

Farben – zwischen Fiktion und Realität

Farben haben eine objektive physikalische Basis. Unsere Farbsensoren im Auge, die Netzhaut und das Gehirn transformieren jedoch die physikalischen Signale auf vielfältige Weise. Der Artikel zeigt, wie weit man Farben objektivieren kann und wie technische Geräte uns dazu bringen, verschiedenste Farben zu empfinden, die gar nicht vorhanden sind.

Auf unserer Netzhaut befinden sich zwei verschiedene Licht-Rezeptorsysteme, die sehr empfindlichen Stäbchen für nächtliche schwarz-weiß Bilder und die weniger empfindlichen Zapfen für farbige Bilder am Tag. Letztere liegen in drei Varianten vor, die ihre maximale Empfindlichkeit bei Rot (600 nm), Grün (550 nm) und Blau (450 nm) aufweisen (Angaben der Wellenlängen von monochromatischem Licht in Nanometern, nm).

Farbraum und Farbdigramm

Mit einem sehr aufwändigen und komplizierten Verfahren wurden in den 1920er-Jahren statistische Mittelwerte für die drei Empfindlichkeitskurven f_1 , f_2 und f_3 als Funktion der Lichtwellenlänge λ gefunden (Abb. 1). Die Resultate wurden 1931 durch die Commission Internationale de l'Éclairage zusammengestellt und sind bis heute nur wenig modifiziert worden. Interessant ist, dass sich die Funktionen f_1 für rotes und f_2 für grünes Licht stark überlappen und dass die rot-empfindlichen Zapfen auch im blauen Spektralbereich ein Nebenmaximum haben. Jedes Lichtspektrum, das wir sehen können, wird gemäss diesen Funktionen auf drei Signale reduziert. Jeder subjektive Farbeindruck entspricht deshalb einem Punkt in einem dreidimensionalen Farbraum.

Unterschiedliche Lichtintensitäten derselben Farbe liegen auf einem Strahl, der vom Nullpunkt des Farbraums ausgeht. Der Nullpunkt entspricht der Empfindung Schwarz, was der vollständigen Abwesenheit von Licht entspricht (Schwarz ist deshalb keine Farbe). Nahe beim Nullpunkt befindet sich ein Graubereich, in der nur die Stäbchen Signale erzeugen können, weshalb man bei den entsprechenden kleinen Lichtintensitäten keine Farben sehen kann.

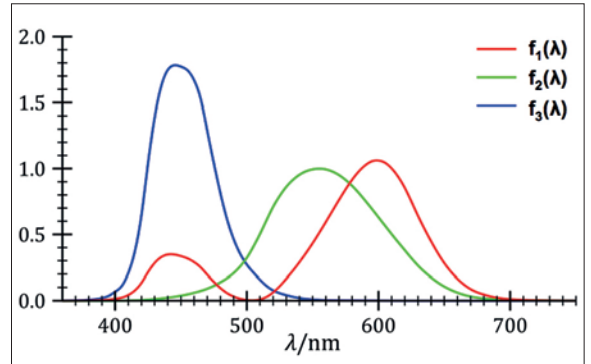


Abb. 1: Normierte Farbempfindlichkeits-Funktionen der Commission Internationale de l'Éclairage CIE. Die Fläche unterhalb jeder Kurve ist dieselbe.

gen können, weshalb man bei den entsprechenden kleinen Lichtintensitäten keine Farben sehen kann.

In etwas grösserem Abstand vom Nullpunkt sprechen die Zapfen zwar an, geben aber erst sehr kleine und unsichere Signale. In diesem Braunbereich können keine Standards definiert werden, weil die individuellen Empfindungsunterschiede viel zu gross sind. Für Farben hat man sich deshalb auf eine angenehme Standard-Lichtintensität geeinigt. Der entsprechende Farbbereich ist ein Achtel der Oberfläche einer Kugel um den Nullpunkt des Farbraums (nur positive Halbachsen). Der Radius dieser Kugel ist gleich der Standardintensität, die auf 100 % oder 1 normiert wird. Der dreidimensionale Farbraum wird dadurch auf eine zweidimensionale Kugelfläche reduziert, die einem Dreieck mit drei rechten Winkeln entspricht. Glättet man diese gekrümmte Fläche, erhält man das in Abb. 2 dargestellte internationale Farbdigramm mit den zwei Koordinatenachsen x und y , die der relativen Intensität von Rot und Grün entsprechen.

Die relative Intensität von Blau ist definitionsgemäss $z=1-x-y$; die z -Achse ist deshalb nicht notwendig. Das sphärische Dreieck wird bei der Glättung zu einem ebenen Dreieck mit Eckpunkten bei (1/0), (0/1) und (0/0). Auf Grund der Überlappung der in Abb. 1 gezeigten Empfindlichkeitskurven ist die reine rote Spektralfarbe mit der grössten noch sichtbaren Wellenlänge von 750 nm nicht bei (1/0), sondern bei (0,73/0,27), weil auch die Grün-Rezeptoren 27 % zur Empfindung beitragen. Analoges gilt für die grüne

Wellenlänge von 520 nm, die bei (0,07/0,84) liegt, entsprechend den Rezeptorsignalen Rot 7%, Grün 84% und Blau 9%. Die kürzeste sichtbare Wellenlänge von 400 nm liegt bei (0,17/0,00) und wird zu 83% durch die Blau- und zu 17% durch die Rot-Rezeptoren bestimmt.

Farbmischungen und Komplementärfarben

Die reinen Spektralfarben, wie sie beispielsweise aus der Zerlegung von Sonnenlicht durch ein Glasprisma entstehen, liegen am Rand des Farbdigramms. In Abb. 2 sind ihre Wellenlängen in Nanometern angegeben. Alle Farben im Innern des Farbdigramms sind Farbmischungen. Interessant ist, dass jede Mischfarbe aus zwei reinen Farben hergestellt werden kann, wobei jeweils die eine reine Farbe beliebig gewählt werden kann. So kann z.B. die grüne Mischfarbe bei (0,3/0,6) hergestellt werden durch reines Rot mit 700 nm und reinem Blau-Grün mit 515 nm. Dasselbe Grün entsteht aber auch aus der additiven Mischung der Mischfarben, die mit R und G bezeichnet sind, da alle Punkte auf derselben Geraden liegen. Weiss liegt im Zentrum des Farbdigramms und Komplementärfarben, die addiert definitionsgemäss Weiss ergeben, liegen so, dass ihre Verbindungslinie durch den Weisspunkt führt.

Anwendung für RGB-Farbmonitore

Farbmonitore erzeugen die Farbeindrücke mit Hilfe additiver Mischungen von drei Primärfarben, die mit R, G und B bezeichnet werden. Um möglichst viele Farbeindrücke (für das menschliche Auge) erzeugen zu können, müssen diese drei Primärfarben so gewählt werden, dass das durch sie gebildete Dreieck eine möglichst grosse Fläche des Farbdigramms abdeckt, denn nur die Farben im Innern des Dreiecks können durch Mischung erreicht werden. Die Punkte R, G und B in Abb. 2 sind ein Beispiel für eine mögliche Wahl. Die RGB-Werte liegen vielfach zwischen 0 und 255 und können mit 8 Bit oder 1 Byte dargestellt werden. Wichtig ist, dass der Farbmonitor so konstruiert und eingestellt ist, dass $R=G=B=255$ Weiss ergibt. $R=G=B=0$ entspricht Schwarz und Werte dazwischen sind Graustufen.

In Abb. 2 haben die RGB-Primärfarben die Koordinaten $R=(0,61/0,35)$, $G=(0,20/0,71)$, $B=(0,16/0,08)$. Wollen wir ein RGB-Tripel in x-y-Koordinaten umrechnen, müssen wir die RGB-Werte zuerst normie-

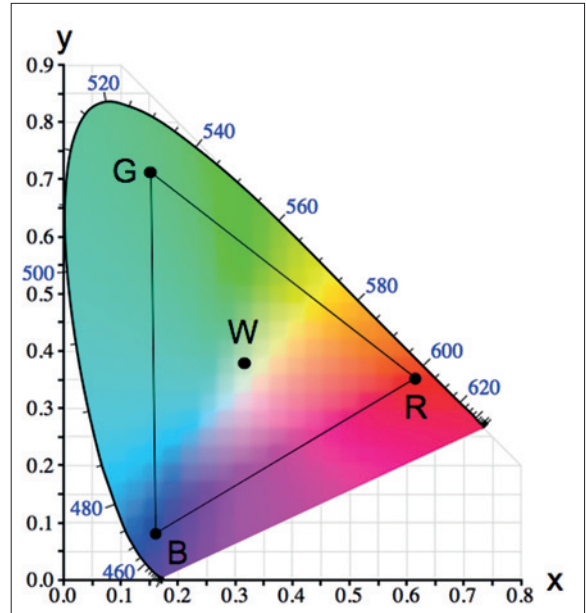


Abb. 2: Normiertes x-y-Farbdigramm. Erklärungen im Text. Man beachte, dass die angegebenen Farben approximativ sind, da es keinen Monitor und kein Druckverfahren gibt, um alle Farben im Diagramm darstellen zu können. Die Punkte R, G, B sind durch den Autor geschätzte Primärfarben eines RGB-Monitors. W ist der Weisspunkt.

ren. Dazu bilden wir die Summe $R+G+B$ und dividieren alle drei Werte durch diese Summe, wodurch wir die normierten rgb-Werte erhalten ($r+g+b=1$ oder $g=1-r-b$). Mit Hilfe der Vektorrechnung ergibt sich:

$$x = 0,61 r + 0,16 b + 0,20 (1-r-b)$$

$$y = 0,35 r + 0,08 b + 0,71 (1-r-b)$$

Wie erwartet gibt $RGB=(255/0/0)$ die Werte $rgb=(1/0/0)$ und $(x/y) = (0,61/0,35)=R$. Weiss W liegt bei $rgb=(0,33/0,33/0,33)$, also im Schwerpunkt des Dreiecks mit Ecken R, G, B bei $(x/y) = (0,32/0,38)$.

«Wir sehen die Dinge nicht wie sie sind, sondern wie wir sind.» Dieses Zitat aus dem Talmud wird einleuchtend illustriert durch RGB-Farbmonitore. Diese rufen in uns beispielsweise die Empfindung Gelb hervor, indem sie uns eine Mischung von Rot und Grün offerieren, die wir nicht von reinem Gelb (um 570 nm) unterscheiden können. Es ist deshalb zu erwarten, dass Tiere (insbesondere Insekten) die Farbqualität unserer Monitore als mangelhaft bis schlecht beurteilen würden.

Fritz Gassmann

Der Autor ist Physiker und arbeitete früher am Paul Scherrer Institut PSI in Villigen.