. Diese beantwortete Sir Isaac Newton, indem er Licht durch ein Prisma fallen ließ. Ein Prisma zerlegt einen Lichtstrahl in einzelne Spektralfarben, da kurzwelliges Licht stärker gebrochen wird als langwelliges. Die Spektralfarben sind Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo und Violett und können nicht noch einmal zerlegt werden. Auch wenn sie erneut durch ein Prisma fallen, verändern sie sich nicht. Diese Lichtbrechung kann man auch in der Natur beobachten, wenn die Sonne trotz Regen durch die Wolken scheint und ein Regenbogen entsteht. Die Lichtstrahlen der Sonne werden hierbei in den Regentropfen reflektiert und gebrochen. (Karl, o.D.) (o.V., Universität Wien, o.D.)



Abbildung 10, Prisma (Bild von "freepik")

Und um nun zu verstehen, wie der Mensch Dingen Farbe zuteilt, also sie in einer bestimmten Farbe sieht, muss man die grundlegende Biologie hinter diesen Vorgängen verstehen. Die Zapfen in unserer Netzhaut enthalten Pigmente, die jeweils einen Teil des Lichts aus dem Farbspektrum absorbieren. Diese Pigmente werden auch Sehfärbstoffe genannt. Sie bestehen aus einer Variante des Proteins Opsin und Retinal, das vom Vitamin A abstammt. Wenn Photonen absorbiert werden verändert sich das Retinal. Ein Effekt wird in Gang gesetzt, der Neuronen in der Netzhaut aktiviert, worauf diese über den Sehnerv Impulse ans Gehirn schicken. Das eigentliche „Sehen“ ist also reine „Einbildung“. (Goldsmith, 2007)

## 7.2 Strukturfarbe

Strukturfarben entstehen durch optische Effekte. Dabei spielen die Beschaffenheiten der Oberflächen, auf die das Licht fällt, eine Rolle und nicht bestimmte chemische Strukturen. Fünf verschiedene physikalische Phänomene sorgen dafür, dass man Farben sieht, obwohl

keine Pigmente vorhanden sind. Diese sind Dünnschichtinterferenz, Vielschichtinterferenz, Beugung, Streuung und photonische Kristalle.

Bei der **Dünnschichtinterferenz** trifft das Licht auf eine dünne Oberfläche und wird auf beiden Seiten von dieser reflektiert. Es überlagert sich und dadurch entsteht ein farbiges Interferenzmuster. Wenn sich die Wellenberge/-täler überlagern, dann spricht man von konstruktiver Interferenz. Überlagern sich die Amplituden nicht, so spricht man von destruktiver Interferenz. Dieses Phänomen kann man zum Beispiel bei Seifenblasen beobachten, die in verschiedenen Farben bunt schillern.

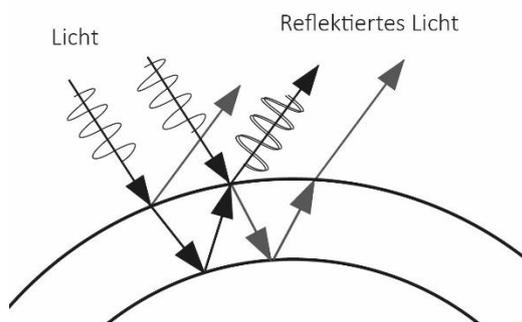


Abbildung 12, Konstruktive Interferenz

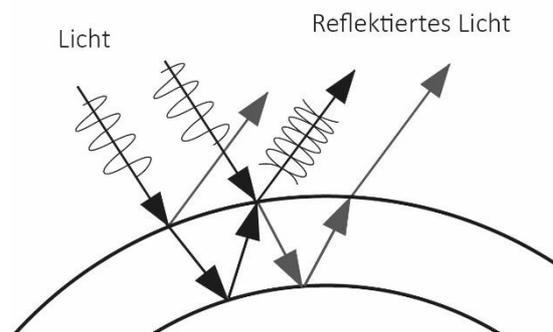


Abbildung 11, Destruktive Interferenz

Wenn das Licht nicht nur durch eine Schicht fällt, sondern öfter reflektiert wird, nennt man das **Vielschichtinterferenz**. **Lichtbeugung** kann man zum Beispiel an einer CD beobachten. Diese besitzt ein optisches Gitter, das bedeutet, dass es mehrere Reihen von Spalten gibt, die die gleiche Breite und den gleichen Abstand zueinander haben. **Lichtstreuung** entsteht, wenn Licht von Streuobjekten reflektiert wird und die Lichtwellen interferieren. Regelmäßige Strukturen sorgen für schöne, definierte Farben, wogegen ungeordnete Strukturen eher Grau oder Weiß ergeben. Die weiße Farbe von Wolken und das Blaugrau der Blautanne entstehen zum Beispiel durch Streuung.

Besondere Phänomene kann man auch durch Photonische Kristalle beobachten. Diese haben periodische Nanostrukturen, welche darauf ausgelegt sind, Photonen zu beeinflussen. In der Natur kann man solche Strukturen zum Beispiel bei Opalen erforschen. (o.V., ULB Sachsen-Anhalt), (Gebeshuber I., 2016)

### 7.2.1 Experiment

Dr. rer. nat. Sigrid Zobl erforschte das Thema Strukturfarbe im Zuge ihrer Dissertation mit dem Titel „Strukturfarbe im Brennpunkt der Bionik“, und stellte Nachforschungen zur Replikation der Oberflächen an. Sie entwickelte eine Methode, mit der man einen Stempel, der Schillerfarben überträgt, anfertigen kann. Mithilfe von Polyvinylsiloxan gelang es ihr, einen sogenannten „Masterstempel“ anzufertigen, mit dem man mehrfache Positiv-Abdrücke in Epoxidharz machen kann. Durchgeführt wird das Experiment mithilfe einer CD-R, da diese ein Beugungsgitter besitzt.

Zuerst wird die silberne Schicht auf der Oberfläche entfernt, dann wird das Polyvinylsiloxan aufgetragen und aushärten gelassen. Wenn man den Stempel dann abzieht, kann man bereits einen schillernden Effekt beobachten.



Abbildung 13, Experiment-Strukturfarbe

## 8 Tiere und ihre Farben

Strukturfarben wurden von Forschern in der Natur, vor allem der Tier- und Pflanzenwelt, entdeckt und erforscht. Diese Farben und auch Formen und Verhaltensweisen von Tieren werden ständig weiter erforscht. Es gibt noch viele ungeklärte Fragen, aber einige Muster kann man immer wieder erkennen. Bevor man sich die Färbungen von Tieren näher ansieht ist es jedoch wesentlich zu verstehen, dass nicht alle Tiere die Welt gleich wahrnehmen.

### 8.1 Welche Farben nehmen Tiere wahr und warum?

Dass der Sehsinn für den Menschen der wichtigste ist, wurde in dieser Arbeit schon beschrieben, aber er ist auch für die meisten Tiere unerlässlich. Teilweise haben diese sogar eine weit ausgeprägtere optische Wahrnehmung, als der Mensch, um sich optimal an ihre Umgebung anpassen zu können.

Wie bereits erwähnt, absorbieren die Zapfen im Auge Lichtwellen und wandeln sie in elektrische Impulse um. Der Mensch und manche Primaten haben drei verschiedene Zapfentypen, wobei die meisten Säugetiere nur zwei haben. Deshalb wurde der Sehsinn des Menschen auch lange Zeit für außergewöhnlich gehalten. Vögel zum Beispiel sehen aber mehr Farben als Menschen. Ihnen ist es auch möglich, ultraviolettes Licht wahrzunehmen. Sie haben, nicht wie der Mensch nur drei, sondern vier Typen von Zapfen und nehmen die Welt ganz anders, mit für uns nicht vorstellbaren Mischfarben und vielleicht sogar mit uns unbekanntem Farbdimensionen, wahr. (Goldsmith, 2007)

Es gibt natürlich viel Gründe für die Musterungen und Färbungen von Tieren. Sie müssen sich zum Beispiel vor Fressfeinden schützen oder die Männchen den Weibchen imponieren. Man kann diese Punkte grob in drei Überkategorien zusammenfassen: Paarung, Warnung und Tarnung.

#### 8.1.1 Paarung

Bei der Balz werben die Männchen um die Weibchen und versuchen sich von ihrer besten Seite zu zeigen. Bei Vögeln und Fischen haben die Männchen oft sehr bunte Farben, um die

Aufmerksamkeit auf sich zu ziehen. Paradiesvögel und Pfauen präsentieren zum Beispiel ihre bunten Schwanzfedern, um Weibchen anzuwerben. (Thiel, 2006)

### 8.1.2 Warnung

In der Tierwelt gibt es einen ständigen Kampf ums Überleben, deshalb passen sich viele Tiere an und entwickeln Abwehrmethoden. Der Pfeilgiftfrosch zum Beispiel, ist das zweitgiftigste Tier der Welt. Sein Gift dient dazu, Parasiten abzutöten, die auf der warmen, feuchten Haut des Frosches ideale Lebensbedingungen finden würden. Außerdem schützt es auch vor größeren Feinden. Hier kommt nun auch die auffällige Farbe ins Spiel. Die Fressfeinde, die mit der giftigen Oberfläche in Berührung kommen, merken sich das und sind nun in Zukunft durch die auffällige Farbe, ein Wiedererkennungswert, gewarnt. (Blank, 2006)



Abbildung 14, Pfeilgiftfrosch (Zachary Spears)

Weit verbreitete Warnfarben im Tierreich sind zum Beispiel Schwarz und Gelb. Wespen, Spinnen und Frösche signalisieren so, dass sie gefährlich sind. Diesen Effekt nutzen auch Tiere, die eigentlich gar nicht giftig sind. Schwebfliegen haben eine ähnliche Musterung wie Wespen, um sich vor ihren Feinden zu schützen. Man nennt diese Art der Anpassung Mimikry, da die Tiere andere als Tarnung nachahmen.

### 8.1.3 Tarnung

Die bereits erwähnte Wespenmimikry ist in der Natur sehr weit verbreitet, man kann aber auch andere Formen von Mimikry finden. Bei Schmetterlingen, Fischen und Vögeln kommt zum Beispiel die Augenfleckenmimikry häufig vor. Diese dient als Abschreckung und auch

Ablenkung. Wenn Raubfische weniger verletzbare Bereiche angreifen, da sie durch die Flecken in die Irre geführt werden, ist es kleineren Fischen oft möglich leicht verletzt zu entkommen.

Eine weitere Form der Anpassung, die als Tarnung verwendet wird, ist die Mimese. Dabei ahmen die Tiere ihre Umgebung nach. Viele Vogelweibchen, die ihre Nester am Boden bauen, haben Farben, die dem Boden ähneln. Es gibt aber auch spezifischere Formen der Mimese, wie zum Beispiel die Rinden- oder Blattmimese. Wenn sich ein Tagpfauenauge auf einem Baumstamm niederlässt und seine Flügel zuklappt, ist es an seine Umgebung gut angepasst und wird leicht übersehen. Stabheuschrecken und wandelnde Blätter (Phylliinae) wiederum sind zwischen Blättern und Ästen kaum erkennbar. (Pies-Schulz-Hofen, 2004)

## 8.2 Wie entstehen diese Farben?

Tiere bekommen ihre Färbungen hauptsächlich durch verschiedene Pigmente. Da sie aber Farbstoffe nicht so gut synthetisieren können wie Pflanzen, kommen auch teilweise Strukturfarben zum Einsatz, damit eine ebenso große Farbvielfalt erzielt werden kann. (Dipl. -Biol. Brechner, Dr. Dinkelaker, & Dr. Dreesmann, 2001)

Die Farbe Weiß kommt oft bei Schmetterlingsflügeln vor und kann verschieden intensiv sein. Prinzipiell entsteht Weiß nicht durch Pigmente, sondern durch das Fehlen dieser. Der Effekt, der die Kraft der Farbe sehr intensiv macht, entsteht durch Streuung und Reflexion von Licht. Weiß kann also auch zu den Strukturfarben gezählt werden. Ein Beispiel in der Tierwelt ist der Cyphochilus-Käfer, der von kleinen Schuppen übersät ist, die das Licht so brechen, dass er für unsere Augen strahlend weiß aussieht. (Vukusic, Hallam, & Noyes, 2006)

Braun oder Rot entstehen meist durch das am weitesten verbreitete Pigment in der Tierwelt, Melanin. Viele Felle und Federn haben deshalb ihre Färbung. Es wird zwischen Eumelanin, das braun oder schwarz ist, und Phäomelanin, das gelblich oder rötlich sein kann, unterschieden. Gebildet wird das Pigment in den Melanosomen in den Melanocyten

## Tiere und ihre Farben

und in der Netzhaut. Auch der Ton der Haut- und Haarfarbe des Menschen wird durch die Höhe der Melanin-Pigmentierung bestimmt. Die Farbmusterung hängt von der Verteilung der Pigmente ab. An Stellen, wo zum Beispiel mehr Sonnenlicht auf die Haut kommt, ist sie dunkler, da das Melanin als Lichtschutzfaktor gegen die UV-Strahlung gebildet wird.

Braune und rote Farben können auch durch Pigmente aus der Gruppe der Ommochrome entstehen. Diese kommen hauptsächlich in den Augen, Flügeln und der Haut von Insekten vor.

Carotinoide sorgen für eine gelbe, rote oder purpurne Färbung. Tiere können diesen Farbstoff nicht selbst synthetisieren, daher bekommen sie ihn ausschließlich durch ihre Ernährung. Flamingos zum Beispiel ernähren sich von Mikroorganismen wie Salinenkrebse oder Blaualgen, die im salzig-brackigen Wasser von Küstenlagunen vorkommen. Diese Organismen produzieren Beta-Carotin, das die Flamingos beim Fressen in sich aufnehmen. Ein kräftiges Rosa zeugt also von einer guten Ernährung. Auch Blaufußtöpel bekommen die blaue Färbung ihrer Füße durch ihre Nahrung. Sie gewinnen die Carotinoide, die ihre Beine blau färben, aus den Fischen, die sie in den küstennahen Gewässern jagen. Je kräftiger die Farben leuchten, desto attraktiver sind sie für die Weibchen. Carotinoide absorbieren Licht im Blau- und UV-Bereich und dienen, wenn sie in Pflanzen vorkommen, oft als Lockfarbe für Tiere. (Reichholf, 2011) (o.V., Geo-lino, 2018)



Abbildung 15, Flamingo (Gwen Weustnik)



Abbildung 16, Blaufußtöpel (Andy Brunner)

Grüne und blaue Farben werden meist nicht wie die anderen, aufgrund von Pigmenten wahrgenommen, sondern aufgrund von Oberflächenstrukturen. Diese Strukturen im Nanometer-Bereich interagieren mit dem Licht, das auf sie fällt und reflektieren nur bestimmte Lichtwellen. Dieser Effekt basiert auf den, im Kapitel „Farbwahrnehmung“ angeführten, physikalischen Phänomenen und wird als Strukturfarbe bezeichnet. Der Grund warum diese Farben so selten in der Natur sind, und kaum als Pigmente vorkommen, ist noch nicht genau erforscht.

### 8.3 Tiere mit Strukturfarben

Ein bekanntes Tier, das tatsächlich blaue Pigmente besitzt, ist der Schmetterling *Nassaea obrinus* („Olivewing“). Das Pigment, das er in seinen Flügeln hat, heißt Pterobilin. Er ist aber eine Ausnahme, da blaue Farbe fast immer durch Strukturen entsteht.

#### 8.3.1 Morphofalter

Morphofalter haben ein strahlendes Blau, das nicht durch Pigmente entsteht, sondern durch ihre besondere Oberfläche. Auf ihren Flügeln haben sie kleine Schuppen, auf denen sich wiederum Nanostrukturen befinden. Die Form dieser Strukturen erinnert an Tannenbäume. Diese reflektieren das Licht so, dass man ein leuchtendes, helles Blau wahrnimmt. Bei den Männchen ist die Farbe am kräftigsten.



Abbildung 17, Morphofalter (Annie Spratt)

### 8.3.2 Kohlweißling

Auch der Kohlweißling beispielsweise bekommt seine strahlend weiße Farbe durch Strukturen. Auf seinen Flügeln sind kleine, verlängerte Perlen, die dafür sorgen, dass das Licht in alle Richtungen gestreut wird. Die Schmetterlinge haben üblicherweise eine oder mehrere schwarze Stellen. An diesen sind keine Perlen vorhanden und das Licht wird absorbiert.



Abbildung 18, Kohlweißling (KarinaVorozheeva)

### 8.3.3 Pfau

Bei Pfauen wird Licht an der Vorder- und Rückseite der Federn reflektiert, dadurch wird die Farbe in einem bestimmten Wellenlängenbereich verstärkt. Die Strukturen bestehen aus Melanin in der Form photonischer Kristalle und haben die Form eines Zylinders. Der Abstand der Melaninzylinder bestimmt die Farbe an der jeweiligen Stelle der Feder.



Abbildung 19, Pfau (Ricardo Frantz)

## 9 Tiere, die ihre Farbe und Form ändern

Mit einer Kombination aus Pigmenten und Strukturfarbe ist es manchen Tieren möglich, ihre Farben zu ändern. Diese Vorgänge waren bis vor kurzem noch kaum erforscht, es wird jedoch immer mehr Interesse an diesen Naturphänomenen geweckt. Ganz besondere Fälle, wie zum Beispiel der Oktopus, können sogar ihre Oberfläche und somit ihre Form wandeln.

### 9.1 Chamäleons

Ein Tier, das sehr bekannt dafür ist, dass es seine Farbe wechseln kann, ist das Chamäleon. Männliche Tiere versuchen so, die Weibchen zu beeindrucken, oder Konkurrenten einzuschüchtern. Früher wurde vermutet, dass die Farbwechsel nur mithilfe von Pigmenten stattfinden. In ihrer Haut haben die Tiere Zellen mit roten Pigmenten, gelben Pigmenten und mit Melanin. Wenn das Melanin sich ausbreitet, erscheint die Farbe dunkler und wenn es sich verdichtet erscheint sie heller. Forscher an der Universität Genf untersuchten diese Vorgänge und fanden heraus, dass Chamäleons kein grünes Pigment unter ihrer Haut haben. Diese Farbe erzeugen sie stattdessen mithilfe von Nanokristallen unter den Farbzellen. Wenn sich die Abstände der Kristalle verändern, ändert sich die gesamte Farbe des Chamäleons, da das Licht anders reflektiert wird. Wenn das Kristallgitter eng angeordnet ist, werden mehr blaue Lichtwellen reflektiert und in Kombination mit den gelben Pigmenten erscheint das Chamäleon Grün. Sind die Nanokristalle jedoch weiter auseinander, werden Farben wie Gelb, Orange und Rot reflektiert.

Wenn man tiefer geht, findet man aber noch eine Schicht von Kristallen. Diese reflektieren infrarote Wellenlängen und schützen das Tier somit vor Hitze. (Teyssier, Saenko, van der Marel, & Milinkovitch, 2015), (Milinkovitch, 2015)



Abbildung 20, Chamäleon (Anastasia Mezenina)

## 9.2 Tintenfische

Tintenfische nutzen Farbe auf viele verschiedene Arten. Wenn sie zum Beispiel vor Feinden flüchten, hinterlassen sie eine große Tintenwolke, um diese zu irritieren. Sie können aber auch so wie Chamäleons, selbst ihre Farbe wechseln. Die Schichten in ihrer Haut sind ähnlich wie bei den Chamäleons aufgebaut. Sie besitzen ebenfalls Farbzellen mit Pigmenten. Zusätzlich haben sie Zellen aus dünnen Chitinplättchen, welche Licht reflektieren und so blaue, grüne und silberne Farbtöne erzeugen. Man nennt diese auch Iridophoren. Unter diesen befindet sich eine weitere Schicht reflektierender Zellen, diese sind die Leucophoren. Sie bestehen aus durchscheinenden Proteinen und reflektieren das ganze Licht, das auf sie fällt. Diese Zellen wirken also wie Reflektoren und werden von den Tintenfischen dazu verwendet, ein weißliches oder bläuliches Licht auszusenden. Sie machen sich für ihre Fressfeinde quasi unsichtbar. Vor allem Oktopoden haben diese Eigenschaft.

Oktopoden sind die am weitesten entwickelten Tintenfische und besitzen die besondere Fähigkeit nicht nur ihre Farbe anzupassen, sondern auch ihre Form. Sie machen dies mithilfe von Papillen, das sind rundliche Erhebungen an oder in Organen, die sie nach Belieben steuern können. Somit lassen sie ihre Haut glatt oder uneben erscheinen. Das ist ein großer Vorteil, da sie sich so ideal an die Korallen in ihrer Umgebung anpassen können. (o.V., The Eugene Bell Center, o.D.), (Welsch & Liebmann, Farben, 2012)



Abbildung 21, Oktopus (Vlad Tchompalov)

## 10 Strukturfarbe in der Kunst

Mittlerweile gibt es auch Künstler, die sich Strukturfarben näher ansehen und diese in ihre Arbeiten mit einfließen lassen. Die Farben bieten neue, einzigartige Möglichkeiten.

### 10.1 Franziska Schenk

Eine Künstlerin, die sich mit mehreren naturwissenschaftlichen Themen, unter anderem Strukturfarbe beschäftigt, ist Franziska Schenk. Sie ist Dozentin für bildende Künste an der Birmingham City University. Weil sie von dem leuchtenden Blau der Morphoschmetterlinge so beeindruckt ist, beginnt sie Nachforschungen anzustellen. Um die schillernden Farben in ihren Projekten verwenden zu können, studiert sie die Insekten und ihre Oberflächen. Danach folgen Experimente mit verschiedenen Materialien. Damit die Malfarben sich je nach Blickwinkel ändern, werden kleine Blättchen untergemischt, die einen ähnlichen Effekt erzeugen wie die Oberflächenstrukturen bei Tieren.

Ihre Arbeit „The Art of Iridescence“ stellt Franziska Schenk 2010 fertig. Die Malereien, die entstehen, zeigen einen Schmetterling und dessen leuchtend blaue Farbe. Außerdem ermöglicht das eigens entwickelte Malmedium den gleichen Effekt, den man auch bei Schillerfarben in der Natur beobachten kann. Je nach Blickwinkel und Belichtung ändern sich die Oberflächen der Bilder.

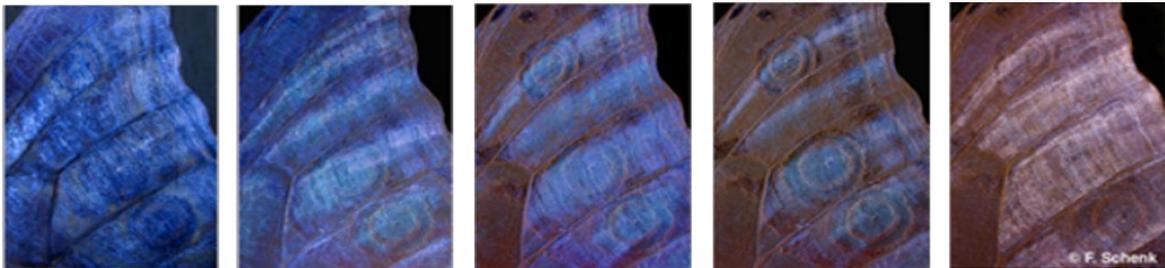


Abbildung 22, Malerei aus verschiedenen Winkeln belichtet (Franziska Schenk)

Bis heute hat die Künstlerin mehr als fünf Projekte, in denen sie mit den besonderen Strukturen und Farben arbeitet, hervorgebracht. (Schenk, kein Datum)

## 10.2 Paul Evans

Ein weiterer Künstler, der das Thema Strukturfarbe studiert, ist Paul Evans. Er arbeitet mit verschiedenen Materialien und in verschiedenen Stilen, außerdem kooperiert er mit Dichtern, Grafik-Designern und Akademikern. Sein Ziel ist es die körperliche und emotionale Beziehung des Menschen zur Natur zu erforschen.

2016 stellt er sein Werk „Irridescence“ bei den Millennium Galleries Sheffield aus. Es besteht aus einer Installation mit virtueller Realität und aus verschiedenen 3D-Drucken. Diese stellen die photonischen Kristalle, die man auf den Flügeln der Morphoschmetterlinge finden kann, dar. (Evans, 2016)

# 11 Illustration des Kinderbuches

Die Idee des praktischen Teils dieser Arbeit war es, das Thema Bionik und in diesem Fall besonders Strukturfarbe, der breiteren Masse leicht verständlich näher zu bringen. Daraus entstand der Gedanke, ein Kindersachbuch zu illustrieren.

## 11.1 Inspiration

Inspiriert werden die Ideen, für die Illustrationen des Kinderbuches, hauptsächlich von zwei Künstlerinnen, die das beruflich machen, den Autorinnen und Illustratorinnen Rachel Ignotofsky und Christina Balit. Außerdem helfen die Zeichnungen und Erklärungen von Claus Mattheck dabei, zu verstehen, wie man physikalische Inhalte unkompliziert und einfach zu verstehen darstellt.

**Rachel Ignotofsky** ist eine Autorin und Illustratorin aus Los Angeles. Sie interessiert sich für Geschichte und Wissenschaft und ihr Ziel ist es, Informationen lustig und leicht begreifbar zu übermitteln. Ihre Zeichnungen haben einen einzigartigen Stil und untermalen die Texte. In ihrem Buch „Women in Science“ schreibt sie über 50 innovative Wissenschaftlerinnen, die die Welt verändert haben. Jeder Text hat eine Illustration und ein Zitat der jeweiligen Frau. Inspiration zum Projekt für diese Arbeit, war ihr Buch, da die Bilder und die Gesamtkompositionen dem Text eine besondere Wirkung verleihen und das Lesen interessanter machen. Ihr Stil kann als reduziert und abstrakt beschrieben werden, aber sie erfasst trotzdem die wichtigsten Details und kreiert somit einen Gesamteindruck. Ihre Illustrationen der Personen können, obwohl sie simpel sind, Charakter und Einzigartigkeit darstellen. Den Platz um die Figuren füllt sie mit kleinen Bildern von Gegenständen, mit Bezug zu der jeweiligen Frau, und Mustern. (o.V., Rachel Ignotofsky, o.D.)

**Christina Balit** hat über 20 Kinderbücher illustriert und ihren ganz eigenen Stil perfektioniert. Ihr erstes Buch gestaltet sie als Mixed-Media-Collage, später beginnt sie, mit Wasserfarben zu experimentieren. Man kann den Einfluss der Collage auf ihren Malstil noch sehen, da ihre Malereien in Sektionen geteilt sind, was ihnen einen ganz eigenen Effekt verleiht. Im Mittelpunkt stehen auch meist die Figuren, die im Text beschrieben

werden. In dem Buch „Treasury of Greek Mythology“ zum Beispiel, illustriert sie die Geschichten der einzelnen Götter und Göttinnen. Sie verleiht jedem und jeder mithilfe kräftiger Farben und fließender Formen einen eigenen Charakter. (Balit, o.D.)

**Claus Mattheck**, ein Physiker und Autor, erklärt in seinen Publikationen physikalische Phänomene. Durch seine Zeichnungen und Bilder sind diese auch für Laien einfach verständlich. Mit seinem Buch „Secret Design Rules of Nature“, versucht er unter anderem Designern mithilfe seiner Erklärungen die Naturgesetze, in Bezug auf Form und Struktur, näher zu bringen. Er will helfen „Brücken“ zwischen Zivilisation und Natur zu bauen, eine Idee, die viele Forscher im Bereich der Bionik unterstützen. (Mattheck, 2007)

### 11.2 Konzept

Die Ideen für die praktische Arbeit sind wie bereits erwähnt das Schreiben und Illustrieren eines Kinderbuches. Bevor man einen Text verfasst und Bilder dazu entwickelt, ist es wichtig, einige Dinge festzulegen. Man sollte sich Gedanken über die Zielgruppe und deren Alter machen. Darauf basierend kann man überlegen, wie lang das Buch sein soll und wie komplex der Inhalt sein darf. Das illustrierte Buch über Tiere und ihre Farben, soll für ein breites Publikum zugänglich sein. Grundsätzlich ist es ein Kinderbuch, durch die Illustrationen und das relativ wenig bekannte Thema ist es jedoch für jede Altersgruppe angemessen. Der Inhalt beruht auf dem theoretischen Teil der Diplomarbeit über Tiere, ihre Färbungen und Strukturfarbe. Die Bilder zeigen hauptsächlich die Tiere, die im Text erläutert und beschrieben werden.

### 11.3 Ausführung

Nach dem Anfertigen von detaillierten Skizzen werden die Farbpaletten für die einzelnen Bilder entschieden. Die Illustrationen sind mit Gouache gemalt. Die Rahmen, die die Seiten übersichtlicher machen, sind in den Farben der jeweiligen Tiere gehalten. Diese sind mit schwarzen Linien umrahmt, um sie hervorzuheben.



Abbildung 23, Skizzen

## Illustration des Kinderbuches



Abbildung 25



Abbildung 24

## 12 Résumé

Dieses Dokument erklärt naturwissenschaftliche Vorgänge im Bezug auf Bionik, vor allem Strukturbionik und Strukturfarbe, und veranschaulicht deren mögliche Verbindung zur Kunst.

Der Beginn der Arbeit zeigt auf, dass Menschen sehr früh auf die Idee kamen Phänomene aus der Natur zu betrachten und anhand dieser Prinzipien kommerziell nutzbare Produkte zu produzieren. Eine weitere wesentliche Erkenntnis ist, dass nicht alles, was natürlich wirkt oder organische Formen aufweist, tatsächlich bionische Eigenschaften hat. Das Gebiet der Bionik ist außerdem sehr breit gefächert und es kommen laufend neue Erkenntnisse hinzu. Die Strukturbionik zum Beispiel kann unter anderem auch mit Bereichen wie der Kybernetik verknüpft werden, da das Ziel beider Wissenschaften maximale Effizienz ist. Mittlerweile ist Bionik ein Fachgebiet, das aus keinem Lebensbereich mehr wegzudenken ist.

Der zweite Teil stellt fest, dass der Mensch zirka 80% seiner Umgebung mit dem Sehsinn wahrnimmt, weshalb dieser essenziell ist. Danach präsentiert er die Erkenntnis, dass nicht alle Farben durch Pigmente entstehen, sondern physikalische Phänomene, die das Licht beeinflussen, auch für bestimmte Färbungen sorgen können. Weiters geht er auf die optische Wahrnehmung von Tieren ein. Diese variiert von Art zu Art und manche Organismen, können sogar mehr Farben und Nuancen, als Menschen sehen. Man kann zusammenfassend sagen, dass Tiere ihre Färbungen aufgrund bestimmter Gründe haben und ändern. Außerdem kommen in der Natur Strukturfarben häufig in der Tierwelt vor, da gewisse Farbstoffe nicht gut synthetisieren können und somit eine größere Farbvielfalt erzielen können.

Durch das Auseinandersetzen mit den theoretischen Inhalten und dem physikalischen Experiment, spiegeln die praktischen Arbeiten die erlernten Kenntnisse in Kunst und Naturwissenschaft wieder. Ein Fazit, das aus dem künstlerischen Schaffen gezogen werden kann, ist, dass Naturwissenschaften und Kunst viele Gemeinsamkeiten aufweisen.

## VI. Literaturverzeichnis

Balit, C. (o.D.). *Christina Balit*. Abgerufen am 06. 01 2019 von <http://www.christinabalit.com/about/4592700335>

Blank, S. (09. 09 2006). *Die Welt*. Abgerufen am 02. 01 2019 von <https://www.welt.de/print-welt/article151143/Vorsicht-giftig.html>

Blüchel, K., & Malik, F. (2006). *Faszination Bionik*. Malik Management Zentrum St. Gallen.

Decker, S. (2018). *www.planet-wissen.de*. Von [https://www.planet-wissen.de/kultur/architektur/moderne\\_dachkonstruktionen/pwiefreiottovordenk\\_erdleichtbaus100.html](https://www.planet-wissen.de/kultur/architektur/moderne_dachkonstruktionen/pwiefreiottovordenk_erdleichtbaus100.html) abgerufen

Deiß, K. (2012). *www.daserste.de*. Von <https://www.daserste.de/information/wissen-kultur/w-wie-wissen/sendung/2011/bau-bionik-100.html> abgerufen

Dipl. -Biol. Brechner, E., Dr. Dinkelaker, B., & Dr. Dreesmann, D. (2001). *Spektrum.de*. Abgerufen am 30. 12 2018 von <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/pigmente/9064>

Enterprise Florida. (2009). *www.youtube.com*. Von [https://www.youtube.com/watch?v=WFlj1G\\_DuAU](https://www.youtube.com/watch?v=WFlj1G_DuAU) abgerufen

Evans, P. (2016). *axisweb.org*. Abgerufen am 30. 12 2018 von <https://www.axisweb.org/p/paulevans/#artwork>

Gebeshuber, I. (2016). *Wo die Maschinen wachsen*. Wals bei Salzburg, Österreich: Ecowin Verlag bei Benevento Publishing.

Gebeshuber, P. D.-I. (2018). (C. Rieger, & D. Micheli, Interviewer)

- Goldsmith, T. (1 2007). *Spektrum.de*. Abgerufen am 30. 12 2018 von [file:///C:/Users/Clara/Downloads/sdw\\_2007\\_1\\_S96.pdf](file:///C:/Users/Clara/Downloads/sdw_2007_1_S96.pdf)
- Karl, G. R. (o.D.). *Justus-Liebig-Universität Giessen*. Abgerufen am 5. 11 2018 von <http://www.allpsych.uni-giessen.de/karl/teach/farbe.html>
- Kühn, S. (2016). *www.wirelesslife.de*. Von <https://wirelesslife.de/ikarus-komfortzone/> abgerufen
- Kulow, B. (2018). *www.amazonas.de*. Von <https://amazonas.de/riesenseerose-pracht-fuer-zwei-naechte/> abgerufen
- Mattheck, C. (2007). *Secret Design Rules of Nature*. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH.
- Milinkovitch, M. (05. 03 2015). *Université de Genève*. Abgerufen am 04. 01 2019 von <https://www.unige.ch/communication/communiqués/files/1714/8698/6418/CdP150310-en.pdf>
- o.V. (02 2018). *Geo-lino*. Abgerufen am 13. 02 2019 von <https://www.geo.de/geolino/tierlexikon/18675-rtkl-tierlexikon-blaufusstoelpel>
- o.V. (o.D.). *Rachel Ignotofsky*. Abgerufen am 06. 01 2019 von <https://www.rachelignotofskydesign.com/about/>
- o.V. (o.D.). *The Eugene Bell Center*. Abgerufen am 05. 01 2019 von <http://www.mbl.edu/bell/current-faculty/hanlon/skin-ultrastructure-neurobiology/>
- o.V. (o.D.). *Universität Wien*. Abgerufen am 5. 11 2018 von [https://www.univie.ac.at/mikroskopie/1\\_grundlagen/optik/Grundlagen%20der%20Optik.pdf](https://www.univie.ac.at/mikroskopie/1_grundlagen/optik/Grundlagen%20der%20Optik.pdf)

o.V. (kein Datum). *ULB Sachsen-Anhalt*. Abgerufen am 30. 12 2018 von <https://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/diss-online/04/04H153/t3.pdf>

Pies-Schulz-Hofen, R. (2004). *Die Tierpflegerausbildung*. Stuttgart: Parey Verlag.

Plant Biomechanics Group Freiburg. (2016). [www.bionik.online.de](http://www.bionik.online.de). Von <https://www.bionik-online.de/top-down-prozess/> abgerufen

Plant Biomechanics Group Freiburg. (2016). [www.bionik-online.de](http://www.bionik.online.de). Von <https://www.bionik-online.de/bottom-up-prozess/> abgerufen

Prof. Dr. Nachtigall, W., & Blüchel, K. (2000). *Das große Buch der Bionik*. Deutsche Verlags-Anstalt.

Quack, K. (2008). [www.computerwoche.de](http://www.computerwoche.de). Von <https://www.computerwoche.de/a/synte-gration-die-methode,1879256> abgerufen

Reichholf, J. H. (2011). *Der Ursprung der Schönheit*. München: Verlag C. H. Beck oHG.

Schenk, F. (kein Datum). *Franziska Schenk*. Abgerufen am 28. 12 2018 von <http://www.franziskaschenk.co.uk/>

Schlößer, T., & Rahms, S. (2016). [www.planet-wissen.de](http://www.planet-wissen.de). Von <https://www.planet-wissen.de/natur/forschung/bionik/index.html> abgerufen

Sharklet Technologies. (2016). [www.asknature.org](http://www.asknature.org). Von <https://asknature.org/idea/sharklet-surface-texture/#.XGfoMqdoRQJ> abgerufen

Sharklet Technologies. (2018). [www.sharklet.com](http://www.sharklet.com). Von <https://www.sharklet.com/our-technology/sharklet-discovery/> abgerufen

Sharklet Technologies. (2018). [www.sharklet.com](http://www.sharklet.com). Von <https://www.sharklet.com/our-technology/technology-overview/> abgerufen

Speck, T. (2018). *www.spektrum.de*. Von <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/bionik/8744> abgerufen

Teyssier, J., Saenko, S. V., van der Marel, D., & Milinkovitch, M. C. (10. 03 2015). *nature communications*. Abgerufen am 04. 01 2019 von <https://www.nature.com/articles/ncomms7368>

Thiel, H. P. (2006). *Kinder-Tierlexikon*. München: Wissen Media Verlag GmbH.

Vukusic, P., Hallam, B., & Noyes, J. (5. 9 2006). *Sciencemag.org*. Abgerufen am 30. 12 2018 von [http://newton.ex.ac.uk/research/emag/pubs/pdf/Vukusic\\_SC\\_2007.pdf](http://newton.ex.ac.uk/research/emag/pubs/pdf/Vukusic_SC_2007.pdf)

Wächter, T. (2005). *www.ufg.at*. Von [https://www.ufg.at/fileadmin/media/institute/raum\\_und\\_design/industrial\\_design/arbeiten/2006/waechter\\_theresa\\_spuren.pdf](https://www.ufg.at/fileadmin/media/institute/raum_und_design/industrial_design/arbeiten/2006/waechter_theresa_spuren.pdf) abgerufen

Welsch, N., & Liebmann, C. C. (2012). *Farben*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Welsch, N., Schwab, J., & Liebmann, C. (2013). *Materie*. Berlin: Springer-Verlag GmbH.

*www.bionikforscherwoche.com*. (2015). Von <https://bionikforscherwoche.wordpress.com/2015/07/10/teilgebiete-der-bionik/> abgerufen

*www.ephotozine.com*. (2015). Von <https://www.ephotozine.com/photo/hezarfen-ahmed-celebi--a-legendary-ottoman-aviator-42784421> abgerufen

## VII. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Skizze aus da Vincis Notizbuch .....	4
Abbildung 2: Sagrada Familia von Innen .....	5
Abbildung 3: Peterskuppel .....	7
Abbildung 4: Polygonverbindungen .....	8
Abbildung 5: Hai .....	10
Abbildung 6: Lotusblüteneffekt.....	11
Abbildung 7: Strukturfarbe.....	12
Abbildung 8: Victoria Cruziana .....	12
Abbildung 9: Crystal Palast, London .....	12
Abbildung 10, Prisma (Bild von "freepik").....	18
Abbildung 11, Destruktive Interferenz .....	19
Abbildung 12, Konstruktive Interferenz .....	19
Abbildung 13, Experiment-Strukturfarbe.....	20
Abbildung 14, Pfeilgiftfrosch (Zachary Spears) .....	22
Abbildung 15, Blaufußstölpel (Andy Brunner) .....	24
Abbildung 16, Flamingo (Gwen Weustnik).....	24
Abbildung 17, Morphofalter (Annie Spratt) .....	25
Abbildung 18, Kohlweißling (KarinaVorozheeva) .....	26
Abbildung 19, Pfau (Ricardo Frantz).....	26
Abbildung 20, Chamäleon (Anastasia Mezenina).....	27
Abbildung 21, Oktopus (Vlad Tchompalov).....	28
Abbildung 22, Malerei aus verschiedenen Winkeln belichtet (Franziska Schenk).....	29
Abbildung 23, Skizzen.....	32
Abbildung 24.....	33
Abbildung 25.....	33