

# Licht und Farbe

## Grundlagen für das Farbfernsehen

# Fs 12

4 Blätter

### 1 Licht als elektromagnetische Strahlung

#### 1.1 Wellenlängenbereich

Licht ist der Teil der elektromagnetischen Strahlung, der vom menschlichen Auge wahrgenommen wird (Bild 1). Er umfaßt den Wellenlängenbereich von rund 380 nm bis 780 nm. (Es gilt:  $1 \text{ nm} = 1 \mu\text{m} = 10^{-9} \text{ m} = 10^{-6} \text{ m}$ ; die Einheiten  $\mu\text{m}$  und  $\text{Å}$  sind möglichst nicht mehr anzuwenden.)

Mit Änderung der Wellenlänge ändert sich der im Auge erzeugte Farbeindruck, die *Farbart* oder der *Farbton*. Die Begriffe *Farbart* und *Farbton* werden im Abschnitt 3.4 näher erläutert. Zwischen Wellenlängen und *Farbart* besteht folgende Beziehung:

(380...450) nm	Purpurblau (violett)	435,8 nm Spektralblau
(450...482) nm	Blau	
(482...487) nm	grünlich Blau	
(487...492) nm	Cyan (Blaugrün)	
(492...497) nm	bläulich Grün	
(497...530) nm	Grün	546,1 nm Spektralgrün
(530...560) nm	gelblich Grün	
(560...570) nm	Gelbgrün	
(570...575) nm	grünlich Gelb	
(575...580) nm	Gelb	
(580...585) nm	gelblich Orange	
(585...595) nm	Orange	
(595...620) nm	rötlich Orange	
(620...780) nm	Rot	700,0 nm Spektralrot

#### 1.2 Spektrale Zerlegung

Der einfachste Versuch, die Wellennatur des Lichts nachzuweisen, besteht darin, daß man Sonnenlicht durch einen schmalen Spalt auf ein Glasprisma fallen läßt (Bild 2). Auf dem hinter dem Prisma aufgestellten Schirm zeichnet sich nun nicht wieder der durch das Sonnenlicht erleuchtete Spalt ab, es entsteht vielmehr ein Lichtband, in dem die Spektralfarben Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau und Violett in stetigem Übergang aufeinander folgen. Der Brechungswinkel ist nämlich – außer von der Glassorte – von der Wellenlänge abhängig: Kurzwelliges Licht wird beim Übergang in ein anderes Medium (Luft – Glas) stärker als langwelliges gebrochen. Dadurch erklärt sich, daß der ursprüngliche Lichtspalt in ein Lichtband auseinandergezogen wird.

Durch diese Zerlegung erhält man die Spektralfarben.

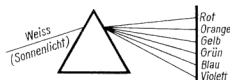
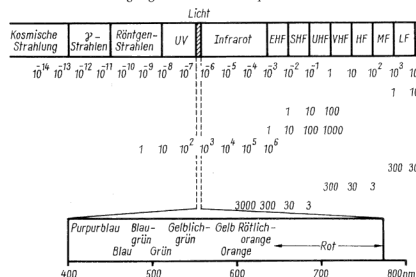


Bild 2. Spektrale Zerlegung des weißen Sonnenlichtes

Links: Bild 1.

Spektrum der elektromagnetischen Strahlung

- LF (niedrige Frequenzen), LW
- MF (mittlere Frequenzen), MW
- HF (hohe Frequenzen), KW
- VHF (sehr hohe Frequenzen) (very high frequencies)
- UHF (ultrahohe Frequenzen) (ultra high frequencies)
- SHF (superhohe Frequenzen) (super high frequencies)
- EHF (extremhohe Frequenzen) (extremely high frequenc.)
- UV Ultraviolettstrahlen

### 1.3 Gesättigte und ungesättigte Farben

Schneidet man aus der Vielzahl dieser Spektralfarben einen extrem schmalen Streifen heraus, dann erhält man einen (monochromatischen) Farbton, eine Spektralfarbe. Dies ist eine reine, eine gesättigte Farbe. Man denke z. B. an die gelbe Spektrallinie des Natriumdampfes.

Mischt man eine solche Spektralfarbe mit „Weiß“, so entsteht eine ungesättigte Farbe. Man denke sich rote Tinte. Verdünnt man sie mit Wasser, so geht der Farbton von Rot in Rosa über. Bei noch stärkerer Verdünnung wird schließlich die Flüssigkeit fast farblos (Weiß). Ungesättigte Farben stellen einen Übergang zwischen einer gesättigten Farbe und Weiß dar.

### 2 Farbsehen und Farbpfinden

#### 2.1 Augenempfindlichkeit

Das von der Augenlinse auf der Netzhaut entworfene Bild trifft auf zwei Arten von lichtempfindlichen Elementen, Stäbchen und Zapfchen. Mit den Stäbchen allein lassen sich nur Helligkeitsunterschiede feststellen, d. h. wären nur diese im Auge vorhanden, so würden wir nur Schwarzweiß-Bilder sehen.

Die Zapfchen dagegen geben uns die Möglichkeit, die verschiedenen Farblichtstrahlungen wahrzunehmen.

Wie im Abschnitt 1.1 gezeigt, ist unser Sehen selektiv, jenseits von Rot (Infrarot) und jenseits von Violett (Ultraviolett) ist die Augenempfindlichkeit Null. Da es in der Natur nur stetige Übergänge gibt, setzt also die Augenempfindlichkeit bei den roten Farbönen schwach ein, steigt über Gelb bis auf die optimale Empfindlichkeit für Grün und fällt danach über Blau allmählich ab, um jenseits des violetten Bereichs Null zu werden (Bild 3).

Diese unterschiedliche, spektrale Empfindlichkeit besagt: Führt man dem Auge für jede Farbe die gleiche Strahlungsleistung zu (z. B. in Watt gemessen), so ist der Helligkeitseindruck gemäß der Augenempfindlichkeitskurve unterschiedlich.

Soll umgekehrt das Auge jede Farbart als gleich hell empfinden, müssen die zugeführten Strahlungsleistungen unterschiedlich sein, bei Blau und Rot groß, bei Grün klein.

#### 2.2 Additive Mischung

Wird das Licht zweier oder mehrerer verschiedenfarbiger Lichtquellen gleichzeitig auf eine weiße Fläche geworfen, so

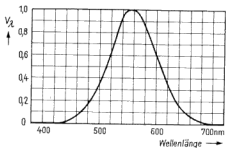
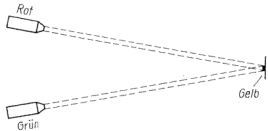


Bild 3. Spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion  $V_\lambda$  des menschlichen Auges – gilt für hell adaptiertes Auge (Voraussetzung ist, daß jede Wellenlänge mit gleicher Energie abgestrahlt wird), (nach Literaturquelle [1])

Bild 4. Additive Mischung zweier Farblichtstrahlungen mit Hilfe zweier Projektoren und einer Projektionsfläche



sieht das Auge nicht diese verschiedenen Farbkomponenten getrennt voneinander, es registriert vielmehr einen neuen Farbeindruck. So entsteht z. B. aus der Mischung von Rot und Grün der Farbeindruck „Gelb“ (Bild 4). Diese Tatsache, allgemein ausgedrückt, spiegelt eines der Grundgesetze der Farbentheorie wider: Wenn man drei geeignete Farblichtarten mischt, so kann man durch Wahl der Leuchtdichten der drei Farblichtquellen jede Farbart nachbilden. So kann eine Mischung aus den drei Farblichtarten Rot, Grün und Blau im Auge den Farbeindruck Weiß ergeben. Daß also die Farbe Weiß, das Sonnenlicht, eine Mischung verschiedener Farbarten ist, beweist der erwähnte Versuch, bei dem Sonnenlicht mit einem Prisma (Spektralapparat) in seine einzelnen Komponenten zerlegt wird (Bild 2).

Von additiver Mischung wird also dann gesprochen, wenn das Licht zweier oder mehrerer Lichtquellen gemischt wird.

### 2.3 Subtraktive Mischung

Dieser Fall tritt z. B. bei Betrachtung eines undurchsichtigen Körpers auf. Seine Farbe ist durch die Eigenschaften des von ihm reflektierten Lichtes bestimmt. Ein grünes Blatt z. B. absorbiert aus dem weißen Sonnenlicht die roten, gelben, blauen und violetten Komponenten und reflektiert die grünen Anteile.

Ein weißer Körper reflektiert demnach alle Komponenten, während ein (ideal) schwarzer Körper die gesamte auf ihn treffende Strahlung absorbiert.

Durch subtraktive Mischung wird also die Körperfarbe oder Gegenstandsfarbe erzeugt. Daraus folgt, daß die Farbe eines Gegenstandes nur bei einer bestimmten Beleuchtung definiert ist, stillschweigend ist Bestrahlung mit Tageslicht vorausgesetzt.

Wird z. B. ein roter Apfel mit blauem Licht bestrahlt, erscheint er schwarz, denn rote Körperfarbe heißt nämlich, daß vom auffallenden Licht alle Komponenten bis auf rot

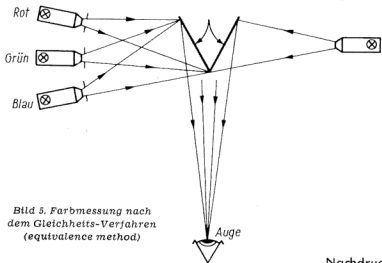


Bild 5. Farbmischung nach dem Gleichheits-Verfahren (equivalence method)

verschluckt werden. Im „Blau“ ist also kein „Rot“-Anteil enthalten, der zurückgestrahlt werden könnte.

### 2.4 Erkennbarkeit von Farben bei kleinen Bilddetails

(siehe auch FIA Fs 11, Abschnitt 6.2)

Bei sehr kleinen Flächen, d. h. bei sehr kleinen Seh winkeln ( $< 4^\circ$ ) kann das Auge nur Helligkeitsunterschiede wahrnehmen.

Bei etwas größeren Flächen, d. h. größerem Seh winkeln ( $> 4^\circ$ ) tritt zur Erkennbarkeit von Helligkeitsunterschieden noch ein Farbunterscheidungsvermögen hinzu. Allerdings kann das Auge nicht jede Farbart bestimmen. Es kann nur beurteilen, ob die Farbe zum langwelligen Teil des Spektrums (Orange, Gelbrot) oder zum kurzwelligen Teil des Spektrums (Cyan, Blaugrün) gehört.

Erst bei noch größeren Flächen und noch größeren Seh winkeln ( $12^\circ$ ) kann das Auge deutlich die einzelnen Farben unterscheiden.

## 3 Der Weg zum Farbdreieck

Beim Studium aller mit Farben, Farbmischung usw. zusammenhängenden Fragen ist das Farbdreieck ein gutes Hilfsmittel. Es lohnt sich deshalb, seine Entstehung aus der Farblehre heraus zu zeigen.

### 3.1 Darstellung einer Farbe durch drei Eichfarben<sup>1)</sup>

Eins der wichtigsten Gesetze der Farbenlehre – von Graßmann formuliert – besagt: Wählt man drei Farben, so kann man fast jede beliebige Farbe durch additive Mischung dieser drei Eichfarben nachbilden. Voraussetzung ist u. a., daß keine der drei Eichfarben durch die beiden anderen nachgeahmt werden kann.

Die in diesem Gesetz enthaltene Tatsache beruht auf den komplizierten Vorgängen im menschlichen Auge und im Nerven- bzw. Sehzentrum im Gehirn. Man vermutet, daß die Sehzäpfchen auf der Netzhaut des Auges drei unterschiedliche, spektrale Empfindlichkeiten für die Wellenlängen des sichtbaren Lichtes haben (siehe auch Abschnitt 2.2). Die additive Mischung von Rot, Grün, Blau gibt Weiß.

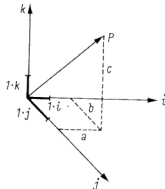
Man kann sich am besten durch einen einfachen Versuch von der Gültigkeit dieses Gesetzes überzeugen. Bild 5 stellt mehrere Projektoren dar, die auf zwei im Winkel zueinander angeordnete Projektionschirme strahlen. Der eine Schirm wird mit der zu untersuchenden Farbe, der andere Schirm mit den drei Eichfarben beleuchtet. Die zwischen die Eichlichtquellen und den Schirm geschalteten Abschwächer<sup>2)</sup> werden so einreguliert, daß der Betrachter keinen Unterschied zwischen den von beiden Schirmen hervorgerufenen Farbeindrücken feststellen kann.

[Man beachte jedoch, daß nicht alle Farben sich durch Addition der drei Eichfarben darstellen lassen, siehe Bild 8 im folgenden Abschnitt 3.2.]

<sup>1)</sup> Im vorliegenden Abschnitt 3 wird nur von Lichtquellen gesprochen, wie bei additiver Mischung. Unter Farbe ist also stets „Farblichtstrahlung“ gemeint.

<sup>2)</sup> In Bild 5 zur Vereinfachung weggelassen.

Bild 6. Darstellung eines Punktes  $P$  im Raum mit den drei Einheitsvektoren  $i, j, k$ . Der Vektor  $V$  für den Punkt  $P$  ist nach Abschnitt 3.2 bestimmt durch die Strecken  $a, b$  und  $c$  bzw. durch den Ausdruck  $V = a \cdot i + b \cdot j + c \cdot k$





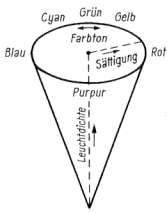


Bild 9. Darstellung einer Farbe nach Helligkeit, Farbton, Sättigung mit Hilfe einer Kegeldarstellung

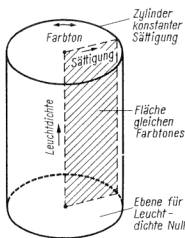


Bild 10. Wie Bild 9, aber in Zylinderform

Die Farbart erhält man, wenn diese Gleichung dividiert wird durch:

$$D = R + G + B \quad (\text{Erklärung siehe Anhang})$$

Man erhält: 
$$\frac{F}{D} = \frac{R}{D} \cdot (R) + \frac{G}{D} \cdot (G) + \frac{B}{D} \cdot (B) \quad (2)$$

Setzt man 
$$\frac{R}{D} = r, \quad \frac{G}{D} = g, \quad \frac{B}{D} = b \quad (3)$$

ergibt sich: 
$$\frac{F}{D} = r(R) + g(G) + b(B) \quad (4)$$

Aus Gleichung 3 und aus 1 = 
$$\frac{R}{D} + \frac{G}{D} + \frac{B}{D} \quad (5)$$

schließlich folgt:  $r + g + b = 1$   
das bedeutet aber (siehe Anhang) Darstellung einer Fläche.

**3.5 Transformation in das XYZ-System**

Mit dem Übergang vom Farbraum in die Farbebene sind aber noch nicht alle Wünsche erfüllt. Im Abschnitt 3.2 war festgestellt worden, daß bei dem System, das von den drei Primärfarben Rot (700 nm), Grün (546,1 nm), Blau (435,8 nm) ausgeht, nicht alle Farben positive skalare Werte (R, G, B), sondern teilweise negative Werte besitzen. Das bedeutet aber, daß eine solche Farbe (mit negativem Beiwert) ihren Farbort nicht innerhalb, sondern außerhalb des durch die drei Achsen (R), (G), (B) bestimmten Raumes hat.

Um diesen Nachteil zu vermeiden, ist es erforderlich, andere Achsen zu wählen (X, Y, Z), so daß alle Farben in dem durch sie beschriebenen Raum eingeschlossen und die skalaren Beiwerte immer positiv sind.

Das RGB-System baut sich auf den realen drei Primärfarben Rot, Grün, Blau, das XYZ-System auf sogenannten „imaginären“ Primärfarben auf.

Den Größen X, Y, Z entsprechen keine physikalisch realisierbaren Farblichtstrahlungen, man könnte von übersättigten Farben sprechen. Sie dienen also nur als mathematische Bezugswerte.

Bei der Wahl dieses neuen Systems hat man außerdem noch zwei Gesichtspunkte mit berücksichtigt. Die Helligkeit soll nur mit einer (Y) der drei imaginären Primärfarben verknüpft sein. Das bedeutet:

Der Wert Y gibt im XYZ-System die Größe der Helligkeit an, Y muß also für die Spektralfarben mit  $V_\lambda$  (Bild 3) identisch sein, denn auch  $V_\lambda$  zeigt die Helligkeit, die das Auge bei den einzelnen Wellenlängen feststellt, wenn die abgestrahlte Leistung in jedem kleinen Wellenlängenbereich stets die gleiche ist.

Man vergleiche die Werte von Bild 3 mit den  $Y = V_\lambda$ -Werten der Tabelle 1.

Eine zweite Voraussetzung war, daß der Weißpunkt im Schwerpunkt des Farbdreiecks liegen soll.

Diese Forderungen sind im XYZ-System erfüllt. Der Zusammenhang zwischen diesem neuen System und dem auf den drei Primärfarben aufgebauten (RGB-System) ist gegeben durch:

$$\left. \begin{aligned} X &= 2,7690 R + 1,7518 G + 1,1300 B \\ Y &= 1,0000 R + 4,5907 G + 0,0601 B \\ Z &= 0,0000 R + 0,0565 G + 5,5943 B \end{aligned} \right\} (6)$$

oder

$$\left. \begin{aligned} R &= '2,3644 X - 0,8966 Y - 0,4681 Z \\ G &= -0,5152 X + 1,4264 Y + 0,0887 Z \\ B &= 0,0052 X - 0,0144 Y + 1,0092 Z \end{aligned} \right\} (6a)$$

Durch die Transformationsformeln (6) erreicht man die gestellte Forderung, daß alle Farben innerhalb des durch das XYZ-System umschriebenen Farbraumes liegen. Die skalaren Größen (X, Y, Z) sind positiv. Das kommt außerdem in den von der IBK (Internationale Beleuchtungs-Kommission) bzw. ICI (Internationale Commission of Illumination) erarbeiteten Tabellen der Spektralfarben zum Ausdruck (Tabelle 1). Sie sind unter der Voraussetzung eines „Spektrums gleicher Energie“ berechnet. Das bedeutet, daß in jedem gleich großen Abschnitt des Spektrums die gleiche Leistung abgestrahlt wird. Es ergibt sich dann als Summe das „Normalweiß“ oder „equal-energy white“ (E).

**Tabelle 1. Normwerte der Spektralfarben (im XYZ-System) für energiegeliches Spektrum**

$\lambda$ (nm)	$\bar{x}_\lambda$	$\bar{y}_\lambda$	$\bar{z}_\lambda$	$\lambda$ (nm)	$\bar{x}_\lambda$	$\bar{y}_\lambda$	$\bar{z}_\lambda$
380	0,0066	0,00	0,030	580	4,28	4,07	0,0080
390	0,020	0,0005	0,094	590	4,60	3,54	0,0051
400	0,067	0,0019	0,32	600	4,97	2,95	0,0037
410	0,20	0,0056	0,97	610	4,69	2,35	0,0014
420	0,63	0,019	3,02	620	3,99	1,78	0,0009
430	1,33	0,054	6,48	630	3,01	1,24	0
440	1,63	0,11	8,17	640	2,10	0,82	0
450	1,57	0,18	8,29	650	1,33	0,50	0
460	1,36	0,28	7,80	660	0,77	0,29	0
470	0,91	0,43	6,02	670	0,41	0,15	0
480	0,45	0,65	3,80	680	0,22	0,079	0
490	0,15	0,97	2,18	690	0,11	0,038	0
500	0,023	1,51	1,27	700	0,053	0,019	0
510	0,044	2,35	0,74	710	0,027	0,0098	0
520	0,30	3,32	0,37	720	0,014	0,0047	0
530	0,77	4,03	0,20	730	0,0066	0,0023	0
540	1,36	4,46	0,095	740	0,0033	0,0014	0
550	2,03	4,65	0,041	750	0,0014	0,0005	0
560	2,78	4,65	0,018	760	0,0009	0,0005	0
570	3,56	4,45	0,0098	770	0,0005	0	0

Die Werte der ICI/IBK-Tabelle von 1931 – veröffentlicht in [4] – wurden mit dem Faktor 4,679 multipliziert. Diese Umrechnung hat lediglich den Sinn, daß bei Addition aller Werte jeder der drei Spalten – bei Unterteilung in 5 zu 5 nm, also 380, 385, 390 usw. – sich 100 ergibt. Bei der ICI/IBK-Tabelle erhält man unter gleicher Voraussetzung als Summe 21,37.

Für genaue Berechnungen siehe die ausführlicheren Tabellen in [4] oder DIN 5033, Blatt 2. Diese Werte sind in Bild 20 in Kurvenform dargestellt. (Blatt 3 und 4 folgen.)

**Literatur**

- [1] Telefunken, Taschenbuch 1965, Seite 493.
- [2] Holm, W. A.: Fernseh-Technik ohne Mathematik. Philips Technische Bibliothek.
- [3] Corni, P. S. und Tomsonsd, G. B.: Color Television. Iliffe Books Ltd., London.
- [4] Bourno, Dr. P. L.: Farbe und Farbwahrnehmung. Philips Technische Bibliothek.
- [5] Mollown, Knox und Dean, Charles E.: Principles of color Television. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [6] Theile, Richard: Fernsehsehen. ETZ-A, Bd. 85 (1964), Heft 24, Seite 791.
- [7] Dirbach, W.: Zur Farbe des Leuchtdichs. Telefunken-Zeitung, Jahrgang 29, Juni 1956, Heft 112, Seite 105.
- [8] Practical Color Television for the Service Industry. RCA Service Company, Inc., Camden, N.I.
- [9] Der Telefunken-Sprecher 1965, Heft 30 und 31.
- [10] Welland, Klaus: Die elektronische Umkehrung von fotografischen Farbnegativen. AEO 14 (1960), Seite 441...460.

### 3.6 Die Farbebene im XYZ-System, das Farbdreieck

Wie im Abschnitt 3.4 für das RGB-System gezeigt, kann man beim XYZ-System mit den analogen Formeln (siehe Formel [2]) zur Farbebene übergehen.

Mit  $D_1 = X + Y + Z$

$$\text{ist } x = \frac{X}{D_1} \quad y = \frac{Y}{D_1} \quad z = \frac{Z}{D_1} \quad (7)$$

Beispiel:

Für  $\lambda = 500 \text{ nm}$  ergibt sich aus Tabelle 1

$$X = 0,0049$$

$$Y = 0,3230$$

$$Z = 0,2720$$

$$D_1 = 0,5999$$

$$x = \frac{0,0049}{0,5999} = 0,0082; \quad y = \frac{0,3230}{0,5999} = 0,539; \quad z = \frac{0,2720}{0,5999} = 0,453$$

$$x + y + z = 1,0$$

Die nach Formel 7 errechneten Werte sind in Tabelle 2 auf Blatt 3a enthalten und in Bild 11 eingetragen. Man erhält die bekannte Darstellung des Farbdreiecks.

### 3.7 Eigenschaften und Anwendung des Farbdreiecks

● Alle Spektralfarben liegen auf der hufeisenförmigen Kurve, bei 380 nm (Purpurbau bzw. Violett) beginnend und bei 780 nm (Rot) endend. Dafür ist der Sättigungsgrad = 1.

● Der Weißpunkt liegt im Schwerpunkt des Farbdreiecks mit den Koordinaten  $x = 0,333$ ,  $y = 0,333$ .

● Zwischen dem Weißpunkt und der hufeisenförmigen Kurve liegen die ungesättigten Farben. Der Abstand vom Weißpunkt entspricht dem Grad der Sättigung.

● Von dem ersten Quadranten der Farbebene hat überhaupt nur der Teil zwischen den beiden Achsen ( $x, y$ ) und der Geraden, die durch die Punkte  $P_1$ :  $x = 1, y = 0$  und  $P_2$ :  $y = 1, x = 0$  geht, Bedeutung. Denn nach der Gleichung:  $x + y + z = 1$  kann  $x$  im Maximum 1 werden, wenn  $y$  und  $z$  Null sind. Entsprechendes gilt für  $y$ .

● Werden zwei Farbarten additiv gemischt, so läßt sich die sich ergebende Mischfarbe im Farbdreieck in einfacher Weise bestimmen. Der Farbart der Mischfarbe liegt nämlich auf der Verbindungslinie der Farbarten zu zu mischenden Farbarten, und zwar ist sein Abstand zu den Farbarten der beiden Ausgangsfarben umgekehrt proportional zu deren Determinanten D.

Beispiel: Bild 12

Man mische das Licht einer grünen Lichtquelle (Farbart A) mit dem einer roten (Farbart B).

Ist die Intensität der grünen Lichtquelle sehr viel größer als die der roten, wird sich Grüngelb ergeben, sind beide Intensitäten etwa gleich, erhält man Gelb. Und hat schließlich Rot die höhere Intensität, ist die Mischfarbe Gelbrot oder Orange.

● Bisher ist nur die Lage der Spektralfarben auf dem Hufeisen betrachtet worden, d. h. aller der Farben, die sich bei Zerlegung von weißem Licht (Sonnenlicht) ergeben. Ihre Farbart wandern auf dem Spektralfarbenzug von links unten (Violett 380 nm) über Grün nach rechts unten (Rot 780 nm). Durch die Verbindungslinie zwischen diesen beiden Endpunkten müssen nun Farbtöne dargestellt werden, die sich bei Mischung von Violett und Rot bilden, und zwar: Violett, Purpur, Purpurrot, Rotpurpur, Rot (Bild 13).

Deshalb nennt man die Verbindungslinie, die den hufeisenförmigen Spektralfarbenzug zu einer geschlossenen Figur ergänzt, die Purpurlinie.

● Für die Purpurfarben kann man, wie für die Spektralfarben, einen Farbart, d. h. die Farbkordinaten, festlegen. Man kann ihnen aber zunächst keine Wellenlänge zuordnen, da sie ja nicht als Spektralfarben vorkommen, sondern immer nur durch Mischung entstehen.

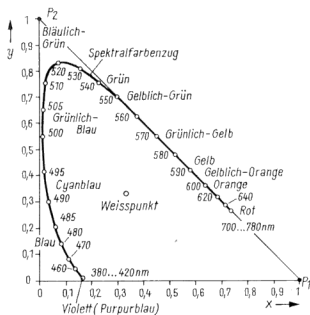


Bild 11. Farbdreieck-Spektralfarbenzug nach Literaturquelle [1]

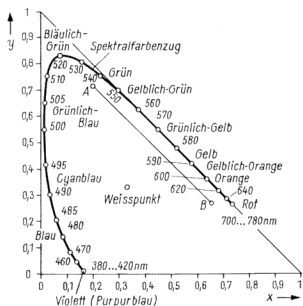


Bild 12. Additive Mischung zweier Farben, dargestellt im Farbdreieck

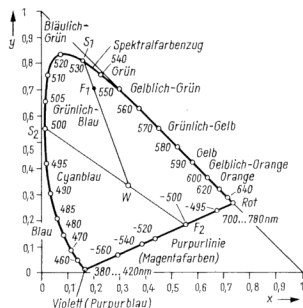
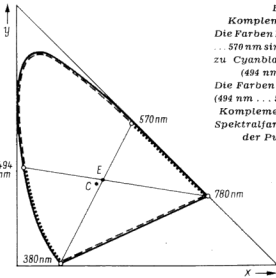
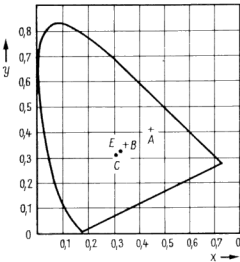


Bild 13. Die Purpur- oder Magentalinie im Farbdreieck. Bestimmung der dominierenden und - für die Purpurfarben - negativen dominierenden Wellenlänge, Bestimmung der Sättigung

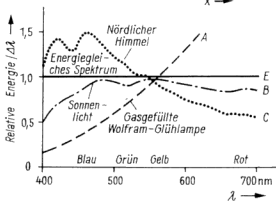


**Bild 14.**  
Komplementär-Farben.  
Die Farben Rot...Gelb 780 nm  
...570 nm sind komplementär  
zu Cyanblau...Purpurblau  
(494 nm...380 nm).  
Die Farben Cyanblau...Gelb  
(494 nm...570 nm) haben als  
Komplementärfarbe keine  
Spektralfarbe, sondern eine  
der Purpurfarben



**Bild 15.**  
Die Lage der Normallichtquellen im Farbdreieck.

	x	y
A	0,448	0,408
B	0,347	0,352
C	0,310	0,316
E	0,333	0,333



**Bild 16.** Die (relative) spektrale Energieverteilung der vier Normallichtquellen (nach Literaturquelle [3])

● **Dominierende Wellenlänge (dominant wavelength)**  
Im Farbdreieck kann man, wie gezeigt, eine Farbart durch die Koordinaten bestimmen. Man kann aber auch (vgl. Abschnitt 3.3) noch eine andere Kennzeichnung wählen.

Eine grüne Lichtquelle  $F_1$  sei durch die Koordinaten  $x = 0,2$ ,  $y = 0,7$  (Bild 13) festgelegt. Zieht man eine Gerade durch diesen Farbort und den Weißpunkt (W), so schneidet diese den Spektralfarbenzug bei der Wellenlänge  $\lambda = 530 \text{ nm}$  ( $S_1$ ). Diese so ermittelte Wellenlänge heißt „dominierende Wellenlänge“.

Nun gibt das Verhältnis der beiden Strecken  $\frac{F_1 - W}{S_1 - W}$  die Farbsättigung an.

Ein Farbort läßt sich also auch aus:  
dominierender Wellenlänge und Sättigung  
ermitteln.

● **Negative dominierende Wellenlänge**  
Für die Purpurfarben gibt es keine zugeordnete Wellenlänge. Man hat sich hier so geholfen:

Die durch den Farbort ( $F_2$ , Bild 13) und W gehende Gerade verlängert man über den Weißpunkt hinaus bis zum Spektralfarbenzug ( $S_2$ ). Die zu  $S_2$  gehörende Wellenlänge nennt man in diesem Fall „negative“ dominierende Wellenlänge.

Purpurfarben lassen sich also durch Angaben der negativen dominierenden Wellenlänge und der Sättigung im Farbdreieck bestimmen (Bild 13).

● **Komplementärfarben**

Zwei Farbarten werden dann als komplementär zueinander bezeichnet, wenn sich bei ihrer Mischung das Normalweiß ergibt. Folglich müssen zwei zueinander komplementäre Farbarten auf einer Geraden liegen, die durch den Weißpunkt geht. Wie Bild 14 zeigt, bilden für die Farbarten (am blauen Ende des Spektralfarbenzuges) von 380 nm...494 nm die Farbarten (am roten Ende) von 570 nm...780 nm die Komplementärfarben (und umgekehrt).

Für die Farbarten von 494 nm...570 nm gibt es keine komplementären Spektralfarben, sie werden durch die Purpurfarben (auch Magentafarben genannt) zu Weiß ergänzt.

● **Ausgenutzter Teil des Farbdreiecks**

Gesättigte Farben kommen in der Natur recht selten vor. Deshalb ist es auch nicht so kritisch, daß mit Reproduktionen (Farbfotografien, Farbdrukken) weder gesättigte Farben wiedergeben noch das Farbdreieck voll ausgenutzt werden können. Bild 17 zeigt durch die Schraffur, welcher Teil des Farbdreiecks reproduzierbar ist.

● **Weißpunkt, Unbuntpunkt**

Es hat sich als notwendig herausgestellt, genau zu definieren, was unter einer weißen Lichtstrahlung zu verstehen ist. Die bereits erwähnte Normenkommission (ICI bzw. IBK) hat dazu folgendes festgelegt.

**Normallichtquelle A**

Licht einer gasgefüllten Wolfram-Glühlampe  
Farbtemperatur 2848 (°K)  
Farbkoordinaten  $x = 0,448$   $y = 0,408$  (Bild 15)  
Spektrale Energieverteilung (relativ) (Bild 16)

**Normallichtquelle B**

ungefähr dem Sonnenlicht am Mittag entsprechend  
Farbtemperatur  $\approx 4800$  (°K)  
Farbkoordinaten  $x = 0,347$   $y = 0,352$  (Bild 15)  
Spektrale Energieverteilung (relativ) (Bild 16)

**Normallichtquelle C**

etwa Tageslicht oder etwa das Licht vom nördlichen Himmel  
Farbtemperatur  $\approx 6500$  (°K)  
Farbkoordinaten  $x = 0,310$   $y = 0,316$  (Bild 15)  
Spektrale Energieverteilung (relativ) (Bild 16)

**Normallichtquelle E**

Normalweiß, Weiß für energiegleiches Spektrum,  
Unbuntpunkt  
Farbtemperatur  $\approx 5500$  (°K)  
Farbkoordinaten  $x = 0,333$   $y = 0,333$  (Bild 15)  
Spektrale Energieverteilung (relativ) (Bild 16)

**Tabelle 2. Koordinaten der Spektralfarben im Farbdreieck**

$\lambda$ (nm)	x	y	z	$\lambda$ (nm)	x	y	z
380	0,174	0,005	0,820	560	0,373	0,625	0,002
390	0,174	0,005	0,821	570	0,444	0,555	0,001
400	0,173	0,005	0,822	580	0,513	0,487	0,001
410	0,173	0,005	0,823	590	0,575	0,424	0,001
420	0,171	0,005	0,824	600	0,627	0,373	0,001
430	0,169	0,007	0,824	610	0,666	0,334	0
440	0,184	0,011	0,825	620	0,692	0,308	0
450	0,157	0,018	0,826	630	0,708	0,282	0
460	0,144	0,030	0,826	640	0,719	0,261	0
470	0,124	0,058	0,818	650	0,726	0,274	0
480	0,091	0,133	0,776	660	0,730	0,270	0
490	0,045	0,295	0,660	670	0,732	0,268	0
500	0,008	0,538	0,453	680	0,733	0,267	0
510	0,014	0,750	0,236	690	0,734	0,266	0
520	0,074	0,834	0,092	700	0,735	0,265	0
530	0,155	0,806	0,039	bis			
540	0,230	0,754	0,016	780	0,735	0,265	0
550	0,302	0,692	0,006				

Für genaue Berechnungen siehe die ausführliche Tabelle in [4] oder DIN 5033, Blatt 2. Man vergleiche dazu Bild 11.

### 4 Grundfarben für das Farbfernsehsystem

Für das RGB-System wurden (siehe Abschnitt 1.1 und 3.5) als Primärfarben

- Rot mit 700 nm (langwelliges Ende des sichtbaren Spektrums)
  - Grün mit 546,1 nm } leicht als spektrale Linien aus dem Licht einer Quecksilberdampfampe
  - Blau mit 435,8 nm } auszufiltern
- gewählt.

Für das Farbfernsehen geht man von anderen Grundfarben ( $R_F, G_F, B_F$ ) aus:

- Rot mit 610 nm
- Grün mit 537 nm } dominierende Wellenlänge
- Blau mit 472 nm

Für die Wahl dieser Grundfarben  $R_F, G_F, B_F$  gelten folgende Überlegungen:

Das durch sie bestimmte Dreieck soll innerhalb des Farbdreiecks eine möglichst große Fläche einnehmen. Im Farbfernsehen wird bekanntlich mit additiver Farbmischung gearbeitet. Da ferner negatives Licht nicht realisierbar ist, können nur die Farben nachgebildet werden, die innerhalb des Dreiecks ( $R_F, G_F, B_F$ ) liegen (Bild 17).

Für die Farbfernseh-Bildröhre müssen Leuchtstoffe vorhanden sein, die diese Farben mit ausreichendem Wirkungsgrad abstrahlen. Betrachtet man die Lage von R und B in der Augenempfindlichkeitskurve (Bild 3), so sieht man, daß diese beiden Primärfarben in den Grenzbereichen liegen, in denen die Augenempfindlichkeit sehr klein ist. Deshalb wären sehr hohe Energien erforderlich, um die notwendigen Helligkeiten für die Wiedergabe von Blau und Rot zu erzeugen.

Durch die Wahl von 610 nm anstatt 700 nm für Rot steigt die relative Hellempfindlichkeit von 0,01 auf 0,51 und für Blau von 0,02 auf 0,11, bedingt durch die Festlegung von 472 nm anstelle von 435,8 nm. Natürlich verliert man dadurch, wie Bild 17 zeigt, die Wiedergabemöglichkeit für die stark gesättigten Farbtöne von Rot, Blau und Purpur.

Man sieht ferner, daß für stark gesättigtes Grün und Blau-Grün keine Wiedergabemöglichkeit besteht; dies gilt aber sowohl für das RGB- wie für das FCC-System. Dieser Verzicht ist möglich, weil in diesen Bereichen das menschliche Auge bei kleineren Farbänderungen nicht so empfindlich wie bei entsprechenden Änderungen im blauen oder roten Bereich ist.

#### 4.1 Vergleich der Farbkoordinaten

	ICI- oder IBK-System		FCC-Standard für Farbfernsehen	
	x	y	x	y
Rot	0,735	0,265	0,670	0,330
Grün	0,274	0,717	0,210	0,710
Blau	0,167	0,0089	0,140	0,080

### 5 Anhang

#### 5.1 Erläuterung zur Gleichung 2 (Blatt 2a)

Der Übergang von der Gleichung 1 zur Gleichung 2 beruht auf dem zweiten Graßmannschen Gesetz. Es besagt:

Werden die beiden im Farbmeßgerät beobachteten Lichtflecke (Bild 5) vom Betrachter als gleich beurteilt, dann ändert sich daran nichts, wenn man die Leuchtdichte beider Flecke um den gleichen Faktor ( $p$ ) erhöht oder schwächt, dabei aber die relative spektrale Verteilung konstant läßt.

Das heißt,

$$\text{Zustand 1: } F = R(R) + G(G) + B(B) \quad (1)$$

$$\text{Zustand 2: } p \cdot F = p \cdot R(R) + p \cdot G(G) + p \cdot B(B) \quad (6)$$

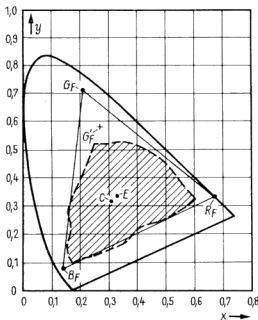


Bild 17. Ausgenutzter Teil des Farbdreiecks  $a$  = in der Reproduktionstechnik (schraffierte Fläche)  $b$  = nach der NTSC-Norm (Dreieck  $B_F, G_F, R_F$ ) [5]  $C_F$  ist die heute gebräuchliche Lage für den grünen Bildröhren-Leuchtstoff

Stellt man die Werte  $F$  und  $p \cdot F$  räumlich dar, dann sieht man, daß  $F$  und  $p \cdot F$  auf der gleichen, durch den Ursprung des Koordinaten-Systems gehenden Geraden liegen. Durch eine solche Leuchtdichtenerhöhung ändert sich also die relative Lage des Farbbortes im Raum nicht. Der Farbbort wandert nach Bild 18 bei kleineren Leuchtdichten  $F$  zum Ursprung hin, bei höheren Leuchtdichten ( $p \cdot F = 2F$ ) entfernt er sich von ihm.

Als nächster Schritt sei angenommen, daß durch die Division mit  $D$  eine EinheitsEbene gewonnen sei. Diese sei der geometrische Ort für alle Farbarten. Betrachten wir einen Schnittpunkt dieser Ebene z. B. mit der (R)-Achse, dann kann an dieser Stelle die Farbe nur Rot sein; denn die (R)-Achse repräsentiert von den drei Primärfarben die eine, nämlich Rot. Es können also an dieser Stelle keine grünen oder blauen Komponenten vorhanden sein.

Aus  $r + g + b = 1$  folgt in diesem Fall:  $r = 1$

Ferner nach Gleichung 3  $G = D \cdot g$  d. h.  $G = 0$

und  $B = D \cdot b$  d. h.  $B = 0$

also  $D = R$

Und für Gleichung 2 ergibt sich:  $\frac{F}{D} = \frac{F}{R} = 1 (R)$

Die aus Gleichung 1 durch Division mit  $D$  abgeleitete Gleichung 2 charakterisiert also tatsächlich eine Ebene, die die drei Farbsachen in den Punkten

$$R = 1 \quad G = 1 \quad B = 1$$

schnidet. Denn die für Rot angestellte Überlegung gilt sinngemäß auch für Grün und Blau.

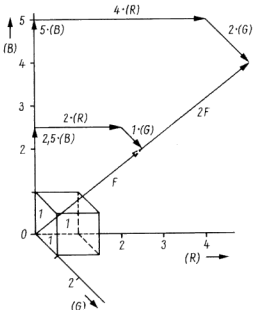


Bild 18. Konstruktion der Vektoren oder Farbart für zwei Farben gleicher Farbart aber unterschiedlicher Leuchtdichte

**Fs 12**

Mit den Regeln der projektiven Geometrie läßt sich ebenfalls beweisen, daß die Gleichung

$$\frac{F}{D} = r(R) + g(G) + b(B)$$

dann eine Ebene darstellt, wenn nämlich

$$r + g + b = \text{const}$$

und im speziellen Fall

$$r + g + b = 1$$

ist.

Schließlich sei noch darauf hingewiesen, daß die Farbeinheitsvektoren so gewählt sind, daß 1 (R) + 1 (G) + 1 (B) Normalweiß ergibt. R · (R) heißt also, daß Rot um den Faktor R heller ist, eine um R größere Leuchtdichte besitzt.

Das gleiche gilt für (G) und (B).

Somit gibt die Gleichung  $D = R + G + B$  an, wie groß insgesamt die Leuchtdichte einer Fläche ist. Durch die Division mit D wird also die Leuchtdichte auf einen Festwert bezogen.

**5.2 Beispiel für die Berechnung von Farbkoordinaten**

Gegeben sei die relative spektrale Energieverteilung  $\varphi_\lambda$  eines Bildröhren-Leuchtschirms (Bild 19).

Dann erhält man die Farbkoordinaten aus folgenden Gleichungen

$$X \sim \int \varphi_\lambda \cdot \bar{x}_\lambda \cdot d\lambda$$

$$Y \sim \int \varphi_\lambda \cdot \bar{y}_\lambda \cdot d\lambda$$

$$Z \sim \int \varphi_\lambda \cdot \bar{z}_\lambda \cdot d\lambda$$

[ $\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda$  bedeutet: Auf Normalweiß E bezogen]

Eine Integration ist selten durchführbar, denn die spektrale Energieverteilung folgt nur in Ausnahmefällen einer einfachen Funktion. Deshalb muß in kleinen Teilschritten summiert werden. Gewöhnlich arbeitet man je nach verlangter Genauigkeit mit einer Breite eines solchen Schrittes von 5 bis 10 nm.

Es ist also z. B. für den Bereich von 400...410 nm die Ordinate von  $\varphi_\lambda$  festzustellen, nach Bild 19 beträgt dieser Wert etwa 31. Dieser Wert ist mit  $\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda$  zu multiplizieren, je nachdem, ob X, Y oder Z gesucht ist.

Die Produkte  $\varphi_\lambda \cdot \bar{x}_\lambda; \varphi_\lambda \cdot \bar{y}_\lambda; \varphi_\lambda \cdot \bar{z}_\lambda$  haben dabei folgende

Bedeutung:

Die Normspektralwerte in Tabelle 1 und Bild 20 geben an, welchen Anteil jede der drei (imaginären) Normfarben X, Y, Z bei einer gegebenen Wellenlänge zu leisten hat, damit Normalweiß (reference white) entsteht. Das drückt sich, wie Bild 16 zeigt, in einer waagerechten Linie im Spektralverteilungs-Diagramm aus. Nun ist aber die spektrale Energieverteilung im gewählten Beispiel (Bild 19) nicht konstant, sondern wellenlängenabhängig. Man muß deshalb die  $\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda$ -Werte nicht mit 100 wie bei Normalweiß (energiegleich), sondern mit  $\varphi_\lambda$  (z. B. 31) multiplizieren.

$\lambda$ (nm)	$\varphi_\lambda$	$\bar{x}_\lambda$	$\varphi_\lambda \cdot \bar{x}_\lambda$	$\bar{y}_\lambda$	$\varphi_\lambda \cdot \bar{y}_\lambda$	$\bar{z}_\lambda$	$\varphi_\lambda \cdot \bar{z}_\lambda$
400	28	0,014	0,29	0,000	0	0,068	1,91
420	50	0,134	6,7	0,004	0,2	0,646	32,3
440	94	0,348	32,7	0,023	2,18	1,747	164,0
460	95	0,291	27,6	0,060	5,7	1,669	158,0
480	70	0,096	6,7	0,139	9,7	0,813	56,8
500	50	0,005	0,25	0,323	16,1	0,272	13,6
520	55	0,063	3,47	0,710	39,1	0,078	4,28
540	68	0,290	19,7	0,954	64,8	0,020	1,38
560	75	0,595	44,6	0,995	74,6	0,004	0,30
580	75	0,916	68,7	0,870	65,3	0,002	0,15
600	60	1,062	63,6	0,631	37,9	0,001	0,06
620	45	0,854	38,4	0,381	17,3		
640	32	0,448	14,3	0,175	5,6		
660	22	0,165	3,63	0,061	1,34		
680	15	0,047	0,7	0,017	0,26		
700	10	0,014	0,14	0,004	0,04		
			331,48		340,10		432,76
			= X		= Y		= Z

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = \frac{331,48}{1104,34} = 0,300$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{340,10}{1104,34} = 0,308$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} = \frac{432,76}{1104,34} = 0,391$$

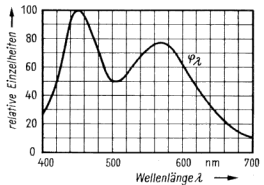
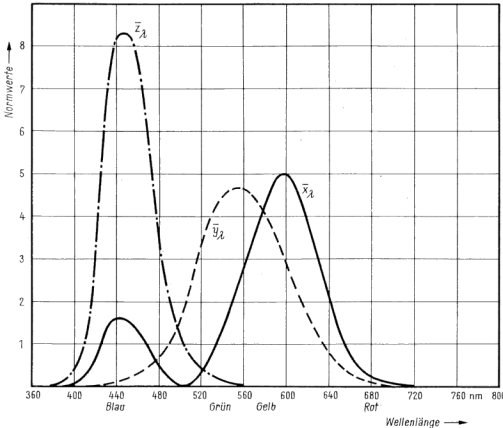


Bild 19. Relative spektrale Energieverteilung eines Leuchtschirms einer Schwarzweiß-Bildröhre (nach Literaturquelle (7))

Links: Bild 20. Normwerte der Spektralfarben (nach Tabelle 1 auf Blatt 2a)

Die Literaturhinweise befinden sich auf Blatt 2a.