

Praktikumsversuch

Farbe

S. Siggelkow und H. Burkhardt

Inhaltsverzeichnis

1	Farbe	3
1.1	Einleitung	3
1.2	Menschliche Farbwahrnehmung	4
1.3	Farbdarstellung	6
1.3.1	Dreifarbentheorie	6
1.3.2	Farbsysteme	9
1.4	Farbnormalisierung	18
1.4.1	Modellbildung	18
1.4.2	Normalisierung bzgl. der Beleuchtungsgeometrie	19
1.4.3	Normalisierung bzgl. des Beleuchtungsspektrums	20
1.4.4	Normalisierung bzgl. beider Effekte	21
1.5	Versuchsteil	22
1.5.1	Versuchsaufbau	22
1.5.2	Grundlegende Einführung in Matlab	23
1.5.3	Theoretische Aufgaben	25
1.5.4	Aufgaben zur menschlichen Farbwahrnehmung	25
1.5.5	Aufgaben zur Farbdarstellung	26
1.5.6	Aufgaben zur Farbnormalisierung	27

1 Farbe

1.1 Einleitung

Farbe ist ein wichtiger Bestandteil in der Bildverarbeitung und Bildanalyse. Es ist jedoch keineswegs trivial, das menschliche Farbempfinden auf dem Computer nachzubilden. Am Anfang müssen daher Untersuchungen der menschlichen Farbwahrnehmung stehen. Zum einen darf bei der Abbildung der realen Szene auf den Computer keine für den Menschen relevante Information verlorengehen, zum anderen braucht aber auch diejenige Information, welche der Mensch nicht wahrnimmt, nicht abgebildet werden. In Kapitel 1.2 wird daher der Ablauf der Farbwahrnehmung im menschlichen Auge betrachtet.

In Kapitel 1.3 werden dann unterschiedliche Möglichkeiten der Darstellung von Farbe auf dem Computer vorgestellt. Diesen liegen unterschiedliche Motive zugrunde: Manche Systeme basieren auf der Farberzeugung im Monitor und sind somit auf diese bestens abgestimmt, wieder andere sind für eine Übertragung von Bildinformationen bestimmt, zielen also auf eine einfache verlustbehaftete, aber visuell kaum wahrnehmbare Komprimierung ab. Für das Messen von Farbe wiederum sind Systeme gefragt, in denen das menschliche Farbunterscheidungsvermögen durch einfache Metriken dargestellt werden kann. Und schließlich sind für den interaktiven Gebrauch Farbsysteme gefragt, die Farbe in einer dem Menschen geläufigen Form beschreiben.

Durch Beleuchtungsänderungen können sich die Farben ein und derselben Szene entscheidend verändern. Der Mensch ist aber trotzdem in der Lage, eine Szene bei Tageslicht und bei Sonnenuntergang als unverändert zu erkennen. Für den Computer ist dies keine leichte Aufgabe. Es gibt aber Möglichkeiten den Einfluß der Beleuchtung unter einigen idealisierten Bedingungen herauszurechnen. Ein solches Verfahren wird in Kapitel 1.4 behandelt werden.

Im letzten Kapitel sind schließlich die zu bearbeitenden Aufgaben angegeben.

1.2 Menschliche Farbwahrnehmung

Die menschliche Farbwahrnehmung ist von fundamentaler Bedeutung für die Betrachtung von Farbe im Rahmen der digitalen Bildverarbeitung. Denn nur, was der Mensch sieht, braucht auf dem Computer nachgebildet zu werden. Daher soll zunächst geklärt werden: *Was ist Farbe* überhaupt? Wie kommt das Farbsehen zustande?

Physikalisch gesehen ist Farbe nichts anderes als Licht mit unterschiedlichen Wellenlängen. Der sichtbare Bereich beginnt bei Blauviolett (ca. 410 nm) und setzt sich fort über Blau (470nm), Grün (520nm), Gelb (590nm), Orange (620nm) bis zu Rot (700nm).

Die Farbe eines Gegenstandes wird bestimmt durch die Zusammensetzung des Lichts, das der Gegenstand reflektiert bzw. hindurchläßt. Farben, die absorbiert werden, verschwinden im Spektrum des reflektierten Lichts und verändern somit seine Farbe. Wie wird diese nun vom menschlichen Auge aufgenommen?

Die Netzhaut des Auges (Abbildung 1.1) enthält lichtempfindliche Sensoren. Man

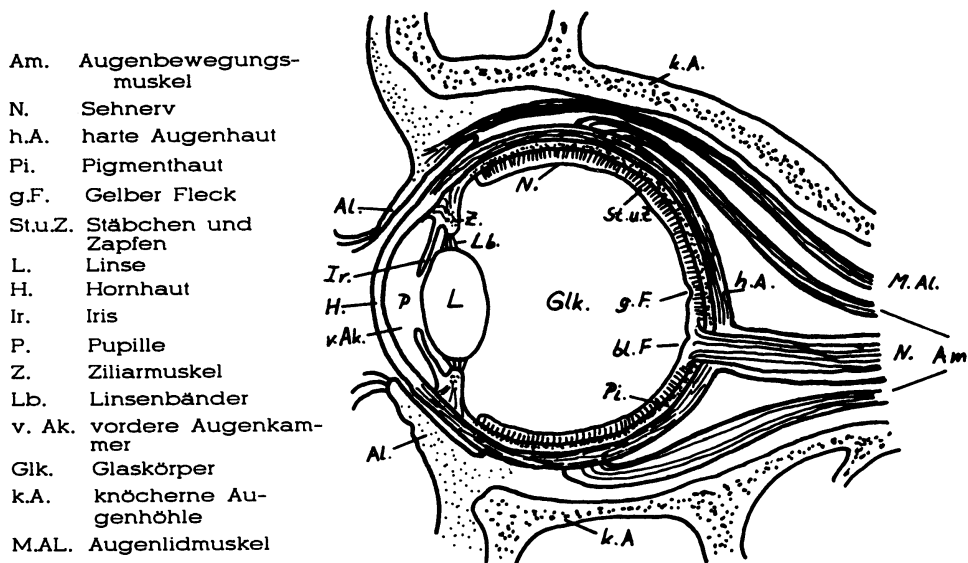


Abbildung 1.1: Vertikaler Schnitt durch das menschliche Auge [9].

unterscheidet zwischen zwei Arten:

Stäbchen für reines Helligkeitsempfinden bei wenig Lichtintensität (ca. 120 Mio.)
und

Zapfen für das Farbsehen bei höherer Lichtintensität (ca. 5..10 Mio.).

Dabei sind die Stäbchen ungefähr um den Faktor 1000 empfindlicher als die Zapfen und somit für das Nachtsehen zuständig. Da sie aber nur zum Helligkeitsempfinden beitragen, erscheinen Objekte in der Dunkelheit farblos. Während die Zapfen vor allem in der Netzhautgrube (gelber Fleck) liegen, auf die das einfallende Licht fokussiert wird, befinden sich die Stäbchen im Umfeld. Daher werden Objekte nachts eher unscharf wahrgenommen.

Das farbige Sehen beruht nach Young und Helmholtz darauf, daß 3 Arten von Zapfen vorhanden sind, und zwar rot-, grün-, und blauempfindliche. Diese Zäpfchen tragen zur Farbwahrnehmung blau-, grün- und gelbsensible Fotopigmente. Die Benennung der roten Zäpfchen ist etwas verwirrend und wohl historisch dadurch zu begründen, daß sie die empfindlichsten für das rechte Ende des sichtbaren Spektrums, also den roten Bereich sind. Tatsächlich liegt ihre maximale Empfindlichkeit aber im gelben Bereich. Bedingt durch diese Fotopigmente, die ungleiche anzahlmäßige Verteilung der einzelnen Fotopigmente (64% gelbe, 32% grüne und der Rest blaue) und eine ungleiche räumliche Verteilung auf der Netzhaut (im Zentrum grün, dann gelb, dann blau), ergeben sich für die einzelnen Zäpfchensorten sehr unterschiedliche Farbempfindlichkeiten wie in Abbildung 1.2 dargestellt (die Farbempfindlichkeit der blauempfindlichen Zapfen ist sehr gering und daher 20-fach überhöht dargestellt).

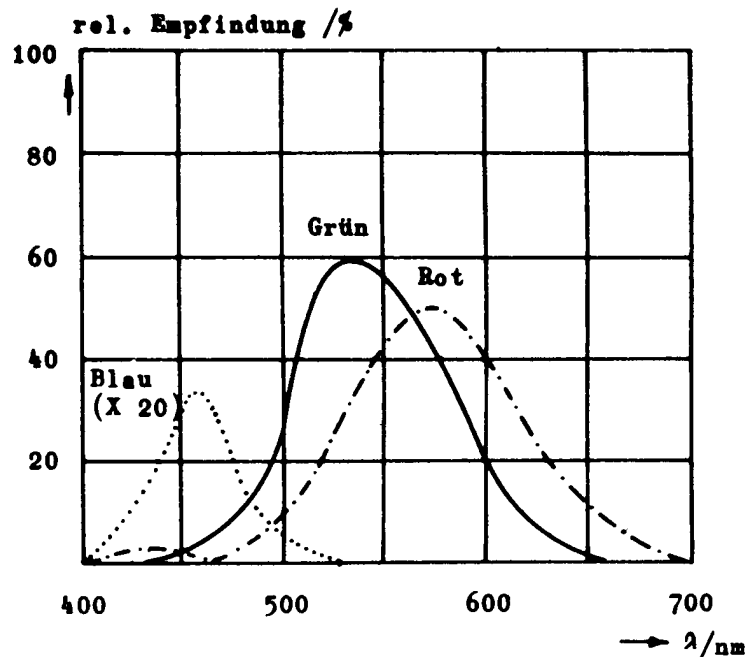


Abbildung 1.2: Relative Farbempfindlichkeit der Zapfen [9].

Signaltechnisch betrachtet, findet im Auge also eine Abbildung des kompletten

Spektralraums $C(\lambda)$ auf 3 Farbsignale $\alpha_i, i = 1, 2, 3$ (Tristimulus) statt, das Auge entspricht einem Filter mit folgender Funktion:

$$\alpha_i(C) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_i(\lambda)C(\lambda)d\lambda, \quad i = 1, 2, 3, \quad (1.1)$$

wobei $S_i(\lambda)$ die in Abbildung 1.2 dargestellten Sensorfunktionen darstellen.

Dies hat wichtige Folgen für die Behandlung von Farbe auf dem Computer, denn es ist in Anwendungen, in denen der nur visuelle Eindruck einer Szene nachgebildet werden soll (Fernsehen, Computergrafik etc.), nicht nötig, das gesamte Farbspektrum darzustellen, sondern es reichen 3 geeignet gewählte Farbreize aus, um einen Bildpunkt zu beschreiben. Dies ist in der Dreifarbentheorie (s. Kapitel 1.3.1) festgehalten.

1.3 Farbdarstellung

1.3.1 Dreifarbentheorie

Wir hatten im vorigen Kapitel gesehen, daß das menschliche Auge das Farbspektrum in einen dreidimensionalen Farbraum abbildet. Somit sollte die wahrgenommene Farbinformation auch lediglich mit Hilfe von drei Basisvektoren darstellbar sein.

Die Dreifarbentheorie von Thomas Young (1802) besagt genau dies:

Jede sichtbare Farbe läßt sich aus drei Primärfarben durch additive Farbmischung herstellen

Mit den Primärfarben $\mathcal{R}, \mathcal{G}, \mathcal{B}$ ergibt sich die additive Farbmischung also zu

$$X = R\mathcal{R} + G\mathcal{G} + B\mathcal{B}. \quad (1.2)$$

Die Primärfarben müssen dabei natürlich linear unabhängig sein, d.h. es darf sich keine durch Mischen der anderen beiden erzeugen lassen können.

Als ein Satz möglicher Primärfarben wurden z.B. 1931 von der CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) die folgenden monochromen Strahler festgelegt (d.h. Strahler, deren Spektrum aus einer einzigen Wellenlänge besteht): Rot mit 700nm, Grün mit 546.1nm und Blau mit 435.8nm. Mit diesen ergeben sich die in Abbildung 1.3 dargestellten Kurven für R, G, B zur Darstellung monochromatischen Lichts. Um z.B. Licht zu erzeugen, das einem monochromen Strahler mit

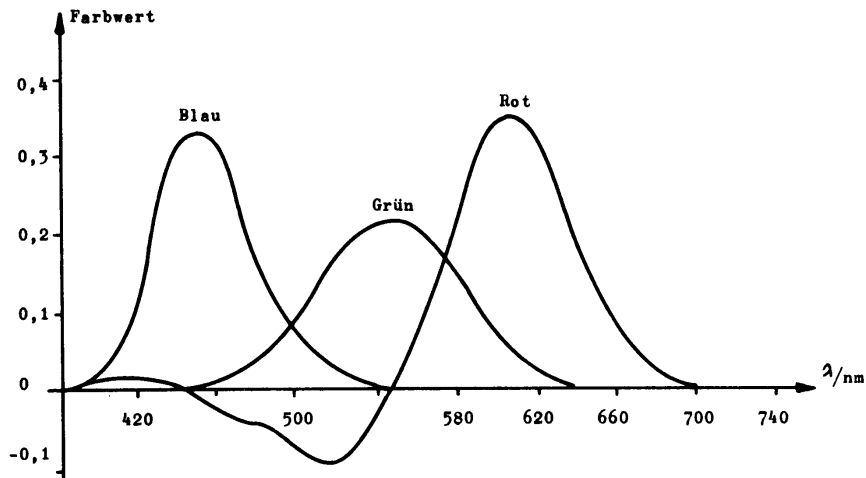


Abbildung 1.3: CIE-Farbmischkurven mit den Primärfarben Rot (700nm), Grün (546.1nm) und Blau (435.8nm) [9].

Wellenlänge 580nm entspricht, müßten also die monochromen Strahler Rot und Grün ungefähr zu gleichen Teilen gemischt werden.

Es wird unmittelbar deutlich, daß der Satz zur Dreifarbentheorie nur eingeschränkt gilt, da in der Praxis keine Strahler mit negativer Intensität existieren. Stattdessen können nur die Farben dargestellt werden, die sich durch Linearkombination der Primärfarben mit positiven Vorfaktoren R, G, B erzeugen lassen.

Zur Verdeutlichung dieses Sachverhaltes soll der 3D-Farbraum genauer betrachtet werden: Eine Komponente darin ist die Intensität. Wird ein Farbvektor mit einem Skalar multipliziert, ändert sich zwar seine Intensität, jedoch nicht seine Farbe. Daher sollen für diese Betrachtung alle Farben über die Intensität normiert werden. Diese Operation reduziert den 3D-Farbraum auf eine 2D-Farbebene:

$$r = \frac{R}{R+G+B}, \quad (1.3)$$

$$g = \frac{G}{R+G+B}, \quad (1.4)$$

$$b = \frac{B}{R+G+B}. \quad (1.5)$$

Es ist ausreichend, nur die Komponenten r und g zu betrachten, da offensichtlich $b = 1 - r - g$. Die Grenze der sichtbaren Farben wird durch alle sichtbaren monochromatischen Farben von blau bis rot bestimmt und ist als hufeisenförmige Kurve (Spektralkurve) gegeben. Da nur die Farben innerhalb dieser Form durch Mischung monochromatischer Farben erzeugt werden können, ergibt die von der Spektralkurve und der Verbindung ihrer beiden Enden (Purpurlinie) eingeschlos-

sene Fläche den Raum aller möglichen Farben. Es ist sofort offensichtlich, daß durch die von der CIE vorgegebenen Primärfarben nicht der gesamte sichtbare Farbbereich, sondern nur ein Teilbereich abgedeckt werden kann.

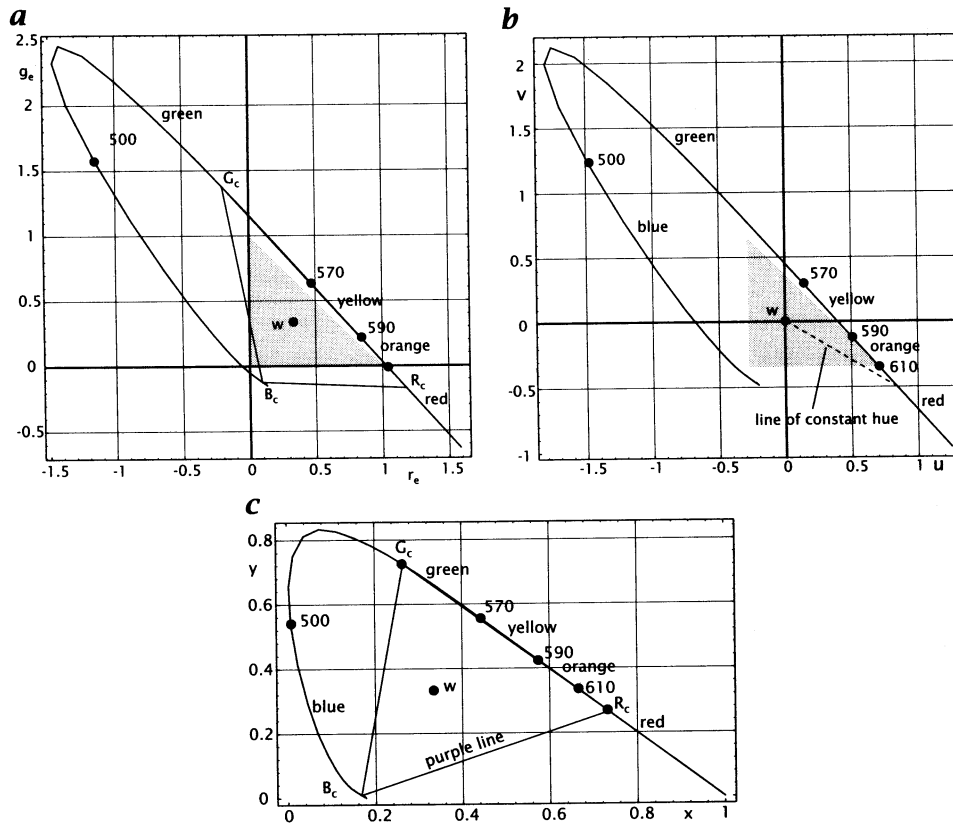


Abbildung 1.4: Farbebene, dargestellt in unterschiedlichen Farbsystemen [4].

Der Vollständigkeit halber soll auch noch eine zweite Art der Farbmischung erwähnt werden. Die bisher dargestellte Form der additiven Farbmischung trifft für sogenannte Lichtfarben zu, d.h. Farben, die dadurch entstehen, daß eine Lichtquelle selbst Licht abstrahlt. Z.B. entstehen Bilder auf dem Computermonitor oder Fernseher durch Lichtfarben. Die Anzeige erfolgt hier durch laufendes Ausenden von Elektronen, die auf die Bildschirmoberfläche treffen und dort ein farbiges Aufleuchten des Phosphors bewirken.

In der natürlichen Umwelt begegnet man dagegen überwiegend der subtraktiven Farbmischung. Der Farbeindruck, den der Betrachter von einem Gegenstand erhält, entsteht dadurch, daß ein Teil des Lichts, das auf die Oberfläche des Gegenstandes trifft, von dieser reflektiert wird, während der Rest absorbiert wird. Daher heißen diese Farben auch Körperfarben. Körperfarben werden wegen der Absorption (Subtraktion) auch als Subtraktionsfarben bezeichnet.

Alle Farbnuancen der Körperfarben lassen sich auf drei Primärfarben reduzieren: Gelb, Magentarot und Zyanblau. In der Computertechnik ist diese Art der Farbmischung vor allem bei Farbdruckern von Bedeutung.

Abschließend sollen noch einmal die wichtigsten Eigenschaften zusammengefaßt werden:

1. Jede Farbe kann - zumindest theoretisch - aus 3 farbigen Lichtquellen gemischt werden (in der Praxis gibt es Beschränkungen durch das Fehlen negativer Lichtintensitäten).
2. Das menschliche Auge kann nicht die Spektralkomponenten einer Farbe auflösen.
3. Farbaddition: Sei \sim eine Äquivalenzrelation: $C_1 \sim C_2 \iff C_1$ und C_2 werden farblich gleich wahrgenommen. Dann gilt:

$$C_1 \sim C_2, C'_1 \sim C'_2 \implies \alpha_1 C_1 + \alpha_2 C_2 \sim \alpha_1 C'_1 + \alpha_2 C'_2. \quad (1.6)$$

4. Farbsubtraktion:

$$C_1 + C_2 \sim C'_1 + C'_2, C_1 \sim C'_1 \implies C_2 \sim C'_2. \quad (1.7)$$

5. Transitivität:

$$C_1 \sim C_2, C_2 \sim C_3 \implies C_1 \sim C_3. \quad (1.8)$$

1.3.2 Farbsysteme

Im Bereich der Bildverarbeitung und Übertragung existieren zahlreiche unterschiedliche Farbsysteme. Da fragt man sich, ob es denn kein optimales Farbsystem gibt und alle Bilddaten in diesem dargestellt werden sollten. Die Tauglichkeit von Farbsystemen läßt sich allerdings unter vielen verschiedenen Aspekten betrachten, so daß man keines als universell optimal bezeichnen würde.

Ein Aspekt kann die Anschaulichkeit der Farbdarstellung sein. Diese ist wie wir am Beispiel einer konkreten Aufgabe noch sehen werden z.B. im HSV-Farbraum viel besser gegeben als im RGB-Farbraum.

In anderen Applikationen ist die Gleichabständigkeit von größerer Bedeutung, d.h. der Abstand gerade noch zu unterscheidender Farben sollte im Farbraum eine ortsunabhängige Konstante sein.

Ein weiterer Gesichtspunkt, der sowohl bei der bandbreitensparenden Übertragung im Fernsehen als auch bei der Komprimierbarkeit digitaler Bilddaten zum Tragen kommt, ist die Unterscheidung von Farb- und Helligkeitsinformation.

Die Physiologie unserer Augen erlaubt es, im Farbartkanal mit der Hälfte oder gar nur einem Viertel der Informationsmenge auszukommen, die im Helligkeitskanal enthalten ist. Deshalb sind sowohl beim Farbfernsehen als auch in der digitalen Bildverarbeitung Farbsysteme gebräuchlich, die aus einem Helligkeitskanal L oder Y für die Luminanz- oder Schwarzweiß-Information und zwei sog. Farbdifferenzkanälen für die Farbartinformation bestehen. Es ist aber sofort klar, daß der Verlust von Farbartinformation z.B. im Bereich der Qualitätskontrolle zu Problemen führen kann. Die unterschiedlichen Farbsysteme haben also alle ihre Berechtigung.

Im folgenden sollen die gebräuchlichsten und wichtigsten Farbsysteme dargestellt und gemäß ihren Eigenschaften klassifiziert werden.

Das RGB-Farbsystem

Es existieren verwirrenderweise unterschiedliche RGB-Farbsysteme. Die von der CIE vorgeschlagenen Primärfarben haben - zumindest derzeit - technisch wenig Bedeutung, da in Monitoren die Farberzeugung üblicherweise dadurch geschieht, daß Phosphore durch Elektronenbeschuß zum Leuchten angeregt werden. Diese Phosphore geben aber kein monochromatisches Licht ab, wie es bei den CIE-Primärfarben angenommen wird, sondern ein ganzes Lichtspektrum. Somit liegen diese Primärfarben im Inneren der Spektralkurve statt auf ihr. Außerdem wurden bei den Fernsehsystemen PAL/SECAM einerseits und bei NTSC andererseits unterschiedliche Phosphore verwendet. Also gibt es auch hier noch geringe Unterschiede. Meist ist allerdings die NTSC-Empfängerbildröhrensystem-Spezifikation gemeint, wenn vom RGB-System die Rede ist.

Das Normalfarbsystem XYZ

Um negative Farbkoordinaten wie in Abbildung 1.3 zu vermeiden, wurde ein neues Farbkoordinatensystem mit virtuellen Primärfarben eingeführt, d.h. mit Primärfarben, die keiner physikalischen Farbe entsprechen. Dieses XYZ-System ist so konstruiert, daß es die Spektralkurve umschließt. Es wird durch die folgende lineare Koordinatentransformation vom RGB-NTSC-Empfänger-System beschrieben

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.607 & 0.174 & 0.201 \\ 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.000 & 0.066 & 1.117 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}. \quad (1.9)$$

Die inverse Transformation ergibt sich direkt durch invertieren der Transformationsmatrix.

Die Fernsehfarbsysteme YIQ und YUV

In der Fernsehtechnik wird Nutzen aus der Unvollkommenheit des menschlichen visuellen Wahrnehmungssystems gezogen: Es reagiert sehr viel empfindlicher auf Fehler in der Helligkeit als auf Fehler in der Farbe. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft, den Farbraum durch 3 Basisvektoren darzustellen, von denen der eine im Wesentlichen die Helligkeit beschreibt (Luminanz Y) und der daher ziemlich unverfälscht bleiben sollte, und zwei weitere Basisvektoren, die weniger genau übertragen werden müssen. Bei der analogen Fernsehübertragung konnte daher die Bandbreite der beiden Farbsignale gegenüber dem Luminanzsignal reduziert werden. Dies ist in Abbildung 1.5 beispielhaft für das NTSC-System dargestellt. In der Praxis bedeutet dies, daß die Farbart mit wesentlich geringerer örtlicher

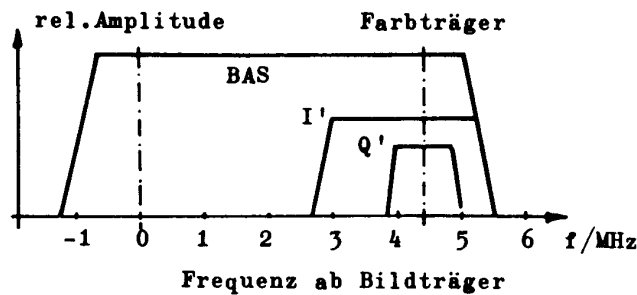


Abbildung 1.5: Übertragungsbänder beim NTSC-System [9].

Auflösung übertragen und damit auch dargestellt wird als die Helligkeit. Bei der ein Europa stärker verbreiteten Fernsehnorm PAL sind die Komponenten U,V um 33° gegenüber I,Q gedreht. Das liegt darin begründet, daß beim YIQ-System eine weitergehende Anpassung an das menschliche visuelle Wahrnehmungsvermögen vorgenommen wurde, die die Richtung besonders hoher Empfindlichkeit für Farbdifferenzen berücksichtigt (s. Abbildung 1.6). Auch diese Koordinatensysteme ergeben sich durch eine lineare Transformation aus dem RGB-NTSC-Empfänger-System. Für das YIQ-System ergibt sich

$$\begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.274 & -0.322 \\ 0.211 & -0.523 & 0.312 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (1.10)$$

und für das YUV-System:

$$\begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.148 & -0.289 & 0.437 \\ 0.615 & -0.515 & -0.100 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}. \quad (1.11)$$

Aber auch digitale Bild- und Videoformate nutzen die Unempfindlichkeit des menschlichen visuellen Wahrnehmungsvermögens gegenüber Farbfehlern aus. So

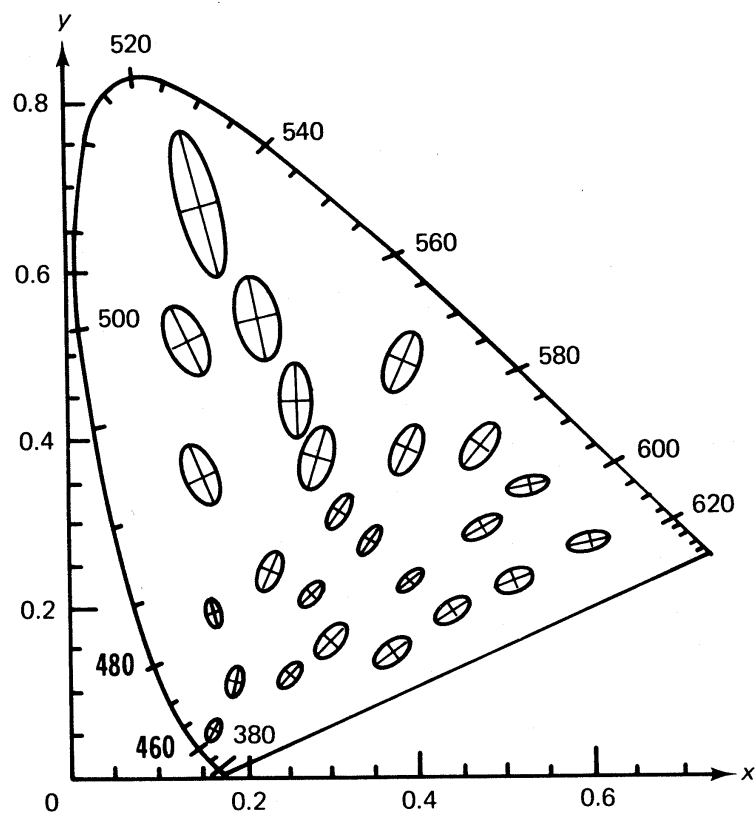


Abbildung 1.6: Relatives Farbunterscheidungsvermögen nach Mc Adams (Mc Adams-Ellipsen) [5]. Die Ellipsen deuten die Farbbereiche an, die vom Auge gerade noch unterschieden werden können, d.h. ein Farbpunkt am Rande einer Ellipse kann gerade eben von einem Farbpunkt im Zentrum der Ellipse unterschieden werden (Ellipsen zehnfach vergrößert dargestellt).

liest man im Zusammenhang mit dem Digitalfernsehen bzw. Digitalkameras oft von der Bezeichnung 4:2:2 oder 4:1:1. Diese bedeuten, daß die Farbkomponenten in verringerter örtlicher Auflösung dargestellt werden, so bedeutet z.B. 4:1:1, daß ein 2x2-Bildausschnitt mit 4 Helligkeitswerten, aber nur 2 Farbwerten beschrieben wird (statt 2x4 Farbwerten). Tatsächlich wird auch noch bei der Quantisierung der Signalwerte häufig eine gröbere Unterteilung bei den Farbwerten als bei dem Helligkeitswert vorgenommen.

Die farbmtrischen Räume UVW, L*a*b*

Wie man Abbildung 1.6 bereits gesehen hatte, ist das Farbunterscheidungsvermögen in den bisher betrachteten Räumen äußerst ungleichmäßig verteilt. In vielen Anwendungen ist es aber gewünscht, direkt aus der relativen Lage von zwei Farben abzuleiten, wie unterschiedlich der Mensch sie auflöst. Zu diesem Zweck wurden eine Reihe von farbmtrischen Räumen geschaffen. In diesen entspricht der visuelle Unterschied näherungsweise der euklidischen Distanz der Farben. Im Wesentlichen wurde also versucht, die Mc Adams-Ellipsen (Achsenverhältnis bis 20:1) durch eine Koordinatentransformation näherungsweise auf Kreise (Achsenverhältnis bis 2:1) abzubilden.

Die Transformation gegenüber dem XYZ-System ist gegeben durch:

$$\begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.405 & 0.116 & 0.133 \\ 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.145 & 0.827 & 0.627 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (1.12)$$

Neben dem UVW-Raum existiert auch noch ein modifizierter Raum U*V*W* mit verschobenem Ursprung. In diesem System kann der Farbunterschied zweier ungesättigter (also pastellartiger) Farben sehr gut durch die Länge der Verbindungsline angenähert werden.

$$d = \sqrt{(\Delta U^*)^2 + (\Delta V^*)^2 + (\Delta W^*)^2} \quad (1.13)$$

Das L*a*b*-System ist durch folgende nichtlineare Transformation des XYZ-Systems gegeben:

$$L^* = 25 \left(\frac{100Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} - 16, \quad 1 \leq 100Y \leq 100 \quad (1.14)$$

$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_0} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (1.15)$$

$$b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^{\frac{1}{3}} \right]. \quad (1.16)$$

Hierin geben X_0, Y_0, Z_0 die Tristimulus-Werte des Referenz-Weißpunktes an. Anschaulich gibt L^* die Helligkeit an, a^* unterscheidet zwischen rot und grün, b^* zwischen gelb und blau.

Auch mit diesem System lassen sich Farbunterschiede einfach als Abstand im Farbraum berechnen.

$$d = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1.17)$$

Grundlage dieses Systems bildet das Munsell-System zur Farbklassifikation. Nach diesem System findet die Klassifikation durch Vergleich mit 1200 dem visuellen Empfinden nach geordneten Farbmustern statt. Um diese Methode auch rechnerisch zugänglich zu machen, wurde das $L^*a^*b^*$ -System entwickelt.

Die Farbräume HSV und IHS

Die bisher betrachteten Systeme sind kaum für eine anschauliche Beschreibung von Farbe geeignet. Es würde z.B. kaum jemand auf die Idee kommen, die Farbe einer Sonnenblume als viel Rot und Grün im RGB-System zu beschreiben. Stattdessen würde man sie als helles, sattes Gelb beschreiben. Für Benutzer-Interfaces sollte daher eine andere Beschreibung gewählt werden. Dies ist mit Hilfe der Systeme HSV oder IHS möglich.

In diesen wird eine Farbe durch die 3 Komponenten Helligkeit, Farbton und Sättigung angegeben.

In Abbildung 1.7 ist der HSV-Farbraum dargestellt (Hue – Farbton, Saturation – Sättigung, Value – Helligkeit)¹. Er besitzt die Form eines Zylinders. Von unten nach oben steigt die Helligkeit der Farbe, von innen nach außen die Sättigung. Der Farbton wird näherungsweise durch den auf $[0 \dots 1]$ normierten Winkel repräsentiert (rot $\hat{=}$ 0, grün $\hat{=}$ $1/3$, blau $\hat{=}$ $2/3$). Die Umrechnung aus dem RGB-

¹genaugenommen ist die Grundfläche nicht kreisförmig, sondern sechseckig

Farbsystem geschieht nach folgenden Formeln [11]:

$$V = \max(R, G, B) \quad (1.18)$$

$$S = \frac{V - \min(R, G, B)}{V} \quad (1.19)$$

$$R' = \frac{V - R}{V - \min(R, G, B)} \quad (1.20)$$

$$G' = \frac{V - G}{V - \min(R, G, B)} \quad (1.21)$$

$$B' = \frac{V - B}{V - \min(R, G, B)} \quad (1.22)$$

$$6H = \begin{cases} 5 + B' & \text{wenn } R = \max(R, G, B) \text{ und } G = \min(R, G, B) \\ 1 - G' & \text{wenn } R = \max(R, G, B) \text{ und } G \neq \min(R, G, B) \\ 1 + R' & \text{wenn } G = \max(R, G, B) \text{ und } B = \min(R, G, B) \\ 3 - B' & \text{wenn } G = \max(R, G, B) \text{ und } B \neq \min(R, G, B) \\ 3 + G' & \text{wenn } B = \max(R, G, B) \text{ und } R = \min(R, G, B) \\ 5 - R' & \text{sonst} \end{cases} \quad (1.23)$$

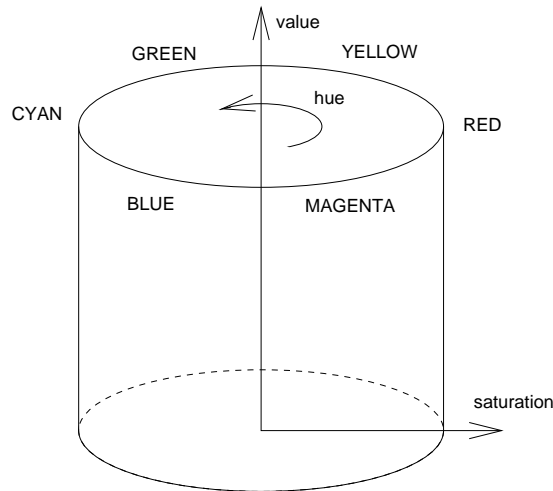


Abbildung 1.7: HSV-Farbraum

Im HSV-Farbraum kann die Ähnlichkeit zweier Farbpunkte $(H_1, S_1, V_1), (H_2, S_2, V_2)$ ebenfalls recht einfach durch die euklidische Distanz zwischen ihnen ausgedrückt werden:

$$d = 1 - \frac{1}{\sqrt{5}} \sqrt{(V_1 - V_2)^2 + (S_1 \cos H_1 - S_2 \cos H_2)^2 + (S_1 \sin H_1 - S_2 \sin H_2)^2}. \quad (1.24)$$

Durch die Normierung mit $1/\sqrt{5}$ wird erreicht, daß $d = 1$ für identische Farben und $d = 0$ für Farben mit für das HSV-System maximal möglichem Abstand.

Ein weiteres System aus dieser Gruppe ist das IHS-Farbsystem. Dieses berücksichtigt, daß die visuelle Farbvielfalt im sehr dunklen und hellen Bereich gemindert ist. Außerdem berücksichtigt es folgenden Konflikt im HSV-System: Bei maximaler Helligkeit wird eine Farbe weiß, d.h. sie wird ungesättigt. Das gleiche gilt für sehr dunkle Farben. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, den Zylinder zu einem Doppelkegel umzuformen wie in Abbildung 1.8 dargestellt. Das dort angegebene System ist das IHS-System. Es entsteht durch folgende nichtlineare Transformation aus dem RGB-System [10]:

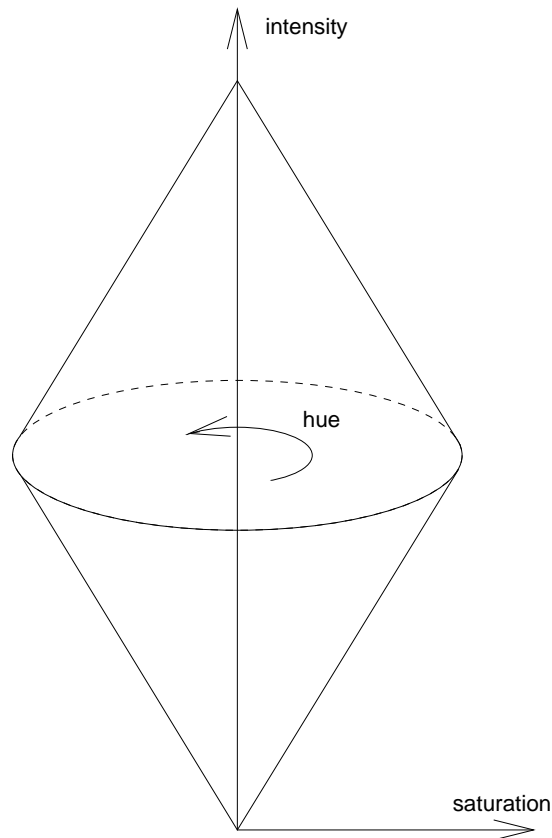


Abbildung 1.8: IHS-Farbraum

$$\begin{pmatrix} I \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (1.25)$$

$$H = \tan^{-1} \frac{V_2}{V_1} \quad (1.26)$$

$$S = \sqrt{V_1^2 + V_2^2} \quad (1.27)$$

Auch hier gilt die vorige anschauliche Zuordnung: Intensity – Helligkeit, Hue – Farbton, Saturation – Sättigung.

Der PhotoCD-Farbraum YCC

PhotoYCC ist ein von Kodak und Philips 1991 im Rahmen des Kodak Photo CD Systems entwickelter Farbraum, der sich sehr stark an La^*b^* anlehnt, aber für die digitale Bildverarbeitung durch eine nichtlineare Transformation optimiert wurde. Die beiden Farbdifferenzkanäle weisen zudem eine unterschiedliche Stufenskalierung auf, bei der speziell die Farben, die in fotografischen Farbbildern vorkommen berücksichtigt wurden. Deshalb bietet YCC bei gleicher Quantisierung in der Praxis eine bessere Farbauflösung als La^*b^* . Zudem ist YCC vom Rechenaufwand her geeignet in Hinblick auf eine schnelle Bildverarbeitung und Darstellung auf einem Monitor.

Ein weiterer Aspekt ist die Ausweitung des darstellbaren Farbraums. Wie wir gesehen hatten, ist durch die vorgegebenen Primärstrahler der Bereich der darstellbaren Farben erheblich kleiner als der vom Menschen wahrnehmbare Farbraum. Dies ist zur Zeit eine unbedeutende Einschränkung, da Monitore ohnehin nur diesen Farbbereich darstellen können. Aber es ist ja durchaus zu erwarten, daß künftige Displayssysteme diesen Restriktionen nicht mehr unterliegen (z.B. Laserprojektionssysteme). YCC läßt daher RGB-Werte im Bereich $[-0.2, 2.0]$ statt $[0, 1]$ zu und kann somit auch Farben repräsentieren, die außerhalb des Farbraumdreiecks der Primärvalenzen liegen. Der Weißpunkt (100% Reflexion) liegt zum Beispiel bei $Y=182$, so daß noch Raum (bis $Y=255$) für extreme Glanzlichter ist. Diese kommen in realen Szenen durchaus vor und können von fotografischen Filmen im Gegensatz zu herkömmlichen Farbsystemen gut dargestellt werden.

Auch in YCC sind Luminanz- und Farbartkomponenten getrennt. Somit können auch hier ohne sichtbaren Schärfeverlust die Chroma-Komponenten mit der halben Abtastfrequenz gesampelt werden. Dies spart zum einen Speicherplatz auf der Photo CD, zum anderen beschleunigt es auch die Verarbeitung der Bilddaten.

Was dieses System im Vergleich zu herkömmlichen Farbformaten aber insbesondere auszeichnet ist, daß die Aufnahmesituation standardisiert ist. So ist z.B. die spektrale Empfindlichkeit der Sensoren genau vordefiniert. Es können also keine geräteabhängigen Verfälschungen entstehen. Insbesondere entfällt sogar die Abhängigkeit der Farbe vom Film (so haben z.B. Kodak-Farbnegativfilme einen eher bräunlichen Ton, während Fuji eher die grünen Farben betont). Die Eigenschaften des Filmes werden beim Scannen der Bilder herausgerechnet und somit die realen Farben der Szene rekonstruiert.

1.4 Farbnormalisierung

Ein im Bereich der automatischen Bildanalyse auftretendes Problem ist die Variation der Beleuchtung. So führt etwa eine Änderung der Beleuchtungsfarbe (Tageslicht oder Sonnenuntergang) zu völlig unterschiedlichen Bildern des gleichen Objekts. Oder bei Lageänderungen der Lichtquelle gegenüber dem Objekt oder umgekehrt treten Schatten an unterschiedlichen Stellen auf. Während der Mensch mit solchen Situation meist spielend fertig wird, erschweren diese Effekte die automatische Bildanalyse sehr, weshalb man in kritischen Anwendungen sorgfältigst darauf bedacht ist, konstante Aufnahmeverhältnisse zu schaffen. Dies bedeutet jedoch eine starke Einschränkung, die nicht immer in Kauf genommen werden kann. Daher wird versucht, die oben genannten Effekte in Modellen nachzubilden und mit deren Hilfe Transformationen zu finden, die ein konstantes Bild unter den oben beschriebenen Veränderungen liefern, also gegenüber solchen Variationen des Lichts invariant sind.

1.4.1 Modellbildung

In der Natur kommen zahlreiche unterschiedliche Effekte bei der Beleuchtung von Objekten zum Tragen. Hier sollen vereinfachend nur sogenannte Lambertsche Oberflächen betrachtet werden, d.h. Oberflächen mit perfekter Diffusion. Zudem soll zunächst nur der Fall einer einzigen Lichtquelle betrachtet werden.

Dann ergibt sich nach dem in Abbildung 1.9 dargestellten Modell die Sensorantwort am Ort $\hat{\mathbf{x}}$ des Sensors einer Kamera (oder des Auges) durch

$$p_i^{\hat{\mathbf{x}},E} = \langle \mathbf{e}^{\mathbf{x}}, \mathbf{n}^{\mathbf{x}} \rangle \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S^{\mathbf{x}}(\lambda) E(\lambda) F_i(\lambda) d\lambda, \quad i = 1, 2, 3. \quad (1.28)$$

Darin bezeichnet $\mathbf{e}^{\mathbf{x}}$ die Richtung der Lichtquelle von \mathbf{x} aus, $\mathbf{n}^{\mathbf{x}}$ die Oberflächennormale in \mathbf{x} , $S^{\mathbf{x}}(\lambda)$ den prozentualen Anteil des reflektierten Lichts bei Wellenlänge λ , $E(\lambda)$ das Beleuchtungsspektrum und $F_i(\lambda)$ die Sensorkurve des Sensors i . Durch Substitution von $\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S^{\mathbf{x}}(\lambda) E(\lambda) F_i(\lambda) d\lambda$ durch $q_i^{\mathbf{x},E}$ erhält man folgende Vereinfachung:

$$p_i^{\hat{\mathbf{x}},E} = q_i^{\mathbf{x},E} \langle \mathbf{e}^{\mathbf{x}}, \mathbf{n}^{\mathbf{x}} \rangle \quad (1.29)$$

Es ist leicht einzusehen, daß $q_i^{\mathbf{x},E}$ nicht durch eine veränderte Lage von Objekt und Lichtquelle beeinflusst wird, wohl aber durch Veränderung des Beleuchtungsspektrums.

Das obige Modell berücksichtigte nur eine punktförmige Lichtquelle. Für m Licht-

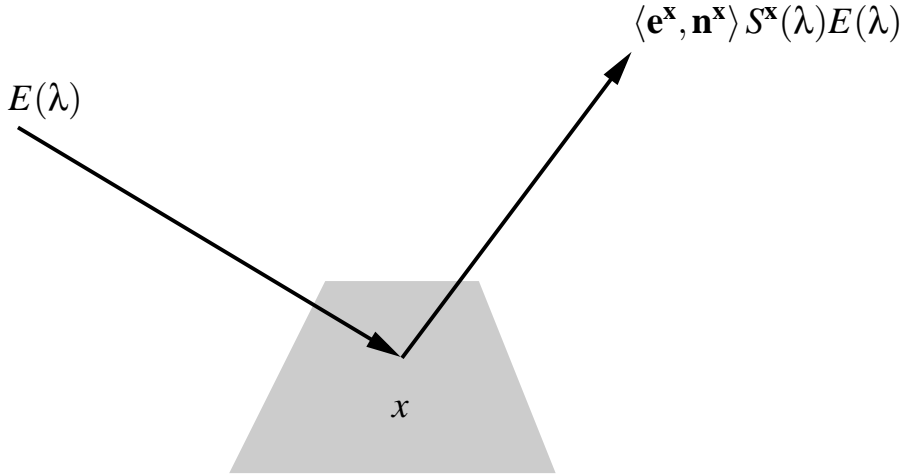


Abbildung 1.9: Beleuchtungsmodell

quellen erhält man

$$p_i^{\hat{\mathbf{x}}, E} = q_i^{\mathbf{x}, E} \sum_{j=1}^m \langle \mathbf{e}_m^{\mathbf{x}}, \mathbf{n}^{\mathbf{x}} \rangle, \quad (1.30)$$

was rechnerisch durch $\mathbf{e}^{\mathbf{x}} = \sum_{j=1}^m \mathbf{e}_m^{\mathbf{x}}$ wieder zu einer effektiven Lichtquelle zusammengefaßt werden kann.

1.4.2 Normalisierung bzgl. der Beleuchtungsgeometrie

Mit dieser Modellierung läßt sich leicht intuitiv eine Normierung finden, die Invarianz gegenüber Änderungen der Beleuchtungsgeometrie schafft. Da alle Sensoren gleich beeinflusst werden, ergibt sich folgende Normalisierung:

$$\frac{p_i^{\hat{\mathbf{x}}, E}}{\sum_{j=1,2,3} p_j^{\hat{\mathbf{x}}, E}} = \frac{q_i^{\mathbf{x}, E} \langle \mathbf{e}^{\mathbf{x}}, \mathbf{n}^{\mathbf{x}} \rangle}{\sum_{j=1,2,3} q_j^{\mathbf{x}, E} \langle \mathbf{e}^{\mathbf{x}}, \mathbf{n}^{\mathbf{x}} \rangle} = \frac{q_i^{\mathbf{x}, E}}{\sum_{j=1,2,3} q_j^{\mathbf{x}, E}}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (1.31)$$

Diese Normierung haben wir schon in Kapitel 1.3.1 kennengelernt. Beim Übergang vom RGB- ins rgb-Farbsystem war folgende Normierung verwendet worden, die in der Literatur zur Computer Vision weitverbreitet ist, z.B. [1, 6, 3]:

$$r = \frac{R}{R + G + B} \quad (1.32)$$

$$g = \frac{G}{R + G + B} \quad (1.33)$$

$$b = \frac{B}{R + G + B}, \quad (1.34)$$

$$(1.35)$$

Für die spätere einheitliche Darstellung soll diese Normierung folgendermaßen formuliert werden: Die n Bildpunkte werden durch Aneinanderreihung der Zeilen in einem Vektor dargestellt, so daß man unter Berücksichtigung der 3 Farbkomponenten eine $n \times 3$ -Matrix erhält (Abbildung 1.10), im folgenden Farbbildmatrix genannt. Bei dieser Betrachtung bedeutet die eben gefundene Normalisierung also

R_1	G_1	B_1
R_2	G_2	B_2
R_3	G_3	B_3
R_4	G_4	B_4
R_5	G_5	B_5
R_6	G_6	B_6
\vdots	\vdots	\vdots
R_{n-1}	G_{n-1}	B_{n-1}
R_n	G_n	B_n

Abbildung 1.10: Matrixdarstellung \mathbf{I} eines Farbbildes.

eine Zeilen-Normierung der Farbbildmatrix \mathbf{I} :

$$\mathcal{Z}(\mathbf{I})_{i,j} = \frac{I_{i,j}}{\sum_{k=1,2,3} I_{i,k}}. \quad (1.36)$$

1.4.3 Normalisierung bzgl. des Beleuchtungsspektrums

Als nächstes soll der Einfluß der Verteilung des Beleuchtungsspektrums auf die Sensorantworten untersucht werden. Die Lage von Objektfläche und Lichtquelle

soll also konstant gehalten werden, die Farbe der Lichtquelle hingegen darf sich ändern.

Zur Vereinfachung werden δ -förmige Empfindlichkeiten der Kamerasensoren angenommen, was natürlich nur eine grobe Näherung darstellt. Mit $F_i(\lambda) = \delta(\lambda - \lambda_i)$, $i = 1, 2, 3$ vereinfacht sich Gleichung (1.28) zu:

$$p_i^{\hat{\mathbf{x}}, E} = \langle \mathbf{e}^{\mathbf{x}}, \mathbf{n}^{\mathbf{x}} \rangle \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S^{\mathbf{x}}(\lambda) E(\lambda) \delta(\lambda - \lambda_i) d\lambda = \langle \mathbf{e}^{\mathbf{x}}, \mathbf{n}^{\mathbf{x}} \rangle S^{\mathbf{x}}(\lambda_i) E(\lambda_i) \quad (1.37)$$

Für ein anderes Beleuchtungsspektrum E_1 erhält man also

$$p_i^{\hat{\mathbf{x}}, E_1} = \langle \mathbf{e}^{\mathbf{x}}, \mathbf{n}^{\mathbf{x}} \rangle S^{\mathbf{x}}(\lambda_i) E_1(\lambda_i). \quad (1.38)$$

Kombiniert man beides, so sieht man, daß

$$p_i^{\hat{\mathbf{x}}, E_1} = \frac{E_1(\lambda_i)}{E(\lambda_i)} p_i^{\hat{\mathbf{x}}, E}, \quad (1.39)$$

d.h. innerhalb eines Sensors werden alle Werte um den gleichen Faktor skaliert. Bezeichne \mathbf{R} (bzw. \mathbf{G} oder \mathbf{B}) die erste (bzw. zweite oder dritte) Zeile der Matrix \mathbf{I} . Dann wird also durch eine Änderung des Beleuchtungsspektrums eine Transformation der Form $(\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}) \rightarrow (\alpha\mathbf{R}, \beta\mathbf{G}, \gamma\mathbf{B})$ durchgeführt. Somit liegt es nahe, eine Normierung innerhalb jeden Farbkanals durchzuführen.

$$\frac{n}{3} \frac{\alpha\mathbf{R}}{\sum_{i=1}^n R_i} = \frac{n}{3} \frac{\mathbf{R}}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (1.40)$$

$$\frac{n}{3} \frac{\beta\mathbf{G}}{\sum_{i=1}^n G_i} = \frac{n}{3} \frac{\mathbf{G}}{\sum_{i=1}^n G_i} \quad (1.41)$$

$$\frac{n}{3} \frac{\gamma\mathbf{B}}{\sum_{i=1}^n B_i} = \frac{n}{3} \frac{\mathbf{B}}{\sum_{i=1}^n B_i} \quad (1.42)$$

Der Vorfaktor $n/3$ ist hier so gewählt, daß die Summe aller Pixel nach Normierung n ergibt, wie auch schon im Fall der Beleuchtungsgeometrie-Normierung.

Wenn wir uns die Darstellung aus Abbildung 1.10 ins Gedächtnis rufen, so bedeutet diese Normalisierung also eine Normierung der Spalten der Farbbildmatrix \mathbf{I} :

$$S(\mathbf{I})_{i,j} = \frac{n}{3} \frac{I_{i,j}}{\sum_{k=1}^n I_{k,j}}. \quad (1.43)$$

1.4.4 Normalisierung bzgl. beider Effekte

Die Normalisierung bzgl. beider Effekte kann durch folgende Schritte erfolgen:

1. Initialisierung: $\mathbf{I}_0 = \mathbf{I}$
2. Iterationsschritt: $\mathbf{I}_{i+1} = \mathcal{S}(\mathcal{Z}(\mathbf{I}_i))$
3. Terminierungsbedingung $\mathbf{I}_{i+1} \cong (\mathbf{I}_i)$

Es erfolgt also eine fortgesetzte Hintereinanderausführung beider Normalisierungsprozeduren bis das Resultat sich nicht mehr ändert.

Offensichtlich macht dieses Vorgehen nur Sinn, wenn zwei Bedingungen erfüllt sind:

- Das Verfahren konvergiert und
- das Ergebnis ist eindeutig

In [2] werden diese beiden Eigenschaften nachgewiesen, so daß obige Iterationsvorschrift tatsächlich eine Normalisierung bzgl. beider Effekte durchführt.

1.5 Versuchsteil

In diesem Kapitel soll der Versuchsteil beschrieben werden. In Kapitel 1.5.1 wird zunächst der Versuchsaufbau dargestellt. Kapitel 1.5.2 gibt eine grundlegende Einführung in das Arbeiten mit Matlab. Danach folgen dann schließlich die Aufgabenstellungen für die Versuche.

1.5.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus einem PC, der mit einer MatroxTM Meteor II Bildaufnahmekarte (Abbildung 1.11) zur Aufnahme eines Kamerabildes mit bis zu 768×576 Pixeln in 24 Bit Farbtiefe ausgestattet ist, sowie einer 3-Chip-Videokamera. 3-Chip-Kameras besitzen im Gegensatz zu herkömmlichen 1-Chip-Kameras je Farbebene einen lichtsensitiven Chip. Auf diese wird das einfallende Licht mit Hilfe eines Prismas aufgeteilt. Bei herkömmlichen Kameras hingegen sind auf einem Chip nebeneinander rot-, grün- und blau-empfindliche Sensoren platziert. Dies bedeutet aber, daß die Farben mit einem örtlichen Versatz aufgenommen werden, der im Bildsignal vernachlässigt wird.

Außerdem steht ein Repräsentativ mit verschiedenfarbigen Leuchten zur Verfügung, die zudem leicht in ihrer Position zu verstellen sind.

Nach dem Starten von Matlab werden mit `setup_farbe` alle benötigten Funktionen und Variablen geladen. Zur Aufnahme eines Bildes existiert dann die Funktion `grab_palrgb` (Verwendung z.B. mit `bild=grab_palrgb;`).

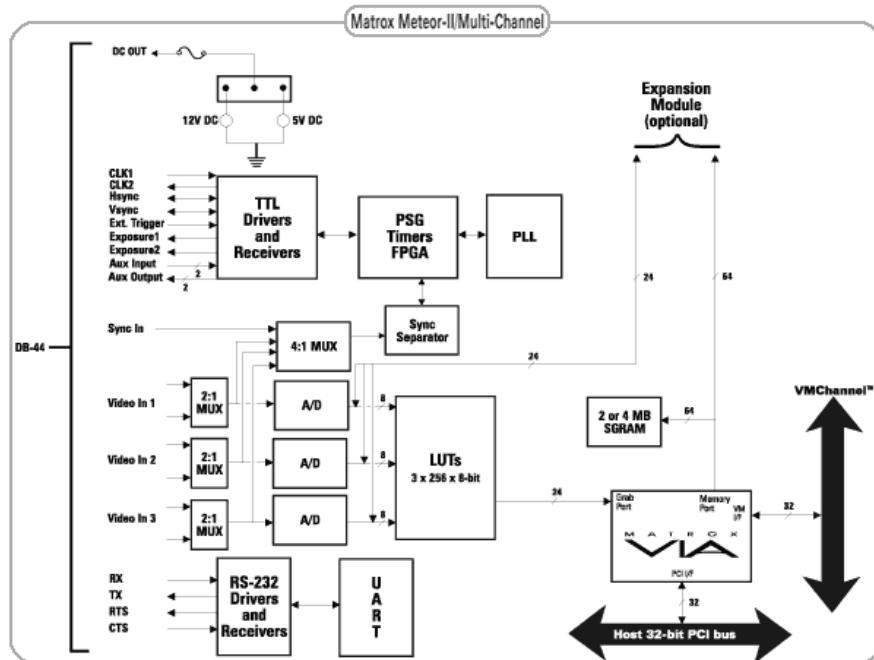


Abbildung 1.11: Blockschaltbild der Bildaufnahmekarte Matrox Meteor II.

1.5.2 Grundlegende Einführung in Matlab

Matlab ist eine interaktive Programmierumgebung zur numerischen Berechnung mathematischer Probleme. Der Name Matlab ist eine Kurzform für *Matrix Laboratory*, was anzeigt, daß Matrizenrechnung eine wichtige Stellung in Matlab einnimmt. In Matlab sind viele wichtige Verfahren der Numerik bereits als fertige Funktionen angeboten, wie z.B. die Inversion von Matrizen. Hier sollen nur die wichtigsten Funktionen beschrieben werden, für eine ausführliche Beschreibung der Software sei auf [8, 7] verwiesen.

Eine Variable kann definiert werden, indem man ihr einen Wert zuweist, z.B.

```
g=9.81;
a=2e4;
```

Vektoren und Matrizen werden durch eckige Klammern markiert und Zeilen durch Semikolon voneinander getrennt, z.B.

```
vec=[1 2 3 4];
mat=[1 2 3; 4 5 6; 7 8 9]
```

Wird der Abschluß durch ein ';' weggelassen, wird zudem das Ergebnis angezeigt, im zuletzt genannten Beispiel also

```
mat =
```

```
    1    2    3
    4    5    6
    7    8    9
```

ausgegeben. Achtung, dies kann bei sehr großen Matrizen äußerst unerwünscht sein! Durch Einfabe des Variablennamens ohne Semikolon kann man sich also den Inhalt der Variablen anzeigen lassen. Die Befehle `who` and `whos` liefern eine Liste aller vom Benutzer verwendeten Variablen.

Matlab stellt zahlreiche Operatoren (+ - * / etc.) und Funktionen (sin, cos, exp, sqrt etc.) bereit.

Neben diesen einfachen elementaren Funktionen, kann man selbst auch eigene Funktionen definieren. Dies geschieht durch Anlegen eines Files mit dem Namen der Funktion und der Funktionsbeschreibung. Eine Funktion zur Berechnung einer Grauwertbildinvertierung (Wertebereich [0, 1]) könnte z.B. so aussehen:

```
function out=grauinv(in)
out=1-in;
```

Für die Durchführung dieses Versuchs könnten vor allem folgende Befehle von Nutzen sein: `size(bild)` ergibt die Dimension der Variablen `Bild`, in diesem Versuch wird man typischerweise eine $m \times n \times 3$ -Matrix vorliegen haben. Leider sind viele Matrixoperationen, wie z.B. die Matrizenmultiplikation `.*`, nur für $m \times n$ -Matrizen vordefiniert. Es lohnt sich daher teilweise, diese Einzelmatrizen nach folgendem Beispiel zu extrahieren, zu bearbeiten und anschließend wieder in eine höherdimensionale Matrix zurückzuschreiben.

```
r=bild(:,:,1);
erg(:,:,1)=matrix.*r;
g=bild(:,:,2);
erg(:,:,2)=matrix.*g;
b=bild(:,:,3);
erg(:,:,3)=matrix.*b;
```

Darin sind die `':'` Platzhalter für den gesamten Indexbereich der jeweiligen Dimension.

Für die Ausgabe der Resultate werden folgende Befehle benötigt: Mit `figure` wird ein neues Fenster geöffnet, in dem Graphen, Bilder etc. angezeigt werden können.

`plot(r)` zeichnet `r` über dem Intervall `[1...size(r)]`. Möchte man den Definitionsbereich selbst vorgeben, kann man dies durch Angabe einer weiteren Variable `a` gleicher Dimension tun: `plot(a,r)`. Dabei geben jeweils korrespondierende Elemente aus `a` und `r` eine Koordinate.

Oftmals ist es vorteilhaft mehrere Verläufe in einem Graphen darzustellen. Mittels `hold on` bleiben alte Verläufe stehen, während ein neuer eingezeichnet wird. Sinnvollerweise sollte man dann durch Übergabe noch weiterer Elemente in `plot` Farbe oder Strichelung variieren (näheres mit `help plot`).

`imshow(bild)` stellt Bilder dar. Diese sollten von der Dimension $m \times n \times 3$ und im Wertebereich `[0...1]` sein. Achtung: Aufgrund numerischer Ungenauigkeiten bei den Berechnungen kann dieser Wertebereich schon mal verlassen werden, obwohl theoretisch z.B. klar ist, daß das Ergebnis maximal 1 ergeben kann. Darum ist es ggf. notwendig, vor der Darstellung Werte > 1 auf 1 zu setzen. Dies geschieht besonders einfach mit

```
index=find(bild>1);  
bild(index)=1;
```

Falls weitere Funktionen benötigt werden sollten oder Unklarheiten bestehen, erhält man mit `help` oder komfortabler mit `helpwin` eine umfassende Hilfe zu den Matlab-Funktionen.

1.5.3 Theoretische Aufgaben

Aufgabe 1: Was ist der Unterschied zwischen additiver und subtraktiver Farbmischung?

Aufgabe 2: Was bedeutet perzeptuelle Uniformität?

Aufgabe 3: Beschreiben sie den Begriff Helligkeit anhand des $L^*a^*b^*$ Farbsystems.

Aufgabe 4: Erklären sie anhand des XYZ Farbraumes was Chromazitätskoordinaten sind.

Aufgabe 5: Kann man Farbdifferenzen in beliebigen Farbsystemen durch den euklidischen Abstand bestimmen? Begründen sie ihre Antwort.

1.5.4 Aufgaben zur menschlichen Farbwahrnehmung

Aufgabe 1: Die Abbildung 1.2 werde in Matlab näherungsweise durch 3 Normalverteilungen mit den in Tabelle 1.1 angegebenen Parametern dargestellt.

Sensorkurve	μ	σ	Maximum
Blau	445	20	0.02
Grün	535	37	0.6
Rot	575	41	0.5

Tabelle 1.1: Normalverteilungsparameter der 3 Sensoren

Aufgabe 2: Berechnen Sie die Summe der drei Kurven und stellen Sie sie dar. Was repräsentiert diese Kurve anschaulich?

Aufgabe 3: Verwenden Sie wieder die Sensorkurven aus Aufgabe 1.5.4. Schauen Sie sich die in den Variablen C1, C2 und C3 vorgegebenen Farbspektren an. Was repräsentiert das Farbspektrum C1? Beurteilen Sie mit Hilfe der Sensorkurven, welche Farbspektren das menschliche Auge unterscheiden kann.

1.5.5 Aufgaben zur Farbdarstellung

Aufgabe 4: Gibt es einen anderen Satz von 3 Primärfarben als die RGB-Primärfarben, mit dem der gesamte Farbraum dargestellt werden könnte?

Aufgabe 5: Schreiben Sie ein Funktion zur Variation der Bildhelligkeit, indem Sie das Bild in das HSV-System konvertieren, es dort geeignet bearbeiten und anschließend zurückwandeln. Hinweise: In Matlab existieren bereits die Funktionen `rgb2hsv` und `hsv2rgb`, verwenden Sie das vorhandene Bild `farbe.tif`

Aufgabe 6: Schreiben Sie eine Funktionen, die bei Eingabe der RGB- bzw. HSV-Werte die zugehörige Farbe anzeigen. Versuchen Sie damit, die auf dem beim Versuch ausliegenden Farbmuster nachzubilden. Welche Möglichkeit der Farbdefinition würden Sie bevorzugen?

Aufgabe 7: Schreiben Sie eine Funktion zur Konvertierung eines Bildes von RGB nach YUV.

Aufgabe 8: In diesem Versuch soll der Vorteil des YUV-Systems gegenüber dem RGB-System bei der Farbbildübertragung demonstriert werden. Es werde angenommen, daß das Signal aufgrund begrenzter Kanalbandbreite nicht in voller Auflösung übertragen werden kann. Das Signal muß also mit verringerter Bandbreite übertragen werden, was sich als eine Tiefpaßfilterung äußert. Um den Effekt überdeutlich zu machen nehmen Sie einen – übertriebenen – Tiefpaß mit einer 9x9-Maske und konstantem Wert $1/81$ an. Schreiben Sie eine Routine, die alle Farbkomponenten des Bildes filtert (Tip: `conv2` führt eine zweidimensionale Faltung durch). Die Kanalbandbreite soll nun zulassen, daß einer der drei Farbkanäle original übertragen werden könnte. Schreiben Sie also eine Routine, die nur die 2 letzten Farbkomponenten filtert. Probieren Sie

diese anhand des Bildes farbe.tif nun einmal im RGB-Raum und einmal im YUV-Raum aus (Konvertieren nach YUV, Filtern, Konvertieren nach RGB). Vergleichen Sie die Ergebnisse.

1.5.6 Aufgaben zur Farbnormalisierung

Aufgabe 9: Schreiben Sie Funktionen zur Normalisierung bzgl. der Beleuchtungsgeometrie, bzgl. des Beleuchtungsspektrums sowie bzgl. beider Effekte.

Aufgabe 10: Bauen Sie mit ein paar Objekten eine Bildszene unter der Kamera auf.

Aufgabe 11: Variieren Sie die Lage der Lichtquelle, nehmen Sie die Szene unter diesen veränderten Bedingungen auf und normieren Sie sie geeignet.

Aufgabe 12: Variieren Sie die Farbe der Lichtquelle, nehmen Sie die Szene unter diesen veränderten Bedingungen auf und normieren Sie sie geeignet.

Aufgabe 13: Variieren Sie Lage und Farbe der Lichtquelle, nehmen Sie die Szene unter diesen veränderten Bedingungen auf und normieren Sie sie geeignet.

Aufgabe 14: Vergleichen Sie die Ergebnisse. Wodurch könnten Abweichungen zwischen den einzelnen normierten Bildern erklärt werden?

Literaturverzeichnis

- [1] J.L. Crowley and F. Berard. Multi-modal tracking of faces for object colour perception. In *Proceedings of CVPR'97*, pages 640–645, 1997.
- [2] G. Finlayson, B. Schiele, and J.L. Crowley. Comprehensive colour image normalization. In *In H. Burkhardt and B. Neumann, Hrsg., Fifth European Conference on Computer Vision (ECCV) 1998, Freiburg, jun 1998*.
- [3] G. Healey. Using color for geometry-insensitive segmentation. *Journal of the Optical Society of America, A*, 6:920–937, 1989.
- [4] B. Jähne. *Digitale Bildverarbeitung*. Springer Berlin Heidelberg, 1997.
- [5] A.K. Jain. *Fundamentals of Digital Image Processing*. Prentice Hall, 1989.
- [6] J. Matas, R. Marik, and J. Kittler. On representation and matching of multicoloured objects. In *Proceedings of ICCV'95*, pages 726–732, jun 1995.
- [7] The Math Works Inc. *Image Processing Toolbox for Use with Matlab*, jan 1997.
- [8] The Math Works Inc. *Matlab 5*, jan 1998.
- [9] B. Morgenstern. *Farbfernsehtechnik*, volume 4. Teubner Stuttgart, 1994.
- [10] W.K. Pratt. *Digital Image Processing*, volume 2. John Wiley & Sons, 1991.
- [11] J. R. Smith. *Integrated Spatial and Feature Image Systems: Retrieval, Analysis and Compression*. PhD thesis, Dissertation, Columbia University, 1997.