

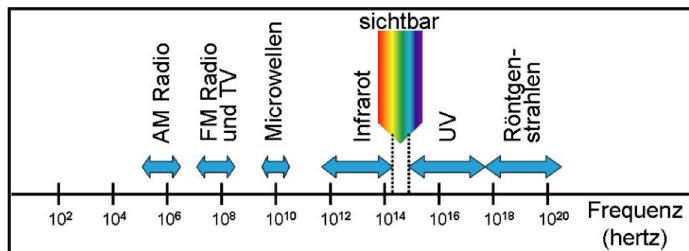
4. Farbe

Farbe ist eine der Grundesszenen 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

Ich habe zum Thema Farbe so gut wie keine PowerPoint slides eingebaut, bei Bedarf hier schauen: [EVC-CG04-Farbe_2025S_Slides.pdf](#)

Was ist Farbe?

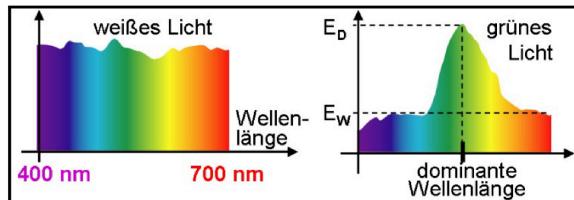
Unser Auge kann elektromagnetische Strahlung im eher engen Frequenz-bereich zwischen etwa $3,8 \cdot 10^{14} \text{ Hz} (\approx 780 \text{ nm})$ und $7,8 \cdot 10^{14} \text{ Hz} (\approx 380 \text{ nm})$ erkennen. Dabei empfinden wir diese Strahlung als Licht. Dieser sichtbare Bereich ist von Mensch 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]

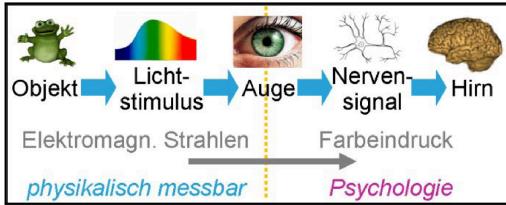
Tatsächlich kommt in der Natur aber höchst selten spektralreines Licht vor (das nur genau eine Wellenlänge hat), sondern meist sehen wir eine Mischung aus vielen Farben (Spektrum). Frequenzen mit mehr Energie bestimmen dann welche Farbe wir wahrnehmen, man spricht von dominanter Wellenlänge. Sind alle 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

Kolorimetrie

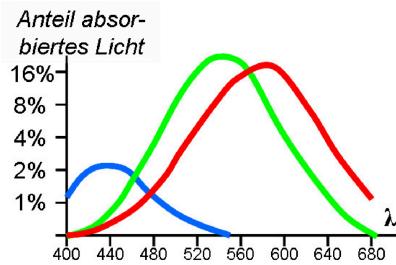
Die Kolorimetrie ist die Wissenschaft von der technischen Beschreibung von Farben. Man möchte also eine Farbe durch Zahlen, durch exakte Angaben beschreiben. Da aber eine Farbe ein empfundener Sinneseindruck ist, und keine physikalisch direkt messbare Größe, kann nur der visuelle Stimulus numerisch definiert 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-farbigen“ 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.



The Human Eye

Werner Purgathofer

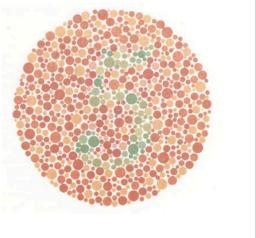
TU WIEN

retina contains:

- rods: black/white (grey)
- cones: color

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 *Farblindheit*. 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.



Mögliche Beeinträchtigungen:

red/green blindness

→ red & green cones too similar

blue blindness

→ no blue cones

monochromatism

→ all cones missing

mehr zum Auge: [2. Bildaufnahme](#)

Farbmodelle:

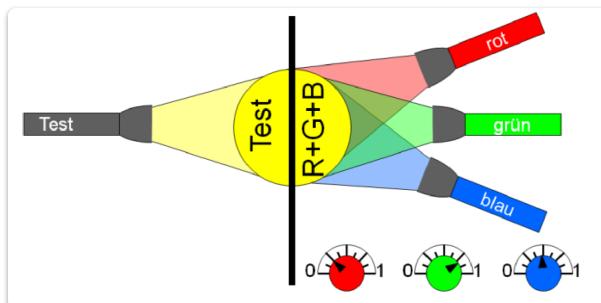
CIE 1931 XYZ-Farbmodell

[EVC_Skriptum_CG](#), p.16

Grundlage: Tristimulus-Theorie (Farbwahrnehmung durch 3 Zapfentypen).

Experiment: Farbvergleich mit 3 Grundfarben (Rot, Grün, Blau) zur Erzeugung einer Testfarbe.

- **Problem:** Negative Farbanteile nötig (Grundfarbe muss zur Testfarbe addiert werden).



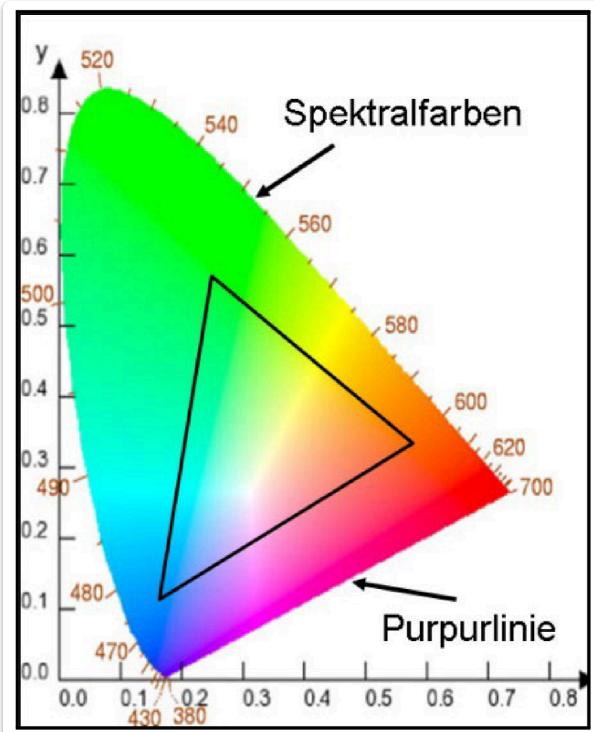
Transformation: Umwandlung in positive "imaginäre Grundfarben" X, Y, Z.

CIE-Diagramm (1931):

- Normierung auf Helligkeit 1.
- Projektion auf die XY-Ebene mit Koordinaten (x, y) .
- z ergibt sich aus $x + y + z = 1$.
- Vollständige Farbdefinition: (x, y, Y) , wobei Y die Helligkeit darstellt.

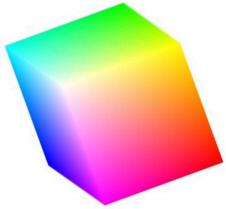
Eigenschaften des CIE-Diagramms:

- **U-förmige Außenkante:** Spektralreine Farben (monochromatisches Licht).
- **Purpurlinie:** Verbindet die Endpunkte der U-Form, enthält Komplementärfarben spektraler Farben (keine reine Wellenlänge).
- **Jeder Punkt:** Repräsentiert eine andere Farbe.
- **Linearkombination zweier Farben:** Liegt auf der geraden Linie zwischen den Farben.
- **Weißpunkt:** Liegt etwa in der Mitte.
- **Komplementärfarben:** Liegen an entgegengesetzten Enden einer Geraden durch den Weißpunkt.
- **RGB-Monitor-Farbraum:** Darstellbare Farben liegen innerhalb des Dreiecks, das durch die Rot-, Grün- und Blau-Punkte des Monitors aufgespannt wird.
- **Begrenzung:** Kein Monitor kann alle sichtbaren Farben darstellen, da keine drei realen Farben das gesamte CIE-Diagramm abdecken.

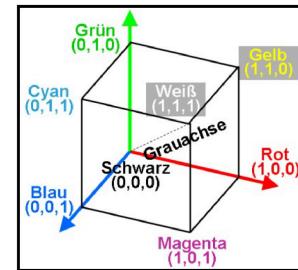
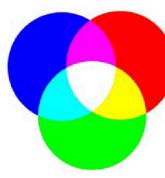


RGB Farbmodell

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



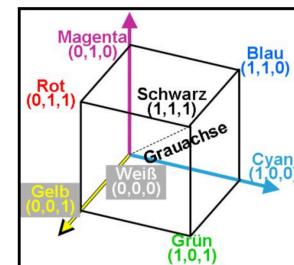
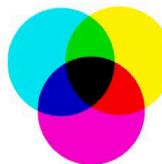
das RGB-Modell verwendet. Dabei wird ein Pixel aus drei kleinen Farb-punkten zusammengesetzt, deren Lichtsumme (*additive Farbmischung!* – siehe Skizze mit den Kreisen) einen Farbeindruck erzeugt. Je nach verwendeter Technologie und konkreten Materialien hat jeder Monitor geringfügig unterschiedliche 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

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

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

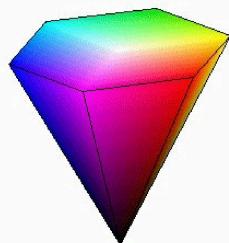


Vielfach kommt einem auch das *CMYK – Modell* unter. K steht dabei für Key, das entspricht der Farbe Schwarz. Beim Druck werden hierbei alle Grauanteile mit schwarzer Farbe extra gedruckt statt sie als Mischung gleicher Anteile von Cyan, Magenta und Yellow teurer und schlechter zu erzeugen.

HSV- und HLS- Farbmodelle

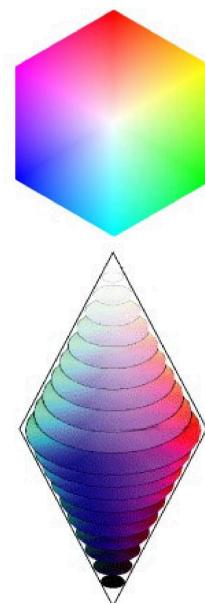
Neben den für Geräte sinnvollen Farbräumen gibt es noch Beschreibungen der Farben in einer Weise, die dem *menschlichen Benutzer* entgegen kommt. Wir können nur sehr schwer und mit viel Übung eine Zielfarbe aus den Komponenten R, G, B oder C, M, Y beschreiben. Unsere üblichen Beschreibungen von Farben 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.

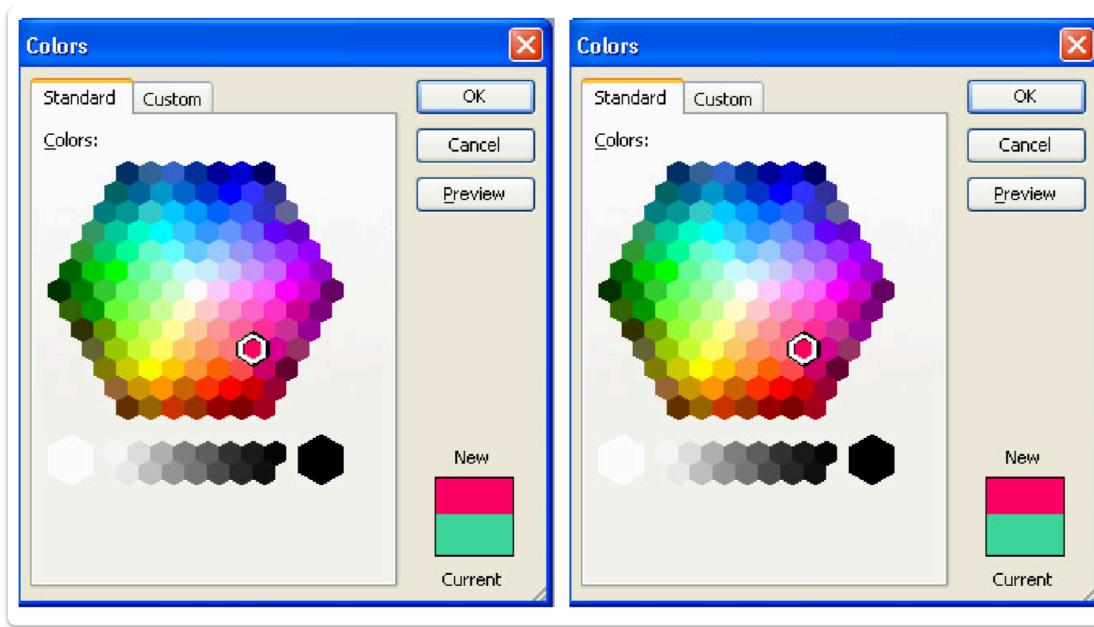
HSV steht für *Hue*, *Saturation* und *Value*. Hue heißt Bunton oder Farbton, bezeichnet die Farbe entlang eines Farbkreises, der von Rot über Orange, Gelb, Grün, Cyan, Blau, Violet, Magenta wieder ins Rot geht. Wenn man den RGB-Würfel genau in Richtung seiner Grau-achse anschaut, so sieht man diesen Farbkreis als Grenze des entstehenden Sechseckes (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.





Meist hat man heutzutage in Desktopanwendungen mehrere verschiedene Farbmodelle zur Auswahl

Farbsymbolik

Quelle: [EVC_Skriptum_CG](#), p.18

- Farben spielen in unserem Leben eine große Rolle.
- Die Verwendung von Farben kann zwischen verschiedenen Kulturen divergieren
- Manche Bedeutungen beziehen sich nur auf ein gewisses Gebiet.

Sprachgebrauch

- **Grundvokabular:** Jede Sprache besitzt einen Kernbestand an Farbbezeichnungen.
- **Anzahl:** Variiert stark zwischen Sprachen (2 bis 20 grundlegende Termini).
- **Nuancen:** Zusätzlich existieren zahlreiche Bezeichnungen für Farbnuancen.
- **Deutsch:**
 - 6 bis 11 grundlegende Farbterme.
 - Ca. 150 bis 200 zusätzliche Bezeichnungen (z.B. oliv).
- **Andere Sprachen:**
 - **Italienisch:** Unterscheidung innerhalb einer Farbkategorie (z.B. *azzurro* für Himmelblau, *blu* für Dunkelblau).
 - **Ungarisch:** Unterscheidung innerhalb einer Farbkategorie (z.B. *piros* und *vörös* für Rot).
- **Fazit:** Die Kategorisierung und Benennung von Farben ist sprachabhängig und kann feiner oder gröber ausfallen.

Farbe in der Religion

- **Symbolkraft:** Farben besitzen in der Spiritualität oft symbolische und kulturell/religiös bedeutsame Inhalte.
- **Heilige Farbe:** In vielen Weltreligionen (außer dem Christentum) existiert eine heilige Farbe.
- **Islam:**
 - **Grün:** Lieblingsfarbe des Propheten Mohammed.
 - **Bedeutung:** Oft auf islamischen Staatsflaggen vertreten (z.B. Saudi-Arabien).

Farben in der Politik

- **Zuordnung:** Politische Strömungen und Parteien werden oft mit bestimmten Farben assoziiert.
- **Funktion:** Farben dienen als **einheitliches Erkennungsmerkmal**.
- **Beispiele:**
 - **Rot:** Marxismus-Leninismus, Sozialismus, Arbeiterbewegung.
 - **Grün:** Umweltorganisationen und -parteien.

Kennzeichnung durch Farben

- **Alleinstehendes Merkmal:** Farbe selbst transportiert Bedeutung ohne zusätzliche Erklärung.
- **Beispiele:**
 - **Wasserhähne:** Rot (warm), Blau (kalt).

Farben im Verkehr

- **Bewusste Information:** Farben in Verkehrszeichen, Lichtern und Ampeln sind codiert.
- **Rot/Weiß:** Verbots- und Gefahrenschilder.
- **Blau/Weiß:** Gebots- und Informationsschilder.
- **Ampel:** Rot (Stopp), Gelb (Vorsicht), Grün (Fahren).
- **Begrenzungslichter:** Rot (links vorbeifahren), Weiß (rechts vorbeifahren).

Farben in der Technik

- **Beschreibung von Teilen:** Farben kennzeichnen spezifische Komponenten.
- **Beispiel (Elektrik):** Phase, Nullleiter, Erdung (durch Drahtfarbe).

Farben in der Natur

- **Farbwirkung:** Natur nutzt Farben für verschiedene Zwecke.
- **Anlocken:** Buntes Balzgefieder/Schnäbel (Vögel).
- **Tarnung:** Anpassung an die Umgebung.

- **Warnung:** Abschreckung von Fressfeinden.

Assoziationen zu Farben (kulturabhängig)

- **Blau:** Himmel, Weite, Ferne, Sehnsucht, Phantasie.
- **Rot:** Blut, Krieg, Tod, Lebenskraft, Leidenschaft, Liebe, Zorn.
- **Grün:** Wiesen, Wälder, Natur, "grüner Daumen", Hoffnung, Zuversicht.
- **Gelb:** Sommer, Sonne, Lebensfreude, Licht, Gold, aber auch Neid, Geiz, Eifersucht, Egoismus, Verlogenheit.
- **Schwarz:** Tod, Ende, Leere, Trauer (in "weißen" Kulturen), Freude (in manchen "dunklen" Hautfarben-Kulturen).
- **Weiß:** Vollkommenheit (in "weißen" Kulturen), Trauer (in manchen "dunklen" Hautfarben-Kulturen), Freude (in "weißen" Kulturen).

