

**550 nm**

**Farbwechsel von Tieren**

*Kommunikation in der Natur*

Helen Weisbecker

# 550 nm

**Farbwechsel von Tieren**

*Kommunikation in der Natur*

Helen Weisbecker

# Inhalt

## 1. Farben

1.1 Farbe als Informationsmedium	11
1.2 Farbsignale in der Natur	15
1.3 Farbkontraste	19
1.4 Farbpsychologie	33
1.5 Farbsymbolik	35

## 2. Farbe in Tier- und Pflanzenwelt

2.1 Reflexion und Absorption	63
2.2 Pigmente	65
2.3 Melanin	67
2.4 Funktionen	69
2.5 Strukturfarben	71
2.6 Fische, Amphibien und Reptilien	73

## 3. Farbwechsel

3.1 Morphologischer Farbwechsel	77
3.2 Physiologischer Farbwechsel	78
3.3 Physiologischer Farbwechsel am Beispiel von Tieren	83
3.4 Chamäleon	83
3.5 Gecko	93
3.6 Feilenfisch	99
3.7 Scholle	105
3.8 Tintenfisch	109

## 4. Lexikon

112

## 5. Quellen

114

## 6. Impressum

116



Abb. 1 Der maurische Gecko  
*Tarentola mauritanica*

## Einführung

Dieses illustrierte Buch über den Farbwechsel von Tieren ist für alle, die sich für die Welt der Farben interessieren. Es behandelt die Faszination, die Farbe auf uns ausübt, wie Farben uns helfen, uns anzupassen und wie sie Tieren helfen, sich in der Natur zu orientieren oder einzufügen.

Im Buch werden die Themen Farben, Farbe in der Tier- und Pflanzenwelt und Farbwechsel behandelt. Im ersten Kapitel erfährst du alles über Farben, wie sie als Informationsmedium dienen und als Farbsignale in der Natur funktionieren. Daraufhin folgt eine Übersicht über alle Farbkontraste und ein Einblick in Farbpsychologie und -symbolik.

Im zweiten Kapitel erfährst du, wie Farben in der Tier- und Pflanzenwelt eingesetzt werden, um sich anzupassen und zu überleben. Du lernst, wie die Farbvielfalt der Natur verursacht wird und wie sie Tieren bei der Partnerwahl oder zur Tarnung helfen.

Das letzte Kapitel führt dich in die Welt von Tieren, welche die Fähigkeit besitzen, ihre Farbe zu wechseln. „Farbwechsel von Tieren – Kommunikation in der Natur“ ist für alle, die sich für Farben und ihren Einfluss auf die Natur interessieren. Es enthält viele Illustrationen, die dir beim Verstehen helfen. Lass dich überraschen, wie vielseitig Farben in der Tier- und Pflanzenwelt eingesetzt werden und wie sie unser Verständnis für die Natur vertiefen.

Unsere Natur leidet unter Kriegen, Massenkonsum und dem Klimawandel und verliert dadurch ihre Schönheit. Diese zeichnet sich vor allem durch die Artenvielfalt der Tiere aus. Ein großer Teil der Schönheit in der Natur stammt von der beachtlichen Diversität der Körperfärbung von Tieren. Viele Organismen weisen eine Fülle von Farben und Mustern auf, besonders durch Pigmente in ihrer Haut. Die dadurch entstehende Schönheit zieht seit der Antike Menschen, besonders Biologen und Hobbyforscher, an. Aristoteles, welcher als erster die Biologie systematisch studierte, konzentrierte sich bei seinen Studien auf die bunte Färbung der Haut von Tieren, beispielsweise auf die des Tintenfisches.<sup>1</sup> Die Funktionen von Farben in der Tierwelt beruhen auf evolutionären Prozessen und erstrecken sich über Tarnung, Auflauern oder Warnung bis hin zu einer durch sexuelle Selektion bedingte Werbefärbung. Die bemerkenswertesten Beispiele für Körperfarben und -muster finden sich bei Kraken, Tintenfischen oder Chamäleons, da diese ihre Farbe schnell ändern können. Der schnelle Wechsel dient zur Kryptierung, Werbung oder sogar der Darstellung von Gefühlen.<sup>2</sup> Nicht nur Tiere nutzen Farbe als Ausdrucks- und Kommunikationsmittel. Auch Designer\*innen bedienen sich an der vielfältigen Auswahl an Farben, um beispielsweise Gefühle, Stimmungen oder Warnungen zu vermitteln oder, um Aufmerksamkeit und Individualität zu generieren.

700 nm

600 nm

500 nm

400 nm

Abb. 2 Das sichtbare Lichtspektrum  
Visible spectrum

# 1.

## Farbe

### Farben des Lichtspektrums

Es gibt wohl kaum eine andere Erscheinung als Farbe, die mit so viel Symbolik verbunden wird. Farbe hat die Eigenschaft, Stimmungen und Gefühle hervorzurufen und ist eine Sinnesempfindung. Aus kulturellen Entwicklungen entstehen Farbsymboliken, welche uns in Metaphern, in der Werbetechnik oder im religiösen Kontext begegnen.

In diesem Kapitel wird auf Farbe und ihre psychologische Wirkung eingegangen und dargestellt, welche Effekte Farbkombinationen und -kontraste erzeugen. Außerdem werden die Symbolik und die Bedeutung von unterschiedlichen Farben vorgestellt. Dies soll helfen, um Farbgebung und -wechsel von Tieren und der Natur nachvollziehen zu können.

Das sichtbare Lichtspektrum (Abb. 2) ist der Abschnitt des elektromagnetischen Spektrums, den das menschliche Auge sehen kann. Dieser Wellenlängenbereich wird auch als sichtbares Licht bezeichnet. Das menschliche Auge kann Wellenlängen von 380 bis 700 Nanometer erkennen.<sup>117</sup>



Abb. 3 Farbmarkierung in der Abfallwirtschaft

## Farbe als Informationsmedium

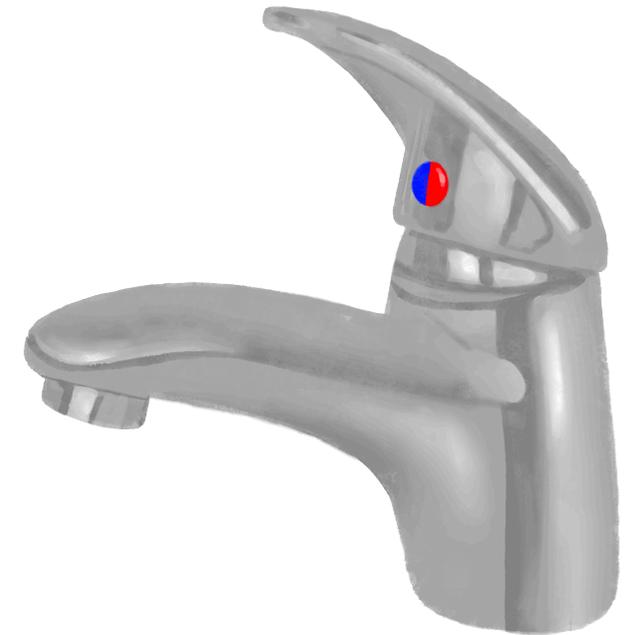


Abb. 4 Farbmarkierung im Haushalt

### Farbmarkierungen

Menschen, besonders Mitteleuropäer, nutzen Farben unter anderem als Hinweise, wodurch sie als „wortloses Informationsmedium“<sup>3</sup> dienen. Diese Markierungen begegnen uns zum Beispiel im Haushalt, wo die rote Markierung bei einem Wasserhahn (Abb. 4) für warmes und die blaue Markierung für kaltes Wasser steht. Hier wurde die menschliche Temperaturempfindung von Farben angepasst, da wir Blau als kalte und Rot als warme Farbe wahrnehmen.<sup>4</sup> Farbgebung als Informationsmedium findet man außerdem in der Abfallwirtschaft (Abb. 3). Gelb steht für wiederverwertbare Abfallstoffe, Grün dagegen weist auf biologisch kompostierbare Abfälle hin und Blau markiert Altpapier.

## Straßenverkehr

Auch im Straßenverkehr dienen Farben als Informationsgeber (Abb. 5 – 6). Sie weisen auf Gefahren, Gebote oder Verbote hin. Als Symbolträger werden die Farben Grün, Gelb, Rot und Blau verwendet. Die achromatischen Farben Schwarz und Weiß präzisieren die Symbolik. Treffen wir im Straßenverkehr auf die Farbe Rot, wird von einem Verbot ausgegangen, beispielsweise das absolute Halteverbot. Grün hingegen signalisiert freie Fahrt. Gelb dient als Achtungssignal und Blau weist auf beschränkte Nutzungsmöglichkeiten hin. Farbe als wortloses Informationsmedium erlaubt im Straßenverkehr eine schnellere Orientierung.<sup>5</sup>

Abb. 5 – 6 Farbmarkierung im Straßenverkehr

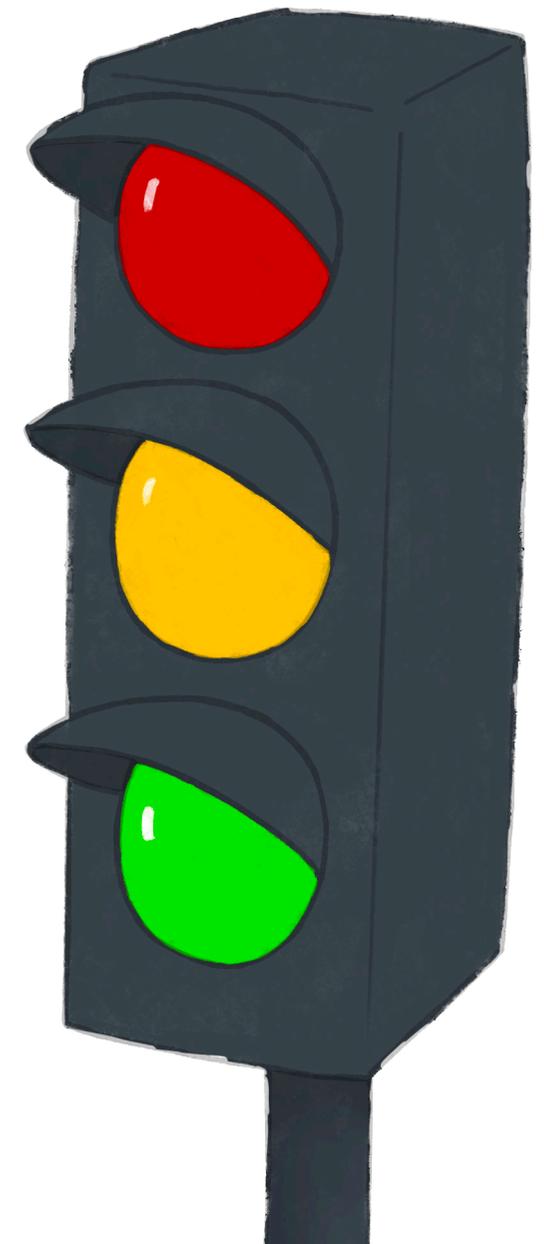




Abb. 7 Raupe vom großen Kohlweißling  
*Pieris brassicae*

## Farbsignale in der Natur

### Signale

Nicht nur Menschen nutzen Farbe als Informationsträger. Auch in der Natur findet man Farbkennzeichnungen, welche bestimmte Signale übermitteln. Männliche Paradiesvögel setzen ihr buntes Balzgefieder für eine prachtvolle Schau ein. Arktische Papageientaucher (Abb. 8) oder tropische Tukane (Abb. 10) nutzen ihre bunten Schnäbel als Partner-signal. Um Weibchen anzulocken, setzt der Fregattvogel (Abb. 9) seine leuchtend roten Kehlsäcke ein. Ein Meister der Locksignale ist der australische und polynesisische Laubvogel. Er baut eine Laube und schmückt diese mit vielen bunten Gegenständen. Je mehr bunte Gegenstände sich in seiner Laube befinden, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, ein Weibchen zu beeindrucken.

### Farbwechsel

Bezüglich Farbe und Tierwelt stechen besonders Tierarten wie zum Beispiel das Chamäleon hervor. Sie besitzen die Fähigkeit, ihre Körperfärbung zu ändern und signalisieren dadurch Paarungs- und Angriffsbereitschaft oder ein Bedürfnis nach Ruhe.



Abb. 8 Arktischer Papageientaucher  
*Fratrula arctica*



Abb. 9 Fregattvogel  
*Fregatidae*

## Tarnung

Farben dienen Tiere nicht nur um Aufmerksamkeit in jeglicher Art zu generieren, sondern auch, um sich zu tarnen. Die graue Körperfarbe von Mäusen oder Ratten hilft ihnen, sich vor potenziellen Fressfeinden zu schützen. Grüne Tiere, wie zum Beispiel Blattläuse, Raupen (App. 7) oder Frösche leben bewusst in einer grünen Vegetation. Einige Schnecken- und Schmetterlingsarten können ihre Umgebung so perfekt imitieren, dass sie bei einem schnellen Hinsehen mit ihrem Untergrund verschmelzen.

## Warnung

Neben der Nutzung von Farbe als aufmerksamkeitsgenerierendes Signal oder als Tarnung, gibt es eine dritte Signalgebung: Farbe dient Tieren auch, um eine Warnung an ihre Fressfeinde zu schicken. So zeigen zum Beispiel Wespen mit ihrer gelb-schwarzen Färbung, dass sie wehrhaft sind.<sup>6</sup>



Abb. 10 Tropischer Tukan  
*Ramphastidae*

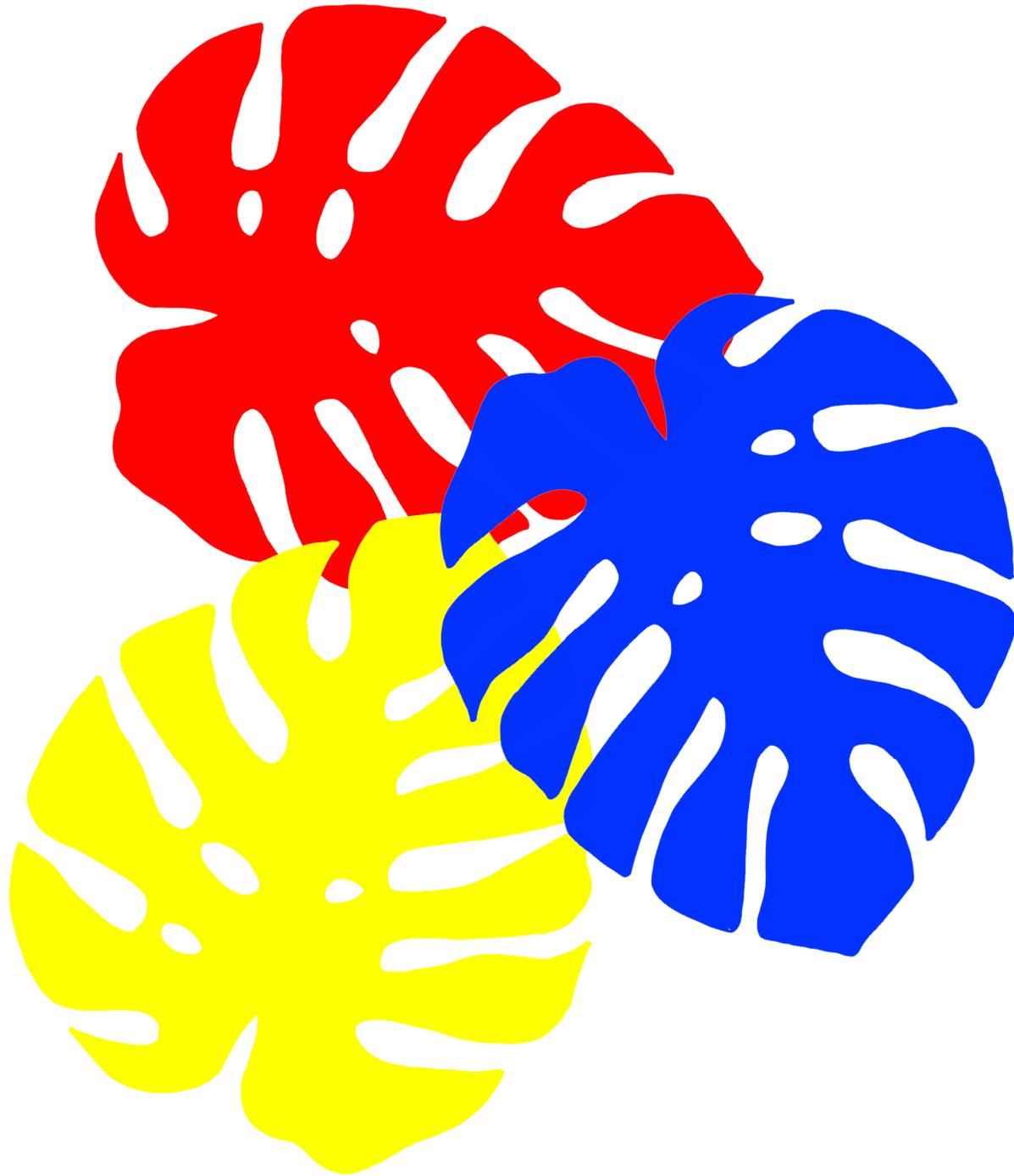


Abb. 11 Farbe-an-Sich-Kontrast mit den drei primären Grundfarben Rot, Gelb und Blau

## Farbkontraste

Farben an sich sind ein starkes Ausdrucksmittel. Um dies noch weiter zu verstärken, werden Farbkontraste genutzt. Diese werden bewusst, zum Beispiel in Werbung, eingesetzt, um das Interesse des Betrachtenden zu wecken oder zu verstärken. Kontraste können außerdem genutzt werden, um auf wichtige Informationen hinzuweisen. Farbkontraste sind eine „räumlich, seltener zeitliche, Nebeneinanderstellung unterschiedlich gefärbter Flächen“<sup>77</sup>. Die benachbarten Farben beeinflussen sich in ihrer physischen und psychologischen Wirkung gegenseitig. Sowohl Goethe als auch Johannes Itten versuchten das Zusammenwirken von Farben mithilfe eines Systems zu kategorisieren.

### Farbe-an-Sich-Kontrast

Der stärkste Farbkontrast wird mit dem Farbe-an-sich-Kontrast erreicht. Hier werden die primären Grundfarben Rot, Gelb und Blau gegenübergestellt.



## Hell-Dunkel-Kontrast

Der Hell-Dunkel-Kontrast bestimmt durch die Gegenüberstellung von Helligkeit und Dunkelheit das menschliche Dasein, wie zum Beispiel die Gegenüberstellung von Tag und Nacht.

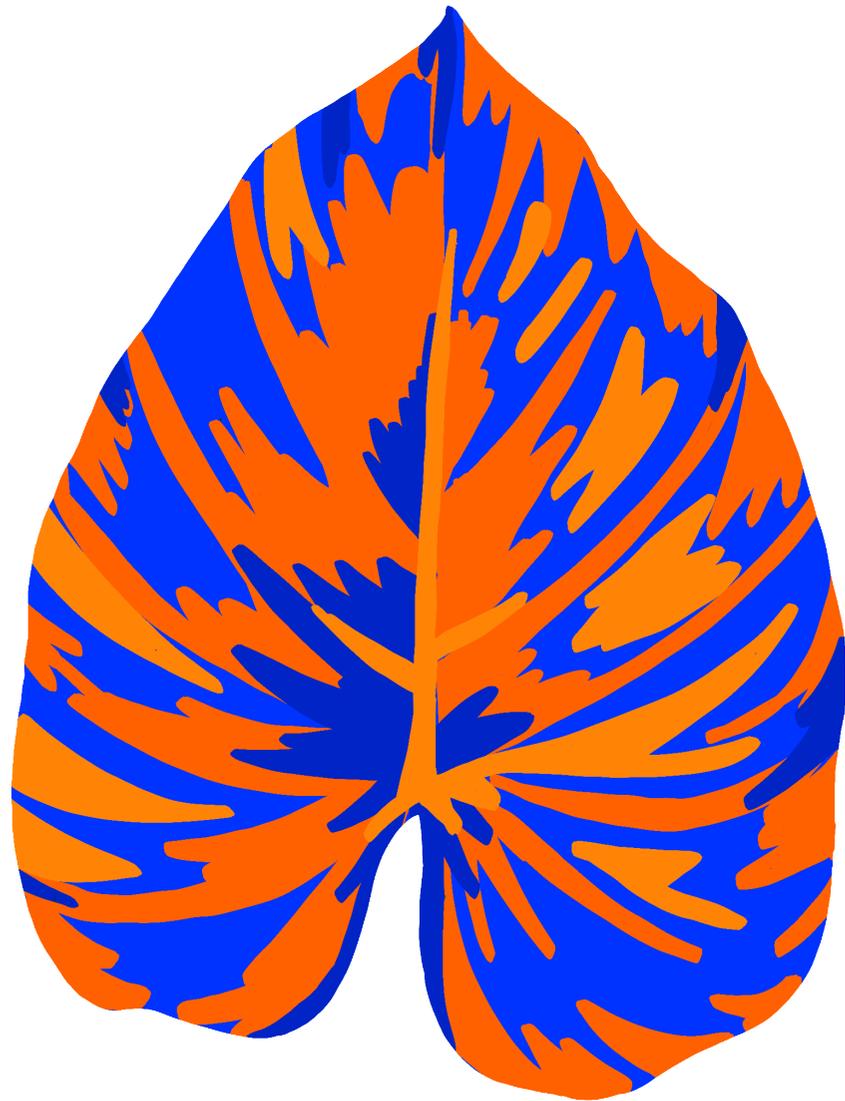


Abb. 13 Kalt-Warm-Kontrast mit den Farben Blau und Orange

### Kalt-Warm-Kontrast

Auf das Zusammenspiel von warmen Farben, wie zum Beispiel Orange oder Gelb, und kalten Farben, wie Grün oder Blau, beruht der Kalt-Warm-Kontrast. Durch diesen Kontrast können nicht nur Form und Gestalt betont werden, es lässt sich außerdem eine zweipolige Empfindung darstellen.<sup>9</sup> Temperaturwahrnehmung von Farben ist ein subjektives Gefühl, da derartige Empfindungen den tatsächlichen Gegebenheiten physikalisch betrachtet widersprechen. Diese Wahrnehmungen entstanden wahrscheinlich durch Assoziationen zu rotem Feuer sowie blauem Wasser.<sup>10</sup>

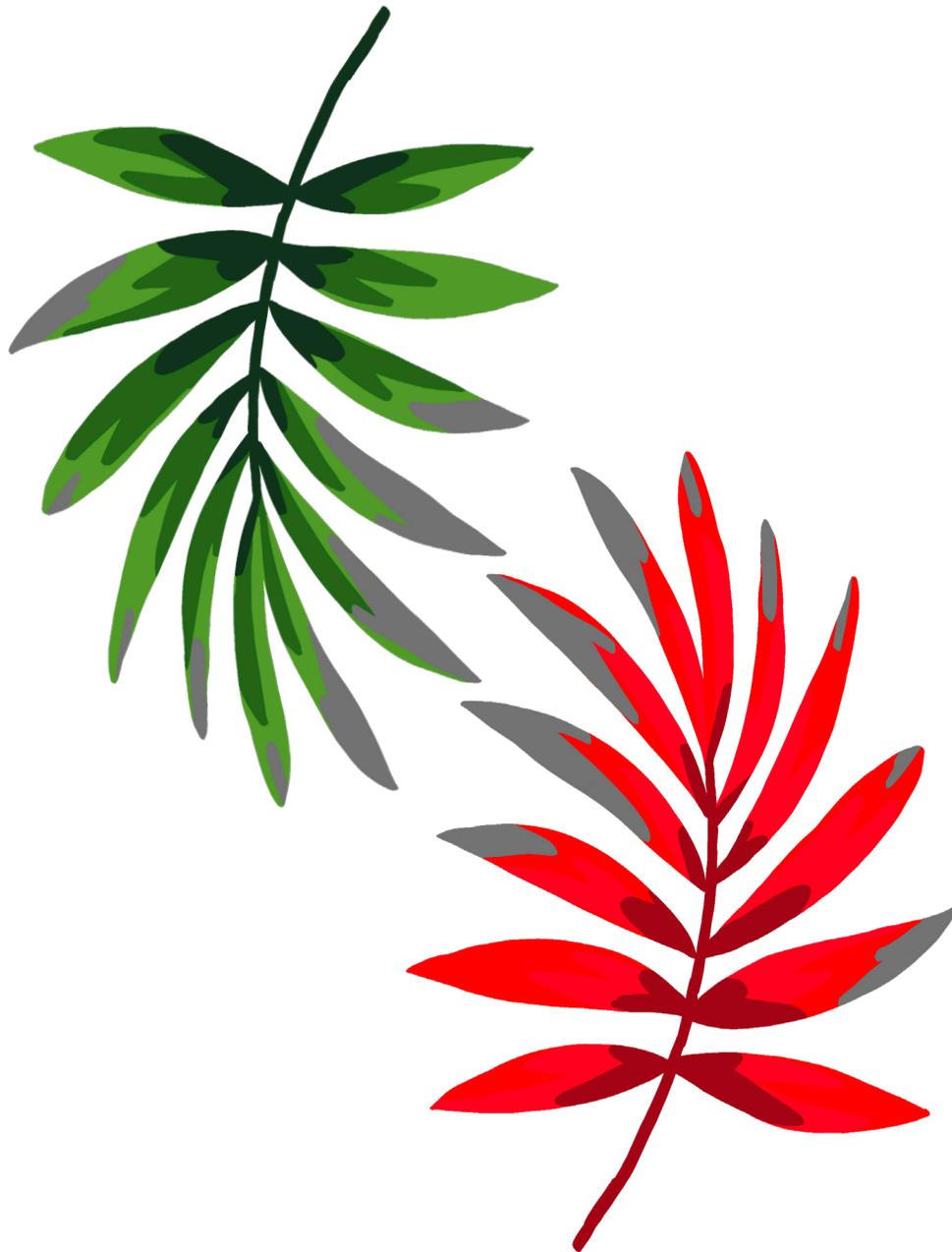


Abb. 14 Simultan-Kontrast

### Simultan-Kontrast

Ein weiterer Kontrast ist der Simultan-Kontrast. Dieser wird durch physiologische Eigenarten des menschlichen Farbsehens hervorgerufen. Durch das Verschieben von Farbnuancen wirken angrenzende Farben leuchtender oder gedämpfter.



Abb. 15 Komplementär-Kontrast mit den Komplementärfarben Rot und Grün

### Komplementär-Kontrast

Der wohl stärkste Farbkontrast in der Malerei ist der Komplementär-Kontrast. Es werden zwei Farben verwendet, die sich im Farbkreis gegenüberstehen. Bekannt für die Nutzung dieses Stilmittels ist besonders der niederländische Maler Vincent van Gogh.<sup>11</sup>



Abb.16 Qualitätskontrast

## Qualitätskontrast

Spricht man vom Qualitätskontrast, ist die Rede vom Gegensatz von leuchtenden, gesättigten zu trüben, gebrochenen Farben. Nutzung davon hat besonders der Maler Henri Matisse gemacht.

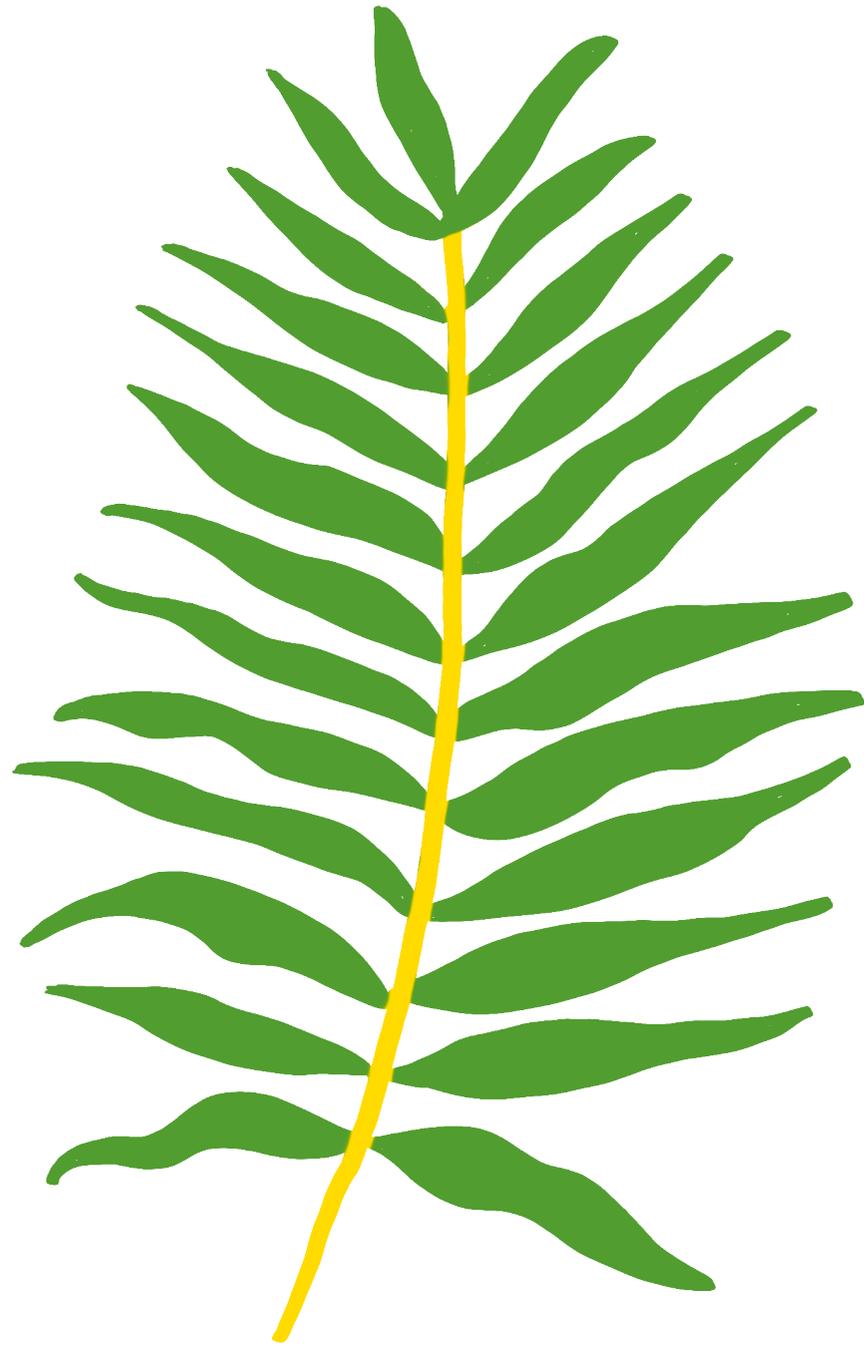


Abb. 17 Quantitätskontrast durch die Verteilung an Flächengröße zwischen die Farben Grün und Gelb

## Quantitätskontrast

Nutzt man die Wirkung einer Farbe hinsichtlich ihrer Leuchtkraft und Flächengröße, entsteht ein Quantitätskontrast. Goethe hat hierfür Verhältnisse bestimmt, welche harmonisch wirken. Hält man diese nicht ein, entsteht ein unruhiger Gesamteindruck. Das Stilmittel des Quantitätskontrastes findet man beispielsweise in dem Gemälde „Der Mann mit dem Goldhelm“ von Rembrandt van Rijn.<sup>12</sup>



Abb. 18 Das Jemenchamäleon  
*Chamaeleo calytratus*

## Farbpsychologie

Wie schon zu Beginn des Kapitels beschrieben, besitzt Farbe die Eigenschaft, Gefühle und Stimmungen hervorzurufen. Um dies genauer verstehen zu können, setzen sich unter anderem moderne Psychologen und Farbtherapeuten mit den Themen Farbpsychologie und -symbolik auseinander. Sie vertreten die Meinung, dass sich niemand der Wirkung von Farben entziehen kann und dass Farben Einfluss auf seelische und körperliche Vorgänge haben. Menschen verbinden Farben mit bestimmten Eigenschaften oder Empfindungen und stehen so in positiver oder negativer Weise in Beziehung zu diesen. Beispielsweise wirkt Rot erregend und kann eine hohe Puls- und Atemfrequenz auslösen. Goethe stellt in seiner Farbenlehre fest, dass Gelb eine heitere Stimmung erzeugt, Blau hingegen Trauer. Farbwirkung war schon in alter Zeit von Bedeutung. Beispielsweise wurde Farbe in der Heilkunde zur Bekämpfung von Gebrechen, in religiösen Ritualen oder in der Kunst, mit der Intention, auf das seelische und körperliche Befinden zu wirken, eingesetzt. Psychologen geht es darum, „eindeutige Beziehungen zwischen Farben als physiologische Erscheinung und den davon ausgehenden psychischen Verhaltensweisen im Denken, Fühlen und Handeln der Menschen herauszuarbeiten.“<sup>13</sup> Mit Beginn des 20. Jahrhunderts entwickelte sich in Europa die Chromotherapie, eine alternative Heilmethode.

Diese Methode wurde unter der Annahme entwickelt, dass sich Farben heilend, stimulierend und harmonisierend auf den Körper und die Psyche auswirken. Die Therapie erfolgt durch Lichtbestrahlung mit der Erkenntnis zugrunde liegend, dass jede Farbe eine Schwingungsfrequenz besitzt. Farben sollen nicht über visuelle, sondern über chemische und physikalische Wege in den Körper eindringen. Jedoch zeigte die Chromotherapie keine besonderen Heilungserfolge.<sup>14</sup> Max Lüscher stellte fest, dass die Wahrnehmung von Farben „objektiv und universal, die Bevorzugung [...] jedoch subjektiv ist.“<sup>15</sup> Beim sogenannten „Lüscher-Test“ sollen Personen Farbkärtchen der Präferenz nach sortieren. Ziel ist es, dass durch die entstehende Farbfolge der seelisch-körperliche Zustand des Betroffenen festgestellt werden kann. Nach Lüscher zufolge besitzt eine Person mit der Vorzugsfarbe Gelb eine innere Freiheit zur Selbstentfaltung und ist ein rezeptiver Denkertyp. Wird die Farbe Rot bevorzugt, hat die Person eine hohe Selbst-Erregungsaktivität sowie ein starkes Selbstvertrauen und gehört zum provokativen Denkertyp. Blau zeigt ein Innehaben von Ruhe und Zufriedenheit und ordnet die Person als einen reflexiven Denkertyp ein. Eine Person mit der Vorzugsfarbe Grün hat durch Selbstfestigkeit und Beharrung eine hohe Selbstachtung und gehört zum objektiven Denkertyp. Dieser Farbtest wird jedoch als zu dogmatisch und nicht divers genug bewertet.<sup>16</sup> Neben Goethe und Lüscher haben auch weitere Farbtheoretiker, wie Heinrich Fieling oder Pfister-Heiss-Hiltmann den Versuch gestartet, seelische Zustände anhand von Farbtests zu bestimmen. Die Ergebnisse hierbei waren mehr oder weniger erfolgreich.



Abb. 19 Fensterblatt  
*Monstera*

## Farbsymbolik

Psychologen befassen sich außerdem mit Eigenschaften und Symbolwerten von Farben. Die Wirkung von Farbe spielt besonders in der Werbebranche, in der Mode oder bei einer Wohnungsgestaltung eine große Rolle. So gilt Grün als Farbe des Wachstums, Heilung oder Harmonie. Orange symbolisiert Lebensfreude und -energie.<sup>17</sup> Auf ähnliche Zuordnungen wird im weiteren Verlauf eingegangen, um nachvollziehen zu können, welche Gefühle Tiere durch einen Farbwechsel ausdrücken könnten.



Abb. 20 Rose  
*Rosa*

## Rot

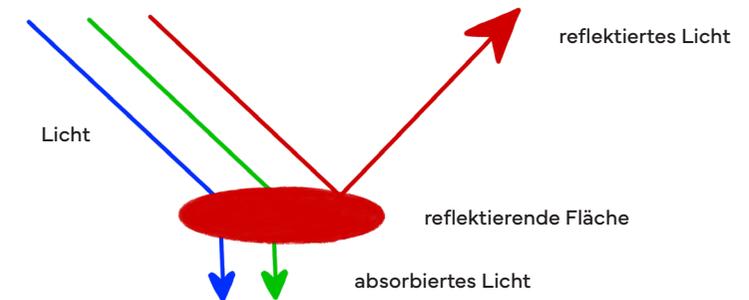


Abb. 21  
Subtraktive Farbmischung

### Primäre Spektralfarbe

Rot ist eine primäre Spektralfarbe der Lichtmischung, hat eine Wellenlänge von 700 nm und gehört zu den vier psychologischen Grundfarben. Im Druckprozess entsteht Rot durch subtraktive Mischung von Gelb und Magenta. „Fällt weißes Licht auf eine Mischung magentafarbener und gelber Pigmente, so absorbieren die magentafarbenen Pigmentteilchen die grünen Spektralanteile, die gelben Pigmentteilchen verschlucken die blauen Anteile.“<sup>18</sup> Dadurch wird langwelliges Licht reflektiert und erzeugt die Farbe Rot. Rottöne werden besonders mit Liebe, Erotik, Wut, Feuer, Gefahr oder Wärme assoziiert.<sup>19</sup> Rote Pigmente gehören zu den ersten, die Menschen nutzen konnten, da die Rohstoffe dafür leicht aufzufinden waren. Darunter gehören Eisenoxide, Zinnober, Erde oder pflanzliche und tierische Ausgangsprodukte.

### Assoziationen

Positive Assoziationen sind Liebe, Mut, Kraft oder Fruchtbarkeit, während Aggression, Hass, Blutvergießen und Krieg als negative Verbindungen zugeordnet werden. Letzteres verläuft sich beispielsweise darauf zurück, dass viele Völker ihre Krieger mit roter Farbe bemalten. Schon in der Höhlenmalerei wurde sich von rotem Ocker und Eisenoxide Nutzen gemacht. Im alten China und in Japan galt Rot als die Farbe des Lebens und Tote wurden mit Zinnoberpulver bestreut. Ägypter verbanden die Farbe mit eher negativen Eigenschaften, zum Beispiel als Farbe der unfruchtbaren Wüste oder des Unglücks. Rot galt im antiken Griechenland als Farbe der Männlichkeit oder des Mutes. Außerdem gibt es die Sage, dass aus dem Blut des Adonis die Rose entstanden sei. Diese war die Blume des Liebesgöttin Venus.<sup>20</sup>

## Symbolik

Es liegt daher nahe, dass davon die Symbolik der käuflichen Liebe stammt, wenn zum Beispiel von „Rotlichtvierteln“ gesprochen wird. Für Römer war Rot eine Würdenfarbe, welche zum Beispiel den Kaisern zugeschrieben wurde. In der christlichen Symbolik stand Rot für Opferbereitschaft, Blut und Liebe. Später wurde Rot aufgrund von der Assoziation mit Feuer die Farbe des Teufels, wodurch man rothaarigen Frauen Hexerei untersagte.<sup>21</sup> Rot symbolisiert im politischen Bereich Freiheit, Fortschritt oder Friedenswillen. Außerdem deutet es auf sich verbessernde Lebensverhältnisse hin. Sozialdemokraten, Kommunisten und Sozialisten haben sich Rot zu ihrer Farbe gemacht, um die Ziele dieser Ideologien und Bewegungen zu vermitteln.

## Psychologie

In der Psychologie wird Menschen mit Rot als Lieblingsfarbe oft nachgesagt, dass sie reine Liebe und Ehrlichkeit verkörpern. Sie hätten ein aggressives und herrisches Wesen und einen unbändigen Tatendrang.<sup>22</sup>

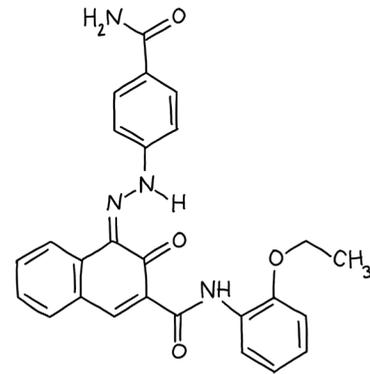


Abb. 22 Pigment Rot 170 ist eine chemische Verbindung aus der Gruppe der Azopigmente

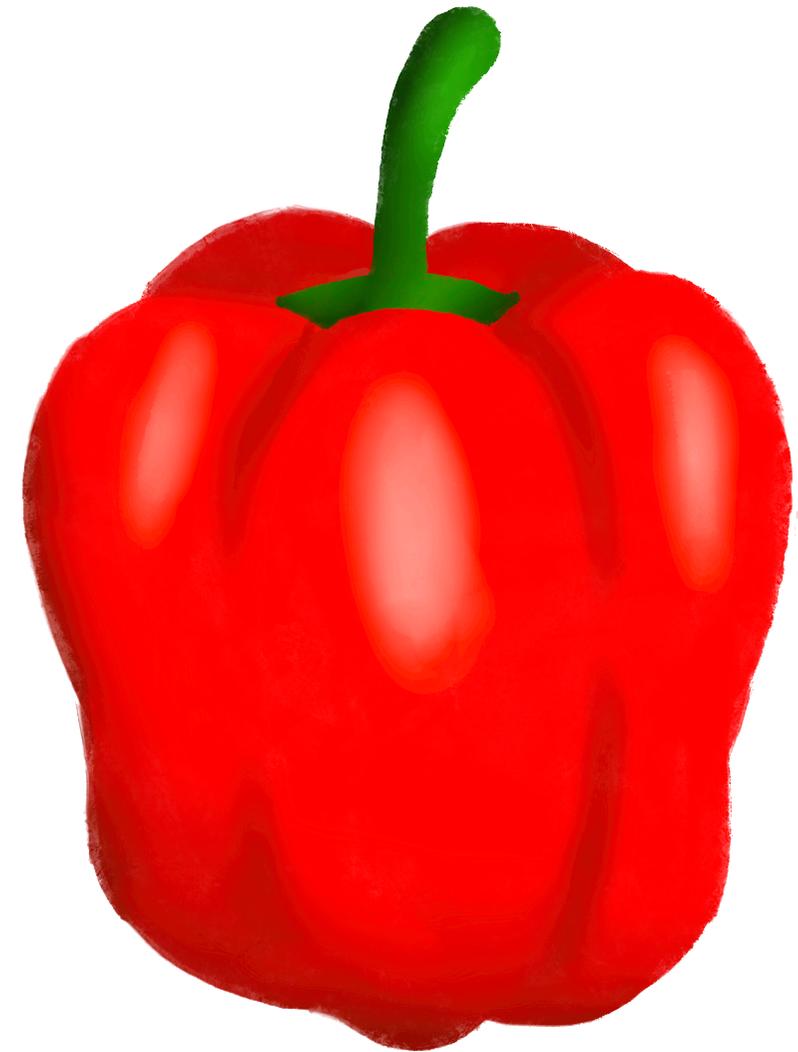


Abb. 23 Paprika  
*Capsicum*

# Grün

## Primäre Spektralfarbe

Nicht nur Rot, sondern auch die Farbe Grün gehört zu den psychologischen Grundfarben. Außerdem ist auch diese Farbe eine primäre Spektralfarbe der Lichtmischung. Das lässt sich daraus schließen, dass sie die vierte Farbe im Regenbogen ist.<sup>23</sup> Grün hat eine Wellenlänge von 546,1 nm und wird vor allem mit Gift, Natur, Gesundheit, Frühling und Hoffnung assoziiert. Im CMYK-Vierfarbdruck entsteht Grün dadurch, dass weißes Licht auf eine Mischung cyanfarbener und gelber Pigmente fällt. Dadurch absorbieren die cyanfarbenen Pigmentteilchen die roten Spektralanteile und die gelben Pigmentteilchen verschlucken die blauen Anteile. So wird nur noch Licht mittlerer Wellenlänge reflektiert und bringt die Farbe Grün hervor.<sup>24</sup>

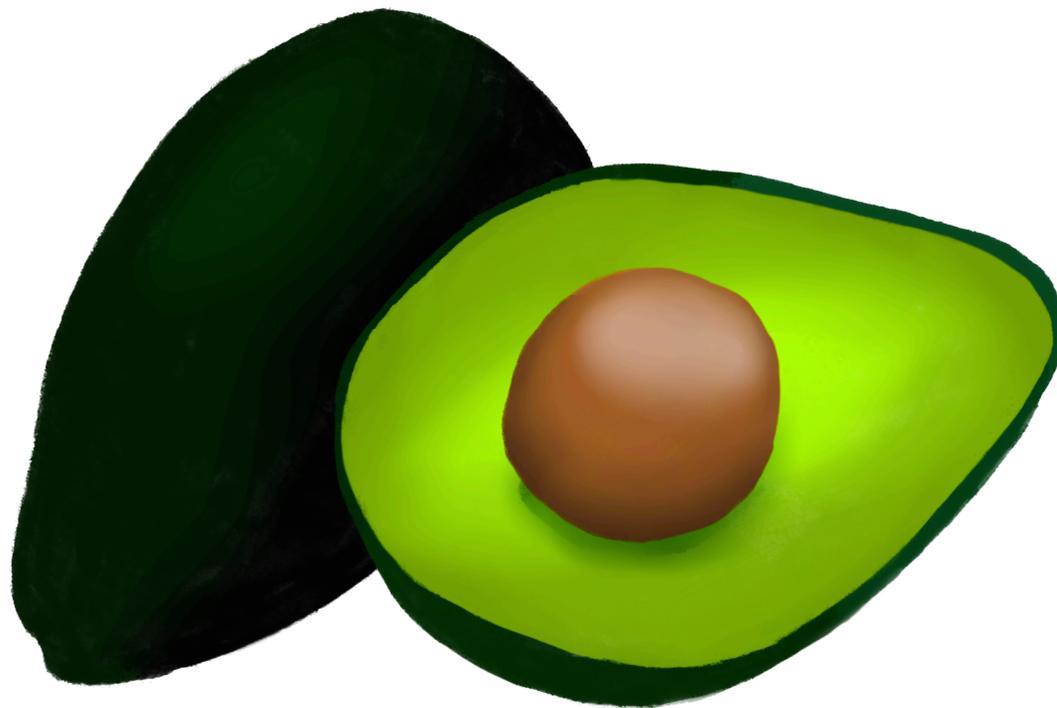


Abb. 23 Avocado  
*Persea americana*

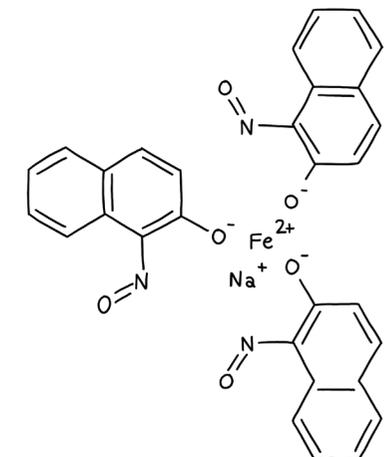


Abb. 24 Pigmentgrün B ist eine organische-chemische Verbindung aus der Klasse der Metallkomplexfarbstoffe

## Vorkommen

In der Kunst kommt sie seltener vor. Auch als Textilfarbstoff erweist sich Grün oft als ungeeignet, da der häufigste natürliche Farbstoff, Chlorophyll, eher unbeständig ist und schnell ausbleicht. Seit dem 20. Jahrhundert wird der Farbstoff aber auch aus Brennnesseln extrahiert und nach chemischer Behandlung zur Färbung von Ölen oder Seifen eingesetzt. Früher konnte jedoch nur auf wenige grüne Pigmente zurückgegriffen werden. In antiken Wandmalereien findet man Verwitterungsprodukte von glimmerhaltigen Silikaten und in der Antike setzte man den grünen Halbedelstein Malachit ein. Die alten Ägypter stellten aus Azurit mithilfe von Kohlendioxid ein grünes Pigment her. In vielen Gemälden europäischer Künstler, besonders in Bildern des 16. und 17. Jahrhunderts, findet man das Pigment Grünspan, welches aus essigsauren Kupfersalzen besteht. Seit Ende des 18. Jahrhunderts stehen synthetische Pigmente zur Verfügung. Diese basieren auf Cobalt, Chrom und Zink. Später folgten Chromoxidgrün, Chromoxidhydratgrün und Zinkgrün. Die Farbbezeichnung stammt wahrscheinlich von dem indoeuropäischen Wortstamm „grho“, was so viel wie wachsen oder gedeihen bedeutet.<sup>25</sup>

## Symbolik

Dadurch verbinden Menschen Grün mit neu entstehendem Leben, Überleben oder Wachstum. Ägypter bemalten Sarkophagdeckel Verstorbener, in Hoffnung auf dessen Wiedergeburt, mit der Farbe Grün. In China steht Grün für das Wiedererwachen der Natur und symbolisiert somit den Frühling. In Indien ist es die Herzfarbe und vertritt somit die Liebe. Der Religionsstifter Mohammed sagte, dass ein Anschauen von Grün einem Gottesdienst gleichen soll. Das Islamistische in Wüste lebende Volk sieht in der Farbe Grün ein Paradies mit Wäldern und Flüssen. Im lateinischen Christentum steht Grün für Barmherzigkeit und Hoffnung. Chromtherapeuten setzen die Farbe bei Herz-Rhythmusstörungen, Magengeschwüren, Nierenproblemen oder Augenkrankheiten ein.

## Assoziationen

Positive Assoziationen sind Natur, Frische, Jugend oder Zuversicht, während negative Assoziationen Neid, Gift, Gleichgültigkeit und Unreife sind. Besonders in Comicserien ist auffällig, dass böse Charaktere oft in Grün dargestellt werden. Ist Grün die Lieblingsfarbe einer Person, spricht man davon, dass sie auf der einen Seite sozial kompetent, zuverlässig und mitfühlend ist. Auf der anderen Seite wird Personen mit der Vorzugsfarbe Grün Selbsthass, Gefühlskälte und Geiz untersagt.<sup>26</sup>

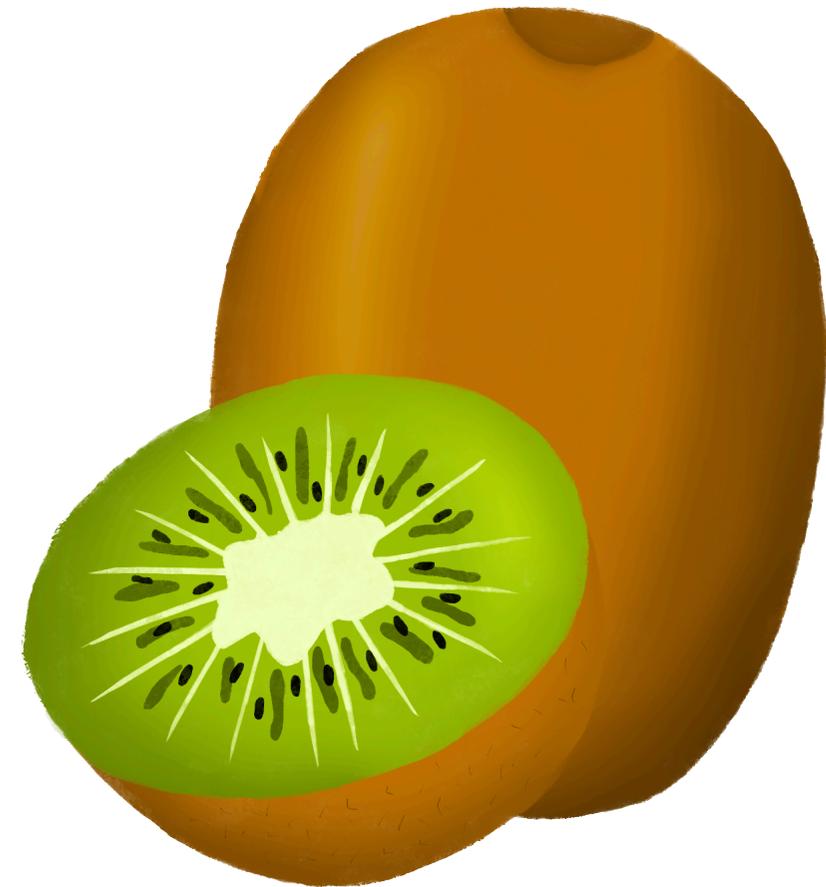


Abb. 25 Kiwi  
*Actinidia deliciosa*

## Blau

### Primäre Spektralfarbe

Blau ist die dritte von vier Farben der psychologischen Grundfarben und als fünfte Farbe des Regenbogens ebenfalls eine primäre Spektralfarbe der Lichtmischung. Sie hat eine Wellenlänge von 435,8 nm und wird besonders mit Ferne, Kühle, Vertrauen, Sauberkeit und Unendlichkeit assoziiert. Beim Druckprozess fällt weißes Licht auf eine Mischung von cyan- und magentafarbener Pigmente. Dadurch absorbieren die cyanfarbenen Pigmentteilchen rote Spektralanteile und die magentafarbenen Pigmentteilchen verschlucken die grünen Anteile. Es ergibt somit einen blauen Farbeindruck, da nur noch kurzwelliges Licht reflektiert wird.<sup>27</sup>



Abb. 26 Welle

## Vorkommen

Die Farbe der Ferne und Sehnsucht war bis zur Einführung von synthetischen Farbstoffen eine der kostbarsten. Die meisten natürlichen blauen Pigmente und Farbstoffe wurden aus weit entfernten Ländern nach Europa importiert und gehörten zu den seltensten. Bis ins 18. Jahrhundert wurde Ultramarinblau aus dem Halbedelstein Lapislazuli gewonnen. Außerdem wurde Indigoblau aus dem japanischen Indigostrauch gewonnen und vor allem für Textilfärbung eingesetzt. Später erhielt man blaue Pigmente unter anderem aus dem Mineral Azurit, der Pflanze Färberwaid und dem südamerikanischen Blauholz.<sup>28</sup> Isaac Newton zerlegte als erster das weiße Tageslicht und erkannte, dass Blau die am stärksten gebrochene Farbe ist. Sowohl das Blau des Himmels als auch das Blau von Wasserschichten entsteht durch eine Streuung der Lichtquanten.

## Geschichte

Dadurch, dass natürliche blaue Pigmente nur selten und schwer zu beschaffen waren, wurden diese teuer verhandelt und aufgrund der Kostbarkeit in der Antike und im Mittelalter zur Götter- und Königsfarbe erhoben. Alte Ägypter bemalten ihre Götter mit blauer Farbe, besonders den Hauptgott Amun-Re. Viele weitere Gottheiten oder Könige kleideten sich in Blau. Darunter zählen der babylonische Gott Marduk, die Göttin Isis, der germanische Göttervater Wotan, ebenso die Mutter Gottes, Maria. In vielen orientalischen Ländern werden Fenster- und Türrahmen blau angestrichen. Dies dient als Versuch, die Aufmerksamkeit wohlwollender Außerirdischer auf sich zu lenken.<sup>29</sup>

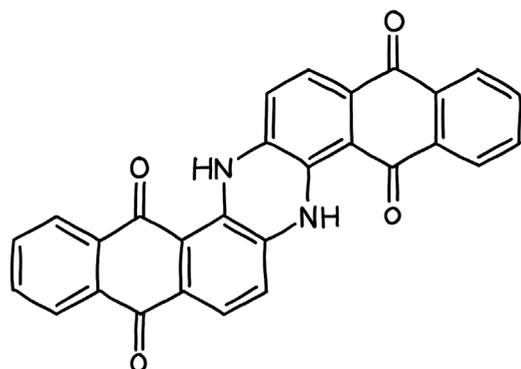


Abb. 27 Blaues  
Pigment Indanthron

## Symbolik

In der Kunst steht Blau für die Ferne, das Geistige oder das Göttliche. Psychologisch wirkt Blau genau entgegengesetzt zu Rot. Es ist die Farbe des Gemüts, des Träumens und der Sehnsucht und wirkt beruhigend und entspannend. Sie repräsentiert außerdem Tiefe, Sanftheit, Genauigkeit, Klugheit, Mut, Wahrheit oder Treue. Negative Assoziationen sind Lügen oder Kälte. Den Brauch männliche Babys blau zu kleiden, stammt aus orientalischen Kulturen, da diese dort höher geschätzt werden.

Ansonsten ist Blau vor allem als Modelfarbe als Symbol des Arbeiters oder in Produktwerbungen als sanft wirkende Farbe für Hygieneartikel bekannt.<sup>30</sup>

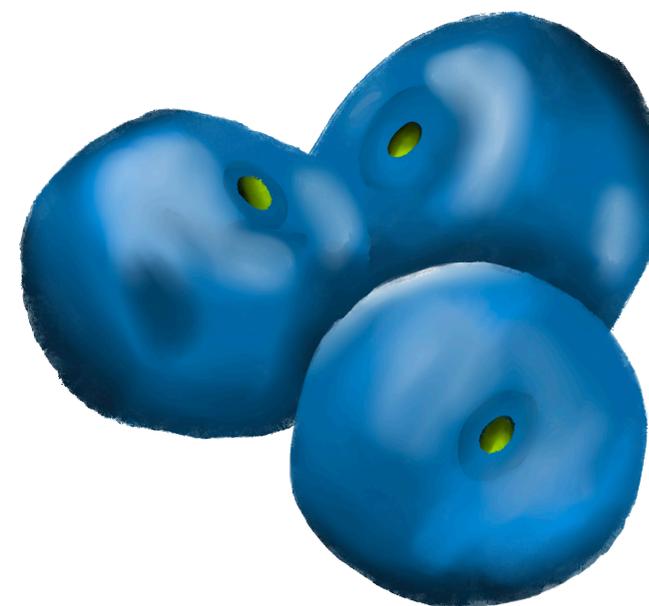


Abb. 28 Blaubeere  
*Vaccinium myrtillus*



Abb. 29 Sonnenblume  
*Helianthus annuus*

## Gelb

### Adaptive Farbmischung

Gelb hat eine Wellenlänge von 580 nm und wird durch eine adaptive Mischung von rotem und grünem Licht erzeugt. Sie ist die vierte und letzte Grundfarbe der Psychologie und gilt als Grundfarbe für die Druckindustrie. Im Vierfarbdruckverfahren entziehen Pigmente der Farbe Gelb weißes Licht die Blauanteile. Dadurch wird rotes und grünes Licht reflektiert und bildet einen Farbreiz, der das menschliche Auge die Farbe Gelb wahrnehmen lässt. Gold wird nicht als eigene Farbe gewertet, sondern ist ein Gelb mit einer Oberflächenspiegelung.<sup>31</sup>

### Vorkommen

Gelb ist sowohl die Farbe der Gottheit als auch der Schande. Natürlich gelbe Pigmente zählen zu den ältesten von Menschen genutzten Farbstoffen. Diese erhält man beispielsweise aus gelbem Ocker, ein Eisenoxidhydrat, und Terra di Siena. Ab dem 15. Jahrhundert gewann man Gelb zunehmend künstlich auf Metalloxidbasis gewonnene Pigmente. So wurde unter anderem Blei-Zinn-Gelb, Neapelgelb, Cadmiumgelb oder Chromgelb verwendet. Häufig genutzte gelbe Farbstoffe sind außerdem Curcumin, aus tropischem Kurkuma, oder Safran mit dem Farbstoff Crocetin. Regional vorkommende Pflanzen zur Erzeugung von gelben Farbstoffen sind in Deutschland die Echte Kamille oder die Schafgarbe.<sup>32</sup>

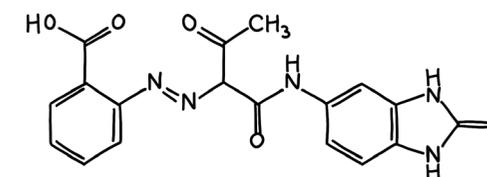


Abb. 30 Pigment Yellow 151 ist ein synthetischer, wasserunlöslicher, organischer, gelber Farbstoff aus der Gruppe der Azofarbstoffe

## Psychologie

Gelb ist die hellste und leuchtkraftstärkste aller Farben. Physiologisch und kulturell gesehen ist Gelb eine zweideutige Farbe. Im Mittelalter wurde sie als Schandfarbe angesehen und aus der Gesellschaft ausgestoßenen Mitgliedern zugeschrieben. Außerdem wurde Judas Ischariot als Verräter in einem gelben Gewand dargestellt. Auf der anderen Seite wurde in vorchristlichen Religionen die Sonne als Gottheit verehrt. So wurden Helios, Hermes oder Sol in gelben Gewändern abgebildet. In China ist Safrangelb eine Würdefarbe des Kaisers und verkörpert göttliches Wissen und göttliche Allmacht. Im Buddhismus sollen gelbe Gewänder dazu beitragen, höchste Weisheit und Erkenntnis zu erlangen.<sup>33</sup> Zudem ist Gelb die Kennfarbe der Post. Das entstand vermutlich durch den griechischen Götterboten Hermes.

## Assoziationen

Positive Eigenschaften, die man der Farbe zuschreibt, sind Lebensfreude, Optimismus, Vergnügen und Freundlichkeit. Negative Assoziationen sind Neid, Geiz, Eifersucht, Egoismus und Verlogenheit. Gelb ist in der Natur die Farbe der Reife und des Herbstes. In der Psychotherapie wird die Farbe gegen Stress, Vergesslichkeit oder Nervosität eingesetzt. Wählt eine Person Gelb als ihre Lieblingsfarbe, wird ihr Intelligenz, Neugier, großer Freiheitsdrang und Bemühung um Weiterbildung nachgesagt.<sup>34</sup>

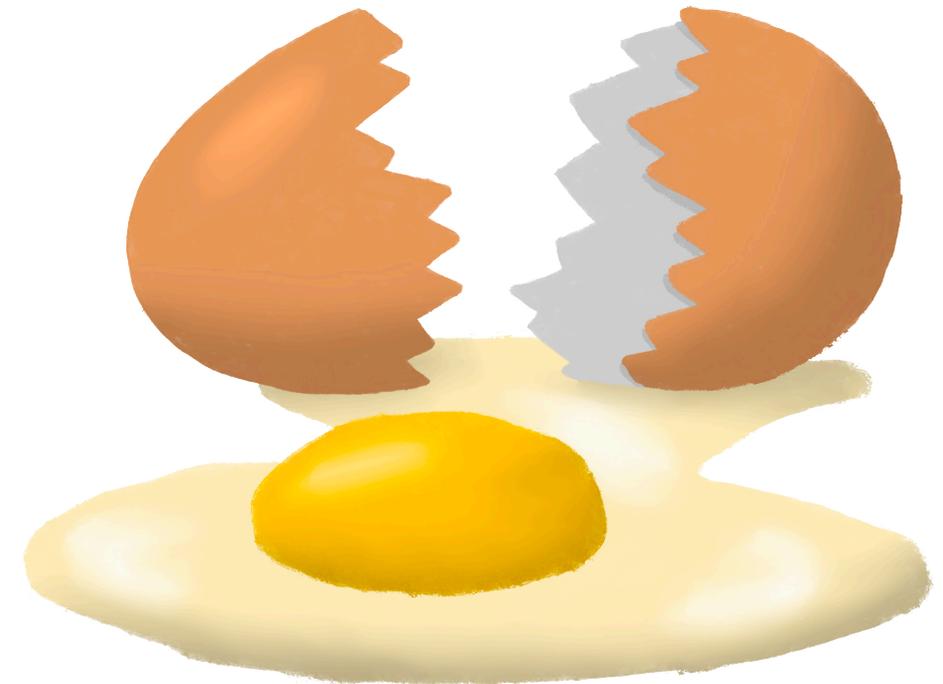


Abb. 31 Eigelb  
*Vitellus*

## Schwarz

### Achromatische Farbe

Die letzten beiden Farben, auf die eingegangen wird, sind keine echten Farben. Die Rede ist von Schwarz und Weiß. Schwarz ist keine Farbe, da es vielmehr das Fehlen jeglichen Lichts und dadurch jeglicher Farbe ist. Das Licht aller Wellenlängen wird absorbiert.<sup>35</sup> Dadurch ist die Stellung der Farbe Schwarz im Kanon der Farben umstritten. Nach Aristoteles ist Schwarz Teil linearer Farbmodelle. Im 15. Jahrhundert nahm Leon Battista Alberti diese aus der antiken Farbordnung heraus, woraufhin Leonardo da Vinci diese wieder einordnete. Isaac Newton verband die Farbe endgültig. Heute zählt man Schwarz und Weiß zu den achromatischen (unbunten) Farben.

### Entstehung

Schwarz besitzt den Farbwert 0, da es die Abwesenheit aller Farben bedeutet. Viele Farbforscher reden auch von einer Nicht- oder Unfarbe. „Theoretisch absorbiert ein schwarzer Körper sämtliches Licht, das auf ihn auftritt, zu 100 % und reflektiert demzufolge 0 %.“<sup>36</sup> Dadurch wird Schwarz als „lichthungrig“ beschrieben und nimmt alle Wellenlängen des spektralen Lichts in sich auf.<sup>37</sup>



Abb. 32 Dominosteine

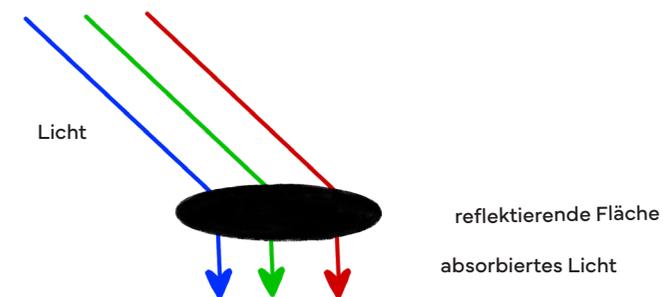


Abb. 33  
Subtraktive Farbmischung

## Vorkommen

Obwohl die Farbe Schwarz in der unbelebten Natur, mit Ausnahme von Ruß, selten vorkommt, gehört sie zu den an den frühesten genutzten Malfarben der Menschheit. In der belebten Natur – bei Tieren – ist Schwarz stark durch das Pigment Melanin verbreitet. Viele Vögel haben in der oberen Federschicht zusätzliches Melanin, wodurch ihr schwarzes Gefieder je nach Lichteinfall bunt schillert. Hierbei spricht man von Interferenz. Außerdem lässt sich Schwarz leicht aus Knochenasche, Elfenbeinkohle, Holz- oder Rebkohle erzeugen. Im Gegensatz zu den vier primären Spektralfarben der Lichtmischung wurden synthetisch erzeugte Pigmente erst spät – im 19. Jahrhundert – entwickelt.

## Symbolik

Schwarz war ursprünglich eine Götterfarbe. Das lag daran, dass Urgötter und -göttinnen aus der schwarzen „Mutter Erde“ entstammen. In der westlichen Symbolwelt steht Schwarz für das Unnachgiebige, Endgültige, Harte und Strenge und wird insgesamt mit Negativem und Bösem verbunden. Daher stammen Redewendungen, wie das „schwarze Schaf“.<sup>38</sup> Politisch steht die Farbe in Deutschland für ursprünglich christlich orientierte Parteien und verkörpert Konservatismus. Gleichzeitig verkörpert die Farbe aber auch eine märchenhafte und unrealistische Welt und steht für Individualität und Stärke. Im Mittelalter diente sie als Textilfarbe, um die Demütigung von Mönchen zur Schau zu stellen. Andererseits war sie die Farbe des Adels. Auch heute wird Würde durch schwarze Anzüge ausgedrückt. Schwarz als dunkelste Farbe bringt zusammen mit Gelb den stärksten Helligkeitskontrast zustande. Deshalb wird Schwarz oft in Werbung oder Screendesign eingesetzt oder genutzt, um auf Gefahrenquellen aufmerksam zu machen.<sup>39</sup>



Abb. 34 Rabe  
Corvus

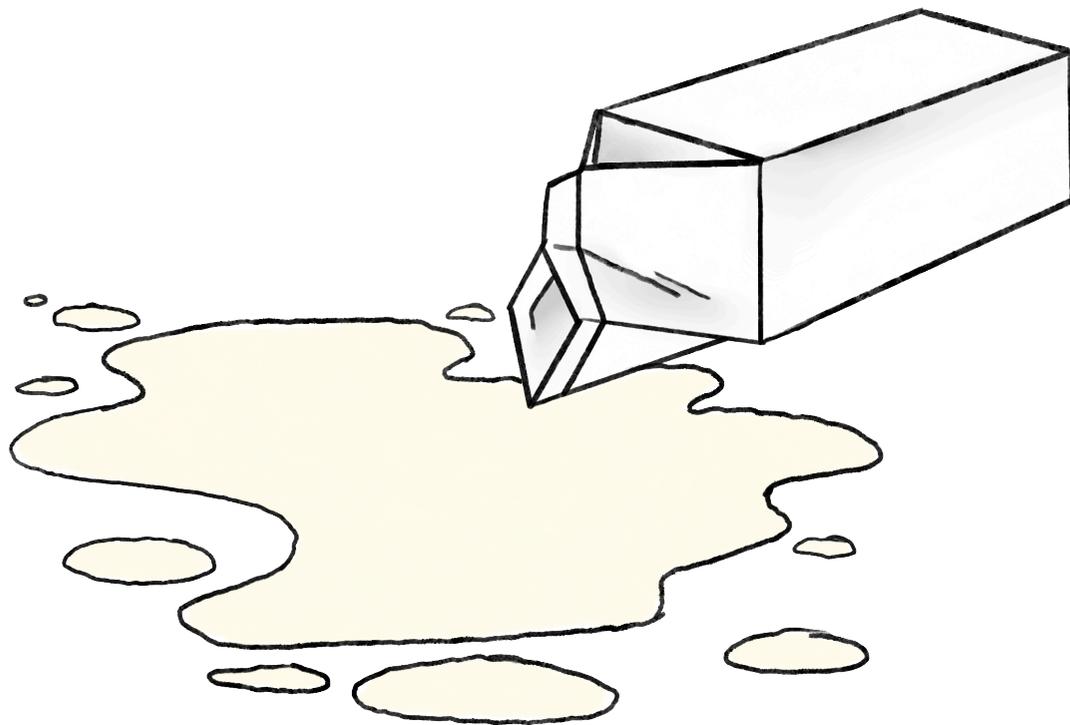


Abb. 35 Milch  
Lac

## Weiß

### Achromatische Farbe

Auch Weiß ist eine unbunte Farbe. Im Gegensatz zu Schwarz ist Weiß die Kombination aller sichtbaren Wellenlängen. Sie ist eine Tertiärfarbe der Lichtmischung aus gleichen Anteilen von Lichtfarben. Um Weiß zu drucken, werden Pigmente eingesetzt, die in allen Spektralfarben reflektieren.<sup>40</sup>

Die Farbe der Jungfräulichkeit und Reinheit hat eine noch ungenauere Stellung im Farbkanon als Schwarz. Viele Farbtheoretiker behaupten, dass Weiß die Abwesenheit jeglicher Farbe oder nur die Helle ist. Das führt darauf zurück, dass Newton „Weißheit“ mit Helligkeit gleichsetze. Bis ins 15. Jahrhundert gehörte Weiß zu den Hauptfarben und machte einen ähnlichen Prozess wie die Farbe Schwarz durch, bis Newton aufgrund von physikalischen Erkenntnissen diese aus dem Farbkreis verbannte. Heute zählt Weiß genauso wie Schwarz zu den achromatischen Farben.

### Entstehung

„Der Farbeindruck Weiß entsteht physiologisch dann, wenn alle eingestrahlten Wellenlängen des Lichts vollständig (zu 100 %) reflektiert und gleichmäßig gestreut werden.“<sup>41</sup> Auf der Netzhaut werden dann alle drei Zapfentypen durch gleichstarke Lichtimpulse erregt. Man spricht hier von dem Prinzip der Streuung. Nach diesem erzeugen auch Pflanzen die Farbe Weiß. In weißen Blüten befinden sich feine Luftlamellen und -bläschen. Diese befinden sich auch in weißen Haaren, wenn das Pigment Melanin im Alter nicht mehr erzeugt wird. Wolken erscheinen durch luftstreuende Wassertröpfchen weiß.

Weiß gehört sowie Schwarz zu den frühen Malfarben der Menschheit, da natürliche Pigmente leicht auffindbar waren. Dazu gehören Calcit, Gips und Baryt. Schon seit der Antike konnte Weiß als synthetisches Pigment hergestellt werden.<sup>42</sup> Die wichtigsten weißen synthetischen Pigmente sind heute Zink- und Titanweiß. Diese werden auch als Sonnenschutzmittel verwendet, da sie das Sonnenlicht reflektieren und dadurch vor UV-Strahlen schützen. In der Textilbranche wird Weiß durch Bleichen, beispielsweise mit Chlor, was farbgebende Moleküle zerstört, erzeugt.

## Symbolik

Die Farbe Weiß in künstlerischen Gemälden symbolisiert etwas Erhabenes und Reines. In der Psychologie und Mythologie steht sie für den Übergang oder für Weisheit. Etymologisch hängt letzteres mit dem Farbbegriff zusammen. Eine weiße Taube steht als biblisches Symbol für den Frieden. Weiße Götter, wie Apoll, Vajrasattva oder Ra verkörpern den überwindenden, erleuchteten Geist. Dadurch, dass Weiß schon bei kleinster Zusammenmischung mit einer anderen Farbe ihren Farbcharakter verliert, da sie eine geringe Farbreichweite hat, verfügt sie auch in der Psychologie über vieldeutige und wandelbare Bedeutungen. Vor allem stellt Weiß den Gegenpol zu Schwarz dar – der Tag und die Nacht, das Gute und das Böse, die Wahrheit und die Lüge. Weiß verkörpert außerdem durch den weißen, männlichen Samen und die Schale von Vogeleiern, den Anfang eines Lebens. Schwarz hingegen wird mit Tod assoziiert. Zudem symbolisiert Weiß Reinheit und Jungfräulichkeit.<sup>43</sup>

## Assoziationen

Priester und Gottesdiener wurden früher in weißer Kleidung repräsentiert. Dadurch tragen Ärzte heute diese Farbe, weshalb eine Assoziation mit Hygiene und Sterilität nahe liegt. Eine wichtige Rolle spielt die Farbe außerdem bei Übergangsfesten, wie die Kommunion, die Hochzeit oder Trauerfeiern. Personen, die Weiß als ihre Lieblingsfarbe angeben, „sollten sich bemühen, sich durch ihre Individualität zu befreien [und] die Fesseln von Umständen und Beziehungen abzustreifen.“<sup>44</sup> Neben der Verbindung zu Jugend, Frische und Ordnung, steht Weiß für unabhängige Freiheit.<sup>45</sup>

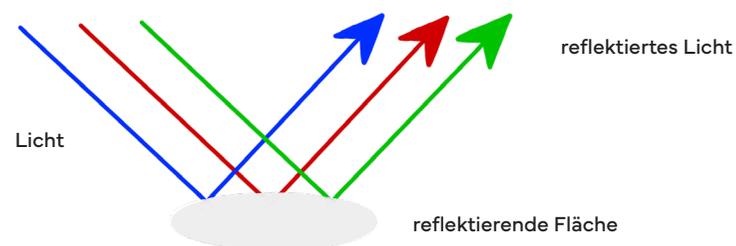


Abb. 36

Subtraktive Farbmischung



Abb. 37 Hochzeitskleid



## Farbe in Tier- und Pflanzenwelt

Woher stammt die Farbe in der belebten und unbelebten Tierwelt? Warum ist ein Frosch grün und wodurch nehmen wir eine Pfingstrose Rosa wahr? Die Farbvielfalt in der Natur wird vor allem durch Pigmente verursacht. Tieren und Pflanzen helfen Farben bei der Partnerwahl oder dienen als Warn- oder Locksignal.

Abb. 38 Das Pantherchamäleon  
*Furcifer pardalis*

## Reflexion & Absorption

Pigmente sind Moleküle in pflanzlichen oder tierischen Zellen. Sie besitzen die Fähigkeit, bestimmte Lichtquellen zu reflektieren oder zu absorbieren. Reflexion bedeutet, dass das Licht nicht aufgenommen wird. Es wird zurückgeworfen und dadurch tritt es in unser Auge und wird von uns als Farbe wahrgenommen. Von absorbiertem Licht ist die Rede, wenn Licht aufgenommen wird. Dadurch wird der vom Licht angestrahlte Gegenstand durch die zugeführte Energie erwärmt. Ein Pigment absorbiert nur einen Teil des weißen Lichts, beispielsweise Grün und Blau. Die Absorption von Grün und Blau führt dazu, dass der restliche Teil rot reflektiert wird. In unserem Auge kommt also nur rotes Licht an.<sup>46</sup>

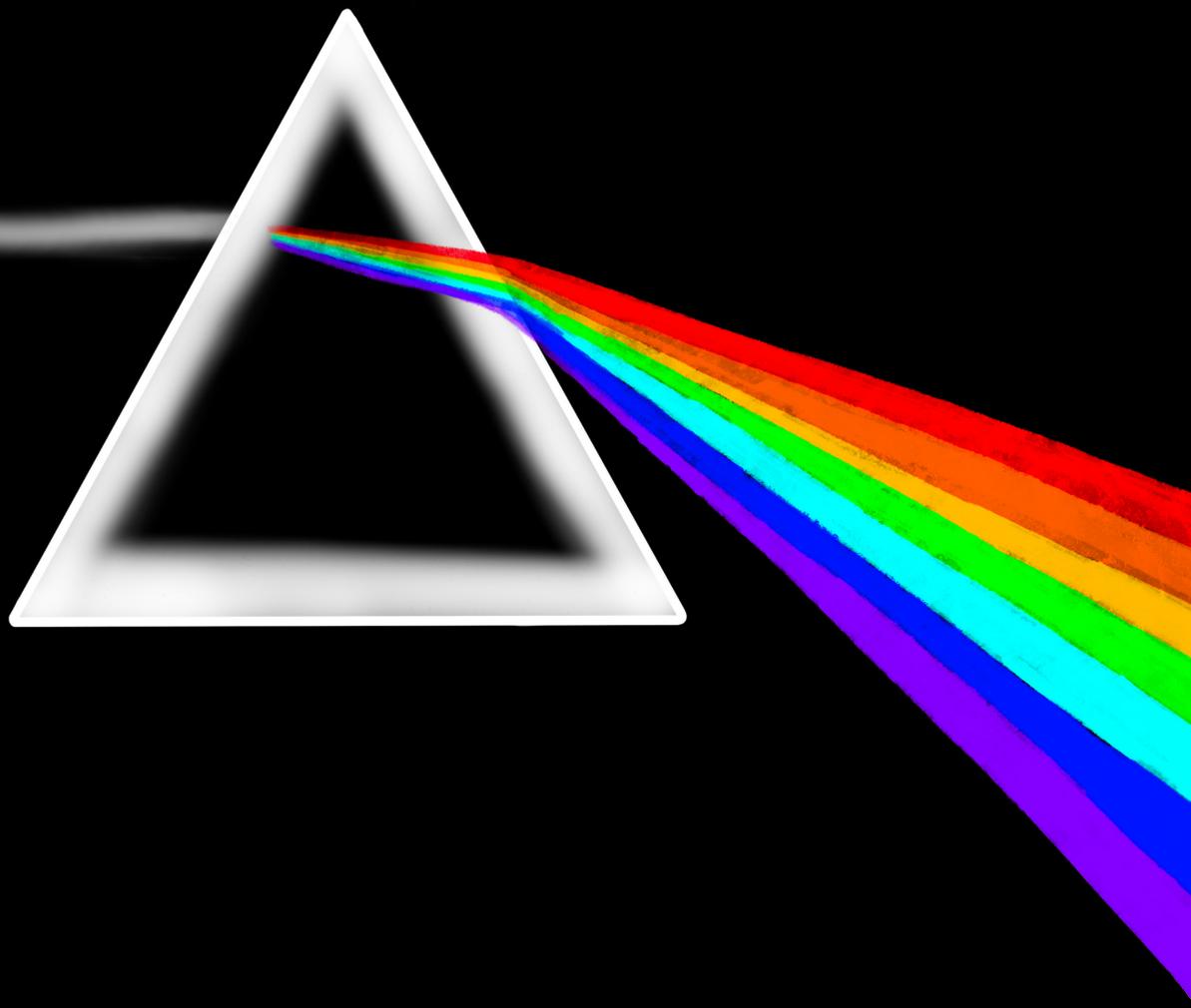
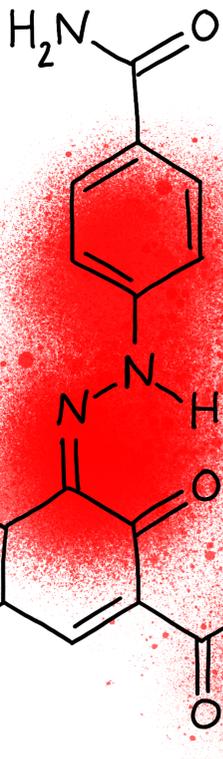
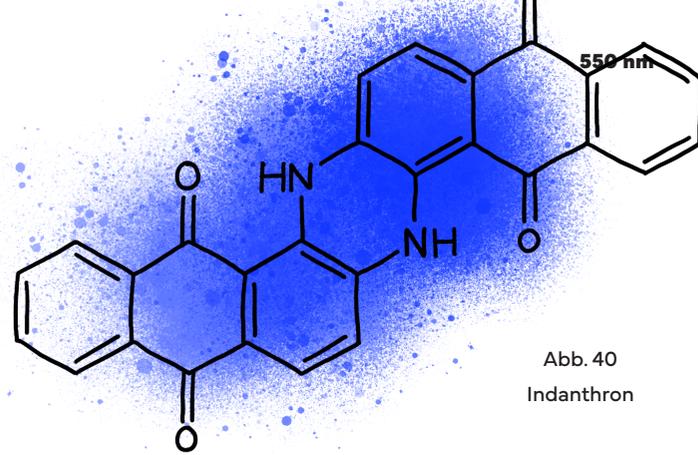
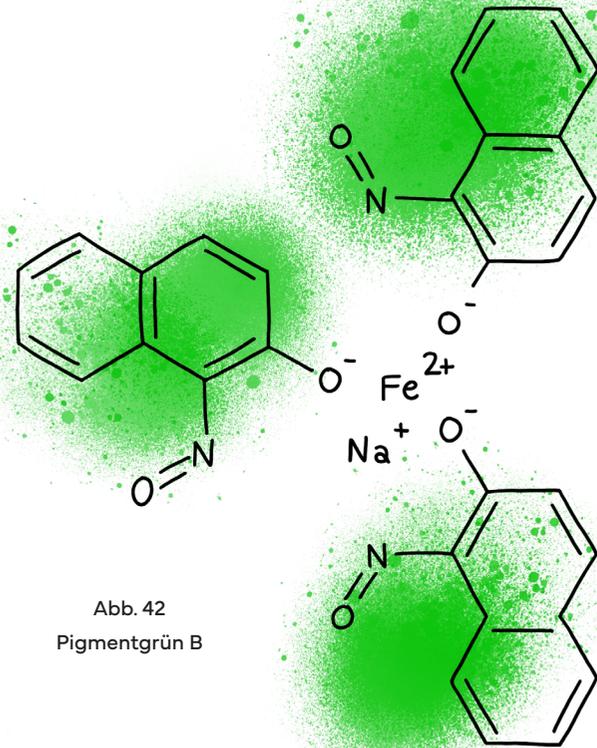
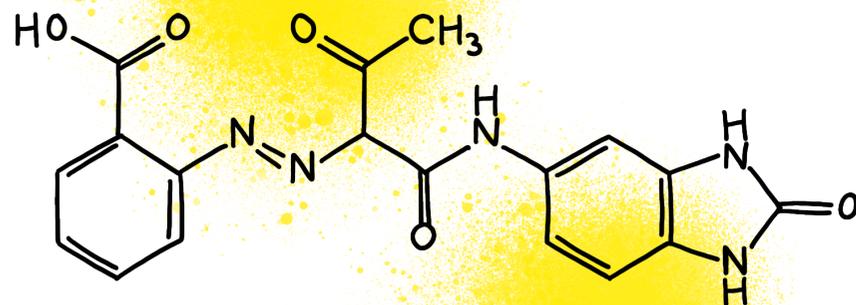


Abb. 39 Lichtbrechung im Prisma

Abb. 41  
Pigment Rot 170Abb. 40  
IndanthronAbb. 42  
Pigmentgrün BAbb. 43  
Pigment Yellow 151

## Pigmente

Farben entstehen durch Pigmente. Es sind kleine farbgebende Teilchen, meist kristalline Partikel mit einer Größe im Mikro- oder Nanometerbereich. Einen entscheidenden Einfluss auf die Farbausbildung haben physikalische Eigenschaften wie die Oberflächenbeschaffenheit, die Korngröße, Korngrößenverteilung, Kristallform und -modifikation. Durch Lichtstreuung (Reflexion und Absorption) zeigen opake farbige Objekte ihre Farbe. „Der Farbreiz entsteht im Wesentlichen dadurch, dass viele Pigmentpartikel das Licht in der Aufsicht zum Betrachter [hinstreuen], aber dabei vorzugsweise bestimmte Wellenlängenbereiche des einfallenden Lichtspektrums absorbieren [...] indem sie die Lichtenergie in molekulare Schwingungsenergie (Wärme) umwandeln.“<sup>47</sup> Tritt eine Lichtwelle auf, wird ein Teil dieser durch den Streuprozess reflektiert. Dadurch wird dem Betrachter ein Farbeindruck vermittelt.<sup>48</sup> Pigmente werden nach ihrem Farbton in Weiß-, Schwarz- und Buntpigmente

unterteilt. Zu den natürlichen Pigmenten gehören Erdfarbenpigmente und Pflanzenfarbstoffe. Bei Erdfarbenpigmenten handelt es sich um farbgebende Metalloxide, die gelbliche, rötliche und bräunliche Farbtöne bewirken. Sie gehören zu den ältesten Farbmitteln. Zu den Pflanzenfarbstoffen gehören Carotinoide, die weit verbreitet sind und gelbe bis violette Farben liefern. Der häufigste Pflanzenfarbstoff ist das grüne Chlorophyll, ein membrangebundenes Pigment. Weitere Farbstoffe dieser Klasse sind Indigo, Flavonoide oder Anthocyane.<sup>49</sup>



Abb. 44 Das Pigment Melanin bestimmt welche Hautfarbe ein Mensch oder ein Tier hat

## Melanin

### Hautfarbe und Teint

Chlorophyll, Carotinoide, Flavonoide und Melanin sind die am weitesten verbreiteten Pigmente bei Pflanzen und Tieren. Die ersten drei Substanzen werden nur in pflanzlichen Zellen erzeugt, wohingegen Melanin vor allem im Tierreich vorkommt. Melanin verleiht dem Fell, den Federn oder der Haut ihre schwarze oder braune Farbe.<sup>50</sup>

Melanin bestimmt außerdem, welche Augenfarbe ein Mensch hat. Alle Menschen haben bei der Geburt blaue Augen. Im Alter von sechs Wochen bis zu etwa einem Jahr lagert sich der Farbstoff in das Irisstroma ein. Hier spricht man von Melanozyten, welche in braunen, schwarzen oder gelben Varianten vorkommen. Je nach Gewebedichte und Melaninkonzentration färbt sich die Iris grau, grün, hellbraun oder dunkelbraun. Umso höher die Konzentration an Melanin ist, desto dunkler werden die Augen. Grüne und blaue Augen verfügen über einen geringen Pigmentanteil.<sup>51</sup> Der Name leitet sich aus dem griechischen Wort melos ab und bedeutet „schwarz“. Melanin hat eine hochkomplexe und uneinheitliche Struktur.<sup>52</sup> In der Natur gibt es zwei Klassen von Melanin. Zum einen Eumelanin, ein schwarzes bis dunkelbraunes unlösliches Material. Dieses befindet sich in schwarzen Haaren oder in der Retina. Zum

anderen kommt das Phäomelanin vor, welches ein gelbes bis rotbräunliches in Alkalien lösliches Material ist. Es befindet sich in roten Haaren oder roten Federn. Die Konzentration von Eumelanin und Phäomelanin bestimmt bei Menschen die Hautfarbe und den Teint. Über die genaue biologische Funktion ist nur wenig Gesichertes bekannt. Es spielt eine Rolle bei der Partnererkennung, fungiert als Sonnenschutzmittel und dient als Schutz gegen freie Radikale.<sup>53</sup>



Abb. 45 Wespe  
*Vespinæ*

## Funktionen

Farben erfüllen in der Tierwelt verschiedene Funktionen. Zu den bekanntesten zählen die Hilfe zur Partnerwahl, eine Warnung oder ein Locksignal. Besonders der Flamingo legt großen Wert auf seine Partnerwahl. Die Männchen präsentieren sich in bunten Farben, um die Weibchen auf sich aufmerksam zu machen. Sein rosarotes Gefieder produziert er nicht selbst. Er eignet sich die Farbe durch entsprechende Nahrung an. Sie fressen kleine Krebse, die Carotinoide enthalten. Ein Beispiel zur Einsetzung von Farbe als Tarnung bildet der Pfeilgiftfrosch. Aufgrund seiner knalligen Farbe sticht er dem Feind ins Auge und signalisiert dadurch seine Giftigkeit. Andere Tiere, wie die Schwebfliege geben lediglich vor giftig zu sein. Sie ahmt mit ihrer Färbung einer Wespe nach und schreckt durch diese Tarnung Feinde ab.<sup>54</sup>

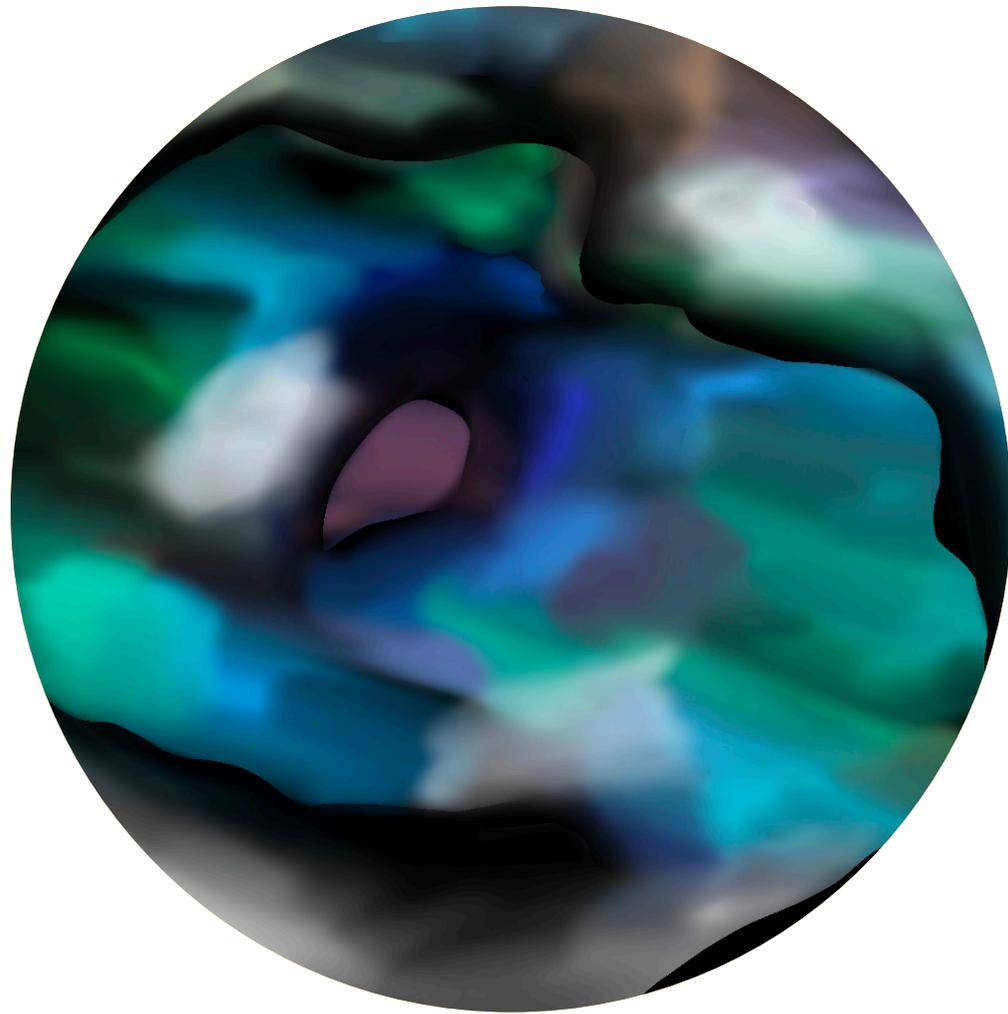


Abb. 46 Oberflächenbeschaffenheit  
einer Perlmutter  
*Mater perlarum*

## Strukturfarben

Strukturfarben entstehen nicht aufgrund von lichtabsorbierenden Pigmenten. Sie entstehen durch zelluläre Strukturen, die das Licht streuen oder reflektieren.<sup>55</sup> Die Farben entstehen also wegen der Struktur eines Materials und nicht aufgrund der Farben, die Atome oder Pigmente des Materials besitzen.<sup>56</sup> Durch die Überlagerung der reflektierten Lichtwellen entstehen Schillerfarben. Den Vorgang nennt man Interferenz. Interferenz an dünnen Schichten begegnet uns beispielsweise bei Seifenblasen. Weißes Licht besteht aus verschiedenen Wellenlängen. Fehlt eine dieser, zum Beispiel Blau, sehen wir die Komplementärfarbe Gelb. Hat eine Oberfläche mehrere transparente Schichten, wird das Licht unterschiedlicher Wellenlängen auf verschiedene Arten reflektiert. Dadurch kann eine Überlagerung der Wellen entstehen und das Phänomen der konstruktiven Interferenz tritt ein. In der Natur findet man eine Vielzahl von Tier- und Pflanzenarten, welche mit Schillerfarben geschmückt sind. Darunter zählen Schmetterlinge, Käfer oder die Federn eines Pfau. Das Perlmutter, eine Meeresschnecke, besteht fast ausschließlich aus Kalziumcarbonat, welches sich in mehreren transparenten Schichten mit organischem Material abwechselt. Durch diese Wechsellagerung wird Licht je nach Wellenlänge an verschiedenen Stellen reflektiert und Interferenz mit

dem Ergebnis eines schillernden Farbeffekts tritt auf. Der grüne Schmetterling *Papilio palinurus* stellte lange Zeit ein Rätsel dar, da er keinerlei grüne Pigmente besitzt. Die Erklärung seiner Flügel Farbe liegt in dem Aufbau der Flügelschuppen. Diese bestehen aus zahlreichen, übereinanderliegenden, regelmäßig angeordneten Schichten von Chitin. Diese Schichten sind transparent und lösen durch den Einfall von Licht eine Interferenz aus. Die Interferenz führt dazu, dass der Schmetterling grün schillert. Ein weiteres Beispiel stellt die *Pollia condensata* dar, eine Pflanze mit metallisch-blauen Beeren. Für den metallischen Farbeffekt sind dünne, parallel verlaufende Zellulosefasern in den Zellwänden verantwortlich. Die jedoch am hellsten reflektierenden Strukturen findet man bei Fischen. Sardinen können beispielsweise durch feine Strukturen im Gewebe unterhalb der Schuppen 90 % des Lichtes reflektieren. Dadurch erreichen sie annähernd die Wirkung eines Spiegels.<sup>57</sup>

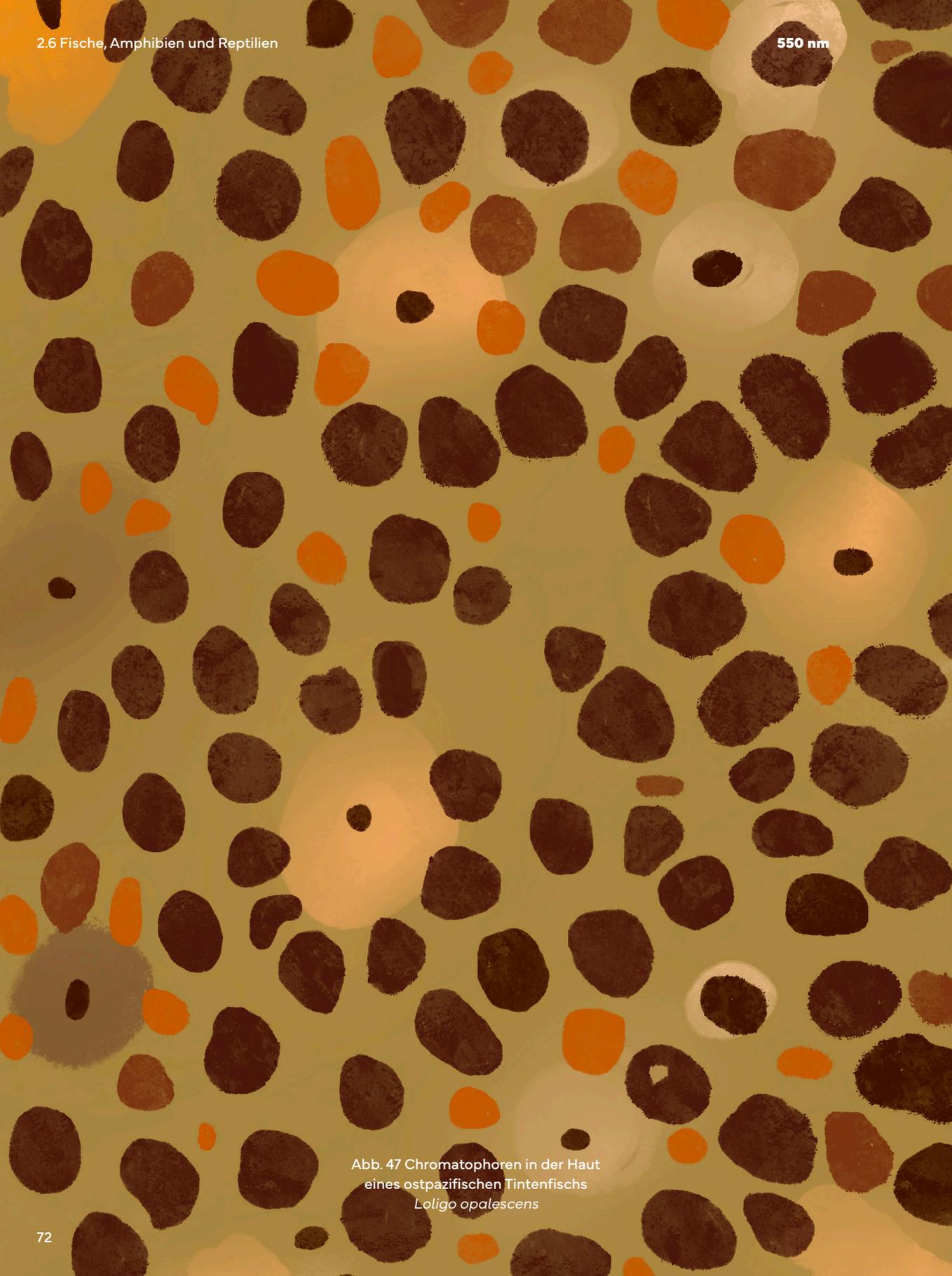


Abb. 47 Chromatophoren in der Haut  
eines ostpazifischen Tintenfischs  
*Loligo opalescens*

## Fische, Amphibien und Reptilien

Fast alle Tiere, die ihre Farbe wechseln können, sind Fischen, Amphibien und Reptilien unterzuordnen. Auch die Farbe von Fischen wird in Licht absorbierende Pigmente und in Licht reflektierende Strukturfarben unterteilt. Die Farbmittel befinden sich in mit Farbmittel gefüllte Zellen im Bindegewebe der Haut. Diese nennt man Chromatophoren und sind bei Fischen, Amphibien und Reptilien in der Haut, unter der Schale oder unter dem Panzer vorhanden. Man entscheidet bei tierischen Chromatophoren je nach Art des Pigments. Melanophoren sind durch Melanine dunkelgelb bis schwarz. Xanthophoren erscheinen aufgrund von Pteridine und Carotinoide gelb. Erythrophoren sind durch

Pteridine und Carotinoide rot und Guano- oder Iridophoren sind durch Lichtreflexion an Purinkristallen silbrig glänzend oder weißlich matt.

Die Dunkel- bis Schwarzfärbung wird durch Melanin verursacht und die Ausbreitung wird hormonell gesteuert. Melatonin und Melanotropin bewirken eine Verdünnung oder Verdichtung der Melanophoren. Durch die Verdünnung oder Verdichtung kann die Haut heller oder dunkler gemacht und Muster können erzeugt werden. Neurohormonal gesteuerte Änderung der Körperfarbe setzt bei Fischen durch Stress, Erregung, Tarnung, Temperaturwechsel, Paarungsbereitschaft oder Erregung ein.<sup>58</sup>



Abb. 48 Palmwedel  
*Palmae*

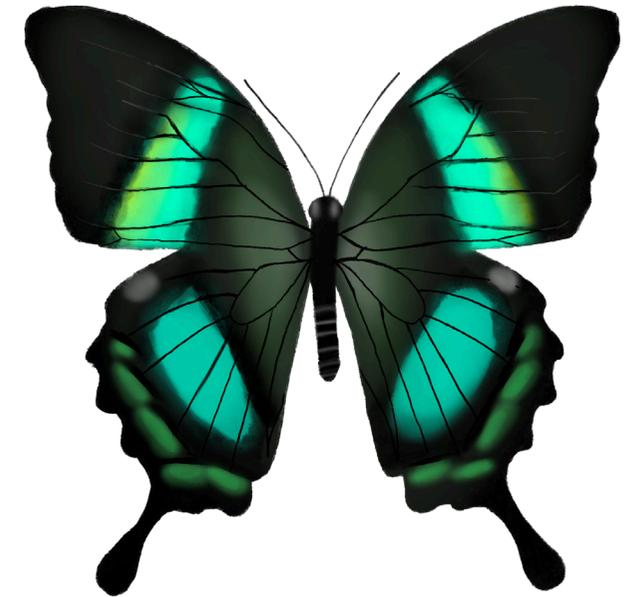


Abb. 49 Neon-Schwabenschwanz  
*Papilio palinurus*

## Farbwechsel

Mit Farbwechsel ist die Fähigkeit einiger Tiere gemeint, die Farbe ihres Körpers ganz oder teilweise zu ändern. Man unterscheidet zwischen zwei Formen des Farbwechsels. Auch wenn in dieser Publikation lediglich der physiologische Farbwechsel von Bedeutung ist, wird nun ein Blick auf den morphologischen Farbwechsel geworfen.



Abb. 50 Hermelin, Wechsel zwischen  
Sommer- und Winterkleid  
*Mustela erminea*

## Morphologischer Farbwechsel

Der morphologische Farbwechsel geschieht in einem Zeitraum von mehreren Tagen bis Wochen und tritt durch die Vermehrung oder Verminderung der Zahl Farbstoffe führender Zellen (Chromatophoren) oder des Gehalts an Farbstoffen ein. Er vollzieht sich im Zusammenhang mit Häutung, Mauser oder Haarwechsel und kann sowohl irreversibel als auch reversibel sein. Ein irreversibler morphologischer Farbwechsel bedeutet die Änderung von Jugend- zu Adultfärbung. Der Saisondimorphismus, also eine saisonale Änderung, ist reversibel. Eine Funktion des morphologischen Farbwechsels ist die optische Tarnung durch Anpassung an die sich farblich verändernde Umgebung. Beispielhaft hierfür sind das Hermelin, ein Wiesel, und Schneehühner, welche zwischen Sommer- und Winterkleid (Abb. 50) wechseln. Zudem dient der Wechsel zur Signalwirkung, was vor allem bei der Balz, das werbende Vorspiel der Begattung von Tieren, zu Einsatz kommt.<sup>59</sup>



Abb. 51 Das Chamäleon  
*Chamaeleonidae*

## Physiologischer Farbwechsel

Der physiologische, spontane Farbwechsel hingegen kann innerhalb von Sekunden ablaufen. Kopffüßer ändern ihre Farbe in wenigen Sekunden. Krebse und Fische benötigen Minuten oder Stunden. Die Körperfarbe wechselt als Reaktion auf Reize und geschieht durch Änderung der Verteilung eines bereits vorhandenen Farbstoffs innerhalb der Chromatophoren. Wenn das Pigment in der Mitte der Chromatophoren konzentriert ist, erscheint die Haut des Tieres hell. Ist das Pigment ausgebreitet und gleichmäßig innerhalb der Zelle verteilt, zeigt sich die Farbe des Pigments. Bei diesem Vorgang unterscheidet man zwischen zwei verschiedenen Mechanismen. Bei Gliedertieren, Fischen, Amphibien oder Reptilien breiten sich die Pigmentgranula aktiv in den Chromatophoren aus und sammeln sich im Zentrum der Zelle. Man spricht hierbei von einer aktiven Pigmentverlagerung. Kopffüßer hingegen können dadurch, dass radial glatte Muskelfasern an der Zelloberfläche der Chromatophoren ansetzen, ihre Gestalt ändern. Der Chromatophor wird unter Entfaltung der Zellmembran zu einer flachen Scheibe gedehnt und es findet eine Farbvertiefung statt. Das Pigment der Zelle wird geballt und der Körper des Tieres wird aufgehellt.<sup>60</sup> Der Farbwechsel ist oft ein neurophysiologischer Vorgang, der durch visuellen Input ge-

steuert wird.<sup>61</sup> Durch Lichteinwirkung auf das Pigmentsystem oder aber über Sinnesorgane oder den Tastsinn, wird der Farbwechsel zentralnervös ausgelöst. Bei Kopffüßer und Chamäleons erfolgt die Steuerung neural, bei Fischen eher hormonal.<sup>62</sup>

Farben haben viele Funktionen bei Tieren, beispielsweise Thermoregulation, Tarnung oder soziale Interaktionen. Tiere, die zu einer physiologischen Farbänderung fähig sind, können ihre Farbe als Reaktion auf ökologische Bedingungen ändern.<sup>63</sup> Ändert sich ein Umweltfaktor, kann dies eine Änderung der Farbe des Tieres hervorrufen.<sup>64</sup> Die funktionale Bedeutung schneller Farbänderungen wird vor allem bei Kopffüßern, Krebstieren, Fischen und Amphibien deutlich. Ein Farbwechsel bei Reptilien wird mit Hintergrundanpassung, Kommunikation und Thermoregulation in Verbindung gebracht. Einige nordamerikanische Eidechsen haben im warmen Zustand eine hellere Rückenfarbe als im kalten Zustand. Da sich dunklere Tiere schneller erwärmen und dadurch eine höhere Körpertemperatur erreichen, haben sie durch den Farbwechsel einen thermischen Vorteil. Dies wurde durch verschiedene empirische Studien bestätigt, doch ob die thermische Wirkung bei Reptilien relevant ist, ist nicht eindeutig.<sup>65</sup> Es lässt sich jedoch feststellen, dass vor allem Gliedertieren, Plattfischen,

Fröschen und Echsen der physiologische Farbwechsel zur Tarnung dient. Echsen, Fische und Kopffüßer nutzen ihre Fähigkeit zur Signalwirkung für Artgenossen, Konkurrenten oder Fressfeinden.<sup>66</sup>

Das Zwergchamäleon nutzt die Fähigkeit des Farbwechsels vor allem als Reaktion auf soziale Interaktionen oder Signale und nicht, wie landläufig angenommen, durch das Bedürfnis nach Tarnung. Dadurch lässt sich schließen, dass die Gründe und Anreize für einen Farbwechsel variabel sind und allgemein noch wenig verstanden.<sup>67</sup>

Vögeln und Säugetieren fehlt die Fähigkeit zum psychologisch bedingten Farbwechsel, doch kann man beispielsweise das durch periphere Durchblutung bedingte Erröten des Gesichtes eines Menschen als eine Form des physiologischen Farbwechsels auffassen.<sup>68</sup>



Abb. 52 Das Chamäleon  
*Chamaeleonidae*

## Das Chamäleon *Chamaeleonidae*

Chamäleons sind vor allem für ihre Fähigkeit bekannt, die Hautfarbe zu wechseln. Sie sind 20 bis 30 Zentimeter große Echsen, welche auf Bäumen leben. Ihre lange Klebezunge hilft ihnen, Beute schnell zu fangen. Es gibt circa 120 bekannte Chamäleonarten. Diese können in zwei Gattungen aufgeteilt werden. Zum einen gibt es die circa 30 Zentimeter langen Chamäleons und zum anderen kleinere, wie zum Beispiel die Stummelschwanz- oder Zwergchamäleons. Die meisten Arten leben in Afrika, vor allem auf der Insel Madagaskar, während nur vier Arten in Südostasien und Südeuropa leben. Meistens sind sie an Waldrändern wohnhaft, da dort die meisten Insekten sind. Diese gehören zu ihrer Hauptnahrung und sie können sie durch die lange Klebezunge rasch fangen. Am klebrigen Ende dieser bleibt die Beute haften. Die meisten Chamäleons sind Einzelgänger, doch finden sie sich manchmal in Gruppen von vier bis sechs Tieren zusammen. Die tagaktiven Echsen haben dünne und lange Beine, wodurch sie hoch auf Bäume klettern können. Außerdem helfen ihre Finger und Zehen, welche mit Greifzangen behaftet sind, sich geschickt bewegen zu können. Eine weitere Besonderheit sind ihre Augen. Diese können sich unabhängig voneinander in alle Richtungen bewegen. Dadurch entsteht die Möglichkeit, ihrer Beute unbemerkt aufzulauern.<sup>69</sup>

„Entgegen landläufiger Meinung vermögen die Echsen aber nicht, rasch eine an ihre jeweilige Umgebung angepasste Tarnfarbe zu erzeugen.“<sup>70</sup> Durch den Farbwechsel drücken sie vor allem ihre Gefühle aus. Das können beispielsweise Partner- oder Warnsignale, Hunger und Sättigkeit, sowie ein Zustand von Ruhebedürfnis sein. Andererseits geschieht der Farbwechsel auch als Reaktion auf Licht- oder Wärmeverhältnisse ihrer Umgebung. Wie der Wechsel funktioniert, ist nicht eindeutig. Norbert Welsch, ein Doktor der Naturwissenschaften, erklärt den Wechsel mit zwei Zellentypen in der Unterhaut, welche übereinander liegen. Der untere Zellentyp dieser sind die Flitterzellen (Iridocyten). Sie enthalten kleine irisierende Guaninplättchen. Eigentlich ist Guanin farblos, doch entfaltet sich die Farbe durch „Interferenz an Grenzflächen der dünnen Blättchen“<sup>71</sup>. Die darüber liegenden Zellen sind Chromatophoren, welche Farbpigmente enthalten. Die Farbpigmente können in der ganzen Zelle verteilt oder nur in bestimmten Bereichen vorhanden sein. Außerdem heften an den Chromatophorenzellen radiale Muskelstränge. „Bei Muskelkontraktionen werden die elastischen Pigmentsäckchen gedehnt, der Pigmentfarbstoff wird ausgebreitet und unter Mitwirkung der Flitterzellen sichtbar.“<sup>72</sup> Der Vorgang kann sowohl hormonell als auch nervös gesteuert werden – immer dann, wenn das Tier auf Reize reagiert.<sup>73</sup> Auch Wissenschaftler der *Nature Communications*, eine wissenschaftliche Fachzeitschrift der Nature Publishing Group, bestätigen, dass der Farbwechsel eine Kombination von Pigmenten (in Chromatophoren) und Interferenz (durch Iridocyten) ist. Sie er-

Abb. 53 Das Pantherchamäleon  
*Furcifer pardalis*



läutern, dass die Veränderung der Farbe nur auf die Pigmente innerhalb der Chromatophoren zurückzuführen ist, eine falsche Annahme sei. Sie haben das Pantherchamäleon (*Furcifer pardalis*) untersucht und festgestellt, dass photonische Kristalle den aktiven Farbwechsel bewirken. Gemeint sind hiermit Strukturfarben, wie sie bei Schmetterlingen oder Käfern vorzufinden sind. Nature Communications zeigt, dass Chamäleons ihre Farbe durch aktive Abstimmung eines Gitters aus Guanin-Nanokristallen innerhalb der oberflächlichen dicken Schicht der dermalen Iridophoren ändern. Außerdem reflektiert eine tief liegende Schicht an Iridophoren einen großen Teil des Sonnenlichts, besonders den Infrarotbereich.<sup>74</sup>

Im Allgemeinen wird der physiologische Farbwechsel so beschrieben, dass er durch Dispersion oder Aggregation von Pigmenten innerhalb von Chromatophoren entsteht. In der Studie von Nature Communications wird jedoch deutlich, dass es eher strukturelle als pigmentäre Komponenten umfasst. Damit sind mehrschichtige Nanoreflektoren mit abwechselnd hohem und niedrigem Brechungsindex gemeint, welche eine Interferenz der Lichtwellen erzeugen. Die Untersuchungen mit dem in Madagaskar lebenden Pantherchamäleon zeigen eine Verlagerung der spektralen Gewichtung vom blauen über den grünen zum roten Teil des sichtbaren elektromagnetischen Spektrums. Dieses Phänomen lässt sich nur schwer allein durch die Dispersion oder Aggregation von Pigmenten erklären. Die Ergebnisse zeigen, dass es sich vermutlich um eine Kombination dessen und die Abstimmung eines strukturellen Farbmechanismus, wie zum Beispiel die

Mehrschicht-Interferenz, handelt.

In der Haut des Chamäleons sind Materialien mit hohem und niedrigem Brechungsindex angeordnet. Diese Anordnung hat das Potenzial, sich wie ein photonischer Kristall zu verhalten. Dieser erzeugt bei Vögeln oder Insekten leuchtende Farben (Strukturfarben). Vergleicht man von Nature Communications erstellte TEM-Bilder von blauer oder grüner Haut im Ruhezustand mit denen von gelber oder weißer Haut im angeregten Zustand, stellt man fest, dass die Kristallgröße in den Iridophoren zwar nicht variiert, sich der Abstand zwischen den Guaninkristallen jedoch ändert. (Abb. 55 – 56) Dieser ist in der ruhenden Haut circa 30 % kleiner als in der angeregten Haut. Nur eine minimale Änderung der Geometrie eines photonischen Kristalls führt zu drastischen Farbveränderungen. Dadurch wird die Hypothese aufgestellt, dass sich die Farbe des Pantherchamäleons ändert, indem sich der Abstand zwischen den Guaninkristallen in den Iridophoren verändert. Es ist wahrscheinlich, dass die Vergrößerung des Abstands zwischen den Nanokristallen bei erregten männlichen Chamäleons dazu führt, dass die Iridophoren ihr selektives Reflexionsvermögen von kurzen blauen zu langen roten Wellenlängen verändern, was den Wechsel von grüner zu gelber Haut verursacht.<sup>75</sup>

Die Linnean Society of London, eine der ältesten existierenden naturforschenden Gesellschaften, hat eine Studie bezüglich Zwergchamäleons (*Bradypodion pumilum*) durchgeführt. Ziel war es zu erkennen, ob morphologische Variationen als Folge räumlich expliziter Unterschiede in der Habitatstruktur entstehen. Hierbei wurde deutlich, dass nicht nur die Körpergröße, sondern



Abb. 54 Familie der Leguanartige *Iguania* innerhalb der Schuppenkriechtiere *Squamata*<sup>15</sup>

auch die Ausprägung auffälliger Ornamente im Zusammenhang mit der Maximierung des Fortpflanzungserfolgs stehen. Sexuelle Selektion führt zu morphologischer Variation, da sie für den Fortpflanzungserfolg adaptiv ist. Es wurden Studien an Zwergchamäleons in offenen und in geschlossenen Lebensräumen durchgeführt. Das Ergebnis zeigt, dass die sexuelle Selektion in geschlossenen Lebensräumen die Entwicklung von Ornamenten begünstigt.<sup>76</sup> Das liegt daran, dass leuchtende Farben und auffällige Verzierungen bei der Paarung helfen, im offenen Lebensraum jedoch ein Risiko für Feinde darstellen würden und das Raubrisiko ihren Nutzen im Hinblick auf den Fortpflanzungserfolg überwiegt.<sup>77</sup> Der Geschlechtsdimorphismus war somit in geschlossenen Lebensräumen ausgeprägter. Bunte Farben als Signalgebung an potenzielle Partner wird durch das Raubtierrisiko in offenen Lebensräumen konterkariert. Dies sieht man beispielsweise daran, dass ornamentale Gularschuppen in geschlossenen Lebensräumen deutlich größer sind und dadurch als auffälliges Merkmal zur Schaustellung den Erfolg der Fortpflanzung erhöht. Geschlossene Lebensräume bieten einen gewissen Schutz vor Raubtieren, was einen verstärkten Sexualdimorphismus und die Entwicklung auffälliger Geschlechtsmerkmale in Form von leuchtenden Ornamenten und Farben ermöglicht.<sup>78</sup> Wie bereits erwähnt, nutzen Chamäleons die Fähigkeit des Farbwechsels eher, um Gefühle auszudrücken, statt zur Tarnung vor Feinden. Die Linnean Society of London hat jedoch eine Studie mit einem gewöhnlichen Chamäleon (*Chamaeleon chamaeleo*) durchgeführt, die das Ziel hatte, Tarnung und Fluchtent-

scheidungen von Chamäleons zu analysieren.<sup>79</sup> Die Studie zeigt, dass Fluchttaktiken von Chamäleons besonders auf Bewegungslosigkeit und kryptischer Färbung beruhen.<sup>80</sup> Es wird festgestellt, dass Tarnung durch kryptische Färbung, also Körperfarben, die die der umgebenden Vegetation entsprechen, erreicht wird. Beispielsweise ist ein Chamäleon grün, wenn es eine grüne Blattvegetation bewohnt oder braun, wenn es auf einem Baum sitzt.<sup>81</sup> Obwohl das Wissen über die Wechselwirkungen von Lebensraum und Morphologie bei Chamäleons wächst, gibt es nur wenige handfeste Informationen, da ihre kryptische Lebensweise die Beobachtungen erschwert.<sup>82</sup>

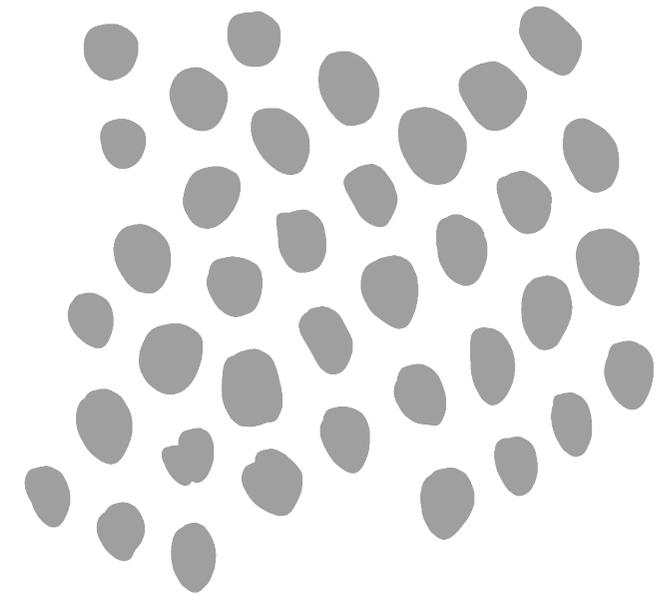


Abb. 55 Guaninkristalle in der Haut des Chamäleons im entspannten Zustand

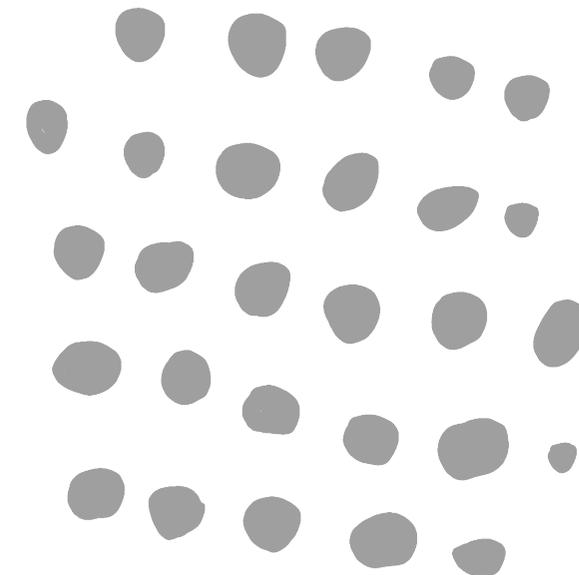


Abb. 56 Guaninkristalle in der Haut des Chamäleons im angeregten Zustand



Abb. 57 Jemenchamäleon  
*Chamaeleo calyptratus*



Abb. 58 Jemenchamäleon  
*Chamaeleo calyptratus*



Abb. 59 Madagaskar-Taggecko  
*Phelsuma madagascariensis*

## Der Gecko *Gekkonidae*

Auch der maurische Gecko (*Tarentola mauritanica*) besitzt die Fähigkeit, seine Körperfarbe zu ändern. Er ist mit einer Schnauzen-Lüftungslänge von 45 bis 85 Millimeter ein mittelgroßer Gecko und lebt im europäischen Mittelmeerraum. Dort ist er vor allem auf Felsklippen, Steinmauern oder an Gebäuden in Küstenregionen zu finden. Obwohl er nachtaktiv ist, wird er tagsüber bei der Nahrungssuche oder beim Sonnenbaden beobachtet. Potenzielle Räuber sind Katzen, Wiesel, Vögel oder Schlangen.<sup>83</sup>

Die Linnean Society of London hat eine Studie durchgeführt, bei der Farbveränderungen in Zusammenhang mit Hintergrund, Temperatur und Licht untersucht wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass der Gecko seine Rückenfarbe als Reaktion auf die Veränderung der Umweltbedingungen ändert. Im Gegensatz zu anderen Reptilienarten ist der Farbwechsel des Geckos jedoch nicht mit Thermoregulation verbunden. Die Beleuchtung hingegen schien ein wesentlicher Auslöser zu sein, ebenso wie der Hintergrund.<sup>84</sup> Bei der Studie wurden im April 2011 zehn ausgewachsene Geckos in Cilento, Italien, in der Küstennahe der Provinz Salerno, gefangen. Von der dort herrschenden Vegetation eines mediterranen Pinienwaldes, wurden sie in ein Labor an der Universität Antwerpen, Belgien, transportiert. Sie wurden dort zu fünf in

Terrarien gehalten und waren einem Zwölf Stunden Hell-Dunkel-Wechsel bei einer Temperatur von 25 °C ausgesetzt.<sup>85</sup>

Das Experiment verlief so, dass ein Gecko unterschiedlichen Hintergründen (weiß, grau und schwarz), verschiedenen Lichtverhältnissen (Licht an und aus) und wechselten Temperaturen (10 bis 35 °C) ausgesetzt wurde. Die Testtemperaturen basierten auf Umgebungstemperaturen, die dem Gecko aus seinem natürlichen Lebensraum bekannt sind.<sup>86</sup> Die Ergebnisse zeigen, dass die Helligkeit der Eidechsen von den Hintergründen beeinflusst wurde. Unter dunklen Bedingungen war der Hintergrund nicht signifikant, doch war die Helligkeit der Echsen aus beleuchteten Terrarien stark von der Hintergrundfarbe abhängig. Auf schwarzem Hintergrund waren sie deutlich weniger hell als auf weißem Hintergrund. Außerdem hatte der Gecko auch unter simuliertem Tageslicht eine geringere Helligkeit als unter Nachtbedingungen.<sup>87</sup>

Die Studie verdeutlicht, dass der maurische Gecko seine Rückenfarbe als Reaktion auf Veränderung der Umweltbedingungen innerhalb einer Stunde anpasst. Auswirkungen der Temperatur waren nur unter dunklen Bedingungen signifikant, was darauf hindeutet, dass im Gegensatz zu dem, was bei vielen tagaktiven Eidechsen beobachtet wird, ein Farbwechsel bei nachtaktiven Eidechsen

nicht mit Temperaturregulierung verbunden ist.<sup>88</sup> Sich dem Hintergrund anzupassen, erfordert eine Beleuchtung, denn unter dunklen Bedingungen wird die Helligkeit der Rückenhaut nicht beeinflusst. Die Melaninverteilung in Chromatophoren ist für die Verdunklung der Haut zuständig. Der Prozess wird möglicherweise durch Licht ausgelöst, welches auf die Chromatophoren einwirkt. Eine funktionale Erklärung wäre, dass die Anpassung an die Umgebung nachts weniger wichtig ist, da die Anzahl der Raubtiere zu der Zeit reduziert ist.

Bei Leguanen werden physiologische Farbwechsel während sozialen Interaktionen beobachtet. Ähnliche Veränderungen wurden bei zwei Gattungen tagaktiver Geckos erkannt. Es ist unwahrscheinlich, dass die Veränderung der Haut auch bei dem maurischen Gecko in der intraspezifischen Kommunikation eine Rolle spielt, lässt sich jedoch nicht ausschließen. Es wäre interessant festzustellen, ob der maurische Gecko, so wie beispielsweise das Zwergchamäleon, je nach sozialem Kontext eine Farbveränderung erfährt. Die Studie fasst zusammen, dass der maurische Gecko seine Körperfarbe als Reaktion auf Hintergrund- und Lichtbedingungen anpasst. Sie verringern ihre Helligkeit je nach Hintergrund. Die Thermoregulation, also die Abhängigkeit der Körpertemperatur eines Organismus von der Außenwelt, scheint keine wichtige Funktion des Farbwechsels zu sein.<sup>89</sup>

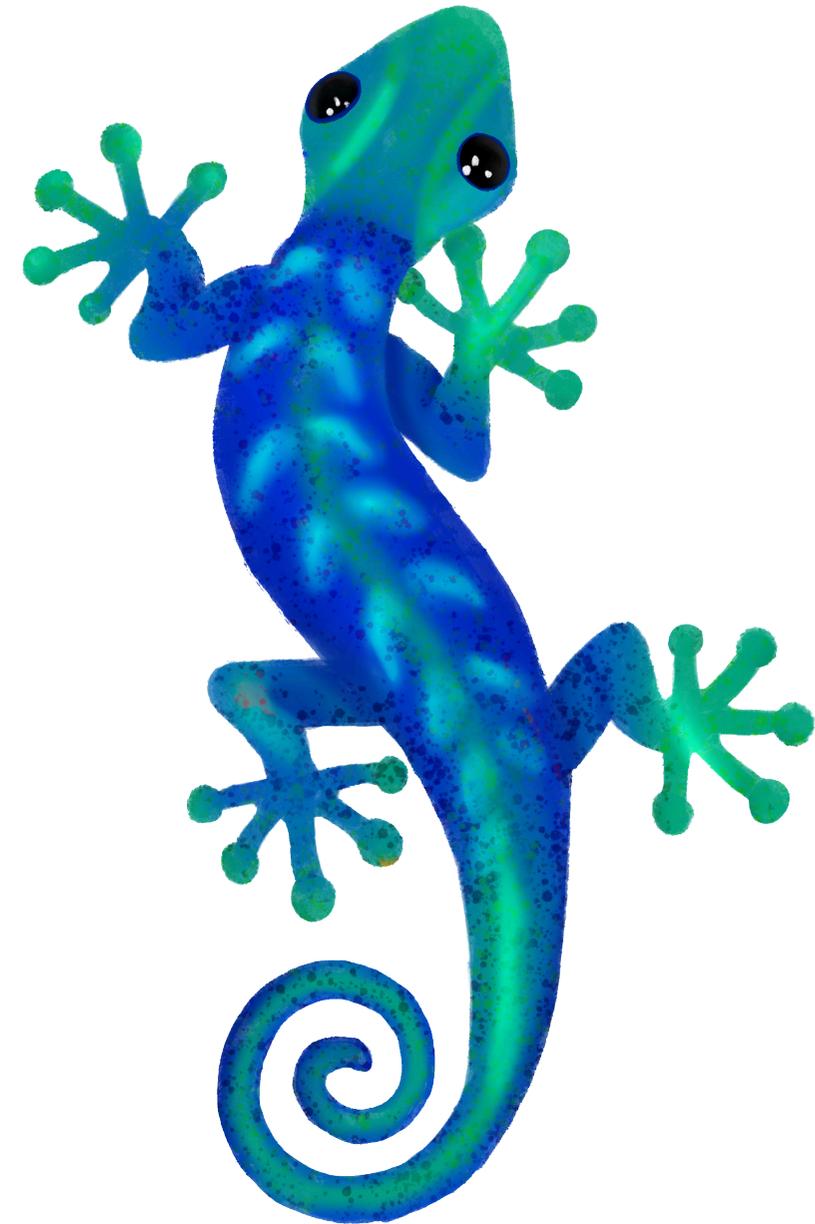


Abb. 60 Madagaskar-Taggecko  
*Phelsuma madagascariensis*

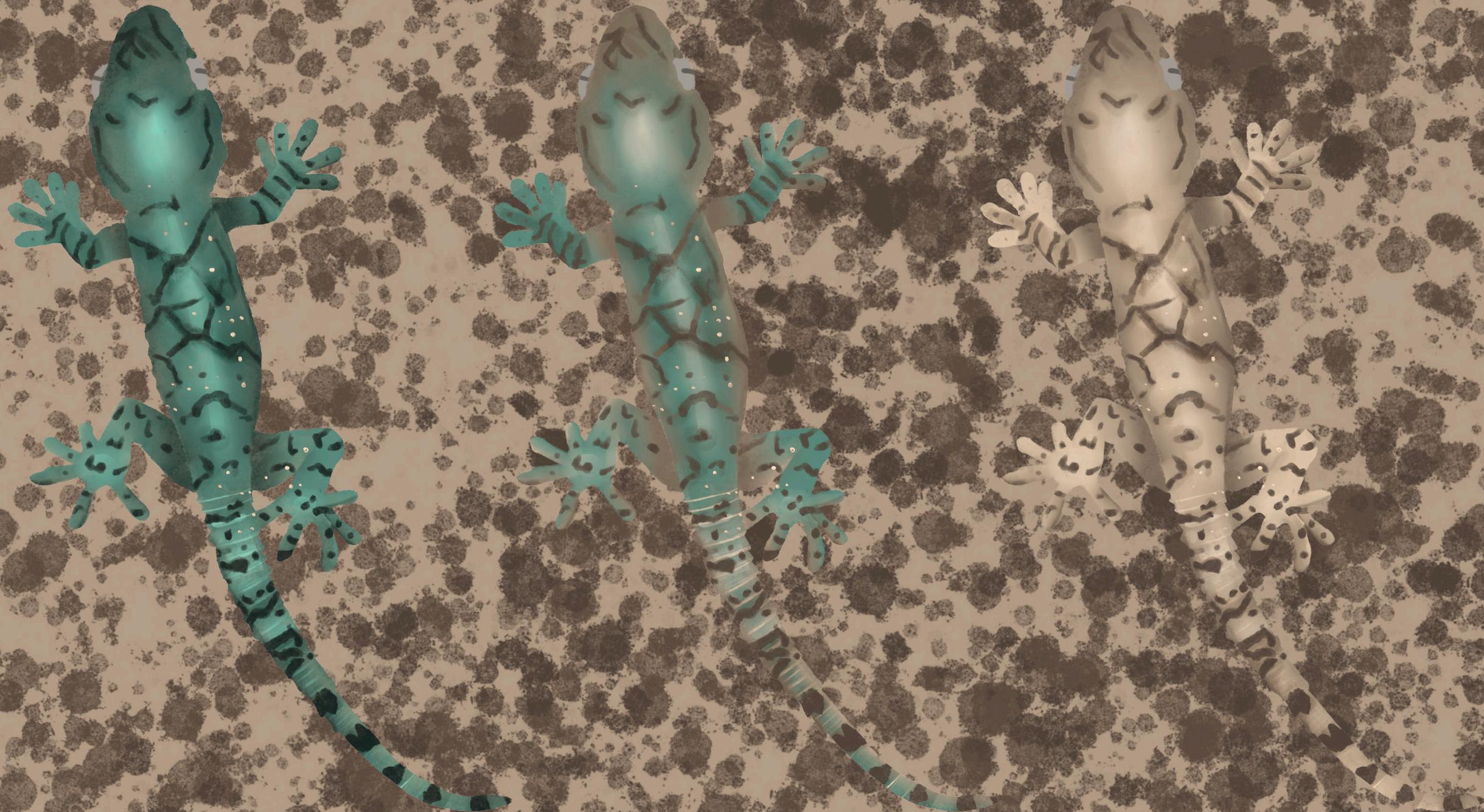


Abb. 61 Der maurische Gecko  
*Tarentola mauritanica*

## Der Feilenfisch *Monacanthidae*

Die Linnean Society of London hat in einer weiteren Studie den Farb- und Musterwechsel des schlanken Feilenfisches (*Monacanthus Tuckeri*) untersucht. Mithilfe von Feldaufnahmen wurde die anatomische Lage der veränderlichen Musterkomponenten untersucht. Ziel war es zu erkennen, ob diese die Farbe von nahen gelegenen Korallen oder Algen annehmen. Außerdem wurde mit einem Canny-Kantendetektor untersucht, ob die Umrisslinie des Feilenfisches von seinem Hintergrund zu unterscheiden ist und die innere Struktur seiner Hautlappen wurde analysiert.<sup>90</sup> Die Untersuchungen fanden an einem karibischen Korallenriff unter natürlichem Licht statt.<sup>91</sup> Der schlanke Feilenfisch kann sein Aussehen innerhalb ein bis drei Sekunden ändern und ist somit Meister der adaptiven Tarnung. Außerdem besitzt er Hautlappen, welche zusätzlich seine Körperform verschleiern. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass sich der Feilenfisch durch Körpermuster, Hautstruktur, Körperhaltung und

Schwimmausrichtung vor potenziellen Feinden schützt.<sup>92</sup> Zudem nutzt er seine Fähigkeiten zur Signalgebung. Der Feilenfisch, mit einer Standardlänge von zwei bis fünf Zentimeter, bewegt sich zwischen Weichkorallen und Algen und schwebt oft mit dem Kopf nach unten. Dort sucht er nach Plankton und Krebstieren. Eine seiner Besonderheiten ist, dass er seine dreidimensionale Form durch das Vorhandensein von Hautlappen ändern kann. Die daraus entstehenden Projektionen haben eine starke Ähnlichkeit mit der Struktur von Korallen, Algen und Pflanzen, weshalb die Verschleierung der wahren Körperform möglich wird.<sup>93</sup> Während der Studie wurden sechzehn verschiedene Körpermuster identifiziert. Einige dieser scheinen eine Kombination aus anderen zu sein. Beispielsweise entsteht ein großer dunkler Mittelstreifen durch die Verdunklung benachbarter Flecken. Der Vorgang geschieht durch pigmentierte Melanozyten, welche sich innerhalb von Me-

Abb. 62 Der Feilenfisch  
*Monacanthidae*

lanophoren ausbreiten. Der Wechsel der Muster läuft mit einem Mittelwert von 3,04 Sekunden ab. Zu den in der Studie erkannten Wechsel gehörten leichte Aufhellungen oder Verdunklungen innerhalb eines Körpermusters oder auch starke Ganzkörperwechsel. Letztere vor allem dann, wenn das Tier seinen Hintergrund wechselt oder sich schnell zwischen Korallen bewegt.<sup>94</sup> In neun von elf Fällen, ähnelte der Feilenfisch mehr den Korallen als dem umgebenden Hintergrund. Das ermöglicht ihm, sich unbemerkt zwischen dreidimensionalen Riffstrukturen zu bewegen. Vermutlich wird der Farbwechsel durch neuronale und nicht durch hormonelle Mechanismen gesteuert. Wie bei Kopffüßern ist der Farbwechsel ein neurophysiologischer Vorgang, welcher durch visuellen Input gesteuert wird. Neuronale Mechanismen wurden jedoch bisher bei Fischen kaum untersucht.<sup>95</sup> Obwohl der Farbwechsel nur eine von vielen Tarnkomponenten ist, veranschaulichen die Ergebnisse der Studie, dass der Feilenfisch eine Ähnlichkeit mit seinem Hintergrund entwickelt, um sich vor Raubfeinden zu schützen.<sup>96</sup> Oft war der Körper des schlanken Feilenfisches abwechselnd dunkler (rot) oder heller (blau) als der unmittelbare Hintergrund. Dadurch wurde die Kontinuität der echten Körperkante unterbrochen und es entstand eine erfolgreiche Tarnung. Wenn er

sich innerhalb seiner Umgebung verschleiern möchte, ermöglichen die physiologisch veränderbaren Muster, den Kontrast der inneren Musterkomponenten zu verändern. Muster können dazu beitragen, seine wahre Körperkante zu kryptieren, indem sie durch Illusion eine falsche Kante erzeugen.<sup>97</sup> Der schlanke Feilenfisch ändert seine Körpermuster und -farben effektiv und schnell in Abhängigkeit seiner unmittelbaren Umgebung. Viele Fische besitzen diese Fähigkeit, doch gibt es nur wenige Studien zu diesem Verhalten. Die Linnean Society of London ist der Meinung, dass diese Art von Meerestischen in Zukunft neue Erkenntnisse über die visuelle Wahrnehmung und Taktiken der visuellen Tarnung von Tieren liefern werden.<sup>98</sup>

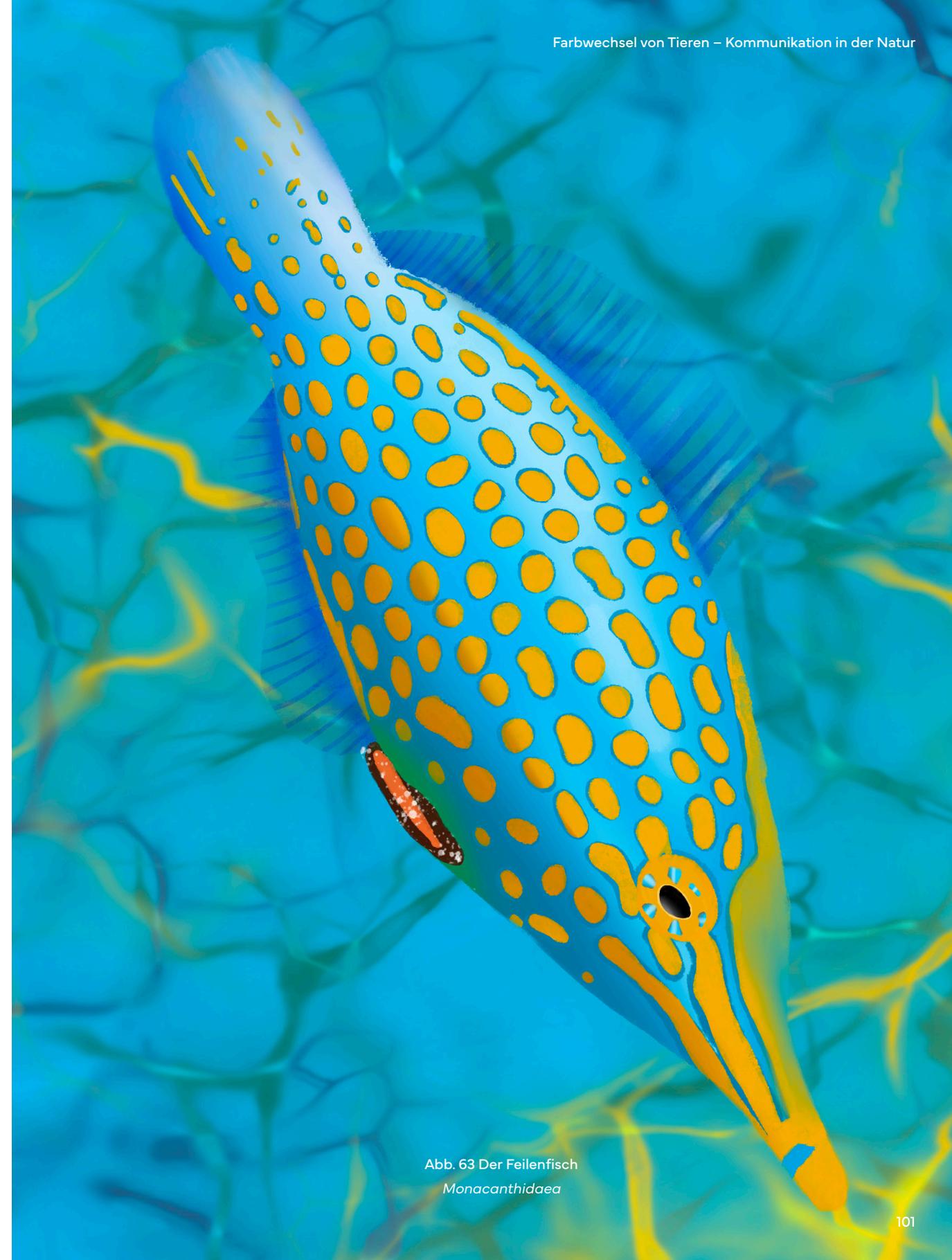


Abb. 63 Der Feilenfisch  
*Monacanthidae*



Abb. 64 Der Feilenfisch  
*Monacanthidae*



Abb. 65 Die Scholle  
*Pleuronectes platessa*

## Die Scholle

### *Pleuronectes platessa*

Die Scholle (*Pleuronectes platessa*) ist eine Plattfischart, welche am Meeresboden in einer Tiefe bis zu 200 Metern lebt. Schollen findet man besonders von Norwegen bis Portugal an der westeuropäischen Atlantikküste. Die Jungfische entwickeln vorerst eine symmetrische Gestalt, wie die von den meisten Fischen. Dadurch, dass die Scholle sich ihrem Leben auf dem Meeresboden anpasst, entwickelt sich bald die platte Form. Bei dieser Entwicklung wandert eines der Augen nach oben. Die zum Boden gewandte Körperfläche ist durch in den Hautzellen eingelagerten Guinanpartikel weißlich-bläulich gefärbt. Die Körperhälfte, die nach oben zeigt, hat eine bräunlich-grünliche Färbung mit gelb-orangen Flecken. „Hier enthalten die Zellen in der Unterhaut schwarze, braune oder graue Melaninpigmente sowie gelbliche bis orangefarbene Carotinoide und rötlich gefärbte Pterine als Chromophoren.“<sup>99</sup>

Entsteht eine Bedrohung durch Fressfeinde, kann sich die Scholle schnell dem jeweiligen Untergrund anpassen. Dadurch, dass die Augen die Farbe der Unterfläche wahrnehmen, entwickelt sich rasch eine passende Tarnfarbe. Der Vorgang wird nervös oder hormonell gesteuert. Die Farbe ändert sich dadurch, dass sich die Chromatophoren der Haut zusammenziehen oder ausdehnen, wodurch sich die Lage der Farbkörnchen innerhalb der

Zellen ändert. Eine verwandte Plattfischart ist die Flunder (*Paralichthys* und *Ancylosetta*). Diese besitzt die Fähigkeit, anders als die Scholle, welche eher dunkle Farben bevorzugen, sich ihrer Umgebung durch Farbtöne von Gelb, Orange und Blau über Rosa und Braun anzupassen. So können sogar Muster der Umgebung, zum Beispiel Wellenmuster, imitiert werden.<sup>100</sup>

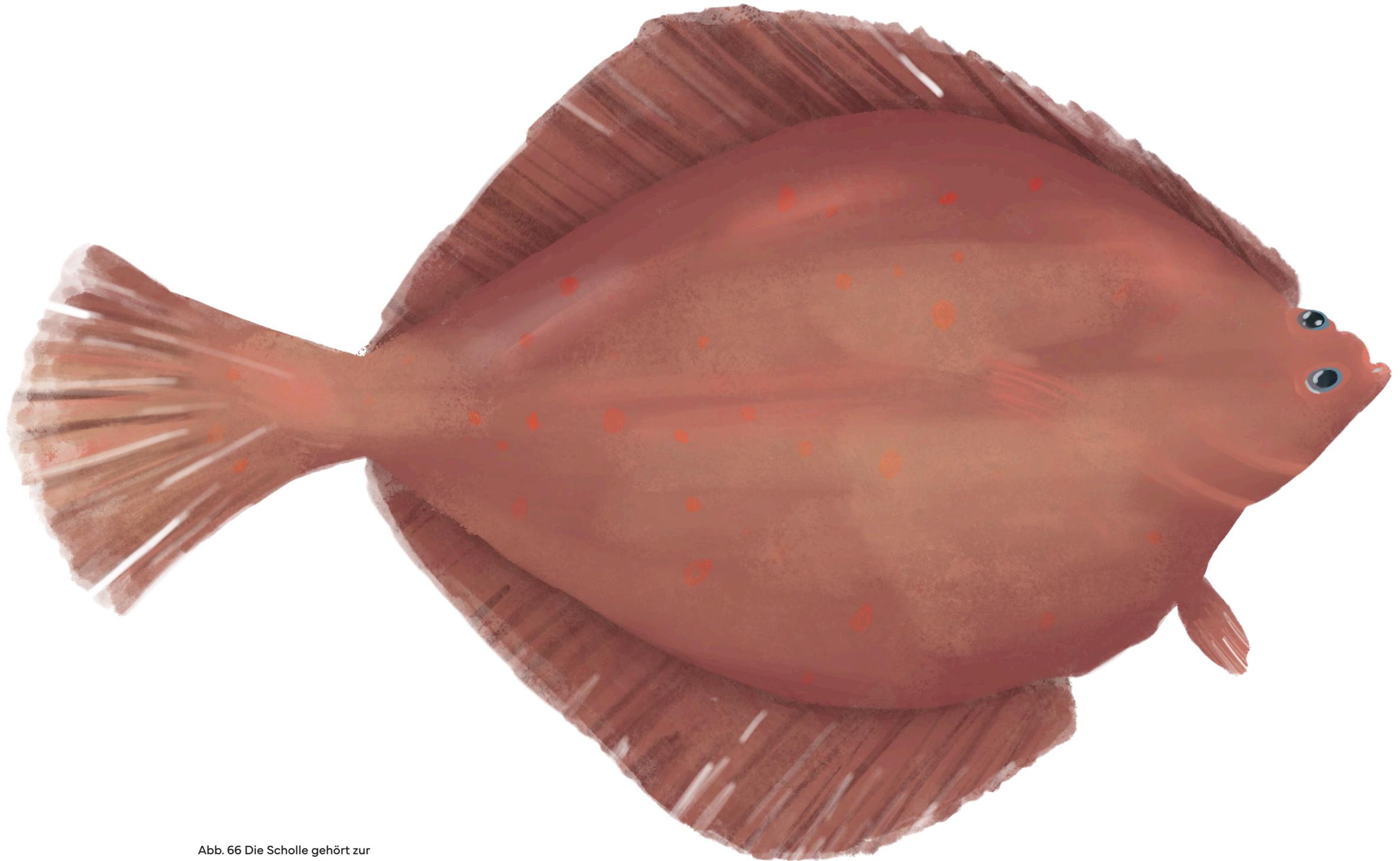


Abb. 66 Die Scholle gehört zur  
Ordnung der Plattfische  
*Pleuronectiformes*<sup>116</sup>



Abb. 67 Der Tintenfisch  
*Coleoidea*

## Der Tintenfisch *Coleoidea*

Tintenfische sind eine Unterklasse der Kopffüßer (Cephalopoden). Es sind circa 730 verschiedene Arten bekannt, welche Größen von 2 Zentimeter bis 22 Meter aufweisen. Die bekanntesten Arten sind die Sepien (Sepiida), die Kalmare (Teuthida) und die Kraken (Octopoda).<sup>101</sup> Ihre Gemeinsamkeit ist der Kopffuß, auf welchem sowohl die Augen und die Mundöffnung als auch die Arme sind, welche mit Saugnäpfen und Haftpolster gezeichnet sind. Die Taxonomie der Tintenfische unterscheidet man nach der Anzahl der Kiemen. Es gibt zum einen die Vierkiemer (Tetrabranchiata) und zum anderen die Zweikiemer (Dibranchiata). Zu den Vierkiemern gehört unter anderem der Nautilus, welcher zur Gattung der Familie der Perlboote (*Nautilus pompilius*) gehört. Das Schneckenhaus, in dem er lebt, ähnelt einer logarithmischen Spirale. Er legt immer wieder neue Kammern an, lebt jedoch nur in der vordersten. Fast alle Tetrabranchiata sind ausgestorben, lediglich die Familien aus der Gattung *Nautilus* haben überlebt. Bei ihnen lässt sich eine Ähnlichkeit mit fossilen Ammoniten feststellen. Diese bevölkerten bereits vor 400 Millionen Jahren die Weltmeere. Die Augen der Perlboote haben keine Linsen und sie können bis zu 90 Tentakel aufweisen. Außerdem sind sie die einzigen Tintenfische, welche keine Tinte produzieren.

Diese, die Tinte ausstoßen, sind der Dibranchiata angehörig und werden nach der Anzahl der Arme unterschieden. Man unterscheidet zwischen den zehnamigen (Decabrachia, Decapoda) und achtarmigen Tintenfischen. Zu den Zehnamigen gehören unter anderem Kalmare und Sepien. Octobranchia oder Octopoda sind achtarmige Kraken. Zwei Tarneinrichtungen sorgen dafür, dass Tintenfische sich vor ihren Fressfeinden schützen können. Zum einen schützen sie sich dadurch, dass sie sowohl ihre Körperfarbe als auch ihre Oberflächenstruktur an die Umgebung anpassen können. Zum anderen können Tintenfische einen tintenähnlichen Farbstoff ausstoßen.<sup>102</sup> Dies hat der Tierklasse seinen deutschen Namen eingebracht. Bei Gefahren scheiden sie durch eine Drüse in der Mantelhöhle einen dunklen melaninhaltigen Farbstoff aus. Kombiniert mit Schleim hinterlässt dieser eine langanhaltende Tintenwolke. Während der Feind verwirrt ist, nimmt der Tintenfisch eine helle Farbe an und kann sich durch das Rückstoßprinzip in Sicherheit wahren.<sup>103</sup> Die Augen der Tintenfische sind ein Beispiel für konvergente Entwicklungen im Tierreich. Diese haben einen hohen Differenzierungsgrad und können, gepaart mit ihrem hoch entwickelten Nervensystem, Feinde rasch

erkennen. Die Veränderungen der Farbe der Haut entsteht durch einen erregten Zustand von Muskeln, welche an Farbzellen sitzen. Die Chromatophoren sind melaningefüllte Farbzellen und können rosa, rot, orange, gelb, violett, braun oder schwarz sein. Im entspannten Zustand sind diese flach und dadurch kaum zu sehen. Befindet sich das Tier in einem erregten Zustand, vergrößert sich die Oberfläche enorm, wodurch ein sichtbarer Farbleck auf der Haut entsteht. Besonders ist vor allem, dass der Tintenfisch nicht nur seine Farbe ändern, sondern sich auch der Struktur der Umgebung anpassen kann. Durch in der Haut eingelagerten Muskeln, kann ein ausgebeultes, stacheliges, runzliges oder glattes Aussehen angenommen werden. Doch zeichnet sich das Tier mit noch einer weiteren Besonderheit aus. Mithilfe von Leuchtorganen am Bauch Licht erzeugen und zu Manipulationszwecken nutzen. Zudem kann er durch reflektierende Zellen, die Leucophoren, Licht reflektieren. Die obere Hautschicht ist mit den bereits genannten Chromatophoren bestückt, welche für den Farbwechsel sorgen. Darunter befinden sich Zellen aus dünnen Chitinplättchen, welche Licht reflektieren und dadurch silberne, grüne und blaue Farben erzeugen können (Iridophoren). Unten dieser Schicht befinden sich die Leucophoren. Diese sind aus farblosen, durchscheinenden Proteinen aufgebaut, weshalb es möglich ist, das gesamte auftreffende Licht zu reflektieren. Dieses Phänomen, auch „Reflektorsystem“<sup>104</sup> genannt, ermöglicht Tintenfischen weißes oder bläuliches Licht auszusenden. Sie können sich so vor Fressfeinden unsichtbar machen oder sich ih-

rer Beute unbemerkt nähern. Diese Proteine nutzen Forscher auch für die Entwicklung von optischen Bauteilen oder Tarnsystemen. Neben diesen beeindruckenden Phänomenen, besitzen Tintenfischen noch weitere Besonderheiten. Der Riesenkalmar (Architeuthis princeps), ist mit 22 Metern wohl der Größte aller Tintenfische.<sup>105</sup> Trotz mehreren Tonnen an Gewicht, schafft er es durch Zusammenziehen der Mantelhöhle nach dem Rückstoßprinzip, mit bis zu drei Metern pro Sekunde zu schwimmen.<sup>106</sup> Die Tinte der Tintenfische wurde nach den Sepien benannt. Früher nutzte man diese zum Schreiben, doch dient sie heute als Schutzpigment in Sonnencremes oder zum Färben von Pasta. Ist ein Sepia weiß gefärbt, zeigt es Wut oder Angst. Ein Zebromuster dient zur Bedrohung von Rivalen. Nicht nur bei den Sepien, sondern auch bei Kalmaren und Kraken dient die Einfärbung der Haut als Kommunikationsmittel zwischen Artgenossen. Der wohl am weitesten entwickelte Tintenfisch, ist der Oktopus. Verschiedene Tests beweisen, dass er außerordentlich lernfähig ist und komplexe Probleme lösen kann. Dadurch, dass er keinerlei hartes Skelett mehr besitzt, kann er sich in Boden- und Felsspalten verstecken. So können sich die großen Tiere durch nur wenige Zentimeter große Öffnungen quetschen.<sup>107</sup>

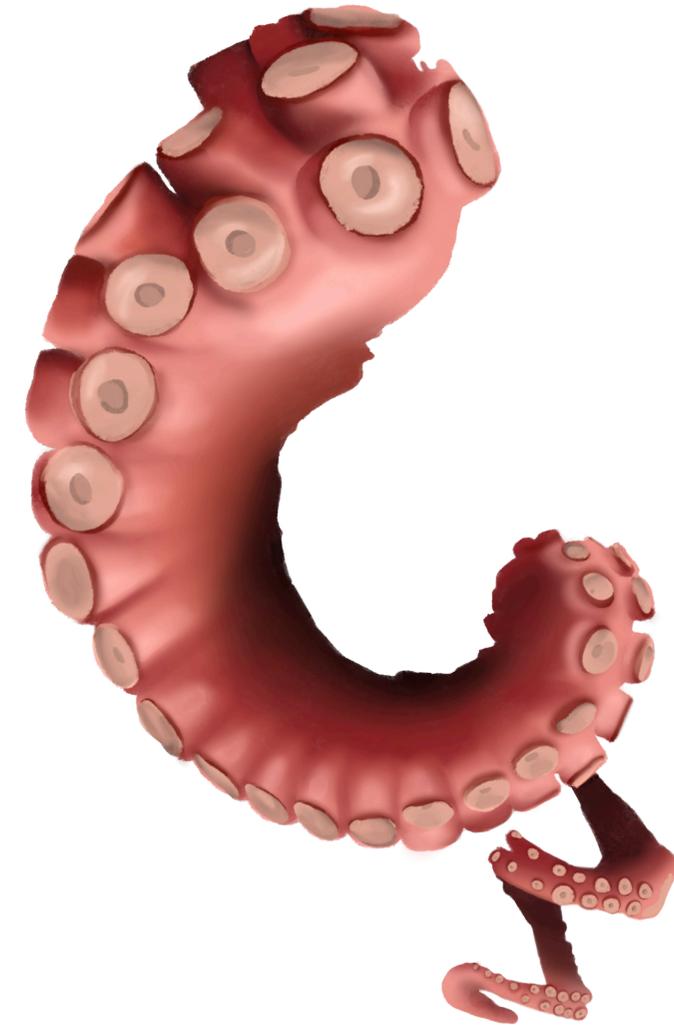


Abb. 68 Tentakel des Tintenfisches

# Lexikon

## Carotinoide

Carotinoide [Carotin] sind in der Pflanzen- und Tierwelt weit verbreitete Pigmente, welche gelb, rot oder purpurfarben sind. Die Farbigkeit beruht auf einem System mehrerer konjugierter Doppelbindungen. Durch diese kann Licht der Wellenlängen bis über 500 nm absorbiert werden. Tiere können Carotinoide nur über die Nahrung aufnehmen. Carotinoide kommen in Laubblättern, Pollen, Samen oder Wurzeln vor. Sie wurden nach der Karotte (*Daucus carota*) benannt. Durch pflanzliche Nahrung gelangen sie bei Menschen oder Tieren in Haut, Schale, Panzer, Gefieder, Schnabel oder in das Ei-Dotter. Follen besitzen Carotinoide innerhalb Chromatophoren in der Haut. Zudem haben sie in Früchten und Blütenblättern als Lockfarben für Tiere Bedeutung.<sup>108</sup>

## Chitin

Chitin ist ein stickstoffhaltiges lineares Polysaccharid (Unterklasse der Kohlenhydrate, Polymere Zucker<sup>109</sup>) und Hauptbestandteil des Außenskeletts von Gliederfüßer, beispielsweise in Krabben- und Hummerschalen oder in Maikäferflügeln. Chitin ist außerdem in Zellwänden von Pilzen zu finden.<sup>110</sup>

## Chlorophyll

Chlorophylle [von griech. chloros = grün-gelb; griech. phyllon = Blatt], Blattgrün, sind grüne, oder in isolierter Form rötlich fluoreszierende, Farbstoffe. Der Pflanzenfarbstoff ist in grünen Pflanzen, bestimmten Bakterien und photosynthetisierten Algen. Chlorophylle nehmen eine wichtige Stellung bei der Photosynthese ein, da mithilfe von ihnen die Lichtenergie des Sonnenlichts absorbiert wird.<sup>111</sup>

## Chromatophoren

Chromatophoren [von griech. chroma = Farbe; phoros = tragend] sind pigmenthaltige Zellen (Farbzellen) von Chamäleons, Krebstieren oder Kopffüßer, welche locker verteilt in der Haut liegen. Xanthophoren und Erythrophoren sind durch Carotinoide und Pterine gelb-rot gefärbt; Guanophoren und Iridiophoren verleihen Tieren ein weißes bis silbriges Aussehen, da sie Guaninkristalle speichern, die Licht reflektieren; Melanocyten bilden Melanine, welche von gelb über rötlich-braun bis schwarz sind. Bei Fischen und Amphibien können Chromatophoren einen Farbwechsel hervorrufen, wenn die Pigmentgranula im Cytoplasma der verästelten Chromatophoren wandern. Dadurch sind sie entweder über die gesamte Zelle verteilt oder aber geballt. Diese Pigmentverlagerung findet nervös oder hormonell statt und dient der Tarnung oder kann die Stimmung des Tieres ausdrücken, wie zum Beispiel Paarungsbereitschaft oder Erregung.<sup>112</sup>

## Guanin

Guanin ist eine Purinbase, welche in kristalliner Form der silbrig glänzende Bestandteil von Fisch- und Reptilien-Schuppen ist. In den Mantelrandaugen der Kammmuschel liegen Guaninkristalle in circa dreißig Lagen übereinander und erzeugen eine reflektierende Schicht. In den Flitterzellen (Iridocyten) der Kopffüßer befinden sich ähnliche Strukturen.<sup>113</sup>

## Iridocyten

Iridocyten [von griech. irid = Regenbogen, in Regenbogenfarben schillernd] sind Flitterzellen, die Plättchen aus Guanin enthalten. Sie befinden sich im Unterhautgewebe von Krebstieren, kaltblütigen Wirbeltieren und Weichtieren und reflektieren das einfallende Licht. Besonders bei Kopffüßern liegen sie in vielen Schichten übereinander und sind hoch entwickelt. Flitterzellen sind mit den darüberliegenden Chromatophoren für den Farbwechsel dieser Tiere verantwortlich.<sup>114</sup>

## Quellen

1. Vgl. H. Hashimoto; M. Goda; R. Futahashi; R. Kelsh; T. Akiyama: Pigments, Pigment Cells and Pigment Patterns, Singapur: Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2021, S. 5
2. Vgl. Ebd.
3. Welsch, Norbert; Liebmann, Claus: Farben – Natur, Technik, Kunst, 3. Aufl., Tübingen, München, Deutschland: Springer Verlag GmbH, 2012, S. 26
4. Vgl. Ebd.
5. Vgl. Ebd. S. 27
6. Vgl. Ebd. S. 29
7. Ebd. S. 36
8. Vgl. Ebd.
9. Vgl. Ebd. S. 37f.
10. Vgl. Ebd. S. 38f.
11. Vgl. Ebd. S. 39f.
12. Vgl. Ebd. S. 40
13. Ebd. S. 53
14. Vgl. Ebd. S. 53f.
15. Ebd. S. 54
16. Vgl. Ebd.
17. Vgl. Ebd. S. 55
18. Ebd. S. 56
19. Vgl. Ebd.
20. Vgl. Ebd. S. 58
21. Vgl. Ebd. S. 59
22. Vgl. Ebd. S. 60
23. Vgl. Ebd. S. 64
24. Vgl. Ebd. S. 62
25. Vgl. Ebd. S. 63
26. Vgl. Ebd. S. 65
27. Vgl. Ebd. S. 66
28. Vgl. Ebd. S. 68
29. Vgl. Ebd. S. 69
30. Vgl. Ebd. S. 70
31. Vgl. Ebd. S. 72
32. Vgl. Ebd. S. 74
33. Vgl. Ebd. S. 75
34. Vgl. Ebd. S. 76
35. Vgl. Ebd. S. 94
36. Ebd. S. 96
37. Vgl. Ebd.
38. Vgl. Ebd. S. 97
39. Vgl. Ebd. S. 98
40. Vgl. Ebd. S. 100
41. Ebd. S. 102
42. Vgl. Ebd.
43. Vgl. Ebd. S. 103
44. Ebd. S. 104
45. Vgl. Ebd.
46. Pigmente tauchen die Tier- und Pflanzenwelt in Farbe. (2013, 4. September). SimplyScience. Abgerufen am 15. September 2022, von <https://www.simplyscience.ch/teens/wissen/pigmente-tauchen-die-tier-und-pflanzenwelt-in-farbe?r=1>
47. Welsch, Norbert; Liebmann, Claus: Farben – Natur, Technik, Kunst, 3. Aufl., Tübingen, München, Deutschland: Springer Verlag GmbH, 2012, S. 151
48. Vgl. Ebd.
49. Vgl. Ebd. 152
50. Pigmente tauchen die Tier- und Pflanzenwelt in Farbe. (2013, 4. September). SimplyScience. Abgerufen am 15. September 2022, von <https://www.simplyscience.ch/teens/wissen/pigmente-tauchen-die-tier-und-pflanzenwelt-in-farbe?r=1>
51. Vgl. Welsch, Norbert; Liebmann, Claus: Farben – Natur, Technik, Kunst, 3. Aufl., Tübingen, München, Deutschland: Springer Verlag GmbH, 2012, S. 262
52. Vgl. Ebd. S. 392
53. Vgl. Ebd. S. 393
54. Pigmente tauchen die Tier- und Pflanzenwelt in Farbe. (2013, 4. September). SimplyScience. Abgerufen am 15. September 2022, von <https://www.simplyscience.ch/teens/wissen/pigmente-tauchen-die-tier-und-pflanzenwelt-in-farbe?r=1>
55. Strukturfarben – Die schillernde Farbenwelt des Tier- und Pflanzenreichs. (2013, 4. September). SimplyScience. Abgerufen am 15. September 2022, von <https://www.simplyscience.ch/teens/wissen/strukturfarben-die-schillernde-farbenwelt-des-tier-und-pflanzenreichs?r=1>
56. Prof. Lemeshko. (2020, 18. Oktober). CHAMÄLEON-PHYSIK: STRUKTURFARBEN einfach erklärt. Was haben Chamäleons und Seifenblasen gemeinsam? YouTube. Abgerufen am 25. September 2022, von <https://www.youtube.com/watch?v=3Yc-f6A0r7zw>
57. Strukturfarben – Die schillernde Farbenwelt des Tier- und Pflanzenreichs. (2013, 4. September). SimplyScience. Abgerufen am 15. September 2022, von <https://www.simplyscience.ch/teens/wissen/strukturfarben-die-schillernde-farbenwelt-des-tier-und-pflanzenreichs?r=1>
58. Die Farben der Vögel und der Fische. (2012, 30. August). DAZ.online. Abgerufen am 15. September 2022, von <https://www.deutsche-apothekezeitung.de/daz-az/2012/daz-35-2012/die-farben-der-voegel-und-der-fische>
59. Farbwechsel. Lexikon der Biologie. Abgerufen am 20. September 2022, von <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/farbwechsel/2>
60. Ebd.
61. Vgl. The Linnean Society of London: Biological Journal of the Linnean Society, Volume 116, Oxford University Press, 2015, S. 388f.
62. Farbwechsel. Lexikon der Biologie. Abgerufen am 20. September 2022, von <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/farbwechsel/2>
63. Vgl. The Linnean Society of London: Biological Journal of the Linnean Society, Volume 107, Oxford University Press, 2012, S. 182
64. Vgl. Ebd. S. 182f.
65. Vgl. Ebd. S. 183
66. Farbwechsel. Lexikon der Biologie. Abgerufen am 20. September 2022, von <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/farbwechsel/2>
67. Vgl. The Linnean Society of London: Biological Journal of the Linnean Society, Volume 107, Oxford University Press, 2012, S. 183
68. Farbwechsel. Lexikon der Biologie. Abgerufen am 20. September 2022, von <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/farbwechsel/2>
69. Vgl. Welsch, Norbert; Liebmann, Claus: Farben – Natur, Technik, Kunst, 3. Aufl., Tübingen, München, Deutschland: Springer Verlag GmbH, 2012, S. 197
70. Ebd. S. 198
71. Ebd.
72. Ebd.
73. Vgl. Ebd.
74. Vgl. Nature Communications: Photonic crystals cause active colour change in chameleons, Macmillan Publishers, 2015, S.1
75. Vgl. Nature Communications: Photonic crystals cause active colour change in chameleons, Macmillan Publishers, 2015, S.2
76. Vgl. The Linnean Society of London: Biological Journal of the Linnean Society, Volume 102, Oxford University Press, 2011, S. 878
77. Vgl. Ebd. S. 879
78. Vgl. Ebd. S. 885
79. Vgl. The Linnean Society of London: Biological Journal of the Linnean Society, Volume 72, Oxford University Press, 2001, S. 547
80. Vgl. Ebd. S. 548
81. Vgl. Ebd. S. 552
82. Vgl. The Linnean Society of London: Biological Journal of the Linnean Society, Volume 102, Oxford University Press, 2011, S. 879
83. Vgl. The Linnean Society of London: Biological Journal of the Linnean Society, Volume 107, Oxford University Press, 2012, S. 183
84. Vgl. The Linnean Society of London: Biological Journal of the Linnean Society, Volume 107, Oxford University Press, 2012, S. 182
85. Vgl. Ebd. S. 183
86. Vgl. Ebd. S. 184
87. Vgl. Ebd. S. 185
88. Vgl. Ebd. S. 187
89. Vgl. Ebd. S. 188
90. Vgl. The Linnean Society of London: Biological Journal of the Linnean Society, Volume 116, Oxford University Press, 2015, S. 387
91. Vgl. Ebd. S. 377
92. Vgl. Ebd.
93. Vgl. Ebd. S. 387
94. Vgl. Ebd. S. 386
95. Vgl. Ebd. S. 388f.
96. Vgl. Ebd. S. 391
97. Vgl. Ebd.
98. Vgl. Ebd. S. 392
99. Welsch, Norbert; Liebmann, Claus: Farben – Natur, Technik, Kunst, 3. Aufl., Tübingen, München, Deutschland: Springer Verlag GmbH, 2012, S. 200
100. Vgl. Ebd.
101. Wikipedia. (2022, 30. Juli). Tintenfische. Abgerufen am 16. August 2022, von <https://de.wikipedia.org/wiki/Tintenfische>
102. Vgl. Welsch, Norbert; Liebmann, Claus: Farben – Natur, Technik, Kunst, 3. Aufl., Tübingen, München, Deutschland: Springer Verlag GmbH, 2012, S. 200
103. Vgl. Ebd. S. 201
104. Ebd.
105. Vgl. Ebd.
106. Vgl. Ebd. S. 202
107. Vgl. Ebd.
108. Lexikon der Biologie. Carotinoide. Abgerufen am 26. September 2022, von <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/carotinoide/12331>
109. Lexikon der Biologie. Polysaccharide. Abgerufen am 26. September 2022, von <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/polysaccharide/53013>
110. Lexikon der Biologie. Chitin. Abgerufen am 26. September 2022, von <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/chitin/13547>
111. Lexikon der Biologie. Chlorophylle. Abgerufen am 26. September 2022, von <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/chlorophylle/13670>
112. Lexikon der Biologie. Chromatophoren. Abgerufen am 26. September 2022, von <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/chromatophoren/13923>
113. Lexikon der Biologie. Guanin. Abgerufen am 26. September 2022, von <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/guanin/29738>
114. Lexikon der Biologie. Flitzerzellen. Abgerufen am 26. September 2022, von <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/flitzerzellen/24951>
115. Wikipedia. (2022, 26. September) Chamäleons. Abgerufen am 14. Januar 2023, von <https://de.wikipedia.org/wiki/Chamäleons>
116. Wikipedia. (2022, 24. Oktober) Scholle (Fisch). Abgerufen am 14. Januar 2023, von [https://de.wikipedia.org/wiki/Scholle\\_\(Fisch\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Scholle_(Fisch))
117. Nasa Science. (2016, 10. August) Visible Light. Abgerufen am 14. Januar 2023, von [https://science.nasa.gov/ems/09\\_visiblelight](https://science.nasa.gov/ems/09_visiblelight)

# Impressum

Helen Weisbecker  
Studentin der FH Aachen  
FB04 Kommunikationsdesign  
Bachelorarbeit  
7. Semester  
Wintersemester 2022/23  
16. Januar 2023

