

Farbwiedergabe mit einer 3 Chip CCD-Kamera

1. Ziel des Praktikumsversuchs

Innerhalb des Versuches sollen neben den grundlegenden Farbsignalprozessen, die in einer 3-Chip-CCD Kamera ablaufen, die Einflüsse der Aufnahmebeleuchtung auf die Farbwertsignale verdeutlicht werden. Es sollen Maßnahmen zur Verbesserung der Signale besprochen und deren Grenzen aufgezeigt werden. Im Versuch werden die Ein- und Ausgangsgrößen an einer Versuchskamera messtechnisch ermittelt. Daraus können dann die in der Kamera auftretenden Veränderungen erfasst werden. Mit den aufgenommenen Werten werden die Farbabstände in den CIE-LUV- und CIE-LAB-Farbsystemen berechnet.

2. Grundlagen

Im ersten Abschnitt der Grundlagen wird die Frage geklärt, was unter richtiger Farbwiedergabe beim Farbfernsehen zu verstehen ist und welche Bedingungen das Bildaufnahme- bzw. Bildwiedergabesystem erfüllen muss. Im Anschluss daran erfolgt die Darstellung der theoretischen Hintergründe für diese Bedingungen. Weiterhin wird das Verfahren zur Kennzeichnung der Farbwiedergabe nach DIN 6169 Teil 6 dargestellt.

2.1 Was bedeutet „richtige“ Farbwiedergabe beim Farbfernsehen ?

Unterscheidung des Begriffs Farbwiedergabe

Korrekte Farbwiedergabe bedeutet, dass eine aufgenommene Szene und deren Farben auf einem Farbfernseher so wiedergegeben werden, wie sie einem Beobachter auch im Original erscheinen.

Bei dieser Forderung werden weder die Besonderheiten des menschlichen Sehsystems noch die technischen Randbedingungen eines Farbfernsehers berücksichtigt. Nachfolgend wird die von Hunt [1,2] vorgeschlagene Unterscheidung der Farbwiedergabe zur Klärung des Problems herangezogen.

Hunt versteht unter **exakter Farbwiedergabe** beim Farbfernsehen, daß jede Körperfarbe bei der Wiedergabe die gleiche Farbvalenz besitzt, wie bei der Aufnahme vor der Kamera. Gleiche Farbvalenz fordert bekanntlich gleiche Farbart und Leuchtdichte. Der Leuchtdichtedynamikbereich von Kathodenstrahlröhren hat technische Grenzen. Der Bereich der darstellbaren Leuchtdichten (max. 130cd/m^2) auf einem Farbfernseher ist viel geringer, als die bei der Aufnahme vorkommenden Leuchtdichten.

Bei einer **farbmetrisch richtigen Farbwiedergabe** besitzt jede Körperfarbe auf dem Wiedergabegerät genau dieselbe Farbart, wie beim Aufnahmezustand. Die Leuchtdichte stimmt jedoch nur noch relativ zu einem Bezugsweiß überein. Auch diese Forderung liefert bei der Farbwiedergabe mittels Farbfernseher keine wünschenswerten Ergebnisse, da bei der Aufnahme oft verschiedene Lichtarten benutzt werden. Farben erscheinen einem Beobachter bei unterschiedlichen Lichtarten vor der Kamera in Folge der Umstimmung des Auges als gleich. Ein Beobachter vor dem Wiedergabegerät nimmt Unterschiede infolge des Lichtartenwechsels jedoch wahr. Aber auch andere Bedingungen, wie Helligkeit und Farbe des Umfeldes sowie die Größe der Objekte stimmen bei der Aufnahme und Wiedergabe nicht überein und beeinflussen die Farbempfindung.

Aus diesem Grund wäre für die Farbwiedergabe beim Farbfernsehen die Forderung einzuhalten, dass die Farben innerhalb einer Szene sowohl unabhängig von der Aufnahmeart als auch von anderen

Bedingungen (Objektgröße und Umfeld) auf der Wiedergabeseite immer unter gleichen Bedingungen erscheinen sollen. Diese beiden Forderungen werden als *äquivalente Farbwiedergabe* bezeichnet. Um diese zu erfüllen, müßten kameraseitig alle Änderungen selbständig berücksichtigt und an die Wiedergabebedingungen angepasst werden. Dies ist auf Grund der Komplexität jedoch nicht möglich.

Wird dagegen gefordert, daß die Farben auf der Wiedergabeseite so erscheinen sollen, wie sie dem Beobachter am Besten gefallen, unabhängig davon, ob diese dann deutlich von der eigentlichen Farbe bei der Aufnahme abweichen, spricht man von der *bevorzugten Farbwiedergabe*.

Nach der Unterscheidung der Arten der Farbwiedergabe bleibt dennoch die Frage offen, wie bei dem Farbfernsehsystem die Farbwiedergabe charakterisiert werden kann.

Sowohl die bevorzugte Farbwiedergabe (wegen ihrer subjektiven Bewertung), die äquivalente Farbwiedergabe (auf Grund ihrer Komplexität) als auch die exakte Farbwiedergabe (wegen fehlender technischer Realisierbarkeit), sind zur Beschreibung ungeeignet.

Aus diesen Gründen ist eine Charakterisierung nur über die farbmetrisch richtige Farbwiedergabe möglich. Dabei ist eine Annäherung an die äquivalente Farbwiedergabe erreichbar, indem ein Bezugszustand definiert wird. Dieser Bezugszustand ist durch die Bezugslichtart (nach EBU Normlichtart D65) gegeben, unter der die Farben auf dem Bildschirm erscheinen sollen.

Für die farbmetrisch richtige Farbwiedergabe bei einem Farbfernsehsystem können folgende Forderungen aufgestellt werden:

1. Eine Oberfläche innerhalb einer Szene soll auf dem Farbfernseh Bildschirm mit der Farbvalenz wiedergegeben werden, mit der diese bei der Beleuchtung unter Normlichtart D65 einem Beobachter erscheinen würde.
2. Die Farbwerte, die für die Ansteuerung der Bildschirmprimärvalenzen Verwendung finden, werden für das Idealweiß auf $R_w=G_w=B_w$ festgelegt (Weißabgleich).
3. Die Beleuchtungsstärke des Bezugslichtes soll so gewählt sein, daß eine idealweiße Fläche (spektrealer Strahldichtefaktor $\beta(\lambda)=1$) mit der maximal erzielbaren Leuchtdichte des Farbfernseh bildschirmes erscheinen soll (gilt nur für das Bildwiedergabesystem und soll nicht weiter betrachtet werden).

2.2 Anpassung des Bildaufnahme- und Bildwiedergabesystem an die Anforderungen 1 und 2

2.2.1 Anforderung 1:

In Abbildung 1 ist die Forderung 1 dargestellt. Dabei stellt die Farbreizfunktion $\varphi_{\lambda,D65}$ den natürlichen Farbreiz (bei Beleuchtung mit D65), und die Farbreizfunktion $\varphi_{\lambda,CRT}$ den vom technischen System erzeugten Farbreiz dar. Beide Farbreize werden mit dem menschlichen Auge bewertet. Aus diesem Grund wird zur Anpassung des technischen Systems an die Forderung 1 zuerst die Wirkungsweise des menschlichen Auges beschrieben. An Hand dieser Betrachtung kann dann auf die Zusammensetzung des vom technischen System nachgebildeten Farbreizes geschlossen werden.

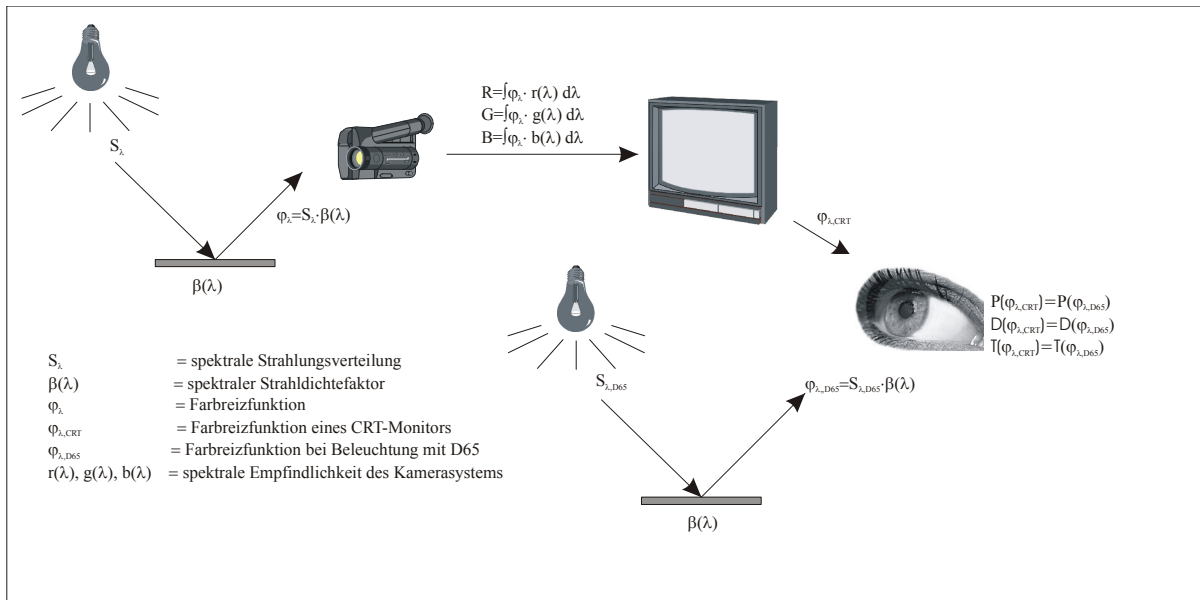


Abbildung 1: Eine Oberfläche innerhalb einer Szene soll auf dem Farbfernsehbildschirm mit der Farbvalenz wiedergegeben werden, mit der diese bei der Beleuchtung unter Normlichtart D65 einem Beobachter erscheinen würde.

Bewertung eines Farbreizes durch das menschliche Auge

Der in das menschliche Auge gelangende Farbreiz wird mit drei Empfängern bewertet (3 Arten von Zapfen). Jeder dieser drei Empfänger besitzt eine andere spektrale Empfindlichkeit. Die Bewertung der Farbreizfunktion φ_λ führt zu eindeutigen Erregungskomponenten P, D, T und erfolgt über den folgenden Zusammenhang:

$$\begin{aligned}
 P &= \int \varphi_\lambda \cdot \bar{p}(\lambda) d\lambda \\
 D &= \int \varphi_\lambda \cdot \bar{d}(\lambda) d\lambda \\
 T &= \int \varphi_\lambda \cdot \bar{t}(\lambda) d\lambda
 \end{aligned} \tag{1}$$

Die aus den Erregungskomponenten gewonnenen Informationen werden von den nachgeschalteten neuralen Strukturen an das Sehzentrum des Großhirns weitergeleitet. Nach Auswertung der Signale entsteht dort die Farbpfindung.

Es ist möglich, dass unterschiedliche Farbreizfunktionen ($\varphi_{\lambda 1}$ und $\varphi_{\lambda 2}$), das heißt unterschiedliche spektrale Verteilungen, gleiche Erregungskomponenten ergeben und die gleiche Farbpfindung auslösen können.

Eine Farbpfindung kann somit auch durch drei Impulse wie z.B. mit den in der Farbmeterik oft verwendeten Primärvalenzen¹ $\lambda_r=700$ nm, $\lambda_g=546,1$ nm und $\lambda_b=435,8$ nm oder mit den Abstrahlcharakteristiken der Bildschirmphosphore $r(\lambda)_{CRT}$, $g(\lambda)_{CRT}$ und $b(\lambda)_{CRT}$ ausgelöst werden.

$$\varphi_{\lambda,CRT} = R \cdot r(\lambda)_{CRT} + G \cdot g(\lambda)_{CRT} + B \cdot b(\lambda)_{CRT} \tag{2}$$

¹ Dabei handelt es sich um die von der CIE 1931 festgelegten Primärvalenzen, die aus den Untersuchungen von Wright 1928-29 und Guild 1931 hervorgegangen sind.

In den nachfolgenden Ausführungen wird dargestellt, wie mit einem technischen System (speziell mit einem CRT-Monitor²) jede Farbempfindung, die durch einen natürlichen Farbreiz ausgelöst wird, nachgebildet werden kann.

Dazu muß die vom technischen System nachgebildete Farbreizfunktion die folgenden Bedingungen erfüllen:

$$\begin{aligned}
 P &= \int S_{\lambda,65} \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{p}(\lambda) d\lambda = \int \varphi_{\lambda,CRT} \cdot \bar{p}(\lambda) d\lambda = \int (R \cdot r(\lambda)_{CRT} + G \cdot g(\lambda)_{CRT} + B \cdot b(\lambda)_{CRT}) \cdot \bar{p}(\lambda) d\lambda \\
 D &= \int S_{\lambda,65} \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{d}(\lambda) d\lambda = \int \varphi_{\lambda,CRT} \cdot \bar{d}(\lambda) d\lambda = \int (R \cdot r(\lambda)_{CRT} + G \cdot g(\lambda)_{CRT} + B \cdot b(\lambda)_{CRT}) \cdot \bar{d}(\lambda) d\lambda \quad (3) \\
 T &= \int S_{\lambda,65} \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{t}(\lambda) d\lambda = \int \varphi_{\lambda,CRT} \cdot \bar{t}(\lambda) d\lambda = \int (R \cdot r(\lambda)_{CRT} + G \cdot g(\lambda)_{CRT} + B \cdot b(\lambda)_{CRT}) \cdot \bar{t}(\lambda) d\lambda
 \end{aligned}$$

bzw.

$$\begin{aligned}
 P &= \int S_{\lambda,65} \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{p}(\lambda) d\lambda = R \cdot \int r(\lambda)_{CRT} \cdot \bar{p}(\lambda) d\lambda + G \cdot \int g(\lambda)_{CRT} \cdot \bar{p}(\lambda) d\lambda + B \cdot \int b(\lambda)_{CRT} \cdot \bar{p}(\lambda) d\lambda \\
 D &= \int S_{\lambda,65} \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{d}(\lambda) d\lambda = R \cdot \int r(\lambda)_{CRT} \cdot \bar{d}(\lambda) d\lambda + G \cdot \int g(\lambda)_{CRT} \cdot \bar{d}(\lambda) d\lambda + B \cdot \int b(\lambda)_{CRT} \cdot \bar{d}(\lambda) d\lambda \quad (4) \\
 T &= \int S_{\lambda,65} \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{t}(\lambda) d\lambda = R \cdot \int r(\lambda)_{CRT} \cdot \bar{t}(\lambda) d\lambda + G \cdot \int g(\lambda)_{CRT} \cdot \bar{t}(\lambda) d\lambda + B \cdot \int b(\lambda)_{CRT} \cdot \bar{t}(\lambda) d\lambda
 \end{aligned}$$

Die Farbwerte R, G, B geben an, mit welcher Stärke die einzelnen Anteile der Bildschirmprimärvalenzen an der Ermischung der Farbvalenz bzw. der Erzeugung des Farbreizes beteiligt sind, um die geforderte Farbempfindung zu erzeugen. Nach Forderung 1 muß eine Farbvalenz so wiedergegeben werden, wie sie einem Beobachter unter der Beleuchtung mit Normlichtart D65 erscheinen würde.

Die für die Darstellung einer Farbvalenz benötigten Farbwerte können über die Spektralwertkurven ermittelt werden. Diese Kurven sind genormt und werden mit $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ bezeichnet.

Die Farbwerte R, G, B errechnen sich folgendermaßen:

$$\begin{aligned}
 R &= \int S_{\lambda,E} \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{r}(\lambda) d\lambda \\
 G &= \int S_{\lambda,E} \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{g}(\lambda) d\lambda \\
 B &= \int S_{\lambda,E} \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{b}(\lambda) d\lambda
 \end{aligned} \quad (5)$$

Dabei stellt $S_{\lambda,E}$ die spektrale Strahlungsfunktion des energiegleichen Spektrums mit $S_{\lambda,E}=1$ dar.

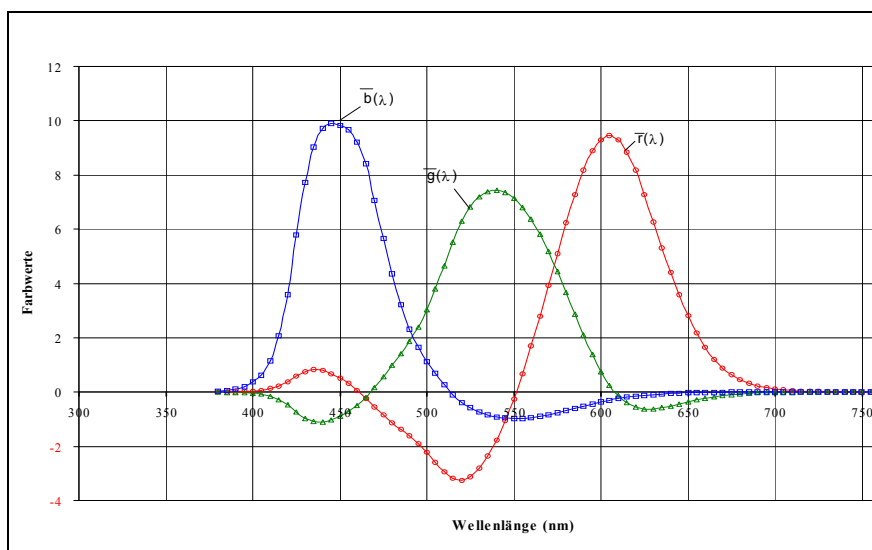


Abbildung 2: Spektralwertkurven der EBU-Bildschirmprimärvalenzen

² CRT (Cathode Ray Tube) Kathodenstrahlröhre

Mit Kenntnis der Spektralwertkurven können nun für das Bildwiedergabesystem folgende Bedingungen aufgestellt werden:

Eine Farbvalenz kann nur dann empfindungsgemäß richtig wiedergegeben werden, wenn das Bildaufnahmesystem genau die Farbwerte ermittelt, die das Bildwiedergabesystem benötigt, um einen Farbreiz zu erzeugen, der die gleiche Farbempfindung bei einem Betrachter auslösen soll, wie der natürliche Farbreiz.

Die Ermittlung der Farbwerte R, G, B erfolgt bei einem Kamerasystem auf die gleiche Weise wie beim menschlichen Auge. Aus Gleichung 1 folgt speziell für ein Kamerasystem:

$$\begin{aligned} R &= \int S_{\lambda,A} \cdot \beta(\lambda) \cdot r(\lambda) d\lambda \\ G &= \int S_{\lambda,A} \cdot \beta(\lambda) \cdot g(\lambda) d\lambda \\ B &= \int S_{\lambda,A} \cdot \beta(\lambda) \cdot b(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (6)$$

$r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ stellen die spektralen Empfindlichkeiten der drei Kanäle des gesamten Aufnahmesystems dar. Wenn die spektrale Strahlungsverteilung der Aufnahmeleuchtart $S_{\lambda,A}$ gleich der des energiegleichen Spektrums ist, sind die Spektralwertkurven $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ gleich der spektralen Empfindlichkeit der Kamera. Da dies in der Realität nie der Fall ist, werden die Spektralwertkurven an die Aufnahmeleuchtart angepaßt, um auf die spektralen Empfindlichkeiten des gesamten Bildaufnahmesystems schließen zu können.

Nachfolgend ist die oben beschriebene Bedingung für die Farbwerte dargestellt:

$$\begin{aligned} R &= \int S_{\lambda,A} \cdot \beta(\lambda) \cdot r(\lambda) d\lambda = \int S_{\lambda,E} \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{r}(\lambda) d\lambda \\ G &= \int S_{\lambda,A} \cdot \beta(\lambda) \cdot g(\lambda) d\lambda = \int S_{\lambda,E} \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{g}(\lambda) d\lambda \\ B &= \int S_{\lambda,A} \cdot \beta(\lambda) \cdot b(\lambda) d\lambda = \int S_{\lambda,E} \cdot \beta(\lambda) \cdot \bar{b}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (7)$$

Aus diesen Gleichungen können die spektralen Empfindlichkeiten des Aufnahmesystems abgeleitet werden.

$$\begin{aligned} r(\lambda) &= \frac{S_{\lambda,E} \cdot \bar{r}(\lambda)}{S_{\lambda,A}} \\ g(\lambda) &= \frac{S_{\lambda,E} \cdot \bar{g}(\lambda)}{S_{\lambda,A}} \\ b(\lambda) &= \frac{S_{\lambda,E} \cdot \bar{b}(\lambda)}{S_{\lambda,A}} \end{aligned} \quad (8)$$

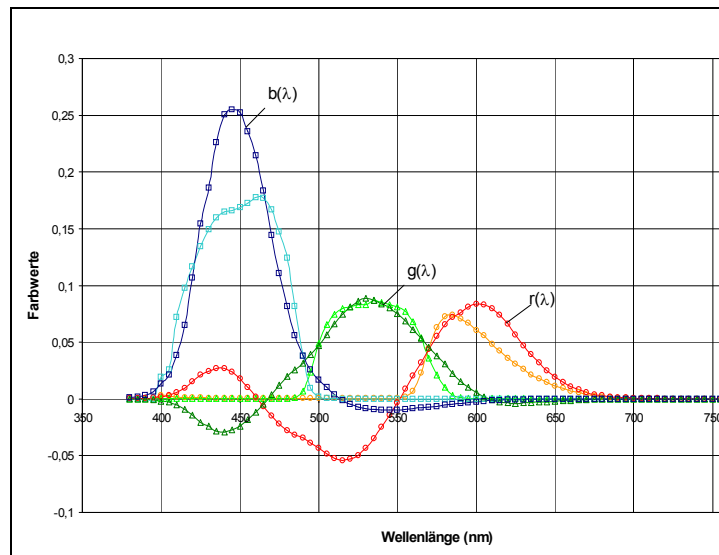


Abbildung 3: Spektrale Empfindlichkeiten einer idealen Kamera im Vergleich zu der Versuchskamera (angepasst an die Aufnahmebeleuchtung Halogen 3200K)

2.2.2 Anforderung 2 (Weißabgleich)

Die in Abbildung 3 dargestellten spektralen Empfindlichkeiten für ein Bildaufnahmesystem ermöglichen eine farbmetrisch richtige Farbwiedergabe nur bei Verwendung von Halogenbeleuchtung mit 3200K. Da aber eine Kamera nicht nur unter einer Art von Lichtquellen arbeiten soll, muß die Signalverarbeitung einer Kamera an die entsprechende Beleuchtung und deren spektrale Strahlungsverteilung $S_{\lambda,A}$ angepasst werden. Die Anpassung der spektralen Empfindlichkeit an die Aufnahmebeleuchtung wird als Weißabgleich bezeichnet. Die Anpassung kann sowohl schaltungstechnisch als auch mit speziellen Filtern realisiert werden. Da diese beiden Möglichkeiten in ihrer Herstellung sehr kostenintensiv sind, wird die Anpassung der spektralen Empfindlichkeit an die sich wechselnde Beleuchtung über die Veränderung der Verstärkungen des Rot- und Blaukanals vorgenommen. Damit wird nur die Größe der Kurven, aber nicht ihr Verlauf, verändert:

$$R = k_r \int_{380nm}^{780nm} S_{\lambda,A} \cdot \beta(\lambda) \cdot r(\lambda) \, d\lambda \quad (9)$$

$$G = k_g \int_{380nm}^{780nm} S_{\lambda,A} \cdot \beta(\lambda) \cdot g(\lambda) \, d\lambda \quad (10)$$

$$B = k_b \int_{380nm}^{780nm} S_{\lambda,A} \cdot \beta(\lambda) \cdot b(\lambda) \, d\lambda \quad (11)$$

Die Verstärkungsfaktoren k_r , k_g und k_b werden so gewählt, daß sich für eine mattweiße Vorlage mit $\beta(\lambda)=1$ die drei Farbwerte R, G, B zu 100 ergeben. Werden diese Farbwerte an das Bildwiedergabesystem übertragen, ergibt sich dort die Normlichtart D65, die als Bezugslichtart von der EBU vorgeschrieben wurde. Bei der Verwendung der spektralen Empfindlichkeiten der Farbmischkurven nach Abbildung 3 (ideale Kamera) ergeben sich für die Integrale gleiche Werte und somit auch für die Verstärkungsfaktoren ($k_r=k_g=k_b$). Die Verstärkungsfaktoren werden auf den Grünkanal normiert.

Sie werden nach folgenden Gleichungen bestimmt:

$$k_g = \frac{100}{\int_{380nm}^{780nm} S_{\lambda,A} \cdot \beta(\lambda) \cdot g(\lambda) \, d\lambda} \quad (12)$$

$$k_r = k_g \frac{\int_{380nm}^{780nm} S_{\lambda,A} \cdot \beta(\lambda) \cdot r(\lambda) \, d\lambda}{\int_{380nm}^{780nm} S_{\lambda,A} \cdot \beta(\lambda) \cdot g(\lambda) \, d\lambda} \quad (13)$$

$$k_b = k_g \frac{\int_{380nm}^{780nm} S_{\lambda,A} \cdot \beta(\lambda) \cdot b(\lambda) \, d\lambda}{\int_{380nm}^{780nm} S_{\lambda,A} \cdot \beta(\lambda) \cdot g(\lambda) \, d\lambda} \quad (14)$$

Werden dagegen für die Beleuchtung der Szene keine Halogenlampen mit einer Farbtemperatur von 3200K benutzt, sondern andere Lichtquellen, sind die Ergebnisse der Integrale nicht mehr gleich, wodurch auch die Verstärkungsfaktoren untereinander differieren.

2.3 Realisierung der Farbmischkurven

Die spektralen Empfindlichkeiten des gesamten Bildaufnahmesystems setzen sich aus den einzelnen Transmissionsgraden (des Kameraobjektives $\tau_o(\lambda)$, des Lichtteilers $\tau_{Lr}(\lambda)$, $\tau_{Lg}(\lambda)$, $\tau_{Lb}(\lambda)$, der Filter $\tau_{Fr}(\lambda)$, $\tau_{Fg}(\lambda)$, $\tau_{Fb}(\lambda)$), der spektralen Empfindlichkeit der Empfänger (CCD-Matrix) $s_r(\lambda)$, $s_g(\lambda)$, $s_b(\lambda)$, und der Farbsignalverarbeitung innerhalb der Kamera zusammen.

$$\begin{aligned} r(\lambda) &= \tau_o(\lambda) \cdot \tau_{Lr}(\lambda) \cdot \tau_{Fr}(\lambda) \cdot s_r(\lambda) \\ g(\lambda) &= \tau_o(\lambda) \cdot \tau_{Lg}(\lambda) \cdot \tau_{Fg}(\lambda) \cdot s_g(\lambda) \\ b(\lambda) &= \tau_o(\lambda) \cdot \tau_{Lb}(\lambda) \cdot \tau_{Fb}(\lambda) \cdot s_b(\lambda) \end{aligned} \quad (15)$$

Bei Betrachtung der spektralen Empfindlichkeiten des gesamten Bildaufnahmesystems fällt auf, dass die negativen Anteile mit lichtelektrischen Empfängern nicht erzeugt werden können. Um dennoch die Forderung nach einer exakten Farbwiedergabe nicht aufgeben zu müssen, könnte einerseits jede einzelne Kurve mit einem Empfänger realisiert werden. Das bedeutet jedoch, dass sieben Empfänger benötigt werden und damit ein hoher Aufwand an Vorfilterung und Lichtleitung erforderlich ist. Das Problem kann durch eine Transformation gelöst werden. Dazu wird eine Matrix gesucht, die die bekannten spektralen Empfindlichkeiten in drei Kurven transformiert, die keine negativen Anteile mehr besitzen. Diese könnten dann von jeweils einem Empfänger und den vorgeschalteten Komponenten realisiert werden. Im nachfolgenden ist der Farbsignalverlauf eines Bildaufnahmesystems dargestellt, bei dem die Farbwerte mit spektralen Empfindlichkeiten erzeugt werden, die nur positive Anteile besitzen und anschließend mit Hilfe der elektronischen Matrix (Widerstandsnetzwerk) transformiert werden.

Die Abbildung 4 zeigt ein Blockschaltbild der Farbsignalverarbeitung und verdeutlicht, welche spektralen Empfindlichkeiten sich an den Meßpunkten 1-3 ergeben würden. Nach der elektronischen Matrix werden die Farbwertsignale an die technischen Bedingungen, die das Bildwiedergabesystem stellt, angepasst. Da ein CRT-Monitor nur positive Signale verarbeiten kann, müssen die aus der Matrix sich ergebenden Signale begrenzt werden. Das bedeutet, dass die negativen Anteile der Farbmischkurve abgeschnitten werden. Weiterhin müssen die Signale an die Besonderheiten der Kathodenstrahlröhre angepaßt werden, die keinen linearen Signalverlauf besitzt (Gammakorrektur).

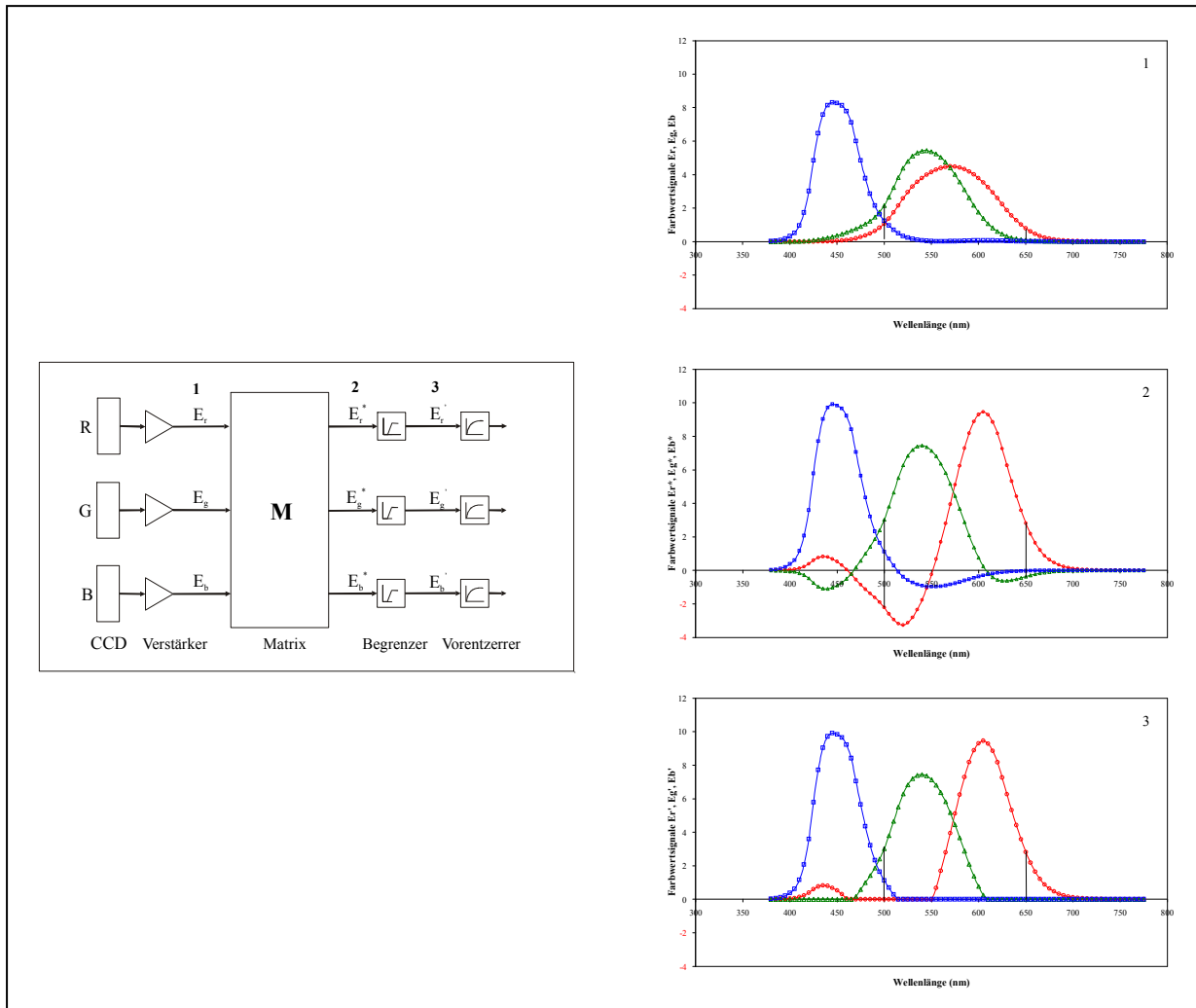


Abbildung 4: Farbsignalverarbeitung innerhalb einer Kamera, mit elektronischer Matrix und deren Farbmischkurven an den Messpunkten 1-3

2.4 Verfahren zur Kennzeichnung der Farbwiedergabe in der Fernsehtechnik mit Bildaufnahmegeräten

Verfahren nach DIN 6169 Teil 6

In der DIN 6169 Teil 6 [3] wird ein Verfahren beschrieben, mit dem sich die Farbwiedergabeeigenschaft von Fernsehübertragungssystemen zahlenmäßig durch einen Farbwiedergabeindex kennzeichnen läßt. Der Farbwiedergabeindex wird nach dem Testfarbenverfahren ermittelt.

Hierbei werden die Testfarben mit dem Bildaufnahmesystem aufgenommen und die erzeugten Farbwertsignale an den Empfänger übertragen. Die Farbwertsignale sind für die Ansteuerung des Bildwiedergabesystems und für die Erzeugung des entsprechenden Farbreizes erforderlich.

Die für den Vergleich mit der Originalfarbe³ benötigten Farbwerte werden aus den Farbwertsignalen der Kamera berechnet. Zwar könnten die Farbwerte auch über den Bildschirm ermittelt und mit den Soll-Farbwerten der Originalfarbe verglichen werden, doch ist davon abzusehen, da dadurch die einzelnen Teilprozesse, die auf die Farbwiedergabe wirken, nicht mehr erkennbar sind. Aus diesem

³ Als Originalfarbe wird dabei die Farbe bezeichnet, die entsteht, wenn die Testfarbe mit der Normlichtart D65 beleuchtet wird.

Grund sollten die Farbwiedergabeeigenschaften für jedes Gerät innerhalb der Übertragungskette einzeln ermittelt werden.

Die von der Kamera erzeugten Farbwertsignale werden in Normfarbwerte umgerechnet und mit denen der Originalfarbe verglichen. Die Abweichung zu der Originalfarbe, welche infolge der Erzeugung und Verarbeitung der Signale innerhalb des Bildaufnahmesystems entstehen, können mit dem Farbabstand ΔE charakterisiert und in einen Farbwiedergabeindex umgerechnet werden.

Der Farbabstand gibt den geometrischen Abstand zwischen dem Farbort der Wiedergabefarbe und dem der Originalfarbe innerhalb eines empfindungsgemäß gleichabständigen Farbsystems an. In der DIN 6169 Teil 6 wird dabei das CIE-LUV System (1976) benutzt.

Um vergleichbare Ergebnisse bei diesem Verfahren zu ermöglichen, wird eine feste Anzahl von festgelegten Testfarben benutzt. Für eine messtechnische Bestimmung müssen sie als reale Körperfarben vorliegen. Bei einer rechnerischen Bestimmung sind die spektralen Strahldichtefaktoren $\beta(\lambda)$ der einzelnen Testfarben erforderlich.

Zur Ermittlung des Farbwiedergabeindex wird wie folgt vorgegangen:

1. Bestimmung der Farbwertsignale E_r, E_g, E_b , die von dem Kamerasystem bei der Aufnahme einer Testfarbe erzeugt werden
2. Umrechnung der Farbwertsignale in Farbwerte R,G,B und anschließender Transformation in Normfarbwerte X,Y,Z
3. Berechnung des Farbabstandes ΔE_{Luv} unter Verwendung der ermittelten und der vorgeschriebenen Normfarbwerte der Testfarbe
4. Berechnung des speziellen (R_i) und des allgemeinen Farbwiedergabeindex (R_d)

1. Bestimmung der Farbwertsignale E_r, E_g, E_b die von dem Kamerasystem bei der Aufnahme einer Testfarbe erzeugt werden

a. Messung der Farbwertsignale E_r, E_g, E_b

Vor der Messung der Farbwertsignale der einzelnen Testfarben muss das Bildaufnahmesystem an die vorherrschende Aufnahmelichtart angepasst werden (Weißabgleich).

Das Kamerasystem wird so eingestellt, dass sich bei der Aufnahme des Idealweißes (mit $\beta(\lambda)=1$) unter der gewählten Lichtart für die Farbwertsignale drei gleich große Werte ($E_r=E_g=E_b$) ergeben. Erst nach diesem Weißabgleich können die Farbwertsignale für die einzelnen Testfarben ermittelt werden.

b. Rechnerische Bestimmung der Farbwertsignale

Für die rechnerische Bestimmung der Farbwertsignale müssen sowohl die spektralen Empfindlichkeiten der drei Kanäle $r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda)$ des Bildaufnahmesystems, die spektrale Strahlungsverteilung der Aufnahmelichtart $S_{\lambda,A}$ sowie die spektralen Strahldichtefaktoren $\beta_i(\lambda)$ ⁴ der Testfarben bekannt sein. Die Farbwertsignale errechnen sich dann mit Hilfe der folgenden Gleichungen:

$$\begin{aligned}
 E_{r,i} &= k_r \int S_{\lambda,A} \cdot \beta_i(\lambda) \cdot r(\lambda) d\lambda \\
 E_{g,i} &= k_g \int S_{\lambda,A} \cdot \beta_i(\lambda) \cdot g(\lambda) d\lambda \\
 E_{b,i} &= k_b \int S_{\lambda,A} \cdot \beta_i(\lambda) \cdot b(\lambda) d\lambda
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Die Konstanten k_r, k_g, k_b werden so gewählt, daß für das Idealweiß unter der entsprechenden Aufnahmelichtart die drei Farbwertsignale gleich 100 werden.

⁴ Der Index i entspricht der Nummer der jeweiligen Testfarbe

2. Umrechnung der Farbwertsignale in Farbwerte und anschließende Transformation in Normfarbwerte

Da die gemessenen Farbwertsignale $E_{r,i}$, $E_{g,i}$, $E_{b,i}$ (Wertebereich: 0-255) innerhalb eines anderen Wertebereiches liegen als die Farbwerte R_i , G_i , B_i (Wertebereich: 0-100), müssen die Farbwertsignale in diesen umgerechnet werden. Die Normfarbwerte X_i , Y_i , Z_i können mit der Transformationsmatrix aus den Farbwerten errechnet werden (EBU-RGB mit D65 als Weißpunkt).

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,4303 & 0,3416 & 0,1782 \\ 0,2219 & 0,7068 & 0,0713 \\ 0,0202 & 0,1296 & 0,9387 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R_i \\ G_i \\ B_i \end{pmatrix} \quad (17)$$

3. Berechnung des Farbabstandes unter Verwendung der ermittelten und der vorgeschriebenen Normfarbwerte der Testfarbe

Der Farbabstand zweier Farbproben wird mit ΔE bezeichnet. Er beschreibt den empfundenen Unterschied zwischen zwei Farbvalenzen durch eine Maßzahl. Mit der Berechnung des geometrischen Abstandes innerhalb der Normfarbtafel xy ist eine Charakterisierung nicht möglich, da der geometrische Abstand zwischen zwei Farborten innerhalb der Normfarbtafel nicht gleich dem empfundenen Unterschied zwischen diesen beiden Farborten ist.

Dieses Problem ist der höheren Farbmeterik zugeschrieben, die sich mit der Beschreibung der gegenseitigen Beziehungen zwischen den Farben beschäftigt. Grundlegende Erkenntnisse lieferten die Studien von MacAdam 1942 [4,2]. Für seine Versuche wählte er 25 verschiedene Farborte innerhalb der Normfarbtafel aus. Die Farbarten wurden mittels Filter erzeugt und besaßen alle die gleiche Leuchtdichte von ca. 50 cd/m^2 . Die Farbvalenz wurde der Versuchsperson auf einer Sehfeldhälfte dargeboten. Auf der anderen Sehfeldhälfte sollte die Versuchsperson die vorgegebene Farbvalenz aus zwei anderen Farbvalenzen nachmischen, die so gewählt waren, dass ihre Verbindungsgerade in der Farbtafel durch den Farbort der vorgegebenen Farbvalenz ging, und diese exakt nachmischen konnte. Die Nachmischung wurde von der Versuchsperson mehrfach wiederholt, wobei die für die Mischung verwendeten Farben unterschiedlich waren.

Die ermittelten Farborte ordneten sich zu einer Ellipse mit der vorgegebenen Farbvalenz als Mittelpunkt an. Sowohl Größe als auch Lage der Ellipsen ist innerhalb der Normfarbtafel recht unterschiedlich und zeigt sehr deutlich, daß die Darstellung der Farbarten empfindungsgemäß stark verzerrt ist.

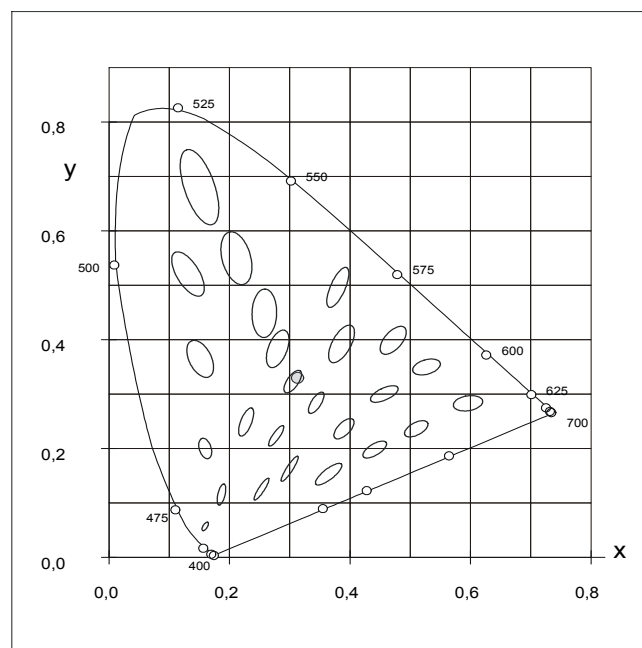


Abb. 4. 1: MacAdam-Ellipsen in 10-facher Vergrößerung

In einer Farbtafel, welche empfindungsgemäß gleichabständig ist, gehen die Ellipsen in gleich große Kreise über. Um dieses Mißverhältnis zu beseitigen, müßte die Normfarbtafel projektiv verzerrt werden.

Aus einer Vielzahl von bestehenden Transformationsformeln wurden 1976 zwei Formeln für die Farbabstandsberechnung empfohlen, welche auf die einzelnen Gesichtspunkte der Farbabstandsbewertung der einzelnen Anwender unterschiedlich stark eingeht. So kommt das CIE-LAB-System hauptsächlich bei Körperfarben und das CIE-LUV-System bei Selbstleuchtern zur Anwendung, wozu auch der Farbfernseher gehört. Aus diesem Grund wird das CIE-LUV-System auch innerhalb der DIN 6169 Teil 6 verwendet.

Zur Berechnung des Farbabstandes innerhalb des CIE-LUV-Systems müssen die Normfarbwerte X_i, Y_i, Z_i bzw. die Normfarbwertanteile der einzelnen Testfarben in die Farbwerte u'_i, v'_i der CIE-UCS Farbtafel 1976 umgerechnet werden.

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}$$

(18)

Und deren Rücktransformation:

$$x = \frac{9u'}{6u' - 16v' + 12}$$

$$y = \frac{4v'}{6u' - 16v' + 12}$$

(19)

Die Farbtafel des UCS-Systems stellt eine projektive Transformation der Normfarbtafel dar. Bei der Ermischung einer Farbvalenz aus zwei Komponenten liegen die Farbörter der Komponenten immer noch auf einer Verbindungsgeraden. Die MacAdam Ellipsen werden allerdings auch hier nicht ganz als Kreise wiedergegeben, wie es eigentlich gewünscht wird, aber der Unterschied zwischen den Ellipsen beträgt statt 1:20 in der Normfarbtafel nur noch 1:2.

Anschließend werden die Farbwerte L^*, u^*, v^* im empfindungsgemäßen Farbraum des CIE-LUV-Systems (1976) berechnet. Für die Helligkeitsbewertung wird eine der Empfindung angepaßte Größe L^* (psychometrische Helligkeitsfunktion) definiert, die die Tatsache berücksichtigt, dass das menschliche Sehsystem Leuchtdichteänderungen bei kleinen Leuchtdichten stärker wahrnimmt als bei großen.

$$L^* = 116 \cdot \left(\frac{Y}{Y_w} \right)^{1/3} - 16 \quad \text{für } 0,008856 < \frac{Y}{Y_w} < 1$$

(20)

$$L^* = 903,29 \cdot \left(\frac{Y}{Y_w} \right) \quad \text{für } 0 < \frac{Y}{Y_w} < 0,008856$$

$$u^* = 13 \cdot L^* \cdot (u' - u'_w)$$

(21)

$$v^* = 13 \cdot L^* \cdot (v' - v'_w)$$

Alle Größen, die mit dem Index w gekennzeichnet sind, stellen die Werte für die jeweilige unbunte Bezugsfarbe bei Körperfarben bzw. den Farbort der Lichtart (z.B. D65) dar.

Mit diesen Farbwerten lässt sich dann der Farbabstand zwischen zwei Farbvalenzen berechnen, wobei ein Farbabstand von $\Delta E=1$ einen Farbunterschied angibt, der von einem 2° Normalbeobachter gerade noch wahrgenommen werden kann:

$$\Delta E_{Luv} = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (u_2^* - u_1^*)^2 + (v_2^* - v_1^*)^2} \quad (22)$$

Oft reicht allerdings die Angabe des Gesamtfarbabstandes nicht aus und es ist notwendig, die Einzelabstände mit anzugeben, die die Art der Abweichung näher beschreiben.

Aus den Farbwerten u^* und v^* lässt sich der *Bunton* ableiten, und in einem Koordinatensystem darstellen. Dabei verläuft die u^* Achse in Grün-Rot Richtung und die v^* Achse in Blau-Gelb.

4. Berechnung des speziellen und des allgemeinen Farbwiedergabeindex

Aus den Farbabständen kann für jede Testfarbe der spezielle *Farbwiedergabeindex* R_i berechnet werden:

$$R_i = 100 - 4,6 \cdot \Delta E_{Luv} \quad (23)$$

Der *allgemeine Farbwiedergabeindex* R_a ist als Mittelwert der speziellen Farbwiedergabeindizes definiert:

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (24)$$

3. Vorbereitungsaufgaben

1. Berechnen Sie die Normfarbwerte X,Y,Z wenn folgende RGB-Farbwerte vorliegen:

R=31, G=19, B=4

2. Berechnen Sie den Farbabstand ΔE_{Luv} zwischen Probe und dem Original bei Beleuchtung mit D65.

	Normfarbwerte			Normfarbwertanteile		CIE-LUV-System	
	X_w	Y_w	Z_w	x_w	y_w	u'_w	v'_w
D65	95,04	100	108,89	0,3127	0,3290	0,1978	0,4683
	X	Y	Z	x	y	u'	v'
Probe	6,57	6,80	22,52				
Original	5,94	5,64	18,56				

⁵ Allgemein ist zu sagen, daß die reine Angabe des Farbabstandes ΔE keine Aussagekraft besitzt, es sollte auch gekennzeichnet werden, mit welcher Formel dieser berechnet wurde. Auch ist darauf hinzuweisen, dass keine der heutigen verwendeten Formeln den Anspruch auf allgemeine Gleichabständigkeit besitzt.

4. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

4.1. Versuchsaufbau:

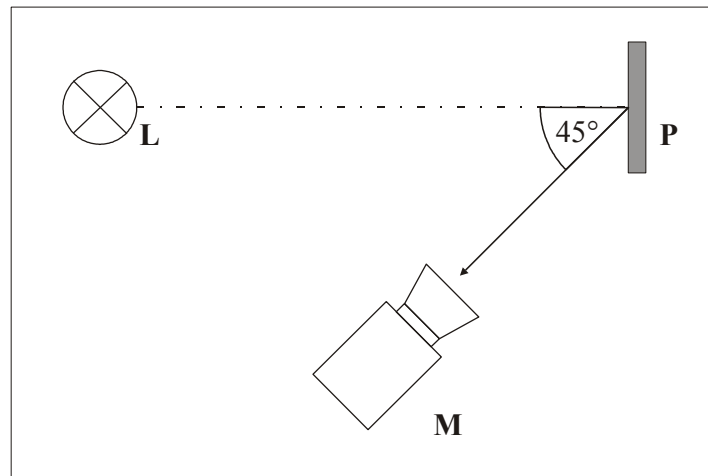


Abbildung 1: Versuchsaufbau mit 0°/45° Messgeometrie

Lichtquelle	Position	Spannung
Leuchtstofflampe 2700 K	40 cm	230 V Netzspannung
Halogenleuchte 2700 K	60 cm	8,8 V
Halogenleuchte 3200 K	60 cm	13,9 V
LED 3160 K	30 cm	230 V Netzspannung

Tabelle 1: Positions- und Spannungsangaben für die Versuchslichtquellen

4.2. Messung der Farbwerte mit einem Spektralradiometer

Es sollen die Farbwerte der Farbproben in Abhängigkeit von der verwendeten Beleuchtung gemessen werden. Dafür stehen 4 verschiedene Aufnahmebeleuchtungen zur Verfügung. Die Messung der Farbwertanteile (x,y) erfolgt mit einem Spektralradiometer.

Tragen Sie die Messwerte für jede Aufnahmebeleuchtung in eine xy Normfarbtafel ein. Beurteilen Sie die Unterschiede zu den Messwerten bei einer Beleuchtung mit Normlichtart D65! (Die Normfarbtafel liegt am Arbeitsplatz aus und die Werte für die Beleuchtung mit D65 sind bereits eingetragen.)

4.3. Messung der Farbwertsignale mit der Versuchskamera

Nehmen Sie die grundlegenden Kameraeinstellungen⁶ in Abhängigkeit von der Beleuchtungsauswahl (siehe Tabelle 2 oder 3) vor.

Danach wird durch Dämpfung bzw. Verstärkung des Rot- und Blaukanals der Weißabgleich manuell mittels Referenzweiß vorgenommen. Dabei müssen die Gesamtverstärkung (Gain-Control), die Integrationszeit und der Abstand der Lichtquelle zum Referenzweiß so gewählt werden, dass sich für den Grünkanal ein Wert von ca. **210** ergibt. Die Rot- und Blaukanalverstärkung wird dann solange variiert, bis sich für alle drei Kanäle R, G, B das gleiche Farbwertsignal ergibt (nach Abzug des Dunkelsignals, Vorgabe durch das Excel-Formular beachten). Es ist darauf zu achten, dass keiner der Kanäle übersteuert wird.

⁶ Durchführen eines Schwarzabgleiches, Einstellung der Integrationszeit sowie der Gesamtverstärkung

Nach abgeschlossenem Weißabgleich werden die Farbwertsignale für jede Testfarbe gemessen und in ein Microsoft-Excel Formular (*Auswertungsformular 2 für Testfarbensatz 1.xls bzw. Testfarbensatz 2*) eingetragen. Dieses Vorgehen wird für jede Aufnahmebeleuchtung durchgeführt.

Tragen Sie die berechneten Normfarbwertanteile xy für jede Aufnahmebeleuchtung in eine Normfarbtafel ein. Vergleichen Sie auch die Farbabstände ΔE_{LUV} miteinander. Bei welchen Testfarben ergeben sich die größten Farbabstände?

4.4 Einflussgrößen auf die Ergebnisse

Notieren Sie die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Messergebnisse!

Hinweise zur Bedienung der Kamera

1. Versuchskamera auf Stativhalter befestigen und ausrichten
2. Versuchsrechner einschalten, OS/2 booten, Programm „*Lmess Farbkamera*“ vom Desktop aus starten
3. Kontrollmonitor einschalten und auf 0 AV einstellen (nur mit Fernbedienung möglich)
4. Lichtquelle positionieren und entsprechende Spannung einstellen (siehe Tabelle 1)
5. Überprüfung der Standardeinstellungen an der Kamera
 - Mit der MENU Taste auf der Kamerarückseite (siehe Abb.1) wird das Hauptmenü aufgerufen
 - Mit den FUNCTION Tasten (UP und DOWN) können die einzelnen Optionen angesteuert werden. Gehen Sie die einzelnen Einstellungen durch und vergleichen Sie diese mit denen in Tabelle 2 bzw. 3. Mit den Tasten DATA UP und DOWN können die Werte verändert werden.
 - Mit der MENU Taste das Hauptmenü verlassen.

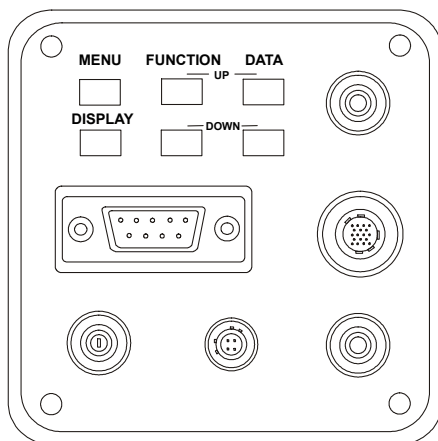


Abb.1: Kamerarückseite

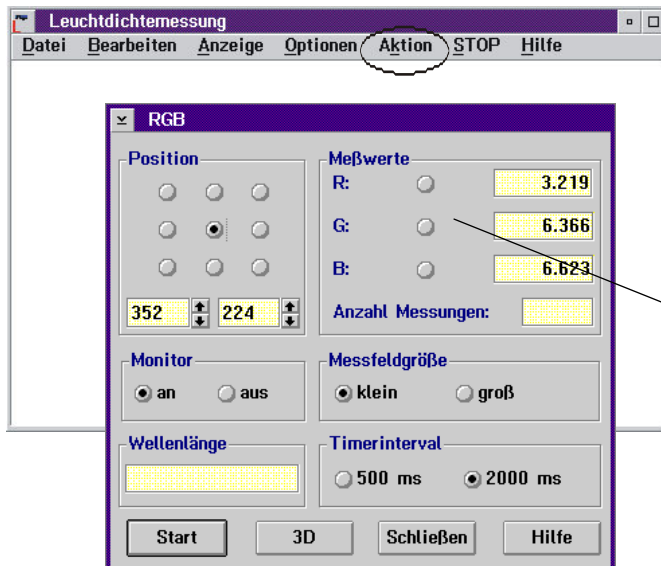
	Standardwert	Variation
GAIN	STEP	
STEP	00 dB	0-18 dB
C.TEMP	3200 K	
WHT:BAL	MANU	
R.GAIN	0	± 99
B.GAIN	0	± 99
CCD IRIS	OFF	
SHUTTER	STEP	
STEP	1/125	1/125-1/10000
MANU	310/625	
M.PED	0	
DTL	0	
H.PHASE	0	
SC	0	
0/180	0	
GAMMA	OFF	
G.SYNC	OFF	
FLD/FRM	FRM	
D-SUB	Y/C	

Tabelle 2: Einstellwerte der Kamera für Halogenlampe und LED

	Standardwert	Variation
GAIN	STEP	
STEP	00 dB	0-18 dB
C.TEMP	3200 K	
WHT:BAL	MANU	
R.GAIN	0	± 99
B.GAIN	0	± 99
CCD IRIS	OFF	
SHUTTER	OFF	
STEP	1/125	
MANU	310/625	
M.PED	0	
DTL	0	
H.PHASE	0	
SC	0	
0/180	0	
GAMMA	OFF	
G.SYNC	OFF	
FLD/FRM	FRM	
D-SUB	Y/C	

Tabelle 3: Einstellwerte der Kamera für Leuchtstofflampe

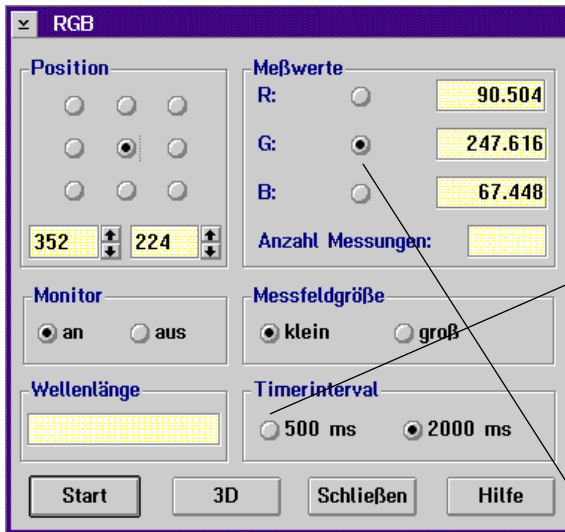
- Schwarzabgleich ausführen: (wird im Programm *Lmess Kamera* durchgeführt)
 - Objektiv mit Objektivdeckel verdunkeln



- In der Menüleiste auf „Anzeige“ gehen und den Menüpunkt „RGB-Messfenster“ aktivieren
- Farbwertsignale (RGB) für das Dunkelsignal erfassen und in Excel-Formular bzw. Tabellenblatt eintragen

- Objektivdeckel entfernen
- Testfarbensatz in Halterung einführen und Referenzweiß im Sichtfenster positionieren
- Kamera so positionieren, dass das RGB-Messfenster auf dem Monitor von der Farbprobe umschlossen wird und scharfstellen
- Raumlicht ausschalten

11. Weißabgleich durchführen



- Einzeldarstellung des Hauptmenüs durch drücken der Tasten MENU und dann DISPLAY an der Kamerarückwand aufrufen
- Achtung: Es muss unbedingt die Einzeldarstellung gewählt werden, da sonst das Messfenster die Menüschrift als Signal interpretiert!
- Timerintervall auf 500 ms stellen
- Option STEP (unterhalb von SHUTTER STEP) mit der FUNKTION Taste an der Kamerarückwand anwählen und Integrationszeit (1/125 - 1/10000) mit DATA so einstellen, dass sich für den Grünkanal G ein Wert von ca. 225 ergibt (Kontrollfeld für Übersteuerung von G darf nicht aktiv sein!)
- Gegebenenfalls über die Option STEP

(GAIN STEP) Gesamtverstärkung verändern (auf Übersteuerung achten)

- Option R.GAIN ansteuern und Rotkanal verstärken bzw. dämpfen, so dass sich der berechnete Wert aus dem Excel-Formular ergibt. Einstellungen in das Excel-Formular bzw. Tabellenblatt eintragen.
 - Gleiches mit B.GAIN ausführen
 - Da sich die Verstärkungen gegenseitig beeinflussen, kann eine Nachkorrektur erforderlich sein
12. Farbwertsignale für Referenzweiß in Excel-Formular (*Auswertungsformular 2 für Testfarbensatz 1.xls bzw. Testfarbensatz 2*) bzw. Tabellenblatt eintragen
 13. Farbwertsignale der Farbproben in Excel-Formular bzw. Tabellenblatt eintragen
 14. Lichtquelle wechseln, einstellen und positionieren (siehe Tabelle 1)
 15. Weiter wie ab Punkt 5 (Kamera einstellen)

5. Literatur

- [1] Hunt, R.W.G.: Objectives in Color Reproduction. Proc. Inter.Soc. Color Council (1971), S. 1-37
- [2] Lang H.: Farbwiedergabe in den Medien. Muster Schmidt Verlag, Göttingen, Zürich, 1995
- [3] Richter M.; Terstige H.: Demonstration der Entstehung der Spektralwertkurven. Die Farbe 17 (1968) S.209-223
- [4] MacAdam D.L.: Visual sensitivities to color differences in daylight. Journal Optical Society of America, 32(1942), S. 247-274

6. Weiterführende Literatur

- Richter M.: Einführung in die Farbmeterik. de Gruyter, Berlin, New York, 1980, 2. Aufl.
- DIN 6169 Teil 6: Farbwiedergabe Verfahren zur Kennzeichnung der Farbwiedergabe in der Fernsehtechnik mit Bildaufnahmegegeräten
- DIN 6174: Farbmeterische Bestimmung von Farbabständen bei Körperfarben nach der CIELAB-Formel, 1/1979
- Berger-Schunn A.: Praktische Farbmessung: ein Buch für Anfänger, eine Gedächtnisstütze für Könner. Muster Schmidt, 1994, 2., überarb. Aufl.
- Chrisment A.: Von der Farbe zur Farbmessung, Editions 3C Conail, Paris, 1996