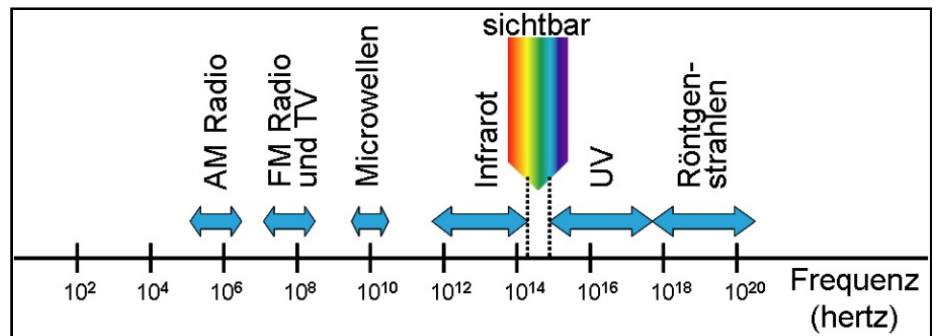


4. Farbe

Farbe ist eine der Grundessenzen der Computergraphik. Farbe richtig zu verstehen und zu handhaben ist ein Grundwerkzeug für Computergraphiker. Das häufig verwendete RGB-Farbmodell ist jedoch nicht in der Lage, alle Farben darzustellen, und auch sonst sehr approximativ. Viele Farbberechnungen werden meist nur näherungsweise gemacht (was oft reicht), und die exakte Farbenlehre ist sehr komplex.

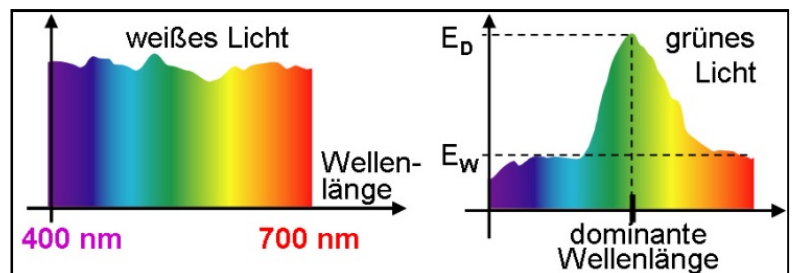
Was ist Farbe?

Unser Auge kann elektromagnetische Strahlung im eher engen Frequenzbereich zwischen etwa $3,8 \cdot 10^{14}$ Hz (~ 780 nm) und $7,8 \cdot 10^{14}$ Hz (~ 380 nm) erkennen. Dabei empfinden wir diese Strahlung als *Licht*. Dieser sichtbare Bereich ist von Mensch zu Mensch leicht unterschiedlich, und viele Tiere haben andere Grenzen. Andere Frequenzbereiche dienen anderen Zwecken (siehe Diagramm). Unser Auge kann innerhalb des sichtbaren Bereiches sogar unterscheiden, welche Frequenz die Strahlung hat, das empfinden wir dann als unterschiedliche *Farben*. Langwelligeres Licht (also niedrigere Frequenz) empfinden wir als rot, kurzwelligeres Licht (also höhere Frequenz) als blau bis violett. Dazwischen liegen alle Regenbogenfarben.



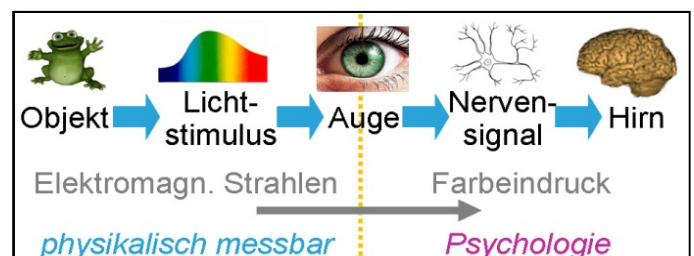
[zur Erinnerung: $c = \lambda \cdot f$, wobei c ... Lichtgeschwindigkeit, λ ... Wellenlänge, f ... Frequenz]

Tatsächlich kommt in der Natur aber höchst selten spektralreines Licht vor (das nur genau eine Wellenlänge hat), sondern meist sehen wir eine Mischung aus vielen Farben (*Spektrum*). Frequenzen mit mehr Energie bestimmen dann welche Farbe wir wahrnehmen, man spricht von *dominanter Wellenlänge*. Sind alle Anteile (ungefähr) gleich groß, so sehen wir ein farbloses Licht (also weiß oder grau). Wenn man mit E_D die Energie der dominanten Wellenlänge bezeichnet, und mit E_W die durchschnittliche Energie der anderen Wellenlängen, so nennt man $(E_D - E_W) / E_D$ die *Reinheit* (purity) einer Farbe. Die *Helligkeit* ergibt sich als die Fläche (Integral) unter der Spektralkurve.



Kolorimetrie

Die Kolorimetrie ist die Wissenschaft von der technischen Beschreibung von Farben. Man möchte also eine Farbe durch Zahlen, durch exakte Angaben beschreiben. Da aber eine Farbe ein empfundener Sinneseindruck ist, und keine physikalisch direkt messbare Größe, kann nur der visuelle Stimulus numerisch definiert werden (also das, was ein Mensch sieht), und zwar so dass

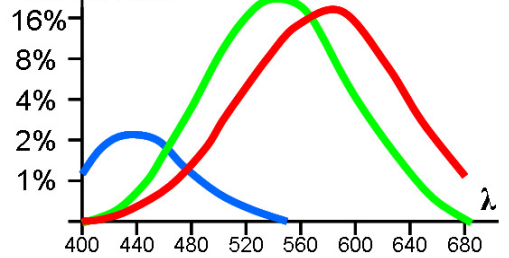


1. Stimuli mit den gleichen Spezifikationen unter gleichen Bedingungen gleich aussehen,
2. Stimuli die gleich aussehen die gleichen Spezifikationen haben,
3. die verwendeten Zahlen stetige Funktionen der physikalischen Parameter sind (d.h. kleine Änderungen der Zahlen bewirken kleine Änderungen der Farben und umgekehrt).

Kolorimetrie berücksichtigt also nur die *visuelle Unterscheidbarkeit* von elektromagnetischer Strahlung. Alle Spektren, die den gleichen Farbeindruck erzeugen, sind in diesem Sinn nicht unterscheidbar, bilden eine Äquivalenzklasse im Farbraum.

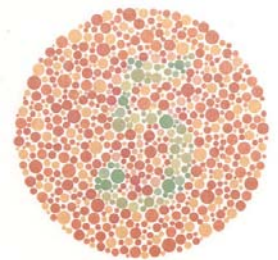
Die *Retina* des Auges, das ist die lichtempfindliche Schicht im hinteren inneren Bereich des Augapfels, enthält etwa 120 Millionen Stäbchen und Zapfen. Stäbchen können keine Farben unterscheiden, dafür sind sie sehr lichtempfindlich. Zapfen sind wesentlich weniger leicht aktivierbar, dafür gibt es drei verschiedene Arten, wobei jede Art in einem anderen Wellenlängenbereich empfindlich ist (die Empfindlichkeitskurven sind in der Graphik rechts abgebildet). Unser Farbempfinden setzt sich folglich aus der Kombination von drei getrennten „nicht-farbig“ skalaren Signalen zusammen, daher bezeichnet man das menschliche Farbempfinden als *Tristimulus*. Die Empfindlichkeitskurven der drei Zapfenarten haben ihre Maxima bei Rot, Grün und Blau, es ist also durchaus angebracht, von Rot-, Grün und Blau-Zapfen zu sprechen. Erst das Gehirn mischt diese 3 Werte zu einer Farbe zusammen. Dies ist auch die Grundlage dafür, dass man dem Auge „alle“ Farben dadurch vorgaukeln kann, dass man eine Farbe aus nur 3 Grundfarben zusammensetzt. Wenn man kleine Lichtpunkte in rot, grün und blau nahe genug nebeneinander platziert, nehmen wir dies als einen Punkt in der so *additiv* gemischten Farbe wahr.

Anteil absorbiertes Licht



Farbfehlsichtigkeit

Bei manchen Menschen fehlt erbbedingt eine Zapfenart (oder sogar zwei) oder es sind die Empfindlichkeitskurven der Zapfen nicht ausreichend verschieden, dann fehlt die Fähigkeit, so viele verschiedene Farben wie die meisten zu unterscheiden. Man spricht von *Farbschwäche* oder *Farbblindheit*. Die häufigste Art ist Rot-Grün-Blindheit, bei der die Rot- und Grün-Zapfen auf zu ähnliche Wellenlängen reagieren. Etwa 8% aller Männer sind zumindest geringfügig farbfehlsichtig! Testbilder, in denen die Information nur erkennbar ist, wenn man bestimmte (z.B. rötliche und grünliche) Töne gleicher Helligkeit unterscheiden kann (siehe Bild), dienen zur Diagnose von Farbfehlsichtigkeit. Da man im Leben auch mit reduziertem Farbsehen sehr gut zurecht kommt, wissen viele Leute gar nichts von ihrer Einschränkung.

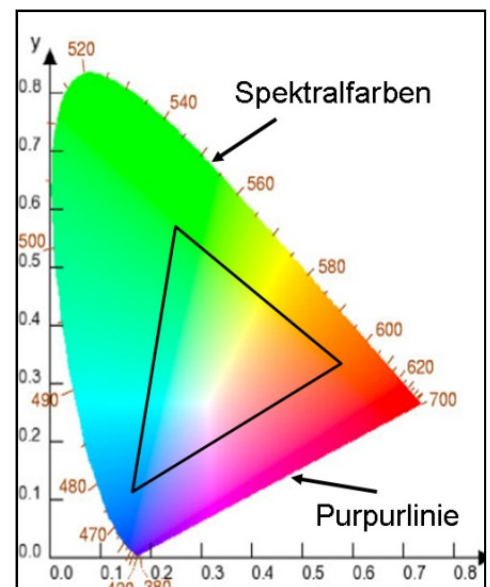
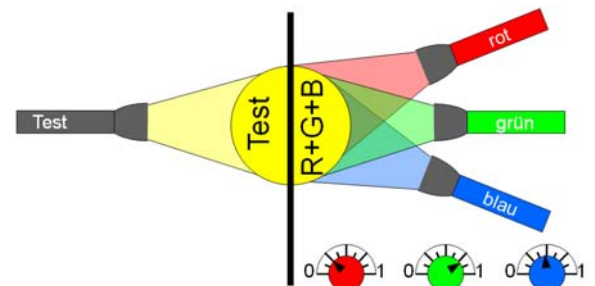


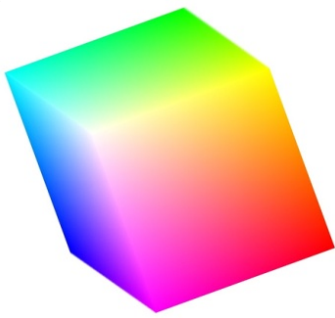
Farbmodelle

CIE 1931 XYZ-Farbmodell

Das XYZ-Farbsystem erhält man direkt aus der Tristimulus-Theorie. Dazu ermittelt man mit *Farbvergleichsexperimenten* welche Kombination der 3 Grundfarben welche Testfarbe erzeugt. Testpersonen müssen für jede spektralreine Testfarbe mit drei Reglern rotes, grünes und blaues Licht so dosieren, dass die gleiche Farbe entsteht. Manche Farben lassen sich aus keiner solchen Kombination erzeugen, daher muss man manchmal auch negative Anteile verwenden, was dadurch geschieht, dass auf der Testfarbenseite etwas Licht einer Grundfarbe dazu gemischt wird. Nach einer Transformation in positive Zahlen ergeben sich „imaginäre Grundfarben“ X, Y und Z. Normiert man die so erzeugten Farben auf die Helligkeit 1 und projiziert das Ergebnis auf die XY-Ebene, so erhält man das *CIE-Diagramm*, das 1931 von der *Commission Internationale d’Eclairage* (CIE) normiert wurde. Die Farben werden durch die Koordinaten (x,y) beschrieben, aus $x+y+z=1$ folgt z. Zusätzlich kann man noch die Helligkeit angeben, diese wird mit Y bezeichnet. Somit ist eine vollständige Farbdefinition durch (x,y,Y) gegeben.

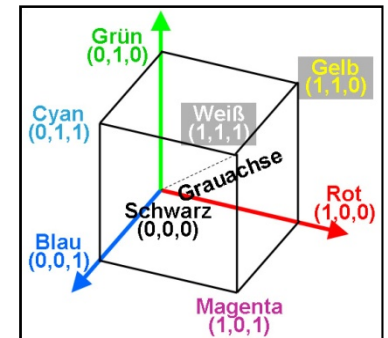
Im CIE 1931-Diagramm befinden sich alle spektralreinen Farben an der U-förmigen Außenkante. Zwischen den Endpunkten dieser Linie verläuft die sogenannte Purpurlinie, die Komplementärfarben von spektralreinen Farben enthält, die aber selbst nicht nur eine Wellenlänge haben. Jeder Punkt im Diagramm entspricht einer anderen Farbe. Eine Linearkombination zweier Farben befindet sich auf der geraden Linie zwischen diesen beiden Farben. Etwa in der Mitte liegt die Farbe Weiß. Komplementärfarben liegen auf entgegengesetzten Enden von Geraden, die durch den Weißpunkt gehen. Die mit einem RGB-Monitor darstellbaren Farben, also die Linearkombinationen der Farben Rot, Grün und Blau, die der Monitor erzeugen kann, liegen alle innerhalb des von diesen 3 Punkten aufgespannten Dreiecks (siehe Skizze). Da es keine drei Farben gibt, die das ganze Diagramm enthalten, kann kein Monitor alle Farben darstellen.





RGB-Farbmodell

Neben Farbräumen (eigentlich Farbraumbeschreibungen) wie dem CIE-Modell, die alle Farben zu beschreiben imstande sind, gibt es Farbräume zur Beschreibung der Farben eines Gerätes. Für Bildschirme wird fast immer das RGB-Modell verwendet. Dabei wird ein Pixel aus drei kleinen Farbpunkten zusammengesetzt, deren



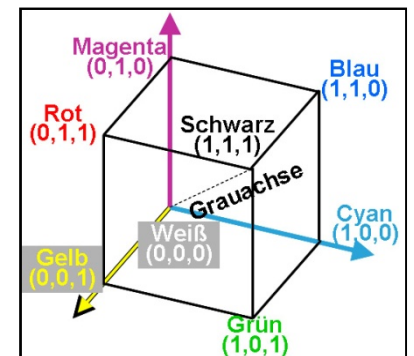
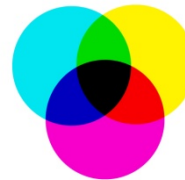
Lightsumme (*additive* Farbmischung! – siehe Skizze mit den Kreisen) einen Farbeindruck erzeugt. Je nach verwendeter Technologie und konkreten Materialien hat jeder Monitor geringfügig unterschiedliche Grundfarben, aus denen unterschiedliche Teilmengen aller Farben erzeugt werden können. Den Raum der Farben, die ein Gerät erzeugen kann, nennt man sein *Gamut*.

CMY-Farbmodell

Das Mischen von farbiger Tinte auf einem Blatt Papier unterliegt ganz anderen Regeln als die additive Farbmischung von Licht. Je mehr Tinte man verwendet, desto dunkler wird das Ergebnis, weil man ja eigentlich einen Filter vor das passiv reflektierende Papier aufbringt, daher spricht man von *subtraktiver* Farbmischung (siehe Skizze mit den Kreisen). Das CMY-Modell dazu ist das Komplement des RGB-Raumes. Für einfache Anwendungen gilt daher

$$[C,M,Y] = [1,1,1] - [R,G,B]$$

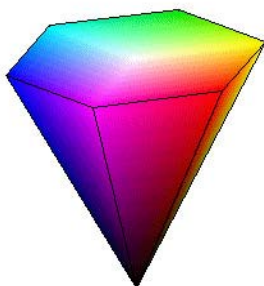
Vielfach kommt einem auch das *CMYK-Modell* unter. K steht dabei für Key, das entspricht der Farbe Schwarz. Beim Druck werden hierbei alle Grauteile mit schwarzer Farbe extra gedruckt statt sie als Mischung gleicher Anteile von Cyan, Magenta und Yellow teurer und schlechter zu erzeugen.



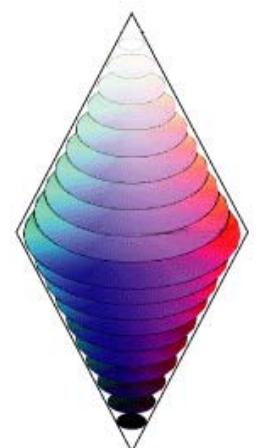
HSV- und HLS- Farbmodelle

Neben den für Geräte sinnvollen Farbräumen gibt es noch Beschreibungen der Farben in einer Weise, die dem *menschlichen Benutzer* entgegen kommt. Wir können nur sehr schwer und mit viel Übung eine Zielfarbe aus den Komponenten R, G, B oder C, M, Y beschreiben. Unsere üblichen Beschreibungen von Farben setzen sich aus Qualitäten wie einem Farbwort, einer Helligkeit und einer Farbreinheit zusammen. Daher werden für das User-Interface zur Farbdefinition solche Farbsysteme verwendet, die in diesen 3 Dimensionen funktionieren. Dazu gehören HLS, HSV, Munsell, RAL, NCS, Coloroid und einige andere.

HSV steht für *Hue*, *Saturation* und *Value*. Hue heißt *Bunton* oder Farbton, bezeichnet die Farbe entlang eines Farbkreises, der von Rot über Orange, Gelb, Grün, Cyan, Blau, Violet, Magenta wieder ins Rot geht. Wenn man den RGB-Würfel genau in Richtung seiner Grauachse anschaut, so sieht man diesen Farbkreis als Grenze des entstehenden Sechsecks (Abbildung). Saturation heißt *Sättigung* und gibt an wie rein eine Farbe ist, wie stark sie sich also von Grau unterscheidet. Value heißt Wert und gibt so etwas wie die *Helligkeit* der Farbe an.

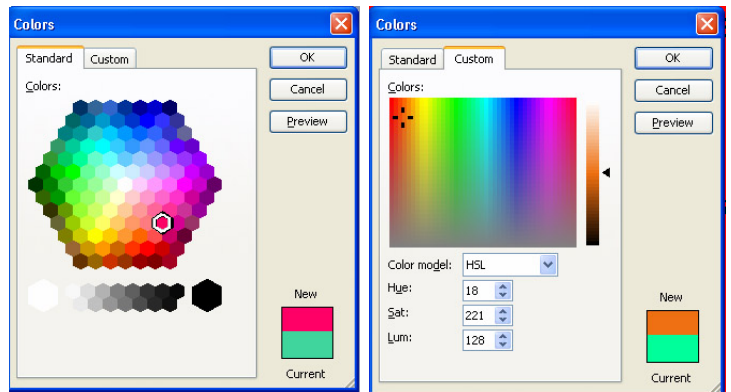


Je dunkler nun eine Farbe ist, desto weniger Abstufungen der Sättigung gibt es. Dadurch lassen sich alle Farben in einer Pyramide darstellen, deren Spitze schwarz ist und deren Grundfläche das Farb-Sechseck ist (Abb. links). Die Farbe wird in Grad entlang der Basiskante angegeben (Rot=0°, Grün=120°, Blau=240°), die Sättigung in Prozent des Abstandes von der Pyramidenachse und die Helligkeit als Prozent des Abstandes der Grundfläche von der Spitze. Ein mittelhelles gesättigtes Gelb hat damit den HSV-Wert (60, 1, 0.5).



Ganz ähnlich funktioniert das **HLS**-System (auch HSL), bei dem H=Hue, L=Lightness oder Luminance, S=Saturation heißen. Die Form des Modells ist jedoch diesmal ein Doppelkegel, der oben an der Spitze weiß ist und unten schwarz (Abb. rechts). Der Hintergrund ist die Annahme, dass Weiß viel heller ist als jede reine Farbe.

Wenn man sich jetzt die typischen Farbdialoge eines Desktop-Programmes ansieht, so wird man die Verwendung dieser benutzerorientierten Farbsysteme erkennen. Meist hat man mehrere Farbmodelle zur Auswahl, oft kann man die Werte auch per Zahlen eingeben. Es ist eine interessante Erfahrung zu probieren, einen bestimmten Farbton in einer bestimmten Helligkeit durch Angabe der RGB-Zahlen zu erreichen.



Farbsymbolik

Farben sind Begleiter im täglichen Leben. Die Verwendung und Bedeutung von Farben kann zwischen verschiedenen Kulturen divergieren. Manche Bedeutungszuschreibungen gelten zwar kulturübergreifend, aber nur innerhalb eines Fachgebietes. Die folgenden Zeilen bringen einige Beispiele.

Sprachgebrauch. Jede Sprache hat ein Grundvokabular für Farben. So gibt es je nach Sprache zwischen 2 und 20 grundlegende Bezeichnungen für Farben und weitere Bezeichnungen für Nuancen. Im Deutschen geht man von 6 bis 11 grundlegenden Termini und ca. 150 bis 200 zusätzlichen Bezeichnungen aus (z.B. oliv). In anderen Sprachen ist das oft anders, so findet man zum Beispiel im Italienischen zwei Bezeichnungen für Blau: *azzurro* (Himmel) und *blu* (dunkelblaue Kapitänsuniform). Im Ungarischen kennt man zwei Rot: *piros* und *vörös*.

Farbe in der Religion. In der Spiritualität werden Farben oft Symbolkraft und kulturelle bzw. religiöse Inhalte zugesprochen. So kommt es, dass in allen Weltregionen (abgesehen vom Christentum!) eine heilige Farbe existiert. Zum Beispiel ist im Islam Grün die Lieblingsfarbe des Religionsstifters Mohammed. Viele islamische Staatsflaggen haben die Grundfarbe Grün, wie zum Beispiel die Saudi-Arabische (Abb. rechts).



Farben in der Politik. In der Politik werden sowohl politischen Strömungen als auch Parteien Farben zugeschrieben. Farben dienen als einheitliches Erkennungsmerkmal. So ist etwa Rot die Farbe des Marxismus-Leninismus, des Sozialismus, der Arbeiterbewegung. Grün ist oft die Farbe von Umweltorganisationen und -parteien.

Kennzeichnung. Farben werden auch als alleinstehendes Kennzeichnungsmerkmal benutzt. Die Farbe an sich steht für einen gewissen Zweck und wird oft ohne weitere Erläuterung eingesetzt. Als Beispiel seien rote und blaue Markierungen auf Wasserhähnen erwähnt.

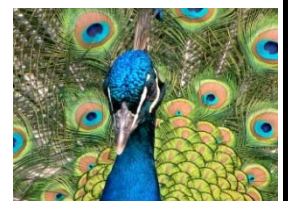


Farben im Verkehr. Bei Verkehrszeichen, Lichtern und Ampeln sind Farben bewusst als Information eingesetzt. Grundsätzlich sind Verbots- und Gefahrenschilder in rot/weiß gehalten, Gebots- und Informationsschilder dagegen in blau/weiß. Die Ampel ist rot/gelb/grün. An roten Begrenzungslichtern ist links vorbeizufahren, an weißen rechts.



Farben in der Technik. In technischen Anwendungen werden Farben auch öfters zur Beschreibung bestimmter Teile verwendet. So erkennt man die Phase, den Nullleiter und die Erdung elektrischer Leitungen an der Farbe des Drahtes.

Farben in der Natur. Auch die Natur bedient sich der Farbwirkung. Viele Vogelarten tragen ein buntes Balzgefieder oder haben bunte Schnäbel um Weibchen anzulocken. Farben dienen in der Natur auch zur Tarnung oder als Warnung an Fressfeinde.



Assoziationen zu Farben. Der Mensch verbindet kulturabhängig mit vielen Farben bestimmte Gefühle und Assoziationen. *Blau*, die Farbe des Himmels, steht für das Weite, die Ferne und für damit leicht zu assoziierende Begriffe (Sehnsucht, Phantasie). *Rot* ist die Farbe des Blutes. Sie steht aber nicht nur für Krieg und Tod, sondern vielmehr auch für Lebenskraft (Leidenschaft, Liebe, Zorn). *Grün* steht für saftige Wiesen, Wälder und Natur. So spricht man vom grünen Daumen oder Städter gerne von der Fahrt ins Grüne. Grün wird auch mit Hoffnung und Zuversicht assoziiert. Sommer, Sonne und Lebensfreude werden mit *Gelb* assoziiert. Gelb ist die Farbe des Lichts und des Goldes. Gelb strahlt. Ambivalent dazu steht aber die Verbindung von Gelb mit Neid, Geiz, Eifersucht, Egoismus und Verlogenheit. *Schwarz* wird mit Tod, Ende und Leere verbunden. Schwarz ist auch die Farbe der Trauer, für Menschen mit „weißer“ Hautfarbe. Dagegen wird *Weiß* als vollkommene Farbe gesehen (viele Menschen mit dunkler Hautfarbe verwenden Weiß zum Ausdruck ihrer Trauer und Schwarz als Freudenfarbe).

