

Mehr Drama

In vielen Industriebereichen wie Digitaldruck oder Humanmedizin ist eine natürliche Farbwiedergabe unerlässlich. Wie wichtig die Farbtreue sein kann, zeigt das Beispiel eines Mediziners, der bei einer Operation mithilfe eines Endoskops das richtige Gewebe entfernen muss. Dieses Whitepaper soll zeigen, wie Sie die Farbtreue Ihrer Kamera optimieren können, so dass die Farbe so natürlich wie möglich auf unterschiedlichen Anzeigegeräten dargestellt wird.

Eine Farboptimierung beinhaltet lineare und nicht-lineare Arbeitsschritte (z.B. Anzeige-Farbraum oder eine Gamma-LUT für die Ansicht), die normalerweise nicht in der industrieller Bildverarbeitung benötigt werden. Beispielsweise bietet ein Standardmonitor unterschiedliche Anzeigemodi wie *sRGB*, "*Adobe RGB*", Wide Gamut etc. an, welche die gleiche Farbe einer Kamerafarbe unterschiedlich reproduziert.

Bei modernen Kameras können die Arbeitsschritte zur Farboptimierung

- auf der Kamera,
- auf dem Host oder
- sowohl als auch

ausgeführt werden.

Der Vorteil der kamerabasierten Optimierung liegt darin, dass

- die Berechnung unabhängig von der Transfer-Bittiefe äußerst präzise ist,
- die Latenzzeit gering ist, da die Berechnung on-the-fly im FPGA durchgeführt werden und dadurch
- die CPU-Last des Hostsystem davon unberührt bleibt.

Kamerabasierte Optimierungen (also Hardware-basiert) sind beispielsweise bei der GigE Vision Kamera mvBlueCOUGAR-X von MATRIX VISION

- Gamma Korrektur
- Negative Verstärkung / Verstärkung (Gain)
- Look-up Tabelle (LUT)
- Weißabgleich
- Offset
- Sättigung und Farbkorrektur

Hostbasierte Optimierung (also Software- und Treiber-basiert) benötigt wenig Bandbreite. Dafür leidet darunter die Genauigkeit, Latenzzeit und die CPU-Last. Insbesondere empfiehlt es sich, auf der

Kamera Gain, Offset und Weißabgleich durchzuführen und Raw-Daten an das Hostsystem zu übermitteln.

Farbverhalten

Um die unterschiedlichen Farbverhalten verdeutlichen zu können, wird eine Farbprüfkarte (z.B. von GretagMacbeth™) als Ausgangspunkt verwendet:

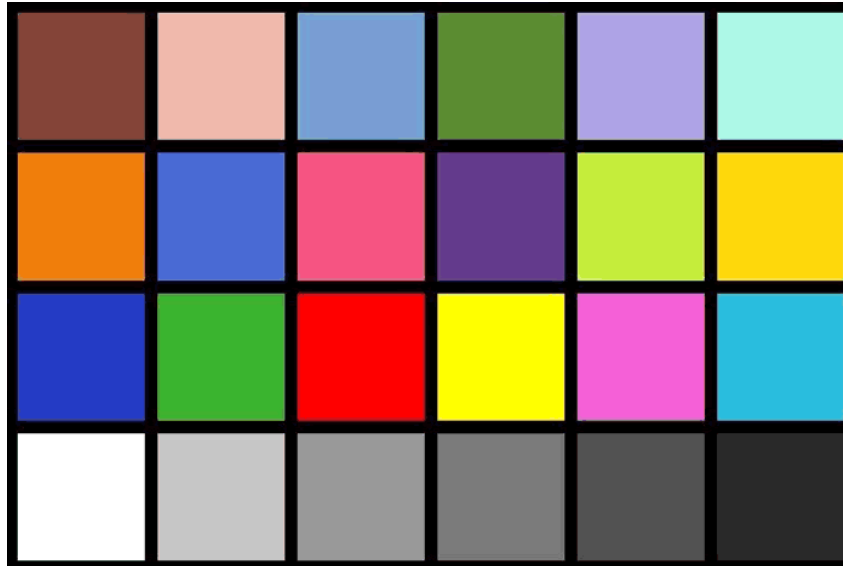


Abbildung 1: Farbkarte als Ausgangspunkt

Die Farbfelder sind wichtig, um die Farben anpassen zu können, während die Graufelder für den Weißabgleich, Offset, Gain und Gamma verwendet werden.

Bei einer Kamera ohne Farboptimierung kann ein Bild beispielsweise wie folgt aussehen:

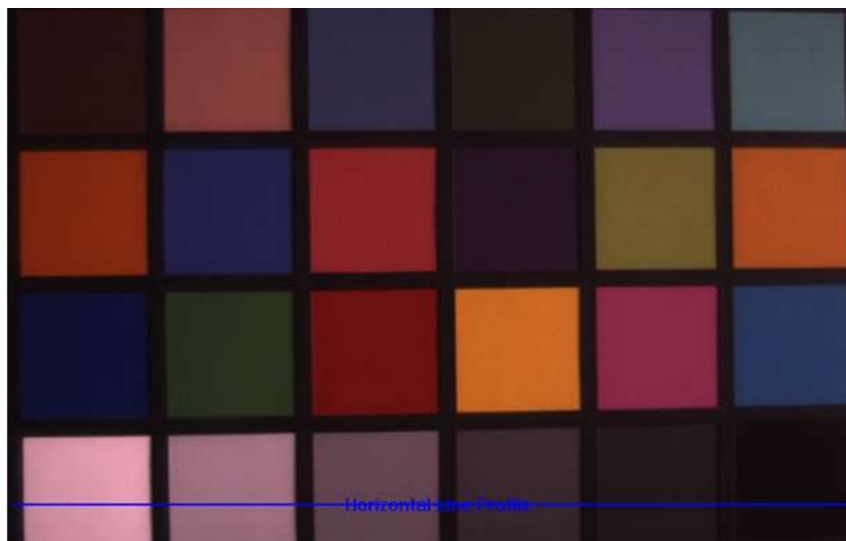


Abbildung 2: Einzelaufnahme ohne Farboptimierung



Abbildung 3: Das entsprechende Histogramm des horizontalen Weiß-zu-Schwarz-Profiles

Wie Sie sehen können,

- fehlt die Sättigung,
- entspricht Weiß mehr einem hellen Grau,
- entspricht Schwarz mehr einem dunklen Grau,
- etc.

Außerdem müssen Sie beachten, dass es zwei Typen von Bildern gibt: Das eine Bild wird in der Kamera generiert, das andere wird an einem Computer-Monitor ausgegeben. Aktuelle Monitore bieten unterschiedliche Anzeigemodi mit unterschiedlichen Farbräumen an (z.B. sRGB). Je nach gewähltem Farbraum werden die Farben dann unterschiedlich dargestellt.

Aus diesem Grund müssen auch die Farbdaten auch hinsichtlich der Anzeigegeräte verbessert werden:

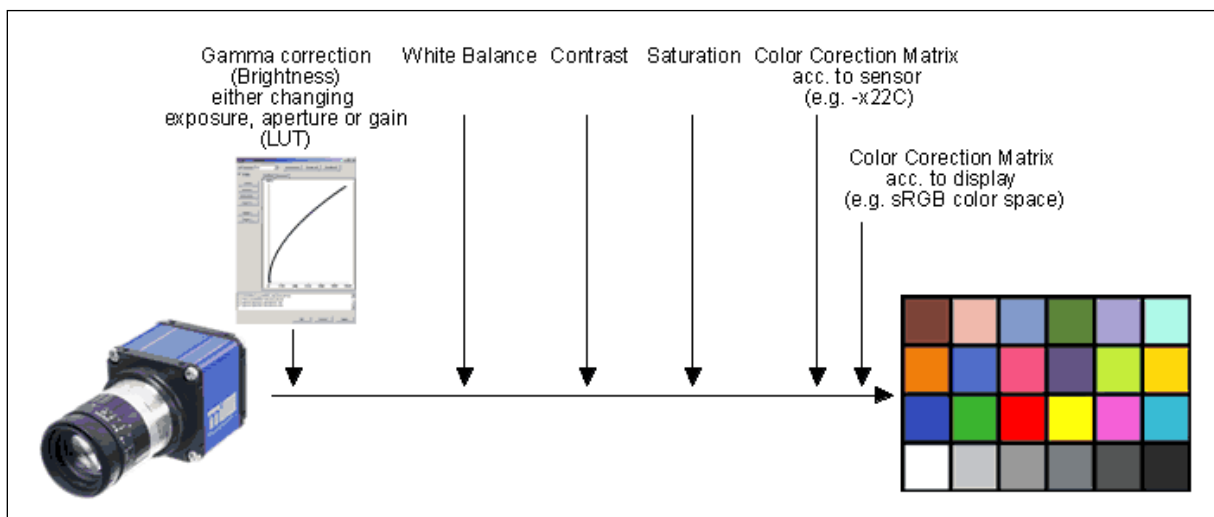


Abbildung 4: Die Arbeitsschritte zu einem Bild mit optimaler Farbtreue

Für ein Bild mit einer idealen Farbtreue sind folgende Schritte notwendig:

1. Gamma Korrektur (Leuchtkraft) ausführen,
2. Weißabgleich ausführen

3. Kontrast verbessern.
4. Sättigung verbessern.
5. "Farbkorrektur-Matrix " verwenden für,
 - a. den Sensor und / oder
 - b. den Monitor.

Die folgenden Kapitel beschreiben die einzelnen Schritte im Detail.

Schritt 1: Gamma korrigieren

Als Erstes kann eine **Gamma-Korrektur** durchgeführt werden, welche das Bild in die Richtung hin ändert, wie das menschliche Auge Licht und Farbe wahrnimmt. Das visuelle System des Menschen nimmt die Helligkeit als Logarithmus der aktuellen Lichtintensität wahr, welches entsprechend in ein Bild interpretiert wird. Beispielsweise wird das helle Licht einer hellen Lichtquelle, welche in etwa 6x heller ist als eine andere Quelle, vom Auge 2x heller wahrgenommen als eine dunklere Quelle¹. D.h. dieses Verhalten folgt der Potenzfunktion x^{Gamma} (Gamma zwischen 0,3 und 0,5). Im Gegensatz dazu arbeitet ein Anzeigegerät wie beispielsweise ein LCD-Monitor linear (Gamma = 1). Um diese Linearität einhalten zu können, muss ein Bild mit dem Reziprok (ca. 2,2) des Gamma-Wertes des menschlichen Auges ausgeglichen werden. Früher haben CRT-Monitore diesen Ausgleich automatisch gemacht:

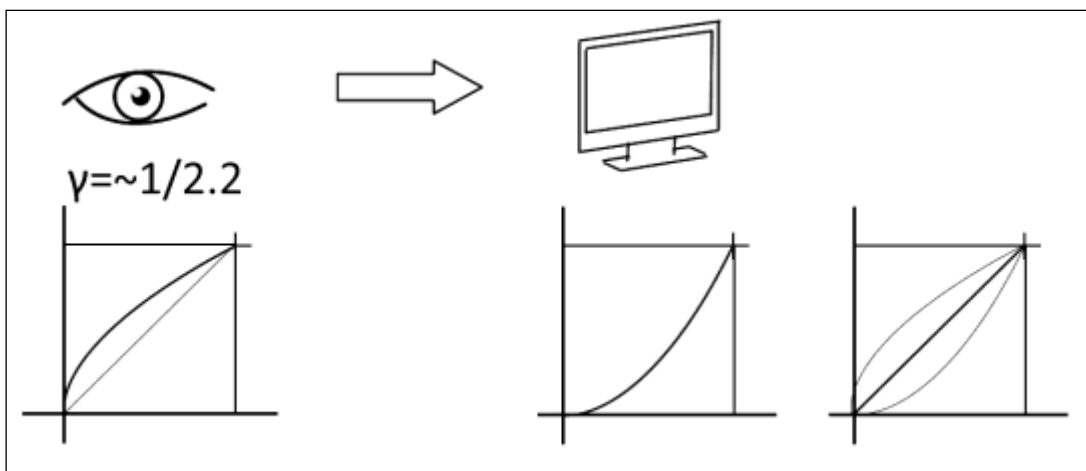


Abbildung 5: Gamma-Ausgleich eines Monitors

Heutzutage ist die Funktion im Monitor oder in der Grafikkarte eingebaut und das Farbprofil wird automatisch eingestellt (z.B. sRGB). Einige Programme prüfen jedoch nicht, ob Gamma-Korrekturen schon durchgeführt wurden. Aus diesen Grund ist es nicht einfach, festzustellen, welchen Wert Gamma in der Verarbeitungskette (Kamera->PC->Monitor) gerade hat.

Eine CCD- oder CMOS-Kamera arbeitet auch linear (Gamma = 1; außer sie läuft im HDR-Modus). Wie bereits erwähnt, gleicht ein Monitor das Bild mit einem Gamma-Wert von 2,2 aus. Um wieder eine

¹ http://charity.cs.uwlab.edu/artofimageprocessing/powerpoint/Chapter_02_HumanVisualSystem.pptx

lineare Ausgabe zu erhalten, muss eine Gamma-Korrektur mit dem Reziprok des Gamma-Werts des Monitors ($1/2.2$) durchgeführt werden:

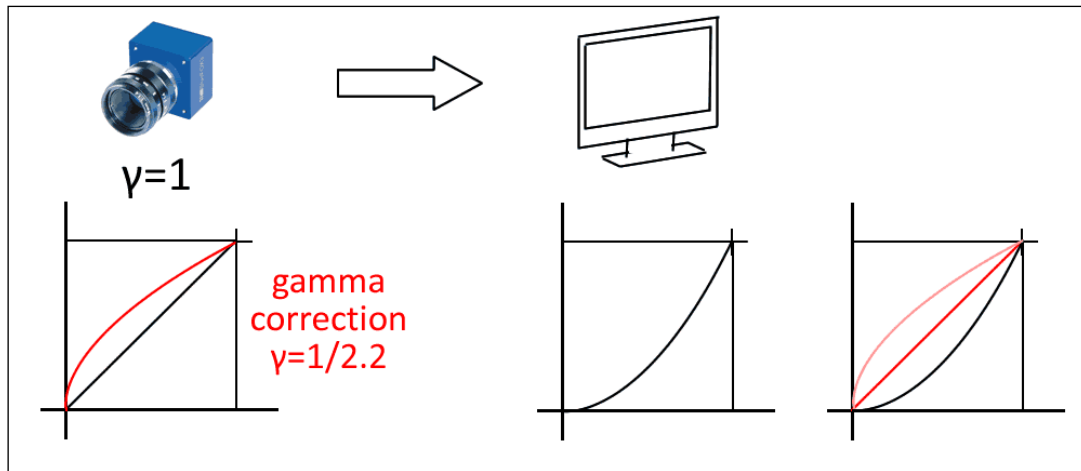


Abbildung 6: Gamma-Korrektur in der Kamera, um einen idealen Gamma-Wert (rot) zu erhalten

Natürlich zeigt eine lineare Kamera auf einem linearen Monitor auch ein korrektes Bild an.

Alternativ können zum Einstellen der Helligkeit auch folgende Dinge angepasst werden:

1. Belichtungszeit,
2. Blende oder
3. Gain.

Nach der Gamma-Korrektur sieht das Bild folgendermaßen aus:



Abbildung 7: Nach der Gamma-Korrektur



Abbildung 8: Das entsprechende Histogramm nach der Gamma-Korrektur

Schritt 2: Weißabgleich durchführen

Wie Sie im Histogramm erkennen können, sind die Farben Rot und Blau über Grün. Wenn Grün nun als Referenz verwendet wird, kann der Weißabgleich optimiert werden. D.h., es wird versucht, dass die neutralen Farben wie Grau und Weiß auch in der Reproduktion neutral erscheinen. Nach dem Weißabgleich wird das Bild wie folgt aussehen:

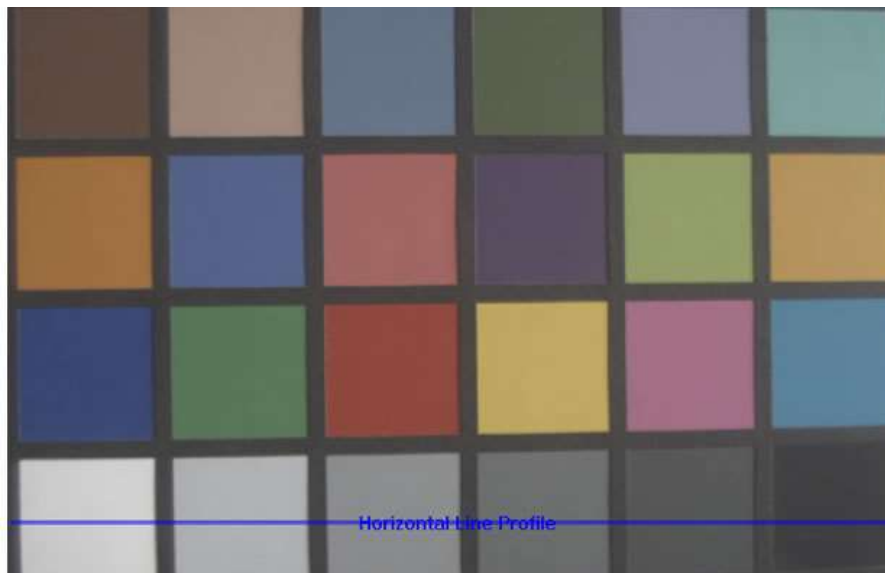


Abbildung 9: Nach dem Weißabgleich



Abbildung 10: Entsprechendes Histogramm nach dem Weißabgleich

Schritt 3: Kontrast verbessern

Nach dem Weißabgleich wirkt Schwarz mehr als dunkles Grau. Um dies zu korrigieren, muss der Schwarzwert angepasst werden. D.h. die dunkelste Stelle im Bild muss auf dem Bildschirm als reines Schwarz dargestellt werden. Nach dieser Korrektur sieht das Bild so aus:

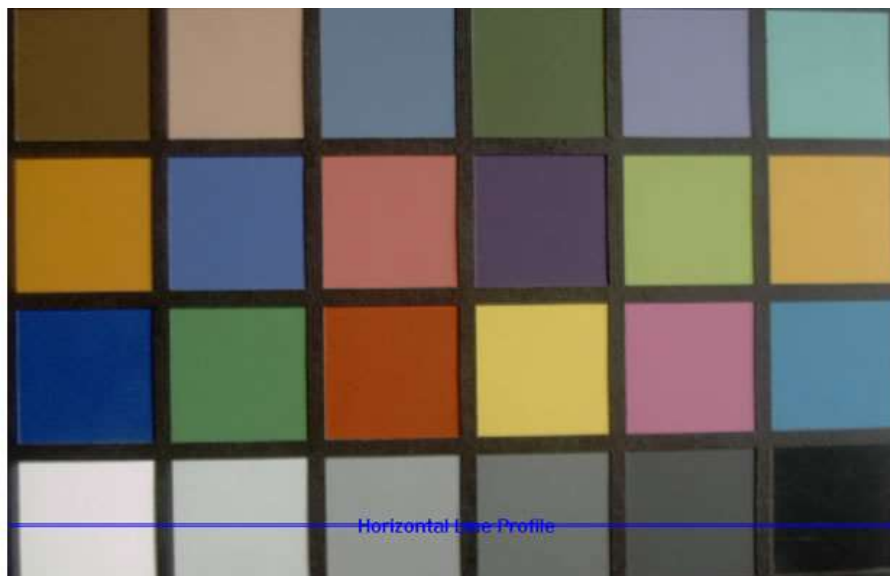


Abbildung 11: Nach der Kontrastverbesserung

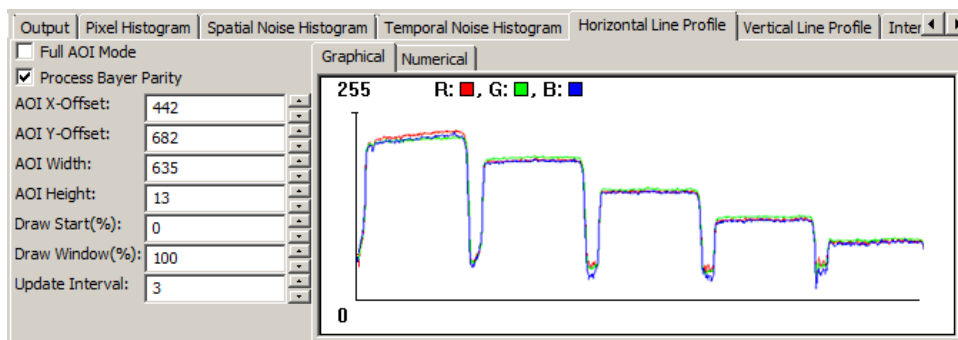


Abbildung 12: Das entsprechende Histogramm nach der Kontrastverbesserung

Schritt 4: Sättigung einstellen

Es fehlt noch die Sättigung. Mit gängigen Tools kann die Sättigung gesenkt oder erhöht werden. Durch das Erhöhen der Sättigung kann das Grau aus den Farben entfernt werden, was zu folgendem Bild führt:

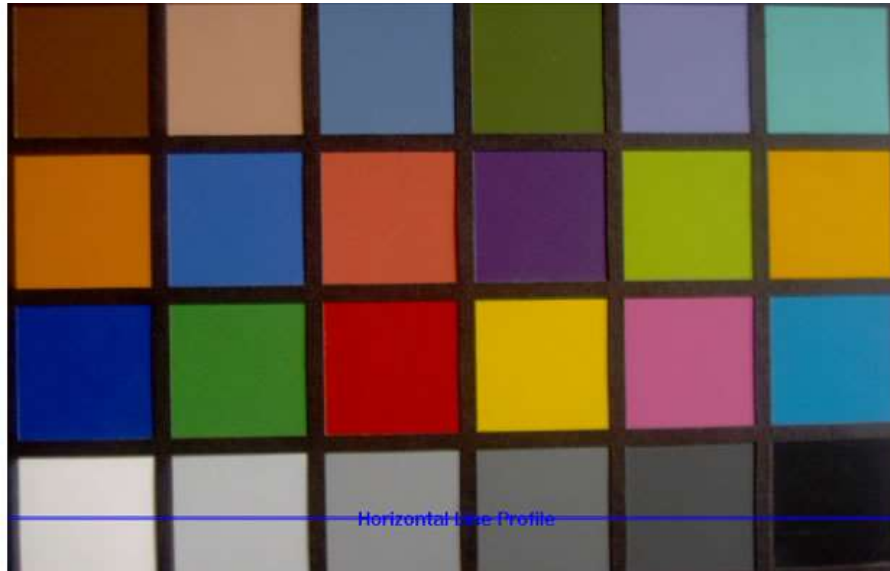


Abbildung 13: Nach Erhöhung der Sättigung



Abbildung 14: Das entsprechende Histogramm nach der Erhöhung der Sättigung

Das Ergebnis kommt der originalen Farbkarte sehr nahe. Dennoch sind weitere Optimierungen bezüglich Farbraum des Anzeigegeräts und der spektralen Empfindlichkeit des Sensor im Verhältnis zum menschlichen Augen möglich – es wird Zeit für die Farbkorrektur-Matrix.

Schritt 5: Farbkorrektur-Matrix (CCM) erstellen

Moderne Kameras stellen ein Tool zur Verfügung, mit welchem normalerweise drei separate 3 x 3 Farbkorrektur-Matrizen angepasst werden können:

- Eine Matrix mit sensorspezifischen Korrekturkoeffizienten (9 Koeffizienten und 3 Offset-Werte für eine RGB(in) → RGB(out) Transformation).
- Ein Parameter für die Farbsättigung, wirksam für alle drei Bildformate (RGB und YUV; siehe Schritt 4).
- Die Wahl des Farbraums des Anzeigegerätes

Aus allen drei Matrizen wird eine Korrektur-Matrix erstellt. Diese wird im linearen Teil des Signalpfades verwendet. MATRIX VISION beispielsweise vermisst sukzessive alle Sensoren aller Kamerafamilien und ermittelt deren spektralen Eigenschaften im Messlabor.

Das Ergebnis kann wie folgt aussehen:

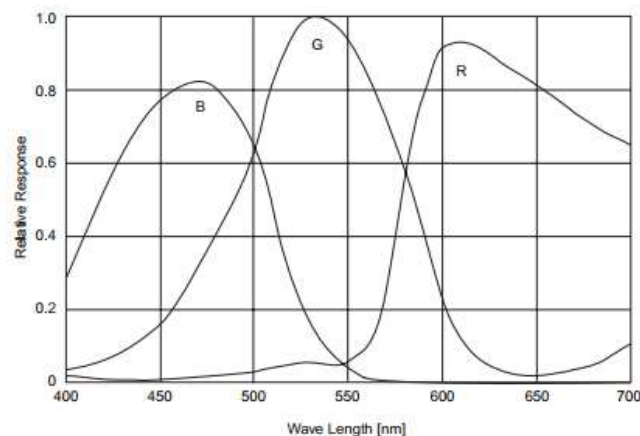


Abbildung 15: Spektrale Eigenschaft von Sonys ICX414AQ

Quelle: <http://www.sony.net/Products/SC-HP/datasheet/01/data/E02403C3Z.pdf>

Verglichen mit der spektralen Eigenschaft des menschlichen Auges, können Unterschiede im blauen und roten Bereich festgestellt werden:

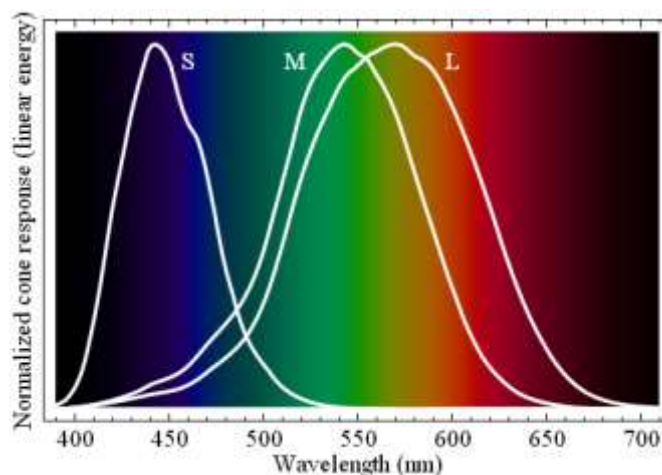


Abbildung 16: Spektrale Eigenschaft des menschlichen Auges

Source: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Cone-fundamentals-with-srgb-spectrum.svg>

Eine Farbkorrektur-Matrix wird verwendet, um die Farbspitzen zu verschieben. Diese Matrix wird auch White-point Preserving Least Square (WPPLS) genannt und sieht folgendermaßen aus:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.65724 & 0.26420 & 0.07857 \\ 0.23601 & 0.92376 & 0.15977 \\ 0.07757 & 0.31273 & 1.23516 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

Abbildung 17: WPPLS-Farbkorrektur des Sensors

In diesem Beispiel werden alle Farben mit den einzelnen Farbkomponenten (Rot, Grün, Blau) verstärkt. Vor allem wird jede Farbkomponenten mit ihrer eigenen Farbe verstärkt.

Die letzte Stelle, wo die Farbtreue noch verbessert werden kann, ist das Anzeigegerät. Jeder Monitor gibt die Farbe je nach Technik unterschiedlich wieder. LCD-Monitore beispielsweise bieten unterschiedliche Farbräume wie sRGB, Adobe RGB oder Wide Gamut RGB an. Die folgende Abbildung zeigt unterschiedliche Farbräume an. Die graue Fläche zeigt den Tonumfang des menschlichen Auges:

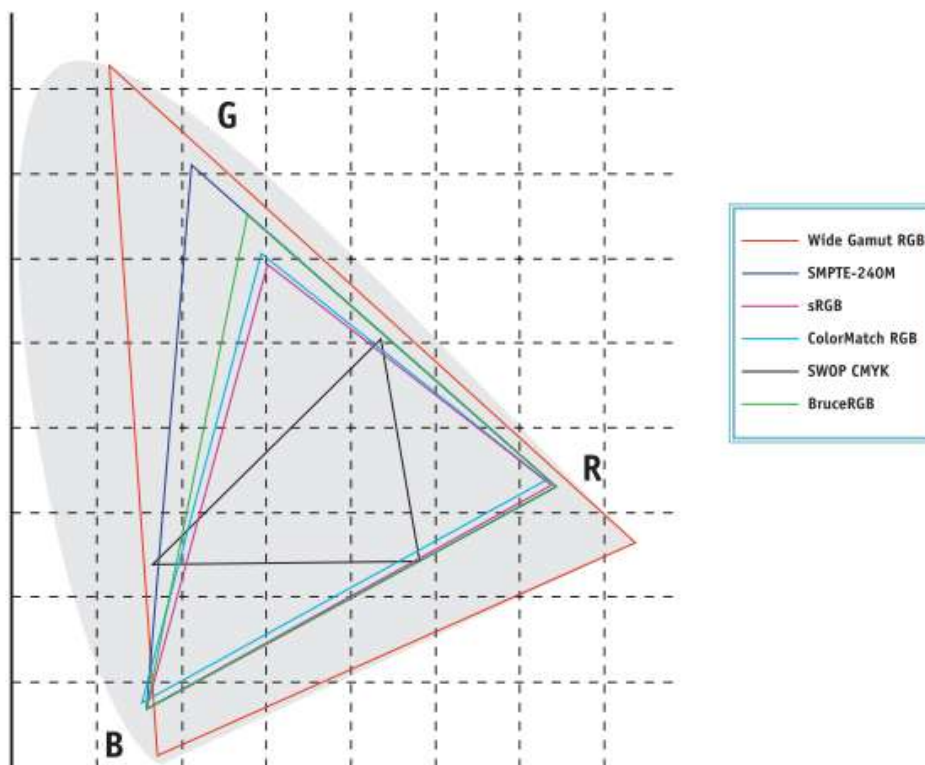


Abbildung 18: Farbräume
Quelle: Adobe Magazine Herbst 1998 Seite 51

Die Farben der Kamera-Matrix werden durch die Matrix des Anzeigegeräts passend umgewandelt. Danach sieht das Bild wie folgt aus:



Abbildung 19: Das finale Bild mit korrigierten Farben

Farbkorrektur bei modernen Kameras

Bei industriellen Kameras sollte der Stand der Dinge sein, dass sie hostbasierte Farbkorrekturen anbieten. Moderne Kameras wie die GigE Vision Kamera mvBlueCOUGAR-X oder die USB3 Vision Kamera von MATRIX VISION gehen einen Schritt weiter und bieten ein FPGA. Dieses FPGA kann Farbkorrekturen direkt auf der Kamera ausführen. Dies führt zu

- hohe Präzision bei der Berechnung (unabhängig von der Transfer-Bittiefe),
- geringe Latenzzeiten (alle Berechnungen werden on-the-fly im FPGA durchgeführt) und
- geringe CPU-Last im Hostsystem.

MATRIX VISION bietet das Tool wxPropView, mit welchem die Parameter der Farbkorrekturen bequem eingestellt werden können. Dieses Tool beinhaltet auch Wizards, mit denen das Ziel einer idealen Farbwiedergabe garantiert schneller erreicht werden kann. Wie Sie sehen können, wird die Farbwiedergabe der mvBlueCOUGAR-X Kameras um den Faktor 2 verbessert.

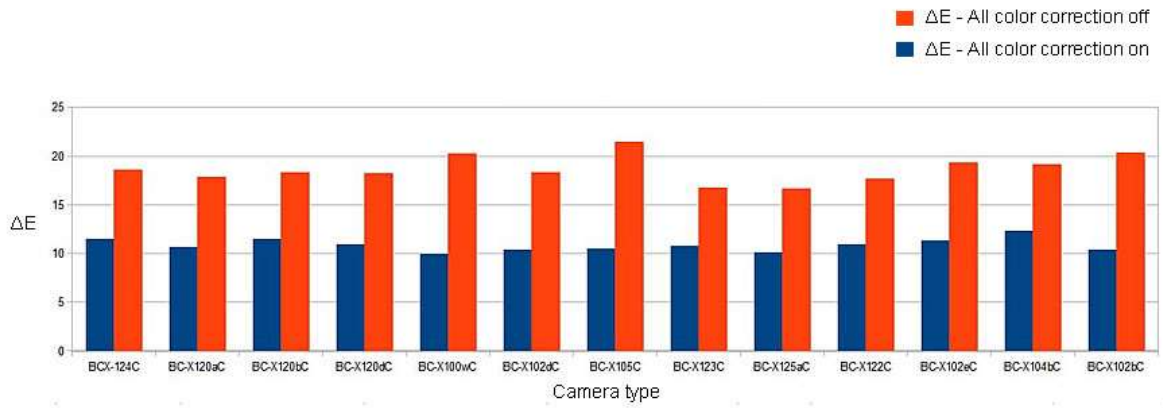


Abbildung 20: Quantitativer Vergleich der mvBlueCOUGAR-X Modelle

Autor: Horst A. Mattfeldt, Senior Consultant MATRIX VISION

<https://www.matrix-vision.com>