
Physikalische Farbtheorie und moderne Farbmeterik

Obwohl nicht nur die Farbfotografie sondern auch unser ganzes Leben von Farben bestimmt und davon abhängig ist und wichtige Entscheidungen (nicht zuletzt auch Kaufentscheide) durch Farben beeinflusst werden, bleibt Farbe eine Sache der subjektiven Wahrnehmung. Die meisten Menschen haben Mühe, den Begriff «Farbe» einzuordnen. In der Umgangssprache kann «Farbe» ein Farbstoff sein, genau so wie ein optisches Phänomen oder ein Sinneseindruck. Ganz besonders schwierig wird es in der Kommunikation; mehrere Leute, die zum Beispiel die Farbe einer roten Frucht definieren sollen, können sich nicht einigen. Für den einen ist die Frucht einfach «rot», für den anderen «feuerrot», «karminrot» oder gar «scharlachrot».

Liest man die «Farbenlehre» von Johann Wolfgang Goethe, wird man kaum klüger. Man spürt indessen, dass selbst die Sprachgewalt dieses grossen Dichters bestenfalls ausreicht, eine verstärkte Vorstellung über Farben zu vermitteln.

Maler, vor allem die grossen Lehrer unter ihnen, hatten ähnliche Schwierigkeiten. Sie stellten Farbtheorien auf, nach denen Generationen von Gestaltern ausgebildet wurden, oft nicht wissend, dass der grosse Lehrer einst seine Theorie mit den damals üblichen Studienfarben erläutert hat, Malfarben, die es heute nicht mehr gibt und diese Theorien somit nicht ohne weiteres auf moderne Farbstoffmoleküle und andere Farbräume übertragbar sind.

Grundlagen zum Begriff Farbe

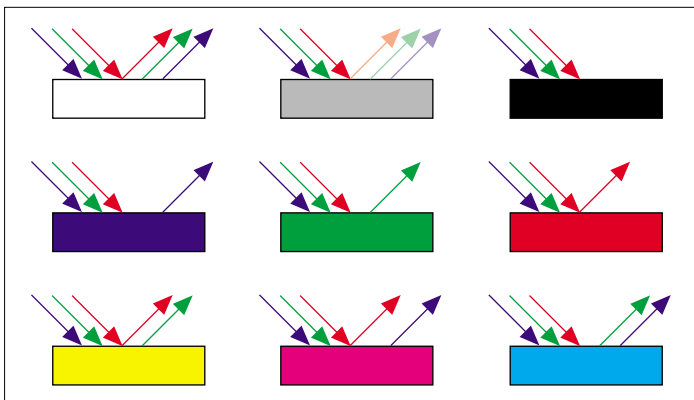
Die hier erläuterten Grundlagen zum allgemeinen Begriff der Farbe ergänzen die Ausführungen zu den Grundlagen der physikalischen Optik in Band 1 der Handbuchreihe Seite 116 ff und setzen diese zum grossen Teil voraus.

Die Schwierigkeiten, das Wesen der Farbe zu verstehen, beruhen in erster Linie darauf, dass Farbe keine physikalische Grösse (wie beispielsweise die Länge oder die Masse) ist. Sie ist ein *Sinneseindruck* und ähnelt in ihrer Art daher eher dem Geschmack oder dem Geruch. Damit eine Farbe wahrgenommen werden kann, ist *das Vorhandensein einer sichtbaren Strahlung*, das heisst Licht, zwingend notwendig. Ein nicht selbstleuchtender Gegenstand ist nur sichtbar und erscheint nur dann farbig, wenn er mit sichtbarem Licht angestrahlt wird. Seine farbliche Erscheinung – man spricht von der *Körperfarbe* – ist abhängig von der Wechselwirkung zwischen der Art der vorhandenen Strahlung sowie der Reflexion und Absorption. So erscheint uns ein Objekt dann gelb, wenn es mit weis-

sem Licht (in folgender Darstellung mit den Spektralanteilen Blau, Grün und Rot dargestellt) angestrahlt wird und der Gegenstand infolge seiner molekularen Oberflächenbeschaffenheit von diesem Licht nur noch den Grün- und Rotanteil reflektiert, den Blauanteil dagegen absorbiert. Der Gegenstand erscheint uns aber auch dann gelb, wenn er eigentlich weiss ist, aber nur mit gelbem bzw. grünem und rotem Licht angestrahlt wird.

Doch selbst unter diesen Voraussetzungen ist streng genommen noch keine Farbe entstanden, sondern erst eine *sichtbare Strahlung*, die schliesslich eine *Farbwahrnehmung* auslösen kann. Das Auge selbst ist nur der Strahlungsempfänger, gewissermassen das Messgerät. Die *Farbempfindung* kommt letztlich im Gehirn zustande.

Dabei ist die Feststellung wichtig, dass unterschiedliche Strahlungen vom Auge nicht zwangsläufig verschieden wahrgenommen werden. Einstrahlungen von monochromatischem Licht mit Wellenlängen über 665 nm können vom Auge nicht mehr unterschieden werden, es erkennt dabei immer dasselbe Rot. Die Zapfchen sind auch nicht in der Lage,



Entstehung von Körperfarben durch Reflexion und Absorption

zu unterscheiden, ob das Licht *monochromatisch* oder *polychromatisch* (aus mehreren Wellenlängen zusammengesetzt) ist. Das Auge beurteilt beispielsweise ein monochromatisches Licht der Wellenlänge 579 nm genau gleich, wie Licht, das im gleichen Verhältnis aus den beiden Wellenlängen 560 und 620 nm besteht.

Weiter ist es für das Auge gleichgültig, ob der Eindruck Weiss durch spektrale Reize des gesamten Spektrums von 380 bis 760 nm erfolgt oder beispielsweise bloss durch zwei Spektrallinien mit beispielsweise 600 und 490 nm (im Intensitätsverhältnis 1:2) oder durch die beiden Linien 493 und 620 nm (im Intensitätsverhältnis 1:1).

Die eingangs erwähnten Schwierigkeiten mit dem Wesen der Farbe erscheinen somit verständlich, sind doch zur *Farbwahrnehmung* mehrere Faktoren gleichzeitig verantwortlich:

- die Art der Lichtquelle und die Zusammensetzung der Strahlung
- die molekulare Oberflächenbeschaffenheit eines Objekts
- das Auge als Strahlungsempfänger
- das Gehirn als Farbwahrnehmungsberechner

Definitionsgemäss bezeichnet man die von einem Objekt reflektierte, sichtbare Strahlung, die eine Farbwahrnehmung auszulösen vermag, als *Farbreiz*. Das Resultat eines solchen Farbreizes im menschlichen Auge (das für die Weiterleitung in das Sehzentrum des Gehirns erzeugte Farbsignal) wird als *Farbvalenz* bezeichnet und beim Sinneseindruck im Gehirn sprechen wir von *Farbempfindung*.

Der Farbreiz ist mit *physikalischen Theorien* erklärbar (was unter anderem in dieser Handbuchreihe versucht wird), die Farbvalenz gehört ins Gebiet der *Physiologie* und die Farbempfindung versucht die *Psychologie* zu umschreiben. Das Sehen und insbesondere das Farbsehen ist ein sehr komplexer physikalischer, physiologischer und psychologischer Vorgang, der noch lange nicht in allen Einzelheiten geklärt ist.

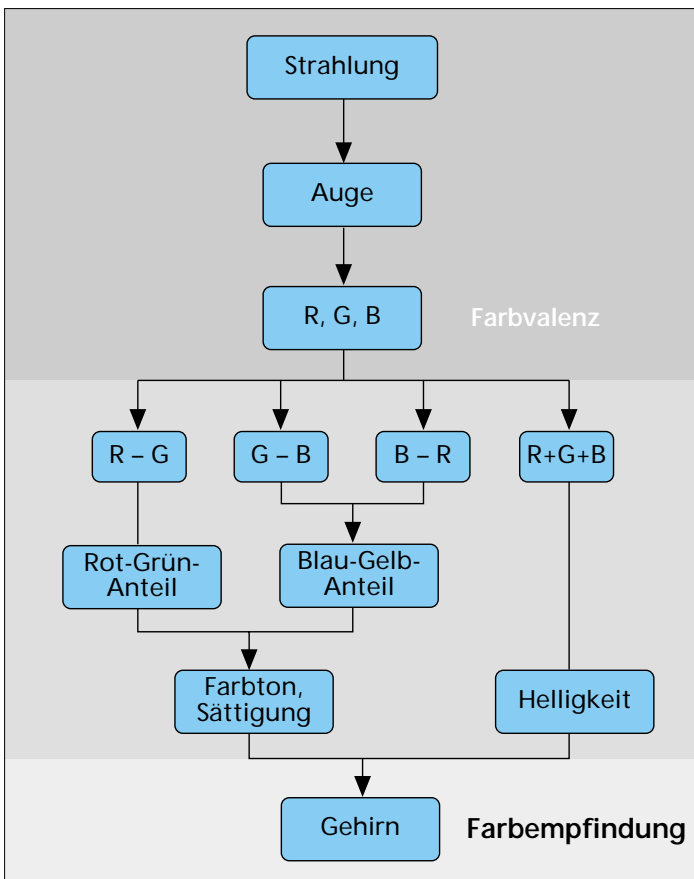
Von der Farbvalenz zur Farbempfindung

Für oberflächliche theoretische Überlegungen zum Farbsehen genügt die *Theorie der Trichromazität* des Auges wie sie um 1809 *Thomas Young* aufgestellt hat. Allerdings war er seiner Theorie selbst nicht ganz sicher, zuerst schlug er nämlich vor, die drei verschiedenen Grundfarben seien Rot, Gelb und Blau, später korrigierte er seine Aussage und sprach von Rot, Grün und Blau. Allgemein bewiesen, dass alle Farben bloss durch diese letztgenannten drei Grundfarben synthetisiert werden können, hat dies dann *James Clerk Maxwell* 1861 mit seiner spektakulären *Dreifarbenprojektion* (siehe Seite 11).

Weil dies physikalisch tatsächlich geht – alle unsere farbigen Fotografien und Druckerzeugnisse, und selbst das Fernsehen sind der Beweis dafür – hatte der deutsche Physiologe *Hermann von Helmholtz* in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts den Mut zu postulieren, dass es im Auge drei getrennte Rezeptoren mit unterschiedlichen Pigmenten gebe (die Zäpfchen), welche jeweils

auf einen Spektraldrittel Blau, Grün und Rot empfindlich seien. Weil das alles so schön logisch und erklärbar war, schien die Theorie der Trichromazität des Auges als gesichert. In endgültiger Gewissheit wiegte man sich in den sechziger Jahren unseres Jahrhunderts, als es dem dafür mit dem Nobelpreis ausgezeichneten Biochemiker *George Wald* gelang, das tatsächliche Vorhandensein dreier verschiedener Zapfenarten im Auge mit den Empfindlichkeitsmaxima Blau, Grün und Rot nachzuweisen. Ebenfalls nachgewiesen wurde die Querverbindung

zwischen unterschiedlich farbempfindlichen *Zäpfchen* und *Bipolarzellen* durch die *Horizontalzellen* sowie die Verbindung der bipolaren Zellen mit den *Ganglion-Zellen* durch die *Amacrin-Zellen*, was schliesslich zur heute noch allgemein gültigen Theorie der Verknüpfung der ursprünglichen Rezeptoren-Signale Blau, Grün und Rot führte (siehe Handbuch Band 1 Seite 126 ff). Das Signal, das nach der Verarbeitung (die noch im Auge geschieht) schliesslich ans Gehirn weitergeleitet wird und dort die *Farbempfindung* auslöst, trägt durch die er-



Verknüpfungen der Farbvalenz des Auges mittels Bildung von Farbdifferenz-Signalen

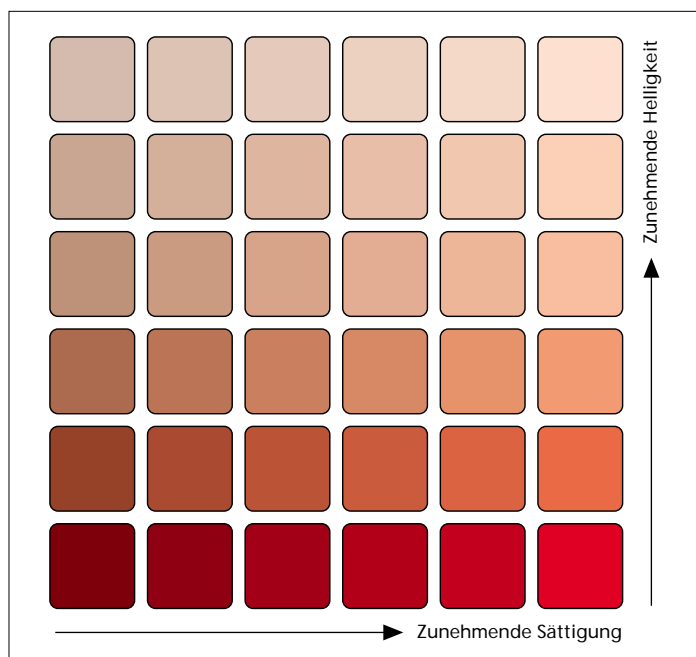
wähnte Verarbeitung mittels Farbdifferenzsignalen neben der Information über die eigentliche farbliche Zusammensetzung (Farbton) auch eine Information über die *Farbsättigung* (Reinheit der Farbe) und die *Helligkeit*.

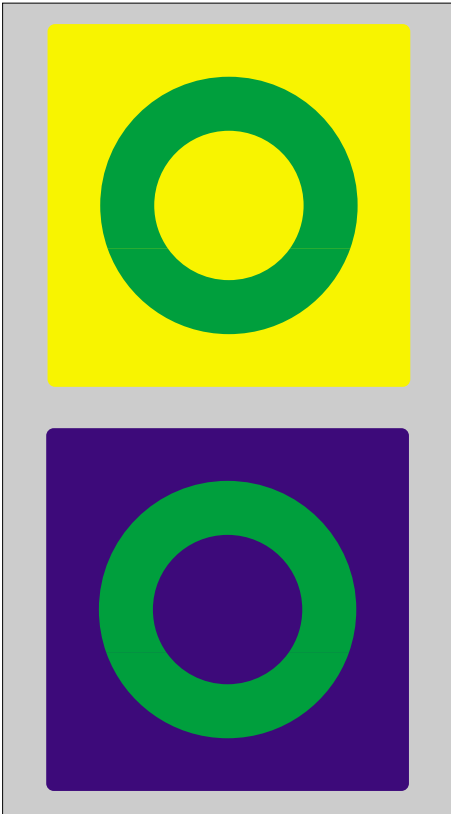
Wesentlich ist dabei die Vermutung, dass die Information von Farbton und Sättigung zusammengefasst ist und die Helligkeit mit einer mindestens gleich grossen Informationsmenge bedacht ist. Für diese Vermutung spricht die Tatsache, nach der das menschliche Farbempfinden auf Schwankungen des *Farbtons* bedeutend weniger sensibel reagiert als auf Änderungen der Helligkeit. Anders gesagt, vergleichsweise grosse Differenzen im Farbton kann der Mensch nur schwer erkennen, dagegen erkennt er bereits sehr geringe Abweichungen in der Helligkeit eines Farbtones.

Nicht berücksichtigt ist bei diesen Überlegungen die Einwirkung der Stäbchen im Auge, die für das Nachtsehen zuständig sind und die eine spektrale Maximalempfindlichkeit im Bereich von 507 nm (blaugrün) aufweisen. Diese spielen indessen bei den Überlegungen zum Farbsehen kaum eine Rolle, weil Farbbeurteilungen einerseits nur bei gutem Licht und andererseits nur mit dem zentralen Blickwinkel, das heisst mit den in der Fovea centralis der Netzhaut ausschliesslich vorhandenen Zäpfchen vorgenommen werden.

Weiter ins Wanken kam die doch so schöne Theorie, als es in neuester Zeit möglich wurde, die Gene der Pigmente auf dem X-Chromosom in den Zäpfchen zu untersuchen und zu vergleichen (im wesentlichen durch *Jerry Nathans*). Die hier liegenden Gene sind verantwortlich

Gleicher Farbton
bei unterschiedlicher
Sättigung und
Helligkeit





Unterschiedliche Farbempfindung bei gleicher Farbvalenz. Die Farbempfindung ist nicht nur von der Farbvalenz abhängig, sondern auch vom Umfeld. Die Ringe in unserer Abbildung besitzen die genau gleiche Farbvalenz. Die im Gehirn ausgelöste Farbempfindung ist jedoch auch abhängig von der Farbe des Umfeldes.

für die Farbempfindlichkeit. Genau so, wie heute niemand mehr die Farbempfindlichkeit der Zäpfchen mittels Absorption und Reflexion der Strahlung an den Farben der Pigmente erklärt (man redet vielmehr von Pigmenten für lang-, mittel- und kurzwelliges Licht), spricht man von lang-, mittel- und kurzwelligen Genen, wobei damit eigentlich die genetische Information gemeint ist, um ein Pigment herzustellen, das am besten das

Licht langer, mittlerer oder kurzer Wellenlänge empfangen kann.

Beim Isolieren der Gene war die Überraschung gross. So fand man nicht ein einziges mittelwelliges Gen, sondern mehrere (allerdings unterschiedlich von Mensch zu Mensch). Hingegen fand man bei einigen Menschen nur eine Sorte langwelliger Gene. Bei vereinzelt anderen Menschen dagegen wurden zwei langwellige Gene gefunden (wodurch die Untersuchungsergebnisse von Augenärzten, die bei einzelnen Patienten bereits zuvor zwei verschiedene Rot-Rezeptoren vermuteten, bestätigt wurden). Mit zunehmender Präzision der Gensondierung konnte man gar Frauen mit *vier verschiedenen, langwelligen Genen* finden, die in der Tat bei Farbvergleichen im Rotbereich deutlich anders reagierten wie Menschen mit nur einem langwelligen Gen.

Der Schluss liegt nahe, es könnte Menschen geben (insbesondere Frauen, denn diese haben bekanntlich zwei X-Chromosomen), die bereits von der Netzhaut her, das heisst, in ihrer Farbvalenz, *tetrachromatisch* sind, die Farben also aus vier Komponenten zusammensetzen. Männer dagegen dürften infolge ihrer genetischen Struktur dagegen meist nur drei verschiedenartige Rezeptoren im Auge haben.

Die Genforschung hat mit diesen neuen Erkenntnissen auch neue Erklärungen für Farbschwächen und Farbenblindheit gefunden. Es ist vorauszu-sehen, dass dieser Forschungszweig weitere Erkenntnisse ermöglichen wird und möglicherweise auch den Informationsfluss zwischen Netzhaut und Gehirn auf eine neue, bisher noch unbekannt Art beschreiben kann.

Das sichtbare Spektrum

Beim Eintritt in ein optisch dichteres Medium wird Licht infolge eines Geschwindigkeitsverlustes gebrochen. Da kurzwellige Strahlen dabei einer stärkeren Brechung unterworfen sind als langwellige, wird ein weisser Lichtstrahl dabei nicht nur *von seiner Richtung abgelenkt*, sondern auch noch in ein farbiges Regenbogenband, *das Spektrum*, aufgefächert. Besonders schön sieht man den Effekt dieser *Dispersion* beim Passieren eines Lichtstrahls durch ein Prisma. Das entstehende Spektrum zeigt ein kontinuierliches Farbband von Blau über Blaugrün, Grün, Gelb, Orange bis Rot.

Im wesentlichen können wir darin drei Hauptabschnitte erkennen, Blau (400 bis 500 nm), Grün (500 bis 600 nm) und Rot (600 bis 700 nm). Man nennt diese Abschnittsdrittel in Anlehnung an die Theorien von Young und Helmholtz *Spektralhauptfarben* oder *Primärfarben*.

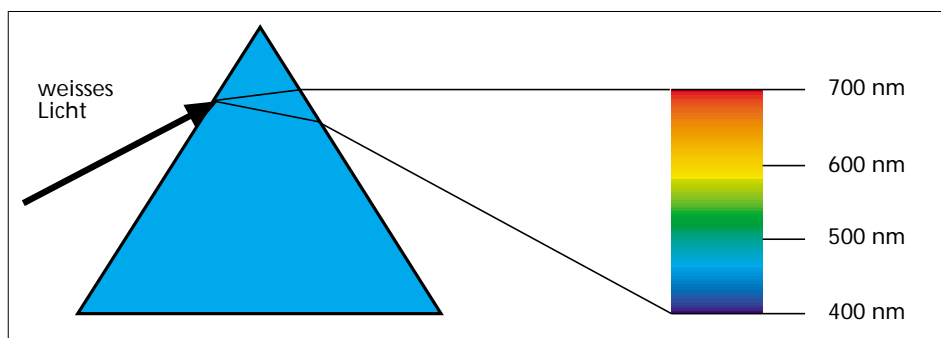
Treffen nur einzelne Wellenlängen oder Wellenlängengruppen unser Auge, sehen wir daher einzelne Farben. Die Summe aller Wellenlängen zwischen 600

und 700 nm beispielsweise erkennen wir als Rot, genau so übrigens, wie die alleinige Wellenlänge von ca. 650 nm. Unser Auge kann in den meisten Fällen nicht unterscheiden, ob der Farbreiz durch ein Wellenlängengemisch oder durch eine einzelne Spektrallinie der Strahlung ausgelöst wird.

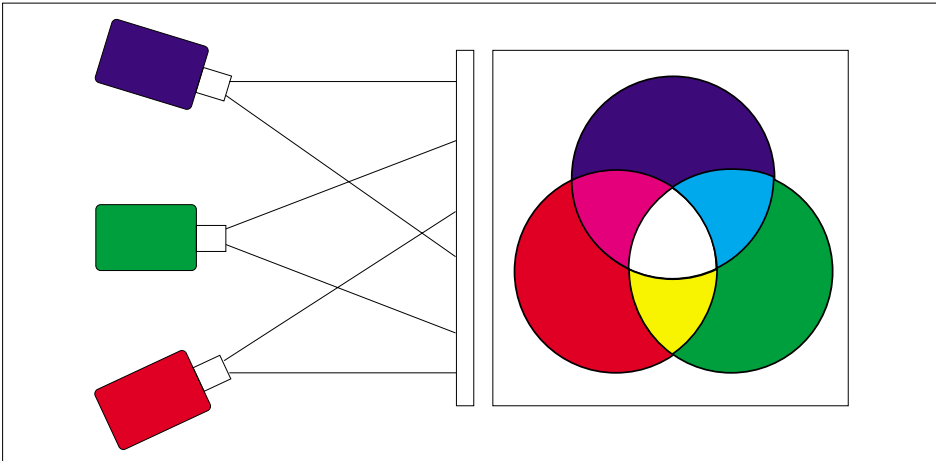
Die additive Farbmischung

Die Spektralhauptfarben sind durch eine Zerlegung des weissen (Sonnen-) Lichtes entstanden. Daraus ableitend können wir gut verstehen, dass auch umgekehrt aus den Hauptfarben durch einfache *Addition* wieder weisses Licht entstehen muss. Stellen wir uns dazu drei Projektoren vor. Im ersten Projektor wird Licht mit den Wellenlängen von 400 bis 500 nm (Blau) erzeugt, im zweiten ein solches mit Wellenlängen von 500 bis 600 nm (Grün) und im dritten schliesslich Licht mit Wellenlängen von 600 bis 700 nm (Rot).

Richtet man nun die drei Projektionsstrahlen übereinander gegen eine weisse Wand, so addieren sich die ent-



Analyse des sichtbaren Lichtes durch Dispersion



Prinzip der additiven Farbmischung.

Durch Addition von zwei additiven Grundfarben entstehen die helleren subtraktiven Grundfarben. Alle drei additiven Grundfarben übereinanderprojiziert ergeben Weiss.

sprechenden Wellenlängen zur Summe von 400 bis 700 nm, was unser Auge wieder als weisses Licht erkennt.

Durch Übereinanderprojektion der Hauptfarben Blau, Grün und Rot synthetisiert man weisses Licht. Weil dabei Lichtenergie zu Lichtenergie *addiert* wird, spricht man bei dieser Mischmethode von *additiver Farbmischung*. Aus dem gleichen Grund werden die Hauptfarben Blau, Grün und Rot als *additive Grundfarben* bezeichnet. Additive Grundfarben schreibt man üblicherweise in der Muttersprache; als Abkürzung genügt B, G, R, oder wie im amerikanischen üblich, RGB.

Werden nur jeweils zwei Grundfarben addiert, so ergeben sich daraus die helleren Mischfarben Gelb, Purpur und Blaugrün. Weil bei der additiven Farbmischung Lichtenergie zu Lichtenergie addiert wird, müssen die entstehenden Mischfarben *heller* sein. Die *Sättigung* ist zwangsläufig *kleiner* als diejenige der

Ausgangsfarben. Bei der additiven Farbmischung müssen daher die Grundfarben eine möglichst hohe Sättigung aufweisen, da diese durch die Farbmischung nicht mehr erhöht werden kann. Aus Gründen, wie sie anschliessend noch erläutert werden, nennt man die aus der Mischung zweier additiver Grundfarben entstehenden Misch- oder Sekundärfarben auch *subtraktive Grundfarben* und schreibt sie üblicherweise englisch: Yellow, Magenta und Cyan. Sinngemäss wird zur Abkürzung der Anfangsbuchstabe verwendet: Y,M,C oder im amerikanischen CMY.

Die additive Farbmischung ist *nur mit Licht möglich*. Durch verschieden starke Mischung der additiven Grundfarben kann jeder beliebige Zwischenton erzeugt werden. Strahlen bei der Addition von Grün und Rot zum Beispiel beide Projektoren gleich stark, entsteht ein reines Yellow. Ist aber der Grün-Projektor nur halb so stark wie der Rot-Projektor,

entsteht ein Gelb mit Tendenz nach Rot, also ein Orange. Ist das Intensitätsverhältnis umgekehrt, weist das entstehende Gelb eben eine Tendenz nach Grün auf, die Mischfarbe ist gelbgrün. Die additive Mischung ist ohne Unterschied für das menschliche Auge auch durch Addition einzelner Spektrallinien möglich.

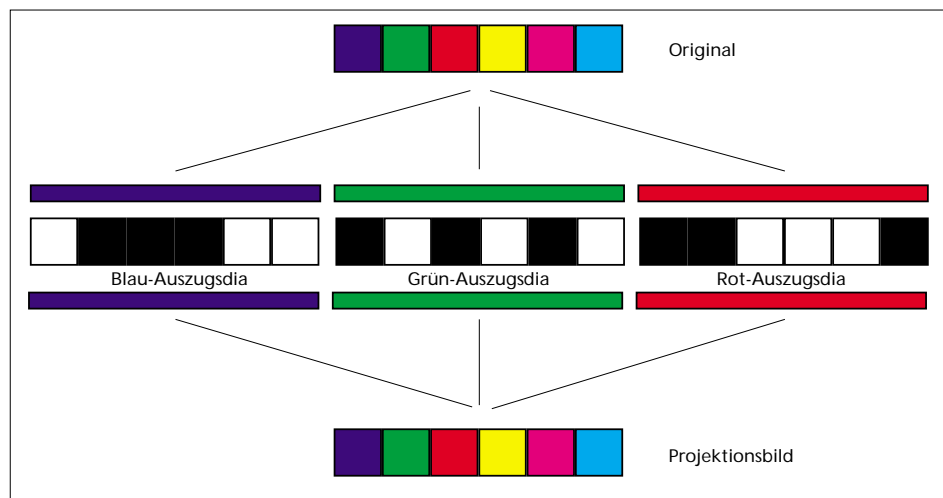
Rot + Grün = *Yellow*
(Weiss minus Blau)
Rot + Blau = *Magenta*
(Weiss minus Grün)
Grün + Blau = *Cyan* (Weiss minus Rot)

Mit Hilfe dieser additiven Farbmischung erstellte *Maxwell* 1861 die erste durch Projektion erzeugte Farbaufnahme (siehe auch Seite 11):

Von einem Original wurden nacheinander drei Schwarzweiss-Aufnahmen hergestellt. Bei jeder Aufnahme wurde ein strenges Selektionsfilter (Farbauszugsfilter) vorgeschaltet. Bei der ersten

Aufnahme verwendete Maxwell ein starkes Blau-Filter, das nur blauhaltige Strahlen passieren liess. Es entstand ein Negativ, das an jenen Stellen eine Schwärzung aufwies, an denen das Original Blau war oder Blau enthielt. Die zweite Aufnahme entstand durch ein Grün-Filter, das nur die grünhaltigen Strahlen passieren liess. Es entstand ein zweites Negativ, das nur an den grünen oder grünhaltigen Stellen eine Schwärzung zeigte. Und schliesslich machte Maxwell eine dritte Aufnahme durch ein Rot-Filter, welche ein Negativ entstehen liess, das nur an den roten und rothaltigen Stellen eine Schwärzung aufwies. Die drei Negative wurden umkopiert, es entstand ein *Blau-Auszugsdiapositiv*, das an jenen Stellen hell war, an denen das Original Blau enthielt, ein *Grün-Auszugsdiapositiv* (hell an den grünen Originalstellen) und ein *Rot-Auszugsdiapositiv* (hell an den roten Originalstellen).

Die drei schwarzweissen Auszugsdiapositive wurden in drei Projektoren ein-



Prinzip der additiven Dreifarbenprojektion (Maxwell 1861)

gelegt, vor deren Objektiven sich die jeweils bei der Aufnahme verwendeten Selektionsfilter befanden. Durch passergenaue Übereinanderprojektion entstand durch additive Farbmischung auf der Leinwand ein Projektionsbild in leuchtenden Farben.

Auch das *Drehen eines Farbkreisels*, der mit verschiedenfarbigen Sektoren beklebt ist, basiert auf der additiven Farbmischung, ebenso die Farbwirkung der *Autochrome-Stärkekörner* bei der Autochrome-Platte von Lumière und ihren Abwandlungen (siehe Seite 15 ff).

Alltäglich ist das Prinzip der additiven Farbmischung auch beim *Fernsehen* (oder dem farbigen Computer-Monitor). In den Grundzügen arbeitet der Farbbildschirm ähnlich wie ein Schwarzweiss-Fernseher, wo das Bild durch *Fluoreszenz* auf der Bildröhre mit einem *Elektronenstrahl* erzeugt wird. Im Zeilensprungverfahren tastet der Elektronenstrahl zunächst alle ungeraden und anschliessend alle geraden Bildzeilen innerhalb $\frac{1}{25}$ Sekunde ab.

Auf dem Bildschirm befindet sich ein *Fluoreszenzstoff*, welcher die unsichtbare Elektronenstrahlung in eine sichtbare Strahlung umwandelt.

Beim Farbfernsehen besteht das *Videosignal* aus einem *Helligkeits-* und einem *Farbsignal*. Zur Aufnahme ist eine Farbkamera notwendig, die durch drei additive Filter das Farbsignal aus dem dabei entstehenden Dreifarbenauszug gewinnt. Empfängerseitig wird das zusätzliche Farbsignal benutzt, um in der Farbbildröhre drei Elektronenstrahlen auszulösen, je einen für Blau, Grün und Rot. Durch eine *Lochmaske* (heute eher eine *Schlitzmaske* oder ein *Drahtsystem* beim *Trinitron-Prinzip*) kann jeder Strahl

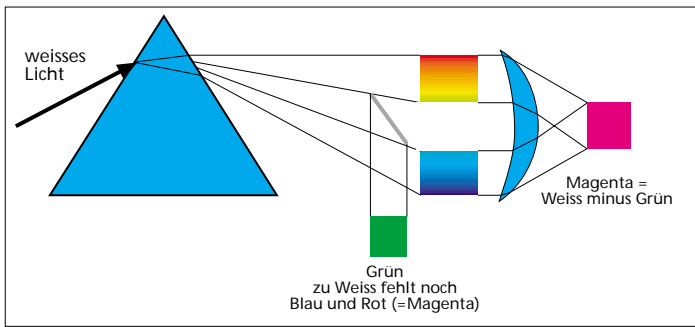
für jedes Pixel nur einen bestimmten, ihm jeweils zugeordneten Fluoreszenzpunkt auf der Fernsehröhre treffen und einen bestimmten Farbton auslösen. Das farbige Monitorbild setzt sich daher ebenfalls pointillistisch aus mehr oder weniger stark leuchtenden Fluoreszenzpunkten in den Farben Blau, Grün und Rot zusammen (siehe dazu auch Band 4).

Komplementärfarben

Aus der additiven Mischung zweier additiver Grundfarben entsteht eine subtraktive Grundfarbe. Die dritte, zur additiven Bildung von Weiss noch fehlende Farbe, nennt man *Ergänzungsfarbe* (zu Weiss) oder *Komplementärfarbe*. Blau ist daher komplementär zu Yellow, denn Yellow entsteht aus Grün und Rot, zu Weiss fehlt daher noch Blau.

Blau	↔	Yellow
Grün	↔	Magenta
Rot	↔	Cyan

Den Begriff Ergänzungsfarben oder Komplementärfarben versteht man am besten mit dem in der Abbildung auf folgender Seite dargestellten Versuch: Wir erzeugen mittels Brechung an einem Prisma ein sichtbares Spektrum mit den Spektraldritteln Blau, Grün und Rot. Mit einem kleinen Dreiecksprisma oder einem Miniaturspiegel blenden wir den Grünanteil (500 bis 600 nm) aus, so dass im Spektrum nur noch die Spektraldritteln Blau (400 bis 500 nm) und Rot (600 bis 700 nm) zurückbleiben, welche wir mittels einer Linse übereinanderprojizieren,



Definition
des Begriffs
Komplementärfarbe

so dass Magenta (Blau + Rot) entsteht. Grün und Magenta sind Farben, die sich gegenseitig additiv zu weiss ergänzen, es sind daher Ergänzungsfarben oder Komplementärfarben. Wenn wir Grün sehen, können wir uns auch fragen, was denn noch zu Weiss fehle. Es fehlt noch Blau und Rot, was ja nichts anderes als Magenta ist.

Die subtraktive Farbmischung

Legen wir ein Gelbfilter (Yellow) auf ein weisses Papier, erscheint uns das Papier gelb gefärbt. Wir haben mit dem Gelbfilter einen Teil des reflektierenden weissen Lichtes *subtrahiert*, nämlich den Blauanteil aus dem Spektrum. Zurückgeblieben ist der Grün- und der Rotanteil. Gelbes Licht setzt sich gemäss additiver Farbmischung aus grünem und rotem Licht zusammen.

Legen wir nun ein Purpurfilter (Magenta) darüber, so subtrahieren wir noch den Grünanteil. Zurück bleibt der Rotanteil, das ursprünglich weisse Papier sieht nun Rot aus. Mit den beiden Farben Yellow und Magenta haben wir Rot erzeugt. Legen wir über die beiden Filter noch ein Blaugrünfilter (Cyan), dann

subtrahieren wir auch noch das rote Licht wodurch uns die Stelle schwarz erscheint.

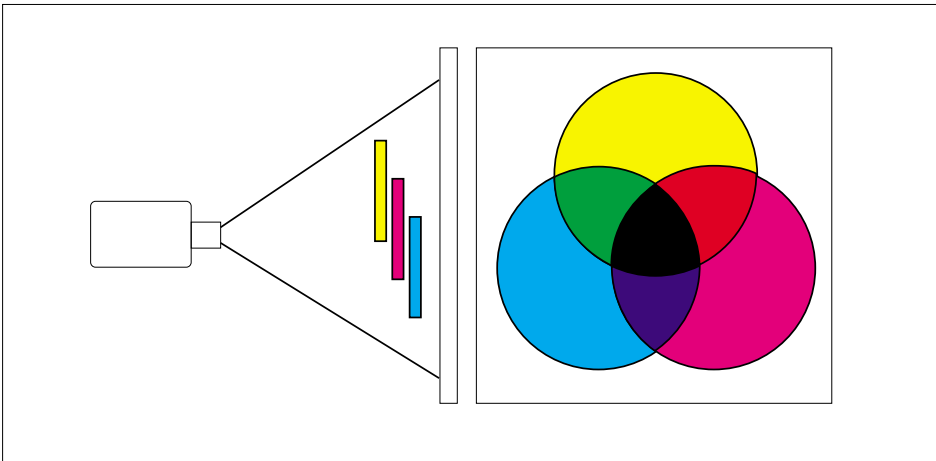
Denselben Versuch kann man auch machen, indem man die drei Filter vor das Objektiv eines einzelnen Projektors hält oder indem man weisses Papier mit Lasurfarben überpinselt.

Weil hier die Farbmischung mittels *Energiesubtraktion* vorgenommen wird, sind die entstehenden Farben dunkler. Die Sättigung der Mischfarben ist höher als diejenige der Ausgangsfarben. Die Grundfarben müssen daher eine möglichst *kleine Sättigung* aufweisen, da diese durch die subtraktive Mischung nicht weiter reduziert werden kann.

Man nennt diese Methode *subtraktive Farbmischung* und die verwendeten, ehemals bei der additiven Mischung erzeugten Farben Yellow, Magenta und Cyan, *subtraktive Grundfarben*.

Durch verschieden starke Mischung der subtraktiven Grundfarbe kann jeder Zwischenton erreicht werden. So ergibt zum Beispiel die subtraktive Mischung von 100% Yellow mit 50% Magenta ein Rot mit gelber Tendenz, ein Orange.

Alle im täglichen Leben vorgenommenen Farbmischungen, wie die Mischung von Malfarben oder farbigen Lösungen, das Zusammenkneten von



*Subtraktive Farbmischung.
Durch Subtraktion von zwei subtraktiven Grundfarben entstehen die dunkleren additiven Grundfarben. Alle drei subtraktiven Grundfarben übereinandergelegt ergeben Schwarz.*

farbigem Plastilin, das Hintereinanderschalten von farbigen Filtern usw. beruhen auf subtraktiver Farbmischung.

Jeder denkbare Farbton, inklusive Weiss, Schwarz und Grau, ist daher mit nur drei Grundfarben mischbar: mit Blau, Grün und Rot durch die additive Mischmethode oder mit Yellow, Magenta und Cyan durch die subtraktive Mischmethode.

Der Grund, weshalb irgend eine gewünschte Farbe nicht immer mit praktischen Malfarben aus nur drei subtraktiven Grundfarben zusammengemischt werden kann, liegt einerseits im ungenügenden Reinheitsgrad dieser Farbstoffe und in den diametralen Forderungen nach geringer Sättigung und gleichzeitig genügender Deckkraft der Grundfarben.

Bei der subtraktiven Mischung müssen die Grundfarben *überlappende Spektralbereiche* besitzen. Würde man beispielsweise ein Filter mit dem Durch-

lassbereich von 500 bis 550nm und ein zweites mit der Durchlässigkeit von 550 bis 600 nm übereinanderlegen, entstünde bei der subtraktiven Mischung Schwarz, weil kein gemeinsamer Durchlassbereich vorhanden ist.

Yellow + Magenta + Cyan	= Schwarz
Yellow + Magenta	= Rot
Yellow + Cyan	= Grün
Magenta + Cyan	= Blau

Farbfotografie

Die Kombination eines additiven Dreifarbenauszugs und einer subtraktiven Farbproduktion mit den jeweils komplementären Farben ist das Urprinzip aller modernen Farbfoto-Verfahren. Betrachten wir dies anhand der ersten Farbbildversuche aus dem letzten Jahr-

hundert (siehe auch Seite 13): Genau gleich wie in der additiven Dreifarbenfotografie nach Maxwell wurden drei *schwarzweisse Auszugsdiapositive* hergestellt, diese aber nicht mit einzelnen Projektoren übereinander projiziert, sondern zu einem einzigen Bildsandwich *zusammenmontiert*.

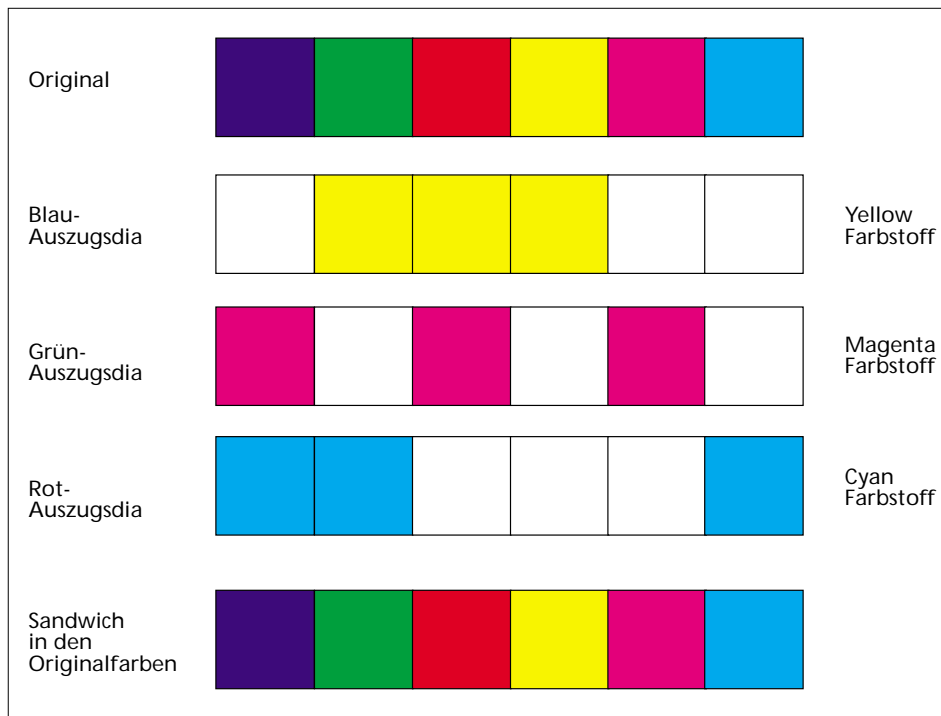
Dazu musste in jedem Dia das schwarze Silberbild ausgebleicht und durch einen lasierenden Farbstoff ersetzt werden. Die unbelichteten (und damit schwarzen) Stellen des Blauauszugsdias werden durch einen Yellow-Farbstoff (Yellow = «Nichtblau»), diejenigen im Grünauszugsdia durch einen Magenta-Farbstoff (Magenta = «Nicht-

grün» bzw. komplementär zu Grün) und im Rotauszugsdia durch einen Cyan-Farbstoff (Cyan = «Nichtrot») ersetzt.

Werden diese drei so eingefärbten Dias passergenau übereinander montiert, entsteht ein Farbsandwich in den Originalfarben.

Vierfarbendruck

Wie alle Farbfoto-Systeme basiert auch der Vierfarbendruck auf dem Prinzip des additiven Farbausuges und der subtraktiven Produktion. Vom Originalbild werden dazu Farbauszüge durch die



Die Kombination eines additiven Dreifarbenauszuges mit der subtraktiven Farbstoffproduktion ist das Urprinzip aller modernen Farbfoto-Verfahren.



Vorlage

unten v.l.n.r.:
Cyan (C)
Magenta (M)
Yellow (Y)



oben v.l.n.r.:
C + M
C + Y
M + Y



rechts v.l.n.r.:
C + M + Y
Schwarz (K)



Vierfarbendruck
C + M + Y + K

Farbaufbau im Vierfarbendruck: auch hier additiver Auszug und subtraktive Produktion

Selektionsfilter Blau, Grün und Rot hergestellt. Die von diesen Auszügen hergestellten, gerasterten Fotolithos werden auf Druckplatten kopiert. Je nach Druckverfahren entstehen auf den Druckplatten erhöhte (Buchdruck), vertiefte (Tiefdruck) oder fettaufnehmende (Offsetdruck) Punkte. Die lasierenden Druckfarben Yellow, Magenta und Cyan bilden dann übereinandergedruckt den originalähnlichen Druck.

Mit den zum Druck verwendeten subtraktiven Grundfarben wäre theoretisch auch ein volles Schwarz erzeugbar (alle drei subtraktiven Grundfarben übereinander). Weil die Farbpigmente der Druckfarben eine sehr geringe Sättigung aufweisen müssen, um den Grundlagen der subtraktiven Farbmischung zu genügen, kann daher der Forderung nach maximaler Deckkraft nicht gleichzeitig entsprochen werden. Man macht daher statt eines Dreifarbindrucks einen Vierfarbindruck, indem man noch eine Litho ohne Filter herstellt («Schwarzauszug») und als vierte Farbe zur Erhöhung der Maximaldichte druckt.

Die Mathematik der Farben

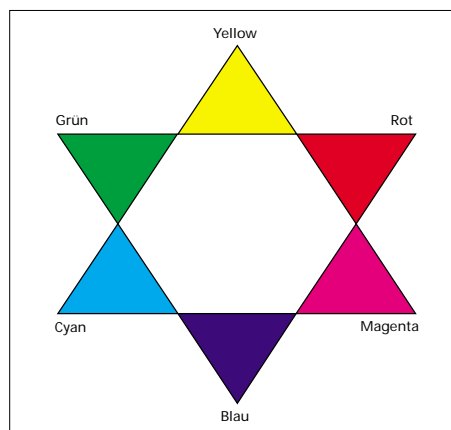
Der Versuch, Farben nicht nur empfindungsmässig zu erfahren, sondern ihnen eindeutige Bezeichnungen zu geben und damit eine exakte Farbkommunikation zu ermöglichen, hat ausgehend von den vielen Farbtheorien berühmter Dichter, Künstler, Lehrer und Physiker schliesslich zur modernen Farbmeterik geführt, insbesondere zum *CIE-Normvalenzsystem* und den *CIE-Farbunterschiedsbeschreibungen* (CIE ist die Ab-

kürzung für Commission Internationale de l'Eclairage).

In der Grundlagenausbildung von Fotografen hat die präzise Farbmeterik in der Vergangenheit eher wenig Beachtung gefunden, da diese für das einfachere Verständnis der Vorgänge in der Farbfotografie kaum von grosser Bedeutung ist. Seit aber die digitale Fotografie und die elektronische Bildbearbeitung an Computer und Bildschirm eine Rolle spielt, werden vom Fotografen vermehrt fundiertere Kenntnisse in den Belangen der drucktechnischen Weiterverarbeitung verlangt. Im Interesse des Farbverstehens und der exakten Farbkommunikation ist für diesen Berufszweig das Verständnis für die Farbmeterik lebensnotwendig geworden.

Der sechsteilige Farbstern

Die für das Verständnis der Farbfotografie erforderlichen Grundfarben kann man im Farbstern zusammenfassen. Der



Der sechsteilige Farbstern. Komplementär-farben liegen einander gegenüber.

sechsteilige Farbstern enthält abwechselnd die drei subtraktiven und die drei additiven Grundfarben.

Aus dem Farbstern kann man problemlos ablesen, dass aus der subtraktiven Mischung von Yellow und Magenta das dazwischenliegende Rot entsteht oder dass Cyan durch additive Mischung aus Grün und Blau entsteht. Anhand des Farbsterns lassen sich die verschiedenen Mischmethoden leicht einprägen. Komplementärfarben liegen einander im Farbstern gegenüber.

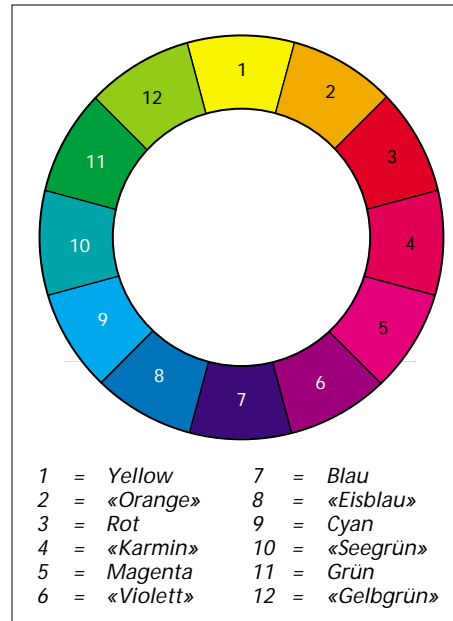
Der Farbkreis

Um den mathematischen Charakter der Farben zu verstehen, versuchen wir weitere Farben ausserhalb der additiven und subtraktiven Grundfarben zu konstruieren. Kombinieren wir beispielsweise mit subtraktiver Mischmethode ein starkes Yellow-Filter mit einem schwachen Magenta-Filter, so ergibt sich der Eindruck Orange. Dasselbe Resultat entstände durch die Kombination von zwei gleich stark gefärbten Filtern der Farben Yellow und Rot. Der zwölfteilige Farbkreis verdeutlicht dies.

Im Farbkreis werden vorerst die drei additiven Grundfarben Blau, Grün und Rot und dann die drei subtraktiven Grundfarben Yellow, Magenta und Cyan platziert. Soweit entspricht die Aufteilung dem sechsteiligen Farbstern der uns bekannten Grundfarben erster und zweiter Ordnung. Komplementärfarben stehen sich wiederum direkt gegenüber.

Versuchen wir nun, uns die noch fehlenden Zwischenfarben vorzustellen: Zwischen Yellow und Rot muss demnach ein gelbliches Rot, nämlich Orange kom-

men, zwischen Cyan und Blau ein Blau mit einer Tendenz nach Cyan, nämlich Eisblau usw.



Der zwölfteilige Farbkreis

Neben den uns bereits bekannten Komplementärfarbenpaaren erster und zweiter Ordnung können wir somit erkennen, dass Orange und Eisblau bzw. Karmin und Seegrün oder Violett und Gelbgrün ebenfalls Komplementärfarben sind.

Die Namen der soeben erwähnten Mischfarben dritter Ordnung sind indes missverständlich und keinesfalls genormt (im Gegensatz zu den subtraktiven und additiven Grundfarben Blau, Grün, Rot, Yellow, Magenta und Cyan, welche zumindest im Bereich der Fotografie genormte und unmissverständliche Farbbezeichnungen sind). Wenn beispielsweise *Johannes Itten* in seiner

Farbenlehre von «Violett» spricht, meint er eine Farbe, deren Farbton sehr nah bei unserem Blau liegt.

Prozentuale Farbverhältnisse

Wir empfinden einen Gegenstand dann als Rot, wenn dieser die Eigenschaft hat, vom weissen Licht 100% Rot zu reflektieren und Grün und Blau vollständig zu absorbieren. Yellow empfinden wir, wenn alles Rot (100%) und alles Grün (100%) reflektiert, aber Blau vollständig absorbiert wird. Aufgrund dieser Überlegung können wir die Farben des zwölfteiligen Farbkreises bezüglich ihrer Rot-Grün-Blau-Reflexionsfähigkeit zum Beispiel mit einer *prozentualen Masszahl* charakterisieren. Mittels additiver Mischung durch drei Projektoren,

deren Helligkeit von 0 bis 100% identisch steuerbar sind, erreicht man durch mathematische Berechnung genau den gewünschten Farbton.

Ebenso möglich ist das Erreichen eines bestimmten Farbtons durch die mathematisch errechnete subtraktive Mischung der Grundfarben Yellow, Magenta und Cyan, wobei dies in der Praxis viel schwieriger zu erreichen ist, weil die subtraktiven Grundfarben dabei eine möglichst geringe Sättigung aufweisen dürfen, eine Forderung, die mit Farbpigmenten, welche gleichzeitig eine gewisse minimale Deckfähigkeit aufweisen sollten, kaum zu erfüllen ist (siehe Vierfarbendruck).

Ein Malfarben-Hersteller, der mit Farbpigmenten arbeitet, welche den theoretischen Anforderungen der subtraktiven Mischung genügen (sehr

Farbempfindung	Reflexion in % (additive Farbmischung)			Farbanteil in % (subtraktive Farbmischung)		
	Blau	Grün	Rot	Yellow	Magenta	Cyan
Blau	100	0	0	0	100	100
Eisblau	100	50	0	0	50	100
Cyan	100	100	0	0	0	100
Seegrün	50	100	0	50	0	100
Grün	0	100	0	100	0	100
Gelbgrün	0	100	50	100	0	50
Yellow	0	100	100	100	0	0
Orange	0	50	100	100	50	0
Rot	0	0	100	100	100	0
Karmin	50	0	100	50	100	0
Magenta	100	0	100	0	100	0
Violett	100	0	50	0	100	50
Weiss	100	100	100	0	0	0
Schwarz	0	0	0	100	100	100
Mittelgrau	50	50	50	50	50	50

theoretisch, weil es in der Praxis keine Mal-Farbpigmente gibt, welche diesen hohen Anforderungen vollauf genügen!), könnte seinen Detailhändlern drei Fässer mit den Farbstoffen Yellow, Magenta und Cyan liefern und einen Farbfächer herstellen, auf dem die aufgeführten Farbtöne beispielsweise mit einem sechsstelligen Zahlencode bezeichnet sind (100% würde dabei der zweistelligen Zahl 99 entsprechen).

Der Farbton «Karmin» hätte daher den zahlenmässigen Code 509900, was nichts anderes heisst, als dass der Farbhändler dem Endkunden die gewünschte Farbe aus 50% (= 1 Teil) Yellow und 100% (= 2 Teile) Magenta zusammenmischt. Ein neutrales Grau hätte den Code 505050 und würde daher aus gleichen Anteilen aus allen drei Farbfässern zusammengemischt. Ein x-beliebiger Farbton könnte dann durchaus beispielsweise den Code 733418 aufweisen.

Im Prinzip arbeiten Farbenhersteller trotz den oben aufgeführten Mängeln nach dieser Methode, wobei zusätzlich zu den drei subtraktiv mischbaren Grundfarben noch Schwarz und Weiss zum Abdunkeln und Aufhellen des Farbtons dazu kommen und dadurch der verwendete Farbcode noch etwas komplizierter sein muss.

Wir sehen daraus aber, dass Farbe in irgend einer Form *mathematisch erfassbar* und dadurch kommunizierbar wird.

Farbton, Helligkeit, Sättigung

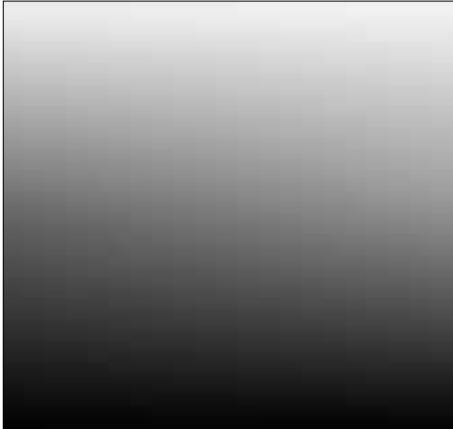
Mit Farbstern oder Farbkreis kann nur der *Farbton* definiert werden. Farben können aber bei gleichem Farbton

vergleichsweise heller oder dunkler sein. Betrachten wir dazu das Gelb einer Zitrone im Vergleich zu demjenigen einer Grapefruit. Ohne Zweifel ist das Gelb der Zitrone, bei womöglich gleichem Farbton heller. Das Gelb der Zitrone ist auch deutlich heller als das Rot einer Kirsche. Anders gesagt, *die Helligkeit einer Farbe ist eine vom Farbton unabhängige Grösse*, der in der Farbkommunikation eine ebenso grosse Wichtigkeit zukommt. Bei dem im vorherigen Abschnitt erläuterten einfachen Farbcode haben wir nur den Farbton mathematisch charakterisiert, nicht aber die Helligkeit.

Schauen wir uns noch einmal das Gelb einer Zitrone an. Es ist heller als dasjenige der Grapefruit. Wie aber verhält es sich zum Gelb einer Birne? Man könnte im ersten Moment glauben, das Gelb der Zitrone sei heller als dasjenige der Birne. Bei genauem Hinschauen merkt man aber, dass dies nicht korrekt ist. Das Zitronengelb ist nicht unbedingt heller, aber es ist leuchtender, kräftiger als das Gelb der Birne. Der Farbunterschied liegt weder am Farbton Gelb noch an der Helligkeit, sondern vielmehr an der *Farbsättigung*. Die Sättigung verändert genauso wie die Helligkeit das Aussehen eines Farbtons und ist damit ein weiteres wichtiges Farbbeschreibungskriterium.

Betrachten wir dazu folgende Abbildung, in der von links nach rechts der Farbton stufenlos von Grün nach der Komplementärfarbe Magenta verläuft. Von unten nach oben nimmt die Helligkeit zu. Links in der Bildmitte und rechts in der Bildmitte liegen die reinen Farbtöne Grün bzw. Magenta mit höchster Sättigung. In der Bildmitte ist die Sätti-

gung am geringsten und es zeigt sich beim Übergang beider komplementären Farben ein praktisch neutrales Grau.



Helligkeit und Sättigung verändern das Aussehen des Farbtöns

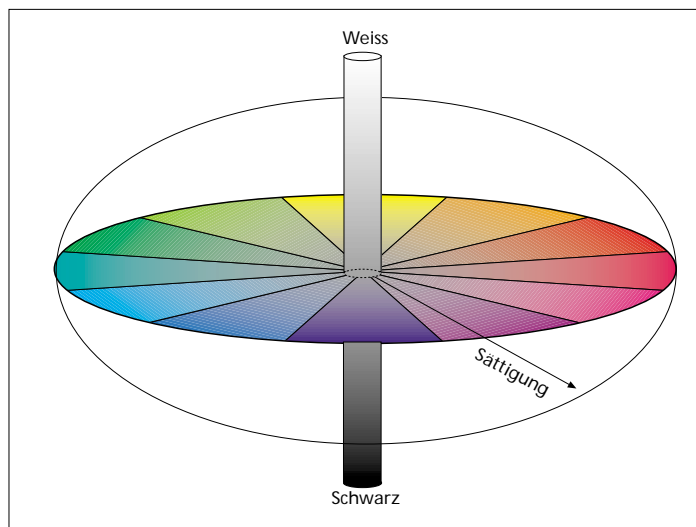
Betrachten wir nun nochmals den zwölfteiligen Farbkreis auf Seite 38. Der Farbkreis zeigt ausschliesslich nur die Farbtöne. Er kann für die genaue Farb-

charakterisierung daher nicht verwendet werden. Wollen wir Farben darstellen, so muss eine Darstellungsform gesucht werden, die in einer Dimension die Farbtöne darstellt, in einer zweiten die jeweilige Sättigung charakterisiert und in einer dritten Dimension schliesslich eine klare Aussage über die Helligkeit macht.

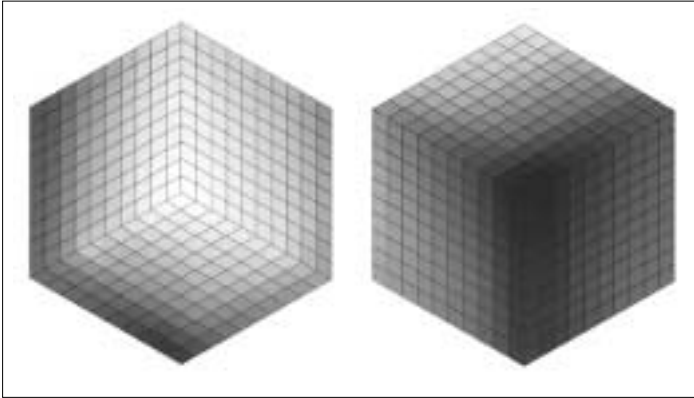
Die Dreidimensionalität der Farbe

Um den dreidimensionalen Charakter der Farbe darzustellen, bleibt nichts anderes übrig, als durch den Farbkreis eine senkrechte Achse für die Helligkeit zu stecken und zwischen den komplementären Farbtönen ein Mittelfeld für die Sättigung anzulegen.

Die reinen *Farbtöne* liegen bei diesem Modell auf dem Aussenmantel, die *Helligkeit* verändert sich auf der senkrechten Achse und die *Sättigung* nimmt vom Zentrum nach aussen zu.



Modell eines dreidimensionalen Farbkörpers



Farbenwürfel von
Alfred Hicethier
(1952)

Alle in der bildenden Kunst bekannten Farbtheoretiker dieses Jahrhunderts haben die Dreidimensionalität der Farbe erkannt und unterschiedliche Farbkörper konstruiert, die Farbton, Farbsättigung und Helligkeit integrieren. Erwähnt sei hier die *Farbenkugel* von Johannes Itten oder der *Farbenwürfel* von Alfred Hicethier.

Farbmetrik

Kommen wir zurück auf unsere Überlegungen am Beispiel eines Malfarbenherstellers im Abschnitt über die prozentualen Farbverhältnisse. Es wäre in der Tat vor allem für die materielle Farbmischung optimal, man könnte angeben, wieviel von welcher Farbe notwendig wäre, um eine genau bestimmte andere Farbe ausmischen zu können. In diesen Fällen handelt es sich aber um *Farbpigmente*, das heisst, es kommt nur die *subtraktive Farbmischung* in Frage, die nicht ohne weiteres gesetzmässigen Begebenheiten gehorcht. Eindeutig einer klaren Gesetzmässigkeit zu unterzie-

hen ist dagegen die *additive Farbmischung* bei der keine Absorption durch Farbstoffpigmente eintritt und dadurch bei einer Mischung ausschliesslich nur die Farbvalenzen der Einzelkomponenten wichtig sind und nicht absorptionsbedingte Spektralkurven, wie dies bei der subtraktiven Mischung der Fall ist.

Diese Überlegungen hat bereits im Jahre 1853 *Gassmann* gemacht und das heute noch gültige *Gassmann'sche Gesetz* postuliert:

- Drei Parameter sind genügend um die Farbe eines Lichtes zu definieren.
- Additive Farbmischungen sind stetig.
- Das Resultat der additiven Mischung hängt allein von der visuellen Erscheinung der Einzelkomponenten ab und ist unabhängig von deren physikalischen Ursprung.

Um diese Gesetzmässigkeit zu verstehen, müssen wir uns seiner Versuchsanordnung bedienen: Drei verschiedenfarbige Lampen, deren Lichtstärke variabel ist, wurden übereinander auf eine weisse Wand projiziert. Daneben projizierte man das Licht einer beliebigen vierten

Lampe. Gassmann stellte nun die Aufgabe, durch Variationen der drei ersten Lampen genau die Farbe einer vierten Lampe visuell nachzumischen.

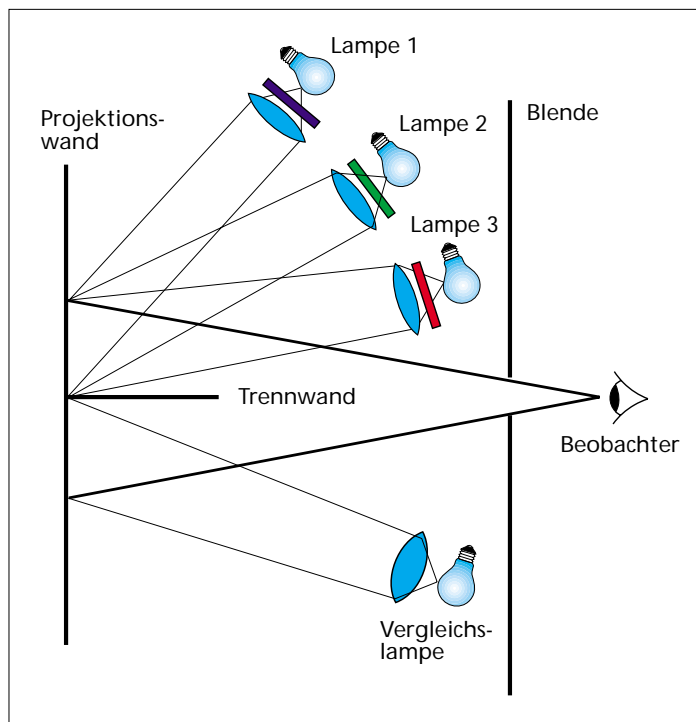
Rasch stellt man bei der Versuchsausführung fest, dass das Gelingen der gestellten Aufgabe davon abhängt, wie man die Farben der drei Lampen gewählt hat. In sehr vielen Fällen gelingt das Nachmischen problemlos wenn nämlich die Farben der ersten drei Lampen Blau, Grün und Rot sind (siehe klassische additive Farbmischung Seite 29).

Gassmann stellte aber interessanterweise fest, dass mit einem Kunstgriff bei jeder denkbaren Kombination von vier Farben eine präzise Ausmischung vorgenommen werden kann, indem man nämlich dem vorgegebenen Licht der vierten

Lampe das Licht einer der drei ersten Lampen zumischt. Wird die genaue Übereinstimmung nur mit diesem Kunstgriff erreicht, so spricht Gassmann von einer «*uneigentlichen Mischung*» (im Gegensatz zur «*eigentlichen Mischung*», mit der die Referenzfarbe ohne Kunstgriff nachgemischt werden kann). Zieht man diese uneigentliche Mischung mit in die Möglichkeiten ein, ergibt sich folgendes Mischgesetz:

Wenn vier Farben vorliegen, ist es immer möglich, entweder mit drei Farben die vierte nachzumischen, oder zwei Farben paarweise so zu mischen, dass beide Mischungen identisch sind.

Auf den ersten Blick erkennt man in dieser Formulierung nichts geniales, denn in der Praxis wird ja üblicherweise



Gassmann'sche Versuchsanordnung

verlangt, die vierte Farbe mit gegebenen «Grundfarben» nachzumischen, ohne die Referenz in irgend einer Weise zu verändern. Das Gesetz sagt indessen, jeder beliebige Farbreiz könne unter Verwendung von nur drei Farbreizen ausgemischt werden, wenn auch manchmal nur unter Einbezug der uneigentlichen Farbmischung. Die Bedeutung liegt daher nicht in der praktischen Anwendung, sondern in der Möglichkeit, damit beliebige Farben *zahlenmässig* beschreiben zu können.

Machen wir dazu ein Gedankenexperiment: Wir haben drei willkürlich ausgewählte Lampen in den (willkürlichen) Farben Blau, Grün und Rot zur Verfügung und wollen zum Beispiel ein ganz bestimmtes Gelb und ein bestimmtes Blaugrün ausmischen. Die visuelle Ausmischung nach dem vorher erläuterten Gassmann'schen Prinzip könnte mengenmässig folgende Resultate ergeben:

$$\text{Gelb} = 10 \text{ Teile Rot} + 11 \text{ Teile Grün} \\ + 1 \text{ Teil Blau}$$

oder anders geschrieben

$$\text{Gelb} = 10 \text{ R} + 11 \text{ G} + 1 \text{ B}$$

Die Ausmischung ist in diesem Fall mit den drei Ausgangsfarben möglich, das heisst, es handelt sich um eine *eigentliche Mischung*.

In unserem nächsten Beispiel dagegen ist die direkte Ausmischung nicht möglich. Wir erreichen eine präzise Übereinstimmung nur mit *uneigentlicher Mischung*:

$$\text{Blaugrün} + 5 \text{ R} = 5 \text{ G} + 6 \text{ B}$$

Ganz offensichtlich handelt es sich bei diesen Angaben um *Gleichungen*, die wir daher auch als solche behandeln und somit die Glieder transponieren dürfen. Die Blaugrün-Gleichung kann daher auch so geschrieben werden:

$$\text{Blaugrün} = 5 \text{ G} + 6 \text{ B} - 5 \text{ R}$$

Das *Minuszeichen* zeigt die dabei notwendig gewordene *uneigentliche Mischung* an.

Die Zahlenwerte der Gleichungen bezeichnet man als *Farbwerte*. Beliebige Kombinationen von *vier Farbvalenzen* lassen sich gemäss obiger Überlegung durch *vier Zahlenwerte* miteinander verknüpfen, was nichts anderes bedeutet, als dass beim Festlegen von drei Primärvalenzen, jede beliebige vierte Farbvalenz schliesslich durch *drei Zahlenangaben* umschrieben werden kann (in unseren beiden Endformeln stehen rechts des Gleichheitszeichen immer drei Farbwerte).

Das Gassmann'sche Postulat entstand aus dieser nunmehr nachvollzogenen Überlegung. Es sagt im übrigen nicht, dass ein bestimmter Farbreiz durch ganz bestimmte Grundfarben mischbar ist, sondern es gilt allgemein, dass diese Mischung mit *beliebigen drei Ausgangsfarben* möglich ist, wobei allerdings keine Ausgangsfarbe verwendet werden darf, welche durch Mischung der beiden anderen hergestellt werden kann. Die drei verwendeten Grundfarben müssen voneinander *«linear unabhängig»* sein.

Folgende Hinweise sind in diesem Zusammenhang von Belang: *Jede Farbe kann durch drei Zahlenwerte umschrieben werden*. Da die Ausmischung mit Hilfe des Auges erfolgt, muss man sich

aber fragen, wie präzise damit das Festlegen des Mischungsverhältnisses ist. Das menschliche Auge ist in dieser Hinsicht äusserst präzise, es kann zwei Farbreize bezüglich ihrer Identität mit sehr hoher Präzision beurteilen.

Durch die Gassmann'schen Gesetze sind aber nicht nur zahlenmässige Farbbestimmungen durch das Experiment möglich, sie gestatten vielmehr, Mischungsverhältnisse ausgehend von beliebigen anderen Primärvalenzen zu *berechnen*, sofern man dies einmal für drei festgelegte Grundfarben experimentell ermittelt hat. Die visuelle, experimentelle Ausmischung muss daher *nur einmal mit drei Primärvalenzen* vorgenommen werden (vorzugsweise von einer grösseren Gruppe von normalsichtigen Menschen; sogenannte «*Normalbeobachter*»).

Das experimentelle Nachmischen der Spektralreize muss heute übrigens nicht mehr praktisch vorgenommen werden. Die entsprechenden Werte wurden bereits vor Jahrzehnten mit sehr hoher Präzision ermittelt und bilden die Basis der farbmetrischen Literatur, aus welcher man die präzisen Werte übernimmt.

Da es genügt, für alle späteren Umrechnungen die Werte der einmal experimentell (visuell) bestimmten Spektralreize zu verwenden, spielt innerhalb der Farbmetrik das Wissen um die genaue Empfangsfunktion des menschlichen Auges keine Rolle. Das ist besonders deshalb wichtig, weil wir davon ausgehen müssen, dass unser heutiges Wissen über das menschliche Sehen noch recht rudimentär ist und dass sich dieses Wissen mit Hilfe der Genforschung in den nächsten Jahren und Jahrzehnten erweitern (und vielleicht verändern) wird.

Sind die Farbwerte für eine einzige Kombination von Primärvalenzen experimentell bestimmt, lassen sich Umrechnungen für andere, beliebige Primärvalenzen wie folgt vornehmen:

Ein Farbreiz A gibt beispielsweise für die Primärvalenzen R, G und B folgende Farbwerte:

$$A = 1 R + 2 G + 3 B$$

Gesucht sind die Farbwerte desselben Farbreizes für drei andere Primärvalenzen, die wir mit X, Y und Z bezeichnen wollen. Dazu muss man lediglich wissen, welche Farbwerte die ursprünglichen Primärvalenzen R, G und B im System der Primärvalenzen X, Y und Z aufweisen. Nehmen wir dazu folgende Farbgleichungen als Beispiel:

$$R = 2 X + 3 Y + 4 Z$$

$$G = 3 X + 2 Y + 4 Z$$

$$B = 4 X + 1 Y + 6 Z$$

Wenn man diese Gleichungen in die Farbgleichung für A einsetzt, ergibt sich:

$$A = 1(2 X + 3 Y + 4 Z) + 2(3 X + 2 Y + 4 Z) + 3(4 X + 1 Y + 6 Z)$$

Nach Auflösen der Klammern und der Addition gleicher Farbwerte ergibt sich:

$$A = 20 X + 10 Y + 30 Z$$

Diese einfache Art der Umrechnung wird als «*lineare Transformation*» bezeichnet und ist immer dann möglich, wenn drei Primärvalenzen eines Systems mit drei anderen Primärvalenzen verknüpfbar sind.

CIE-Normvalenz-System

Im Jahre 1931 hat das *CIE*-Gremium (Commission Internationale de l'Eclairage) drei Primärvalenzen einheitlich festgelegt und mit den Buchstaben R, G und B bezeichnet.

R = 700,0 nm
G = 546,1 nm
B = 435,8 nm

Die Wahl dieser Primärvalenzen ist prinzipiell willkürlich und allein durch technische Begebenheiten bestimmt. 546,1 und 435,8 nm sind zum Beispiel zwei typische Spektrallinien aus dem Quecksilberspektrum.

Ausgehend von diesen *Primärvalenzen* bestand im weiteren die Aufgabe, eine grosse Zahl von verschiedenen Farben (*Farbreizen*) experimentell nachzumischen. Jeder Farbreiz kann als additive Mischung der einzelnen Wellenlängen aufgefasst werden. Umgekehrt kann jeder Farbreiz einfach und ohne Zuhilfenahme des Auges wieder *in seine einzelnen Wellenlängen*, in die sogenannten *Spektralreize*, zerlegt werden.

Durch diese Tatsache ist es möglich, eine sehr grosse Zahl von möglichen Farbreizen in eine bedeutend kleinere Anzahl von Spektralreizen zu überführen. Bedenken wir, dass das menschliche Auge vermutlich über 10 Millionen Farbreize noch unterscheiden kann, die Zahl der Spektralreize im sichtbaren Bereich des Lichtes aber höchstens 400 beträgt, wird die Nützlichkeit der Überführung von Farbreizen in Spektralreize klar. Man kann die Zahl der Spektralreize ohne merkliche Nachteile sogar

noch weiter vermindern, wenn man mehrere Wellenlängen zu einzelnen Paketen zusammenfasst und dabei das Spektrum in Spektralbereiche von beispielsweise 10 nm unterteilt. Durch diese Massnahme reduziert sich die Anzahl der Spektralreize auf 40.

Nur durch die Aufspaltung in Spektralreize sind jedoch noch keine Farbwerte entstanden. Diese lassen sich aber nach dem Gassmann'schen Gesetz berechnen, sofern die Farbwerte ihrer additiven Mischungskomponenten bekannt sind. Aus diesem Grunde ist es nur notwendig, die Farbwerte dieser reduzierten Anzahl Spektralreize, die so-

Farbreiz:

Strahlung, die durch Reizung der Netzhaut eine Farbwahrnehmung hervorruft.

Primärvalenz:

Grundfarbe in einem additiven Farbmischsystem (z.B. R,G,B)

Farbwert:

Anteil der drei Primärvalenzen, die in einem bestimmten Farbreiz enthalten sind (z.B.: Farbreiz A besteht aus folgenden Mengenanteilen der Primärvalenzen: 1 R + 2 G + 3 B).

Spektralreize:

Einzelne Wellenlängen (des Spektrums) aus denen ein Farbreiz besteht.

Spektralwerte:

Farbwert eines Spektralreizes (bezogen auf ein bestimmtes Primärvalenz-System).

Spektralwerte bei einigen ausgewählten Wellenlängen für die CIE-Primärvalenzen R, G und B (Zur besseren Darstellung in der Tabelle sind die Funktionswerte mit dem Faktor 1000 multipliziert)

Wellenlänge nm	r(λ) R 700,0	g(λ) G 546,1	b(λ) B 435,8
400	+ 0.03	- 0.01	+ 0.12
450	- 1.21	+ 0.68	+ 31.67
500	- 7.17	+ 8.54	+ 4.78
550	+ 2.28	+ 21.18	- 0.06
600	+ 34.43	+ 6.25	- 0.05
650	+ 10.17	+ 0.12	0
700	+ 0.41	0	0

nannten *Spektralwerte*, experimentell, einmalig zu bestimmen und als Funktion zwischen Wellenlänge und relativer Strahlungsenergie darzustellen. Die einzelnen Funktionswerte, mit denen die ausgewählten Primärvalenzen R, G und B in den ausgemischten Spektralreizen vertreten sind, bezeichnet man mit $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ und $b(\lambda)$; sie stellen mathematisch nichts anderes als die Mischungsbeträge dar, in denen die drei Primärvalenzen R, G und B vertreten sind. *Negative Werte* bedeuten, dass von der *uneigentlichen Farbmischung* Gebrauch gemacht werden musste.

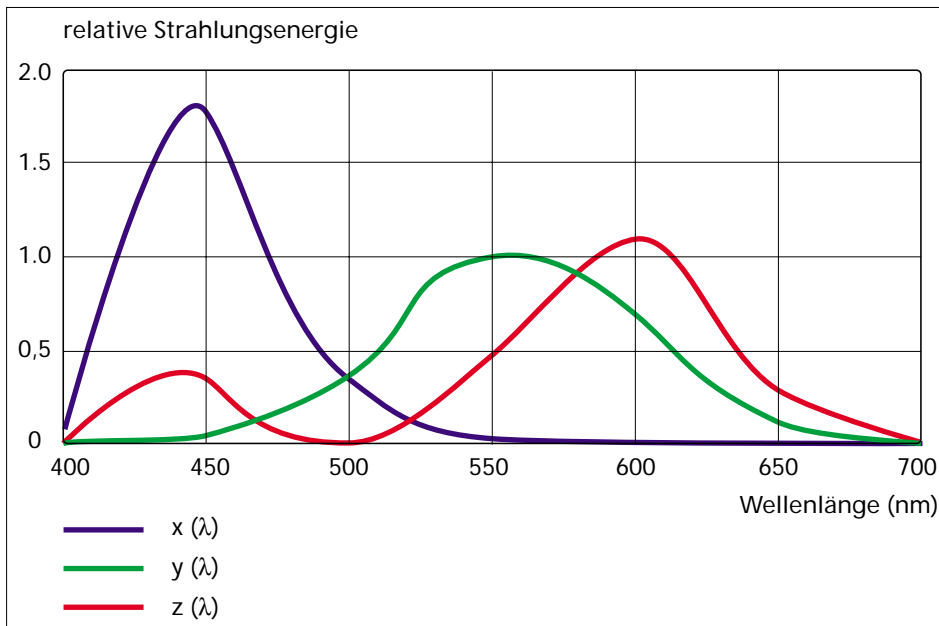
Da die Sättigung einer Mischfarbe bei additiver Mischung nicht grösser sein

kann als die Sättigung der verwendeten Grundfarben, können Farben mit hoher Sättigung nicht nachgemischt werden. Um trotzdem zu positiven Spektralwerten zu gelangen, definierte man *nicht existente, übersättigte Grundfarben*. Mit Hilfe der Gassmann'schen Gesetze sind Umrechnungen der Primärvalenzen R, G und B selbst in nicht existierende, virtuelle Primärvalenzen möglich.

CIE wählte für die so errechneten *virtuellen Primärvalenzen* (auch *virtuelle Tristimulus-Werte* genannt) die Buchstaben X (virtuelles Rot), Y (virtuelles Grün) und Z (virtuelles Blau). Die schliesslich errechneten *Normalspektralwerte* heissen sinngemäss $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ und $z(\lambda)$.

CIE-Normspektralwerte bei einigen ausgewählten Wellenlängen für die virtuellen CIE-Primärvalenzen X, Y und Z

Wellenlänge nm	x(λ)	y(λ)	z(λ)
400	0.0143	0.0004	0.0679
450	0.3362	0.0380	1.7721
500	0.0049	0.3230	0.2720
550	0.4334	0.9950	0.0087
600	1.0622	0.6310	0.0008
650	0.2835	0.1070	0.0000
700	0.0114	0.0041	0.0000



CIE-Normspektralwertkurven

Verständlicher sind die auf der vorhergehenden Seite tabellarisch aufgelisteten Normspektralwerte bei grafischer Darstellung mit *Normspektralwertkurven*, welche die spektrale Augenempfindlichkeit des sogenannten *CIE-Normalbeobachters* darstellt. Dabei hat die $y(\lambda)$ -Kurve eine besondere Bedeutung. Sie wurde nämlich so gewählt, dass sie mit der *spektralen Empfindlichkeit des helladaptierten Auges eines Normalbeobachters* übereinstimmt. Das heisst nichts anderes, als dass der Normfarbwert Y eine direkte Aussage über die *Helligkeit* einer Farbe macht. Verdoppelt man bei einem gegebenen Farbreiz die Helligkeit, so verdoppeln sich ebenfalls alle drei Farbwerte.

Die virtuellen Primärvalenzen X, Y und Z wurden übrigens bewusst so gewählt, dass die *Summe der Normfarb-*

werte für das ideale Weiss (Remission 1.0 bei allen Wellenlängen) *genau 100* beträgt ($X=Y=Z=100$). Analog dazu führen andere Farbreize, deren Remissionswerte bei allen Wellenlängen gleich sind, zu drei gleichgrossen Normfarbwerten, was für unser Auge ein Neutralgrau (unbunt) darstellt.

Streng genommen gilt diese Vorgabe für Körperfarben nur bei einem Betrachtungslicht, das ebenfalls ein *energiegleiches Spektrum* aufweist. Bei anderen Lichtquellen besitzt das ideale Weiss nicht gleiche Normfarbwerte. Für die in Fotografie und Drucktechnik meistens verwendeten Normlichtarten C und D65 (siehe auch Seite 65) gelten die auf nächster Seite aufgeführten Normfarbwerte.

Das Verhältnis der drei Farbwerte X, Y und Z kann wegen der oben erwähn-

Normfarbwerte	C	D65
X	98.07	95.04
Y	100.00	100.00
Z	118.23	108.89

ten Verknüpfung als Information sowohl für den Farbton, wie auch für die Sättigung angesehen werden. Drückt man die Verknüpfung zahlenmässig aus, ergeben sich die Normfarbwertanteile x , y und z :

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

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

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

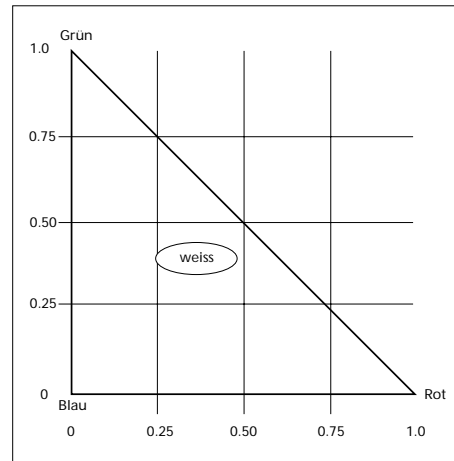
Aus der Gleichung sieht man, dass die Summe der Normfarbwertanteile immer 1 ist: $x + y + z = 1$

Die Verknüpfung erlaubt, *Farbton samt Sättigung* mit *nur zwei Zahlenwerten* anzugeben. Dabei ist es gleichgültig, welche zwei Werte. Man hat sich jedoch geeinigt, die Werte x und y anzugeben. Anstelle der Farbbeschreibung mit drei Normfarbwerten X , Y und Z kann die Farbbeschreibung mit einer Aussage über Farbton und Sättigung mit nur zwei Normfarbwertanteilen x und y vorgenommen werden. Spielt eine explizite Aussage über die Helligkeit eine Rolle, wird diese zusätzlich mit dem Normfarbwert Y angegeben.

Um die Zusammenhänge zu erkennen, müssen die Normfarbwerte grafisch aufgezeichnet werden, wobei man die

Werte x und y in ein Koordinatensystem einträgt. Dadurch ist jede Farbvalenz durch einen Punkt in der Ebene darstellbar.

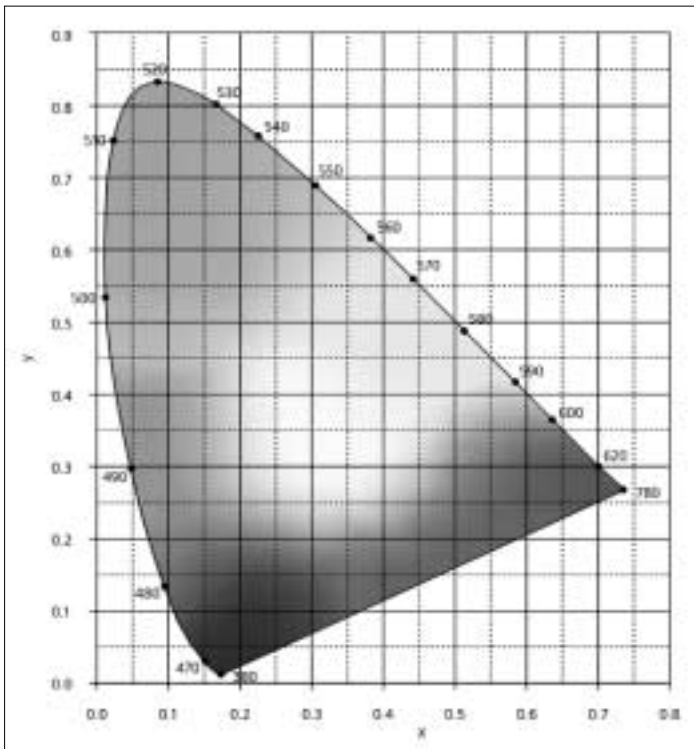
Weil die Summe von $x+y+z$ gleich 1 sein muss, liegen die Farbvalenzen in einem gleichschenkligen Dreieck, dessen Eckpunkte die Koordinaten $(x=0; y=0)$, $(x=1; y=0)$ und $(x=0; y=1)$ besitzen.



Eckpunktskoordinaten des Farbdreiecks

Stellt man innerhalb dieses Dreiecks die aus den Normspektralwerten errechneten *Normfarbwertanteile* (die sogenannten Normspektralwertanteile) x und y grafisch in einer Ebene dar, entsteht eine Art *hufeisenförmiger Kurvenzug*, auf dem die *Farborte der Spektralfarben 380 bis 770 nm* liegen. Schliesst man den offenen Kurvenzug durch eine Gerade, liegen darauf die Magentatöne. Diese Gerade heisst deshalb *Purpurlinie*.

Innerhalb des Spektralfarbenzuges und der Purpurlinie liegen sämtliche Farbvalenzen, die sich durch additive Mischung aus den Spektralvalenzen erzeugen lassen. Die horizontale x -Achse zeigt

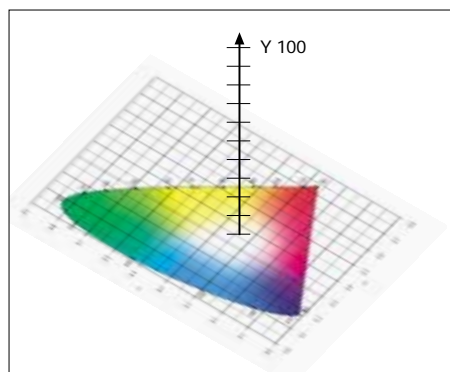


CIE-Farbendreieck
1931

den Rotanteil der Farben, während die vertikale y-Achse den Grünanteil in den Farben angibt.

Die zweidimensionale Darstellung erlaubt indessen nur eine Farbortsangabe, die Auskunft über Farbton und Sättigung gibt, nicht aber über die Helligkeit. Um diese mit dem Wert Y (Luminanz) darzustellen, muss die Darstellung um eine *dritte Dimension* erweitert werden.

Trägt man in diesem dreidimensionalen Koordinatennetz die maximal möglichen Helligkeitswerte für jeden Farbort der Ebene auf, entsteht ein *asymmetrischer Höhenzug*, da die wenigsten Farborte einen Maximalwert von Y=100 erreichen können.



Dreidimensionale Darstellung
der CIE-Farbmasszahlen

Ein ganz bestimmtes Rot könnte beispielsweise folgende Farbmasszahlen aufweisen: $Y=13.0$ $x=0.46$ $y=0.287$

Im CIE-Farbdreieck kann man feststellen, dass die kurzwelligen und langwelligen Spektralfarben jeweils äusserst nah beieinander liegen. Die Spektralfarben von 380 bis 410nm und diejenigen von 690 bis 780nm haben sogar identische Farborte, was nichts anderes bedeutet, als dass unser Auge Licht in diesen Spektralbereichen überhaupt nicht unterscheiden kann.

Da der hufeisenförmige Spektralfarbenzug in einem rechtwinkligen und gleichschenkligen Dreieck liegt, wird als Mittelpunkt $x=y=0.333$ betrachtet. Naheliegenderweise bezeichnet man diese Valenz als *Mittelpunktvalenz*, welche mit dem Buchstaben E bezeichnet wird. Die *Mittelpunktvalenz E* ist identisch mit dem *Unbuntton*.

Die Verbindung eines beliebigen Punktes auf dem Spektralfarbenzug durch eine Gerade mit der Mittelpunktvalenz zeigt sämtliche Mischfarben zwischen der Spektralfarbe und der Unbuntvalenz an, das heisst, auf einer solchen Geraden liegt *immer derselbe Farbton*, mit *abnehmender Sättigung gegen die Mittelpunktvalenz*. Der Abstand eines Farbortes von der Mittelpunktvalenz kann daher als *Mass für die Sättigung* betrachtet werden.

Zwei Farborte, welche durch eine Gerade, die durch die Mittelpunktvalenz verläuft, verbunden werden können, sind *Komplementärfarben*.

Die Farbvalenz des zur Beleuchtung von Körperfarben verwendeten Lichtes gilt als «unbunt» und daher als Mittelpunktvalenz. Die Normwertanteile der üblichen Normlichtarten, z.B. für Farbstichbestimmungen, Spektralmessungen und Farbalmusterungen (siehe auch Seite 65) betragen:

<i>Normlichtart A:</i>	x=0.4476 y=0.4074
<i>Normlichtart C:</i>	x=0.3101 y=0.3162
<i>Normlichtart D65:</i>	x=0.3127 y=0.3290
<i>Normlichtart D50:</i>	x=0.3457 y=0.3585

Aus dem Koordinatenschnittpunkt x,y ergibt sich der *Farbton* mitsamt der *Sättigung* und der Wert Y in der senkrecht darauf stehenden Achse sagt, wie hell dieser Farbton ist.

Das CIELUV-System

Mit dem CIE xyY Farbsystem von 1931 lassen sich Farben exakt und reproduzierbar bestimmen, und dies, sowohl rechnerisch aus dem Spektrum, wie auch direkt messtechnisch mit einem *Spektralfotometer* oder einem *3-Farben-Kolorimeter*. Das System hat den grossen Nachteil, dass die so erhaltenen Farbkoordinaten schlecht mit der Farbempfindung des Menschen korrelieren; die Farben sind sehr ungleichmässig im Farberempfindungsraum verteilt.

1976 wurde deshalb von der CIE der *CIELUV-Farbraum* als Modifikation eines ursprünglich bereits 1964 vorgeschlagenen Farbraums eingeführt, der den erwähnten Mangel behebt und mit dem auch *Farbdifferenzen* anschaulicher umschrieben werden können.

Zur Bestimmung der CIELUV-Koordinaten geht man von den Farbmasszahlen x,y und Y aus, indem zuerst die

Normfarbwertanteile x und y ohne Berücksichtigung der Luminanz zu einer sogenannten *gleichabständigen Farbtabelle* transformiert werden, welche die beiden Koordinaten u' und v' aufweist. Die Berechnung von u' und v' erfolgt aus x und y mittels zweier linearer Gleichungen, was im Prinzip nichts anderes darstellt, als eine *lineare Verzerrung* des CIE-Dreiecks.

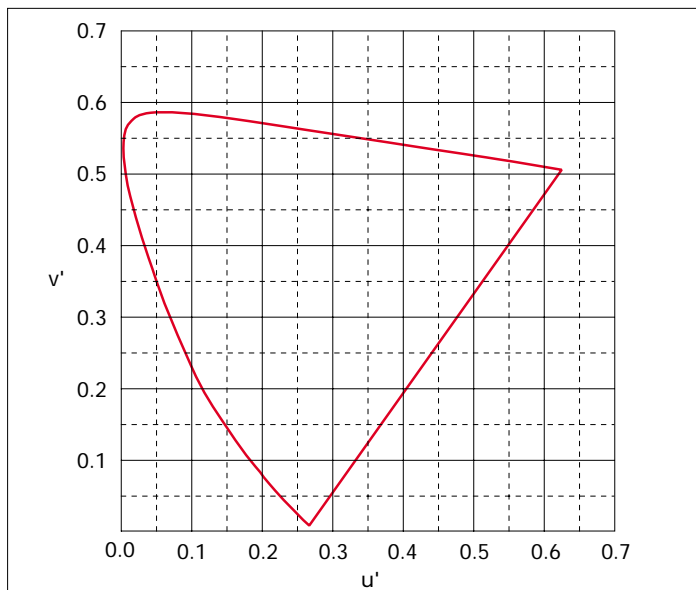
Die CIE $u'v'$ -Farbtabelle eignet sich sehr gut zur Veranschaulichung farbmatischer Zusammenhänge, wie sie zum Beispiel im Mehrfarbendruck, im Farbfernsehen bzw. auf dem Computer-Monitor vorkommen. Für die Darstellung abbildbarer Farbräume oder die Darstellung selbstleuchtender oder fluoreszierender Farben – z.B. bei farbigen Bildschirmen – ist die $u'v'$ -Farbtabelle allen anderen Darstellungen deutlich überlegen.

Eine dreidimensionale Farbbeschreibung entsteht, wenn die Koordinaten u'

und v' unter Berücksichtigung der Helligkeit umgerechnet werden. Die Helligkeitsbezogenen Koordinaten werden mit u^* und v^* bezeichnet. Bei der Umrechnung müssen die Koordinaten der verwendeten Beleuchtungslichtart in die Rechnung einbezogen werden.

Schliesslich wird zur vollständigen Beschreibung die Helligkeit mittels einer Kubikwurzel-Gleichung aus dem Normfarbwert Y errechnet. Diese wird im CIELUV-System mit L^* bezeichnet.

Aus den vollständigen Koordinaten $L^* u^* v^*$ lassen sich noch weitere Werte berechnen, so beispielsweise die *Buntheit* und die *Sättigung*, sowie *Farbtondifferenzen* und *Farbwinkeldifferenzen* zwischen zwei Farbwerten, alles Masszahlen, die insbesondere im grafischen Gewerbe interessieren. Es ist daher nicht verwunderlich, wenn der CIELUV-Farbraum bisher besonders in diesem Gewerbe verbreitet war.



CIELUV $u'v'$ Farbtabelle, die durch eine lineare Verzerrung des CIE-Dreiecks entsteht

Das CIELAB-System

Ebenfalls im Jahre 1976 führte CIE das *CIELAB-System* ein, in erster Linie, um schon existierende Farbabstandsformeln zu vereinheitlichen. Die dem CIELAB-System zugrunde liegende Formel stellt einen guten Kompromiss zwischen der verlangten *linearen Gleichabständigkeit der Farben* mit vernünftig zumutbarem Rechenaufwand dar. Zur Abgrenzung von früher vorgeschlagenen LAB-Koordinaten werden die Koordinaten des CIELAB mit einem Stern bezeichnet: $L^*a^*b^*$. Die Grösse L^* ist identisch mit der *Helligkeitskoordinate* im CIELUV-System, die ja, wie bereits erwähnt, mit Hilfe einer Kubikwurzelberechnung aus Y entstanden ist. Im CIELAB-System entstehen auch die Koordinaten a^* und b^* durch dieselbe Rechnungsart (im wesentlichen der hauptsächlichste mathematische Unterschied zum CIELUV-System) aus den CIE-Normfarbwerten X , Y und Z und den Koordinaten der beleuchtenden Lichtart.

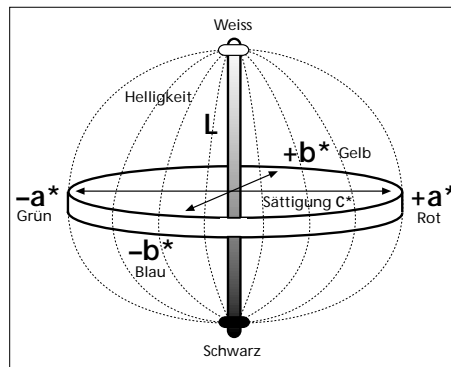
$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16$$

$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$$

$$b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$$

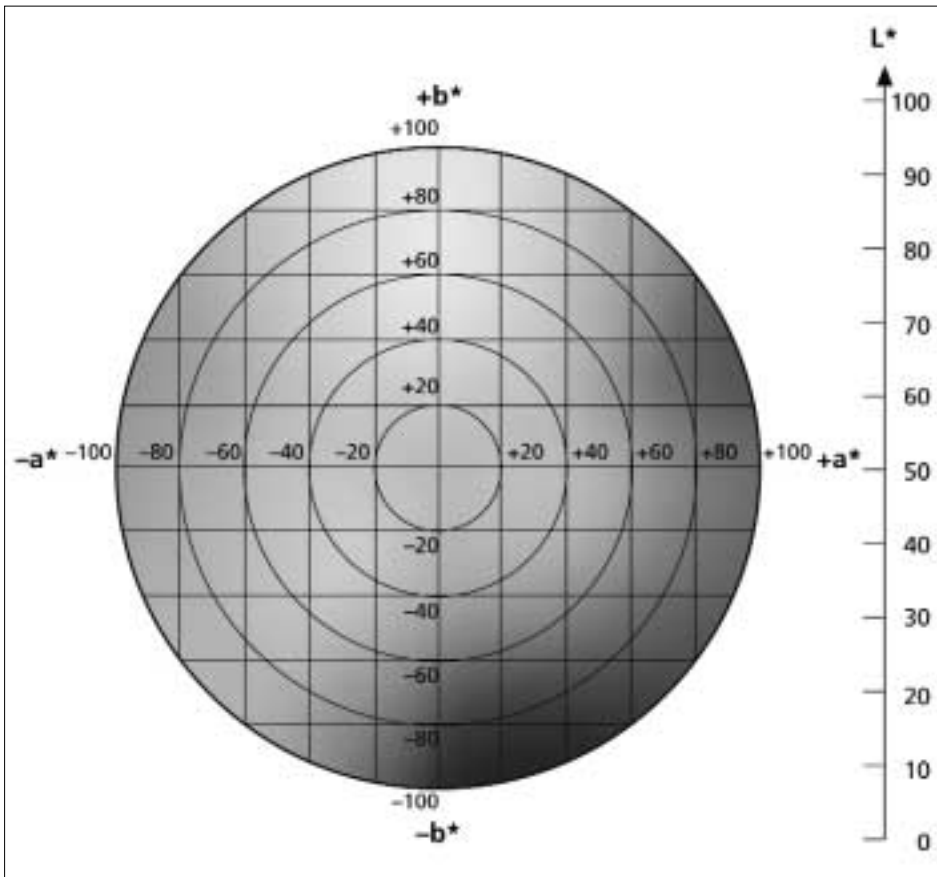
Im CIELAB-System (oder CIE $L^*a^*b^*$) liegen alle Farbtöne gleicher Helligkeit

auf einer kreisförmigen, flachen Ebene, auf der sich die a^* - und b^* -Achsen befinden. Positive a^* -Werte sind rötlich, negative a^* -Werte grünlich, positive b^* -Werte gelblich und negative b^* -Werte bläulich. Am Äquator der Farbscheibe liegen die *reinen Farbtöne hoher Sättigung*. Nach innen nimmt die *Sättigung* ab, im Zentrum ist sie null (unbunt, grau). *Komplementärfarben* liegen einander gegenüber. Die *Helligkeit* im kugelförmigen Farbkörper variiert in vertikaler Richtung von 0 (schwarz) bis 100 (weiss).



Modell des dreidimensionalen CIELAB-Farbraums

Im fotografischen Bereich und in der Druckvorstufe nimmt die Bedeutung dieses Farbraums ständig zu, weil Stichproben daraus verwendet werden, um die Durchsichts- und Aufsichts-Referenzvorlagen nach dem *Industriestandard IT8* zu erstellen. Anhand dieser Referenzvorlagen werden die Farbspektren von Ein- und Ausgabegeräten miteinander verglichen und die gerätgemässigen Abweichungen standardisiert beschrieben, wie dies bei modernen Farbmanagement-Systemen gehandhabt wird.



Die Lage der Farben im CIELAB-Farbkreis

Digital fotografierte Farbbilder oder über einen Scanner digitalisierte Vorlagen werden mit modernen CMS-Systemen heute meistens geräteunabhängig im LAB-Modus (statt im RGB- oder CMYK-Modus) archiviert, so dass dieselben digitalen Bilddaten mit den unterschiedlichsten Systemen weiterverarbeitet und ausgegeben werden können, ohne dass man wissen muss, woher die Rohdaten kommen.

Es ist anzunehmen, dass auch weitere Branchen sich künftig zunehmend dem

CIELAB-Standard zuwenden. In der Textilbranche kommt diesem System ebenfalls grosse Bedeutung zu.

Farbabstand

Das Rot eines Apfels, ein kräftiges Karminrot, könnte beispielsweise die Farbmasszahl $L^* = 42,8$; $a^* = 45,0$; $b^* = 9,5$ aufweisen. Im CIELAB-System sind ähnlich wie im CIELUV-System auch *Buntheit*, *Farbtendifferenz*, *Farbtonwinkel*

Probe A:	$L^* = 42,8$	$a^* = 45,0$	$b^* = 9,5$
Probe B:	$L^* = 48,9$	$a^* = 40,5$	$b^* = 12,3$
Farbabweichung:	$\Delta L^* = +6,1$	$\Delta a^* = -4,5$	$\Delta b^* = +2,8$

und andere farbmtrisch relevante Werte darstellbar, bzw. errechenbar. Im Vergleich zum CIELUV-System ist einzig die Sättigung als solche mathematisch nicht definiert (jedoch im a^*b^* -Wert zusammen mit der Buntheit enthalten).

$$\text{Buntheit } C_{ab}^* = (a^{*2} + b^{*2})^{\frac{1}{2}}$$

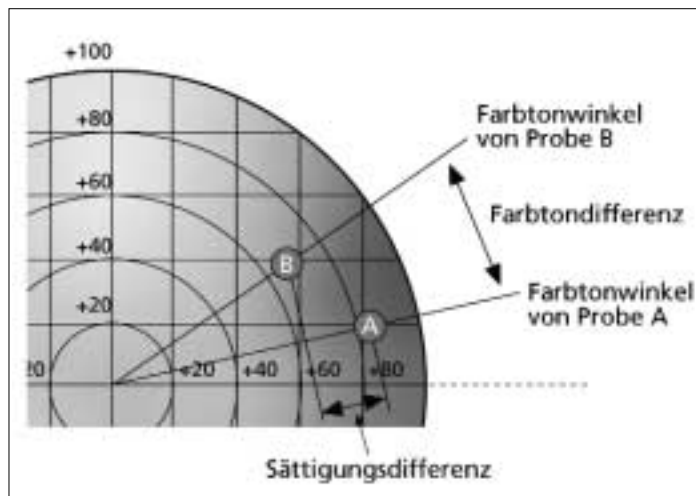
$$\Delta H_{ab}^* = \left[(\Delta E_{ab}^*)^2 - (\Delta L^*)^2 + (\Delta C_{ab}^*)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Oft ist es notwendig, *Farbabweichungen* auszudrücken, das heisst, die farblichen Unterschiede zweier Farben numerisch zu erfassen. Möglich ist dies nur mit einem Farbsystem, das *visuell*

gleichabständig ist (z.B. CIELUV und CIELAB).

Nehmen wir, um dies zu erläutern, die Masszahlen des oben beschriebenen kräftigen Karminrots (Probe A) und vergleichen sie mit den Masszahlen einer zweiten Probe (Probe B), deren Farbe geringfügig blasser ist als diejenige der ersten Probe. Die Gesamtheit der Abweichung setzt sich zusammen aus der *Farbtendifferenz* (ΔH^*), der *Helligkeitsdifferenz* (ΔL^*) und der *Buntheitsdifferenz* (ΔC^*). Mathematisch sind diese drei Komponenten mit dem *Farbabstand* (ΔE) wie folgt verbunden:

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



Darstellung von
Farbwert-
Unterschieden

Der Farbabstand ΔE ist eine Distanz im Farbraum und enthält daher kein Vorzeichen. Die drei anderen Komponenten dagegen sind Grössen, die sowohl negativ als auch positiv sein können.

Als weitere Grösse wird vom *Farbtonwinkel* (h) gesprochen; es ist dies der Winkel, unter dem ein Farbton vom Zentrum des Farbsystems aus gesehen wird, ausgedrückt in einer Winkelfunktion.

$$h_{ab} = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

Die Farbtendifferenz ist positiv, wenn sich ein Anstieg des Farbtonwinkels ergibt, negativ bei einer Abnahme des Farbtonwinkels.

Farbmessgeräte

Instrumente zur Farbmessung ermöglichen die messtechnische Erfassung einer Farbe und die Bestimmung von Farbabständen bzw. Farbtendifferenzen.



Spektralfotometer von Gretag

zen. Sie können Masszahlen wahlweise für mehrere Farbsysteme wie CIE Yxy (CIE 1931), CIE L'u'v' (CIE LUV) und CIE L*a*b* (CIELAB) liefern. Neben der Angabe der Masszahlen sind einzelne Geräte in der Lage, auf ihrem Display den Farbort grafisch darzustellen.

Farbmessgeräte müssen *das menschliche Auge simulieren*, dabei aber alle *präzis auf derselben Augenempfindlichkeitskurve basieren*, denn es ist nicht die Aufgabe eines Messgerätes, das individuelle Auge des Geräteanwenders oder dasjenige seines Farb-Kommunikationspartners zu simulieren. Aus diesem Grunde beziehen sich Farbmessgeräte strikte auf das Auge des *CIE-Normalbeobachters*, wodurch eine immer gleichbleibende Vereinbarung getroffen wird.

Die eingesetzten Farbmessgeräte lassen sich in zwei verschiedenen arbeitende Typen einteilen: eigentliche Spektralfotometer, die nach dem Spektralverfahren arbeiten und Fotometer, die nach dem Dreibereichsverfahren arbeiten.

Spektralfotometer

Mit dem Spektralfotometer wird das empfangene Licht der Farbprobe (bei Aufsichtsprüfung das von der Probe reflektierte Licht, wobei die Probe mit einer im Messgerät eingebauten Lichtquelle beleuchtet wird) durch ein Prisma (Dispersion) oder durch ein Gitter (Beugung) in seine einzelnen Wellenlängen zerlegt. Einzelne Wellenlängenpakete, z.B. über jeweils 10 nm, werden dabei zu einem Messwert zusammengefasst. In diesem Fall hat das Messgerät eine *Bandbreite* von 10 nm, was in der Praxis den besten Kompromiss zwischen Genauig-

keit und Anzahl der Messwerte darstellt. Da die einzelnen Messwerte vom integrierten Rechner verarbeitet werden müssen, ist es notwendig, die Anzahl der Messwerte auf ein vernünftiges Mass zu reduzieren, um eine rasche Messung zu gewährleisten.

Dreibereichs-Fotometer

Preisgünstiger als Spektralfotometer lassen sich Geräte bauen, die das von einem Farbmuster reflektierte Licht über *drei Filter* nacheinander auf einen fotoelektrischen Empfänger werfen. Die farbliche Durchlässigkeit der drei Filter muss dabei so sein, dass die jeweilige spektrale Empfindlichkeit der fotoelektrischen Messzelle durch jeden der drei Filter genau den CIE-Spektralwertkurven entsprechen oder mindestens linear zu diesen in Beziehung gebracht werden können.

Das Hauptproblem bei der Konstruktion von Dreibereichs-Fotometern liegt bei der Herstellung der Filter, mit denen die Empfangscharakteristik der Messzelle an die CIE-Normspektralwertkurven angepasst werden muss. Diese müssen nämlich zusätzlich noch die spektrale Verteilung der benutzten Lichtquelle und die optischen Eigenschaften des Messgerätes berücksichtigen.

In der Praxis werden üblicherweise die teureren Spektralfotometer verwendet, wenn es darum geht, präzise, absolute Farbwerte zu bestimmen. Dazu eignen sich Dreibereichs-Fotometer weniger, sie genügen jedoch den Anforderungen, wenn nur Farbdifferenzen zu bestimmen sind.

Farbmessgeräte eignen sich, je nach Anordnung der Lichtquelle zur Analyse-Einrichtung der Messzelle, entweder zur Messung von lichtundurchlässigen, opaken Aufsichtsproben oder für transparente Proben. Einzelne Geräte können umgestellt werden und beide Probenarten messen.

Für eine objektive und reproduzierbare Farbabbildung und die perfekte, eindeutige und daher unmissverständliche Farb-Kommunikation sind Farbmessgeräte nach dem CIE-Standard unumgänglich. Sie werden früher oder später auch in jenen Branchen Eingang finden, wo heute noch Farbabbildungen visuell mit Farbmustersammlungen durchgeführt werden.

Densitometer

Aufgrund des gerätetechnisch ähnlichen Aufbaus von Dreibereichs-Fotometern mit den in der grafischen Industrie und Fotografie benutzten Densitometern (siehe Band 2 Seite 18 ff) könnte der Eindruck entstehen, Densitometer eignen sich ebenso zur Farbwertmessung. Das ist aber nicht der Fall, weil herkömmliche Densitometer nicht auf das Auge des CIE-Normalbeobachters abgestimmt sind.

Das Transmissionsmaximum der drei Messfilter (B,G,R) eines Densitometers muss vielmehr mit dem Absorptionsmaximum der drei subtraktiven Grundfarben Cyan, Magenta und Yellow präzise zusammenfallen. Messbar sind damit keine Farbwerte, sondern nur *Farbkonzentrationen*, angegeben als Dichtewerte oder als prozentuale Flächendeckungswerte.

Farbtemperatur-Messgeräte

In der Fotografie und der Beleuchtungstechnik wird eine weitere Messgeräteart verwendet, die bezüglich ihres inneren Aufbaus, sowohl den Dreibereichs-Fotometern, wie auch den Densitometern ähnlich sind, die jedoch einem gänzlich anderen Zweck dienen.

In der Farbfotografie besteht das Problem, dass die spektrale Zusammensetzung des Aufnahmelichtes (*Verteilungstemperatur* und *Farbtemperatur*, siehe Band 1 Seite 132 ff) mit der farblichen Empfindlichkeit des Aufnahmematerials übereinstimmen muss, um einen Farbstich zu vermeiden. Es besteht daher oft die Notwendigkeit, die Verteilungs- oder Farbtemperatur des Aufnahmelichtes messtechnisch zu erfassen und damit Farbe und Dichte eines *Konversionsfilters* zu bestimmen, um das durch das Objektiv fallende Aufnahmelicht an die Sensibilisierung des verwendeten Filmmaterials anzupassen (siehe Seite 87).

Einfache *Verteilungstemperaturmesser*, mit denen man nur die Verteilungstemperatur, das heisst, das Verhältnis zwischen dem blauen und dem roten Anteil des Lichtes messen kann, enthalten in ihrem Messkopf, der das einfallende Licht diffus streut, ein rotes und ein blaues *Breitbandfilter* und hinter jedem Filter eine fotoelektrische Messzelle. Das Rechenwerk ermittelt aus dem relativen Verhältnis die Verteilungstemperatur in KELVIN (K) oder in reziproken Megakelvin (MK^{-1} bzw. MIREL) und kann Angaben über Farbe und Dichte eines zu verwendenden Konversionsfilters für eine bestimmte Filmsensibilisierung (Kunstlichtfilm, Tageslichtfilm) machen.

Dreibereichs-Farbtemperaturmesser enthalten drei Breitbandfilter in den Farben Blau, Grün und Rot. Wie bei den einfachen Verteilungstemperaturmessern wird auch hier eine Vergleichsmessung zwischen Blau und Rot gemacht und das Resultat in derselben Weise angezeigt. Die gleichzeitig vorgenommene Grünmessung wird auch noch mit den Werten der Blau- und Rot-Messung verglichen. Der integrierte Rechner verarbeitet diese Vergleichswerte und zeigt zusätzlich zu der Verteilungstemperatur noch an, mit welchem Farb-Korrekturfilter (Magenta oder Cyan) die ermittelte Konversionsfilterung ergänzt werden sollte, um – vor allem bei Lichtquellen mit nicht ganz kontinuierlichem Spektrum – ein neutraleres Bildresultat zu erhalten.



Farbtemperaturmesser Minolta Colormeter III F

Gleich wie mit Densitometern können mit Farbtemperatur-Messgeräten keine Farbwerte gemessen werden. Die spektrale Durchlässigkeit der eingesetzten Filter haben keinen Bezug zum Auge des CIE-Normalbeobachters. Die Lichtdurchlässigkeit entspricht im Prinzip derjenigen von Breitband-Selektionsfiltern (siehe Seite 101) und somit der spektralen Empfindlichkeit der drei unterschiedlich sensibilisierten Schichten eines Farb-Aufnahmefilmes.

Farbordnungssysteme

Eine Sammlung von Farbmustern, die in einer möglichst empfindungsmässig gleichabständigen Klassierung vorhanden sind, bilden ein sogenanntes *Farbordnungssystem*. Derartige Farbmustersammlungen, die zur Kennzeichnung ebenfalls irgendwelche Ordnungsnummern oder Zeichenkombinationen verwenden, werden in verschiedenen Branchen zur Farbkommunikation und vor allem für die visuelle Farbabmusterung verwendet.

Von einem *Farbordnungssystem* kann man nur dann sprechen, wenn die Farbmuster einen bestimmten Farbraum klar definieren und empfindungsmässige Grössen wie Farbton, Sättigung und Helligkeit genügend präzise beschreiben. Um Farbmustersammlungen tatsächlich einsetzen zu können, müssen 30 bis 40 Farbtöne in bis zu 10 Helligkeits- und Sättigungsstufen vorliegen, was eine grosse und nicht ganz einfach zu handhabende Zahl von Farbmustern ergibt. Um ein vernünftiges Handling zu ermöglichen, ist die Zahl der Farbmuster

gebräuchlicher Systeme als Kompromiss auf etwa 500 bis 1700 Muster beschränkt.

Brauchbare Farbmustersysteme müssen aber nicht nur gleichabständig sein, es sollte dazu auch unbedingt eine numerische Beschreibung in Form von CIE-Farbwerten vorliegen. In diesem Fall kann mit Hilfe einer Farbmustersammlung eine Farbe für einen bestimmten Verwendungszweck definiert und bei der Ausführung mit Hilfe der CIE-Masszahlen-Beschreibung auch wirklich messtechnisch überwacht und kontrolliert werden.

Die ersten Farbordnungssysteme entstanden in der Absicht, diese zur reinen, präzisen Farbbeschreibung zu benutzen. Diese Aufgabe ist heute bedeutungslos geworden, da präzise Farbmessgeräte eine weitaus bessere und universellere Farbkommunikation erlauben und ihr Einsatz daher auch bereits viel verbreiteter ist.

Farbmuster haben aber trotzdem ihre Bedeutung, indem sie beispielsweise während der Ausbildung die Fähigkeit fördern, Farben visuell beurteilen zu können. Designer und Farbgestalter arbeiten gerne mit Farbabmusterungs-Systemen um die Farbgebung eines Objekts zu planen und vorzustellen. Allerdings muss man sich bewusst sein, dass die in solchen Mustern verwendeten Farbstoffe in den seltensten Fällen identisch sind mit den Farbpigmenten, die bei der Ausführung des Projekts tatsächlich verwendet werden und somit beträchtliche Abweichungen entstehen können.

Ob überhaupt mit einem bestimmten Farbordnungssystem gearbeitet werden kann, hängt massgeblich davon ab, ob

und wie weit das verwendete System innerhalb der betreffenden Branche und Ländern praktisch vertreten ist.

Das amerikanische *Munsell-System* wird naturgemäss vorwiegend in den USA verwendet, während in Europa eher das deutsche *DIN-System* (DIN 6164) und das schwedische *NCS-System* verbreitet ist. Weitere Farbordnungssysteme sind beispielsweise das *OSA-System* (Optical Society of America) sowie das seit 1986 erhältliche ungarische *Coloroid-System*.

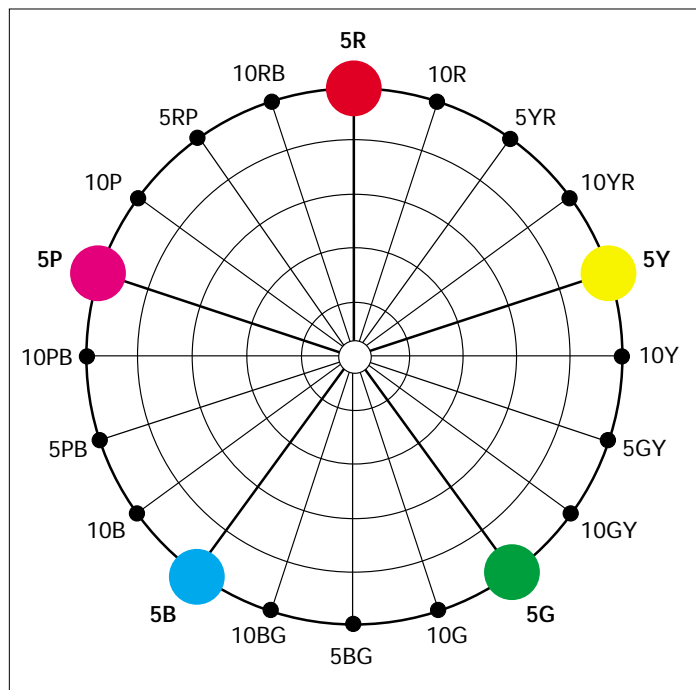
Eine gewisse Verbreitung hat auch das *RAL-System* (RAL-DS), das eigentlich eine Farbmustersammlung auf der Basis des CIELAB-Farbraumes darstellt, das aber, wie beispielsweise das Farbmischsystem *PANTONE*, nicht eigentlich ein Farbordnungssystem darstellt, weil insbesondere keine gleichabständige Klas-

sierung mit empfindungsmässigen Grössen vorhanden ist.

Innerhalb der besonders interessierenden Fotografie und ebenso innerhalb der gesamten grafischen Industrie sind Farbordnungssysteme weitgehend bedeutungslos. Man sollte aber um ihre Existenz und ihre Problematik wissen, weil wir innerhalb der Kommunikation mit farbgestaltenden Berufen vermutlich noch längere Zeit damit konfrontiert werden. Als Beispiel greifen wir von den wichtigsten Systemen nur das Munsell- und das NCS-System heraus.

Das Munsell-System

Im *Book of Color* von Munsell, das älteste Farbordnungssystem, das erstmals



Farbkreis im Munsell-System

1915 von *Albert H. Munsell* herausgegeben wurde und dessen Gleichabständigkeit im Jahre 1943 von der *OSA* (Optical Society of America) verbessert wurde, ist der Farbton erstes Ordnungsprinzip. In einem Farbkreis sind 5 *Hauptfarbtöne* gleichabständig angeordnet: Rot (R), Gelb (Y), Grün (G), Blau (B), Purpur (P). Durch die Mischung nebeneinander liegender Hauptfarbtöne entstehen weitere 5 Farben, was schliesslich einen 10-teiligen Farbkreis ergibt:

<i>Rot</i>	<i>5R</i>
Purpurrot	5RP
<i>Purpur</i>	<i>5P</i>
Blauviolett	5PB
<i>Blau</i>	<i>5B</i>
Blaugrün	5BG
<i>Grün</i>	<i>5G</i>
Gelbgrün	5GY
<i>Gelb</i>	<i>5Y</i>
Orange	5YR

Eine weitere Unterteilung in 10 Abstufungen ergibt insgesamt 100 ganzzahlige Farbtöne, die ihrerseits mit Dezimalstellen noch weiter abgestuft werden können. Für jeden Farbton können 10 Helligkeitsstufen und bis zu 16 Bunttheitsstufen unterschieden werden (letzteres ist aber bei vielen Farbtönen nicht maximal erreichbar).

Das *Munsell Book of Color* umfasst 40 Blätter, auf denen für je einen bestimmten Farbton die verfügbaren Helligkeits- und Bunttheitsstufen veranschaulicht werden. Das Farbmusterbuch gibt es mit matten (1277) oder glänzenden (1450) Mustern. Eine Farbbezeichnung in diesem System könnte zum Beispiel 5YR4/6 lauten. Dabei handelt es sich um ein rötliches Gelb, das zwischen Rot (10R) und

Gelbrot (10YR) liegt, mit der Helligkeit 4 (von 10 möglichen Stufen) und der Bunttheit 6 (von 16 möglichen Stufen).

In der Regel werden anstelle der deutschen Koordinaten-Bezeichnungen die englischen Ausdrücke *Value* (Helligkeit), *Hue* (Farbton) und *Chroma* (Bunttheit) verwendet.

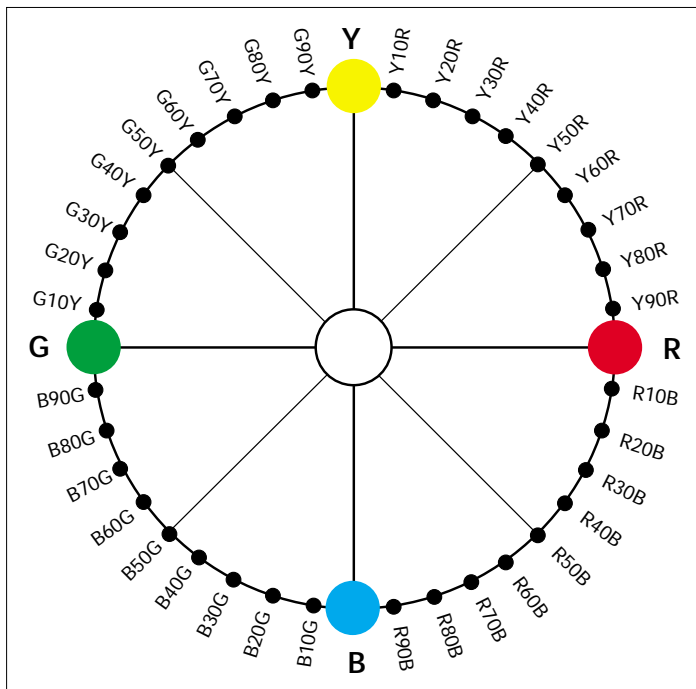
Die visuelle Gleichabständigkeit des Systems ist bei einem Betrachtungslicht der Lichtart C (siehe Seite 67) gewährleistet.

Natural Colour System (NCS)

Das schwedische NCS-System (Autor: *Anders Hård*) verwendet als Farbraumkoordinaten nicht wie üblich Farbton und Sättigung, sondern den Gelb/Blau und den Grün/Rot-Anteil, gemäss Gegenfarbentheorie des deutschen Physiologen *Ewald Hering* (1834–1918).

Begründet wird das gewählte Koordinatensystem mit der Bemerkung, dies sei für den farbmtrischen Laien anschaulicher. Herings *Gegenfarbentheorie* beruht darauf, dass alle wahrgenommenen Farben auf sechs grundlegenden Farbempfindungen basieren, wobei je zwei zueinander gegensätzlich, das heisst, komplementär sind: Rot/Grün; Blau/Gelb; Weiss/Schwarz. Jede Farbe kann daher mit Ihrem Anteil an diesen sechs «Elementarfarben» bewertet werden, wobei für eine einzelne Farbe jeweils nur drei verschiedene Anteile möglich sind.

NCS hat aufgrund dieser Überlegung mittels Experimenten und eigenen «Normalbeobachtern» ihre Farbabstufungen und Farbmuster erstellt. Der Farbkreis ist im NCS-System in vier Quadranten ein-



Farbkreis
im NCS-System

geteilt, die sich aus den Achsen Rot/Grün und Blau/Gelb ergeben. Jeder Quadrant ist seinerseits in 100 Farbtöne unterteilt.

Weiter gilt die Vereinbarung, nach der die Summe von Weiss-, Schwarz- und Buntanteil immer 100 beträgt. Besitzt eine bestimmte Farbe beispielsweise einen Grünanteil von 40%, einen Gelbanteil von 10% und einen Schwarzanteil von 20%, so beträgt der Weissanteil automatisch $100 - (40 + 10 + 20) = 30\%$. Der gesamte Buntanteil ist die Summe der einzelnen Farbanteile (wobei maximal deren zwei vertreten sein können). Dieser wird im NCS-System als *Vollfarbanteil* bezeichnet.

Die Farbwertbezeichnung der vorher erwähnten Farbe lautet im NCS-System: 2030 G20Y. Die Farbanteile 40% Grün und 10% Gelb entsprechen bei einer

Skala mit 100 Farbtönen dem Verhältnis 80 Teile Grün und 20 Teile Gelb. Die Kennzeichnung an zweiter Stelle G20Y charakterisiert dieses Verhältnis. Die davor stehende Kennzeichnung 2030 bedeutet eine Schwarzanteil von 20% und einen Weissanteil von 30%.

Von NCS sind insgesamt 1412 matte und 558 glänzende Farbmuster erhältlich.

Äusserst problematisch sind, sowohl beim Munsell-System, wie auch beim NCS-System, die verwendeten Farbbezeichnungen, die sprachlich völlig verwirrend sind, weil sie sich mit der Namensgebung in physikalisch begründeten Farbsystemen verwechseln lassen, aber nicht mit diesen übereinstimmen. So ist im Munsell-System die zu Rot komplementäre Farbe zwar als Blaugrün

(BG) definiert, das eigentliche Blaugrün (was ja nichts anderes als Cyan ist) dagegen wird als Blau (B) bezeichnet. Im NCS-System wird die Komplementärfarbe von Gelb (Y) zwar korrekt mit Blau (B) bezeichnet, diese indessen wie bei Munsell farblich als Cyan dargestellt. Und komplementär zu Rot (R) ist bei NCS Grün (G). Dieser unlogische und aus Sicht der physikalischen Farbentstehung und dem Prinzip des Farbsehens des menschlichen Auges gar völlig falsche Aufbau, stammt zwar von der Forderung nach empfindungsmässiger Gleichabständigkeit der Farben bei der vorgegebenen Betrachtungslichtart, ist aber der unmissverständlichen Farbkommunikation nicht förderlich.

Wie beim Munsell-System ist auch beim NCS-System eine direkte formelmässige Umrechnung der Farbzahlen in CIE-Farbwerte nicht möglich, was als grösster Nachteil anzukreiden ist, denn bei allen übrigen (weniger verbreiteten Farbordnungssystemen) ist dies möglich. Immerhin kann man bei beiden Systemen mittels Tabellen die CIE-Werte XYZ annähernd ermitteln und die übrigen CIE-Farbwertzahlen daraus errechnen.

Aufgrund der angestrebten Benutzerfreundlichkeit (nach Werbeaussage der NCS-System-Propagandisten sei dies das benutzerfreundlichste Farbordnungssystem überhaupt) ist man beim NCS-System einen Kompromiss bezüglich Gleichabständigkeit eingegangen. Man nimmt in Kauf, dass durch die Einteilung in vier Quadranten die Mischfarben zwischen Rot und Blau mehr unterscheidbare Farbtöne enthalten, als in den anderen drei Quadranten. Das Munsell-System weist deshalb eine Farbkreiseinteilung von fünf Segmenten auf.

Normlichtarten

Für Farbstichbestimmungen, Spektralmessungen und Farbabmusterungen kann nicht eine beliebige Lichtquelle verwendet werden. Neben der Forderung, dass dieses Licht «unbunt», das heisst, der Mittelpunktsvalenz (siehe CIE-Farbendreieck Seite 52/53) entsprechen muss, sollten auch alle Wellenlängen des sichtbaren Lichtbereichs vorkommen und keine Spektrallinie besonders dominieren. Es liegt auf der Hand, dass Lichtquellen, in deren Spektralverteilung nicht alle Wellenlängen vertreten sind (z.B. Gasentladungslampen), eine aussagefähige Abmusterung verhindern und auch nicht als Aufnahmelicht innerhalb der Farbfotografie – wo der Dreifarbenauszug ja bei der Aufnahme gemacht wird – gebraucht werden können.

Als Mass für die Eignung einer Lichtquelle zur Farbabmusterung als Beleuchtungslichtquelle innerhalb der Farbfotografie dient der nach DIN 5035 definierte *Farbwiedergabeindex R_a* .

Ermittelt wird der Farbwiedergabeindex mit Testfarben, wobei die Übereinstimmung des Farbeindrucks dieser Testfarben bei Beleuchtung mit der zu untersuchenden Lichtquelle mit dem Farbeindruck bei Beleuchtung mit einer Bezugslichtart visuell und messtechnisch verglichen wird. Ist die Übereinstimmung 100%ig, beträgt der Farbwiedergabeindex 100.

In den technischen Datenblättern von Leuchtenherstellern ist der Farbwiedergabeindex angegeben. Für Farbabmusterungen und für die Verwendung als Aufnahmelichtquelle in der Farbfotografie sollte R_a mindestens 85 sein.

Dieser Wert kann beispielsweise von Glühlampen, Halogenlampen, Halogen-Quecksilberlampen, Xenon-Lampen und HMI-Lampen erreicht werden, sowie von speziell für diesen Zweck im gleichen Leuchtenkörper (z.B. Leuchttisch) gemischten Leuchtstofflampen.

Um für die Betrachtung von Gegenständen, die Farbabmusterung und die Korrekturfilterbestimmung bei der Farbstichermittlung einheitliche Voraussetzungen zu schaffen, genügt es nicht, nur den zu verwendenden Lichtquellentyp anzugeben. Denn künstliche Lichtquellen können von Exemplar zu Exemplar eine gewisse Streuung aufweisen und zudem empfindlich von der Betriebsspannung abhängig sein. Vielmehr muss eine genau bestimmte spektrale *Strahlungsverteilung* festgelegt werden.

Für die Festlegung internationaler Normen über die Lichtart ging CIE zunächst vom Glühlampenlicht aus. Bei dieser Lichtart ist eine Normierung verhältnismässig einfach, weil durch das Einhalten der vorgeschriebenen Betriebsbedingungen eine genügend konstante Strahlungsverteilung erreicht werden kann. Normiertes Glühlampenlicht mit einer Verteilungstemperatur von 2856K wird als *Normlichtart A* bezeichnet.

Als nächsten Schritt versah man eine Lichtquelle der Normlichtart A mit einem blauen Konversionsfilter und gelangte so zu einer spektralen Strahlungsverteilung mit der Verteilungstemperatur von 6750K, die charakteristisch für ein Tageslicht ist. Diese Lichtart wird als *Normlichtart C* bezeichnet.

Gegenüber echtem Tageslicht hat die Normlichtart C jedoch den Nachteil, praktisch kein UV zu enthalten. Dies

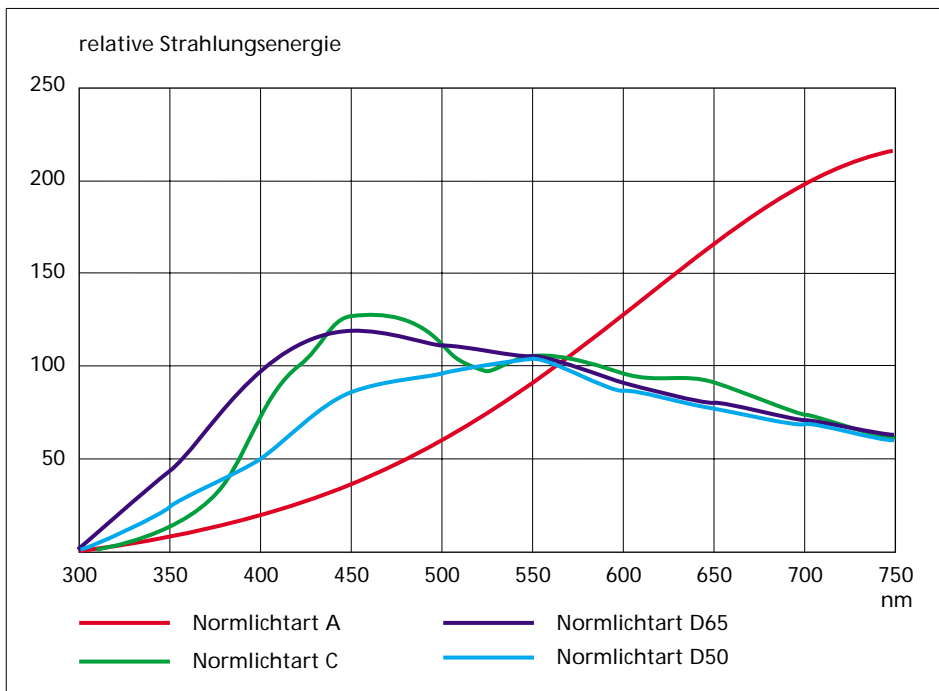
wäre kein Nachteil, würde man immer nur nicht fluoreszierende Proben und Objekte betrachten. Viele Farbstoffe, so auch optisch aufgehellte Papiere, fluoreszieren indessen. Ihr farbliches Aussehen wird durch den UV-Anteil von natürlichem Tageslicht ganz entscheidend verändert.

Aus diesem Grunde hat CIE im Jahre 1963 eine weitere Normlichtart definiert, die dem natürlichen mittleren Tageslicht samt UV-Anteil entspricht.

Gegenüber der Normlichtart C unterscheidet sich diese neue Normlichtart vor allem im unsichtbaren Spektrumsteil zwischen 300 und 380nm. Diese Lichtart wird als *Normlichtart D65* bezeichnet, wobei die Zahl 65 auf eine Farbtemperatur von 6500K hinweist.

Im Gegensatz zu den früheren Normierungen wählte man für die Lichtart D65 nicht eine bestimmte bekannte Lichtquelle. Das hat zwar den Nachteil, dass die Strahlungsverteilung D65 technisch nicht ganz so einfach und daher oft auch nicht so exakt simuliert werden kann. Der Vorteil ist, dass man gleichzeitig eine lückenlose Serie von Tageslicht-Normlichtarten im Bereich von 4000 bis 25000K mit dem Bezeichnungsbuchstaben D festlegen konnte. Möchte man beispielsweise für die Farbtemperatur von 5500K eine genormte Strahlungsverteilung benutzen, so kann diese dem CIE-Tabellenwerk für die Tageslichtart D unter der Normenbezeichnung D55 entnommen oder berechnet werden.

Für die grafische Industrie und die Fotografie hat auch die Normlichtart D50 Bedeutung erlangt. Dieses annähernd neutralweisse Tageslicht wird zur Abmusterung von fotografischen Vorlagen (Dias und Farbbilder) verwendet, wäh-



Spektrale Strahlungsverteilung der wichtigsten Normlichtarten

rend D65 das empfohlene Abmusterungslicht für alle übrigen Anwendungen ist.

In der grafischen Industrie verwendet man meistens Farbdias als Druckvorlagen. Das Farbdiamaterial ist aber eigentlich für die Projektion bei Kunstlicht mit der Verteilungstemperatur von Halogenstrahlern 3200K ausgelegt. Zur Abmusterung müsste daher korrekterweise D40 verwendet werden (tiefere Verteilungs- bzw. Farbtemperaturen sind bei den Tageslichtarten D nicht definiert). D40 wäre aber für die Abmusterung von Andrucken, die mit der fotografischen Vorlage verglichen werden, zu gelblich. Deshalb hat man sich im Sinne eines Kompromisses für diesen Zweck auf die Normlichtart D50 geeinigt. Die ISO-

Norm 3446 regelt die Abmusterung fotografischer Vorlagen unter sich oder mit Andrucken und schreibt die Normlichtart D50 verbindlich vor.

Die Abmusterung und Kontrolle von Aufgedruckten unter sich oder im Vergleich zu Andrucken erfolgt dagegen mit der Normlichtart D65.

Praxis der Abmusterung

Die kritische Abmusterung fotografischer Vorlagen wie Diapositive unter sich, Diapositive mit Andrucken oder Prints, sowie Prints unter sich, erfolgt mit der Normlichtart D50. Zwar könnte die Abmusterung von Aufsichtsbildern unter sich ebenso gut mit der Normlichtart



Leuchttisch D50 mit Betriebsstundenzähler

D65 erfolgen. Dies würde aber bedeuten, dass im Fotostudio zwei verschiedene Normlichtarten vorhanden sein müssten, was nicht besonders sinnvoll wäre. Für das Abmustern von Durchsichtsvorlagen wird ein *Leuchttisch* mit der Normlichtart D50 benötigt. Solche Leuchttische sind mit speziellen Leuchtstoffröhrensätzen ausgerüstet, welche die vorgeschriebene spektrale Strahlungsverteilung garantieren. Wenn möglich sollte der Leuchttisch mit einem *Betriebsstundenzähler* versehen sein, damit man weiss, wann der Röhrensatz ausgetauscht werden muss.

Die optimale spektrale Strahlungsverteilung ist bei Leuchtstoffröhren nur etwa während den ersten 1000 Betriebsstunden gewährleistet. Zudem muss man darauf achten, den Leuchttisch einige Minuten vor der kritischen Abmusterung einzuschalten, denn die darin verwendeten Röhren erreichen erst nach einigen Minuten ihre korrekte Strahlungsverteilung.

Werden nur Durchsichtsvorlagen unter sich abgemustert, genügt ein solcher Leuchttisch. Beim vergleichenden Abmustern zwischen Durchsichts- und Aufsichtsbildern dagegen wird zusätzlich noch ein *adäquates Aufsichtslicht* der Normlichtart D50 benötigt. Im grafischen Zubehörhandel sind entspre-

chende Kombinationen erhältlich, die allerdings sehr kostspielig sind. Zur Not eignet sich für die Aufsichtsbeleuchtung auch ein zweiter Leuchttisch, der umgekehrt mit einer Aufhängevorrichtung über dem unteren Leuchttisch installiert wird.

Da das Resultat der Abmusterung nicht nur von der spektralen Strahlungsverteilung der Lichtquelle abhängig ist, sondern auch von deren *Helligkeit*, ist zu beachten, dass beim Aufsichtsbild das Papierweiss gleich hell erscheinen soll wie die hellste Stelle des Durchsichtsbildes. Gemäss Normierung ist dies (wegen der höheren Graudichte des Dias) dann der Fall, wenn die Leuchtdichte der Durchsichtslichtquelle doppelt so hell ist, wie diejenige der Aufsichtslichtquelle. Die ISO-Norm 3664 schreibt für die Durchsichtslichtquelle eine Beleuchtungsstärke von 4000lx und für die Aufsichtslichtquelle eine solche von 2000lx mit einer Toleranz von ± 500 lx vor.

Diese hohe Beleuchtungsstärke ermöglicht die absolut kritische Abmusterung, weshalb sie in Reproanstalten durchwegs verwendet wird. Weil bei dieser hohen Beleuchtungsstärke in den dunklen Bildstellen noch sehr viele Einzelheiten zu erkennen sind, die später beim Resultat in normal beleuchteten Arbeits- und Wohnräumen nicht mehr gesehen werden können, erwähnt die ISO-Norm noch zwei weitere Fälle: Für die «routinemässige» Beurteilung eine Beleuchtungsstärke von 800/1600lx (Beleuchtungsstärke wie sie in sehr gut ausgeleuchteten Arbeitsräumen und in Schaufenstern herrscht), sowie für die «praktische» Beurteilung 500/1000lx (Beleuchtungsstärke für übliche Arbeits- und Wohnräume).

Praktisch bedeutet dies: Für die kritische Abmusterung und die KorrekturfILTERbestimmung verwendet man die vorgeschriebene Beleuchtungsstärke von 2000/4000 lx, wobei man danach die Abmusterung mit der niedrigeren Beleuchtungsstärke kontrolliert, die der für die Betrachtung des Bildresultats zu erwartenden Beleuchtungsstärke (z.B. Schaufensterbeleuchtung, Arbeitsraum- oder Wohnraumbelichtung) entspricht. Insbesondere kann dadurch festgestellt werden, wieviel Einzelheiten der letztliche Betrachter in den Bildtiefen noch erkennen kann.

Um die geschilderte optimale Beurteilung durchführen zu können, werden (recht teure) Beurteilungslichtquellen benötigt, deren Beleuchtungsstärke sich entsprechend regeln lässt.

Bei Leuchttischen wird in den technischen Spezifikationen nicht die Beleuchtungsstärke angegeben, sondern vielmehr die *Leuchtdichte* (siehe Band 1, Seite 139) mit der Masseinheit cd/m^2 . Unter Einbezug der Lichtstreuung entspricht in diesem Fall 1 lx einer Leuchtdichte von $0,318 \text{ cd}/\text{m}^2$. Die neueste Fassung der ISO-Norm 3664 gibt bei der geforderten Beleuchtungsstärke von 4000 lx für Durchsichts-Leuchttische den umgerechneten, gerundeten Leuchtdichtewert mit $1400 \text{ cd}/\text{m}^2 (\pm 300 \text{ cd}/\text{m}^2)$ an.

Weiter muss bei der Abmusterung das Umfeld beachtet werden. Werden Durchsichtsvorlagen unter sich abgemustert, müssen diese mit einem schwarzen Passepartout vollständig abgedeckt sein und zwar so, dass keinerlei Leuchtfläche mehr zu sehen ist. Für das Abmattern von Kleinbilddias schlägt die erwähnte ISO-Norm anstelle des Leucht-

tisches die Doppelprojektion im völlig verdunkelten Raum vor, was allerdings in der Praxis eher selten befolgt wird.

Werden dagegen Durchsichtsvorlagen mit Andrucken oder Prints verglichen, die in der Regel einen weissen Rand aufweisen, so muss beim Abdecken der Dias dieser weisse Rand simuliert werden, indem man um das Dia herum einen proportional ähnlich wirkenden Teil der Leuchttischplatte durchscheinen lässt.

Metamerie

Das menschliche Auge kann verschiedene Farben als absolut identisch empfinden. Beispielsweise können gleiche Farbtöne durch verschieden anteiliges Mischen von Spektralfarben entstehen (siehe dazu auch Seite 31). Derartige Farben, die zwar für das Auge gleich aussehen, die indessen anders zusammengesetzt sind, bezeichnet man als *metamer* oder *bedingt-gleiche Farben*.

Betrachten wir ein weisses Papier zusammen mit einem leicht rotgefärbten bei rotem Dunkelkammerlicht, so sehen beide Papiere gleich aus. Diese Erscheinung, nach der die verschieden gefärbten Papiere bei Betrachtung mit rotem Licht gleich aussehen, wird als *Metamerie* bezeichnet. Dass bei Beleuchtung mit farbigem Licht unterschiedliche Körperfarben gleich aussehen können, wissen wir alle aus Erfahrung, und so haben wir mit dieser Form der Metamerie kaum Probleme. Problematischer sind zwei Körperfarben, die beispielsweise bei einem bestimmten Tageslicht absolut identisch aussehen, die aber bereits bei

geringfügiger Änderung der spektralen Zusammensetzung des Lichtes ihr Aussehen verändern und verschiedenfarbig werden. Solche metamere Farbabweichungen treten nur dann eklatant und störend auf, wenn die zu vergleichenden Farben mit verschiedenen Pigmenten (oder generell mit verschiedenen farbgebenden Mitteln) hergestellt worden sind.

Definitionsgemäss versteht man unter metameren Farben Farbvalenzen, die zwar zu verschiedenen Farbreizen gehören, aber unter bestimmten Bedingungen für das menschliche Auge gleich aussehen. Bei bedingt-gleichen Körperfarben ist die spektrale Zusammensetzung des beleuchtenden Lichtes eine der wichtigsten Voraussetzungen für gleiches Aussehen. Ändert man die relative spektrale Strahlungsverteilung des Betrachtungslichtes, wird die visuelle Gleichheit im allgemeinen aufgehoben.

Von Kodak gibt es beispielsweise eine kleine Falt-Karte, den *Kodak Color Viewing Light Selector* (P3-180), der zwei magentafarbene Felder mit metameren Farben enthält. Die beiden Farbfelder wirken dann für das Auge absolut identisch, wenn die Normlichtart D50 vorliegt. Bei anderer Beleuchtung sieht man zwei deutlich unterschiedliche Farbtöne. Das einfache Hilfsmittel erlaubt rasch und unkompliziert herauszufinden, ob ein vorhandener Leuchttisch oder ein vorhandenes Betrachtungslicht für die farbliche Abmusterung geeignet sind oder nicht.

In der Farbfotografie können metamere Farben, selbst bei gleichem Licht – anders als mit dem Auge – unterschiedlich dargestellt werden. Typisch dafür ist

das Blau von bestimmten Blumen (zum Beispiel Astern, Clematis), das einen beträchtlichen Anteil von langwelligem Rot reflektiert, welches vom menschlichen Auge nicht wahrgenommen werden kann, das auf dem fotografischen Farbbild aber das Blau deutlich gegen Magenta tendieren lässt.

Ein anderes Beispiel sind bestimmte Textilfarbstoffe, insbesondere olivgrüne oder jeansblaue, die selbst bei gleichbleibendem Elektronenblitzlicht auf verschiedenen Filmmarken völlig unterschiedlich und in den meisten Fällen absolut falsch dargestellt werden. Ich erinnere mich an eine Wintermode-Kollektion mit stark Metamerie anfälligen Farben, die ich fotografierte und auf keinem Dia auch nur annähernd den korrekten Farbton hinbrachte. Es blieb nichts anderes übrig, als dem Fotolithografen Stoffmuster mitzugeben, damit er seine Farbauszüge entsprechend manipulieren konnte, um wenigstens im Druckresultat eine gewisse Ähnlichkeit mit den visuell gesehenen Textilfarben hinzuzaubern!

Die (relativ geringe) *Metamerie von fotografischen Bildfarbstoffen* wirkt sich beispielsweise dann aus, wenn man versucht, zwei auf dem Leuchttisch als absolut identisch interpretierte Farboriginaldias von zwei verschiedenen Farbfilmherstellern (die ja nicht absolut identische Farbstoffe verwenden) zu printen oder zu duplizieren. Man wird erstaunt feststellen, dass für jedes Diafabrikat trotz gleicher Kopierlichtzusammensetzung eine manchmal gänzlich andere Korrekturfilterung notwendig ist, um identische Endresultate zu erreichen! Umgangen wird dieses Problem in der Praxis, indem man mit einem (durch-

sichtigen) Infrarot-Sperrfilter den langwelligeren Strahlungsanteil des Kopierlichtes ausfiltert.

Im Gegensatz zu metameren (bedingt-gleichen) Farben gibt es *isomere*, das heisst, *unbedingt-gleiche Farben* mit gleichen Farbreizfunktionen, die immer und unter allen Umständen für das Auge identisch aussehen und die in der Regel auch farbfotografisch problemlos darstellbar sind.

Je nach ihrer chemisch-strukturellen Zusammensetzung und der Herkunft ihrer Pigmente sind Farbstoffe mehr oder weniger anfällig auf Metamerie. Zwischen fotografischen Vorlagen und der Drucktechnik gibt es kaum nennenswerte Metamerie-Probleme, da trotz unterschiedlichen Farbstoffen, sowohl die Farbfotografie (CMY), wie auch der Mehrfarbendruck (CMYK) mit relativ ähnlichen Grundfarben operieren.

In problematischer Art auf Metamerie anfällig sind Textilfarben, Glanz-Lackfarben, aber auch Aquarellfarben. Hier kann die Farbfotografie in vielen Fällen keine sehr ähnliche Darstellung garantieren. Auch bei direkter Reproduktion bleibt das Problem bestehen. Man behilft sich dabei so, dass man von der Vorlage entweder direkt (wenn das

geht, ansonsten über ein Farbdia) so reproduziert und mit elektronischer Bildbearbeitung überarbeitet, dass die Reproduktion bei Lichtart D50 identisch ist mit der Originalvorlage. Um die Problematik anzudeuten, macht die Reproduktion dann den Vermerk «reproduziert bei D50».

Ist bekannt, bei welchem Licht das Bild- oder Druckresultat zumeist betrachtet wird, kann bei der Reproduktion natürlich auf die betreffende Lichtart abgestimmt werden, beispielsweise auf die Normlichtart D65, wenn das Resultat bei natürlichem Tageslicht betrachtet werden soll oder auf die Normlichtart A, wenn der Betrachter eher im häuslichen Bereich mit Glühlampenlicht anzutreffen ist.

Eine Abstimmung auf die Normlichtart D50 stellt durchaus einen vernünftigen Kompromiss dar, denn selbst starke Metamerie wird vom durchschnittlichen Betrachter nur dann als störend empfunden, wenn er bei gleichem Licht das Bildresultat mit dem Original vergleichen kann (was allerdings unglücklicherweise bei Textilien, die aus dem Kaufhauskatalog bestellt worden sind, der Fall ist...).