

Aspekte der Farbdarstellung in Sichtsystemen

Dr. Bernhard Hampel-Vogedes
Rheinmetall Defence Electronics GmbH
Bremen

Bernhard.Hampel-Vogedes@rheinmetall.com

Abstract: In den letzten Jahren wurden neue Technologien für die Darstellung farbiger Bilder eingeführt. Jahrzehntlang wurde die Röhrentechnologie für die Darstellung von Bildern verwendet. Heute werden dagegen Lampen mit Farbfiltern verwendet oder LEDs bzw. Laser als Lichtquellen für Projektoren und Monitore eingesetzt. Auf der anderen Seite wird die Darstellung in den Bildquellen verfeinert. Sind heute noch 8 Bit pro Farbe üblich gibt es daneben bereits Systeme mit einer Bittiefe von 10 oder 12 Bit pro Farbe. Ausgehend von der Farbpempfindung des menschlichen Auges und den verschiedenen Maßsystemen zur Beschreibung von Farbe werden die verschiedenen Aspekte der Farbdarstellung betrachtet.

1 FARBEMPFINDUNG

Was ist eigentlich „Farbe“? Wenn man etwas darüber nachdenkt, fällt einem auf, dass man zwar weiß was Farbe ist, aber es ist gar nicht so einfach es konkret zu sagen. Ein kurzer Test bei Google ergibt fast 45 Millionen Einträge bei „Farbe“. Erweitert man die Suche um die Begriffe „Color“ oder „Colour“ findet man schon über 1 Milliarde Einträge.

Wie könnte man also Farbe definieren? Eine mögliche Antwort gibt die DIN 5033 (Farbmessung): **Farbe** ist „diejenige Gesichtsempfindung eines dem Auge des Menschen 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.“

Wie die DIN 5033 schon sagt, beziehen wir den Begriff „Farbe“ auf das menschliche Auge. Es ist im Zusammenspiel mit dem Gehirn in der Lage, einen Teil des elektromagnetischen Spektrums in Sinneseindrücke zu übersetzen. Dieser Teil erstreckt sich über die Wellenlängen von 380 nm bis zu 780 nm. Dieser Wellenlängenbereich wird auch als Licht bezeichnet.

Auge

Die Evolution hat verschiedene Typen von Auge hervorgebracht. So besitzen Insekten Facettenaugen. Das Linsenauge ist die Bauform, die u. a. Säugetiere, und damit auch der Mensch, zum Sehen verwenden. Abbildung 1 zeigt den Querschnitt durch das menschliche Auge. Von links fällt das Licht auf das Auge. Der Teil, der durch die Pupille trifft wird von der Linse auf die Netzhaut abgebildet.

11. Workshop Sichtsysteme

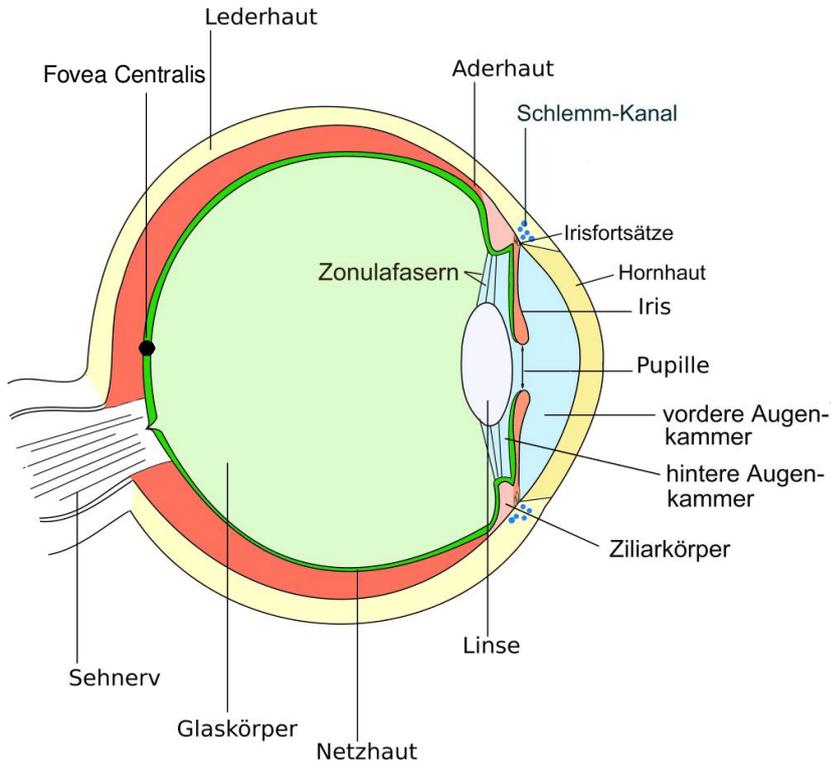


Abbildung 1: Querschnitt durch das Auge, [5]

Betrachtet man die Netzhaut genauer, so fällt zunächst auf, dass das Licht nicht direkt auf die Sehzellen trifft, Abbildung 2. Es durchquert erst die Ganglienzellen, die eine Vorverarbeitung der Signale von den Sehzellen durchführen, bevor es die Sehzellen absorbiert. Im menschlichen Auge gibt es ca. 100 Millionen Sehzellen. Man unterscheidet dann zwei Typen von Sehzellen: die Stäbchen und die Zapfen.

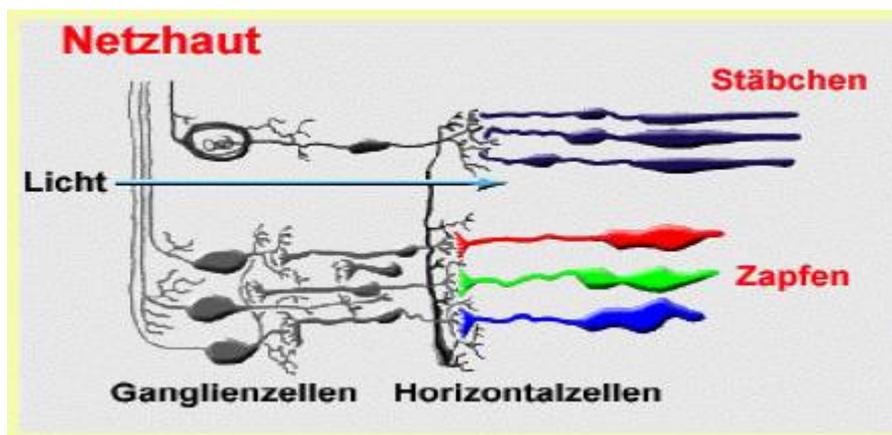


Abbildung 2: Sehzellen in der Netzhaut; [1]

Die Stäbchen sind für dabei um etwa einen Faktor 1000 lichtempfindlicher als die Zapfen. Sie werden daher vor allem für das Nachtsehen (das skopische Sehen) verwendet. Farben können sie allerdings nicht unterscheiden. Sie dienen nur zum Erkennen von hell-dunkel Kontrast. Die größte Empfindlichkeit haben die Stäbchen bei 507 nm. Sie machen ca. 95% der Sehzellen aus. Sie sind in der ganzen Netzhaut verteilt. Die Zapfen konzentrieren sich dagegen auf das Gebiet des gelben Flecks, der Fovea Centralis, Abbildung 1.

11. Workshop Sichtsysteme

Für das Farbsehen (photopisches Sehen) bei Tag sind die Zapfen zuständig. Um Farben zu unterscheiden, sind drei unterschiedliche Arten von Zapfen erforderlich. Sie haben ihren Absorptionsschwerpunkt bei unterschiedlichen Wellenlängen, Abbildung 3.

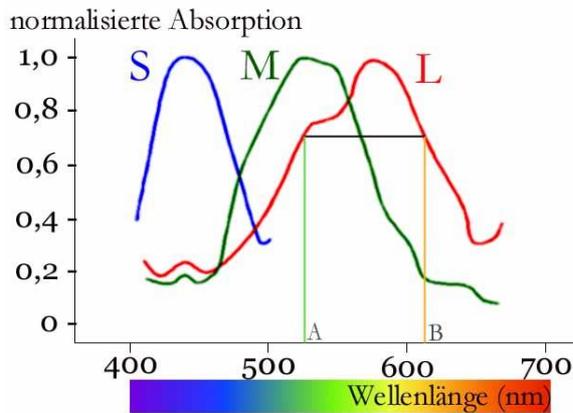


Abbildung 3: Absorptionskurven der Zapfen des Menschen, [3]

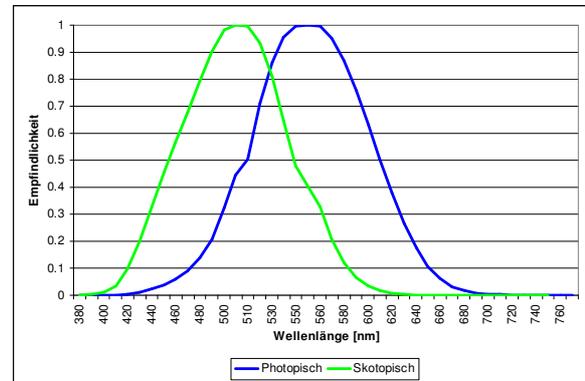


Abbildung 4: Empfindlichkeitskurve für photopisches und skopisches Sehen

Man unterscheidet: L-Zapfen für den roten Bereich (L, long wavelength), mit einem Absorptionsmaximum bei 560 nm; M-Zapfen für den grünen Bereich (M, medium wavelength), mit einem Absorptionsmaximum bei 530 nm; S-Zapfen für den blauen Bereich (S, short wavelength), mit einem Absorptionsmaximum bei 420 nm. Die relative Empfindlichkeit der M- und der L-Zapfen ist vergleichbar. Die S-Zapfen sind dagegen wesentlich unempfindlicher. Die maximale Empfindlichkeit des Farbsehens mit den Zapfen liegt bei 555 nm, also rotverschoben gegen die Empfindlichkeit der Stäbchen, siehe auch Abbildung 4

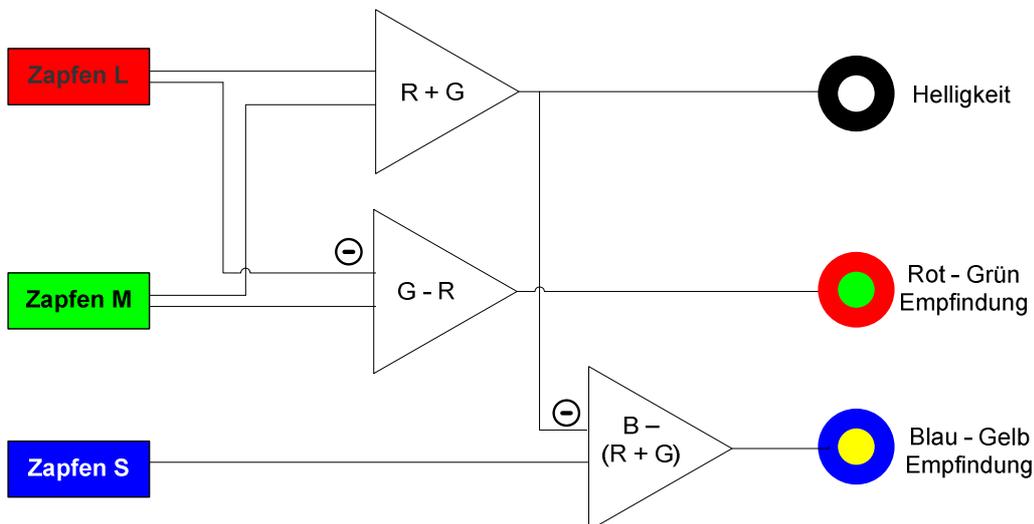


Abbildung 5: Verschaltung der Zapfen in der Netzhaut

Bereits in der Netzhaut werden die Signale der Zapfen in einer ersten Stufe verarbeitet, Abbildung 5. Ein Helligkeitssignal wird aus der Summe von Rot und Grün erzeugt. Die Differenz von Rot und Grün erzeugt ein Signal für das Rot-Grün Empfinden. An einem Ort kann man daher entweder Rot oder Grün, aber nicht beide Farben gleichzeitig, sehen. Die blauen Zapfen werden schließlich mit der Summe aus Rot und Grün verschaltet. Das Ergebnis ist ein Signal für

11. Workshop Sichtsysteme

das Blau-Gelb Empfinden, analog zum Rot-Grün Empfinden. Bei der Beschreibung der Farben werden wir das später im CIE Lab System wieder finden. Bei Nacht bzw. sehr geringer Helligkeit liefern die Zapfen kein ausreichendes Signal mehr.

Aus der Tatsache, dass es drei verschiedene Arten von Zapfen gibt kommt man direkt zur Dreifarben-theorie der Farbwahrnehmung. Erste Vermutungen dazu gehen auf Thomas Young (1807) zurück. Seine Dreifarben-theorie wurde später (1850) von Hermann von Helmholtz weiter verfeinert. So beobachtet Helmholtz, dass man aus Licht von drei Primärfarben (rot, grün und blau) beliebige andere Farben mischen kann, Abbildung 6. Man spricht von der additiven Farbmischung. Auf diesem Grundprinzip beruht auch heute die Farbdarstellung bei Projektoren und Monitoren. Die Summe der drei Primärfarben ergibt weiß.

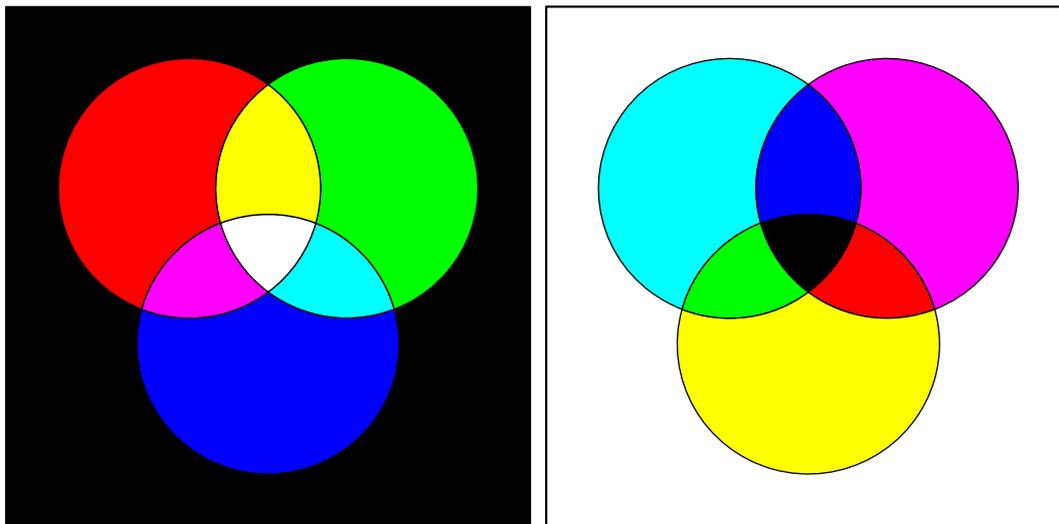


Abbildung 6: Additive (links) und subtraktive (rechts) Farbmischung

Im Gegensatz zur additiven Farbmischung bei leuchtenden Geräten wird in der Drucktechnik die subtraktive Farbmischung verwendet, Abbildung 6. Sie beruht darauf, dass die Sekundärfarben Cyan, Magenta und Gelb jeweils eine Primärfarbe absorbieren.

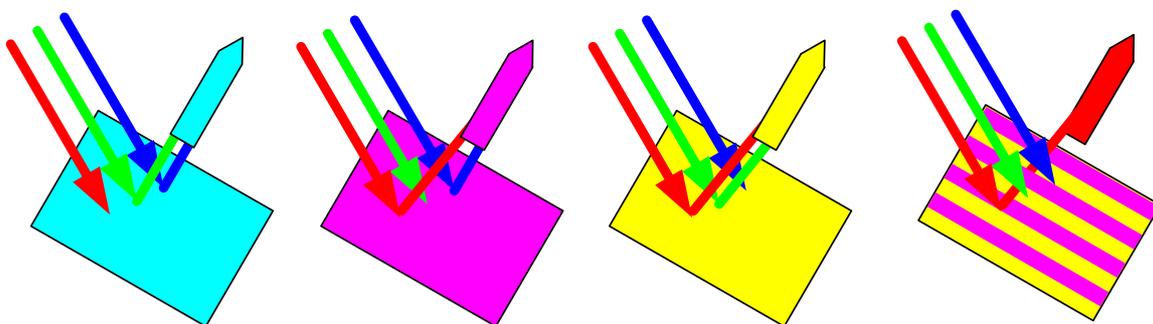


Abbildung 7: Sekundärfarben: cyan absorbiert rot, magenta absorbiert grün und gelb absorbiert blau; eine Mischung (hier als gestreift dargestellt) aus gelb und magenta absorbiert dann grün und blau, das Ergebnis erscheint rot

Wie Abbildung 7 zeigt wird von gelber Farbe der blaue Anteil des Lichtes absorbiert, Rot und Grün dagegen reflektiert. Mischt man nun Gelb mit Magenta, wird Grün und Blau absorbiert, Rot wird reflektiert. Der Eindruck ist also Rot. Eine Mischung von Cyan, Magenta und Gelb absorbiert Rot, Grün und Blau, folglich erhält man eine schwarze Fläche.

11. Workshop Sichtsysteme

In der Drucktechnik wird häufig das CMYK-Verfahren verwendet. Für Farben werden die drei Sekundärfarben Cyan, Magenta, Gelb (Yellow) verwendet. Für schwarz verwendet man dafür schwarze Farbe.

Die Farbe eines Körpers ist jedoch nicht nur von seinen Absorptionseigenschaften abhängig, sondern auch von der Beleuchtung. So geht die sekundäre Farbmischung immer von Beleuchtung mit weißem Licht aus. Beleuchtet man einen weißen Körper mit weißem Licht, so erscheint er auch weiß. Ändert man jedoch die Beleuchtung auf rot, so erscheint der weiße Körper auch rot, Abbildung 8.

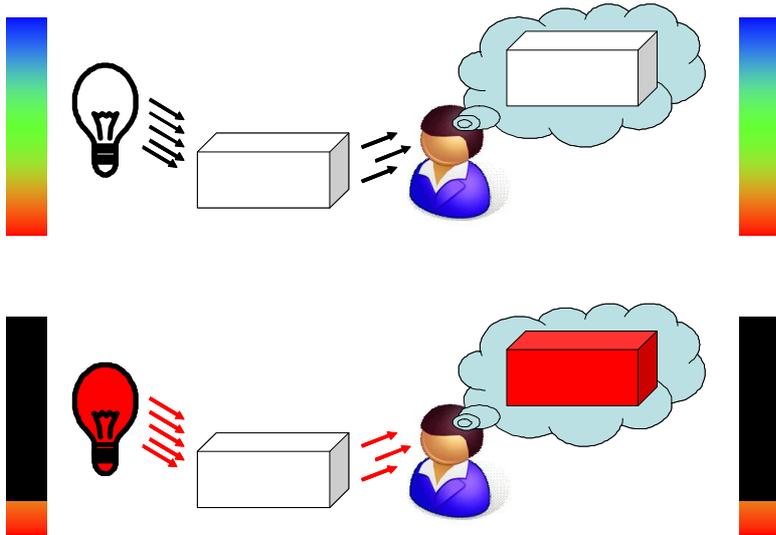


Abbildung 8: Rote Beleuchtung für weißen Körper, der Körper erscheint rot

Wird ein grüner Körper mit weißem Licht beleuchtet, so erscheint er dem Beobachter auch grün. Beleuchtet man ihn jedoch so wie den weißen Körper mit rotem Licht, so erscheint er schwarz, da ein grüner Körper nur grün reflektiert, rot und blau dagegen absorbiert, Abbildung 9.

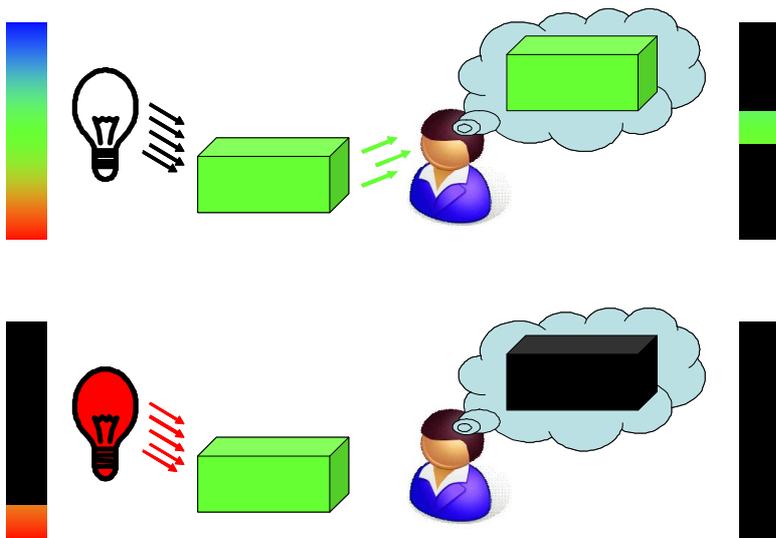


Abbildung 9: Rote Beleuchtung für grünen Körper, der Körper erscheint schwarz

11. Workshop Sichtsysteme

Photometrie

Nachdem bisher viel von Licht und Farbe die Rede war soll hier eine kurze Einführung in die Photometrie gegeben werden. Will man physikalische Größen wie Licht messen, muss man ein Maßsystem bereit halten. Die Physik hält dafür die Radiometrie bereit. Hier wird die elektromagnetische Strahlung in Einheiten der Energie, der Leistung usw. bestimmt. Im Gegensatz dazu berücksichtigt die Photometrie bei der Messung die Empfindlichkeit des menschlichen Auges. Die radiometrischen Größen werden mit der Empfindlichkeit des Auges gewichtet.

Diese Gewichtung ist abhängig von der Wellenlänge der verwendeten Strahlung. Das geht direkt auf die spektrale Empfindlichkeit der unterschiedlichen Sehzellen zurück,

Abbildung 3. Die normierte Gewichtungsfunktion wurde von der internationalen Beleuchtungskommission CIE (Commission internationale de l'éclairage) erstellt. Sie ist unterschiedlich für Tag- und Nachtsehen, Abbildung 4. Die Funktion, die die Empfindlichkeitskurve für das photosische Sehen (Tag) beschreibt wird mit $V(\lambda)$ bezeichnet. Das skopische Sehen beschreibt $V'(\lambda)$.

Die Basisgröße der Photometrie ist die Lichtstärke mit der Einheit Candela (cd). Das Candela ist eine der sieben Basiseinheiten des internationalen Einheitensystems. Ein Candela ist die Lichtstärke einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hz ($\lambda \sim 555$ nm) mit einer Leistung von $1/683$ W/sr aussendet.

Als abgeleitete Größen erhält man dann den Lichtstrom Θ , gemessen in Lumen (lm). Er gibt an wie viel Licht eine Lichtquelle abgibt. Es gilt $1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr}$. Im Gegensatz dazu gibt die Beleuchtungsstärke, gemessen in Lux (lx) an wie viel Licht auf eine Fläche auftrifft. Es gilt $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$. Die Leuchtdichte ist eine weiter wichtige Kenngröße. Sie gibt an wie hell eine Fläche erscheint. Die Leuchtdichte wird in cd/m^2 gemessen.

Photometrische Größen sind spektral bewertete Größen. Die spektrale Bewertung fließt dabei über die Empfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ ein. Dabei gilt die folgende Gleichung:

$$X_p = K_m \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_e \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

Die photometrische Größe X_p erhält man aus der radiometrischen Größe X_e multipliziert mit der Empfindlichkeitskurve durch Integration über den Wellenlängenbereich. Das Ergebnis muss noch mit der Konstanten $K_m = 683 \text{ cd sr} / \text{W}$ multipliziert werden. Hier taucht auch wieder der Zahlenwert 683 aus der Definition des Candela auf.

Die folgende Tabelle gibt den Zusammenhang der photometrischen mit den radiometrischen Größen an.

Photometrische Größe	Einheit	Radiometrische Größe	Einheit
Lichtstärke	cd	Intensität	W/sr
Lichtstrom	lm	Strahlungsleistung	W
Beleuchtungsstärke	lx	Beleuchtungsichte	W/m ²
Leuchtdichte	cd/m ²	Strahldichte	W/sr/m ²

11. Workshop Sichtsysteme

2 FAFRBMETRIK

Zu Beginn haben wir uns mit dem Auge und der Empfindlichkeit der Sehzellen befasst. Aus dieser mehr beschreibenden Beschäftigung muss man nun zu einer mathematischen Formulierung kommen. Historisch standen am Anfang Experimente von Newton, der das weiße Licht der Sonne mit einem Prisma in die Spektralfarben zerlegt. Durch Überlagern einzelner Farben konnte er Farben additiv mischen. Newton hat auch die Farben erstmals auf einem Farbkreis angeordnet.

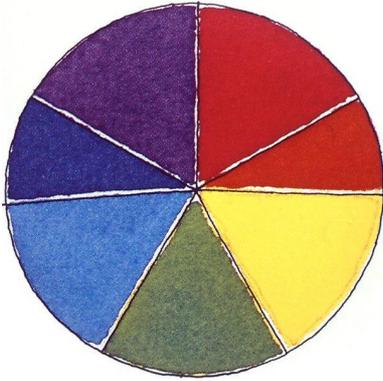


Abbildung 10: Farbkreis nach Newton, [11]

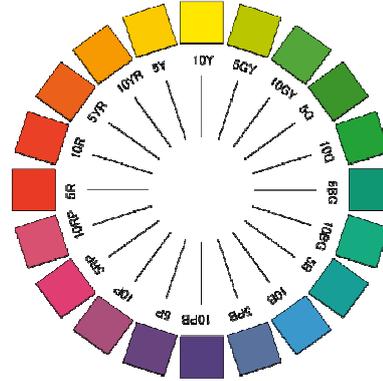


Abbildung 11: Farbkreis nach Munsell,[4]

Thomas Young fand 1807 die drei verschiedenen Rezeptoren im Auge und schloss daraus auf drei Grundfarben. Hermann von Helmholtz entwickelte daraus in der Mitte des 19. Jahrhunderts die erste Theorie zur Dreifarbenlehre.

Auch Maler wie z. B. der Amerikaner Munsell beschäftigten sich mit Farbe. Er veröffentlichte 1905 einen Farbatlas. Das Munsell-System ist ein dreidimensionaler Farbraum. Die hinterlegten Farbmuster haben empfindungsmäßig den gleichen Abstand. Ein Querschnitt durch eine Ebene des Farbraums ist in dem Farbkreis (Abbildung 11) zu sehen.

Das Ordnungsprinzip für die Farbe ist als Zahlentripel {H, C, V} aufgebaut. Dabei steht H für den Farbton (hue), C für Chroma (Farbsättigung) und V für Value (Helligkeit). Das System ist in Abbildung 12 zu sehen. Im neueren Farbsystemen wie dem HSL wird die Einteilung aufgegriffen. Dazu kommen wir später noch.

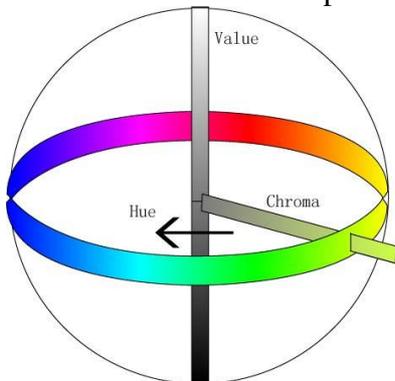


Abbildung 12: Farbsystem nach Munsell, [4]

11. Workshop Sichtsysteme

RGB

Bei elektronischen Anzeigen ist der RGB-Farbraum gebräuchlich. Eine Farbe wird durch additive Farbmischung aus den drei Primärfarben Rot, Grün und Blau erzeugt. Beschrieben wird die Farbe durch ein Zahlentriplett $\{R, G, B\}$, das den relativen Anteil der drei Farben angibt. Der Wertebereich liegt dabei zwischen 0 und 1. Um mit der digitalen Verarbeitung besser auszukommen, wird, je nach Farbtiefe n , auch eine Darstellung zwischen 0 und $2^{(n-1)}$ verwendet. Bei den üblichen 8 Bit je Farbe sind es also Zahlen zwischen 0 und 255.

Für die Farben verwende ich im Folgenden immer die Abkürzungen R (Rot), G (Grün), B (Blau), C (Cyan), M (Magenta), Y (Gelb – yellow), K (Schwarz – key (Schlüsselplatte im Farbdruck, an der die farbigen Platten ausgerichtet werden)), W (Weiß).

Die Farben sind normiert, $R + G + B = 1$.

$$r = \frac{R}{R+G+B} \quad g = \frac{G}{R+G+B} \quad b = \frac{B}{R+G+B}$$

Mathematisch gesehen spannen drei Vektoren $\vec{R}, \vec{G}, \vec{B}$ einen orthogonalen Vektorraum auf. Im Ursprung liegt die Farbe schwarz. Jede Farbe ist durch einen Farbvektor $\vec{F} = \vec{R} + \vec{G} + \vec{B}$ gekennzeichnet. Anschaulich kann man sich den Farbraum als Würfel vorstellen,

Abbildung 13. Die Ecke im Koordinatenursprung ist schwarz. Entlang der Achsen geht es in Richtung der Farben B, R, G, die in der jeweiligen Ecke liegen. Die Mischfarben aus zwei Primärfarben liegen dann ebenfalls an Eckpunkten des Würfels: M (R + B), C (B + G), Y (R + G). Die letzte Ecke schließlich ist die Summe aller drei Primärfarben: W (R + G + B).

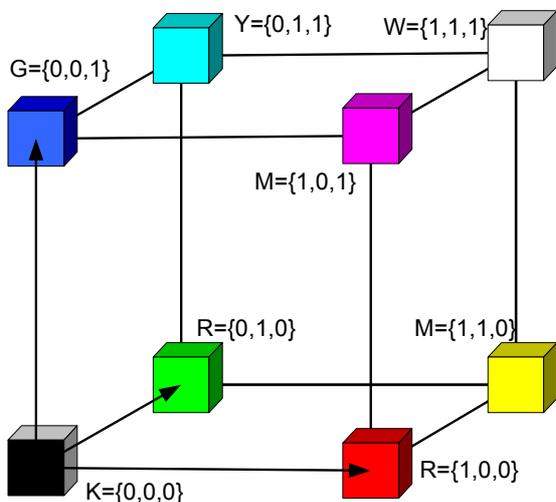


Abbildung 13: RGB-Farbraum

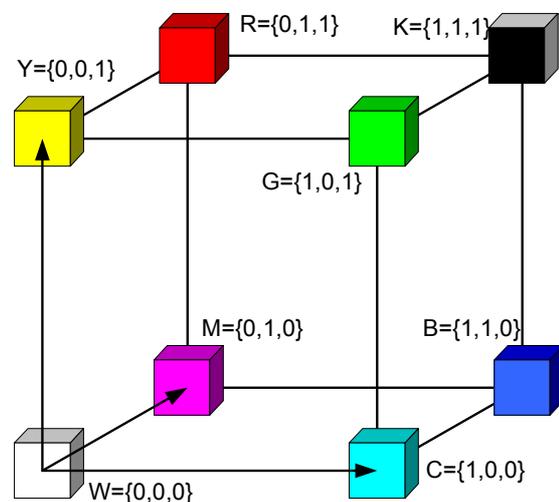


Abbildung 14: CMY-Farbraum

CMY

In der Drucktechnik wird mit subtraktiver Farbmischung gearbeitet. Hier verwendet man den CMY-Farbraum. Er ist analog zum RGB angelegt. Allerdings liegt hier der Ursprung bei W mit den Achsen C, M und Y,

11. Workshop Sichtsysteme

Abbildung 14.

In der Drucktechnik wird allerdings meist neben CMY auch noch schwarz zum Drucken verwendet. Mit der CMYK-Technik gelingt es besser schwarz darzustellen. Bei den praktisch verwendeten Farben ergibt $C + M + Y$ meist nur ein dunkles Braun, auch wenn es theoretisch schwarz ergibt. Schwarze Farbe ist daher in der Drucktechnik für alle dunklen Farben wichtig.

Die beiden Systeme RGB und CMY lassen sich leicht ineinander umrechnen:

$$\begin{array}{ll} C = 1 - R & R = 1 - C \\ M = 1 - G & G = 1 - M \\ Y = 1 - B & B = 1 - Y \end{array}$$

Ein Nachteil des RGB-Systems ist es, dass die Helligkeit der Farbe nicht ausreichend beschrieben wird. Eine Änderung in einer Komponente ändert den Farbton. Wenn man alle drei Komponenten im gleichen Maß ändert, ändert sich aber nicht nur die Sättigung, sondern auch die Intensität und bei größeren Änderung auch noch der Farbton. Eine Änderung in der Helligkeit erfordert eine nichtproportionale Änderung in den drei Komponenten. Ein Vergleichen von Farben und Farbunterschieden ist nicht möglich. Mit den reinen Zahlentripel kann man sich auch meist keine Farbe vorstellen.

HSV

Abhilfe schaffen andere Farbmodelle wie das HSV- oder das HSL-Modell. Ein anschauliches Verfahren zur Transformation soll hier beschrieben werden. Man stellt sich den RGB-Würfel auf der schwarzen Ecke stehend vor. Nun klopft man ihn platt, so dass die sechs farbigen Ecken in einer Ebene liegen. In der Mitte liegt dann die schwarze Ecke unter der weißen Ecke. Man hat ein Farbrad, Abbildung 15, mit der Achse K-W.

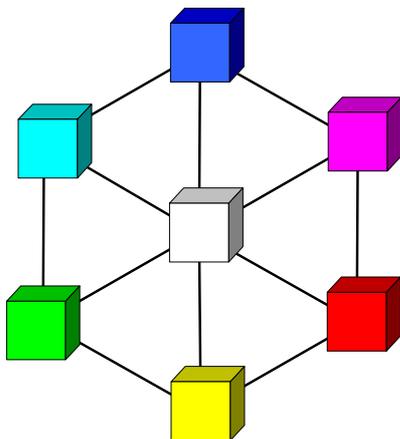


Abbildung 15: RGB-Farbrad

Die Farben kann man nun mit zwei Parametern beschreiben: einen Winkel und einen Abstand von der Achse. Der dritte Parameter ist die Helligkeit, die längs der Achse skaliert; dabei ist unten schwarz und oben weiß. Das Ergebnis ist das HSL- oder HSV Modell, Abbildung 16.

Das H und das S ist beiden Modellen gleich. H steht für Hue (Farbton) und S für die Sättigung (Saturation). Dabei wird H als Winkel angegeben; R entspricht 0° . Die Farben R, G, B haben einen Winkel von je 120° zueinander. Die Farben C, M, Y haben ebenfalls einen Abstand von

11. Workshop Sichtsysteme

120° zueinander sind mittig zwischen R, G, B angeordnet. Der Wert für S liegt zwischen 0 und 1. Er gibt den Abstand von der Achse an. Er ist ein Maß für die Sättigung der Farbe. S = 0 entspricht grau; keinerlei Sättigung. L bzw. V gibt die Helligkeit der Farbe an. L steht für Lightness (Helligkeit) und V für Value. Der Wert liegt zwischen 0 und 1.

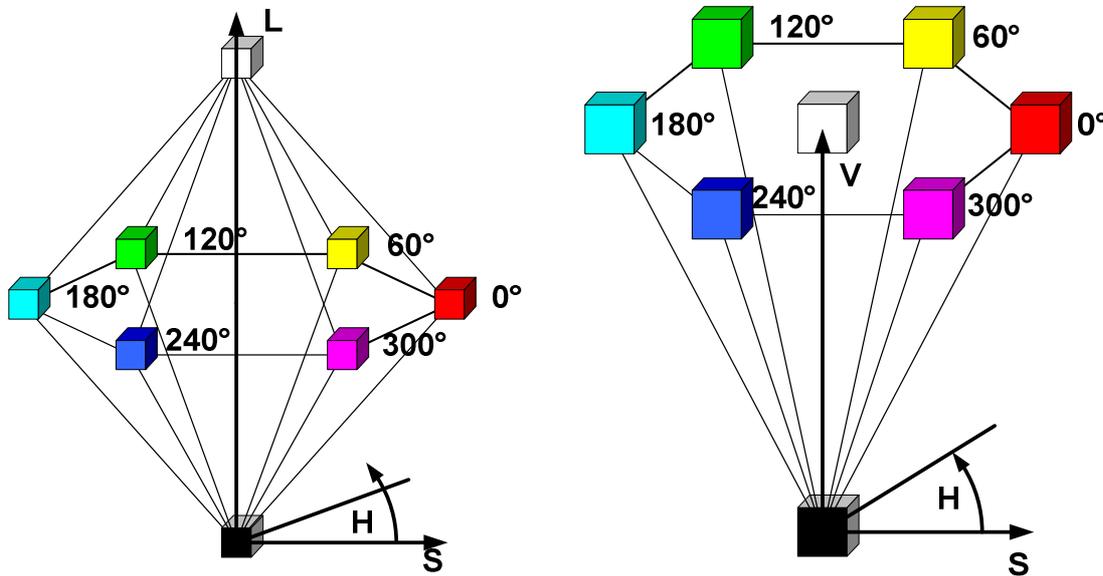


Abbildung 16: HSL-Farbraum (links) und HSV-Farbraum (rechts)

RGB Werte können in HSL bzw. HSV Werte umgerechnet werden. Ausgehend von RGB Werten zwischen 0 und 1 gelten die folgenden Formeln für HSL:

max = Maximum (R, G, B)

min = Minimum (R, G, B)

$H = 0^\circ$ für max = min

$H = 60^\circ \times \left(\frac{G - B}{\max - \min} + 0 \right)$ für max = R

$H = 60^\circ \times \left(\frac{B - R}{\max - \min} + 2 \right)$ für max = G

$H = 60^\circ \times \left(\frac{R - G}{\max - \min} + 4 \right)$ für max = B

$H = H + 360^\circ$ falls $H < 0$

$L = 0.5 \times (\max + \min)$

$S = 0$ für max = min

$S = \frac{\max - \min}{\max + \min}$ für $L \leq 0.5$

$S = \frac{\max - \min}{2 - (\max + \min)}$ für $L > 0.5$

11. Workshop Sichtsysteme

Für HSV erhält man H genauso wie bei HSL. Für S und V gilt:

$$S = 0 \quad \text{für } \max = 0$$

$$S = \frac{\max - \min}{\max} \quad \text{sonst}$$

$$V = \max$$

In den HSL bzw. HSV Modellen ist nicht erforderlich, den Anteil von R, G oder B in einer Farbe zu kennen. Man stellt den Farbton über den Winkel ein. Um von Rot zu rosa zu gelangen, wird nur die Sättigung verringert. Um die eingestellte Farbe (H und S) heller zu machen, wird die Helligkeit (L bzw. V) vergrößert.

Damit lassen sich Farben leicht einstellen und verändern. Abbildung 17 zeigt die Einstellung einer Farbe im Programm POWERPOINT. Man hat die Wahl zwischen HSL und RGB. Bei HSL wandert die Farbe definiert rechts – links beim Ändern des Farbtons. Ändert man die Sättigung bewegt sich die Farbe der rechteckigen Anzeige von in Richtung oben – unten. Die Intensität schließlich lässt den Farbort unverändert. Lediglich die Intensität, angezeigt am rechten Balken, ändert sich.

Beobachtet man dagegen das Fadenkreuz im farbigen Rechteck der RGB Anzeige, so macht es keine vorhersehbaren Bewegungen, wenn man an einer der drei Komponenten die Einstellung verändert. Vergrößert man Rot in dem angegebenen Beispiel, so wandert das Fadenkreuz zunächst schräg nach rechts unten, um sich dann steil nach rechts oben zu bewegen. Gleichzeitig wandert die Pfeilspitze in dem Intensitätsbalken zunächst etwas nach oben, verharrt dann eine Weile bevor es weiter nach oben geht.

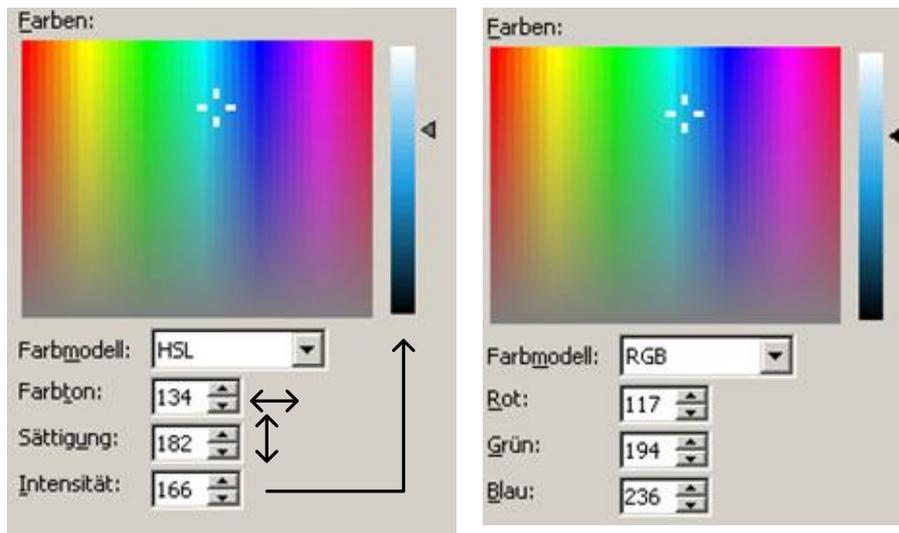


Abbildung 17: Vergleich HSL und RGB

Farbige Bilder sollen manchmal in Graustufenbilder übertragen werden. Man kann das einfach dadurch umsetzen, dass eine Graustufe als $R/3 + G/3 + B/3$ definiert wird. Das Ergebnis ist aber eher fade, Abbildung 18.

11. Workshop Sichtsysteme



Abbildung 18: $R/3 + G/3 + B/3$



Abbildung 19: $Y = 0.299 * R + 0.578 * G + 0.114 * B$

Da die meiste Information im grünen Anteil des Bildes liegt, erhält man mit der folgenden Formel bessere Ergebnisse, Abbildung 19:

$$Y = 0.299 * R + 0.578 * G + 0.114 * B$$

Diese Konversion ist auch Basis der Übertragung von Farbbildern. Neben der Helligkeitsinformation im Wert Y, der allein im schwarz-weiß Empfänger dargestellt wird, wird Farbinformation (Chrominanz) benötigt. Sie erhält man in der Kodierung für das PAL Farbfernsehen durch:

$$U = 0.493 * (B - Y)$$

$$V = 0.877 * (R - Y)$$

Der Vorteil dieser Kodierung liegt in der Trennung der Helligkeitsinformation von der Farbinformation. Außerdem wird die Korrelation zwischen den Farbinformationen reduziert. Der Informationsumfang von U und V ist dabei deutlich geringer als von Y. Die einzelnen Komponenten können getrennt übertragen oder komprimiert werden. So beruht auch die JPEG-Komprimierung auf einem YUV-Bild.

Im YUV werden die Helligkeit und der Abstand der Farbe zum Graustufenbild für die jeweilige Farbe übertragen. Damit kann man statt 24 Bit je Pixel mit 16 Bit je Pixel auskommen. In Abbildung 20 und Abbildung 21 ist noch die U- bzw. V-Komponente zur Y-Komponente des Bildes gezeigt. Deutlich wird dabei, dass bei diesem Bild besonders die U-Komponente kaum Informationen enthält. Das liegt daran, dass das farbige Original kaum Blautöne enthält.

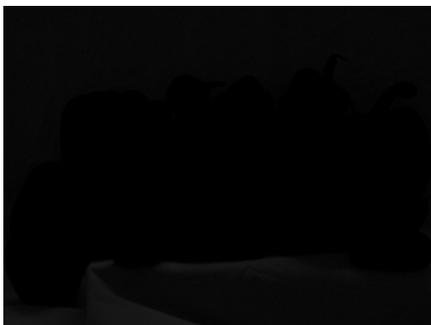


Abbildung 20: U-Komponente

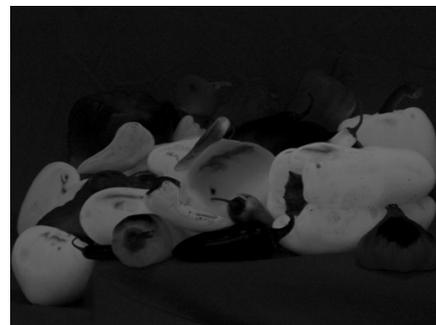


Abbildung 21: V-Komponente

11. Workshop Sichtsysteme

CIE

Nach den Ausführungen zu den verschiedenen Farbmodellen soll nun noch etwas zur Normung von Farben ausgeführt werden. Für die Normung der Farben ist die CIE zuständig. Die CIE wurde Anfang des 20. Jahrhunderts gegründet. Sie hat das CIE-Normvalenzsystem entwickelt und 1931 den XYZ Farbraum veröffentlicht. In ihm sind alle wahrnehmbaren Farben dargestellt. Der XYZ Farbraum wurde 1976 zum $L^*a^*b^*$ Farbraum weiter entwickelt.

Farben können im RGB System beschrieben werden. Dort lassen sich alle Farben innerhalb eines Würfels darstellen. Sind das aber alle Farben, die der Mensch wahrnehmen kann? 1931 wurde von der CIE der XYZ Farbraum definiert, Abbildung 22. Auf dem Rand des Farbraums liegen reine Spektralfarben; die entsprechenden Wellenlängen können an den Rand geschrieben werden. Der Rand ist definiert durch die Wellenlängen von 380 nm bis 780 nm. Das gilt allerdings nicht für den unteren Rand, der Purpurlinie. Diese Farben können nur durch Mischen dargestellt werden. Je weiter nach innen man im Farbraum gelangt, desto weniger sind die Farben gesättigt. In der Mitte liegt die Farbe weiß. Für weiß gibt es verschiedene Definitionen. Die CIE hat das Normweiß D65 festgelegt. D65 entspricht der Farbe eines schwarzen Strahlers der Temperatur 6500 K. Je nach Beleuchtungsart gibt es andere Punkte für weiß. In Abbildung 22 ist die Schwarzkörperkurve eingezeichnet. Sie entspricht der Farbe einer Strahlungsquelle (schwarzer Körper) der entsprechenden Temperatur. Sie geht von niedrigen Temperaturen mit einem deutlichen Rotstich über neutral weiß bis zu hohen Temperaturen mit einem Blaustich.

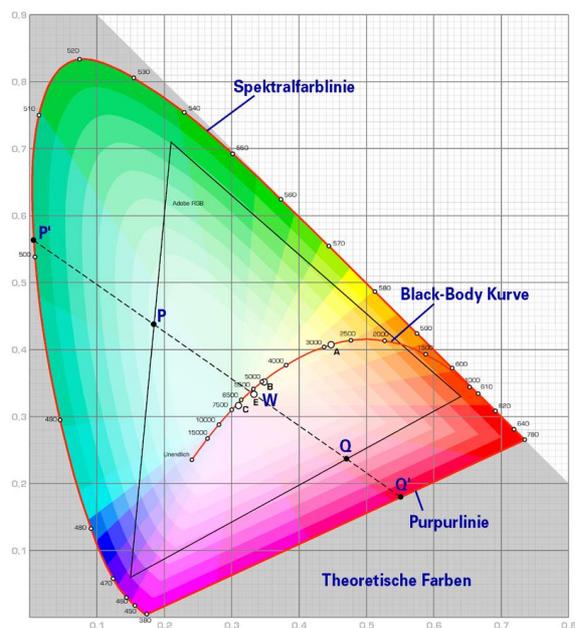


Abbildung 22: CIE Farbraum (1931) [2]

Die Farben sind durch xy Werte definiert. Wie man in Abbildung 22 sieht, kann man auch in diesem Farbraum ein Dreieck aufspannen. Je eine Ecke im roten, grünen und blauen Bereich der Farben bzw. am Rand des Farbraums. Es gibt jedoch kein Dreieck, das den gesamten Raum umfasst. Will man folglich alle Farben beschreiben, muss man ein Dreieck aufspannen, dessen Eckpunkt außerhalb des sichtbaren Farbraums liegen, also im grauen Bereich der Abbildung 22. Man erhält so virtuelle Farbvalenzen X, Y, Z .

11. Workshop Sichtsysteme

Während der RGB oder der CMY Farbraum immer geräteabhängig sind, ist der XYZ Farbraum unabhängig vom Darstellungsmedium und nur auf das Sehen des Menschen ausgerichtet. Dazu wurden Versuchsreihen durchgeführt und aus dem Mittelwert ein Standardbeobachter definiert.

Daraus abgeleitet wurden die Tristimulusfunktionen. Sie geben die spektrale Empfindlichkeit der drei Zapfenarten an. Aus diesen Funktionen kann man Farbmischkurven erstellen. Sie geben an, welchen Anteil an R, G und B erforderlich ist, um die Farbe einer bestimmten Wellenlänge zu erzeugen, Abbildung 23.

Wie man sieht, können Farben zwischen 454 nm und 550 nm rechnerisch nur mit negativem Rotanteil gemischt werden. Bei dem Beispiel in Abbildung 23 muss für einen blaugrünen Farbton bei 500 nm das RGB Trippel lauten: $\{-0.07, 0.085, 0.05\}$.

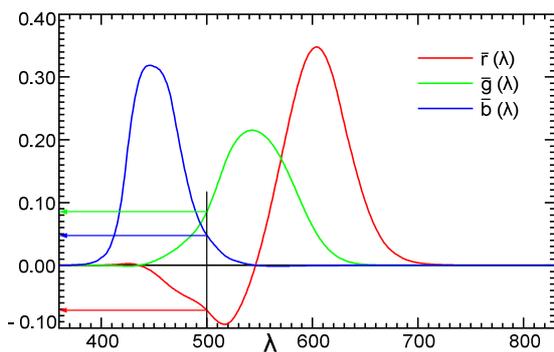


Abbildung 23: Tristimulusfunktionen

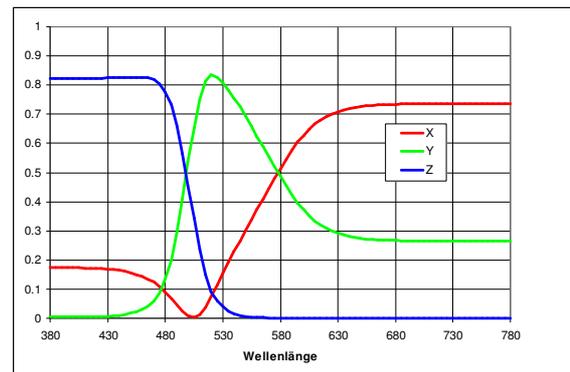


Abbildung 24: Tristimulusfunktionen nach der CIE 1931

Durch eine lineare Transformation kann erreicht werden, dass die virtuellen Primärvalenzen X, Y, Z so verändert werden, dass keine negativen Koeffizienten mehr auftreten und Y dem Helligkeitsempfinden entspricht. Das Ergebnis ist in Abbildung 24 dargestellt.

Die XYZ Werte werden selten grafisch dargestellt. Meist wird ein zweidimensionales Diagramm mit xy-Koordinaten für die Darstellung verwendet, Abbildung 22. Dabei geht die Helligkeitsinformation verloren. Die xyz Werte erhält man aus XYZ durch Normierung:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

Wegen der Randbedingung $x + y + z = 1$ reicht es, nur x und y anzugeben. Die Farbe weiß kann dann unterschiedlich definiert werden. Gebräuchlich ist der neutrale Punkt $x = y = 1/3$ oder der Punkt D65 mit $x_{D65} = 0,3127$ und $y_{D65} = 0,3290$ (nach CIE 1931). Gibt man neben x und y noch den Wert Y für eine Farbe an, so kennt man auch die Helligkeit. Y wird dabei in cd/m^2 angegeben.

Eine Anwendung der Farbcharakterisierung durch das CIE System ist die Spezifikation von Farben. Damit verbunden ist der Vergleich von Farben. Wann sind zwei Farben gleich? Um wie viel dürfen sich zwei Farben in xy unterscheiden, ohne dass man es wahrnehmen kann? Wie Untersuchungen von Mc Adam ergaben, ist der XYZ Farbraum für solche Fragestellungen nicht geeignet. Je nach Ort im Farbraum ist der Abstand zu einer Farbe, die gerade als unterschiedlich wahrgenommen wird verschieden groß. Das lässt schon ein Blick auf den Farbraum, Abbildung 22 vermuten. Grüntöne belegen einen deutlich größeren Bereich als Rot- oder Blautöne. Abbildung 25 zeigt die sogenannten McAdam-Ellipsen (in 10facher Vergrößerung). Sie geben

11. Workshop Sichtsysteme

an wie groß der Bereich um eine Farbe ist, innerhalb dessen man keinen Farbunterschied wahrnehmen kann.

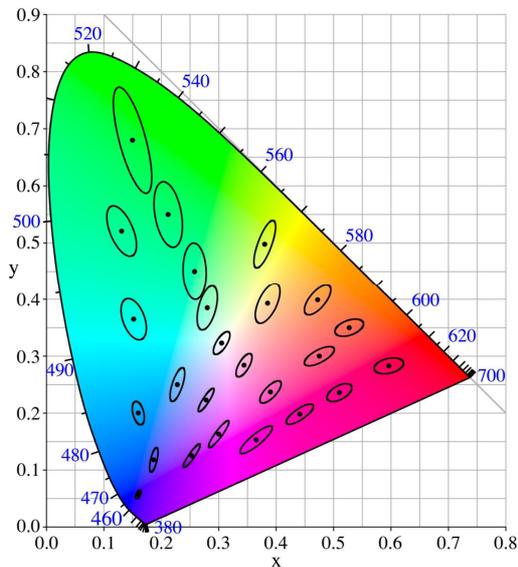


Abbildung 25: Mc Adams Ellipsen im xy-Diagramm [10], Ellipsen 10fach vergrößert

Das Ziel sollte nun sein, einen Farbraum zu schaffen, bei dem die Größe der McAdam-Ellipsen unabhängig vom Ort im Farbraum ist. Man erreicht das durch eine Transformation des XYZ Farbraums in den $L^*a^*b^*$ Farbraum. Anschaulich gibt L die Helligkeit (Lightness) der Farbe an, a^* ist eine Rot-Grün-Achse und b^* eine Blau-Gelb-Achse, Abbildung 26. Mit dieser Transformation beschreiben gleiche Abstände zweier Farben auch einen gleichen Eindruck für den Unterschied, unabhängig von der Farbe selbst.

Bei der Transformation erhält man für L^* einen Wertebereich von 0% bis 100%. Dabei entspricht 0% schwarz und 100% weiß; 50% ist grau. Die a^* Werte gehen von -150 (G) bis +100 (R), die Werte von b^* reichen von -100 (B) bis +150 (Y). $L^*a^*b^*$ nimmt die Verschaltung der Sehzellen, wie sie in Abbildung 5 zu sehen ist, auf. Dort hatten wir eine R-G, eine B-Y und eine hell-dunkel Empfindung festgestellt.

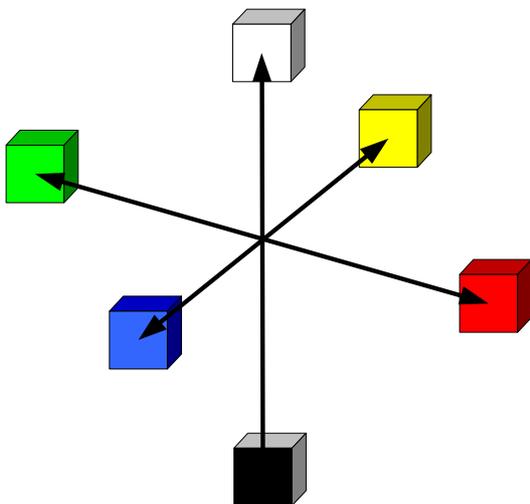


Abbildung 26: CIE $L^*a^*b^*$

11. Workshop Sichtsysteme

Die Transformation aus XYZ nach L*a*b* sieht wie folgt aus:

$$L^* = 116 f_y - 16 \qquad a^* = 500 (f_x - f_y) \qquad b^* = 200 (f_y - f_z)$$

$$f_x = \sqrt[3]{x_r} \quad x_r > \varepsilon; \qquad f_x = \frac{\kappa x_r + 16}{116} \quad x_r \leq \varepsilon$$

$$f_y = \sqrt[3]{y_r} \quad y_r > \varepsilon; \qquad f_y = \frac{\kappa y_r + 16}{116} \quad y_r \leq \varepsilon$$

$$f_z = \sqrt[3]{z_r} \quad z_r > \varepsilon; \qquad f_z = \frac{\kappa z_r + 16}{116} \quad z_r \leq \varepsilon$$

$$x_r = \frac{X}{X_r}; \quad y_r = \frac{Y}{Y_r}; \quad z_r = \frac{Z}{Z_r}$$

$$\varepsilon = 0.008856; \quad \kappa = 903.3$$

Die Größen mit Index r beziehen sich immer auf Weiß als Referenzfarbe. Für D65 als Referenz muss man einsetzen:

$$X = 0.309, Y = 0.319, Z = 0.372$$

Je nach Anwendung können auch andere Stellen im Farbraum als Referenzweiß eingesetzt werden.

Der Abstand zweier Farben lässt sich nun berechnen:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Ein Wert von $\Delta E = 1$ ist von den allermeisten Personen nicht wahrnehmbar. Ab $\Delta E = 3$ können Farbunterschiede von den meisten Personen wahrgenommen werden.

RGB Farbraum

Bei der Farbdarstellung von digitalen Anzeigen wird meist der RGB Farbraum verwendet. Je Farbe werden 8 Bit für die Codierung verwendet. Mit den 24 Bit kann man $2^{24} \approx 16.8 * 10^6$ darstellen. Allerdings können so viele Farben nicht gleichzeitig gezeigt werden, da die Farbunterschiede sehr klein sind. Zwei Farben, die sich um nur das letzte Bit in einem der drei Primärfarben unterscheiden können i. A. nicht als unterschiedlich wahrgenommen werden.

Eindeutig ist der RGB Farbraum allerdings nicht. Welche Farben wie dargestellt werden können liegt an der Wahl der Eckpunkte des RGB Dreiecks, der Primärvalenzen, und dem Weißpunkt. Die Primärvalenzen legen das Farbdreieck der bei geringen Helligkeiten darstellbaren Farben fest. Der Weißpunkt bestimmt das Intensitätsverhältnisse für Farbtripel mit drei identischen Komponenten, damit indirekt auch das Verhältnis vom maximalen R zu maximalen G und B.

Hier gibt es keine eindeutige Normung. So gibt es z. B: CIE-RGB, Adobe-RGB, ProPhoto-RGB und noch einige mehr, Abbildung 27. Der CIE-RGB Farbraum ist durch die Wellenlängen 700 nm (R), 546,1 nm (G) und 435.8 nm (B) dargestellt. Zur praktischen Darstellung werden in der Norm von 1931 Spektrallinien einer Quecksilberlampe verwendet. Anstelle der 700 nm hat das Hg-Spektrum allerdings seine Linie bei 690.7 nm. Das ist ein geringer Fehler, da das menschliche Auge im Bereich über etwa 650 nm Farben kaum noch unterscheiden kann.

11. Workshop Sichtsysteme

Im RGB Farbraum sind nicht alle Farben darstellbar, da er im Inneren des Farbraums liegt und so nur einen Ausschnitt aller möglichen Farbwahrnehmungen darstellt. Die menschliche Farbwahrnehmung ist abhängig von der Helligkeit und der Beleuchtung. Beides wird im RGB Farbraum nicht berücksichtigt. Für ein gutes Unterscheiden von Farben muss eine Mindestleuchtdichte gegeben sein, um die Zapfen anzusprechen. Es darf aber auch nicht zu hell sein, um eine Blendung zu vermeiden. Je nach dem Spektrum des beleuchtenden Lichts kann ein farbiger Körper auch unterschiedlich wahrgenommen werden.

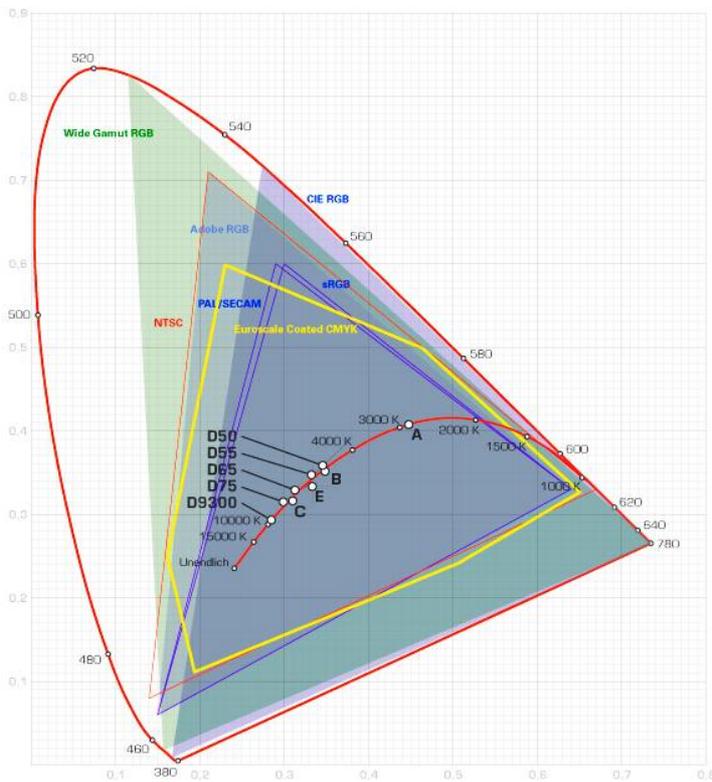


Abbildung 27: RGB Farbräume [12]

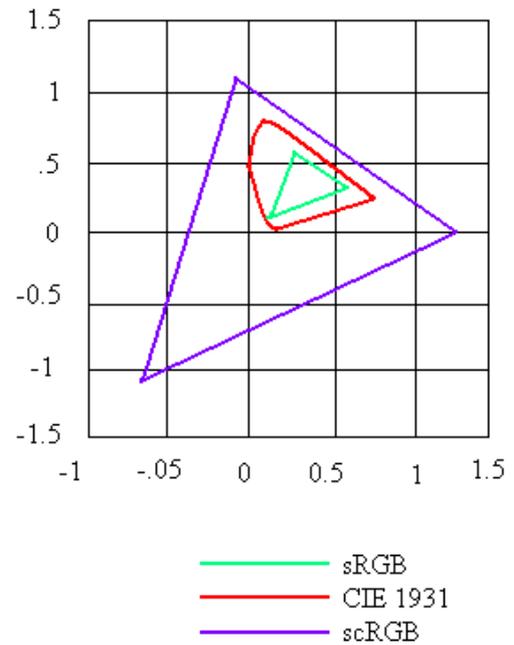


Abbildung 28: scRGB Farbraum [13]

sRGB

Um eine verbesserte Darstellung von Farben an modernen Anzeigegeräten zu ermöglichen, wurde 1999 von der CIE der sRGB Farbraum spezifiziert (IEC 16966-2-1). Er ist auf typische Anzeigegeräte wie z. B. LCD Monitore bei typischen Umgebungsbedingungen im Büro optimiert. Heute folgen die meisten Anzeigegeräte dem sRGB Raum. Die Schlüsseldaten des sRGB sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

	Rot	Grün	Blau	Weiß
x	0.6400	0.3000	0.1500	0.3127
y	0.3300	0.6000	0.0600	0.3290
z	0.0300	0.1000	0.7900	0.3583

Zu diesen Werten kommen noch zahlreiche Angaben zur Umgebung unter der das Display betrachtet werden muss.

11. Workshop Sichtsysteme

Verwendet wird der sRGB Standard für Anwendungen im Internet, insbesondere für Bilder, die dort veröffentlicht werden. Programme zur Bildbearbeitung oder Bilderstellung verwenden häufig sRGB oder können ihr Ergebnis in sRGB konvertieren. Auch OpenGL und Direct3D kann sRGB Texturen verarbeiten.

scRGB

Eine neue Weiterentwicklung ist scRGB. Der große Unterschied ist, dass die Primärvalenzen außerhalb des sichtbaren Farbraums liegen. Dadurch können alle für den Menschen sichtbaren Farben dargestellt werden, Abbildung 28. scRGB wurde von Microsoft definiert. Grundlage sind die Werte für RGB und Weiß aus sRGB. Allerdings wird für die Darstellung je eine 16 Bit Gleitkommazahl anstelle einer 8 Bit Integer verwendet. Damit werden Werte möglich, die außerhalb des sRGB Bereichs liegen. Insbesondere kann mit negativen Zahlen gearbeitet werden, was eine deutliche Erweiterung ermöglicht. Mit der veränderten Darstellung der Werte wird eine höhere Genauigkeit erreicht. In Windows Vista wurde scRGB das erste Mal eingesetzt. Auch Windows 7 soll mit 48 Bit scRGB arbeiten.

3 FAFRDARSTELLUNG

Kommen wir nun zur praktischen Umsetzung, zur Farbdarstellung bei Sichtsystemen. Ich möchte hier zunächst auf verschiedene Typen von Monitoren eingehen. Danach werden verschiedene Projektionstechnologien vorgestellt. Dabei soll jeweils nur die Farbdarstellung im Mittelpunkt stehen.

Auf die Genauigkeit der Darstellung soll hier nicht eingegangen werden. Heute kommen die Signale in den meisten Fällen digital zum Monitor bzw. Projektor. Die Bittiefe beträgt meist noch 8 Bit pro Farbe. Am Prinzip der Farbdarstellung ändert sich durch eine größere Bittiefe nichts.

Intern wird das digitale Eingangssignal häufig mit höherer Genauigkeit weiter verarbeitet. So wird heute in vielen Geräten intern schon mit 10 oder 12 Bit pro Farbe gearbeitet - unabhängig vom Eingangssignal. Damit sollen störende Artefakte bei der Umsetzung des Eingangssignals auf die Graustufen der drei Primärfarben vermieden werden.

Monitor

CRT

Aus historischen Gründen soll hier zunächst auf den guten alten CRT Monitor eingegangen werden. Über viele Jahre war die Elektronenstrahlröhre die einzige Technologie, mit der bewegte farbige Bilder auf einen Monitor dargestellt wurden.

Beim CRT Monitor wird das Bild mit einem Elektronenstrahl auf einer Phosphorschicht geschrieben. Der Elektronenstrahl wird dabei zeilenweise in über die Phosphorschicht geführt. Die Intensität des Elektronenstrahls wird nach dem Grauwert moduliert. Daraus resultieren dann die Graustufen des Bildes.

Die Ablenkung des Elektronenstrahls erfolgt durch ein kontinuierliches, analoges Signal. Ein festes Raster ist nicht vorgegeben. Dadurch kann ein CRT Monitor auch mit verschiedenen Auf-

11. Workshop Sichtsysteme

lösungen betrieben werden, ohne dass das Signal konvertiert werden muss. Artefakte durch die Anpassung verschiedener Formate treten nicht auf.

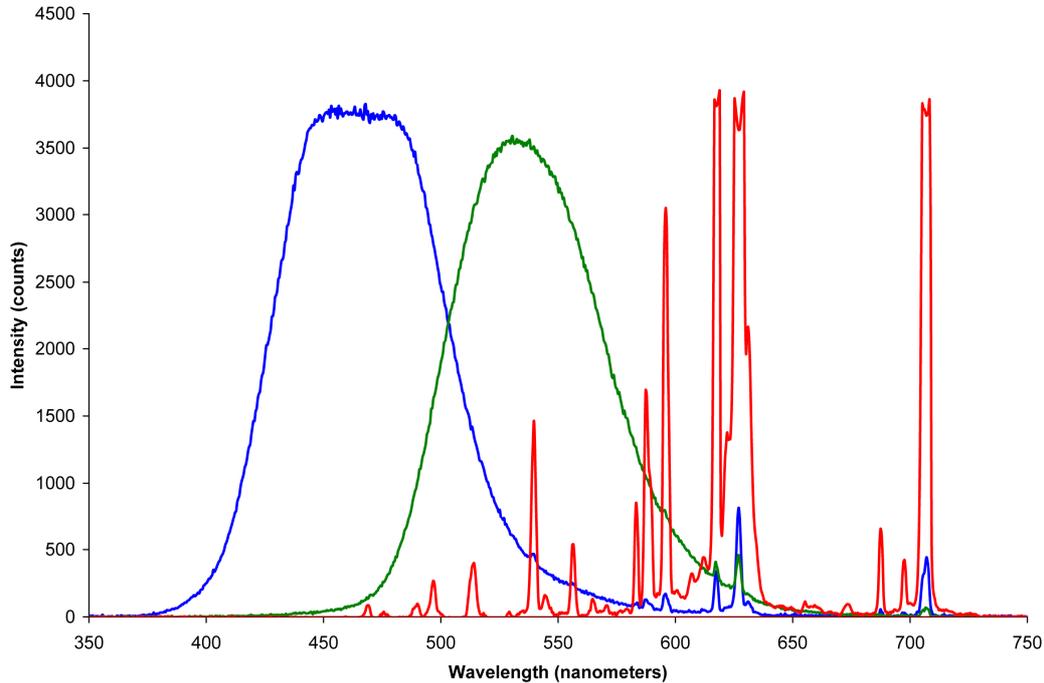


Abbildung 29: Emissionsspektrum von Phosphoren einer CRT Röhre, [6]

Für ein farbiges Bild werden drei Elektronenstrahlen verwendet. Die Phosphorschicht besteht nun aus drei unterschiedlichen Phosphorarten, die ein rotes, grünes bzw. blaues Emissionsspektrum haben, Abbildung 29. Die einzelnen Pixel der Bildröhre werden durch eine sehr feine Maske definiert. Sie sorgt dafür, dass die Elektronenstrahlen nur genau definierte Bereiche der Phosphorschicht erreichen. Es wurden verschiedene Maskenformen entwickelt: Loch-, Schlitz- und Streifenmasken, Abbildung 31. Hinter der Maske ist der Phosphor entsprechend der Maske strukturiert. So können die drei Phosphorarten ebenfalls streifenförmig angeordnet sein, oder in der sogenannten Deltaform (Abbildung 30, wo rot, grün und blau jeweils leicht versetzt sind).

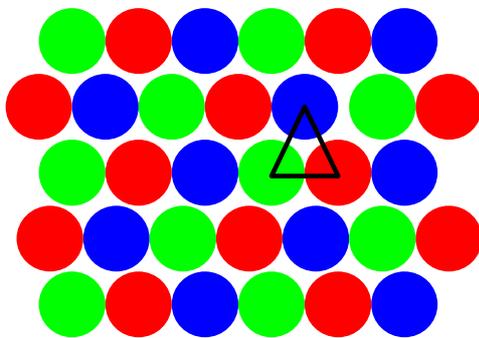


Abbildung 30: Phosphoranordnung in Delta-Form

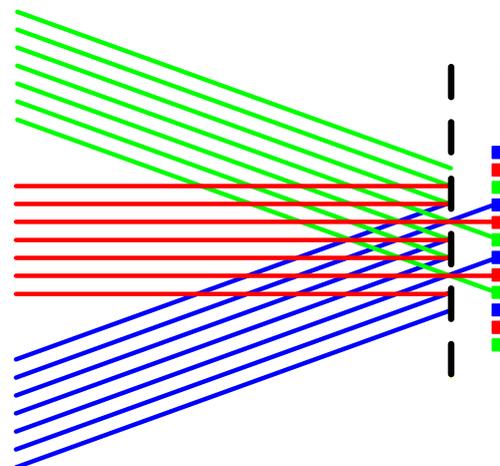


Abbildung 31: Schattenmaske

11. Workshop Sichtsysteme

LCD

Beim LCD Monitor werden die Bildpunkte in einem feinen, diskreten Raster dargestellt. Die Zahl der Rasterpunkte, der Pixel, gibt die dargestellte Auflösung an. Wird eine andere Auflösung von der Signalquelle angeboten, muss sie in das feste Raster des Monitors umgerechnet werden.

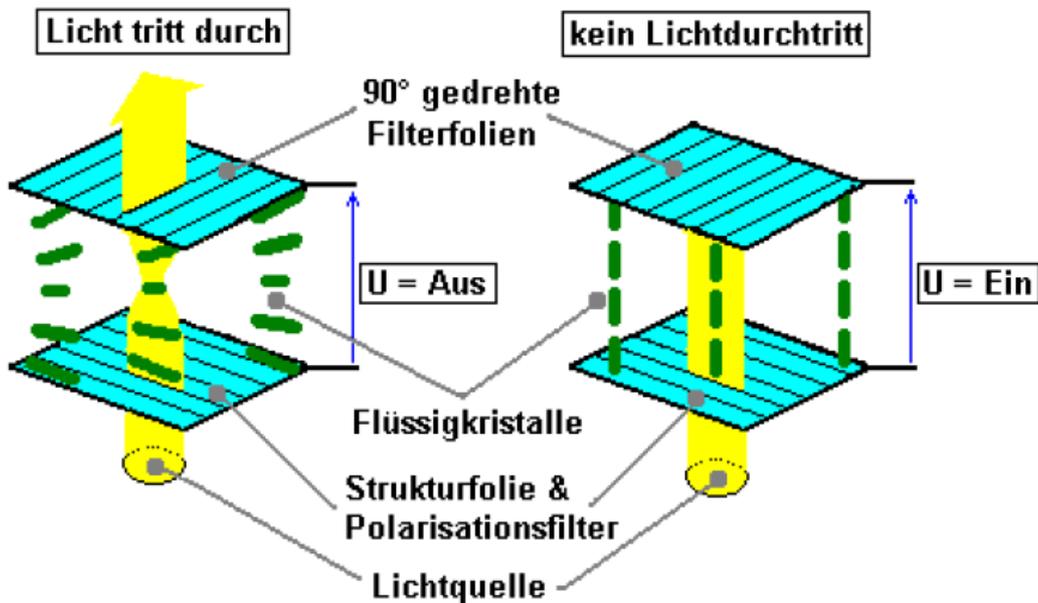


Abbildung 32: Funktionsweise einer LCD-Zelle, [21]

Die einzelnen Pixel werden von hinten beleuchtet. Jede LCD Zelle befindet sich zwischen gekreuzten Polarisatoren. Wenn keine Spannung an der Zelle anliegt, drehen die Flüssigkristalle die Polarisation des einfallenden Lichts um 90° , so dass es den zweiten Polarisator passieren kann. Der Pixel erscheint hell. Durch Anlegen einer Spannung an die Zelle werden die Flüssigkristalle in ihrer Lage umorientiert. Daher wird die Polarisation des Lichts beim durchqueren nicht gedreht, so dass man ein dunkles Pixel sieht. Die Grauwerte werden durch Variation der Spannung eingestellt. Damit wird die Polarisationsrichtung um 0° bis 90° gedreht.

Die Farbe kommt durch Subpixel in das System. Jeder Pixel ist in drei Subpixel unterteilt. Vor jedem Subpixel befindet sich ein Farbfilter: Rot, Grün und Blau. Die Pixel mit ihren Subpixeln sind dabei so fein, dass das menschliche Auge die Subpixel nicht auflösen kann.

Neben den Farbfiltern bestimmt die Lichtquelle der Hintergrundbeleuchtung den dargestellten Farbraum. Je nach dem Spektrum ist der darzustellende Farbraum größer oder kleiner. Darum werden heute LED als Hintergrundbeleuchtung eingesetzt, um den möglichen Farbraum im Vergleich zu den bisher bevorzugt eingesetzten Fluoreszenzlampen zu vergrößern

Backlight

Das LCD Panel im Monitor muss von hinten beleuchtet werden. Dazu wurden verschiedene Beleuchtungsmittel entwickelt. Heute noch weit verbreitet sind kalte Fluoreszenzlampen: CCFL (cold cathode fluorescent lamp). Es handelt sich um eine Gasentladungslampe, die mit Hoch-

11. Workshop Sichtsysteme

spannung betrieben wird. Da die Kathode nicht geheizt wird, spricht man von einer kalten Kathode.

Die lineare Leuchtstoffröhre wird seitlich hinter dem LCD Panel montiert. Das Licht wird in eine Platte eingekoppelt, die das Licht gleichmäßig über die Fläche des LCD Panels verteilt. Man erhält damit ein homogenes weißes Licht als Hintergrundbeleuchtung. Die Lichtausbeute liegt bei etwa 30 lm/W.

Anstelle der linearen Leuchtstoffröhre wurden Flächenstrahler entwickelt. Es sind zweidimensionale Entladungslampen mit hoher Farbtemperatur. Bekannt sind die von Osram produzierten Planon-Strahler. Sie werden direkt hinter dem LCD Panel montiert. Die Flächenstrahler sind weniger als 10 mm hoch. Bei Planon werden Xe-Atome zum Leuchten angeregt. Da diese im UV-Bereich Licht aussenden, wird diese UV-Strahlung von einer Phosphorschicht absorbiert, die dann sichtbares, weißes Licht aussendet. Direkt über der Lampe kann ein Diffusor angebracht werden, um eine homogene Lichtverteilung über die Fläche zu erzielen. Die Lichtausbeute liegt im Bereich 20 – 30 lm/W. Die Lebensdauer wird mit 100 000 h angegeben.

Heute werden auch LED zur Hintergrundbeleuchtung eingesetzt. Der Vorteil ist ein niedrigerer Energieverbrauch und der Wegfall der Hochspannung. Die Lichtausbeute liegt heute bei ca. 100 lm/W. Mit LED als Lichtquelle wird in einigen Anwendungen auf die Farbfilter und die Subpixel verzichtet. Die LED lassen sich sehr schnell modulieren, so dass das farbige Bild sequenziell erzeugt werden kann. Man sieht hintereinander ein rotes, grünes und blaues Bild. Da hier die Subpixel wegfallen, lassen sich höhere Auflösungen realisieren.

Zurzeit sind zwei verschiedene Techniken im Einsatz. Die LED können seitlich angebracht werden. Wie bei den linearen CCFL wird das Licht der LED gleichmäßig über die gesamte Fläche verteilt. Der Vorteil dabei ist, dass man mit relativ wenigen LED großer Helligkeit auskommt. Bei der zweiten Alternative wird ein LED-Array hinter dem Panel angebracht. Hier werden wesentlich mehr LED benötigt. Mit Hilfe eines Diffusors muss das Licht wieder homogenisiert werden. Ein Vorteil dieser Technik ist, dass lokal die Helligkeit geregelt werden kann. Durch dieses lokale Dimmen kann der lokale Kontrast deutlich vergrößert werden. Bei LED liegen heute die Ausbeuten bei bis zu 120 lm/W.

In der Zukunft können auch organische LED (OLED) für die Hintergrundbeleuchtung eingesetzt werden. Sie haben eine noch größere Effizienz. Eine Neue Entwicklung von NOVALED in Dresden kommt auf 120 lm/W für eine großflächige weiße OLED Folie. Diese dünne, sehr helle Folie kann direkt hinter dem LCD Panel montiert werden.

Die OLED-Technologie für Beleuchtung wird u. a. durch das EU-Projekt OLED 100 mit 12 M€ gefördert. [<http://www.oled100.eu/homepage.asp>]

Plasma

Vor einigen Jahren hielten Plasma Monitore als Konkurrenz zu den LCD-Monitoren Einzug in die Displaywelt. Vor allem bei großen Diagonalen waren sie lange die einzige Möglichkeit, einen Flachbildschirm zu realisieren. Mittlerweile hat hier aber die LCD-Technik gleich gezogen.

Ein Plasmabildschirm besteht aus vielen kleinen Plasmakammern, die die einzelnen Subpixel definieren, Abbildung 33. Jeweils drei Subpixel (R, G, B) werden zu einem farbigen Pixel zusammengefasst. Die einzelnen Plasmazellen sind mit einem Phosphor ausgekleidet, der bei Anregung jeweils eine der drei Primärfarben aussendet. In den einzelnen Kammern befindet sich

11. Workshop Sichtsysteme

eine Mischung der Edelgase Neon und Xenon, manche Hersteller mischen auch noch Helium bei. Dieses Gasgemisch hat einen sehr geringen Druck. Durch Anlegen einer Spannung wird in der Zelle ein Niederdruckplasma gezündet. Dazu werden die Edelgase ionisiert. Dabei entsteht UV-Strahlung, die die Phosphorschicht zum Leuchten anregt. So entsteht ein heller Subpixel. Graustufen werden über eine Impulsweitenmodulation erzeugt: je länger die Spannung an der Zelle anliegt, desto heller wird der Pixel.

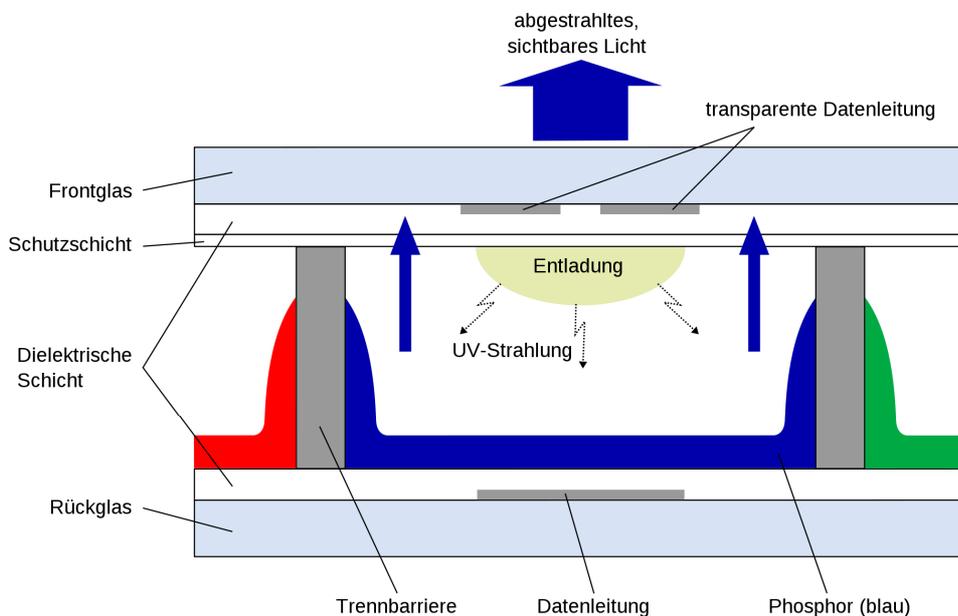


Abbildung 33: Zelle eines Plasmamonitors [7]; hier ein blaues Pixel zwischen Rot und Grün

Ober- und Unterseite werden durch jeweils eine dünne Glasplatte gebildet. Durch den niedrigen Druck des Gasgemischs hat das Plasma nur niedrige Temperaturen. Zum Zünden des Plasmas reichen Spannungen von einigen hundert Volt, da der Abstand der Elektroden beträgt ca. 0.1 mm.

OLED

Mit der OLED Technologie können auch komplette Monitore gebaut werden. Für kleine Bildmagnonen sind sie schon in Produkten wie z. B. Mobiltelefonen eingebaut. Ein OLED Monitor hat wieder ein festes Pixelraster, das aus roten, grünen und blauen Subpixeln aufgebaut ist. Jeder Subpixel wird wieder individuell angesteuert und durch die angelegte Spannung auf den entsprechenden Grauwert eingestellt.

Ein großer Vorteil der OLED Displays ist, dass sie selbstleuchtend sind. Im Gegensatz zu einem LCD-Monitor benötigen sie keine Hintergrundbeleuchtung. Dadurch haben sie eine große Helligkeit bei einem deutlich höheren Kontrast. Sie werden mit niedrigen Spannungen betrieben. Ein weiterer Vorteil der OLED ist die geringe Bautiefe, die unter 1 mm liegt. Da ein Kunststoffsubstrat verwendet werden kann, die Displays auch gebogen werden. Das kann Vorteile für das Design des Gerätes haben. Der Verzicht auf Glas als Substrat führt dazu, dass der Monitor sehr leicht wird.

Abbildung 34 zeigt den Aufbau eines OLED Elements. Auf einem transparenten Substrat wird eine strukturierte, ebenfalls transparente Elektrode als Anode aufgebracht. Darüber befindet sich eine dünne leitfähige organische Schicht. Über ihr wird das lichtemittierende Polymer aufgebracht. Darüber kommt die Kathode. Sie ist in einem reflektierenden Material untergebracht, um das Licht nach unten zu reflektieren. Das Schichtsystem wird mit einer Deckschicht nach oben

11. Workshop Sichtsysteme

abgeschlossen. Legt man zwischen der Anode und der Kathode eine Spannung an, so fließt ein Strom. Der regt die lichtemittierende Schicht zur Emission von Photonen an. Das Licht verlässt die OLED durch die transparente Schicht.

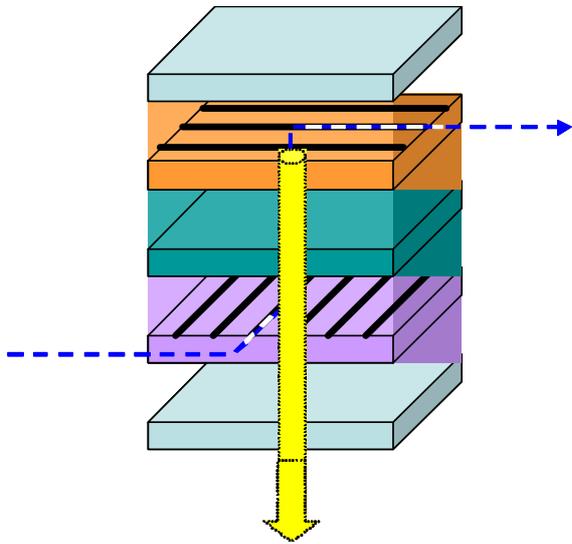


Abbildung 34: Aufbau OLED; von unten: Substrat, transparente Anode, leitfähige organische Schicht, lichtemittierende Schicht, Reflektierende Kathode, Deckschicht; der Strompfad ist gestrichelt eingezeichnet

Erste kommerzielle größere Monitore sind bereits auf dem Markt. Sony hat ein 11“ OLED Fernsehgerät auf dem Markt gebracht, ein 27“ Gerät ist für Ende 2009 angekündigt. Panasonic hat schon einen 40“-Monitor mit HDTV-Auflösung auf Messen präsentiert. Nach Pressemeldungen will Panasonic 2010 einen 31“-Monitor auf dem Markt bringen. Er ist mit 3 mm außergewöhnlich dünn. Auch die Leistungsaufnahme von 40 W ist deutlich geringer als bei vergleichbaren LCD- oder Plasmageräten.

In kleinen mobilen Geräten wie z. B. MP3 Playern oder Mobiltelefonen sind OLED-Displays schon seit einiger Zeit auf dem Markt.

EPD

Eine neue Entwicklung, die gerade auf dem Markt drängt, ist das elektrophoretische Display. Bekannt ist es als E-Paper oder E-Ink Technologie. Zurzeit kommt das EPD noch als reines schwarz-weißes Display in den Handel. Doch gibt es bereits Entwicklungsmuster, die auch farbigen Inhalt anzeigen können.

Unter Elektrophorese versteht man die Wanderung elektrisch geladener Teilchen durch ein Trägermaterial in einem elektrischen Feld. Beim Display befinden sich in den Zellen, die ein einzelnes Pixel definieren, kleine Mikrokugeln mit einem Durchmesser von ca. 0.1 mm. Es gibt weiße und schwarze Kugeln, die unterschiedlich geladen sind. Wenn man nun eine Spannung anlegt, wandern die weißen Teilchen auf die eine Seite des Displays und die schwarzen auf die andere Seite, Abbildung 35. Entsprechen hat man ein weißes oder ein schwarzes Pixel.

11. Workshop Sichtsysteme

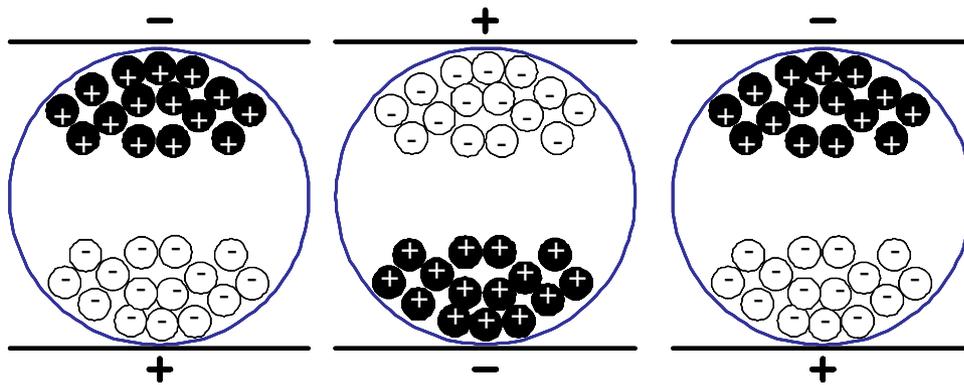


Abbildung 35: mittleres Pixel weiß, äußere schwarz

Ein Vorteil des EPD ist der geringe Energieverbrauch. Die Hintergrundbeleuchtung entfällt. Es ist ein reflektives System, das auch bei Sonnenlicht gut lesbar ist. Die Schaltgeschwindigkeiten sind gering. Es ist, zumindest zurzeit, nicht in der Lage Videos anzuzeigen. Daher ist der Einsatz auch für reine Lesegeräte (E-Book, E-Paper) gedacht. Hier wird der Inhalt des Displays nur beim Umblättern geändert. Eine Aufbauzeit des neuen Inhalts in der Größenordnung 1 s stört dabei nicht.

Die bekanntesten Geräte im Handel ist zurzeit von Sony der Reader und von Amazon der Kindle. PlasticLogic startet im 2. Halbjahr 2009 die Produktion in Dresden mit einem Produkt, das keine 7 mm dick ist.

Farbe kann man wieder durch Subpixeltechnik mit Farbfiltern erreichen, Abbildung 36. Dabei wird jeder Subpixel mit einem Farbfilter abgedeckt. So erscheint das Pixel in Abbildung 36 grün. Ein Nachteil ist die geringe Farbtiefe.

Der Kindle hat 16 Graustufen während sich der erste Sony Reader mit nur 4 Graustufen zufrieden gab. Von Fujitsu wurde der FLEPiA vorgestellt. Das 8" Display mit einer Auflösung von 1024 x 768 Pixel kommt auf 260 000 Farben. Der Nachteil der vielen Farben ist die lange Aufbauzeit des Bildes von ca. 8 s. Reduziert man die Anzahl der Farben auf 64, so baut sich das Bild in weniger als 2 s auf. [9]

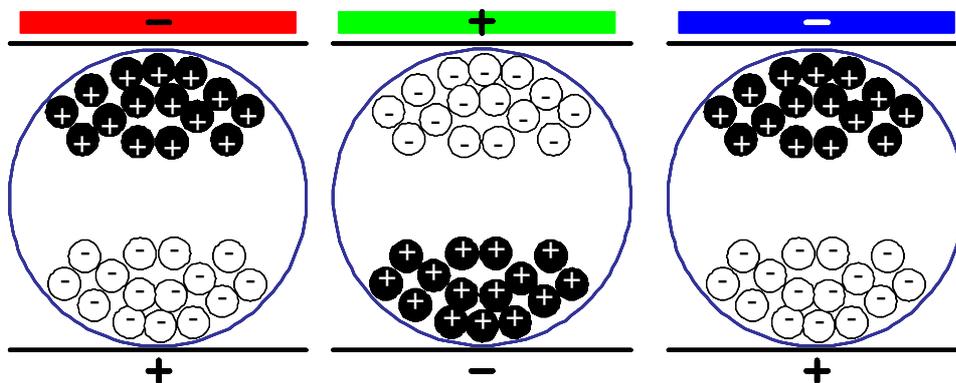


Abbildung 36: grün in der Anzeige

Eine ähnliche Technologie ist das Electronic Wetting Display, die von Philips entwickelt wurde. Ein schwarzes Öl zieht sich dabei beim Anlegen einer Spannung zusammen und gibt den Blick auf eine weiße Unterlage frei. Die Spannung von 20V kann 100 Hz moduliert werden, so dass ein Video gezeigt werden kann.

11. Workshop Sichtsysteme

Auf einem weißen Substrat wird über einer transparenten Elektrode eine dünne, hydrophobe Isolationsschicht aufgebracht. Darüber befindet sich die Zelle, die den Pixel definiert. In ihr befindet sich Wasser und ein schwarzes (oder farbiges) Öl. Wenn keine Spannung an der Zelle anliegt, bedeckt das Öl die Fläche der hydrophoben Schicht – der Pixel ist schwarz. Legt man nun eine Spannung an, so zieht sich das Öl zusammen und gibt den Blick auf den weißen Untergrund frei – der Pixel ist weiß.

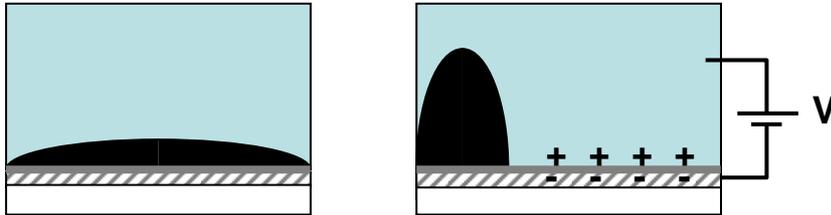


Abbildung 37: Electronic Wetting

Projektor

Für größere Anzeigen werden Projektoren anstelle von Monitoren verwendet. Ein Vorteil ist, dass die Anzeige von mehreren Personen gleichzeitig gesehen werden kann. Oder für eine bzw. wenige Personen kann mit mehreren Bildern ein großes Sichtfeld abgedeckt werden.

CRT

Ähnlich wie bei den Monitoren war der CRT Projektor das erste Gerät, das für die Projektion großer Bilder eingesetzt wurde. Das farbige Bild wird mit drei separaten Röhren erzeugt. Vor jeder Röhre befindet sich ein eigenes Objektiv. Genau genommen werden nämlich drei Bilder projiziert: ein rotes, ein grünes und ein blaues. Erst auf der Projektionsfläche werden die Bilder pixelgenau überlagert. So sieht der Betrachter ein farbiges Bild.



Abbildung 38: CRT-Projektor, Barco reality 909

Die Farbqualität ist durch die drei Phosphorschichten gegeben. Sie bestimmen den Farbraum, der dargestellt werden kann. Da es lange keine alternative Technologie zu den CRT Projektoren gab, bildet der CRT Farbraum eine Richtgröße, an der sich moderne Technologien orientieren. Es können die gleichen Phosphorsorten wie bei Monitoren verwendet werden. Daher sind die Farbeindrücke auch vergleichbar.

11. Workshop Sichtsysteme

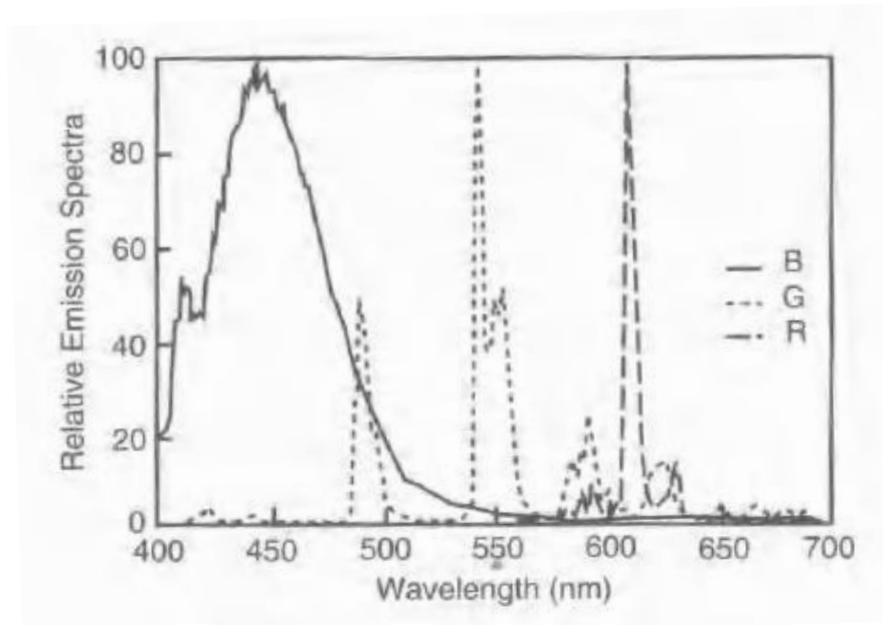


Abbildung 39: Spektrum eines CRT-Projektors [14]

CRT Projektoren schreiben das Bild mit einem Elektronenstrahl auf die Phosphorschicht. Dieses Bild wird dann durch das Objektiv vergrößert auf der Projektionsfläche dargestellt. Die Ablenkung des Elektronenstrahls erfolgt zeilenweise von oben links nach unten rechts. Dabei muss der mit einem analogen Signal abgelenkte Elektronenstrahl nicht einem festen Raster folgen. Der Projektor kann daher auch verschiedene Auflösungen von der Signalquelle direkt ohne Signal-konversion darstellen.

Da kein vorgegebenes Raster beachtet werden muss, kann das Bild z. B. trapezförmig mit gekrümmten Kanten geschrieben werden, um eine Geometriekorrektur für gekrümmte Projektionsflächen zu erzielen. Auch das Edge Blending (Überblenden mehrerer Kanäle) kann durch entsprechende Einstellungen direkt und einfach im Projektor vorgenommen werden.

LCD / LCoS / DLP

Alle anderen, heute eingesetzten Technologien, projizieren ein festes Pixelraster. Da sind zunächst die LCD-, LCoS- und DLP Projektoren zu nennen. Ihnen ist gemeinsam, dass eine Lichtquelle, bis heute meist eine Lampe, eine Pixelmatrix beleuchtet, die Graustufen eines Bildes darstellt. Dieses Bild wird dann mit einem Projektionsobjektiv vergrößert auf der Projektionsfläche dargestellt.

Beim LCD Projektor wird das weiße Licht der Lampe mit dichroitischen Spiegeln in seine roten, grünen und blauen Komponenten aufgespalten, Abbildung 40. Jede Komponente beleuchtet ein LCD Panel in Durchlicht. Die Funktionsweise des LCD Panel ist dieselbe wie beim Monitor. Nur ist die Diagonale mit < 25 mm natürlich wesentlich kleiner. Die drei einfarbigen Bilder werden hinter den LCD Paneln mit Hilfe eines gekreuzten dichroitischen Prismas wieder überlagert, so dass ein farbiges Bild entsteht. Mit einem Objektiv wird das Bild dann projiziert.

Ein LCoS Projektor funktioniert ähnlich einem LCD-Projektor. Allerdings wird das LCD Panel nicht in Transmission, sondern in Reflexion betrieben. Ein- und ausfallendes Licht werden mit einem Polarisationsstrahlteiler getrennt. Dadurch wird der Strahlengang etwas komplizierter,

11. Workshop Sichtsysteme

Abbildung 41. Zunächst wird der blaue Anteil des Lichts abgetrennt (unterer Pfad). Im oberen Pfad wird dann rot und grün getrennt. Mit einem gekreuzten dichroitischen Prisma werden die drei Farben wieder überlagert und mit dem Objektiv projiziert. Das dichroitische Prisma ist so gebaut, dass es das blaue Licht, das von unten kommt, und das rote Licht, das von oben kommt, reflektiert. Das grüne Licht von links passiert beide dichroitischen Schichten.

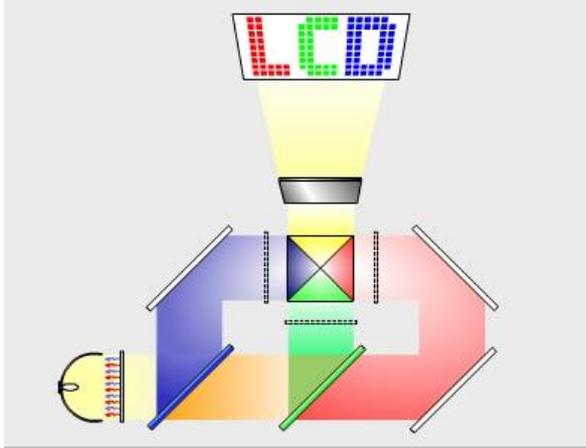


Abbildung 40: Strahlengang LCD-Projektor, [8]

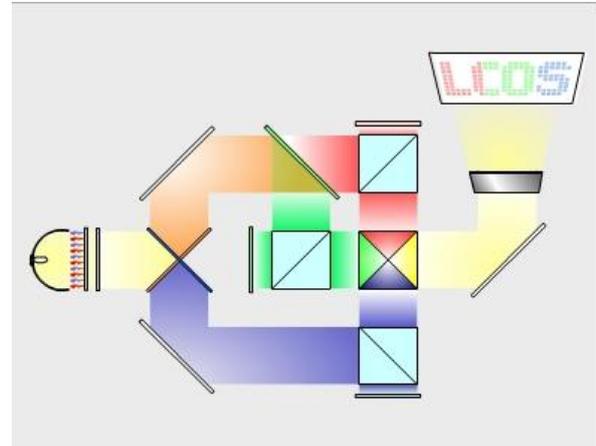


Abbildung 41: Strahlengang LCoS Projektor, [8]

Der große Vorteil des LCoS gegenüber dem LCD ist die größere Pixeldichte mit einem größeren Füllfaktor, Abbildung 42. Darunter versteht man den Anteil der Fläche des Pixels, das mit Licht zum Bild beiträgt. Er erreicht beim LCoS über 90%. Das wird durch den Betrieb in Reflexion erreicht. Die Datenleitungen und die Transistoren und Kondensatoren zum Ansteuern der einzelnen Pixel können hinter dem LCoS Pixel untergebracht werden. Beim LCD-Projektor muss das zwischen den Pixeln sein. Daher erreichen sie nur einen Füllfaktor von etwa 70 – 80 %. Die sichtbare Pixelstruktur wird als „Screen Door Effect“ bezeichnet.

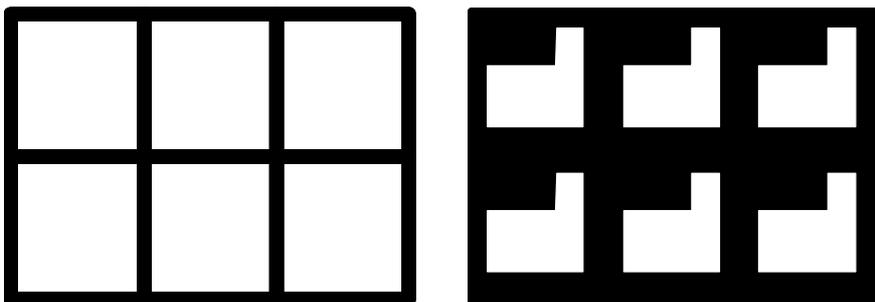


Abbildung 42: hoher Füllfaktor bei LCoS (links), niedriger Füllfaktor bei LCD (rechts)

Die Graustufen werden beim LCD-Projektor durch Spannungsstufen in der Ansteuerung des LCD realisiert. Die Farbe wird zum einen durch die verwendete Lichtquelle und zum anderen durch die verwendeten Elemente zum Trennen und Überlagern der drei Lichtwege bestimmt.

Beim DLP Projektor besteht die Bildmatrix aus vielen kleinen Spiegeln, die um eine Achse gekippt werden können. Dabei gibt es nur zwei diskrete Stellungen für jeden Spiegel. Entsprechend erhält man ein weißes oder ein schwarzes Pixel. Die Graustufen werden durch Impulsweitenmodulation erzeugt.

11. Workshop Sichtsysteme

Für die Farbdarstellung gibt es im Prinzip zwei Möglichkeiten: man verwendet drei DLP Chips mit Farbfiltern ähnlich dem LCoS Projektor oder man verwendet nur ein DLP Chip mit einem Farbrad.

Abbildung 43 zeigt den Strahlengang. Von der Lampe kommt das Licht auf ein Prisma. Durch Totalreflexion wird das Licht auf den DLP Chip gelenkt. Je nach Spiegelstellung wird das Licht in den On- oder den Off-Kanal reflektiert. Im On-Kanal folgt das Projektionsobjektiv und im Off-Kanal ein Absorber, der das Licht absorbiert. Zwischen Lampe und Prisma befindet sich das Farbrad.

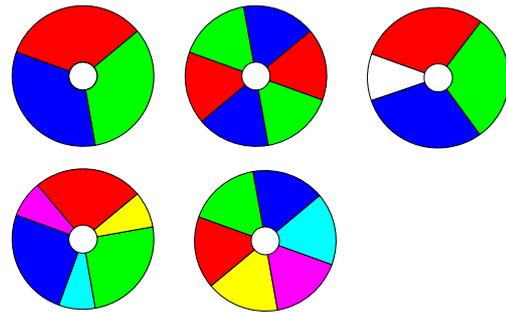
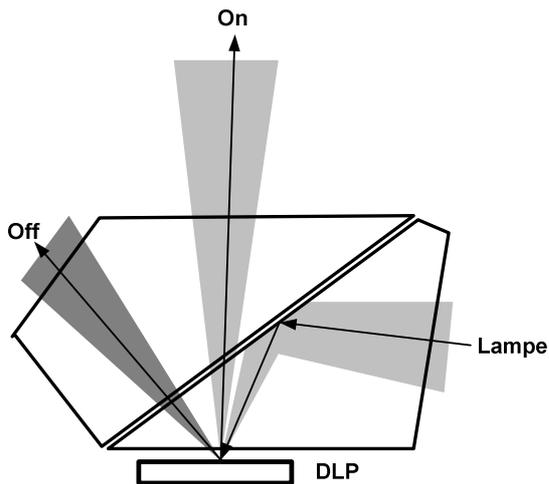


Abbildung 44: Verschiedene Farbräder für verschiedene Anwendungen: RGB, RGBRGB, RGBW, RYGBM, RGBCMY

Abbildung 43: 1-Chip DLP

Bei dem Einsatz eines Farbrades werden die drei Teilbilder (rot, grün, blau) hintereinander dargestellt. Der Bildwechsel ist dabei so schnell, dass es das Auge nicht wahrnimmt und man ein farbiges Bild sieht.

Je nach Anwendung gibt es heute DLP Projektoren mit unterschiedlichen Farbrädern. Für eine gute Farbwiedergabe hat man Segmente mit RGB, ggf. doppelt (RGBRGB). Eine Bessere Farbwiedergabe erhält man mit einem Farbrad, das neben den Primärfarben auch Segmente mit den Sekundärfarben Cyan, Magenta und Gelb besitzt. Will man mehr Licht, also ein helleres Bild, so kann man ein weißes Segment in das Farbrad einfügen. Die größere Helligkeit geht allerdings auf Kosten der Farbsättigung.

Lampen

Die meisten LCD-, LCoS- und DLP Projektoren werden heute mit Lampen betrieben. Doch auch hier gibt es Unterschiede im eingesetzten Lampentyp. Sie unterscheiden sich u. a. im Emissionsspektrum und damit in der Farbwiedergabe und in der Leistungsaufnahme. Xenonlampen arbeiten mit einem hohen Gasdruck während UHP und Halogenlampen mit Unterdruck gefüllt sind. Dadurch sind die Linien der Xe-Lampe verbreitert und man erhält ein breiteres Spektrum, das weißer aussieht. Xe-Lampen werden auch häufiger in Projektoren mit sehr hohem Lichtstrom eingesetzt.

Abbildung 45 zeigt den Vergleich des Spektrums von zwei LCoS Projektoren von Sony. Das Spektrum wurde von einem weißen Bild aufgenommen. Es zeigt also die Wirkung der Lampe in Kombination mit den Farbfiltern, die das Licht aufspalten und wieder überlagern. Das Spektrum

11. Workshop Sichtsysteme

der Xe-Lampe ist in den drei Farbkanälen breiter. Die Farben dieses Projektors wirken etwas natürlicher.

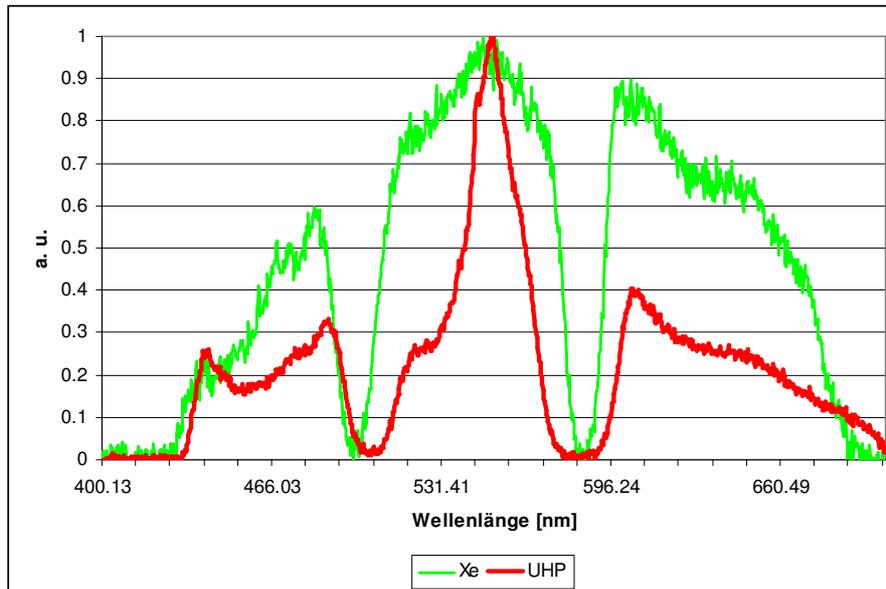


Abbildung 45: Vergleich des Spektrums eines weißen Bildes einer Xe bzw. UHP Lampe

LED

Mittlerweile gibt es auch Projektoren mit LED als Beleuchtung zu kaufen. Zuerst kamen sogenannte Picoprojektoren auf dem Markt. Das sind die sehr kleinen Handgeräte mit kleinem Lichtstrom. Sie sind für den mobilen Einsatz gedacht und beleuchten Flächen der Größe etwa eines DIN A 4 Blatts. Die Projektoren arbeiten mit einem DLP Chip. Auf das Farbrad wird verzichtet, die drei LED werden direkt angesteuert. Die Auflösung der Picoprojektoren ist niedrig. Der Lichtstrom liegt bei den kleinen Geräten bis zu ca. 150 lm.

Im Sommer 2009 stellte u. a. ProjectionDesign mit dem ersten großen DLP Projektor mit LED als Lichtquelle vor. Bei dem FL 32 handelt es sich um ein Gerät mit hoher Auflösung (1920 x 1080 oder 1920 x 1200 Pixel) und einem Lichtstrom von immerhin 600 lm.

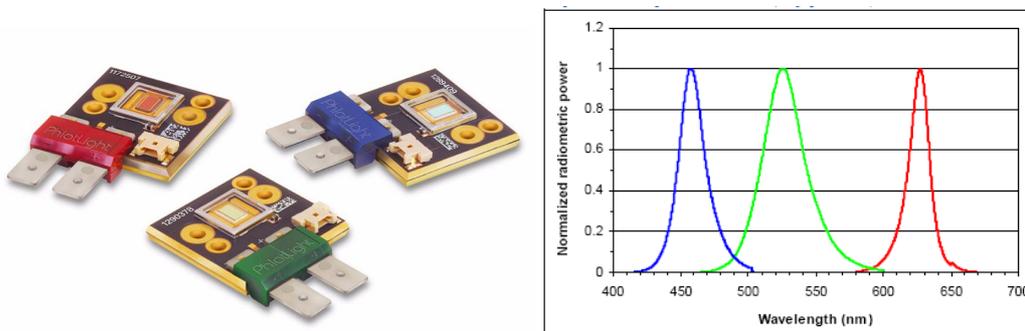


Abbildung 46: LED Chips Projektoren und deren Emissionsspektrum [15, PhlatLight PL 120]

Die LED haben typische Wellenlängen im roten, grünen und blauen Spektralbereich, z. B. 625 nm, 525 nm, 462 nm. Die Lebensdauer der LED von ca. 100.000 h ist größer als die der her-

11. Workshop Sichtsysteme

kömmlichen Lampen. Weiterhin wird auch gerade bei mehrkanaligen Projektionen der Farbabweichung einfacher.

Abbildung 46, links, zeigt einen Chipset für Hochleistungs-LED der Fa. Luminus für Projektoren. Die drei LED (PL 120) haben zusammen einen Lichtstrom von fast 4000 lm. Ähnliche Produkte hat die Fa. Osram mit ihrer Power Projection Serie im Programm.

Laser

In den letzten Jahren wurden die Laserprojektoren weiter entwickelt. Hier gibt es zurzeit vor allem zwei unterschiedliche Prinzipien: Die Projektion eines „flying spot“ oder die GLV-Technik.

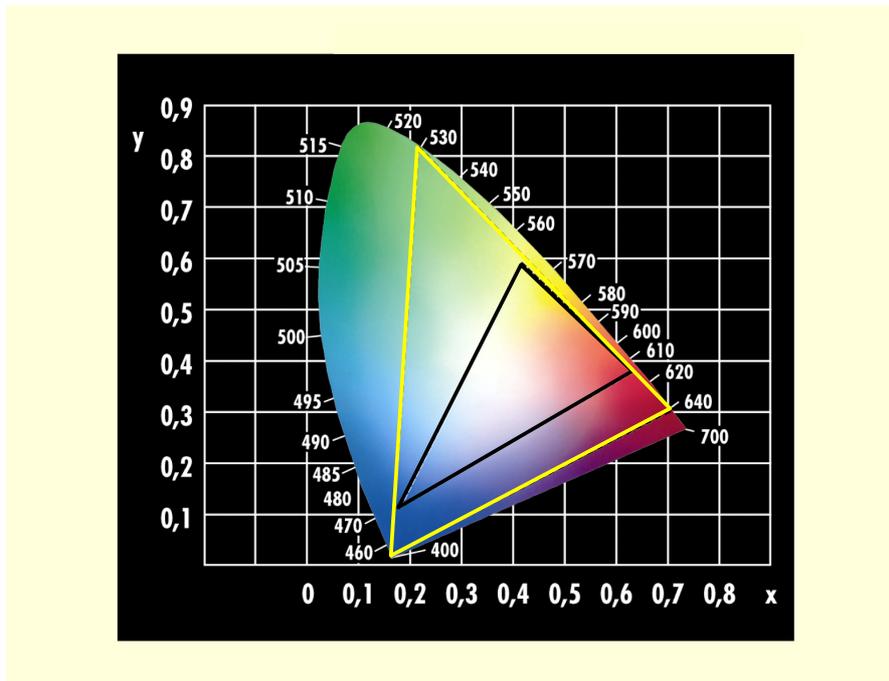


Abbildung 47: Farbraum mit Laserlinie (gelbes Dreieck) im Vergleich zu CRT (schwarzes Dreieck)

Bei der flying spot Technik wird ein Lichtpunkt abgelenkt. Mit zwei Spiegeln wird der Laserstrahl zeilenweise über das Bild geführt. Im Laser selbst wird Licht von drei diskreten Wellenlängen erzeugt, moduliert und überlagert. Pixelweise entsteht so ein farbiges Bild. Das Licht wird dann über eine Glasfaser von der Quelle zum Scanner geführt. Über den Projektor AVIOR wurde im Rahmen dieses Workshops schon berichtet [16, 17, 18].

Der große Vorteil der Laserprojektion im Bezug zur Farbdarstellung ist die Verwendung von Laserlicht, also von reinen Spektralfarben. Diese liegen am Rand des Farbraums. Je nach den gewählten Wellenlängen der drei Primärfarben wird ein mehr oder weniger großes Dreieck über den Farbraum aufgespannt. Alle Farben innerhalb dieses Dreiecks können dargestellt werden. Bei dem Laserprojektor AVIOR wurden die Laserlinien so gewählt, dass das Dreieck sehr groß ist. Verwendet werden die Wellenlängen 446nm, 532 nm und 628 nm. Abbildung 47 zeigt das Farbdreieck des AVIOR Laserprojektors im Vergleich zu dem Farbdreieck eines CRT Projektors. Der darstellbare Farbraum von LCD-, LCoS- oder DLP Projektoren mit einer Lampe unterscheidet sich nicht wesentlich von dem des CRT Projektors.

11. Workshop Sichtsysteme

Neben der sehr guten Farbdarstellung ist der hohe Kontrast ein großer Vorteil des Laserprojektors. Ein Kontrast bis zu 1.000.000:1 wird erreicht. Vor allem bei der Darstellung von Nachtszenen ist der Laserprojektor damit anderen Technologien überlegen.

Beim Laserprojektor AVIOR konnte eine vierte Wellenlänge im Infraroten (830 nm) hinzugefügt werden. Damit kann parallel zum sichtbaren Bild ein Infrarotbild, pixelgenau überlagert, dargestellt werden. So ist die Verwendung von Originalnachtsichtgeräten bei der Ausbildung im Simulator möglich. Man sieht gleichzeitig auf derselben Projektionsfläche ein sehr realistisches Bild mit der Nachtsichtbrille und mit bloßem Auge.

Die neueste Generation des Projektors AVIOR bietet eine Auflösung von 2048 x 1536 Pixel. Durch die modulare Bauweise sind höhere Auflösungen relativ einfach zu verwirklichen. Das gilt sowohl für das traditionelle Bildformat 4:3 als auch für die breiten Formate 16:9 und 16:10.

Bei der GLV-Technik wird die Modulation über ein Beugungsgitter durchgeführt. Dabei wird eine Spalte des Bildes parallel bearbeitet. Diese Spalte wird dann von links nach rechts über das Bild geführt. Die Anzahl der Pixel der Spalte entspricht der Zeilenzahl des Bildes.

Bezüglich der Farbdarstellung gilt das Gleiche wie beim flying spot Prinzip. Der GLV-Projektor arbeitet mit den Wellenlängen 465nm, 532 nm und 631 nm. Das Farbdreieck hat sehr ähnliche Ecken im Vergleich zu dem AVIOR Projektor.

11. Workshop Sichtsysteme

4 LITERATUR

- [1] Andreas Krüger: Die menschliche visuelle Wahrnehmung und visuelle Intelligenz Ein Vortrag von Andreas Krüger, gehalten im Rahmen des Vortragsseminars Medien und Gestaltung
- [2] <http://de.wikipedia.org/wiki/CIE-Normvalenzsystem>
- [3] <http://de.wikipedia.org/wiki/Farbwahrnehmung>
- [4] <http://de.wikipedia.org/wiki/Munsell-Farbsystem>
- [5] <http://de.wikipedia.org/wiki/Auge>
- [6] <http://en.wikipedia.org/wiki/Phosphor>
- [7] <http://de.wikipedia.org/wiki/Plasmabildschirm>
- [8] OC Oerlikon Management AG,
http://www.oerlikon.com/ecomaXL/index.php?site=OPTICS_EN_technologies
- [9] <http://www.epapercentral.com/fujitsu-flepia-color-ereader-launched-hype-or-the-real-deal.htm>
- [10] <http://de.wikipedia.org/wiki/MacAdam-Ellipse>
- [11] http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:LYS05_Newton_colour_circle.JPG&filetimestamp=20070209093108
- [12] <http://de.wikipedia.org/wiki/RGB-Farbraum>
- [13] http://en.wikipedia.org/wiki/ScRGB_color_space
- [14] Matthew S. Brennessoltz, Edward H. Stupp: Projection Displays, Second Edition, Wiley-SID Series in Display Technology, 2008
- [15] Firmeninformation Luminus Devices Inc., Billerica, Massachusetts, USA,
www.luminus.com
- [16] B. Hampel-Vogedes, Laserprojektion: eine neue Technologie für die Visualisierungstechnik, in R. Möller (Herausgeber), 7. Workshop Sichtsysteme, Visualisierung in der Simulationstechnik, Wuppertal November 2001, Shaker Verlag, Aachen 2001
- [17] H. Frost et. al., Größere Realitätsnähe in der Simulation durch Laserprojektion, in R. Möller (Herausgeber), 8. Workshop Sichtsysteme, Visualisierung in der Simulationstechnik, Bremen November 2003, Shaker Verlag, Aachen 2003
- [18] B. Hampel-Vogedes, Laserprojektion in der Flugsimulation, in R. Möller (Herausgeber), 9. Workshop Sichtsysteme, Visualisierung in der Simulationstechnik, Wuppertal November 2005, Shaker Verlag, Aachen 2005