

Bildbearbeitung im Farbraum sRGB

Definition

Der sRGB Farbraum ist nichtlinear. Er geht davon aus, daß Monitore die RGB-Werte des digitalen Bildes mit einer über-quadratischen Kennlinie in der Form

$$I = B^{(\gamma)} = B^{2,2} \quad (B = 0 \dots 255)$$

abbilden. In diesem Farbraum ist der maximale Kontrastumfang, der abgebildet werden kann,

$$K = \left(\frac{255^{2,2}}{1} \right) = 196964$$

was immer ausreichend erscheint.

Aufgrund der exponentiellen Verzerrung muß das Eingangssignal des CCD-Wandlers vorverzerrt werden, ehe es in einer Datei (JPG, BMP) abgelegt wird. Diese Vorverzerrung muß, um Linearität zu gewährleisten, die Umkehrfunktion der Monitorkennlinie darstellen. Mit

$$I = B^{(\gamma)} = B^{2,2} \quad (B = 0 \dots 255)$$

ist die Vorverzerrung durch

$$B = I^{1/\gamma} = I^{1/2,2} = I^{0,4545\dots}$$

definiert.

Arbeiten im Farbraum sRGB

Da durch die Vorverzerrung die Bilddaten nichtlinear vorliegen, sind auch Bildmanipulationen in ihrer Wirkungsweise nicht mehr so einfach zu beurteilen. Erhöht man zum Beispiel die Bildhelligkeit um den Faktor 2, also z.B. von 100 nach 200, so steigt die Intensität auf dem Monitor um

$$I = 2^{2,2} = 4,59.$$

Will man die Intensität des Bildes verdoppeln, darf man B nur um den Faktor

$$B = 2^{0,4545} = 1,37$$

erhöhen. Zumindest ist trotz der Nichtlinearität gewährleistet, daß multiplikative Manipulationen, also Verstärken und Abschwächen, multiplikativ bleiben.

Wie sieht die Sache jedoch bei additiver Manipulation aus? Die beiden Bilder F und G sollen addiert werden, um z.B. eine Spiegelung darzustellen. In der Realität gilt:

$$I = F + G$$

Unsere Kamera hat aus jedem Bild durch Vorverzerrung

$$BF = F \cdot 0,4545$$

$$BF = F$$

$$\cdot 0,4545$$

$$BG = G$$

gemacht. Die Summe ist somit

$$BF + BG = F \cdot 0,4545 + G \cdot 0,4545$$

$$BF + BG = F + G$$

Ein Beispiel:

$$F = 100$$

$$G = 100$$

$$I = F + G = 200$$

Die Bilddaten lauten:

$$BF = 100 \cdot 0,4545 = 45,45$$

$$BG = 100 \cdot 0,4545 = 45,45$$

Werden diese beiden Bilder nun addiert, folgt

$$BF + BG = 90,9$$

und für die Darstellung auf dem Monitor

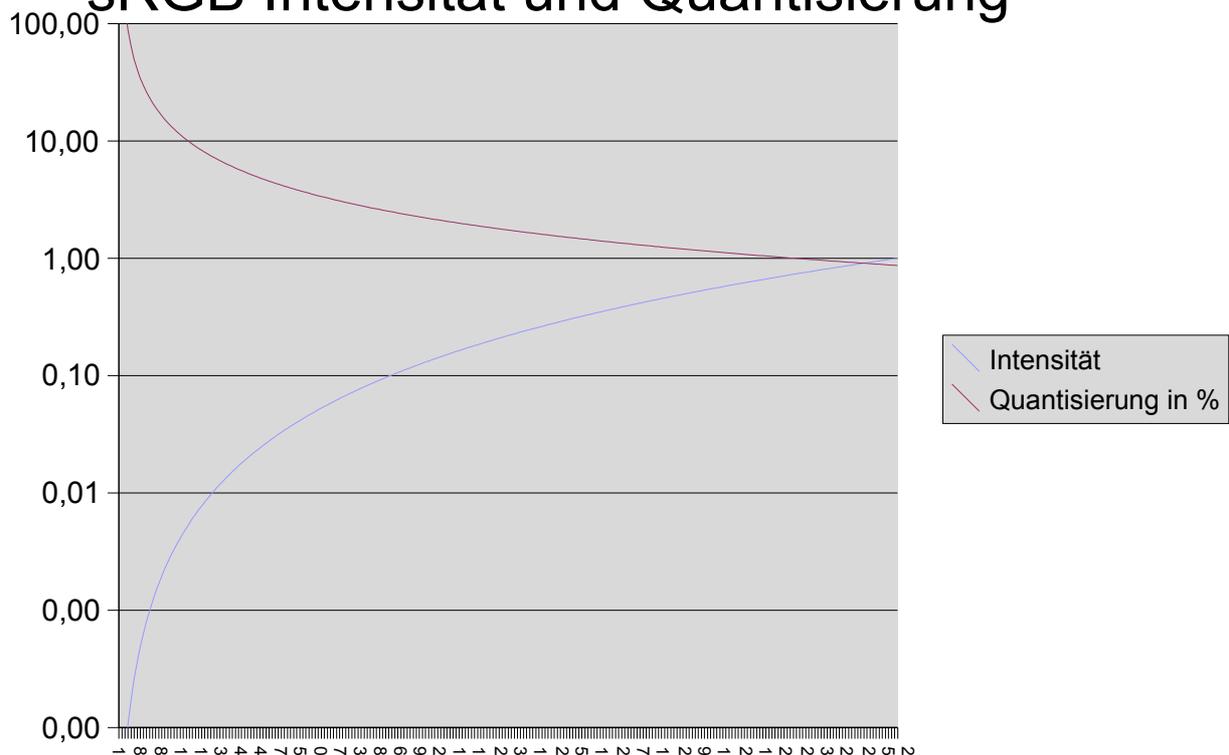
$$I = (BF + BG) \cdot 2,2 = 199,98 \approx 200 \text{ und nicht } 200.$$

Wie man sieht, liefern additive Bildmanipulationen keine korrekte Wiedergabe bei sRGB.

Deshalb auch Vorsicht mit additiven Farbreglern, wie sie von vielen Programmen aufgrund der einfachen Integer-Rechnung verwendet werden:

die Linearität der Wiedergabe wird zerstört.

sRGB Intensität und Quantisierung



Durch die Vorverzerrung mit Gamma = 0,4545... ergibt sich gegenüber der linearen Verarbeitung noch ein weiterer Vorteil. Nicht nur der Kontrastumfang steigt, auch die Quantisierung der Farben ist in einem weiteren Bereich annehmbar gut.

Bei **linearem Farbraum** ist die Quantisierung bei einem Farbwert von 250 sehr fein, nämlich

$$Q = \frac{251}{250} - 1 = 0,4\%$$

bei einem Zehntel der Helligkeit jedoch nur noch

$$Q = \frac{26}{25} - 1 = 4\%$$

bei einem Hundertstel der Helligkeit

$$Q = \frac{3}{2} - 1 = 50\%$$

Eine sehr gute Farbabbildung ist in einem Belichtungsspielraum von 1 zu 2,5 gegeben, bildmäßig gute Farbdarstellung ist bis 1 zu 25 zu erwarten, Ausnutzung der Schatten ist bis etwa 1 zu 80 bei 25% Quantisierungsfehler möglich.

Im **sRGB Farbraum** ist die Quantisierung über einen weiten Bereich konstanter:

Bei	I = 100%	Q = 0,87%
	I = 10%	Q = 2,49%
	I = 1%	Q = 7,23%
	I = 0,1%	Q = 23%

Eine sehr gute Farbabbildung ist über einen Belichtungsspielraum von 1 zu 10 zu erwarten, eine für die bildmäßige Fotografie noch gute Farbabbildung ist bis 1 zu 100 gegeben, eine Ausnutzung der Schatten mit 25% Quantisierungsfehler ist bis 1 zu 1000 möglich.

sRGB bietet bei gleicher Quantisierungsqualität einen 12 mal so großen Belichtungsspielraum wie der lineare Farbraum.

Theoretische Betrachtung der Übertragungsstrecke

CCD-Sensoren produzieren eine der empfangenen Quantenmenge proportionale Ladung im Pixel.

$$Q = \eta * We,$$

worin We die empfangene Strahlungsenergie und η der Quantenausbeute proportional ist. Die Ladung des Pixels wird ausgelesen und nach dem Coulombschen Gesetz

$$U = Q / C$$

in eine Spannung umgesetzt.

Interessant ist nun, dass wir somit über

$$U = \eta * We / C$$

eine zur Lichtenergie proportionale Ausgangsspannung haben, die digitalisiert wird. Wird diese Spannung einem normalen CRT-Monitor zugeführt, erzeugt dieser nach dem Ohmschen Gesetz eine Strahlleistung

$$Ws = \mu * U^2 / R$$

in der μ den Wirkungsgrad der Umsetzung beschreibt. Diese Strahlleistung wird von der Leuchtschicht in den Monitorpixeln in Lichtleistung umgesetzt:

$$Wa = \gamma * Ws$$

Fasst man die gesamte Übertragungsstrecke zusammen, so ergibt sich

$$Wa = \gamma * \mu * (\eta * We / C)^2 = \gamma * \mu * (\eta / C)^2 * We^2$$

oder, unter Zusammenfassung aller Konstanten zu A :

$$Wa = A * We^2.$$

Wie wir sehen können, ist die Übertragungsstrecke bedingt durch den Monitor nichtlinear. Aus diesem Grunde wird in der digitalen Consumer-Fotografie das Ausgangssignal des CCD-Sensors gleich vorverzerrt gespeichert (Gamma-Korrektur):

$$1/2$$

$$sRGB = (We^2)^{1/2} = We$$

und damit

$$Wa = A * We.$$

Auf diese Weise wird ohne zusätzlichen Aufwand eine lineare Übertragungsstrecke mit CRT-Monitoren erreicht.

Bedeutung für die Bildbearbeitung

Die Vorverzerrung schafft zwar für billige Technik optimale Voraussetzungen, ist aber für die digitale Bildbearbeitung ein Hindernis. Die Nichtlinearität der Daten verhindert einfache Operationen wie Addition und Subtraktion mit korrektem Ergebnis, wie sie z.B. zur Rauschunterdrückung oder zum Abzug von Streulicht notwendig sind.

Gangbare Praxis kann hier nur folgende sein:

1. Wandeln der Bilddaten in 32-Bit-Format (Float ist sinnvoll)
2. Linearisierung der Bilddaten durch Gamma 2,2 (oder 2, hängt vom Kameratyp ab)
3. Vornehmen der Verarbeitungsschritte wie Abzug des Dunkelrauschens, Vignettierungsausgleich, Summation von Einzelbildern etc.
4. Transformation nach sRGB mit Gamma 2,2 und speichern in 8 Bit.

Was muss ein Programm bieten

32-Bit Bilddaten sind erforderlich, da das Quadrat von 255 schon den Integerbereich (32767) überschreitet, bei Gamma 2,2 kommt man sogar auf 196000. Float bietet sich an.

Damit ergibt sich bei einer Bildgröße von 3,3 Megapixeln ein Arbeitsspeicherbedarf von

$$\text{Mem} = 3,3 \text{ MB} * 3 \text{ Farben} * 4 \text{ Byte} = 40 \text{ MB}$$

pro Bild. Eine komplette Verarbeitung unter DOS mit EMS ist also nicht möglich, die Bilder müssten dem verfügbaren Speicher entsprechend in Teilblöcken verarbeitet werden. Sinnvoll ist z.B. die zeilenweise Verarbeitung, die bei

$$7 \text{ Mpix} = 3072 * 3 * 4 = 36864 \text{ Byte}$$

pro Zeile belegt.

Das Programm sollte folgende Möglichkeiten bieten:

1. Eingangsformate: (EXIF-) Tiff und BMP
2. Subtraktion, z.B. des Dunkelrauschens
3. Division, z.B. durch ein Graubild zur Vignettierungskorrektur
4. Addition von Bildern
5. (Auto-) Skalierung, Multiplikation
6. Gammakorrektur
7. Vielfachaddition und Skalierung zur Rauschminderung (Summe aus Einzelbildern)
8. Verarbeitung von Exif zur automatischen Auswahl von Dunkelrauschbildern
9. Verarbeitung von Exif zur automatischen Auswahl von Vignettierungsbildern
10. Allgemeine mathematische Operationen (+, -, *, /) mit Bildern und Konstanten
11. Farbmatrix-Operationen zur Korrektur von Farben (ICM)

Denkbar ist eine Kommandozeilenversion, deren Syntax etwa wie folgt aussieht:

- Image in.bmp – noise.bmp = out.bmp
- Image in.bmp / vignette.bmp * 255 = out.bmp
- Image mittel (*.bmp) = out.bmp
- Image autokorrekt (*.tif) (in.tif – noise.bmp) / vignette.bmp * 255 = out.tif (mit EXIF)

- Image in.tif oly510.icm out.tif (Farbkorrektur mit ICM-Profil)

Bildrauschen

Das Rauschen der Bilder von CCD-Sensoren gliedert sich in mehrere Arten:

1. Dunkelstrom
Die Pixel haben nicht alle die gleiche Isolation zum Substrat, sodaß sich beim Belichtungsvorgang Ladung auf verschiedenen Pixeln verschieden stark ansammelt, auch wenn keine Belichtung stattfindet. Hieraus ergibt sich ein Muster, das charakteristisch ist für einen individuellen Sensor.
Die Korrektur kann durch ein Dunkelbild bei gleicher ISO-Empfindlichkeit und Belichtungszeit geschehen, das vom Original abgezogen wird. Da dieses Bild auch andere Rauscharten beinhaltet, ist es zweckmäßiger, ein Durchschnittsbild aus solchen Dunkelbildern zu erstellen.
2. Pixeleffektivität
Die Pixel eines CCD haben üblicherweise nicht alle die gleiche Effizienz. Das kann verschiedene Ursachen haben: Geometrie, Dotierung, Isolationswiderstand und, bei neueren CCDs, die Mikrolinse über dem Pixel. Auch Staub kann sich auswirken. Wie beim Dunkelstrom ist die Pixeleffektivität individuell mit dem CCD-Sensor der Kamera. Ein Weißbild, welches die Verstärkung jedes Pixels darstellt, kann zur Korrektur herangezogen werden. Hierzu wird das Original durch das Weißbild geteilt und mit dem Mittelwert des Weißbildes multipliziert.
3. Thermisches Rauschen
Dieses Rauschen ist individuell für jede Aufnahme. Die Rauschspannung hängt direkt von der Temperatur des CCD, des Verstärkers und des AD-Wandlers ab. Stromsparende moderne Technologie setzt alle gerade nicht benötigten Einheiten in den Sleep-Mode, sodaß die Erwärmung deutlich niedriger ausfällt als bei älteren Modellen.
Kleinere Pixel reagieren aufgrund ihrer geringeren Kapazität stärker auf Rauschströme als große Pixel. Zusätzlich haben kleinere Pixel durch die geringere Fläche auch eine verminderte Quantenausbeute. Auch das verschlechtert den Rauschabstand.
Eine Verminderung des Rauschens ist nur möglich, indem durch Mehrfachaufnahmen unter Ausnutzung der verschiedenen Korrelation von Rauschen und Bildinhalt durch Mittelwertbildung das Rauschen auf das gewünschte Maß gebracht wird. Dabei ist pro Verdoppelung der verwendeten Bildanzahl 3 dB Verbesserung des Rauschabstandes möglich. Sinnvoll einsetzen läßt sich das Verfahren jedoch nur bei (Quasi-) Stilleben.