

2. Theoretischer Hintergrund

2.1. Was ist Farbe?

„Farbe ist diejenige Gesichtsempfindung eines dem Auge strukturlos erscheinenden Teiles des Gesichtsfeldes, durch die sich dieser Teil bei einäugiger Beobachtung mit unbewegtem Auge von einem gleichzeitig gesehenen, ebenfalls strukturlosen, angrenzenden Bezirk allein unterscheiden kann.“, so sagt es das Normblatt DIN 5033, Blatt 1. „Ja nee, is klar“, dachte in diesem Fall vermutlich nicht nur Atze Schröder, sondern auch ich. Im Folgenden möchte ich daher versuchen zu erklären, wie aus Licht Farbe wird, welche Arten von Farbe es gibt, wie Farbe wahrgenommen wird, wie sie gemessen werden kann und wie der Mensch versucht, Farbe in ein Korsett aus Definitionen und Normen zu zwängen (und dabei kläglich versagt). Zudem wird auf das visuelle System und die Farbwahrnehmung von Bienen eingegangen. Versuchen wir also ein bisschen Licht ins dunkle Farbenchaos zu bringen. In einem dritten Teil wird auf die theoretischen Hintergründe des Versuchsdesigns eingegangen.

Zuerst einmal muss deutlich klar werden, dass Farbe keine Eigenschaft von Objekten ist, sie kann nicht objektiv vermessen werden. Farbe ist ein subjektiver Sinneseindruck, den jeder Mensch individuell empfindet. Dennoch kann man den Entstehungsprozess von Farbe in drei gut erklärbaren Ebenen beschreiben: Es gibt eine physikalische, eine physiologische und eine psychologische Ebene (Abb. 1) (Bachmann & Bernhardt 2011).

Der Farbreiz spiegelt die physikalische Komponente wieder und kann als Lichtreiz, also als elektromagnetische Strahlung, die in das Auge des Betrachters fällt und die auf der Netzhaut befindlichen Photorezeptoren reizt, beschrieben werden (Bachmann & Bernhardt 2011). Ein Farbreiz kann auf zwei verschiedene Weisen entstehen und durch eine zugehörige Farbreizfunktion $\phi(\lambda)$ definiert werden (Lang 2004). Im ersten Fall tritt elektromagnetische Strahlung direkt in das Auge ein und löst dort eine Erregung der Photorezeptoren aus. In diesem Fall entspricht der Farbreiz der spektralen Zusammensetzung der einfallenden Strahlung $S(\lambda)$, also z.B. dem emittierten Strahlungsspektrum einer Glühlampe oder des Sonnenlichtes. Es gilt der Zusammenhang $\phi(\lambda) = S(\lambda)$ (Richter 1981). Im zweiten Fall trifft elektromagnetische Strahlung auf ein Objekt, wird von diesem Objekt reflektiert und tritt anschließend in das Auge des Betrachters (Lang 2004).

Der Farbreiz setzt sich aus den physikalischen Eigenschaften des Objekts, also Absorptions- und Reflexionseigenschaften (beschrieben durch den spektralen Remissionsgrad $\beta(\lambda)$), und der spektralen Zusammensetzung des Beleuchtungslichtes $S(\lambda)$ zusammen. Die zugehörige Farbreizfunktion lautet daher $\phi(\lambda) = S(\lambda) \cdot \beta(\lambda)$ (Richter 1981; Lang 2004). Handelt es sich bei dem Objekt um einen Farbfilter, der durchquert wird, wird der spektrale Remissionsgrad $\beta(\lambda)$ durch den spektralen Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ ersetzt. Der Farbreiz wird durch die Funktion $\phi(\lambda) = S(\lambda) \cdot \tau(\lambda)$ beschrieben (Richter 1981).

Die zweite Ebene ist die physiologische Ebene und wird durch die Farbvalenz repräsentiert. Die Farbvalenz spiegelt die Reaktion, die im Auge durch den Farbreiz ausgelöst wird, wieder und ist nur schwer greifbar. Wichtigstes Merkmal einer Farbvalenz ist, dass sie durch drei Maßzahlen eindeutig beschrieben werden kann. Vorstellen kann man sich das am besten, wenn man davon ausgeht, dass Farbe ein beliebiger Punkt in einem definierten dreidimensionalen Raum ist (z.B. einem Koordinatensystem). Die Lage des Punktes kann nun durch drei Vektoren, die sich in Richtung und Länge unterscheiden (= drei Maßzahlen), beschrieben werden. Ähnlich funktioniert dies auch im Auge eines Organismus. Hier beschreibt die Farbvalenz das, was in den Photorezeptoren durch den Farbreiz ausgelöst wird (Bachmann & Bernhardt 2011). Sowohl der Mensch als auch die Biene weisen drei verschiedene Typen von

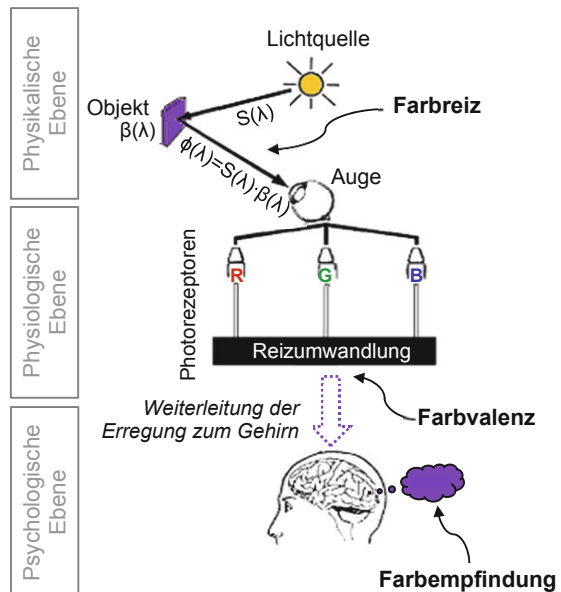


Abb. 1: Die Entstehung von ‚Farbe‘. Farbe ist lediglich eine Sinnesempfindung, die im Gehirn entsteht. Die Entstehung von Farbe verläuft über drei Ebenen (physikalisch, physiologisch und psychologisch) (Grafik nach Böhringer et al 2011; Seite 205).

Photorezeptoren auf, die für das Farbsehen zuständig sind. Fällt ein Farbreiz ins Auge des Betrachters, werden dort die Photorezeptortypen entsprechend der spektralen Zusammensetzung des Farbreizes erregt. Die drei Erregungswerte der Rezeptoren ergeben die drei Maßzahlen der Farbvalenz (Böhringer et al 2011).

Die dritte Ebene der Farbentstehung ist die Farbempfindung, die durch neuronale Verarbeitung im Gehirn entsteht (Lang 2004; Hagendorf 2011). Dieser Vorgang ist sehr komplex und es gibt eine Vielzahl von Phänomenen, die die Farbempfindung beeinflusst. Es ist somit nahezu unmöglich, den durch die Farbempfindung erzeugten Sinneseindruck „Farbe“ zu quantifizieren. Farbe ist also eine rein subjektive Empfindung (Richter 1981). Auch wenn die Farbempfindung individuell ist, hat es sich durchgesetzt, Farbempfindungen durch die drei Kenngrößen Farbton, Farbsättigung und Farbhelligkeit zu charakterisieren (Bachmann & Bernhardt 2011).

2.2. Eigenschaften von Licht

Umgangssprachlich bezeichnet Licht den Teil der elektromagnetischen Strahlung, der für das menschliche Auge wahrnehmbar ist, also der Bereich zwischen 380 und 780 nm (Welsch & Liebmann 2012). Genau genommen ist diese Beschreibung aber unzureichend, da auch die angrenzenden Wellenlängenbereiche der elektromagnetischen Strahlung essentiell für die Entstehung von Farbeindrücken sein können. So ist beispielweise für Bienen auch kurzwellige Strahlung ab 300 nm für die Entstehung von Farbeindrücken relevant. Eine für diese Arbeit geeignetere Beschreibung von Licht umfasst daher ultraviolettes Licht (respektive ultraviolettes Spektrum) und sichtbares Licht (respektive visuelles Spektrum). Nach DIN 5031-7 umfasst das visuelle Spektrum (abgekürzt: VIS) den Wellenlängenbereich von 380 bis 780 nm, also den vom menschlichen Auge wahrnehmbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums und das ultraviolette Spektrum des Wellenlängenbereichs von 100 bis 380 nm.

Die physikalische Besonderheit der elektromagnetischen Strahlung liegt in ihrem Welle-Teilchen-Dualismus (Welsch & Liebmann 2012). Das bedeutet, dass ‚Licht‘ sowohl als Teilchen als auch als Welle beschrieben werden kann und somit unterschiedliche Zusammenhänge entstehen. Um zu verstehen, wie aus Licht ‚Farbe‘ wird, hilft es, die folgenden Zusammenhänge im Hinter-

kopf zu behalten. Durch den Wellencharakter elektromagnetischer Strahlung kann diese durch die Wellenlänge (λ) oder die Frequenz (ν) beschrieben werden. Dabei besteht der Zusammenhang:

$$\nu = c / \lambda$$

mit $c = 3 \times 10^{10}$ cm/s (Lichtgeschwindigkeit). Elektromagnetische Strahlung mit einer kurzen Wellenlänge weist also eine hohe Frequenz auf und umgekehrt (Bruice 2007). Zudem kann die Energie (E) eines Lichtquants folgendermaßen beschrieben werden:

$$E = h\nu = hc / \lambda$$

mit h als Konstante (Planck'sches Wirkungsquantum). Elektromagnetische Strahlung mit einer kurzen Wellenlänge und einer hohen Frequenz ist folglich energiereich (Bruice 2007).

Die bekanntesten Untersuchungen zum Verhalten von Licht führte Isaac Newton in seinen drei Versuchen mit Glasprismen durch, deren Ergebnisse Wissensgrundlage für viele heutzutage selbstverständlich wirkende Erkenntnisse im Bereich des Farbensehens darstellen. In seinem ersten Versuch konnte Newton zeigen, dass sich weißes Licht bei dem Durchtritt durch ein Prisma in sieben Farbbanden aufspaltet, die heute als Spektralfarben bekannt sind (Abb. 2; links). Physikalische Ursache hierfür ist, dass sich das Licht verschiedener Wellenlängen unterschiedlich schnell im Prisma ausbreitet (Kuchling 2007). Langwelliges Licht breitet sich schneller innerhalb eines Prismas aus und wird somit weniger stark abgelenkt als kurzwelliges blaues Licht² (Welsch & Liebmann 2012). In seinem zweiten Versuch zeigte Newton, dass sich eine isolierte Farbbande beim Durchtritt durch ein weiteres Prisma nicht weiter aufspalten lässt (Abb. 2; mittig). Damit lieferte er den Beweis, dass die Spektralfarben die ‚Grundeinheiten‘ von Licht darstellen. In seinem dritten Versuch zeigte Newton, dass sich aufgespaltenes Licht durch den Durchtritt durch eine Linse wieder zu weißem Licht zusammenführen lässt (Abb. 2; rechts).

2 Newton sieht Licht allerdings als Teilchen an. Er nannte diese Teilchen „Korpuskeln“ und ging davon aus, dass sie sich in Farbe, Größe und somit auch in Geschwindigkeit unterscheiden.

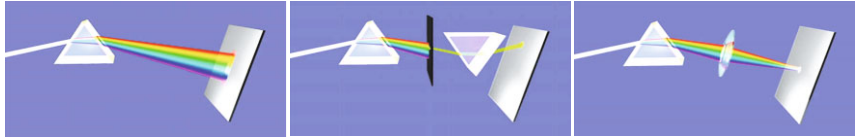


Abb. 2: Newtonsche Prismenversuche. Links: Erster Versuch, der zeigt, dass weißes Licht beim Durchtritt durch ein Prisma in sieben Spektralfarben aufgespalten wird. Mittig: Eine Spektralfarbe kann durch den Durchtritt durch ein Prisma nicht weiter aufgespalten werden (zweiter Versuch). Rechts: Im dritten Versuch zeigte Newton, dass die Spektralfarben beim Durchtritt durch eine Linse wieder zu weißem Licht zusammengeführt werden kann (Grafik nach Welsch & Liebmann 2012; Seite 294 & 295).

2.3. Licht- und Körperfarben

2.3.1. Lichtfarben

Lichtfarben sind ‚Farben‘, die von Selbstleuchtern ausgehen, also z.B. das Licht einer Glühbirne oder eines Farbstrahlers. Die Farbreizfunktion von Lichtfarben entspricht also lediglich der spektralen Zusammensetzung des Selbstleuchters. Als primäre Lichtfarben oder primäre Spektralfarben³ werden die Farben Rot, Grün und Blau bezeichnet (Welsch & Liebmann 2012). Lichtfarben mischen sich nach den Gesetzen der additiven Farbmischung (siehe Kapitel 2.4.; erster Abschnitt).

2.3.2. Körperfarben

Zu den Körperfarben gehören Durchsichtsfarben wie Farbfilter sowie Auflichtsfarben wie Pigmente und andere Malmittel (Richter 1981). Körperfarben entstehen dadurch, dass Licht auf eine Oberfläche trifft, dort teilweise absorbiert und teilweise reflektiert (oder transmittiert) wird und anschließend in das Auge des Betrachters fällt. Der Farbreiz einer Körperfarbe wird also durch die spektrale Zusammensetzung der Beleuchtungsfarbe und die optischen Eigenschaften des angestrahlten Objekts bestimmt (Richter 1981). Die primären Körperfarben, Cyan, Magenta und Gelb bilden die Grundfarben

³ Welsch & Liebmann (2012) verwenden den Begriff ‚primäre Spektralfarben‘ für die Lichtfarben Rot, Grün und Blau und den Begriff ‚sekundäre Spektralfarben‘ für die Mischfarben der primären Spektralfarben, also Cyan, Gelb und Magenta. In beiden Fällen sollte aber nicht von Spektralfarben, sondern lediglich von Lichtfarben gesprochen werden. Der Begriff ‚Spektralfarbe‘ sollte den sieben Farben, die bei der Lichtbrechung im Prisma entstehen, vorbehalten sein (Rot, Orange, Gelb, Grün, Cyanblau, Ultramarinblau und Violettblau).

der subtraktiven Farbmischung nach deren Prinzip Körperfarben gemischt werden (Welsch & Liebmann 2012).

Die wahrgenommene Farbigkeit von Aufsichtsfarben, den gängigeren Körperfarben, entsteht aufgrund von Lichtreflexion und Lichtabsorption. Das grundlegende Prinzip besteht darin, dass bei der Absorption eines Lichtquants die Elektronen eines Moleküls angeregt werden und somit in ein höheres Energieniveau überführt werden. Bei der Rückführung der angeregten Elektronen in ihren ursprünglichen Energiezustand wird die Energie als Lichtstrahlung oder Wärmestrahlung abgegeben (Welsch & Liebmann 2012). Je größer der Abstand zwischen den beiden Energieniveaus ist, desto energiereicher muss das einfallende Licht sein, um den Übergang zu gewährleisten. Bei einem großen Abstand zwischen den Energieniveaus werden energiereiche Lichtquanten, also kurzwelliges Licht wie beispielsweise ultraviolettes Licht, absorbiert; bei einem geringen Abstand zwischen den Energieniveaus werden energieärmere Lichtquanten, also langwelliges Licht wie z.B. rotes Licht, absorbiert (Bruice 2007). Verbindungen, die ein delokalisiertes π -Elektronensystem und viele konjugierte Doppelbindungen aufweisen (z.B. organische Verbindungen), sind besonders gut geeignet, um elektromagnetische Strahlung aus dem UV/VIS-Spektrum zu absorbieren, da der energetische Abstand zwischen dem Grundzustand und dem angeregten Zustand entsprechend gering ist (Bruice 2007). Trifft elektromagnetische Strahlung aus dem UV/VIS-Bereich auf ein solches Molekül, werden entsprechend der energetischen Bedingungen der Elektronen innerhalb des Moleküls, Lichtquanten der entsprechenden Wellenlänge absorbiert und die übrigen Bereiche der elektromagnetischen Strahlung reflektiert. Das reflektierte Licht kann als Farbreiz in das Auge des Betrachters fallen und nach der neuronalen Verarbeitung eine Farbempfindung im Gehirn erzeugen (Bruice 2007; Welsch & Liebmann 2012).

Die wichtigsten Vertreter der Körperfarben sind Pigmente, also „kleine, meist kristalline, unlösliche, farbgebende Partikel“ (Welsch & Liebmann 2012), und Farbstoffe, also „chemische Substanzen, die entweder in Lösungen oder in Bindemitteln [...] löslich sind“ (Welsch & Liebmann 2012). Da in dieser Arbeit mit Pigmenten in Pulverform gearbeitet wird, soll im Folgenden kurz auf die Eigenschaften von Pigmenten eingegangen werden.

Die Farbigkeit von Pigmenten wird durch viele verschiedene Eigenschaften wie „Korngröße, Korngrößenverteilung, Oberflächenbeschaffenheit, Kristallmodifikation und Kristallform“ (Welsch & Liebmann 2012) beeinflusst, sodass es schwierig ist, das Verhalten von Pigmenten in Bindemitteln oder in Mischung mit anderen Pigmenten vorherzusagen. Insbesondere die Oberflächenstruktur und die damit verbundene Streuung des reflektierten Lichts beeinflusst die Zusammensetzung des Farbreizes und somit auch die hervorgerufene Farbempfindung stark. Prinzipiell können Pigmente in vier Kategorien eingeteilt werden: a) natürlich anorganisch, b) natürlich organisch, c) künstlich anorganisch und d) künstlich organisch (Welsch & Liebmann 2012). Zu den natürlichen Pigmenten gehören auch verschiedene Pflanzenfarbstoffe, die für die Färbung verschiedener Pflanzenteile verantwortlich sind. Zu den wichtigsten Blütenfarbstoffen gehören verschiedene Pigmente, Pigmentmischungen oder Komplexe mit Metallionen oder Kohlenhydraten (Tab. 1; zusammengefasst aus Welsch & Liebmann 2012).

Tab. 1: Übersicht der wichtigsten Blütenfarbstoffe. Die Tabelle zeigt einen kurzen Überblick über die wichtigsten Gruppen der Blütenfarbstoffe, ihre chemischen Eigenschaften, die die Lokalisation in der Blüte bestimmen und die Färbung der Blüte.

Blütenfarbstoff	(Wichtige Untergruppen)	Chemische Eigenschaften	Lokalisation in der Blüte	Blütenfarbe ⁴	Vertreter (Beispiele)
Betalaine	Betacyane	wasserlöslich	Vakuole	rot bis violett	Betanin
	Betaxanthine	s.o.	s.o.	gelb	Indicanxanthin
Carotinoide	Carotine	fettlöslich	Chromoplasten Zellmembran	gelb bis orange	β-Carotin Lycopin
	Xantophylle	s.o.	s.o.	s.o.	Lutein Fucoxanthin
Flavonoide	Flavone	wasserlöslich	Vakuole	gelb bis orange	Morin Luteolin
	Anthocyane	s.o.	s.o.	blau bis rötlich	Anthocyanin
					Cyanidin
					Pelargonidin Delphinidin
	Flavonole	s.o.	s.o.	gelb	Quercitin Kämpferol

4 Die aufgeführten Begriffe entsprechen der Farbempfindung durch den Menschen.

Für die Durchführung der Farbwahlversuche in dieser Arbeit wurden aus Kostengründen künstliche Pigmente verwendet. In der Regel handelt es sich dabei um günstige Theaterfarben oder Malfarben, bei denen organische Pigmente in Calciumcarbonat gebunden sind.

2.4. Additive, subtraktive und autotypische Farbmischung

2.4.1. Die additive Farbmischung

Unter additiver Farbmischung versteht man das Mischen von Lichtfarben (Bachmann & Bernhardt 2011). Bei der Mischung der drei primären Lichtfarben Rot, Grün und Blau entsteht Weiß. Ebenso kann Weiß erzeugt werden, wenn eine sekundäre Lichtfarbe (also Cyan, Magenta und Gelb) mit der verbleibenden primären Lichtfarbe gemischt wird (Abb. 3; links). Die Mischfarben sind sehr gut vorhersagbar, da die additive Farbmischung einer mathematischen Regel folgt:

Die spektralen Zusammensetzungen ($S(\lambda)$) der einzelnen Lichtkomponenten werden addiert (Abb. 3; rechts).

Daraus resultiert eine der wichtigsten Eigenschaften der additiven Farbmischung, nämlich die höhere Intensität der Mischfarbe im Vergleich zur Intensität der Grundfarben (die Mischfarbe wirkt heller) (von Campenhausen 1981).

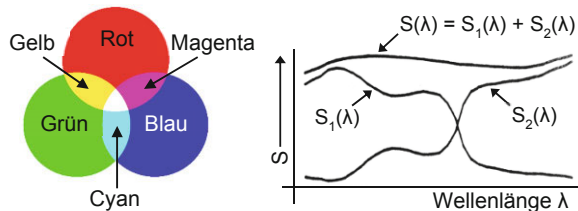


Abb. 3: Additive Farbmischung von Lichtfarben. Links: Das allgemeine Prinzip. Weiß lässt sich entweder aus den primären Lichtfarben Rot, Grün und Blau oder aus einer sekundären und der verbleibenden primären Lichtfarbe (z.B. Cyan und Rot) mischen (Grafik nach Beyerer et al 2012; Seite 206). Rechts: Die mathematische Grundlage der additiven Farbmischung. Zwei Lichtfarben mit der spektralen Zusammensetzung $S_1(\lambda)$ und $S_2(\lambda)$ addieren sich zu der gemischten Lichtfarbe ($S(\lambda)$). Die Mischfarbe wirkt daher heller (Grafik nach von Campenhausen 1981; Seite 151).

Die additive Farbmischung kann auf drei Weisen erzeugt werden (Richter 1981):

- 1) Zwei oder mehr Lichtfarben treten gleichzeitig und räumlich gebündelt in das Auge ein.

Beispiel: Ein grüner und ein roter Farbstrahler werfen Licht auf die gleiche Stelle einer weißen Leinwand. Das zurückgeworfene gelbe Licht tritt gleichzeitig und räumlich gebündelt auf die Netzhaut.

- 2) Zwei oder mehr Lichtfarben treten räumlich gebündelt, aber zeitlich nacheinander in das Auge ein.

Beispiel: Dreht man einen Farbkreis mit verschiedenen farbigen Flächen schnell genug, nehmen wir nicht die einzelnen Farben der Kreissegmente, sondern deren Mischfarbe wahr.

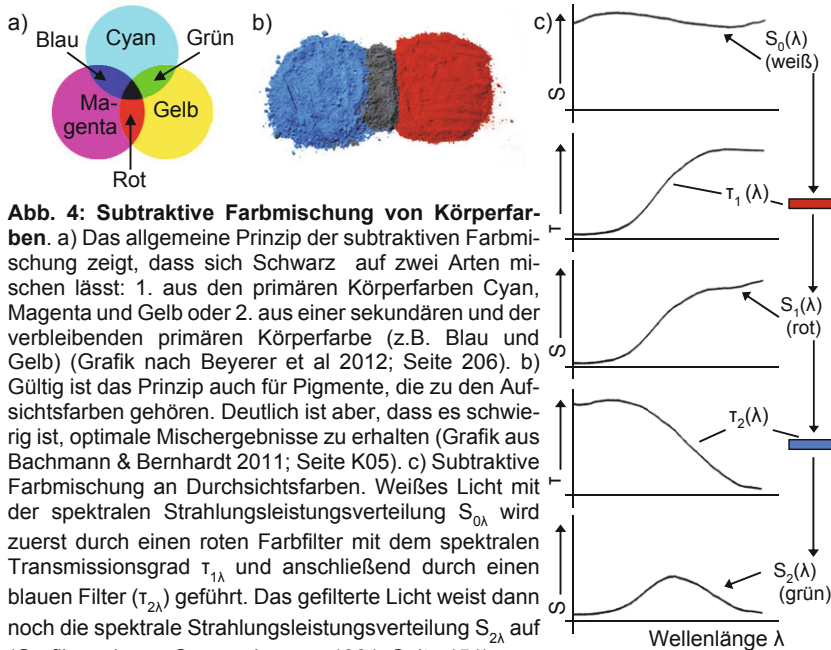
- 3) Zwei oder mehr Lichtfarben treten gleichzeitig, aber an verschiedenen Stellen in das Auge ein.

Beispiel: Ein Computerbildschirm arbeitet mit den Farben Rot, Grün und Blau und stellt diese in Form von winzigen Punkten dar. Das menschliche Auge vermag die einzelnen Punkte nicht aufzulösen und nimmt die Mischfarben wahr.

Wichtig ist, dass das räumliche und zeitliche Auflösungsvermögen des menschlichen Auges dabei berücksichtigt wird.

2.4.2. Die subtraktive Farbmischung

Die subtraktive Farbmischung bezieht sich auf das Mischverhalten von Körperfarben und gilt sowohl für die Mischung von Aufsichtsfarben als auch für die Mischung von Durchsichtsfarben (Bachmann & Bernhardt 2011). Durch Mischung der drei primären Körperfarben Cyan, Magenta und Gelb entsteht Schwarz. Auch durch das Mischen einer sekundären Körperfarbe (also Rot, Grün und Blau) und der verbleibenden primären Körperfarbe (z.B. Cyan und Rot) entsteht Schwarz (Abb. 4a). Am deutlichsten wird das Prinzip der subtraktiven Farbmischung, wenn man mehrere farbige Filter übereinander legt (Abb. 4c). Weißes Licht mit der spektralen Strahlungsleistungsverteilung $S_0(\lambda)$ wird durch einen roten Farbfilter mit dem spektralen Transmissionsgrad $\tau_1(\lambda)$ geschickt. Das austretende rote Licht mit $S_1(\lambda)$ wird durch einen zweiten, blauen Filter mit dem spektralen Transmissionsgrad $\tau_2(\lambda)$ geschickt. Das gefilterte Licht weist die spektrale Strahlungsverteilung $S_2(\lambda)$ und erscheint grün für den menschlichen Betrachter (von Campenhausen 1981). Auch die Mischung von verschiedenen farbigen Pigmenten verläuft nach dem Prinzip der subtraktiven Farbmischung (Abb. 4b), wobei eine genaue Vorhersage der Mischfarbe aufgrund verschiedener Einflüsse wie Oberflächenbeschaffenheit und Partikelgröße der Pigmente nicht möglich ist (Bachmann & Bernhardt 2011). Beide Fälle zeigen, dass die Intensität der Mischfarbe geringer als die der Ausgangsfarbe ist (Welsch & Liebmann 2012).



2.4.3. Die autotypische Farbmischung

Die autotypische Farbmischung ist eine Kombination aus additiver und subtraktiver Farbmischung und findet insbesondere beim Vierfarbendruck Anwendung (Welsch & Liebmann 2012). Bei gängigen Druckverfahren werden zur Mischung von Farbe zwei oder drei der primären Körperfarben (Cyan, Magenta und Gelb) lasierend übereinander gedruckt (subtraktive Farbmischung). Das Druckbild wird allerdings nicht durch den flächendeckenden Druck nach subtraktiver Farbmischung erzeugt, sondern durch das Nebeneinanderdrucken vieler kleiner Druckpunkte, deren Größe so gewählt ist, dass das menschliche Auge sie nicht als einzelne Punkte auflösen vermag (Böhringer et al 2011). Zudem enthält das Druckbild oft nicht bedruckte Bereiche, an denen das Papier durchschimmert. Die additive Komponente der autotypischen Farbmischung setzt sich also aus der Nutzung von farbigen Druckpunkten und der Addition der Absorptionseigenschaften des Papiers zusammen (Welsch & Liebmann 2012). Die spektrale Zusammensetzung

Farbpräferenzen bei Stachellosen Bienen und Hummeln
Analyse unter Berücksichtigung einzelner
Farbparameter

Bossems, J.

2015, XX, 170 S. 51 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-09798-1