

# 1 Grundlagen

<b>1.1</b>	<b>Über Wahrnehmung und Farbe .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2</b>	<b>Geräteabhängige Farbmodelle .....</b>	<b>6</b>
	<i>Übung: Geräteabhängige Farbmodelle .....</i>	<i>15</i>
<b>1.3</b>	<b>Geräteunabhängige Farbmodelle .....</b>	<b>18</b>
	<i>Übung: Geräteunabhängige Farbmodelle .....</i>	<i>35</i>

# 1.1 Über Wahrnehmung und Farbe

## Sinn und Anwendung von Farbmanagement

Wer heute Farben mit elektronischen Mitteln reproduziert oder erstellt, sieht sich mit einer ungeheuren Gerätevielfalt konfrontiert.

Früher war eine Produktionskette überschaubar, es wurde nur für den Druck produziert und die wesentlichen Druckprozesse wie den Offsetdruck hatte man technisch gut unter Kontrolle.

Heute nimmt die Anzahl der zur Verfügung stehenden Ein- und Ausgabegeräte immer weiter zu. Diese unterscheiden sich nicht nur in der Technologie, das heißt, wie sie Farbe erzeugen, sondern auch darin, dass sie mit unterschiedlichen Grundfarben arbeiten.

Als Beispiel für unterschiedliche Ausgabetechnologien sei hier das Computer-to-Plate-Verfahren genannt, bei dem der Zwischenschritt des Ausbelichtens auf Film eingespart wird und die Druckplatten direkt hergestellt werden können. Ein weiteres Beispiel sind die digitalen Druckmaschinen, bei denen gar keine Druckplatten mehr benötigt werden.

Zusätzlich ist noch der gesamte Multimediabereich hinzugekommen. Hier ist das Ausgabemedium ein Computermonitor oder ein Fernseher.

Um diese Gerätevielfalt verstehen und charakterisieren zu können, müssen die Farbmodelle bekannt sein, mit denen die Geräte arbeiten. Schließlich müssen weitere standardisierte Farbmodelle zur Anwendung kommen, die es erlauben, verschiedene Geräte miteinander zu vergleichen. Erst dann sind Sie in der Lage, ein Farbmanagement zu betreiben, um alle in den Produktionsprozess eingebundenen Geräte farbverbindlich benutzen zu können.

## Zur Geschichte der Farbe

Im Jahre 1666 experimentierte Sir Isaac Newton (1643–1727) mit einem Glasprisma. Zu diesem Zeitpunkt wusste man zwar schon, dass Farbe etwas mit Licht zu tun hat, aber die Zusammenhänge waren völlig unbekannt.

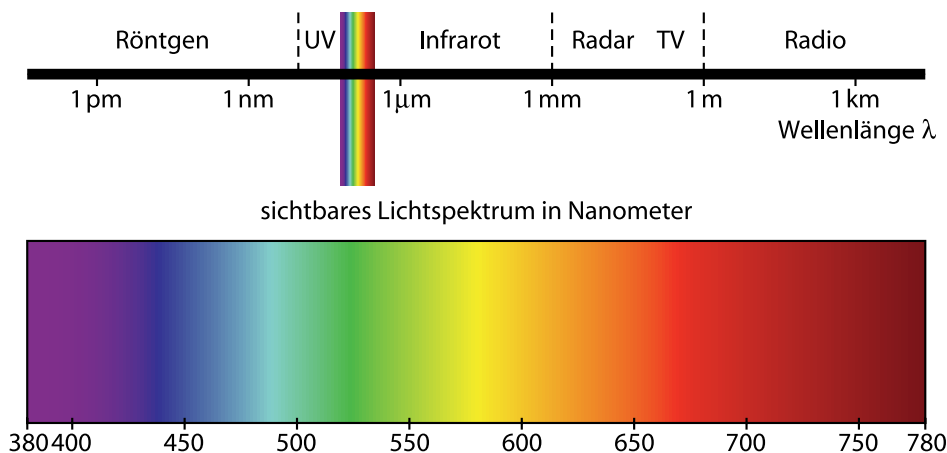
So nahm man von einem Glasprisma an, dass es die verschiedenen Farben zum Licht hinzuaddiert.

Newton dunkelte einen Raum so weit ab, dass nur ein kleiner Lichtstrahl in das Zimmer fiel. Diesen Lichtstrahl lenkte er auf ein Prisma und zerlegte ihn so in verschiedene Farben. Als er nun mit einer kleinen Blende eine Teilfarbe aus dem Spektrum herausfilterte und diese auf ein weiteres Prisma leitete, stellte er fest, dass sich diese Teilfarbe nicht weiter zerlegen ließ.

Aus diesen Experimenten schloss er, dass es Grundfarben geben muss, die sich zusammen zu weißem Licht addieren. Und weil Newton eine Verwandtschaft der Farbtöne zu den Musiktönen sah, teilte er das Farbspektrum analog zu den sieben Grundtönen in Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo und Violett ein.

Es sollte aber weitere 200 Jahre dauern, bis James Clerk Maxwell (1831–1879) die Theorie der elektromagnetischen Wellen entwickelte. Mit elektromagnetischen Wellen lassen sich viele Phänomene beschreiben, die um uns herum passieren. Röntgenstrahlen sind genauso elektromagnetische Wellen wie Radiowellen oder eben Licht. Die Wellen- oder Strahlenarten liegen nur in unterschiedlichen Bereichen, werden durch ihre Wellenlänge  $\lambda$  charakterisiert und in Nanometer (nm) gemessen.

Von Maxwell stammt die Erkenntnis, dass Menschen elektromagnetische Wellen der Wellenlänge 380 nm (Violett) bis 780 nm (Rot) wahrnehmen können. Erst ab diesem Zeitpunkt war man in der Lage, das Phänomen Farbe physikalisch zu beschreiben.



Das sichtbare Lichtspektrum ist nur ein Teilbereich der elektromagnetischen Wellen und erstreckt sich von ultravioletttem Licht bis zum infraroten Licht.

Maxwell war auch der Erste, der die Idee von Thomas Young (1773–1829) aufgriff, dass das menschliche Auge nicht für jede mögliche Farbe eine empfindliche Sehzelle haben konnte. Er konstruierte daraufhin eine Versuchsmaschine, die aus nur drei Grundfarben Rot, Grün und Blau alle möglichen Lichtfarben zusammenmischen konnte.

Hermann von Helmholtz (1821–1894) schließlich entwickelte die Idee der drei Typen von Farbsehzellen, die für verschiedene Farbbereiche empfindlich sind, und beschrieb als Erster die Wirkung von Licht auf das menschliche Auge.

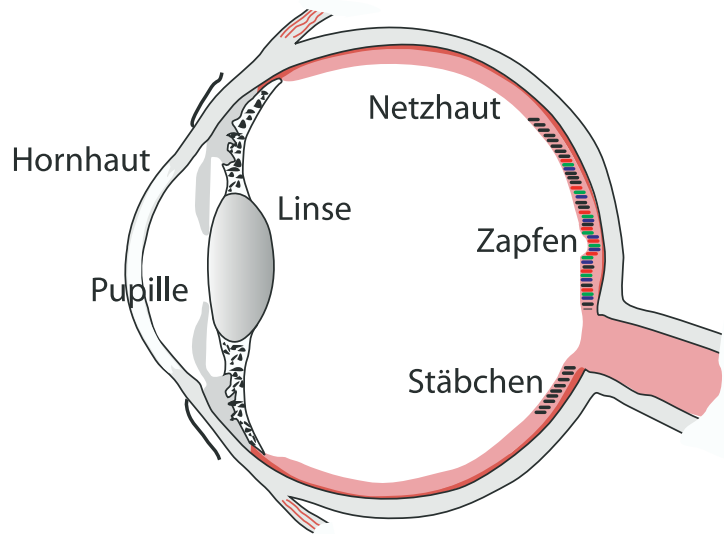
## Das menschliche Auge

Die Wahrnehmung von Farben über das menschliche Auge läuft im Wesentlichen folgendermaßen ab: Licht fällt durch eine Linse in das Innere des Auges. Eine Art Blende, die Pupille, regelt dabei die Lichtmenge, die in das Auge einfallen kann.

Das Licht fällt im Inneren des Auges auf die Netzhaut (Retina), die mit unterschiedlichen Typen von Sehzellen besetzt ist. Diese sind nach ihrer Form benannt.

Auf der einen Seite gibt es die so genannten Stäbchen, Sehzellen, die hauptsächlich für das Sehen bei Dämmerung und im Dunkeln zuständig sind. Von diesen Stäbchen gibt es ungefähr 120 Millionen. Sie sitzen eher auf dem äußeren Teil der Netzhaut. Ihre Anzahl nimmt zur Mitte der Netzhaut hin stetig ab und sie sind nahezu farzunempfindlich (um genau zu sein, sind sie leicht grünblau-empfindlich). Neben der Zuständigkeit für das Dunkelsehen sind sie auch für die Wahrnehmung von Bewegungen verantwortlich.

Auf der anderen Seite gibt es die so genannten Zapfen, die sich verstärkt in der Mitte der Netzhaut befinden. Von ihnen gibt es ungefähr sechs Millionen. Sie sind für das eigentliche Farbsehen zuständig, aber auch für das Scharfsehen. Es sind drei Arten von Zapfen vorhanden, die jeweils für rotes, grünes oder blaues Licht empfindlich sind.



Der Aufbau des menschlichen Auges. Auf der Netzhaut sind in der Mitte die farbempfindlichen Zapfen konzentriert, während im äußeren Bereich nur farbungempfindliche Stäbchen sitzen.

Durch die unterschiedliche Verteilung der verschiedenen Sehzellen ergeben sich unterschiedliche Bereiche des Sehens. Mit beiden Augen lässt sich ein Blickwinkel von fast 180 Grad überstreichen, in dem Bewegungen und Umrisse wahrgenommen werden können (Stäbchen). Das Wahrnehmen von Farbe und Schärfe hingegen beschränkt sich auf einen Blickwinkel von etwa 45 Grad (Zapfen).

Auch ist das Auge sehr anpassungsfähig gegenüber dem Licht, das in der Umgebung vorhanden ist. Das Umgebungslicht wird immer als Weiß empfunden, erst wenn zwei unterschiedliche Lichtquellen wie zum Beispiel Glühlampenlicht und Tageslicht vorhanden sind, fällt der Unterschied auf. Dann wird Glühlampenlicht gelblicher empfunden als Tageslicht.

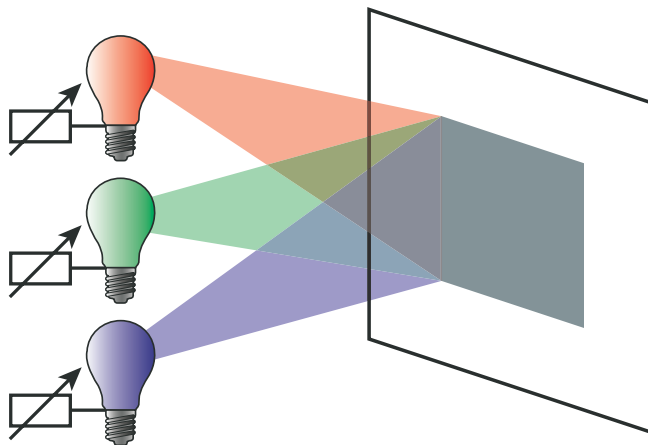
Aus diesem Grund ist es besonders wichtig, dass die Umstände, unter denen Farben betrachtet und beurteilt werden, genau festgelegt sind, damit unterschiedliche Personen die gleichen Farben auch gleich wahrnehmen. Die heute gültigen Normungen werden im Abschnitt *Geräte-unabhängige Farbmodelle* in diesem Teil vorgestellt.

## 1.2 Geräteabhängige Farbmodelle

### Das additive Farbmodell RGB

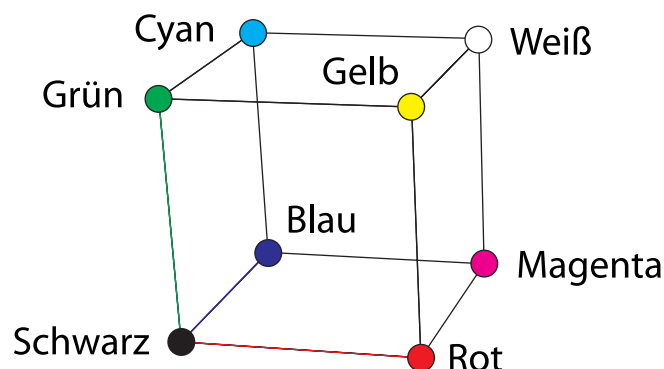
Das additive Farbmodell oder RGB-Farbmodell können Sie sich am leichtesten am Beispiel eines Lampenversuchs vorstellen. Da man in diesem Versuch zur Dunkelheit Licht hinzufügt (addiert), ergibt sich hieraus der Name *additives Farbmodell*. Die Versuchsperson befindet sich in einem dunklen Raum und kann drei farbige Lampen – eine rote, eine grüne und eine blaue – über ein Schalterpult in ihrer Intensität steuern.

Versuchsaufbau des additiven Farbmodells. Mit den in der Stärke einstellbaren farbigen Lampen können verschiedene Farben zusammengemischt werden.



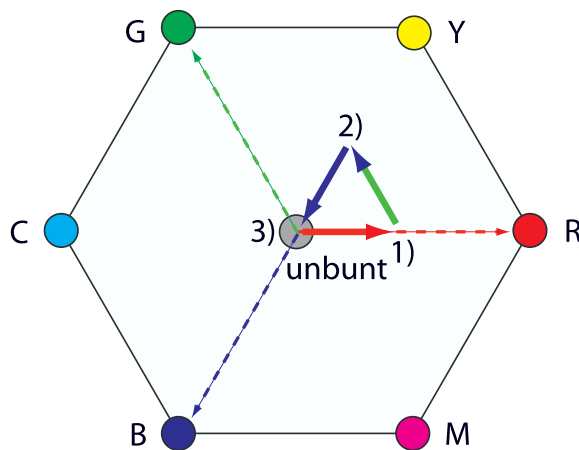
Stellt die Person alle drei Lampen mit der gleichen Intensität ein, so ergibt sich eine graue Farbe (Unbunt). Eine Mischung aus Rot und Grün ergibt ein gelbes Licht, verwendet man nur Rot und Blau, nennt man die Farbe Magenta. Schließlich kann man auch nur Grün und Blau verwenden, die resultierende Farbe heißt Cyan. Werden alle drei Lampen mit maximaler Intensität betrieben, so entsteht Weiß.

Das additive Farbmodell ist mit einem Würfel darstellbar. Alle Farben dieses Farbmodells liegen innerhalb oder auf dem Rand des Würfels.



Stellt man die Grundfarben Rot, Grün und Blau, die Mischfarben Cyan, Magenta und Gelb sowie die Farben Schwarz und Weiß als Ecken eines Würfels dar, so erhält man die vorstehende Abbildung. Alle weiteren Farben, die sich mit den drei Lampen erzeugen lassen, liegen innerhalb dieses Würfels.

In der Praxis hat diese Art der Darstellung den Nachteil, dass außen liegende Farben die innen liegenden Farben verdecken. Um hieraus eine zweidimensionale Darstellung zu erzeugen, stellt man den Würfel auf die schwarze Ecke, so dass sich die weiße Ecke, von oben gesehen, genau auf der gegenüberliegenden Seite befindet. Drückt man den Würfel jetzt zusammen, so ergibt sich die nachfolgende Abbildung.



Zweidimensionale Darstellung des additiven Farbmodells. In der Mitte liegen alle unbunten Farben.

In der Mitte des so erzeugten zweidimensionalen Diagramms liegen alle unbunten Farben wie Schwarz, Weiß und die Grautöne. Ausgehend von der Mitte (Schwarz) bewegt man sich in Richtung der Farbe (hier im Beispiel Rot), deren Intensität man erhöht. Hierbei entspricht die zurückgelegte Strecke der Intensität der verwendeten Farbkomponente. So gelangen Sie zu Punkt 1.

Mischt man eine zweite Farbkomponente hinzu (hier Grün), so muss man sich in die Richtung bewegen, die der Pfeil von der Mitte zur verwendeten Farbkomponente angibt, und gelangt so zu Punkt 2.

Mischt man noch eine dritte Farbkomponente (hier Blau) in einer bestimmten Intensität hinzu, so muss man sich erneut um die entsprechende Strecke in Richtung der zugegebenen Farbkomponente bewegen. So gelangen Sie zu Punkt 3.

Benutzt man alle drei Farben mit der gleichen Intensität, so sind alle drei Pfeile gleich lang und man kommt wieder bei den unbunten Farben an.

In der technischen Anwendung verwendet man das RGB-Farbmodell bei Monitoren und Fernsehern sowie bei Scannern und digitalen Kameras. Bei Monitoren und Fernsehern beschießen drei Elektronenstrahlen drei verschiedene Phosphorschichten. Diese leuchten dann entweder rot, grün oder blau auf. Bei Scannern und digitalen Kameras sind lichtempfindliche Sensoren mit einer roten, grünen oder blauen Filterschicht bedampft, so dass nur das von der jeweiligen Filterschicht durchgelassene farbige Licht auf diese Sensoren fallen kann.

Die Werte, mit denen man die Komponenten Rot, Grün und Blau angibt, sind häufig dem Computerzeitalter angepasst und gehen in diesem Fall von 0 (Lampe ausgeschaltet) bis 255 (Lampe brennt mit maximaler Intensität). Alternativ ist jedoch eine prozentuale Angabe der Intensität möglich.

Sie können sich für die Praxis leicht vorstellen, dass es ein festes RGB nicht gibt. Tauscht man zum Beispiel bei dem Lampenversuch die rote Lampe durch die eines anderen Herstellers aus, so werden sich bei gleichen RGB-Werten andere Farben ergeben. Man spricht deshalb von einem geräteabhängigen Farbmodell.

Die aus dem RGB-Farbmodell resultierende Beschreibung von Farbe ist für unser Vorstellungsvermögen zu abstrakt. Beschreibt man zum Beispiel eine Farbe mit den Werten Rot: 191, Grün: 128 und Blau: 82, so kann nicht sofort angegeben werden, um welche Farbe es sich handelt (es handelt sich um ein Orangebraun). Man versucht deshalb, Farbe intuitiver zu beschreiben, und kommt so zu einem neuen Farbmodell:

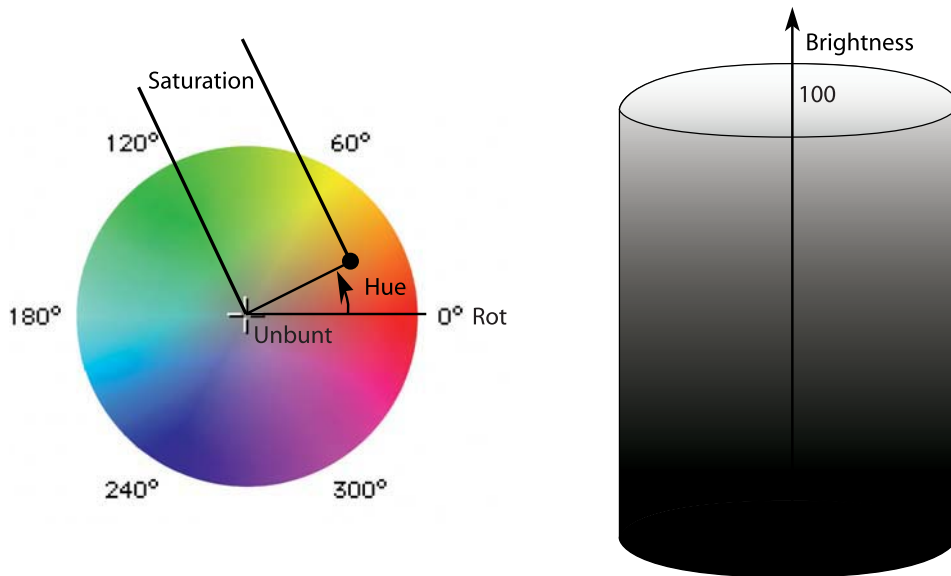
## Das HSB-Farbmodell

Das HSB-Farbmodell leitet sich direkt aus dem RGB-Farbmodell ab. Vorstellen können Sie sich dieses Modell als ein tonnenförmiges Gebilde.

Betrachtet man die Tonne von der Seite, so entspricht eine Bewegung von unten nach oben einer Erhöhung der Helligkeit. Im Englischen nennt man die Helligkeit Brightness (B). Ganz unten liegt Schwarz, ganz oben liegt Weiß. Der Wertebereich der Helligkeit geht von 0 (Schwarz) bis 100 (Weiß).

Schneidet man die Tonne bei einem beliebigen Helligkeitswert auf und betrachtet den Ausschnitt von oben, so ergibt sich ein Kreis. In diesem Kreis ist die Farbe Rot als Bezugsfarbe festgelegt.





Das HSB-Farbmodell leitet sich aus dem RGB-Farbmodell ab und beschreibt Farbe für den Menschen intuitiver.

Beschreibt man jetzt eine Farbe mit einem Winkel zur Bezugsfarbe Rot, so nennt man diesen Winkel *Farbwinkel* oder *Hue* (H). Er gibt die Farb-art einer Farbe an. Immer wenn Sie Begriffe wie Rot, Orange oder Grün verwenden, beschreiben Sie die Farb-art. Der Huewinkel überstreicht einen Wertebereich von 0 bis 359 Grad.

Die *Sättigung* oder *Saturation* (S) gibt den Abstand einer Farbe zum Kreismittelpunkt, also zu den unbunten Farben, an. Das bedeutet, dass die Farben von innen nach außen immer bunter werden. Einem Wert von 0 entspricht eine graue Farbe, einem Wert von 100 entspricht eine maximal gesättigte Farbe. Immer wenn Sie bei einer Farbbeschreibung Wörter wie *blass* oder *neon* verwenden, beschreiben Sie somit die Sättigung einer Farbe.

Eine Farbe ist deshalb nur dann vollständig beschrieben, wenn Sie zum Beispiel von einem hellen Blassgrün sprechen. Aus den Anfangsbuchstaben von Hue, Saturation und Brightness ergibt sich die Abkürzung HSB.

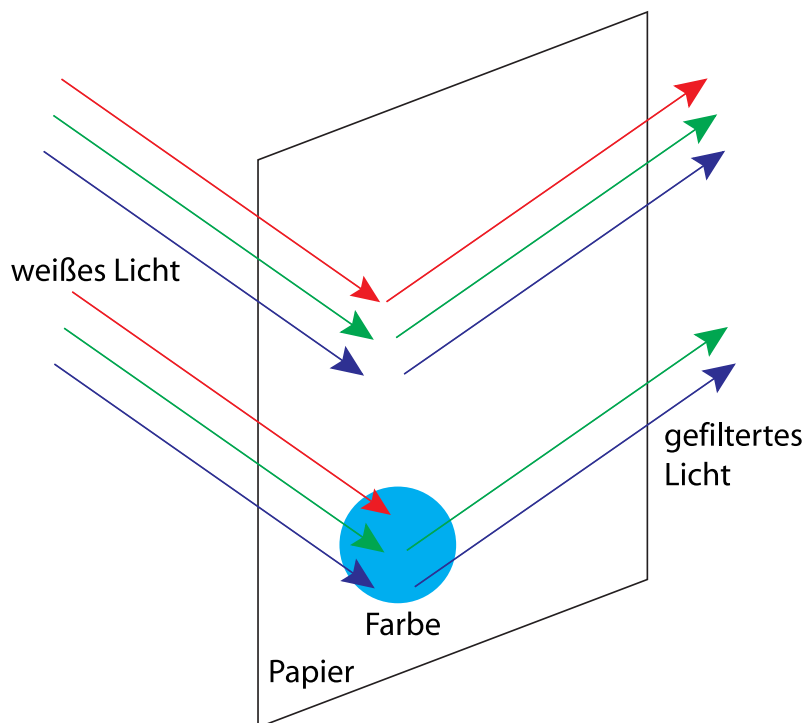
Da sich das HSB-Farbmodell aus dem RGB-Farbmodell ableitet, ist es wie RGB geräteabhängig.

## Das subtraktive Farbmodell CMY

Beim subtraktiven Farbmodell CMY geht man von weißem Licht und einem weißen Blatt Papier aus. Trifft das weiße Licht auf das Papier, wird es unverändert remittiert und trifft so auf das Auge.

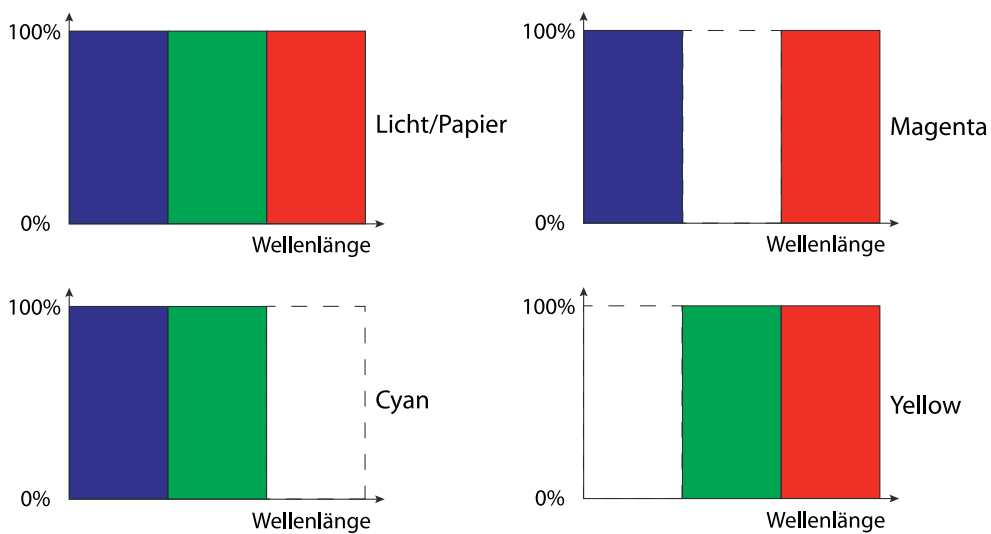
Trägt man nun eine Farbe auf dieses Blatt Papier auf, so lässt sie nur einen farbigen Teil des Lichtes passieren, filtert jedoch einen anderen farbigen Teil heraus. Verwendet werden hierbei die Grundfarben Cyan, Magenta und Yellow (Gelb).

So wirkt das subtraktive Farbmodell, wie es im Druck verwendet wird. Eine bestimmte Farbe filtert farbige Lichtkomponenten aus dem weißen Licht heraus.



Teilt man das weiße Licht in drei farbige Bereiche Rot, Grün und Blau ein, so lässt Cyan den grünen und blauen Teil des weißen Lichtes passieren, filtert jedoch den roten Lichtanteil heraus. Magenta filtert den grünen Lichtanteil heraus und Yellow filtert den blauen Lichtanteil heraus.

Kombiniert man zwei Grundfarben miteinander, so lassen sich die Mischfarben Rot, Grün und Blau erzeugen. Sind alle drei Grundfarben vorhanden, so werden beim Betrachten alle drei Teilbereiche des weißen Lichts herausgefiltert und es ergibt sich Schwarz. Da man aus dem weißen Licht farbiges Licht entfernt (subtrahiert), wird dieses Farbmodell subtraktives Farbmodell genannt.



In der Theorie filtert Cyan die roten Lichtanteile aus dem weißen Licht heraus, Magenta die grünen Lichtanteile und Gelb (Yellow) die blauen Lichtanteile.

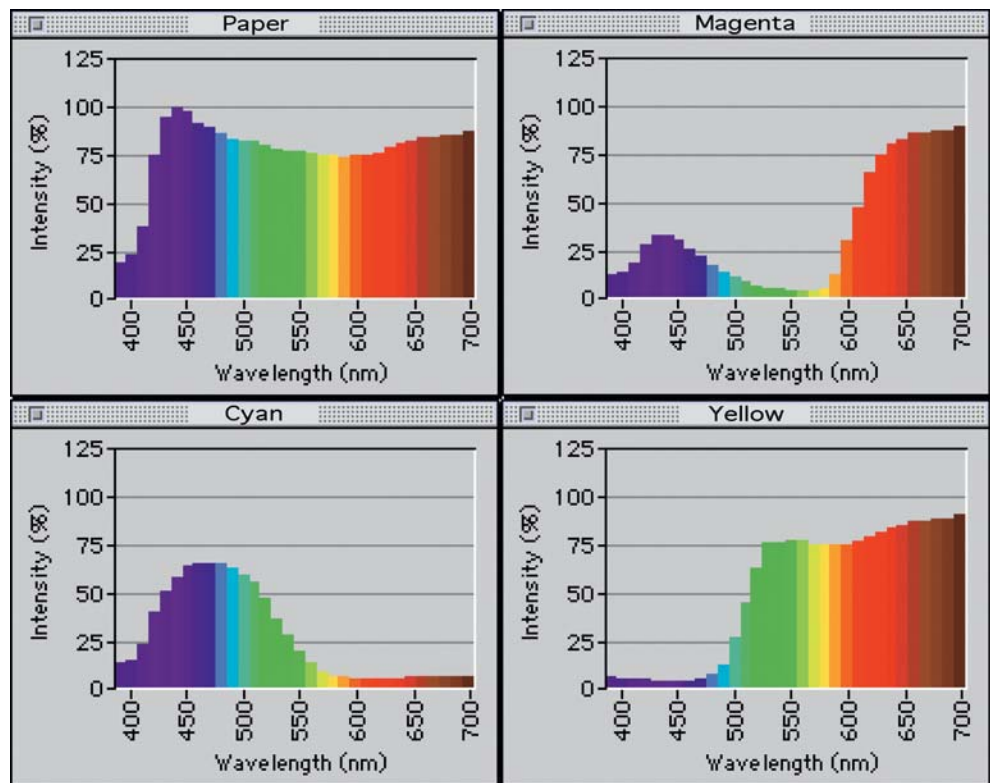
Um nun verschiedene Farbtöne darstellen zu können, müssen Sie in der Praxis viele sehr kleine Farbpunkte zu einer Einheit, einer so genannten *Rasterzelle*, zusammenfassen. Sind die einzelnen Farbpunkte klein genug, so kann sie das Auge nicht mehr als einzelne Punkte wahrnehmen, sie verschwimmen mit den Nachbarpunkten zu einer Mischfarbe.

Nach diesem Prinzip arbeitet das Druckverfahren. Wollen Sie etwa 16 Millionen verschiedene Farben erreichen, so müssen Sie 16 mal 16, also 256 Punkte zu einer Rasterzelle zusammenfassen. Um das Auge hierbei zu überlisten, darf eine Rasterzelle nur etwa 1/150 Inch oder Zoll groß sein (ein Inch sind etwa 2,54 cm). Das entspricht etwa 1/60 cm. Da die Rasterzelle vereinfacht gesehen 16 Farbpunkte breit und 16 Farbpunkte hoch ist, ergibt sich eine Druckpunktgröße von etwa 1/2400 Inch oder 1/1000 Millimeter.

Die Anteile von Cyan, Magenta und Yellow werden üblicherweise von 0 bis 100% angegeben. Benutzt man zum Beispiel Cyan zu einem Anteil von 80% in einer Rasterzelle, so bleiben 20% Weiß.

In der Praxis ist Papier niemals ein idealer Reflektor. Papier remittiert meistens blaues Licht besonders schlecht, so dass ein gelblicher Farbeindruck entsteht. Auch sind die Druckfarben Cyan, Magenta und Yellow alles andere als ideal. Sie lassen sich nicht so rein herstellen, das heißt zum Beispiel, dass Cyan auch Teile des grünen und blauen Lichts wegfiltern wird. Außerdem wird Rot nicht so stark ausgefiltert, wie es erforderlich wäre.

In der Praxis ist der Druckprozess alles andere als ideal. So verschluckt dieses Papier die blau-violetten Lichtanteile schon sehr stark. Cyan beeinflusst die blauen Lichtanteile sehr stark und auch Magenta filtert die blauen Lichtanteile viel zu stark.



## Die Erweiterung von CMY um Schwarz (K)

Druckt man nun Cyan, Magenta und Yellow übereinander, so ergibt sich kein Schwarz, sondern nur ein dunkles Grau, das zudem meistens einen Braunstich aufweist. Aus diesem Grund fügt man dem Druck eine vierte Druckfarbe Schwarz (K, Key oder Kontrast) hinzu.

Hierbei ergibt sich ein weiterer angenehmer Nebeneffekt: Da Sie drei Druckfarben durch eine einzige ersetzen können, sparen Sie auch Farbe. In der Praxis wird man jedoch nicht die gesamten Anteile der drei Farben durch Schwarz ersetzen, da nebenher ein unerwünschter Schärfungseffekt auftritt und im Gegensatz von CMY Schwarz keine lasierende, sondern eine deckende Farbe ist.

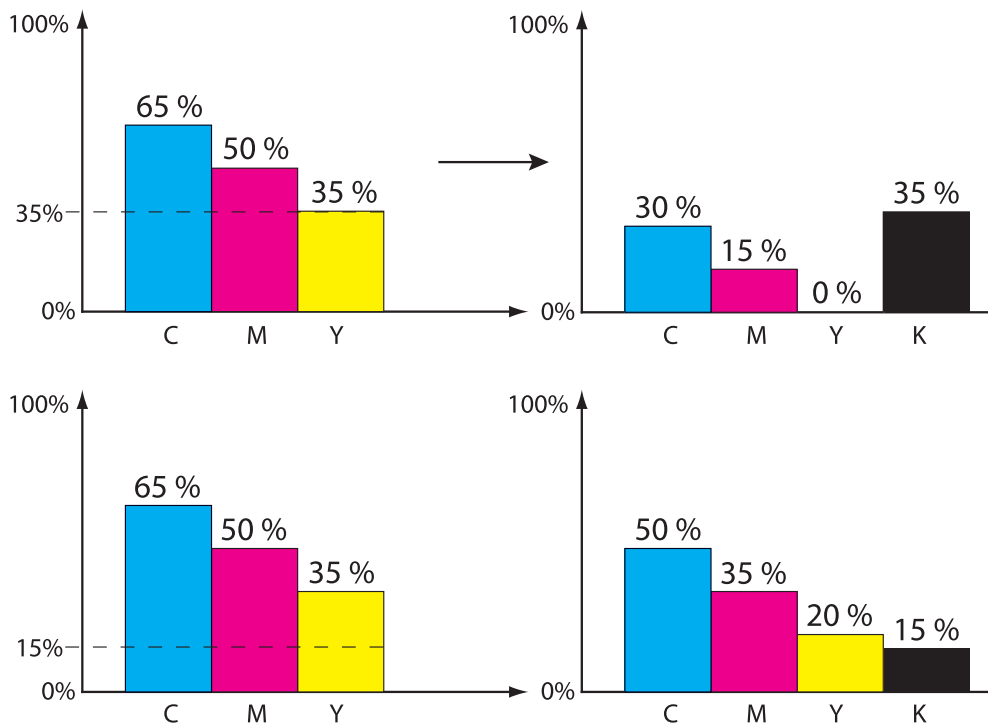
Man verwendet zwei Arten der Farbersetzung:

- UCR (Under Cover Removal, Unterfarbenentfernung oder Buntaufbau). Hierbei wird im Wesentlichen nur bei den unbunten (grauen) Farben ein Teil von CMY durch Schwarz ersetzt.

- GCR (Gray Component Replacement oder Unbuntaufbau). Hierbei werden auch zusätzlich in den bunten Farben Teile von CMY durch Schwarz ersetzt. Das Resultat ist, dass der Druck eine höhere Stabilität gegen Schwankungen von CMY und damit eine höhere Einhaltung der Graubalance aufweist.

Der Schwarzaufbau wird auch als Skelett bezeichnet. Spricht man von einem kurzen Skelett, so findet die Ersetzung von CMY nur bei den sehr dunklen Farben statt. Bei einem langen Skelett werden demgegenüber auch die mittleren Helligkeiten mit beeinflusst. Ein schmales Skelett bedeutet wiederum, dass fast nur die unbunten Farben beeinflusst werden, während ein breites Skelett für die Beeinflussung der bunten Farben steht.

Auch bei diesem Farbmodell muss klar sein, dass es *das* CMY oder *das* CMYK nicht gibt. Ebenso hat, aufgrund unterschiedlicher Standards, der amerikanische Offsetdruck (SWOP) mit der ISO-Skala in Europa und mit der japanischen Norm (Toyo) wenig zu tun. Auch die Grundfarben CMY des Offsetdrucks sehen ganz anders aus als die CMY-Farben bei einem Tintenstrahldrucker. Diese Farbmodelle bezeichnet man deshalb ebenfalls als geräteabhängig.



So entsteht der Schwarzaufbau. Im oberen Extremfall werden gleiche Anteile von CMY durch Schwarz (K) ersetzt. In der Praxis wird man wie im unteren Beispiel nur Teile von CMY durch Schwarz ersetzen.

## Zusammenhang zwischen RGB und CMY

In der Theorie ergibt sich ein einfacher mathematischer Zusammenhang zwischen dem additiven RGB-Farbmodell und dem subtraktiven CMY-Farbmodell. Gibt man die Anteile von RGB und CMY jeweils in Prozent an, so gilt für eine in RGB-Anteilen angegebene Farbe:

Theoretischer Zusammenhang zwischen den additiven RGB-Farben und den subtraktiven CMY-Farben

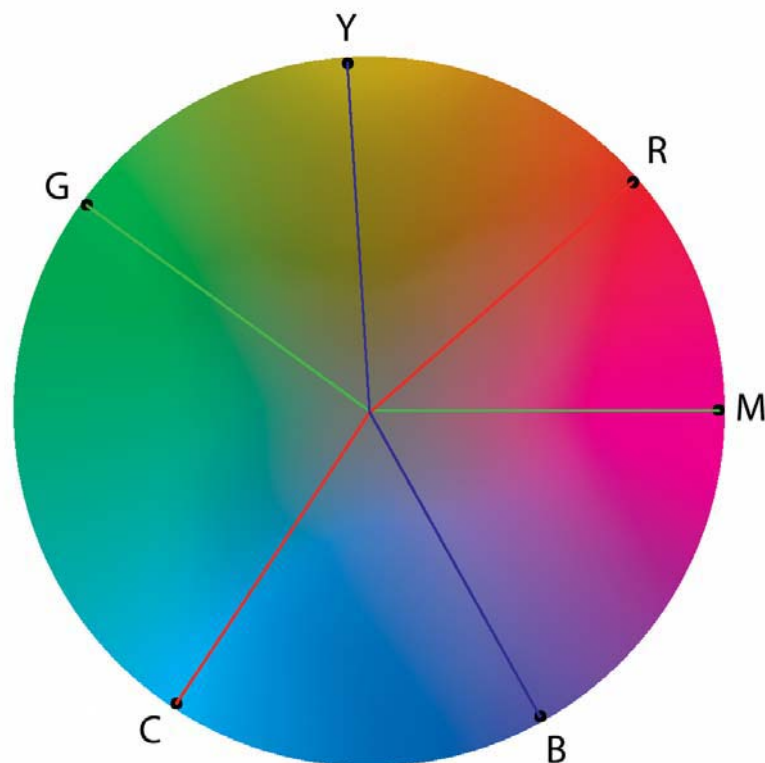
$$C = 100\% - R$$

$$M = 100\% - G$$

$$Y = 100\% - B$$

Wenn Sie nun in der Praxis zum Beispiel die Farbe, die ein bestimmter Monitor als Grün darstellt, mit dem Grün vergleichen, das auf einer bestimmten Druckmaschine durch den Übereinanderdruck von Cyan und Yellow entsteht, so sehen Sie, dass das Monitor-Grün viel heller ist. In der Praxis ist das Farbverhalten gerade von Druckern oder Druckmaschinen viel zu komplex, um es mit einer wie oben angeführten einfachen Formel zu beschreiben. Die nachfolgende Abbildung zeigt deutlich, dass zum Beispiel das Monitor-Grün nicht dem Druck-Magenta gegenüberliegt, wie es in der Theorie der Fall sein müsste.

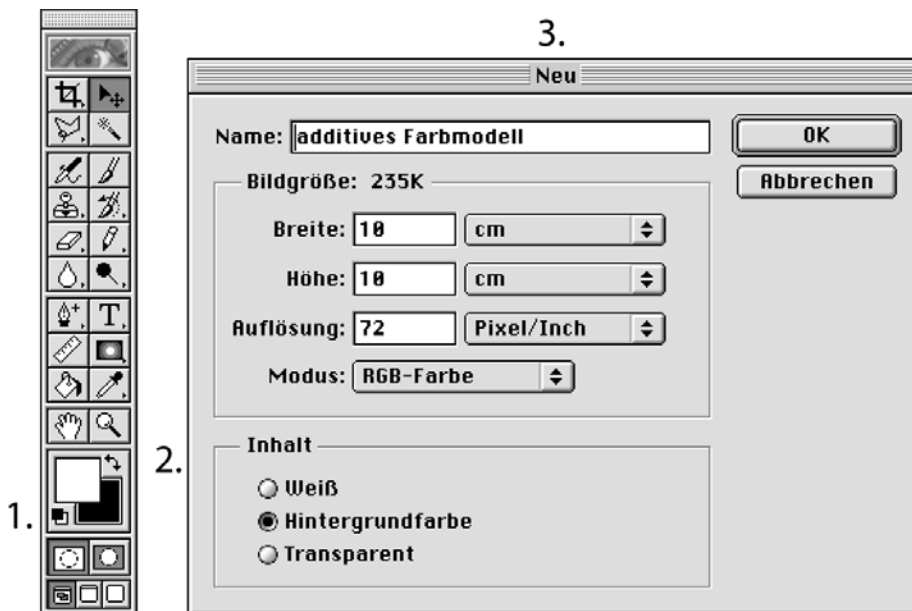
In dieser Abbildung sind die Grundfarben eines typischen Monitors den Grundfarben eines typischen Drucks gegenübergestellt. Man sieht, dass sich Monitor-Grün und Druck-Magenta überhaupt nicht gegenüberliegen.



# Übung: Geräteabhängige Farbmodelle

Einen direkten visuellen Vergleich der Unterschiede zwischen Monitorfarben und Druckfarben können Sie in einer einfachen Übung in Photoshop nachvollziehen.

Im ersten Dokument werden die Monitorfarben nachgebildet. Wenn Sie Photoshop geöffnet haben, legen Sie zuerst die Hintergrundfarbe auf Schwarz und die Vordergrundfarbe auf Weiß fest, indem Sie in der Werkzeugleiste die Standardfarben einstellen (Schritt 1) und sie danach vertauschen (Schritt 2).



Das additive Farbmodell in Photoshop:  
Zuerst wird die Vordergrundfarbe auf Weiß und die Hintergrundfarbe auf Schwarz festgelegt. Dann wird ein neues RGB-Dokument erstellt und mit Schwarz gefüllt.

Dann erstellen Sie ein neues Dokument mit den Maßen 10 cm x 10 cm und einer Auflösung von 72 dpi und legen den Inhalt auf HINTERGRUNDFARBE fest (Schritt 3).

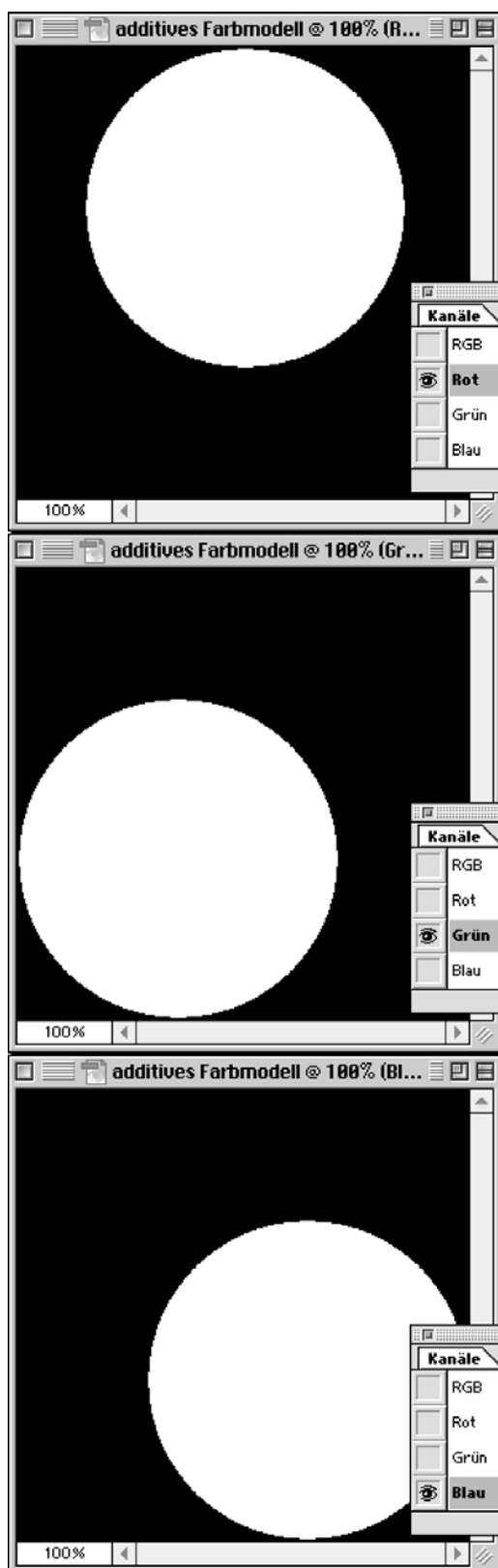
Sie erhalten dann ein schwarzes Dokument, das dem dunklen Raum des additiven Farbmodells entspricht.



Anschließend wird  
zuerst im Rot-Kanal ein  
weißer Punkt gemalt, ...

... dann im Grün-Kanal ...

... und schließlich im  
Blau-Kanal.



Anschließend wählen Sie den Buntstift als Werkzeug aus und benutzen eine Werkzeugspitze mit 200 Pixel Durchmesser.

In der Kanälepalette selektieren Sie jetzt den Rot-Kanal einzeln und malen einen einzelnen weißen Punkt am oberen Rand, seitlich gesehen etwa in der Mitte.

An dieser Stelle wird der dunkle Raum mit rotem Licht beleuchtet.

Dann selektieren Sie den Grün-Kanal einzeln und malen einen einzelnen weißen Punkt in die linke untere Ecke.

An dieser Stelle wird der Raum jetzt von einer grünen Lampe beleuchtet.

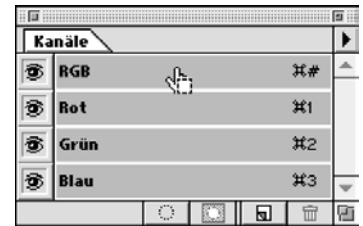
Zum Schluss selektieren Sie den Blau-Kanal einzeln und malen einen letzten weißen Punkt in die rechte untere Ecke des Bildes.

An dieser Stelle beleuchtet jetzt eine blaue Lampe den Raum.

Auf diese Weise können Sie sich auch die Bedeutung von Schwarz und Weiß in der Kanälepalette von RGB-Dokumenten gut merken: Schwarz bedeutet keine Farbe, Weiß bedeutet Farbe.

Aktivieren Sie alle Kanäle gleichzeitig, so können Sie erkennen, wie sich die farbigen Lichter miteinander im Raum mischen.





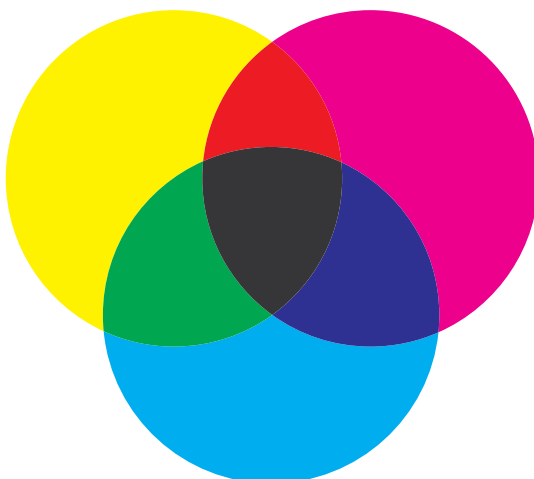
Betrachten Sie anschließend alle Kanäle gleichzeitig, so können Sie die Mischung der drei Grundfarben nachvollziehen.

Für die subtraktiven Farben gehen Sie ähnlich vor. Hier wählen Sie Weiß als Hintergrundfarbe und Schwarz als Vordergrundfarbe. Wieder erstellen Sie ein Dokument der Größe 10 cm x 10 cm mit Hintergrundfarbe, diesmal jedoch im Modus CMYK.

In CMYK geht man vom weißen Papier aus, Farbe auftragen bedeutet, in den Kanälen mit Schwarz zu malen. Sie selektieren zuerst den Cyan-Kanal und tragen hier unten, seitlich gesehen in der Mitte, einen schwarzen Punkt auf. Dann wechseln Sie in den Magenta-Kanal und tragen hier in der oberen rechten Ecke einen weiteren Punkt auf. Schließlich selektieren Sie den Yellow-Kanal und tragen in diesem in der oberen linken Ecke den letzten Punkt auf.

Schalten Sie jetzt auf den CMYK-Gesamtkanal um, können Sie die Farbmischung der subtraktiven Farben betrachten.

Dieses Dokument sollten Sie jetzt mit dem Dokument der additiven Farbmischung vergleichen. Im Vergleich sind die Unterschiede zwischen Druckfarben und RGB-Farben deutlich zu erkennen.



Ähnlich funktioniert die Darstellung des subtraktiven Farbmodells in Photoshop.

## 1.3 Geräteunabhängige Farbmodelle

### Die Versuche und Normungen der CIE

Eine internationale Vereinigung von Wissenschaftlern, die CIE (Commission Internationale de l'Éclairage oder Internationale Beleuchtungskommission) begann Anfang des 20. Jahrhunderts, Erfahrungen im Bereich der Farbwissenschaften miteinander auszutauschen. Ziel war es, einheitliche Standards festzulegen, wie Hersteller und Anwender von Farbprodukten Farben beschreiben und beurteilen.

Im Jahre 1931 fassten diese Wissenschaftler erstmalig alle bis dahin vorhandenen Kenntnisse zusammen und führten weitere umfangreiche Versuche durch. Die wichtigsten Festlegungen beziehen sich auf die Umstände, unter denen Farben beurteilt werden müssen und wie sie beschrieben werden können.

Entstehung eines  
Farbeindrucks

Diese Normungen wurden 1976 erweitert und bilden auch heute noch die Grundlage für die Farbbeschreibung.

Licht

x

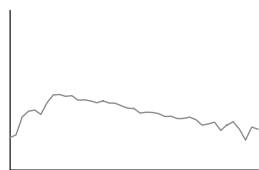
Objekt

x

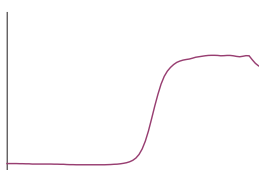
Auge

=

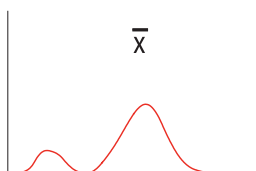
Farbvalenz



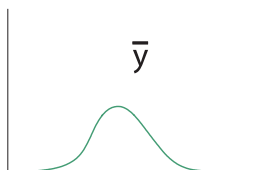
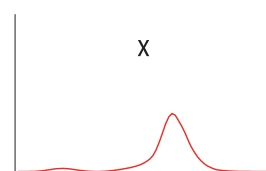
x



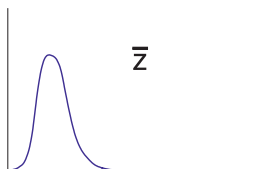
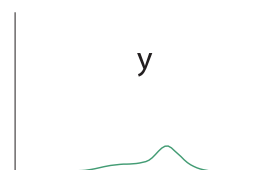
x



=



=



=



Spektrale  
Strahlungs-  
energie

x

Spektrale  
Remission

x

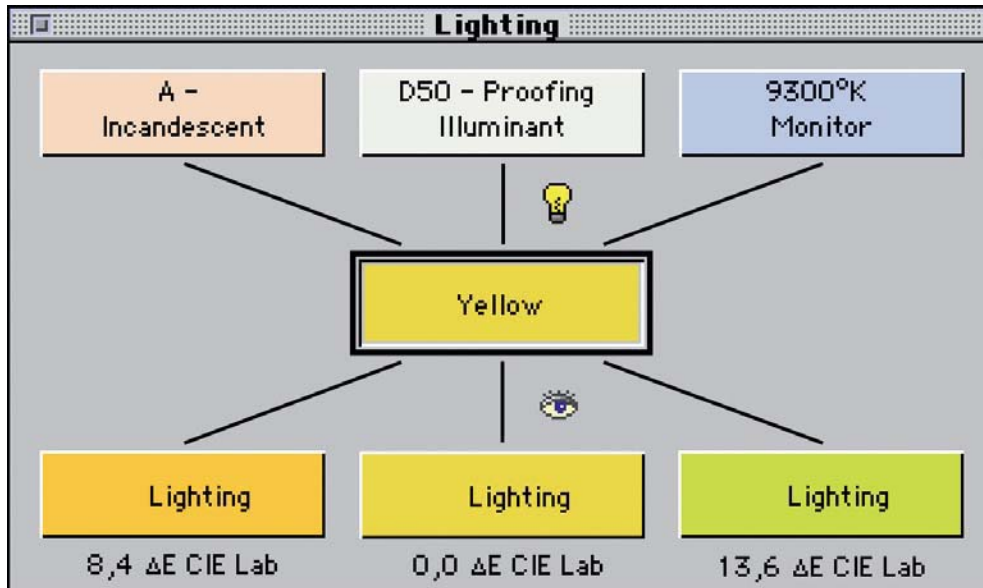
Norm-  
spektralwerte

=

Normfarbwerte

## Wie ein Farbeindruck entsteht

Der physikalische Weg, wie ein Farbeindruck entsteht, besteht aus drei Komponenten: Licht, Objekt und Auge. Diese einzelnen Teile und deren Bedeutung für das Farbmanagement sollen an dieser Stelle beschrieben werden.



So wirkt sich die Beleuchtung auf den Farbeindruck einer Farbe aus. Von links nach rechts: Glühlampenlicht, Normlicht D50 und das Licht eines Standardmonitors.

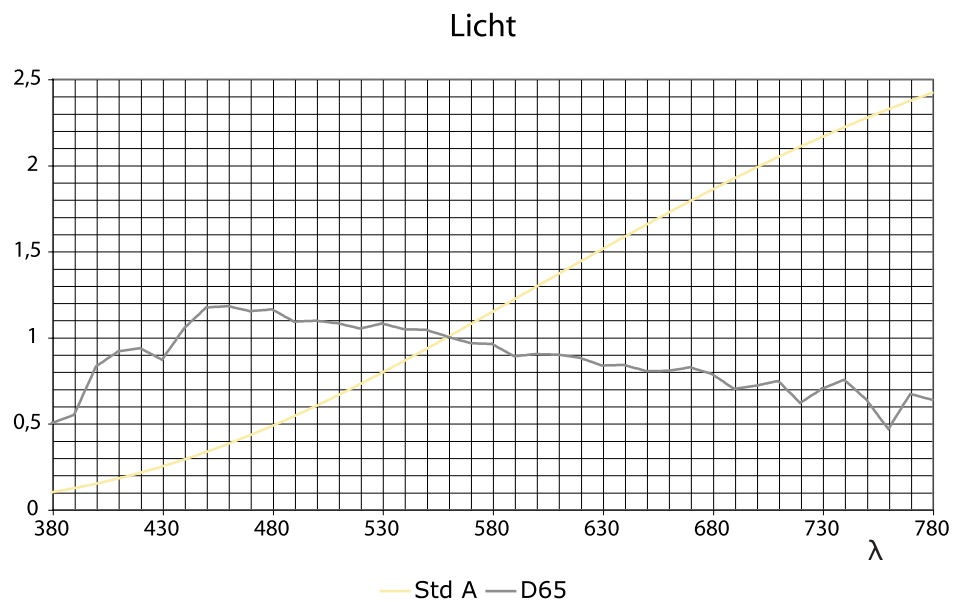
## Das Licht

Das menschliche Auge kann sich sehr gut auf unterschiedliches Umgebungslicht einstellen. Glühlampenlicht zum Beispiel wird nicht als gelbliches Licht empfunden, obwohl ein Messgerät es als gelbliches Licht messen würde. Erst wenn eine Testperson das Licht eines Tageslichtprojektors und einer Glühlampe gleichzeitig betrachtet, beurteilt sie das Licht des Projektors bläulicher als das der Glühlampe.

Erhitzt man einen hohlen Metallwürfel aus Wolfram, der ein Loch besitzt, auf eine bestimmte Temperatur, so tritt aus diesem Loch Licht aus. Es lässt sich nun ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Temperatur des Würfels und dem ausgesendeten Licht herstellen, der so genannten *Farbtemperatur*. Sie wird nicht in Grad Celsius (°C) angegeben, sondern wie in der Wissenschaft üblich in Kelvin (K).

Hierbei entsprechen 0 °C etwa 273 K. Ein Körper, bei dem dieser eindeutige Zusammenhang zwischen Temperatur und Licht besteht, wird als *schwarzer Strahler* bezeichnet. Von der CIE sind einige Standardbeleuchtungsarten festgelegt worden, um gleiche Voraussetzungen zur Farbbeurteilung zu schaffen.

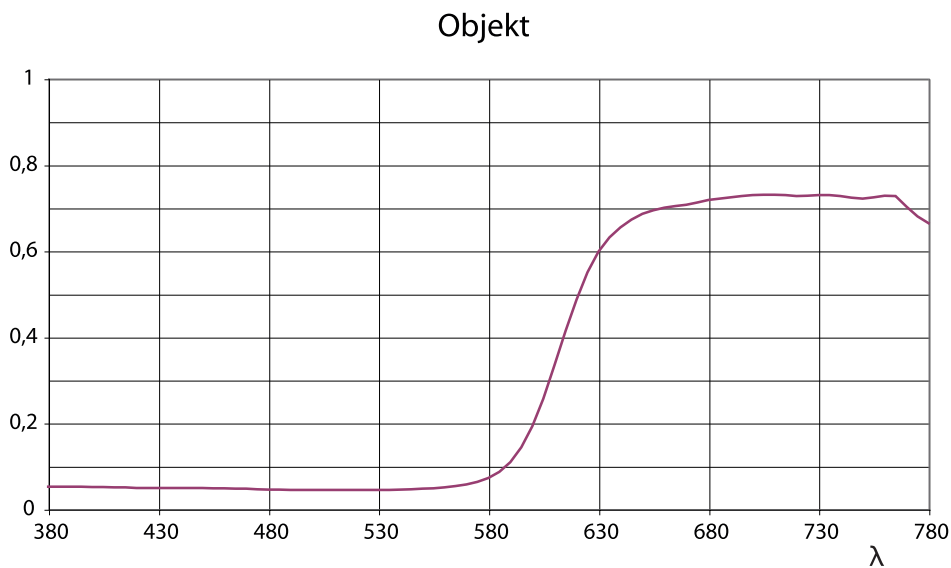
Spektrale Strahlung unter-  
schiedlicher Lichtarten



## Die Standard-Beleuchtungsarten

- **Standardbeleuchtungsart A:** Diese Beleuchtungsart entspricht dem Licht, das von Glühlampen erzeugt wird. Die Farbtemperatur liegt bei etwa 2800 K. Es ist im Vergleich zu Tageslicht ein gelbliches Licht. Verwendet wird dieses Licht in der Fotografie. Kunstlichtfilme sind auf diese Farbtemperatur abgestimmt.
- **Standardbeleuchtungsarten D:** Hier werden mehrere Beleuchtungsarten zusammengefasst. Das D steht für Daylight, also Tageslicht. An das D werden die ersten beiden Ziffern der Farbtemperatur angehängt, um die Lichtart genauer zu spezifizieren:
- **Standardbeleuchtungsart D50:** Diese Lichtart hat eine Farbtemperatur von 5000 K und wird als Standard in der Druckindustrie nach ISO-Norm zur Beurteilung von Farben eingesetzt. Sie gilt als guter Kompromiss zwischen Tageslicht (6500 K) und Kunstlicht (2800 K).
- **Standardbeleuchtungsart D65:** Licht mit einer Farbtemperatur von 6500 K entspricht Tageslicht. D65 ist der ISO-Standard in der Textilindustrie zur Beurteilung von Stofffarben. Auch in der Videoproduktion wird Licht dieser Farbtemperatur als Standard eingesetzt. Weiterhin wird dieses Licht bei Projektoren eingesetzt, zum Beispiel bei Dia- und Overheadprojektoren.

Zum Abschluss sei die Farbtemperatur eines unkalibrierten Computermonitors genannt, die bei etwa 9300 K liegt. Ein Computermonitor erzeugt somit ein bläuliches Licht.



## Die Objekteigenschaften

Mit Licht beleuchtete Objekte erhalten ihre Farbe dadurch, dass sie bestimmte Wellenlängen des Lichts entweder absorbieren (schlucken) oder remittieren (zurückwerfen).

## Die Eigenschaften des Auges

Die drei im menschlichen Auge vorhandenen Zapfentypen besitzen für bestimmte Wellenlängen des Lichts charakteristische Empfindlichkeiten. In der Farbtheorie wichtiger als diese Augenempfindlichkeiten sind die so genannte Normspektralwertfunktionen, die als Berechnungsgrundlage für die Normfarbwerte XYZ dienen.

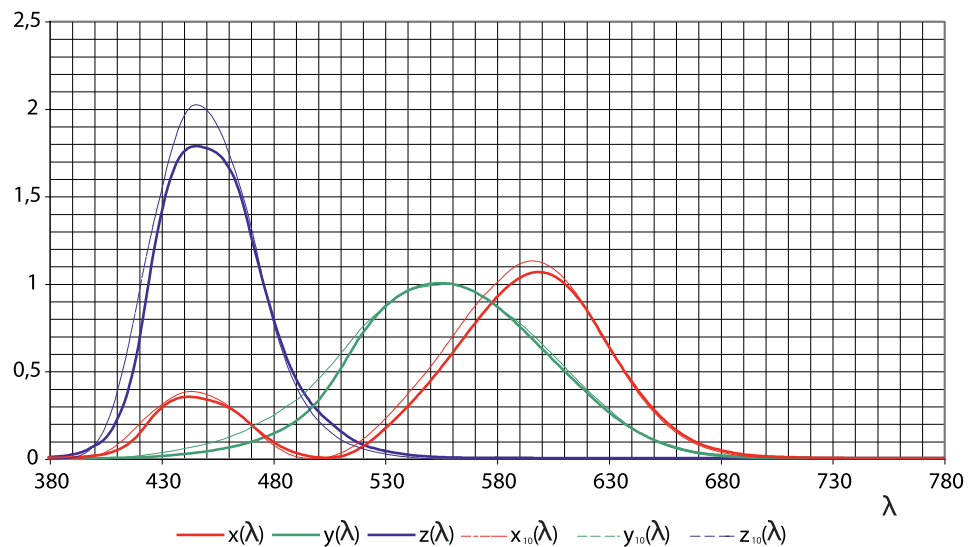
## Der Standardbeobachter

Wie bereits bei der Beschreibung des menschlichen Auges erwähnt, sind auf der Netzhaut die farbempfindlichen Zapfen auf die Mitte konzentriert. Ist eine zu beurteilende Farbfläche so klein, dass das von ihr remittierte Licht nur auf die Mitte der Netzhaut fällt und somit nur einen Farbreiz der Zapfen auslöst, wird die Farbe vom Betrachter als etwas gelblicher empfunden. Ist demgegenüber die Farbfläche so groß, dass auch große Teile der Stäbchen gereizt werden, wird die Farbe als etwas bläulicher empfunden.

Die Abbildung auf der nächsten Seite zeigt anhand der Normspektralwertfunktionen diese Abhängigkeit von der Größe der Fläche.

Die Normspektralwertfunktionen. Zu erkennen ist deutlich, dass die Kurven des 10 °-Beobachters ins Bläuliche verschoben sind.

Normspektralwertfunktionen



Mit dem *Standardbeobachter* wurde festgelegt, wie groß eine Farbfläche sein muss, damit sie von Testpersonen korrekt beurteilt werden kann.

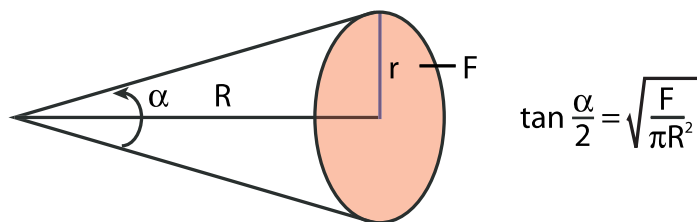
Setzt man die betrachtete Fläche in Beziehung zu dem Abstand, aus dem man die Fläche betrachtet, lässt sich diese Beziehung eindeutig durch die Angabe eines Winkels beschreiben.

Die Standardbeobachter werden deshalb als Winkel definiert.

Als Standardbeobachter wurden festgelegt:

- Der **2 °-Standardbeobachter** (1931) entspricht in etwa einer Fläche von 9,57 cm<sup>2</sup>, die aus einem Meter Entfernung betrachtet wird. Dieser Standardbeobachter wird meistens bei der Beurteilung von Farben eingesetzt. Er berücksichtigt die Art, wie Farbflächen in gedruckter Form aus geringer Entfernung wahrgenommen werden.
- Der **10 °-Standardbeobachter** (1964) entspricht in etwa einer Fläche von 240 cm<sup>2</sup>, die aus einem Meter Entfernung betrachtet wird. Er gilt eher für den Fall, dass Farbflächen großflächig auf eine Leinwand projiziert werden.

Der Standardbeobachter beschreibt den Zusammenhang von Abstand zu einer betrachteten Fläche mit einem Winkel.



## Das additive XYZ-Farbmodell

1931 unternahm die CIE ausgiebige Versuche, die vom Menschen wahrnehmbaren Farben zu erfassen. Man wählte dazu erneut einen Lampenversuch, bei dem die Versuchspersonen mit drei Lampen (Rot, Grün und Blau) eine Testfarbe nachbilden mussten. Die RGB-Werte, die die einzelnen Testpersonen hierbei einstellten, wurden statistisch erfasst und anschließend ausgewertet. Hierbei stellte sich heraus, dass über 90% der Versuchspersonen eine Farbe als gleich empfanden.

Bei bestimmten Farben, zum Beispiel Farben, die aus Sonnenlicht mit einem Prisma erzeugt wurden (Spektralfarben), stellte man jedoch fest, dass sie sich mit diesem Versuchsaufbau nicht nachbilden ließen. Man reduzierte deshalb die Sättigung dieser Farben, indem man zusätzliches farbiges Licht hinzufügte, dessen RGB-Werte man bereits kannte. Auf diese Weise konnte man die neu entstandene Farbe nachbilden.

Rein mathematisch gesehen gab es also Farben mit negativen Anteilen von Rot, Grün oder Blau, die in der Praxis natürlich nicht mit einem solchen Lampenversuch erzeugbar sind. Also definierte die CIE drei hypothetische Grundfarben X, Y und Z, deren abstrakte Namen schon ihren rein theoretischen Charakter beschreiben.

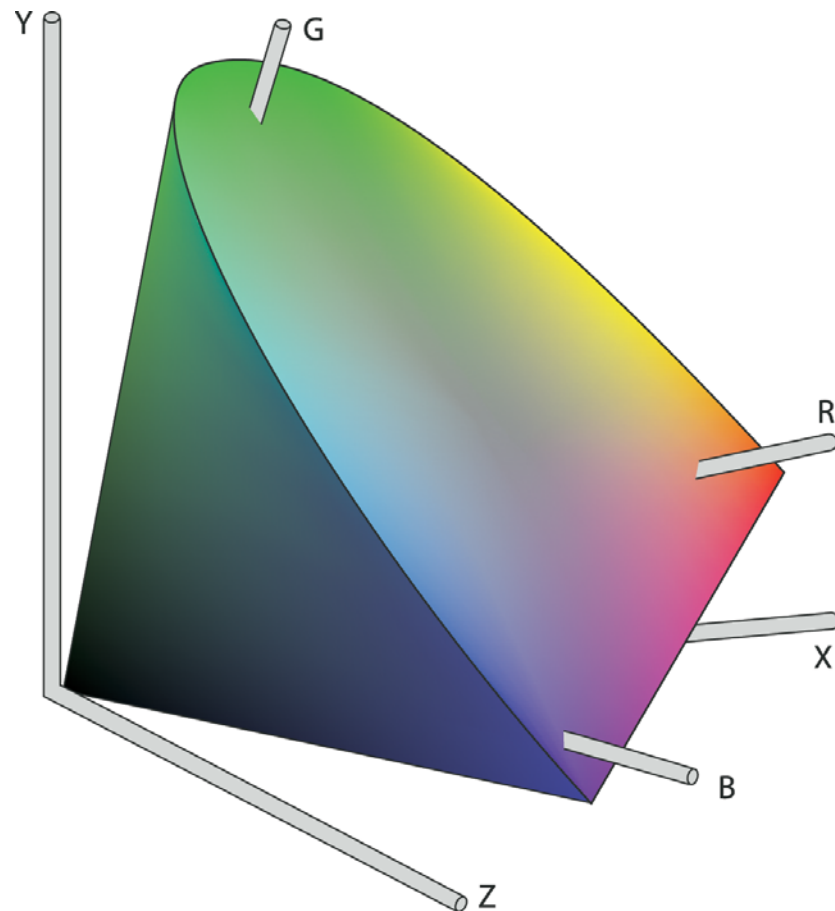
X entspricht hierbei einer roten, Y einer grünen und Z einer blauen Grundfarbe. Trägt man alle in dem Lampenversuch nachgebildeten Farben in einem dreidimensionalen Diagramm auf, ergibt sich ein Körper, der in etwa die Form einer Tüte hat.

Schwarz liegt im Koordinatenursprung bei  $X = Y = Z = 0$ , für alle anderen unbunten Farben gilt, dass die Werte von X, Y und Z gleich sind. Weiterhin gilt in diesem Diagramm, dass, wenn man zwei Farben miteinander mischt, deren XYZ-Werte man kennt, die Mischfarbe durch einfache Addition der Werte bestimmt wird.

In der praktischen Anwendung von Farbmanagement wird das XYZ-Farbmodell selten direkt genutzt. Es bildet aber die Grundlage der anderen geräteunabhängigen Farbmodelle und wird oft bei der Charakterisierung von Monitoren verwendet, da es sich genauso additiv verhält wie das RGB-Farbmodell.

Die nächste Seite zeigt das dreidimensionale XYZ-Farbmodell.

Innerhalb dieses dreidimensionalen Gebildes liegen alle Farben, die der Mensch wahrnehmen kann. Würde man die Achsen R, G und B durch Linien miteinander verbinden, so ergibt sich der Teilbereich, der durch den Lampenversuch erzeugt werden kann.



## Das Yxy-Farbmodell

Der große Nachteil des XYZ-Farbmodells ist seine Dreidimensionalität. Man hatte zwar jetzt ein Farbmodell zur Hand, das alle vom Menschen wahrnehmbaren Farben beinhaltete, konnte dieses aber noch nicht so zu Papier bringen, dass man es wie eine Art Landkarte der Farben einsetzen konnte, aus der sich die Lage der Farben zueinander ablesen ließ.

Betrachtet man die Grundfarben X, Y und Z jedoch etwas genauer, stellt man fest, dass Y ein Maß für die Helligkeit ist, mit der man eine Farbe empfindet. Y wird deshalb in der Farbwissenschaft als der *Luminanzanteil* einer Farbe bezeichnet. Hierbei entspricht eine Luminanz von 0 Schwarz, während eine Luminanz von 100 Weiß entspricht.

Auf der anderen Seite ist eine Farbe erst dann vollständig beschrieben, wenn man auch eine Aussage über die Farbigkeit einer Farbe (*Chrominanz*) trifft. Steckt man nun etwas Mathematik in das vorher vorge-



stellte XYZ-Farbmodell, lässt sich eine Farbe in einen Luminanzanteil Y und in einen Chrominanzanteil, der mit x und y beschrieben wird, aufteilen.

Man definiert ganz abstrakt drei neue Variablen x, y und z, die Berechnung aus den XYZ-Koordinaten läuft dabei folgendermaßen ab:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$

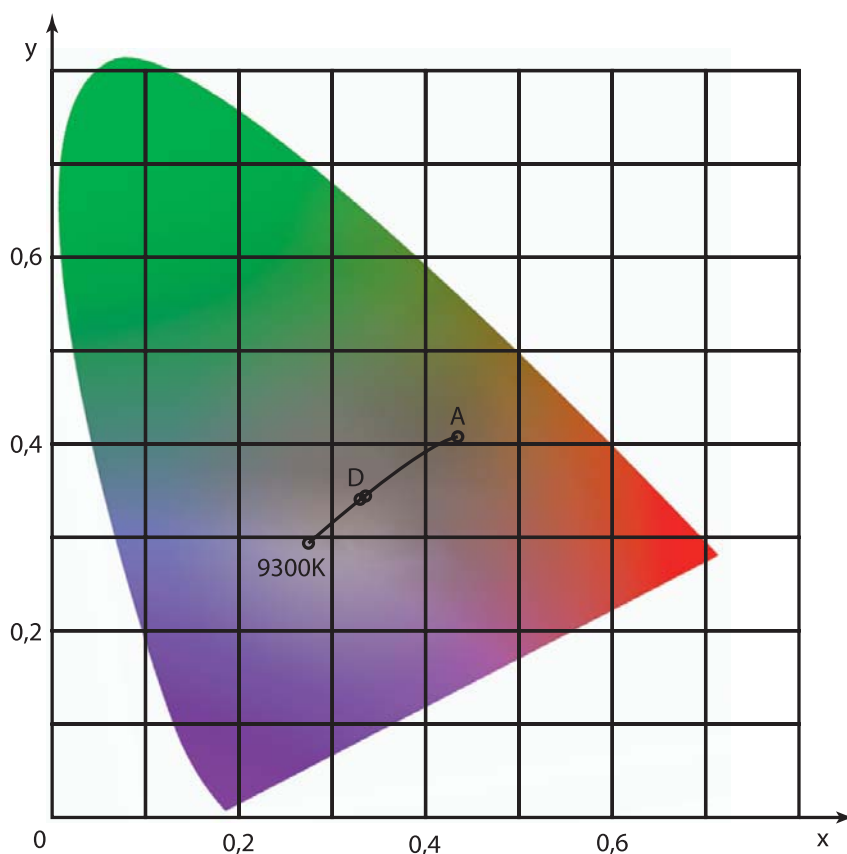
$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Der Übergang von XYZ zu Yxy, bei dem eine Farbe in einen Helligkeitsanteil Y und einen Farbigkeitsanteil xy zerlegt wird.

Wie sich leicht nachrechnen lässt, ergibt dabei  $x + y + z = 1$ . Eine der Koordinaten lässt sich also aus den anderen beiden Koordinaten berechnen. Deshalb benutzt man z nicht und übernimmt stattdessen die Luminanz Y als dritten Wert zur Farbbeschreibung.

Man kommt so zur so genannten *Normfarbtafel*, in der die Chrominanzanteile x und y bei einer bestimmten Helligkeit aufgetragen sind:



In der Normfarbtafel wird die Lage der Farben zueinander dargestellt. Sie gilt immer nur bei einer bestimmten Luminanz.

Berandet wird das Gebilde, umgangssprachlich wegen seiner Form oft als Schuhsohle bezeichnet, durch den Spektralfarbenzug, auf dem alle Farben liegen, die sich aus Sonnenlicht mit einem Prisma erzeugen lassen.

Im unteren Bereich wird die Kurve durch die so genannte *Purpurlinie* geschlossen. Auf ihr liegen Farben, die sich aus einer Mischung von Blauviolett und Rot ergeben. Die Werte von  $x$  und  $y$  laufen von null bis eins. Alle unbunten Farben liegen in der Mitte des Diagramms, wenn die Werte von  $x$  und  $y$  jeweils  $1/3$  betragen.

Bei den Standardbeleuchtungsarten habe ich bereits die unterschiedlichen Farbtemperaturen erwähnt, die Licht haben kann. Trägt man diese in Form einer Kurve im Diagramm ein, so erhält man die so genannte *Schwarzkörperkurve*, die auch als *Planckscher Kurvenzug* bezeichnet wird.

Das Yxy-Farbmodell wird heute noch oft eingesetzt, um die farblichen Möglichkeiten von verschiedenen Geräten miteinander vergleichen zu können. Auch die Einteilung von Farbe in einen Luminanzanteil und einen Chrominanzanteil wird gerade im Videobereich verwendet. Mit Hilfe von Versuchen ließ sich feststellen, dass die Luminanzinformation für die Wahrnehmung wichtiger ist als die Chrominanzinformation.

So eröffnet diese Aufteilung eine Möglichkeit der Informationsverminderung, wie sie zur Übertragung von Bilddaten zum Beispiel im Fernsehbereich notwendig ist. Hierauf gehe ich beim YCC-Farbmodell näher ein.

## Das gleichabständige $L^*a^*b^*$ -Farbmodell

Im Jahre 1976 definierte die CIE ein weiteres Farbmodell, das  $L^*a^*b^*$ . Die Sterne hinter den Komponenten haben historische Gründe, sie sollten dieses Farbmodell als CIELab-Farbmodell kennzeichnen. Da es jedoch kein konkurrierendes Farbmodell gibt, mit dem es verwechselt werden könnte, werden die Sterne in der heutigen Schreibweise weggelassen.

Die vorher vorgestellten Farbmodelle haben den großen Nachteil, dass sich aus ihnen keine Aussage über die Beziehung verschiedener Farben zueinander ableiten lässt.

Betrachtet man zum Beispiel das Xyy-Farbmodell genauer, stellt man fest, dass die grünen Farben in diesem Modell einen weiten Raum einnehmen, während der Übergang von Rot über Orange bis zu Gelb auf einem sehr engen Raum liegt.

Bereits 1964 entwickelte man deshalb ein neues Farbmodell, das Luv-Farbmodell, das die Beziehung der Farben zueinander besser berücksichtigte. Es hat jedoch heute praktisch keine Bedeutung mehr und wird deshalb nur der Vollständigkeit halber genannt.

1976 hatte man als Hilfsmittel bereits Computer zur Hand, so dass man mathematische Probleme mit Computerunterstützung lösen konnte, was 1931 einen immensen Rechenaufwand erfordert hätte. Die CIE Lab-Werte berechnet man aus den XYZ-Werten auf folgende Weise:

$$L = 116 * \left[ f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] - 16$$

$$a = 500 * \left[ f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right]$$

$$b = 200 * \left[ f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right]$$

Allgemeine Formel zur Berechnung der CIE Lab Werte aus XYZ-Werten.

Dabei stellen  $X_n$ ,  $Y_n$  und  $Z_n$  die Werte des Bezugsweißes dar. Lab-Werte sind also immer auf das Papierweiß oder das hellste Weiß eines Monitors bezogen. Die einzusetzenden Funktionen sind je nach Größe der X-, Y- oder Z-Werte unterschiedlich.

Für große Werte von X, Y oder Z sind folgende Funktionen einzusetzen:

$$f\left(\frac{X}{X_n}\right) = \sqrt[3]{\frac{X}{X_n}} \text{ für } X/X_n > 0,008856$$

$$f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} \text{ für } Y/Y_n > 0,008856$$

$$f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_n}} \text{ für } Z/Z_n > 0,008856$$

Bedeutung der Platzhalter in der Formel für große XYZ-Werte

Bei kleinen Werten von X, Y oder Z sind wiederum folgende Funktionen einzusetzen:

Bedeutung der Platzhalter in der Formel für kleine XYZ-Werte

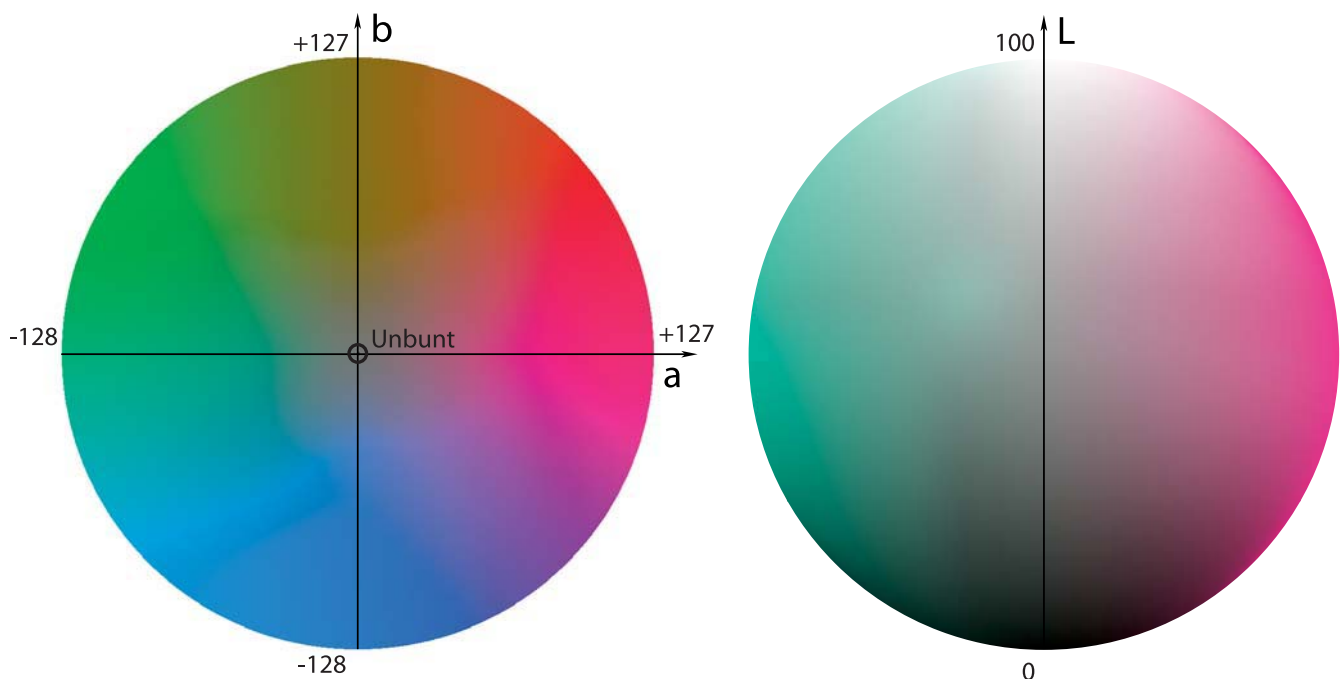
$$f\left(\frac{X}{X_n}\right) = 7,7867 * \frac{X}{X_n} + \frac{16}{116} \quad \text{für } X/X_n \leq 0,008856$$

$$f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = 7,7867 * \frac{Y}{Y_n} + \frac{16}{116} \quad \text{für } Y/Y_n \leq 0,008856$$

$$f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = 7,7867 * \frac{Z}{Z_n} + \frac{16}{116} \quad \text{für } Z/Z_n \leq 0,008856$$

Auf diese Weise gelangte man zum so genannten gleichabständigen *Lab-Farbmodell*, das den oben genannten Nachteil der unregelmäßigen Farbabstände nicht mehr aufweist.

Das gleichabständige *Lab-Farbmodell* hat die Form einer Kugel. L beschreibt die Helligkeit (Lightness), hierbei entspricht einem Wert von 0 Schwarz und einem Wert von 100 Weiß. Erstmals gilt hier auch, dass ein vom Menschen empfundenes mittleres Grau tatsächlich bei einem L-Wert von 50 liegt, also genau in der Mitte von Schwarz und Weiß.



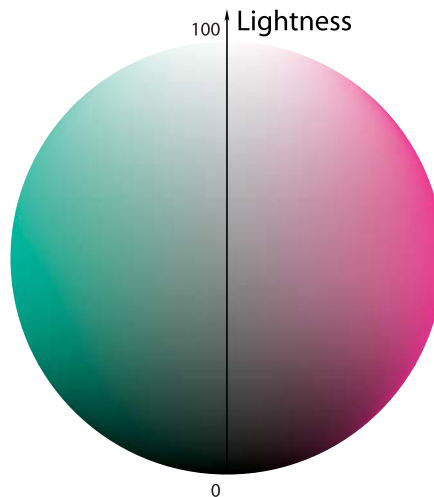
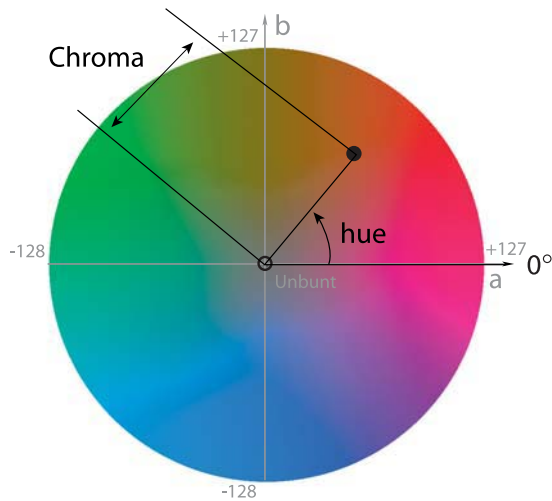
Das Lab-Farbmodell ist eine Kugel. Von unten nach oben ändert sich die Helligkeit, a und b beschreiben die Farbigkeit.

Die beiden anderen Koordinaten, wieder abstrakt nur einfach mit a und b bezeichnet, beruhen auf der Wahrnehmung von Gegenkontrasten.

Die a-Achse bezeichnet den Gegenkontrast zwischen Rot (+) und Grün (-). Versuche haben hierbei ergeben, dass eine Farbe nicht gleichzeitig Rot und Grün sein kann.

Die b-Achse bezeichnet den Gegenkontrast zwischen Gelb (+) und Blau (-). Auch hier haben Versuche ergeben, dass eine Farbe nicht gleichzeitig Gelb und Blau sein kann.

Die Werte von a und b gehen, dem Computerzeitalter angepasst, von -128 bis +127. Die unbunten Farben liegen in der Mitte des Kreises, haben also einen Wert von  $a=b=0$ .



LCh beschreibt Farben intuitiv mit den Komponenten Helligkeit (Lightness), Farbart (hue) und Buntheit (Chroma).

## Das wahrnehmungsangepasste L\*C\*h-Farbmodell

Als Abwandlung des Lab-Farbmodells trifft man häufig auf das LCh-Farbmodell. Es nutzt eine eher dem menschlichen Farbempfinden angepasste Art, Farben zu beschreiben.

Die Helligkeit L (Lightness) wird hierbei unverändert vom Lab-Modell übernommen.

Wie beim HSB-Farbmodell legt man auch hier die Farbe Rot, in diesem Fall die positive a-Achse, als Bezug fest. Man misst den Winkel h (hue) einer Farbe zur positiven a-Achse und beschreibt damit die Farbart.

Als drittes Merkmal misst man den Abstand der Farbe zur unbunten Farbe in der Mitte des Kreises und bezeichnet diesen Abstand als Chroma (C). Mit dem Chroma wird die Buntheit einer Farbe beschrieben. Die Werte für das Chroma gehen von 0 (unbunt) bis 128 (maximale Buntheit).

Mathematisch wird die Umrechnung von Lab zu LCh mit folgenden Formeln beschrieben:

Der Weg von den  
Lab-Koordinaten zu den  
LCh-Koordinaten ...

$$\begin{aligned} L &= L \\ C &= \sqrt{a^2 + b^2} \\ h &= \arctan\left(\frac{b}{a}\right) \end{aligned}$$

Für den umgekehrten Fall, die Berechnung von LCh nach Lab, gilt:

... und von LCh wieder  
zurück zu Lab.

$$\begin{aligned} L &= L \\ a &= C * \cos(h) \\ b &= C * \sin(h) \end{aligned}$$

Durch die Kugelform von Lab bzw. LCh ergibt sich, dass sowohl Schwarz als auch Weiß keine Buntheit haben können, da eine Kugel, von der Seite betrachtet, an den Polen keine seitliche Ausdehnung hat. Die Unbuntheit von Schwarz und Weiß entspricht auch den physikalischen Gegebenheiten.

Im Gegensatz dazu enthält das HSB-Farbmodell hier einen Fehler durch seine tonnenförmige Ausdehnung. Es ist beim HSB-Farbmodell möglich, bei einer Helligkeit von 100% eine Sättigung von 100% anzugeben, was physikalisch unsinnig ist.

## Der Farbabstand $\Delta E$

Das Wichtigste an Lab bzw. LCh ist jedoch, dass erreicht wurde, dass der Abstand zweier beliebiger Farben in diesem Farbraum ein direktes Maß dafür ist, wie verwandt oder verschieden diese Farben zueinander sind.

Diese Maßzahl heißt *Farbabstand Delta E* ( $\Delta E$ ) und berechnet sich in ihrer 1976 ursprünglich entwickelten Form nach dieser Formel:

Definition des Farb-  
abstandes Delta E ...

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

Sind zwei Farben durch ihre Lab-Werte gegeben, hat Farbe 1 die Lab-Werte  $L_1$ ,  $a_1$  und  $b_1$  und Farbe 2 die Lab-Werte  $L_2$ ,  $a_2$  und  $b_2$ , so setzt man in die Formel ein:

$$\Delta E = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2}$$

... und Anwendung, indem die Werte zweier Farben eingesetzt werden.

Der  $\Delta E$ -Wert, der sich hieraus ergibt, hat folgende Aussagekraft:

- Ein  $\Delta E$  von 1 ist der kleinste vom Menschen wahrnehmbare Farbunterschied. Ist  $\Delta E$  zwischen zwei Farben kleiner als 1, so werden diese Farben als gleich wahrgenommen, auch wenn ein Messgerät sie als unterschiedlich erkennt. Ein  $\Delta E$  von 1 kann jedoch nur von einem geübten Fachmann erkannt werden.
- Demgegenüber liegt das von Laien empfundene  $\Delta E$  bei ungefähr 2,5. Für ihn sind Farben mit Werten unter 2,5 gleich.
- Ein  $\Delta E$  von 6 bis 7 gilt als tolerierbar. Vergleicht der Kunde einer Druckerei zum Beispiel ein Original mit einer Reproduktion und sind die Farbabweichungen unter  $\Delta E = 6$ , so wird er diese Farbabweichungen zwar erkennen, aber als tolerierbar akzeptieren.
- Bei einem  $\Delta E$  von über 10 sind die Abweichungen so groß, die Farben also so unterschiedlich, dass die Reproduktion nicht gelungen ist.

Das Lab-Farbmodell und der Farbabstand  $\Delta E$  geben dem Anwender somit ein wichtiges Werkzeug an die Hand, Farben miteinander zu vergleichen und zu beurteilen. Aus diesem Grund gilt das Lab-Farbmodell als das wichtigste Farbmodell im Bereich des Farbmanagements. Im Abschnitt über den fogra-Medienkeil als Werkzeug zur Qualitätskontrolle wird darauf weiter eingegangen.

## $\Delta E$ (CMC) und $\Delta E$ (CIE94)

Nichts ist perfekt, und das Gleiche gilt für CIELab und CIELCh. So stellte sich nach weiteren Experimenten im Laufe der Zeit heraus, dass der Mensch Farbabweichungen nicht unabhängig von der Farbe empfindet.

Sieht man sich die Formel für den Farbabstand näher an, so stellt man fest, dass die Änderung einer Farbe um einen Helligkeitswert eins oder einen a-Wert eins oder einen b-Wert eins ein  $\Delta E$  von eins erzeugt.

Auch für das LCh-Farbmodell existiert eine Formel zur Berechnung des Farbabstands  $\Delta E$ , die auf der nächsten Seite angegeben ist.



Bestimmung des  
Farbabstands  $\Delta E$  für  
LCh-Koordinaten

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta C)^2 + (\Delta H)^2}$$

$$\Delta L = L_1 - L_2$$

$$\Delta C = C_1 - C_2 = \sqrt{(a_1)^2 + (b_1)^2} - \sqrt{(a_2)^2 + (b_2)^2}$$

$$\Delta H = \sqrt{(\Delta a)^2 + (\Delta b)^2 - (\Delta C)^2}$$

Auch hier gilt, dass Helligkeits-, Buntheits- oder Farbtonänderung die gleiche Gewichtung haben.

In der Praxis stimmt der über diese Formeln berechnete Farbabstand  $\Delta E$  in etwa 25% aller Fälle überhaupt nicht mit der empfundenen Farbabweichung überein. Insbesondere gilt:

- Hue oder Farbtonänderungen werden sehr stark empfunden.
- Auf Farbveränderungen im Orangebereich reagiert das menschliche Auge wesentlich empfindlicher als im Grünbereich.
- Buntheits- oder Chromaänderungen werden bei nahezu unbunten Farben stärker empfunden als bei sehr bunten Farben.
- Auch Helligkeitsveränderungen werden, je nach Helligkeit der Farbe, unterschiedlich empfunden.

Aus diesem Grund entwickelte 1988 das Colour Measurement Committee of the Society of Dyers and Colourists in Großbritannien mit  $\Delta E$  (CMC) ein eigenes Bewertungssystem, das diese Umstände berücksichtigt. Es wird hauptsächlich im Bereich der Textilbeurteilung eingesetzt.

Das CMC-System geht sogar noch einen Schritt weiter als das klassische  $\Delta E$ (Lab) und erlaubt es, über einen Toleranzfaktor, den so genannten *Comercial Factor*, bestimmte Aufgabenstellungen zu bewältigen:

- Ein Comercial Factor von eins beschreibt wahrnehmbare Farbunterschiede. In der Formel sind dann l und c gleich eins.
- Ein Comercial Factor von zwei beschreibt (für die Textilindustrie) akzeptable Farbunterschiede. In der Formel ist dann l zwei und c eins.

Für diejenigen unter Ihnen, die sich für die Berechnungsformeln von  $\Delta E$ (CMC) interessieren, seien diese hier genannt, die heute gängigen Messgeräte sind jedoch in der Lage, die so errechneten Werte direkt anzuzeigen:



$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{l * S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{c * S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{S_H}\right)^2}$$

$$S_L = \begin{cases} 0,511 & \text{für } L_1 < 16 \\ \frac{0,040975 * L_1}{1 + 0,01765 * L_1} & \text{für } L_1 \geq 16 \end{cases}$$

$$S_C = \frac{0,0638 * C_1}{1 + 0,0131 * C_1} + 0,638$$

$$S_H = S_C * (F * T + 1 - F)$$

$$T = \begin{cases} 0,56 + |0,2 * \cos(H_1 + 168)| & \text{für } 164 \leq H \leq 345 \\ 0,36 + |0,4 * \cos(H_1 + 35)| & \text{sonst} \end{cases}$$

$$F = \sqrt{\frac{C_1^4}{C_1^4 + 1900}}$$

Die Berechnung des Farbabstands im CMC-System ist bereits so komplex, dass man sie besser dem Computer überlässt.

Mit den mit dem Index eins versehenen Größen ist jeweils die Referenz gemeint.

Die CIE selbst stellte 1994 mit  $\Delta E(\text{CIE94})$  ein weiteres Bewertungssystem vor, das die vorher genannten Umstände berücksichtigt. Dieses wiederum wird häufig in der Farb- bzw. Lackindustrie eingesetzt. Auch hierfür seien die Berechnungsformeln genannt:

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{l * S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{c * S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{S_H}\right)^2}$$

$$S_L = 1$$

$$S_C = 1 + 0,045 * C_1$$

$$S_H = 1 + 0,015 * C_1$$

Die Formel zur Berechnung des Farbabstands im CIE94-System sieht zwar einfacher aus als die des CMC-Systems, ist aber trotzdem nicht einfach zu berechnen.

Abschließend kann man sagen, dass sowohl bei  $\Delta E(\text{CMC})$  wie auch bei  $\Delta E(\text{CIE94})$  zwischen berechneter Farbabweichung und vom Menschen empfundener Farbabweichung eine Deckung von etwa 95% besteht.

Noch weiter verfeinert wurde die Berechnung eines Farbabstands mittlerweile durch  $\Delta E(\text{CIE2000})$ . Die Formel dieses Farbabstandsystems ist jedoch so komplex, dass sie hier nicht aufgeführt wird. Zu finden ist sie zum Beispiel auf der Internetseite von Bruce Justin Lindbloom ([www.brucelindbloom.com](http://www.brucelindbloom.com)).

## Metamerie

Unter Metamerie versteht man, dass zwei Farben unter einem bestimmten Licht gleich, bei einer anderen Beleuchtung jedoch unterschiedlich aussehen.

Für zwei metamere Farben werden also bei einer Lichtart A die gleichen XYZ-Werte gemessen, bei Lichtart B jedoch unterschiedliche.

Mit einem Dreibereichsmessgerät (Colorimeter) kann deshalb keine Metamerie nachgewiesen werden, da seine Beleuchtung normalerweise nicht ausgewechselt werden kann. Man benötigt deshalb ein Spektralphotometer.

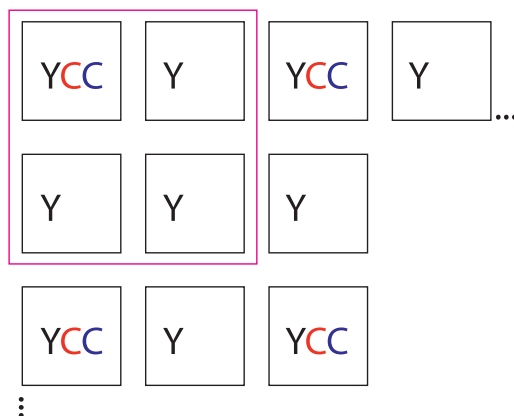
## Das YCC-Farbmodell der Photo-CD

Das YCC-Farbmodell wurde von Kodak zur Verwendung bei der Photo-CD entwickelt. Anhand dieses Farbmodells kann auch veranschaulicht werden, wie viele Videokodierverfahren arbeiten.

Beim Yxy-Farbmodell wurde bereits die Aufspaltung der Farbbeschreibung in einen Luminanzanteil Y und einen Chrominanzanteil, hier CC, beschrieben. Der Chrominanzanteil des YCC-Farbmodells spaltet sich auf in einen roten Chroma-Anteil ( $C_r$ ) und einen blauen Chroma-Anteil ( $C_b$ ). Bezogen auf diesen Umstand ist eine Ähnlichkeit mit dem Gegenkontrastmodell von Lab vorhanden.

Um auf einer Photo-CD möglichst viele Bilder in einer ausreichenden Qualität abspeichern zu können, müssen die ursprünglich vorhandenen Bildinformationen reduziert werden. Auch für den Videobereich galt in der Vergangenheit, dass sich die ursprünglich vorhandene Datenmenge auf Grund ihrer Größe weder verarbeiten noch übertragen ließ.

Das Photo-CD-Verfahren reduziert die Datenmenge, indem sie die Buntheitsinformation reduziert. Dieses Verfahren wird in ähnlicher Weise auch im Videobereich angewendet.



Aus den Ergebnissen verschiedener Versuche weiß man, dass die Luminanzinformation für die menschliche Farbwahrnehmung wichtiger ist als die Chrominanzinformation. Deshalb speichert man nur die Luminanzinformation für jeden einzelnen Bildpunkt ab, reduziert jedoch das Speichern der Chrominanzinformation auf jeden zweiten Bildpunkt. Zusätzlich speichert man nur für jede zweite Bildzeile die Chrominanzinformation.

Betrachtet man nun vier benachbarte Bildpunkte, so erhält man vier Luminanzinformationen, aber nur eine Chrominanzinformation. Ist jede Farbkomponente ursprünglich mit 8 Bit kodiert, hatte jeder Bildpunkt also eine Informationsmenge von 24 Bit, so bleiben nach der Informationsreduzierung im Durchschnitt noch 12 Bit pro Bildpunkt an Information übrig. Somit hat man die Datenmenge auf 50% reduziert.

Dieses Verfahren wird auch als *Chromasubsampling* bezeichnet. Da vier Luminanzinformationen sowie eine rote und eine blaue Chrominanzinformation vorhanden sind, wird in diesem Fall von einem 4:1:1-Chromasubsampling gesprochen. Bei der Wiedergabe des Bildes müssen die fehlenden Informationen von der Software aus benachbarten Bildpunkten berechnet (interpoliert) werden.

## Übung:

# Geräteunabhängige Farbmodelle

In Photoshop kann das Arbeiten in geräteunabhängigen Farbmodellen leider nur bei Helligkeitskorrekturen in Lab intuitiv nachvollzogen werden.

### 1. Helligkeitstest:

Auf der DVD befindet sich eine Datei HELLIGKEITSTEST.TIF. Diese soll in Photoshop geöffnet werden. Auf der linken Seite befindet sich eine fast weiße Fläche, auf der rechten Seite eine fast schwarze Fläche.

Am besten betrachten Sie das Bild, indem Sie alle störenden Umgebungseinflüsse ausblenden. Sie schalten dazu Photoshop in den Vollbildmodus, indem Sie zweimal hintereinander die Taste f betätigen (wenn Sie ein weiteres Mal die Taste f betätigen, kehren Sie in den Standardmodus zurück).

Weiterhin blenden Sie die Paletten aus, indem Sie die BEFEHL+TABULATOR-TASTE (STRG+TABULATOR) drücken (die gleiche Tastenkombination blendet die Paletten wieder ein).

Gesucht ist das graue Feld, das von der Helligkeit genau in der Mitte zwischen Hellgrau und Dunkelgrau liegt. Ist es das obere Feld oder das untere?

## 2. Die bessere Helligkeitskorrektur:

Dazu öffnen Sie in Photoshop die Dateien ALTAR\_1.TIF und ALTAR\_2.TIF und legen diese nebeneinander. ALTAR\_2.TIF wird über den Menüpunkt BILDMODUS>LAB in ein Lab-Bild umgewandelt.

Beide Bilder werden anschließend über den Menüpunkt BILD>EINSTELLEN>TONWERTKORREKTUR verändert, indem Sie unter dem Punkt TONWERTSPREIZUNG in die Zahlenfelder die Werte 0 (Links), 0,65 (Mitte) und 200 (Rechts) eingeben.

Die Bilder sehen jetzt zwar nicht mehr gut aus, verdeutlichen soll diese Helligkeitskorrektur lediglich, dass bei der RGB-Korrektur (ALTAR\_1.TIF) die Farben unnatürlich bunt werden, während sich bei der Lab-Korrektur tatsächlich nur der Kontrast verändert.

## 3. Das bessere Graustufenbild:

Dazu öffnen Sie wieder die beiden Altarbilder und wandeln ALTAR\_2.TIF in den Lab-Modus um. ALTAR\_1.TIF (RGB) wird anschließend über den Befehl BILD>EINSTELLEN>SÄTTIGUNG VERRINGERN entfärbt.

Bei ALTAR\_2.TIF wird zunächst die VORDERGRUNDFARBE auf R=G=B=127 eingestellt. Dann wählen Sie in der KANÄLEPALETTE zuerst den A-KANAL aus, dann das gesamte Bild (AUSWAHL>ALLES AUSWÄHLEN) und füllen den A-KANAL mit der Vordergrundfarbe (BEARBEITEN>FLÄCHE FÜLLEN). Dasselbe wiederholen Sie anschließend für den B-KANAL.

Hiermit wurde die Chrominanzinformation (Buntheitsinformation) aus dem Bild entfernt, übrig bleibt lediglich die Luminanz-(Helligkeits-)Information.

Qualitativ überzeugt das über Lab in Graustufen umgewandelte Bild mehr.