

3 Digitale Bilder

In diesem Kapitel werden einige grundlegende Begriffe eingeführt, die im Zusammenhang mit der Erzeugung, Repräsentation, Manipulation und Ausgabe digitaler Bilder eine Rolle spielen.

3.1 Geometrische Betrachtungen

In den folgenden Teilkapiteln wird kurz auf die geometrischen Aspekte des Bildraums und der Darstellung von Objekten in digitalen Bildern eingegangen.

3.1.1 Bildpunkte (Pixel) und digitale Bilder

Im Gegensatz zu einem mathematischen Punkt, der im kontinuierlichen (analogen) Objektraum keine Ausdehnung besitzt, ist die Darstellung dieses Punktes im diskreten Bildraum nur möglich, wenn der Punkt eine bestimmte Ausdehnung zugewiesen bekommt. Darüber hinaus kann der Punkt im Bildraum nicht beliebig platziert werden, da er in das Raster des Bildraums eingepasst werden muss und so nur ganzzahlige Positionen auf der Darstellungsfläche einnehmen kann. Eine weitere Folge dieser Tatsache ist, dass auf einer endlich großen Darstellungsfläche nur endlich viele Punkte platziert werden können.

Ein endlicher Ausschnitt des gerasterten Bildraums wird als **digitales Bild** bezeichnet und die Rasterelemente heißen **Bildpunkte** oder **Pixel** (von engl. **picture element**). Ein Pixel lässt sich durch folgende Eigenschaften beschreiben (Modellvorstellung eines Pixels):

- Position
- Helligkeit (Intensität, Grauwert, Grauton) bzw. Farbe
- Ausdehnung
- Form

Im folgenden wird stets von quadratischen Pixeln ausgegangen.

Die Position eines Pixels wird mit Hilfe von Koordinatenangaben (x- und y- Koordinate) in einem **Koordinatensystem** beschrieben. Aus historischen Gründen werden in der graphischen Datenverarbeitung und in der digitalen Bildverarbeitung unterschiedliche Koordinatensysteme benutzt: während die graphische Datenverarbeitung ein "normales" Koordinatensystem verwendet (siehe Abbildung 3.1(a)), sitzt bei der digitalen Bildverarbeitung der Ursprung links oben (siehe Abbildung 3.1(b)).

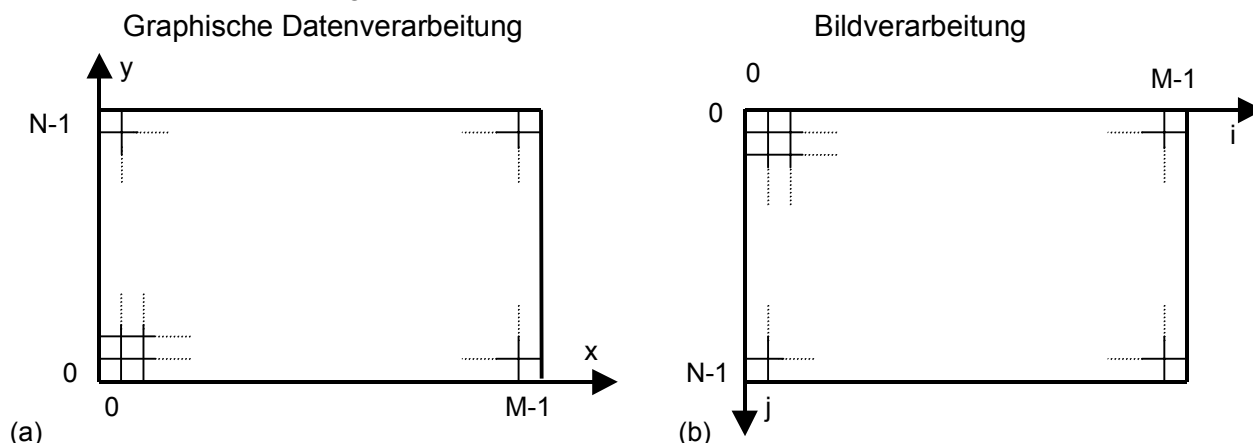


Abb. 3.1: Koordinatensysteme in der Graphischen Datenverarbeitung (a) und der digitalen Bildverarbeitung (b).

Wenn die Ausgabefläche aus M Spalten und N Zeilen besteht, so besitzt sie eine **absolute Auflösung** von $M \cdot N$ Bildpunkten. Das Seitenverhältnis $M : N$ wird als **Aspect Ratio (Darstellungsverhältnis)** bezeichnet. In Tabelle 3.1 sind einige gängige Beispiele für absolute Auflösungen und die zugehörigen Darstellungsverhältnisse aufgelistet.

3.1.2 Vektor- und Rastertechnik

Beim Zeichnen und Repräsentieren graphischer Objekte werden zwei unterschiedliche Techniken eingesetzt, die im folgenden am Beispiel einer Strecke kurz erläutert werden.

Spaltenzahl M	Zeilenzahl N	Absolute Auflösung	Aspect Ratio
640	480	307 200	4 : 3
800	600	480 000	4 : 3
1024	768	786 432	4 : 3
1280	1024	1 310 720	5 : 4
1600	1200	1 920 000	4 : 3
1920	1200	2 304 000	16 : 10

Tabelle 3.1: Beispiele für absolute Auflösungen und die zugehörigen Darstellungsverhältnisse.

In der **Vektortechnik** wird eine Strecke gezeichnet, indem das „Zeichengerät“ (z.B. Zeichenstift oder Elektronenstrahl) am Anfangspunkt der Strecke aufgesetzt und dann bis zum Endpunkt der Strecke geführt wird; siehe Abbildung 3.2 (a). (Diese Technik wird heute fast nur noch bei Stift-Plottern eingesetzt). Zur Repräsentation der Strecke in vektorieller Form genügt es, die Koordinaten des Anfangs- und des Endpunktes anzugeben und zu vermerken, dass diese Punkte miteinander verbunden werden sollen. (Zur Abspeicherung graphischer Informationen in Vektortechnik gibt es spezielle Meta- und Vektor-Bildformate; siehe Kapitel 9.5).

Beim Zeichnen in **Rastertechnik** wird unabhängig vom tatsächlichen Bildinhalt jedes der $M \cdot N$ Pixel der Ausgabefläche „gezeichnet“. Dabei erhalten die Pixel, die auf der Strecke liegen, eine andere Intensität bzw. Farbe, als die des Hintergrunds. Beispielsweise wird bei einem konventionellen Monitor (CRT) der Elektronenstrahl zeilenweise von links oben nach rechts unten geführt und dabei moduliert; siehe Abbildung 3.2 (b). Entsprechend fährt z.B. ein Tintenstrahldrucker das Papier zeilenweise ab, wobei er nur „auf“ der Strecke Tintenpunkte setzt. Bei schräg verlaufenden Linien entstehen dabei „Treppeneffekte“, die als **Aliasing** (vgl. Kapitel 13) bezeichnet werden; siehe Abbildung 3.2 (b)). Diese Effekte sind in Abhängigkeit von der gewählten Auflösung mehr oder weniger gut sichtbar.

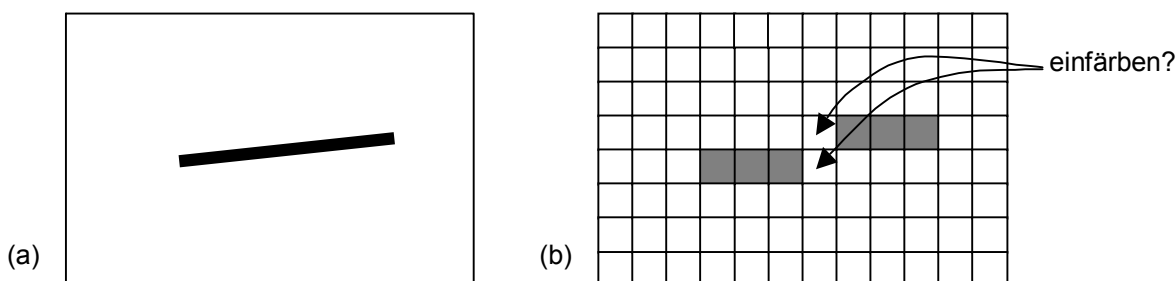


Abb. 3.2: Beispiel für das Zeichnen einer Strecke in Vektortechnik (a) bzw. und in Rastertechnik (b). (In Teil (b) sind die beiden durch den Pfeil gekennzeichneten Pixel beide gleich ungünstig platziert: es entsteht in beiden Fällen eine Treppenstufe).

Zur Repräsentation graphischer Information in Rasterform kann man beispielsweise eine Matrix als virtuelle Entsprechung einer gerasterten Ausgabefläche definieren und alle betroffenen Matrixelemente auf einen bestimmten (Farb-)Wert setzen. Zur Abspeicherung graphischer Information in Rastertechnik gibt es spezielle Raster-Bildformate; siehe Kapitel 7.

Die Konvertierung von Daten aus der vektoriellen Form in die Rasterform bzw. umgekehrt ist ein wesentlicher Bestandteil der Computer Graphik bzw. der Digitalen Bildverarbeitung; siehe auch Kapitel 2.1.

3.1.3 Vektor-Raster-Konvertierung

Die **Vektor-Raster-Konvertierung** wird im folgenden kurz anhand zweier typischer Beispiele vorgestellt. (Auf die **Raster-Vektor-Konvertierung** wird hier nicht näher eingegangen.)

Vektor-Raster-Konvertierung einer Strecke

Um eine durch zwei Punkte $P = [x_P, y_P]^t$ und $Q = [x_Q, y_Q]^t$ (mit „ t “ für transponiert) gegebene Strecke von der Vektor- in die Raster-Darstellung zu konvertieren, gibt es ein ganzes Spektrum von Ansätzen, die von einfachen aber sehr langsamen bis zu extrem ausgefeilten und sehr schnellen (echtzeitfähigen) Verfahren reichen.

Im folgenden wird eine flach verlaufende Strecke mit einer Steigung m mit $|m| = |(y_Q - y_P)/(x_Q - x_P)| \leq 1$ vorausgesetzt. Um alle Zwischenpunkte zwischen P und Q zu erzeugen, wird nun zu jedem x -Wert zwischen x_P und x_Q der zugehörige y -Wert ermittelt.

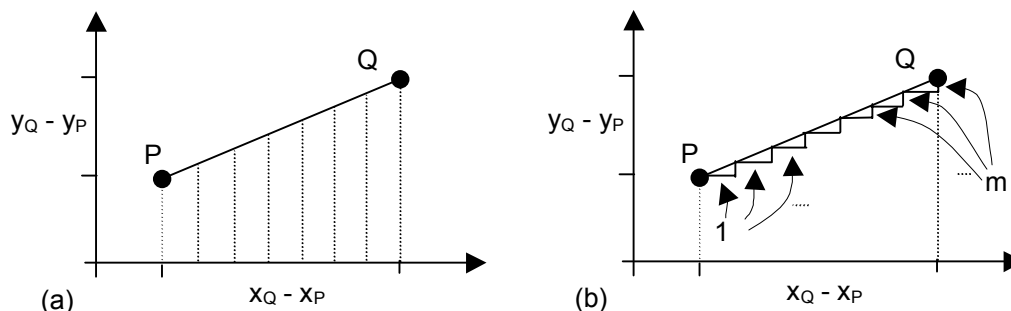


Abb. 3.3: Beispiele für die Vektor-Raster-Konvertierung einer Strecke.

Bei der einfachsten Lösung wird zunächst die Gleichung der Geraden ermittelt, die durch P und Q verläuft. Anschließend wird für jeden x -Wert zwischen x_P und x_Q der zugehörige y -Wert durch Einsetzen in die Geradengleichung ermittelt; siehe Abbildung 3.3 (a). Um das einzufärbende Pixel zu erhalten, muss der berechnete y -Wert anschließend noch gerundet werden. Da hier immer die komplette Geradengleichung ausgewertet werden muss, ist dieser Ansatz extrem langsam.

Eine Verbesserung stellt z.B. die **DDA-Methode** (**D**igital **D**ifferential **A**nalyzer) dar. Zur Berechnung des y -Wertes des Nachbarpunktes von P wird die Steigung m zu y_P dazugezählt; siehe Abbildung 3.3 (b). Durch Runden des so berechneten Zwischenpunktes erhält man den Folgepunkt von P bzgl. des Bildrasters. Mit Hilfe des nicht gerundeten y -Wertes des Zwischenpunktes wird anschließend – wieder durch Addition von m – der y -Wert des nächsten Zwischenpunktes ermittelt, usw.. Dieser Ansatz benötigt je Punkt nur eine Addition und eine Rundung und ist deshalb erheblich schneller.

Noch schnellere aber auch komplexere Verfahren – wie z.B. das Verfahren von Bresenham – können hier nicht vorgestellt werden.

Schlussbemerkung: Bei „steilen“ Strecken wird das entsprechende Vorgehen statt in x -Richtung in y -Richtung durchgeführt.

Vektor-Raster-Konvertierung einer Fläche

Im weiteren wird davon ausgegangen, dass eine Fläche durch einen Konturpolygonzug definiert ist, der in vektorieller Form durch seine Eckpunkte gegeben ist.

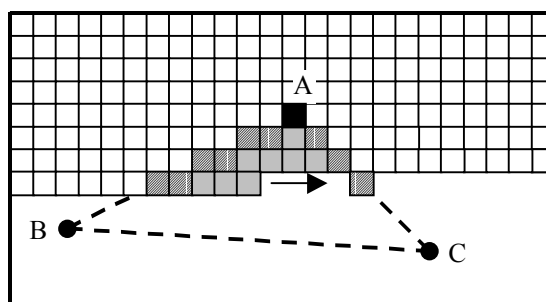


Abb. 3.4: Beispiel für die Vektor-Raster-Konvertierung einer Fläche: Die Eckpixel A bis C des Konturpolygonzuges sind schwarz gezeichnet und die bereits gezeichneten Pixel der Kontur und des Flächeninneren sind schraffiert gemalt bzw. hellgrau eingefärbt.

Um die Fläche zu rastern wird das Bild von oben her Zeile für Zeile abgearbeitet, wobei die Strecken des Konturpolygonzuges gerastert werden. In jeder Zeile werden dann alle Pixel, die innerhalb der Fläche liegen, eingefärbt, indem die betreffende Bildzeile von links nach rechts abgearbeitet wird; siehe Abbildung 3.4. Bei bestimmten Eckpunktconstellationen können dabei Sonderfälle auftreten.

3.2 Photometrische Betrachtungen

Während mit geometrischen Aussagen der Ort beschrieben wird, den ein Objekt einnimmt, beziehen sich photometrische Betrachtungen auf das Aussehen, d.h. die Darstellung eines Objektes mit Hilfe von Grautönen bzw. Farben.

3.2.1 Schwarz-Weiß- und Grauwertbilder

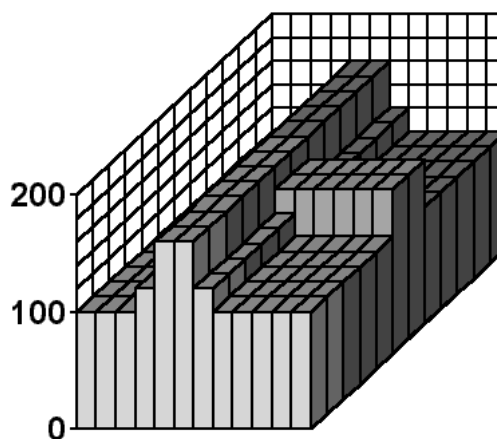
Unter Schwarz-Weiß- und Grauwertbildern versteht man „unbunte“ Bilder, wie sie beispielsweise bei einfachen industriellen Bildverarbeitungs-Aufgaben und bei schwarz-weißen Printmedien (z.B. im nichtfarbigen Zeitungsdruck) verwendet werden.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	100	100	100	120	160	160	120	100	100	100	100	100
1	100	100	100	120	160	160	120	100	100	100	100	100
2	100	100	100	120	160	160	120	100	100	100	100	100
2	100	100	100	120	160	160	120	100	100	100	100	100
3	100	100	100	120	160	160	120	100	100	100	100	100
4	100	100	100	120	160	160	120	100	100	100	100	100
5	100	100	100	120	160	160	140	140	140	140	140	140
6	100	100	100	120	160	160	140	140	140	140	140	140
7	100	100	100	120	160	160	120	100	100	100	100	100
8	100	100	100	120	160	160	120	100	100	100	100	100
9	100	100	100	120	160	160	120	100	100	100	100	100
10	100	100	100	120	160	160	120	100	100	100	100	100
11	100	100	100	120	160	160	120	100	100	100	100	100

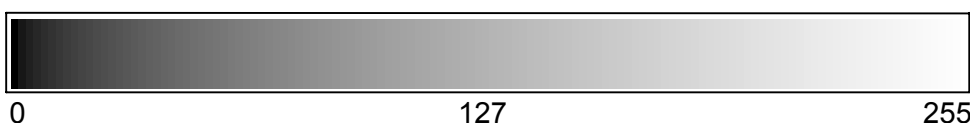
(a) Grauwertmatrix mit Grauwerten $g \in [0,255]$



(b) Grauwertbild



(c) Grauwertgebirge



(d) Graukeil

Abb. 3.5: Repräsentation von Grauwertbildern:
 (a) Grauwertmatrix (b) Grauwertbild
 (c) Grauwertgebirge (d) Graukeil

Die **photometrische Auflösung** (hier **Graustufenauflösung**) gibt an, wie viele Graustufen g zwischen Schwarz und Weiß unterschieden werden. Die Graustufenauflösung ist üblicherweise eine Zweierpotenz 2^n mit $n=1, 2, \dots$. Bei $n=1$ spricht man von **Schwarz-Weiß-Bildern**, während man Bilder mit $n>1$ als **Halbton-, Grauton- oder Grauwertbilder** bezeichnet. Der minimale Grauwert $g_{\text{MIN}}=0$ steht dabei für die Farbe Schwarz und der maximale Grauwert $g_{\text{MAX}} = 2^n-1$ steht für Weiß. Häufig haben Grauwertbilder eine Graustufenauflösung von $2^8 = 256$ Graustufen, da hier genau ein Byte zur Abspeicherung des Grauwertes eines Bildpunktes erforderlich ist.

Abbildung 3.5 zeigt ein Beispiel für die Repräsentation von Grauwertbildern. In Abbildung 3.5 (a) ist die **Grauwertmatrix** mit den Grauwerten in Form von Zahlen dargestellt. Abbildung 3.5 (b) zeigt diese Matrix als Grauwertbild, und in 3.5 (c) sind die Grauwerte in die dritte Dimension abgetragen, wodurch man ein **Grauwertgebirge** erhält. Um das Grauwertspektrum von Bildern visuell abschätzen zu können, wird häufig noch ein sogenannter **Graukeil** dargestellt; siehe Abbildung 3.5 (d).

3.2.2 Farbbilder

Die Farbwahrnehmung ist ein wesentlicher Aspekt der visuellen Informationsaufnahme und so werden Bilder heute meist farbig aufgenommen bzw. synthetisch erzeugt. Um Farbbilder im Rechner repräsentieren und auf Ausgabegeräten wie Bildschirm oder Drucker ausgeben zu können, wurden unterschiedliche Farbmodelle entwickelt.

3.2.2.1 RGB- und CMY-Farbmodell

Das **RGB-Farbmodell** (Red, Green, Blue), bei dem jede Farbe in Ihren Rot-, Grün und Blau-Anteil zerlegt wird, wird z.B. bei Farbmonitoren verwendet. Jeder Bildpunkt eines Bildschirms setzt sich aus drei Einzelpunktchen zusammen, die rotes, grünes und blaues Licht abstrahlen können. Wenn zur Übertragung der Bildinformation (wie z.B. beim Fernsehen) ein anders Farbmodell verwendet wird, so wird vor der Bildausgabe eine Konvertierung in das RGB-Farbmodell vorgenommen.

Der RGB-Farbraum lässt sich als Einheitswürfel darstellen; siehe Abbildung 3.6 (a). Dabei bilden die Primärfarben Rot, Grün und Blau die drei positiven Hauptachsen: r-Achse, g-Achse und b-Achse. Jede Farbe wird durch einen Punkt im Einheitswürfel, d.h. ein Tripel $[r, g, r]^t$ mit $r, g, b \in [0, 1]$ dargestellt.

Die Farbe Schwarz liegt im Ursprung bei $r=g=b=0$; (wenn alle drei Farben an einer Bildschirmposition den Wert Null haben, so bleibt der Bildschirm an dieser Stelle schwarz). Die Farben Rot, Grün und Blau werden durch die Tripel $[1,0,0]^t$, $[0,1,0]^t$ und $[0,0,1]^t$ repräsentiert. Aus diesen drei Primärfarben lässt sich jede gewünschte Farbe durch **additive Farbmischung** erzielen: wenn z.B. die Farben Rot und Grün mit voller Intensität gemischt werden, so nimmt das Auge die Farbe Gelb wahr:

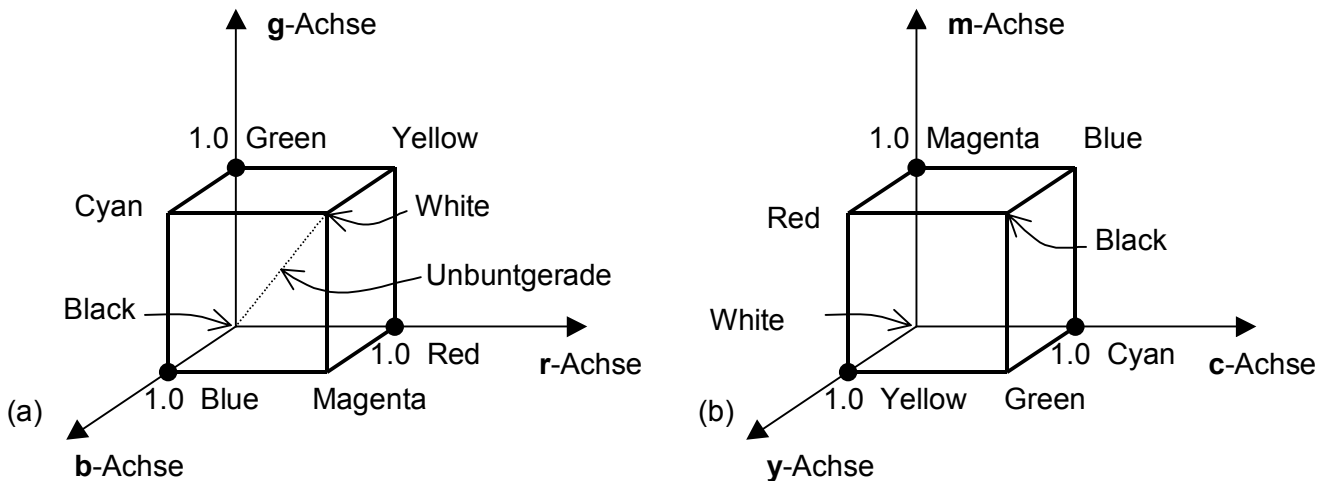
$$\text{Gelb} = \text{Rot} + \text{Grün} = [1,0,0]^t + [0,1,0]^t = [1,1,0]^t$$

Wenn alle drei Primärfarben mit voller Intensität strahlen, so erhält man Weiß:

$$\text{Weiß} = \text{Rot} + \text{Grün} + \text{Blau} = [1,0,0]^t + [0,1,0]^t + [0,0,1]^t = [1,1,1]^t$$

Die Raumdiagonale des Würfels, die die Punkte Schwarz und Weiß verbindet, heißt **Unbunt-Gerade**. Diese Gerade enthält alle Grauwerte zwischen Schwarz und Weiß, für die also gilt: $r = g = b$.

Im Gegensatz zu selbstleuchtenden Medien, bei denen das RGB-Modell mit seiner additiven Farbmischung verwendet wird, setzt man bei reflektierenden Medien (z.B. Farbdruck) das komplementäre **CMY-Farbmodell** ein (Cyan, Magenta und Gelb bzw. Yellow); siehe Abbildung 3.6 (b). Der Einheitswürfel wird hier genau entgegengesetzt zum RGB-Modell definiert und jede Farbe wird durch ein Tripel $[c, m, y]^t$ mit $c, m, y \in [0, 1]$ repräsentiert. Der Ursprung wird durch die Farbe Weiß gebildet: wenn man auf ein weißes Blatt Papier keine Farbe aufträgt, so reflektiert das Papier nach wie vor das volle Spektrum des Lichtes und erscheint Weiß.

**Abb. 3.6:** (a) RGB-Farbmodell;

(b) CMY-Farbmodell.

Durch Auftragen von Farbe werden bestimmte Frequenzbereiche des Lichtes herausgefiltert, weshalb man hier von einer **subtraktiven Farbmischung** spricht. So filtert ein Farbauftrag mit Cyan die Farbe Rot aus weißem Licht heraus, Magenta filtert Grün und Gelb reflektiert kein Blau mehr.

Das folgende Beispiel zeigt bezüglich des RGB-Modells, warum auf einer weißen Fläche zwei dicht benachbarte Farbpunktchen in Cyan und Gelb vom Betrachter als Grün wahrgenommen werden:

$$\text{Weiß} - \text{Rot} - \text{Blau} = [1,1,1]^t - [1,0,0]^t - [0,0,1]^t = [0,1,0]^t = \text{Grün}$$

Nach diesem Prinzip arbeiten z.B. Farbdrucker und andere Hardcopy-Geräte.

Die Umrechnung zwischen dem RGB- und dem CMY-Farbmodell und umgekehrt ergibt sich nach folgender Formel:

$$\begin{bmatrix} c \\ m \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} \quad \text{bzw.} \quad \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c \\ m \\ y \end{bmatrix}$$

RGB(A)-Farbmodell

Beim **RGB(A)-Farbmodell** wird das RGB-Modell um einen sogenannten **Alpha-Kanal** erweitert. Dabei wird zu jedem Pixel zusätzlich zu seinem rgb-Farbtupel noch ein Alpha-Wert (zwischen 0 und 1) angegeben, der die Transparenz der Pixelfarbe festlegt.

Bei der Überlagerung zweier Bilder kann so für jedes Pixel festgelegt werden, ob und in welchem Maße das „untere“ Bild oder das „obere“ Bild sichtbar sein soll. Mit Hilfe des Alpha-Kanals kann man also z.B. einen fließenden Übergang zwischen zwei überlagerten Bildern schaffen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, eine Graphik mit einer transparenten Hintergrundfarbe zu versehen; anschaulich entspricht dies dem Zeichnen der Graphik auf einer transparenten Folie. Wenn man ein derartiges Bild dann einer Textseite oder einem Bild überlagert, so ist nur der beliebig geformte Vordergrund sichtbar und nicht das üblicherweise rechteckige Gesamtbild. Diese Technik wird beispielsweise bei der Gestaltung von Internet-Seiten häufig eingesetzt, um Graphiken und andere Gestaltungselemente in einen beliebig eingefärbten Hintergrund einzubetten; (z.B. GIF-Graphiken, siehe Kapitel 7.2).

CMYK-Farbmodell

Im CMY-Farbmodell wird die Farbe Schwarz dadurch erzielt, dass durch einen Farbauftrag in Cyan, Magenta und Gelb alle Farben aus weißem Licht herausgefiltert werden, d.h. keine Farbe mehr reflektiert wird. In der Praxis ist es jedoch sehr unbefriedigend, die Farbe Schwarz durch einen dreifachen Farbauftrag zu erreichen, zumal man hierbei in der Regel statt Schwarz eher ein dunkles Braun erhält. Aus diesem Grund wird im **CMYK-Modell** noch

die Farbe Schwarz (Black) als vierte Komponente hinzugefügt. Die zusätzliche Verwendung von Schwarz ermöglicht beim Druck außerdem kontrastreichere Farbabstufungen.

3.2.2.2 Weitere Farbmodelle (YUV, HSV)

Während das RGB- und das CMY-Farbmodell von ihrer Konzeption her eher auf die Technologie von Ausgabegeräten zugeschnitten sind, erlauben andere Farbmodelle u.a. eine intuitivere Farbestimmung durch den Benutzer. Bei diesen Modellen wird die Farbe als Kombination einer Intensität (Helligkeit, Luminanz) und zweier Chrominanz definiert. Beispielsweise gibt beim HSV-Farbmodell (siehe unten) die erste Chrominanz den **Farbton**, also die eigentliche Farbabstufung (Rot, Violett, Blau usw.) an, und die zweite Chrominanz bestimmt die **Farbsättigung**, d.h. die Reinheit der Farbe. Während gesättigte Farben klar und leuchtend erscheinen, erhält man z.B. bei reflektierenden Medien durch Beimischung von Weiß ungesättigte, pastelltonartige Farben.

Es gibt zahlreiche Farbmodelle und diese können hier nicht eingehender behandelt werden. Im folgenden soll nur ein grober und verallgemeinernder Zusammenhang zwischen dem RGB-Farbmodell, dem YUV-Modell und dem HSV-Modell vorgestellt werden.

Der Übergang vom RGB- zum **YUV-Farbmodell** (Y nicht verwechseln mit Yellow im CMY-Modell), ist dadurch gekennzeichnet, dass man jede Farbe durch eine (farblose) Intensität y und zwei (intensitätslose) Farben u und v kennzeichnet. Die einfachste Möglichkeit, um die Intensität eines rgb-Farbtupels $[r, g, b]^t$ zu bestimmen wäre, den Mittelwert aus dem r , g und b -Wert zu bestimmen:

$$y = 1/3 * (r + g + b)$$

Diese Gleichgewichtung der drei Farbkanäle entspricht aber nicht der menschlichen Farbwahrnehmung, die im grünen Spektralbereich wesentlich empfindlicher als im roten und insbesondere im blauen Spektralbereich ausgeprägt ist. Farbphysiologische Untersuchungen haben deshalb zu folgendem europäischen Standard geführt:

$$y = 0.3*r + 0.59*g + 0.11*b$$

(Der amerikanische Intensitäts-Standard im YIQ-Farbmodell unterscheidet sich geringfügig in den Gewichtungen von Rot, Grün und Blau).

Um wieder auf einen dreidimensionalen Farbraum zu kommen, müssen nun zusätzlich zur farblosen Helligkeitsachse y noch zwei weitere Achsen (Dimensionen) definiert werden. Um zwei intensitätslose Farben u und v zu erhalten, subtrahiert man von den Farbkomponenten b bzw. r des rgb-Farbtupels die Intensität y und erhält:

$$u = b - y = 1.0*b - (0.3*r + 0.59*g + 0.11*b) = -0.3*r - 0.59*g + 0.89*b \quad \text{und}$$

$$v = r - y = 1.0*r - (0.3*r + 0.59*g + 0.11*b) = 0.7*r - 0.59*g - 0.11*b$$

Der Zusammenhang zwischen dem RGB- und dem YUV-Farbmodell ist gegeben durch:

$$\begin{bmatrix} y \\ u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.59 & 0.11 \\ -0.3 & -0.59 & 0.89 \\ 0.7 & -0.59 & -0.11 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix}$$

Durch Einsetzen der Farben Schwarz bzw. Weiß des RGB-Farbmodells kann man leicht nachprüfen, dass die Unbuntgerade des RGB-Farbmodells der y -Achse des YUV-Farbmodells entspricht.

Auch beim **HSV-Farbmodell** (Hue = Farbton, Saturation = Sättigung, Value = Intensität, Helligkeit), das z.B. im Bildbearbeitungsprogramm Gimp Verwendung findet, wird die Unbuntgerade des RGB-Farbmodells als Intensitätsachse v verwendet. Weiterhin kann man am RGB-Würfel eine Ebene definieren, die den Weiß-Punkt enthält und senkrecht auf der Intensitätsachse v steht. Wenn man nun den RGB-Würfel entlang der Intensitätsachse auf diese Ebene projiziert, so erhält man die in Abbildung 3.7 gezeigte Darstellung. Die sechs farbigen Ecken des Würfels bilden in der Projektion auf die Ebene ein Sechseck, dessen Mittelpunkt der Unbuntgeraden, also allen Grautönen zwischen Schwarz und Weiß entspricht.

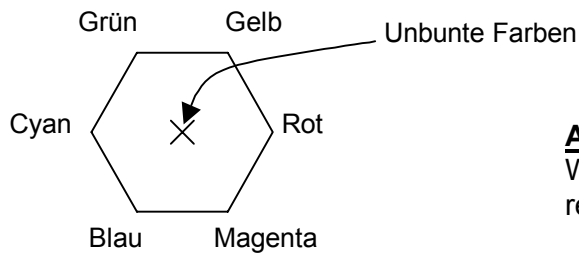


Abb. 3.7: Projektion des RGB-Würfels auf eine Ebene, die senkrecht auf der Unbuntgeraden steht.

Zusammen mit der Intensitätsachse v erhält man hieraus den sogenannten HSV-Hexakegel aus Abbildung 3.8. Die Intensität v einer Farbe wird in der Vertikalen definiert und ihre beiden Chrominanz h und s lassen sich in Polarkoordinaten bezüglich des Schwarz-Punktes beschreiben: der Winkel zwischen 0° und 360° gibt den Farbton h an und der Abstand vom Mittelpunkt bestimmt die Farbsättigung s . Punkte mit großem Abstand vom Mittelpunkt entsprechen also gesättigten Farben.

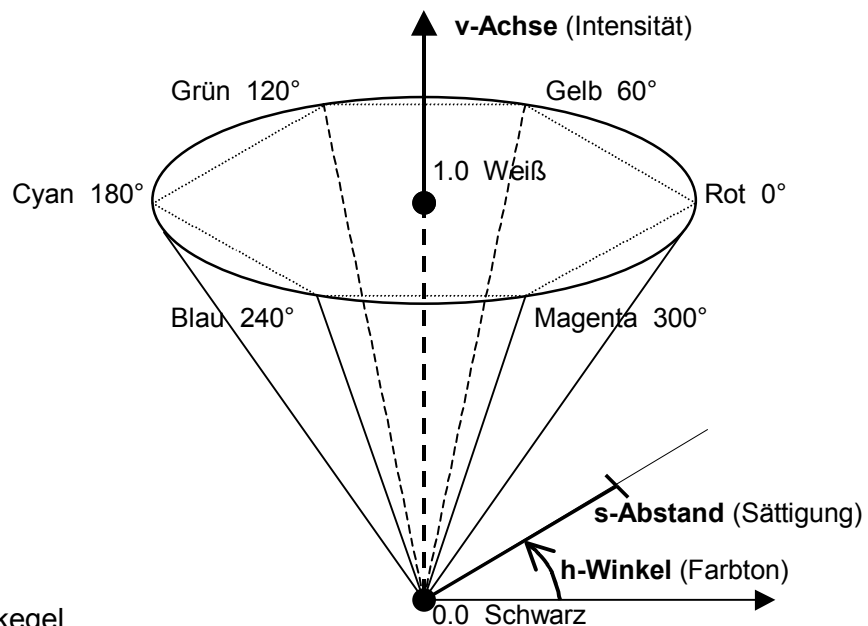


Abb. 3.8: Der HSV-Hexakegel.

Im folgenden ist die Umrechnung eines Farbtupels (r,g,b) des RGB-Farbmodells in ein Tripel (h,s,v) des HSV-Farbmodells angegeben. Mit den Vereinbarungen

$$\max = \max(r,g,b), \quad \min = \min(r,g,b) \quad \text{und} \quad \delta = \max - \min$$

ergeben sich die Helligkeit v und die Sättigung s zu:

$$v = \max \quad \text{bzw.} \quad s = \delta / \max.$$

(Falls $\max=0$ ist, so wird $s=0$ gesetzt und der Farbton h wird als "nicht definiert" erklärt).

Der Farbton h ergibt sich zu:

- Falls $r = \max$ ist: $h = ((g-b)/\delta) * 60^\circ$; falls $h < 0^\circ$: $h = h + 360^\circ$;
- Falls $g = \max$ ist: $h = (2 + (b-r)/\delta) * 60^\circ$;
- Falls $b = \max$ ist: $h = (4 + (r-g)/\delta) * 60^\circ$.

Farbmodelle, die auf einer Intensitäts- und Chrominanz-Zerlegung basieren, bringen eine Reihe von Vorteilen mit sich:

1. Sie entsprechen in der Farbdefinition besser der menschlichen Farbwahrnehmung und ermöglichen eine anschaulichere Beschreibung einer Farbe.
2. Sie erlauben in Übereinstimmung mit dem menschlichen Sehsystem eine Bandbreitenbegrenzung der Chrominanz-Komponenten. Da die räumliche Auflösung der Chrominanz in unserem Sehsystem wesentlich schlechter erfolgt, als die der Intensitäten, können die Chrominanz bei der Analog-Digital-Wandlung gröber quantisiert werden. Dies

bewirkt gegenüber dem RGB-Modell einen deutlich geringeren Platzbedarf bei der Archivierung eines Bildes (siehe Kapitel 7) und macht sich bei der Datenübertragung durch kürzere Übertragungszeiten positiv bemerkbar.

- Bei der Ausgabe auf Schwarz-Weiß-Geräten (z.B. Schwarz-Weiß-Drucker) erfordern sie keine weiteren Berechnungen, da man direkt den Intensitätskanal ausgeben kann.
- Bei Algorithmen zur Bildverarbeitung oder Bildbearbeitung erfordern sie weniger Berechnungsaufwand, da z.B. zur Aufhellung oder Kontrastverbesserung eines Bildes nur der Intensitätskanal verändert werden muss, während beim RGB-Modell alle drei Farbkanäle betrachtet werden müssen. Außerdem ergeben sich beim RGB-Modell in solchen Fällen häufig Farbverfälschungen, wenn z.B. eine der Farbkomponenten „in die Sättigung geht“, d.h. die zulässigen Intervallgrenzen überschreiten würde.

3.2.2.3 Rechnerinterne Repräsentation von Farbbildern

Zur Verarbeitung und Repräsentation von Farbbildern in einem Digitalrechner müssen die einzelnen Farbkanäle **quantisiert**, d.h. auf diskrete Werte abgebildet werden. Beispielsweise ist beim RGB-Modell eine Unterscheidung von $2^8 = 256$ Werten je Farbkanal üblich, so dass man insgesamt eine **Farbauflösung** von $2^8 * 2^8 * 2^8 \approx 16.7$ Millionen verschiedenen Farben erhält. Man spricht in diesem Fall auch von **True-Color**, da (fast) die Farbauflösung des menschlichen Sehsystems erreicht wird. Da zur Abspeicherung eines Pixels hier je Kanal 8 Bit, d.h. insgesamt 24 Bit erforderlich sind, benötigen True-Color-Bilder in Abhängigkeit von ihren Abmessungen sehr viel Speicherplatz.

Falls zusätzlich ein Alpha-Kanal verwendet wird, so wird dieser üblicherweise ebenfalls mit 8 Bit pro Pixel quantisiert.

Neben den Möglichkeiten zur Bildkompression (siehe Kapitel 7), soll hier noch eine weitere Alternative zur platzsparenden Repräsentation von Farbbildern vorgestellt werden. Zu diesem Zweck reduziert man ein True-Color-Bild beispielsweise auf seine 256 „optimalen“ Farben, und stellt diese in einer **Farbtabelle (LUT, für Look Up Table)** zusammen. Die Pixelwerte stellen jetzt keine direkten Farben mehr dar, sondern sie werden als Indizes in diese LUT aufgefasst. Im vorliegenden Fall müssen pro Pixel nur noch 8 Bits zur Abspeicherung des Index zur Verfügung gestellt werden; allerdings muss auch die LUT noch abgespeichert werden.

Auch Grauwertbilder werden mit Hilfe einer LUT dargestellt. Die Grauwerte der einzelnen Pixel stellen Indizes in eine LUT dar, die die eigentlichen Grautöne in Form von rgb-Tripeln enthält, bei denen die r-, g- und b- Einträge dieselben Werte haben; siehe Abbildung 3.9.

Wenn man in die zu einem Grauwertbild gehörende Farbtabelle „echte“ Farben einsetzt, so erhält man ein sogenanntes **Pseudo-Farbbild**. Dies ist eine (z.B. im Bereich der Medizin) häufig eingesetzte Visualisierungstechnik, um auch kleinste Grauwertunterschiede anhand unterschiedlicher Ausgabe(-Pseudo)-Farben gut erkennen zu können.

Grauwertbild					LUT				
	0	1	2	3	4	Index	r	g	b
0	253	255	255	253	255 ...	0	0	0	0
1	255	255	255	0	160 ...	1	1	1	1
2	255	254	255	1	159 ...	:	:	:	:
2	252	255	255	0	161 ...	254	254	254	254
3	:	...	:	:	:	255	255	255	255

Abb. 3.9: Beispiel für die Verwendung einer LUT bei einem Grauwertbild.

Im Gegensatz zu einem Pseudo-Farbbild spricht man von einem **Falsch-Farbbild**, wenn die Farbwerte eines Farbbildes verändert oder vertauscht wurden, so dass die im Bild enthaltenen Objekte in einer anderen (als ihrer tatsächlichen) Farbe dargestellt werden.

Da bei dem Wert eines Pixels nicht erkennbar ist, ob damit ein Grau- oder ein Farbwert gemeint ist, wird dieser Wert im weiteren auch als **Pixelwert** bezeichnet.