

Von der Farbe zur schillernden Pfauenfeder

KLAUS D. HINSCH

Dieses Dokument ist eine Ergänzung zum Artikel „Reine Ansichtssache“ über Schillerfarben in der Natur in **Physik in unserer Zeit**, 42. Jahrgang 2011, Nr. 5, S. 242. Es enthält zwei Abschnitte „Farbe“ und „Pfauenfedern im Regen“.

Farbe

Farbe ist ohne unseren visuellen Sinn nicht denkbar. Bestimmte Bereiche elektromagnetischer Strahlung werden von lichtempfindlichen Sensoren im Auge als Reiz wahrgenommen und führen zur Empfindung von Farbe. Die quantitative Beschreibung von Farbphänomenen ist ein schwieriges Vorhaben, da man sich nicht allein auf physikalische Grundlagen stützt. Um das subjektive Farbempfinden zu studieren, muss man auch die Ergebnisse farbpsychologischer Tests an Probanden einbeziehen. Ausgangspunkt für jede Farbklassifikation ist der als Licht wahrgenommene Teil des Sonnenspektrums mit Wellenlängen zwischen ungefähr 400 und 780 nm. Jeder schmale Ausschnitt dieses Spektrums erzeugt den charakteristischen Farbton einer Spektralfarbe, optimale Wahrnehmung erfolgt zwischen 440 nm (Blau) und 615 nm (Rot).

Die in diesem Artikel verwendeten digitalen Farbfotos führen die Farbinformation für jedes Bildelement (Pixel) als drei numerische Werte, die den Rot-, Grün- und Blauanteil an der jeweiligen Farbe angeben (RGB-Werte). Zur Darstellung auf Bildschirmen werden für jedes Pixel drei vom Auge nicht mehr aufgelöste winzige farbige Elemente hell geschaltet – dies ist mit einer Lupe leicht nachzuweisen.

Obwohl wir Millionen von Farben unterscheiden können, ist die Beschränkung auf drei Grundfarben ausreichend. Dies hängt damit zusammen, dass in unserem Auge drei Typen von Zäpfchen mit unterschiedlicher Farbempfindlichkeit arbeiten. Nach einem aufwändigen Standardisierungsprozess wird heute jede Farbe durch drei Parameter beschrieben und in der internationalen CIE-Normfarbtafel eingeordnet (CIE: Commission International de L'Éclairage) [1]. In diesem Diagramm liegen die Spektralfarben auf einer Hufeisenkurve von Rot nach Blau und die Purpurfarben auf der Verbindungsgeraden von deren Endpunkten. Jedem Ort innerhalb der so definierten Fläche ist eine Farbe zugeordnet, in ihrer Mitte (bei gleichen Anteilen der drei Parameter) liegt der Weißpunkt – der sich allerdings mit dem Typ der Beleuchtung verschiebt (siehe auch Download-Zusatztext zum Beitrag „Die Licht(r)evolution“ in Heft 2/2011). Auf der Verbindungsgeraden zweier Farben liegen ihre Mischprodukte, auf gegenüber liegenden Seiten des Weißpunktes Komplementärfarben. Satte Farben auf der Umrandung werden zum Weißpunkt hin ungesättigter.

Der Bereich der Farben, die sich bei einer Anwendung darstellen lassen, wird in der Farbtafel auf das von den dabei benutzten Primärfarben definierte Farbdreieck beschränkt. So hängen die RGB-Werte bei der Bildschirmdarstellung von den speziellen Eigenschaften der farbigen Felder auf dem Monitor ab. Es wird deutlich,

dass es nicht einfach ist, universell über Farben zu kommunizieren. Ich habe mich im Artikel über die Schillerfarben auf eine überschlägige quantitative Ergänzung der Farbeindrücke beschränkt.

Digitale Bildverarbeitungssysteme verfügen meist über eine Funktion, die Farbwerte am gewünschten Ort in einem Bild abzurufen. Dies können die RGB-Werte sein, oft werden aber auch weitere Werte angeboten. So können die Farben sehr übersichtlich in Zylinderkoordinaten platziert werden. Jedem Winkel entspricht ein Farbton H (englisch Hue) – von Rot bei 0° über Gelb (60°), Grün (120°), Cyan (180°) bis Blau (240°) und weiter über die Purpurfarben (Magenta 300°) wieder zu Rot. Der Abstand zur Zylinderachse gibt die Sättigung (Saturation) von $S = 0$ bis $S = 1$, die reinen Farben liegen also auf der äußeren Zylinderfläche. Parallel zur Achse wird die Helligkeit (Brightness) von $B = 0$ (unterer Zylinderdeckel) bis $B = 1$ (oberer Zylinderdeckel) verändert. Auf der Achse von unten nach oben bewegen wir uns demnach von Schwarz über alle Graustufen bis Weiß. Nach seinen Farbparametern wird diese Darstellung als HSB-System bezeichnet.

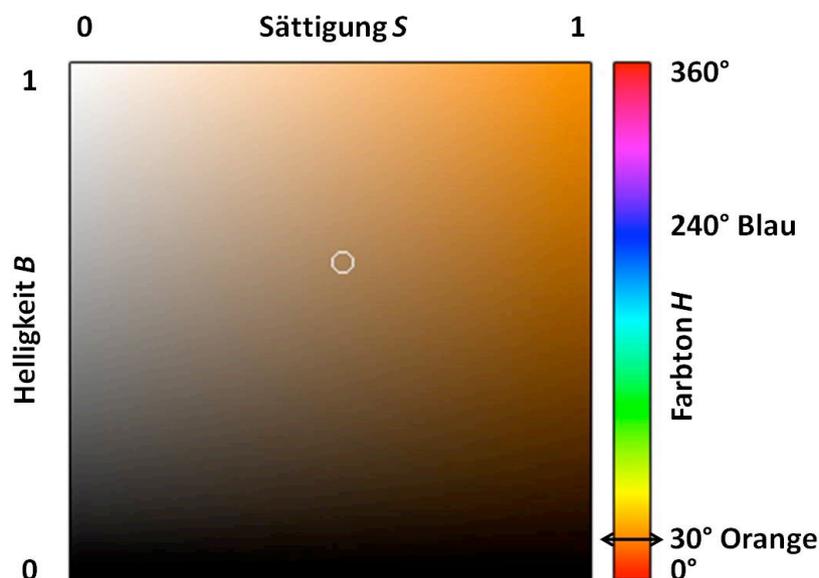


Abb. 1 Radialebene (Sättigung S und Helligkeit B) für den Farbton $H = 30^\circ$ (Orange) aus der HSB-Darstellung von Farben, daneben die Farbtonepalette. Die Spektralfarben der Farbtonpalette liegen zwischen den Winkeln $H = 0^\circ$ und $H = 240^\circ$, den Rest belegen die Purpurfarben. Anordnung nach [2].

Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Radialebene für den Farbton $H = 30^\circ$ (Orange). Es wird deutlich, wie sich der Charakter einer Farbe bei verschiedener Sättigung und Helligkeit verändert. Dunkle Versionen von Orange liefern die braunen Farben. Rechts ist die Palette aller über einen Schieberegler einzustellenden Farbtöne gezeigt (Darstellung nach [2]).

Angesichts dieser farbpsychologisch geprägten Skalen stellt sich die Frage nach der Korrelation mit physikalischen Parametern, beispielsweise mit dem Spektrum des betrachteten Lichtes. Weil unterschiedliche Spektralverteilungen die gleiche Farbempfindung auslösen können (Metamerie), gibt es keinen eindeutigen Zusammenhang. Man hat deshalb die „dominante Wellenlänge“ eingeführt, die angibt, welche Spektralfarbe den gleichen Farbton wie eine Probefarbe erzeugt. Sie ergibt sich aus der Farbtabelle als der Ort, an dem eine vom Weißpunkt über die Probefarbe verlängerte Gerade die Hufeisenkurve schneidet. Bei Purpurfarben verwendet man die Wellenlänge der Komplementärfarbe.

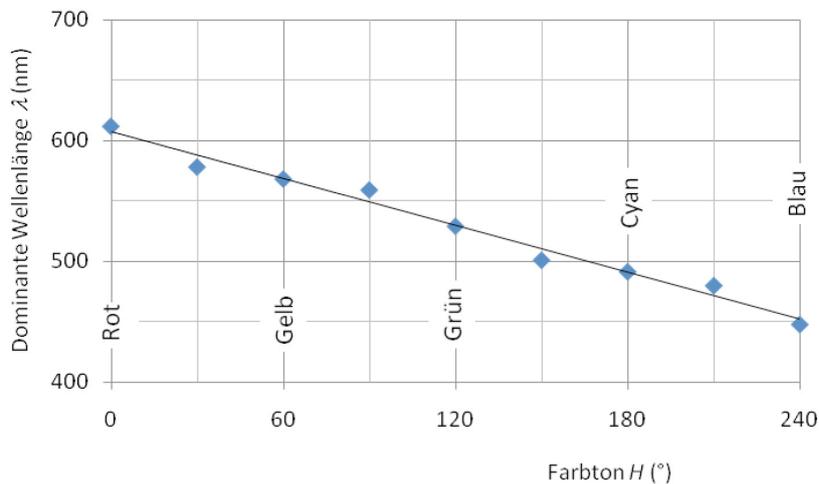


Abb. 2 Zusammenhang zwischen Farbtönen im Bereich der Spektralfarben und dominanter Wellenlänge; Daten aus [3].

Es wird deutlich, dass zur Interpretation unserer Experimente kein allgemein gültiger Zusammenhang zwischen dominanter Wellenlänge und Farbtönen existiert, da unter anderem Beleuchtung, Einstellungen der Digitalkamera und Bezugsfarben der Bildbearbeitung eine Rolle spielen. Unter standardisierten Bedingungen lässt sich die gewünschte Beziehung aber formulieren (Abbildung 2) [3]. Die mittlere Gerade in der Abbildung bedeutet, dass gleichen Wellenlängenschritten auch gleiche Farbtönschritte entsprechen.

Tatsächlich ist dies nicht der Fall, was im Diagramm an den von der Geraden abweichenden Punkten bei den ungeraden 30° -Vielfachen ersichtlich wird. Es ergibt sich eine leichte Welligkeit mit größten Steigungen (reduzierte Empfindlichkeit für die Wahrnehmung von Unterschieden in der Wellenlänge) bei R, G und B. Da einige Details unserer Experimente unbekannt sind und die Farbtönenbestimmung ohnehin nur begrenzt genau ist, wird zur Umrechnung die lineare Näherung benutzt. Das gesamte Thema ist Gegenstand einer ausführlichen Spezialliteratur.

Pfauenfedern im Regen

Die herrlichen Federn des Pfauenhahns mit den irisierenden Augenflecken haben nachweislich eine stimulierende Wirkung auf Pfauenhennen: Je kräftiger die Färbung, desto häufiger Paarungen. Es liegt daher nahe zu untersuchen, was aus dieser Farbenpracht bei Regen wird. Robert Hooke hat sich schon vor knapp 350 Jahren dieser Frage gewidmet und festgestellt: „I found by this, that water wetting these colour'd parts, destroy'd their colours“ [4].



Abb. 3 Pfauenfeder unter der Wasserdusche: a) Farbmuster im nassen Zustand; b) Farbmuster im trockenen Zustand, in den die Feder 10 min nach Befeuchtung zurückkehrt. Kennzeichnung charakteristischer Zonen im Federmuster nach [5].

Um die Farbenpracht aufzuheben, müsste Wasser die für die Farbe verantwortliche periodische Struktur in der Pfauenfeder in ihrer Regelmäßigkeit maßgeblich stören. Wir machen den entsprechenden Versuch. Abbildung 3a zeigt, wie der Bereich um das Auge auf einer Pfauenfeder im Sonnenlicht nach einer Wasserdusche aussieht. Die Feder ist etwas zerfranst, wir erkennen aber weiterhin deutlich das Augemuster – nur haben sich die Farben gegenüber dem trockenen Zustand, der sich nach ungefähr 10 Minuten wieder einstellt (Abb. 1b), grundlegend geändert. Wasser lässt das Muster also nicht verschwinden, wie Hooke verstanden werden könnte, aber es verändert die Farben.

Diese Farbänderungen sind sehr augenfällig. Die drei flächigen Zonen im Inneren haben sich von Tiefblau (nierenförmige Zentralzone I) in Grünblau, von Blaugrün (ovale Zone II) in Grün und von Olivbraun (eiförmige Zone III) in Braun verwandelt. Der ursprünglich zwischen Grün und Gelb liegende Farbton im ersten Ring 1 und im weiter außen liegenden Ring 3 erscheint im nassen Stadium auffallend in lachsfarbigem Rot. Alle diese Änderungen sind Ausdruck einer Farbverschiebung zu längeren Wellenlängen. Die anfangs purpurnen Gegenden am äußeren Rand von Zone III und in Ring 2 haben ihre Farbe verloren und erscheinen im nassen Zustand grau.

Diese visuellen Eindrücke lassen sich durch die im vorigen Abschnitt vorgestellte quantitative Farbanalyse ergänzen. An korrespondierenden Probestellen aus den typischen Zonen im Federmuster werden die Farbdaten aus beiden Bildern verglichen und die Farbtonwerte im nassen und trockenen Zustand bestimmt. Da die Federn auf den zu vergleichenden Bildern in ihrer Form etwas variieren, werden Schwankungen durch Mittelung über 33×33 Pixel ausgeglichen. So ergibt sich zum Beispiel für die Farbe Braun aus der nassen Zone III: $H = 25^\circ$, $S = 0,6$ und $B = 0,3$. Den Farbtönen werden wieder dominante Wellenlängen zugeordnet, aus denen die relative Änderung der Wellenlänge „Nass/Trocken“ berechnet wird. Für die

zentralen Zonen I und II und Ring 1 ergeben sich 7-9%, um die diese Bereiche „röter“ geworden sind. In der bräunlich olivfarbenen Zone III hat sich die Wellenlänge nur um 3 % in Richtung Rot verschoben. Eine Rotverschiebung der purpurnen Ausgangsfarbe von Ring 2 führt vom langwelligen Ende in den nicht mehr sichtbaren Bereich des Spektrums, es resultiert Grau.

Kann – wie beim Schmetterlingsflügel – das Auffüllen von Hohlräumen mit Flüssigkeit die Farbverschiebung erklären? In der Literatur findet sich ein Vorgängereperiment, bei dem ein grüner Federstrahl vom Pfau in Glyzerin (Brechungsindex $n = 1,47$) getaucht und über spektrale Reflexionsmessungen eine Wellenlängenänderung von 2 % ins Rote gefunden wurde [6]. Da der Effekt bei Wasser wegen des Brechungsindex von 1,33 noch geringer sein sollte, kann die gemessene Verschiebung von 7-9 % nur durch Beteiligung eines weiteren Prozesses erklärt werden.

Bei sonst konstanten Bedingungen können nach der Bragg-Formel neben Änderungen im Brechungsindex n auch solche in der Größenskala D für die angeführten relativen Änderungen der Wellenlänge verantwortlich gemacht werden. Es gilt zu prüfen, ob Keratin unter dem Einfluss von Wasser eine Längenänderung erfährt; seine Reaktion auf Feuchte ist aus anderen Zusammenhängen bekannt. So wird mit dem Haarhygrometer die relative Luftfeuchte über die Längenänderung eines Haares bestimmt, das aus Keratin besteht. Es ist also gut möglich, dass sich durch Einlagerung von Wasser in die Feder der für die optische Interferenz maßgebliche mittlere Abstand der Stäbchen aus Melanin vergrößert. Nach Abzug von 2 % durch Änderung von n müsste die für die Farbverschiebung erforderliche relative Längenänderung (Dehnung) bis zu 7% groß sein.

Ein solcher Betrag ist durchaus denkbar. Für Menschenhaar wird zum Beispiel bei einer Erhöhung der absorbierten Luftfeuchte von 0 % auf 33 % eine Dehnung von 2% in Längsrichtung und 16% in radialer Richtung angegeben [7]. Der Unterschied geht auf die faserige Struktur des Keratins und seine Vorzugsorientierung im Haar zurück. Auch in der Vogelfeder ist die Orientierung der Keratine von Bedeutung. So findet man zum Beispiel im Schaft der Feder zwei Lagen, in denen das Keratin einmal axial, im anderen Fall peripher orientiert ist [8]. Für einen endgültigen Schluss müsste man die strukturellen Einzelheiten des Keratins in den farbrelevanten Zonen der Federstrahlen kennen.

Von Volumenhologrammen ist ein ähnliches Phänomen der Farbänderung bekannt. Dort verkleinern sich die Abstände der bei der Aufnahme durch Interferenz erzeugten Gitterebenen in der fotografischen Emulsion, weil Silbersalze beim Fixieren ausgespült werden. Ein in Rot erwartetes rekonstruiertes Bild erscheint dann in Grün [9].

Die Farbverschiebung ist eine charakteristische Folge der Nano-Strukturen. Da die SEM-Aufnahmen für alle Zonen auf der Feder ähnliche Strukturen liefern, sollten die Zonen sich ähnlich verformen und auch ähnlich große Farbverschiebungen aufweisen. Der durch unsere Experimente gefundene deutlich geringere Wert in der braunen Zone fällt aus der Reihe und verlangt eine Erklärung. Die bisherigen Überlegungen setzten voraus, dass die Federfarbe ausschließlich als Strukturfarbe entstanden ist. Sollte sie aber einen Anteil Pigmentfarbe enthalten, würde dieser natürlich nicht an der Farbverschiebung teilnehmen – was das Endresultat verändert.

Hier kommen Messungen gelegen, in denen an verschieden farbigen Federstrahlen der spektrale Reflexionskoeffizient für senkrechten Einfall bestimmt wurde [6]. Die blauen und grünen Federstrahlen liefern entsprechend ihrer Farbreinheit relativ schmale Reflexionskurven mit einem Maximum bei ihrer jeweiligen Farbe von 470 nm und 530 nm. Für gelbe Federstrahlen ist die Kurve mit Maximum bei 570 nm fast doppelt so breit und zeigt noch ein sehr kleines Nebenmaximum bei kürzeren Wellenlängen. Die braunen Strahlen jedoch liefern eine Reflexionskurve mit zwei breiten Maxima von beinahe gleicher Höhe bei 610 nm und 460 nm.

Unsere Beobachtungen lassen sich gut verstehen, wenn das langwellige Maximum als Strukturfarbe und das kurzwellige durch die Wechselwirkung am Pigment Melanin entstanden sind. Die Gitterkonstante der braunen Federstrahlen und der bräunliche Farbton von Melanin im Durchlicht sprechen dafür. Dann schiebt sich nur der langwellige Peak bei Feuchte weiter ins Rote, während der kurzwellige an seiner Position bleibt. So ergibt sich eine geringere Gesamtverschiebung des wahrgenommenen Farbtons als bei einer reinen Strukturfarbe.

Die Farbexperimente mit Wasser an der Pfauenfeder haben auf das prinzipiell unterschiedliche Verhalten der beiden Farberzeugungsmechanismen in der Natur aufmerksam gemacht. Ob die Pfauenbalz bei Regen weniger erfolgreich ist, müssen nun die Verhaltensforscher klären.

Literatur

- [1] D.S. Falk et al., Ein Blick ins Licht, Birkhäuser Verlag, Basel 1990, S. 253; N. Welsch und C. C. Liebmann, Farben – Natur, Technik, Kunst; Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2004, S. 118.
- [2] Bildverarbeitungsprogramm Photoshop von Adobe Systems.
- [3] R. W. Pridmore, Roles of complementary colours in colour perception, Dissertation Macquarie University Sydney 2008, online hdl.handle.net/1959.14/89194.
- [4] R. Hooke, Micrographia, London 1665. Online unter www.gutenberg.org/files/15491/15491-h/15491-h.htm.
- [5] H. Durrer, Verh. Naturf. Ges. Basel **1962**, 73, 204.
- [6] J. Zi et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA **2003**, 100, 12576.
- [7] C. Popescu und H. Höcker, Chem. Soc. Rev. **2007**, 36, 1282.
- [8] R. H. C. Bonser und P. P. Purslow, Journ. Exp. Biology **1995**, 198, 1029.
- [9] R. J. Collier et al., Optical Holography, Academic Press, Burlington (US-MA) 1971, S. 228.