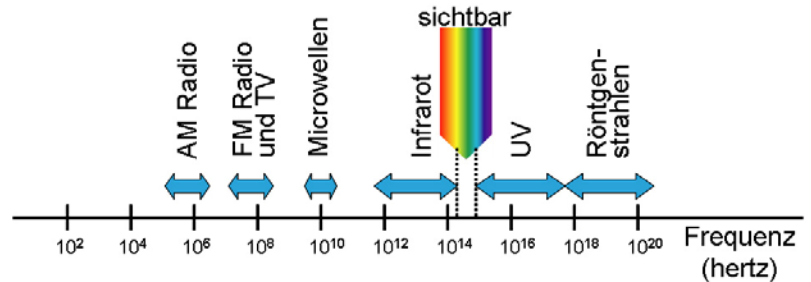


Farben und Farbmodelle

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?

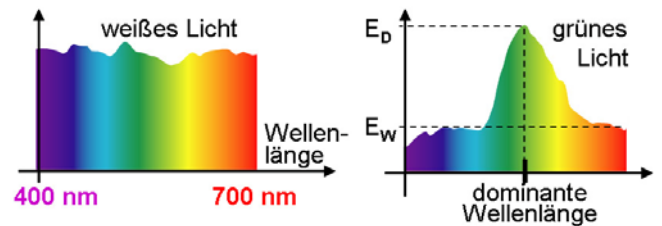
Unser Auge kann elektromagnetische Strahlung im Frequenzbereich zwischen etwa $3,8 \cdot 10^{14}$ Hz (~ 780 nm) und $7,8 \cdot 10^{14}$ Hz (~ 380 nm) erkennen. Daher empfinden wir diese Strahlung als *Licht*. Dieser sichtbare Bereich ist von Mensch zu Mensch unterschiedlich, und viele Tiere haben andere Grenzen. Andere



Frequenzbereiche werden für andere Zwecke verwendet (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.

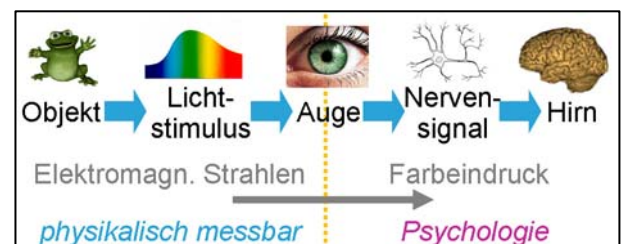
[zur Erinnerung: $c = \lambda \cdot f$, wobei c ...Lichtgeschwindigkeit, λ ...Wellenlänge, f ...Frequenz]

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 das Integral unter der Spektralkurve.



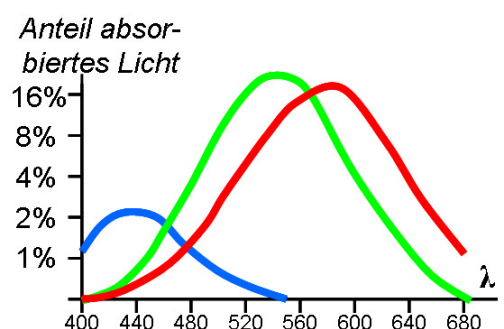
Kolorimetrie

Die Kolorimetrie ist die Wissenschaft von der technischen Beschreibung von Farben. Da aber eine Farbe ein empfundener Sinneseindruck ist, und keine physikalisch direkt messbare Größe, kann nur der visuelle Stimulus numerisch definiert werden, so dass



- Stimuli mit den gleichen Spezifikationen unter gleichen Bedingungen gleich aussehen,
- Stimuli die gleich aussehen die gleichen Spezifikationen haben,
- die verwendeten Zahlen stetige Funktionen der physikalischen Parameter sind.

Die Retina des Auges, das ist die lichtempfindliche Schicht im hinteren inneren Bereich des Augapfels, besteht aus 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 auf einen anderen Wellenlängenbereich empfindlich ist. Unser Farbempfinden setzt sich folglich aus



der Kombination von drei getrennten „nicht-farbigem“ 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.

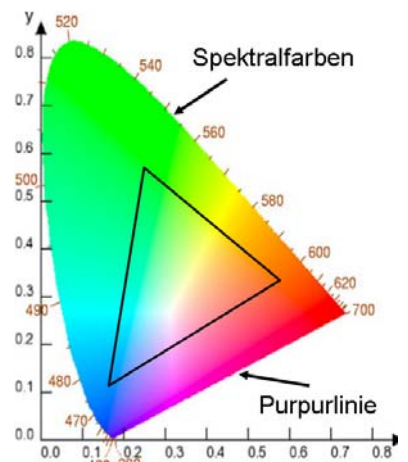
Farbblindheit

Bei manchen Menschen fehlt 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 sehen. 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 farbfählsichtig!

Farbmodelle

CIE 1931 XYZ-Farbmodell

Das XYZ-Farbsystem erhält man direkt aus der Tristimulus-Theorie. Dazu ermittelt man mit Farbvergleichsexperimenten welche Kombination von den 3 Grundfarben welche Farbe erzeugt. Da sich manche Farben aus keiner solchen Kombination erzeugen lassen, muss man manchmal auch negative Anteile verwenden, was dadurch geschieht, dass man zur zu erzeugenden Farbe etwas Licht dazu mischt. Dadurch ergeben sich virtuelle Grundfarben X, Y und Z, die es in Wirklichkeit nicht gibt. 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 internationalen Commission *Internationale d'Éclairage* 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.

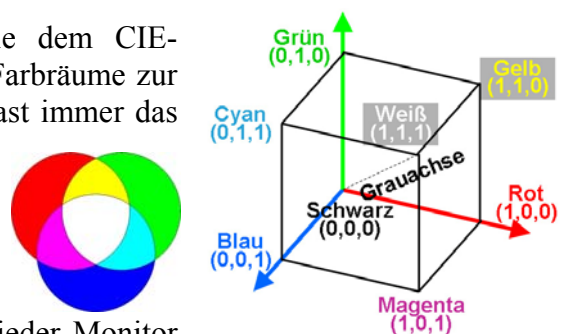
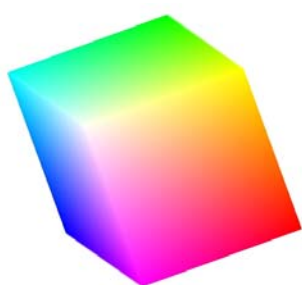


Im CIE 1931-Diagramm befinden sich alle spektralreinen Farben an der U-förmigen Außenkante. Zwischen den Endpunkten dieser Linie verläuft die sogenannte Purpurlinie, die Komplementärfarben von spektralreinen Farben enthält, die aber selbst nicht nur eine Wellenlänge haben. Jeder Punkt im Diagramm entspricht 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 Dreieckes (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 Bildschirm wird fast immer das RGB-Modell verwendet. Dabei wird ein Pixel aus drei kleinen

Farbpunkten zusammengesetzt, deren Lichtsumme (*additive Farbmischung!*) 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*.

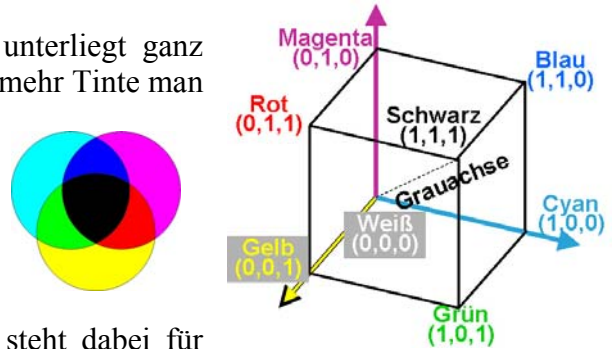


CMY-Farbmodell

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 hier von *subtraktiver Farbmischung*. 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.



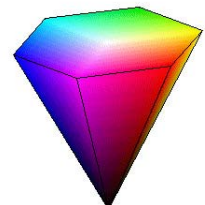
HSV- und HLS- Farbmodelle

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 Ziel-farbe 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.

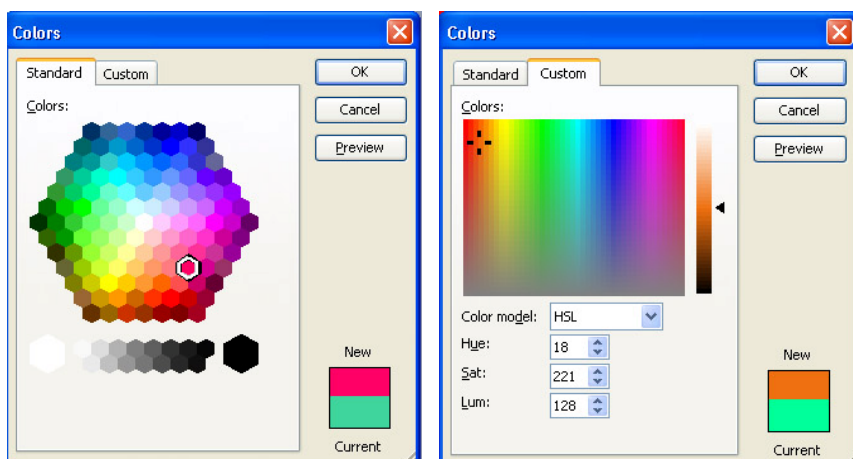
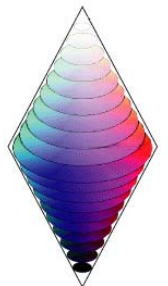
HSV steht für *Hue*, *Saturation* und *Value*. Hue heißt *Bunton* oder Farbton, bezeichnet die Farbe entlang eines Farbkreises, der von Rot über Orange, Gelb, Grün, Cyan, Blau, Violet, Magenta wieder ins Rot geht. Wenn man den RGB-Würfel genau in Richtung seiner Grauchse anschaut, so sieht man diesen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

■ Inhaltsverzeichnis

Graphikprimitive

Linienalgorithmen	1
Gefüllte Flächen	3
Buchstaben und Zeichen	3
Polygon-Listen	3

Geometrische Transformationen

Einfache 2D-Transformationen	5
Homogene Koordinaten	5
3D-Transformationen	7

2D-Viewing

2D Viewing-Pipeline	9
Window-Viewport Transform.	9
Linien-Clipping	9
Polygon-Clipping	10
Text-Clipping	12

3D-Viewing

Konzepte des 3D-Viewing	13
3D-Viewing-Pipeline	14
Viewing-Koordinaten	14
Projektionen	15

Sichtbarkeitsverfahren

Backface Detection (B.Culling)	17
Z-Puffer-Verfahren (Depth B.)	17
Scanline-Methode	18
Depth-Sorting-Methode	18
Area-Subdivision Methode	19
Octree-Methode	19
Ray-Casting	20
Klassifizierung der Verfahren	20

Attribute graphischer Primitive

Attr. von (Punkten +) Linien	21
Attr.v. (2D-)Polygonen+Flächen	21
Attr. von Text	23
Attr. von 3D Polygonen	23
Aliasing und Anti-Aliasing	23

3D Objektrepräsentationen

Constructive Solid Geometry	25
Quadrees und Octrees	26
Andere Objektrepräsentationen	26

Kurven und Flächen

Kurven	27
Freiformflächen	30

Licht und Schattierung

Lichtquellen und Oberflächen	31
Einfaches Beleuchtungsmodell	31
Schattierung von Polygonen	33

Ray-Tracing

Das Ray-Tracing Prinzip	35
Ray-tracing Implementierung	36
Schnitte zw. Strahlen + Objekten	37
Ray-Tracing Beschleunigung	38

Globale Beleuchtung: Radiosity

Die Radiosity Gleichung	39
Berechnung der Formfaktoren	40
Fortschreitende Verfeinerung	41
Aspekte von Radiosity	42

Texturen und andere Mappings

Environment Mapping	43
Texture Mapping	43
Bump Mapping und Displacement Mapping	45
Kombination mehrerer Mappings	46

Farben und Farbmodelle

Was ist Farbe?	47
Kolorimetrie	47
Farbmodelle	48

Inhaltsverzeichnis	50
--------------------	----