

Standardisierte farbtreue Wiedergabe von Bildern auf Monitoren und Druckern - Stand der Technik und Einsatzhinweise

Dietmar Kollhoff
Karl-Heinz Franke
Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e.V.
Ehrenbergstraße 11
D-98693 Ilmenau
e-Mail: dietmar.kollhoff@zbs-ilmenau.de
URL: <http://www.zbs-ilmenau.de>

Einleitung

Für den Verarbeiter von Farbbildern, die mit aufwendigen Verfahren farbmétrisch korrekt erfaßt werden, stellt auch die farbtreue Wiedergabe eine Herausforderung dar. Beispiele hierfür sind Luftbildaufnahmen und medizinische Anwendungen im Bereich der Hautanalyse. Aus dem Bereich des Farbdruckes und der Multimediatechnik sind in den letzten Jahren eine Reihe von Initiativen entwickelt worden mit dem Ziel, plattformübergreifende Verfahren des Farbmanagements zu standardisieren und in der Praxis einzuführen.

Unter Farbmanagement versteht man im allgemeinen den Prozeß der Sicherstellung der korrekten Farbwiedergabe von Bildern. Gestützt auf die Farbkalibrierung sorgt das Farbmanagement für die Anpassung der Farbräume. Dabei besteht die vollständige Kalibrierung aus zwei Stufen: einerseits erfolgt die Kalibrierung des Eingabegerätes, wie z.B. einer Kamera oder eines Scanners, und andererseits die Kalibrierung des Ausgabegerätes, d.h. eines Druckers oder eines Monitors. In vielen Fällen wird jedoch der Wiedergabeseite sowie der optimalen Farbanpassung zuwenig Aufmerksamkeit geschenkt. Die Zielstellung besteht darin, standardisierte Schnittstellen und Vorgehensweisen für die Erzeugung und den Austausch von Farbbilddaten zu schaffen und anzuwenden.

In dem Beitrag soll der Stand der Technik auf diesem Gebiet dargestellt und Schlußfolgerungen für die Gestaltung der Kamerakalibrierung und der Bildwiedergabe gezogen werden. Ein grundsätzliches Verständnis über Farbräume, Farbmischung und Farbtransformationen wird vorausgesetzt, näheres kann in [Lang95] nachgelesen werden.

Die Aufgaben des Farbmanagements

Das Bedürfnis nach einem standardisierten Farbmanagement entstand zuerst in der elektronischen Druckvorstufe, wo Bilddaten aus verschiedenen Eingabegeräten zusammengeführt, auf Displays dargestellt und schließlich auf verschiedenen Ausgabegeräten ausgegeben werden. Trotz der verschiedenen Farbraumumfänge der Ein- und Ausgabegeräte soll ein vorhersagbares und reproduzierbares Ergebnis beim Farbdruck erzielt werden. Weiterhin soll es möglich sein, die Farbwiedergabeeigenschaften eines Gerätes auf einem anderen Gerät mit einem ähnlichen bzw. größeren Farbraumumfang zu simulieren.

Das Konzept besteht darin, die farbmétrischen Eigenschaften aller Geräte in einem standardisierten Format zu beschreiben und Regeln für die Bestimmung der erforderlichen Umrechnung der Bilddaten aus einem Eingangsfarbraum in einen Ausgangsfarbraum auf der Grundlage dieser Beschreibungen aufzustellen. Die Verwaltung dieser Beschreibungen und die korrekte Transformation der Bilddaten bezeichnet man als Farbmanagement. Das transparent im Hintergrund arbeitende Farbmanagementsystem soll den Anwender von Routineaufgaben der Farbanpassung entlasten, damit er sich auf kreative Bildmanipulationen konzentrieren kann. Durch das Farbmanagement wird nicht verhindert, daß Fehler bei der Wiedergabe von Farben in einem anderen Farbraum und insbesondere bei einem kleineren Farbraumumfang auftreten, sondern es wird sichergestellt, daß diese

Fehler definiert verteilt sind und (je nach gewähltem Rendering Intent) den Bildeindruck nicht stören. Positiv ist, daß normierte Farbbilddaten frei ausgetauscht werden können.

Wichtige Funktionen der Farbmanagementsysteme

In einem Farbbilderfassungs- und Reproduktionssystem übernimmt das Farbmanagementsystem neben der Verwaltung von Farbprofilen, die den einzelnen Geräten zugeordnet sind, zwei hauptsächliche Aufgaben:

- Anpassung des Farbraumumfanges (Gamut Mapping), d.h. die Umsetzung der mit einem Eingabegerät erhaltenen Farben in den Umfang des Ausgabegerätes unter Beachtung der gewünschten Abstimmung (Rendering Intent).
- Farbraumtransformation, d.h. die Umwandlung der Farbdaten von einem Farbraum in einen anderen Farbraum.

In vielen Fällen ist der Farbumfang von Ausgabegeräten, speziell von Drucktechnik, kleiner als der Farbumfang von Eingabegeräten. Die dann erforderliche Umfangskompression kann sich auf den gesamten Farbraum bzw. nur auf Teile davon auswirken. Wenn der Farbumfang des Ausgabegerätes größer als der des Eingabegerätes ist, dann kann man zwischen der Beibehaltung der Farbwerte und der Erweiterung des Farbumfanges wählen.

Die Art und Weise, wie das Gamut Mapping erfolgt, kann in Abhängigkeit von der beabsichtigten Wirkung verschieden gestaltet werden. Hierzu sind vier Wiedergabeoptionen, die sogenannten „Rendering Intents“, festgelegt worden. Dies sind:

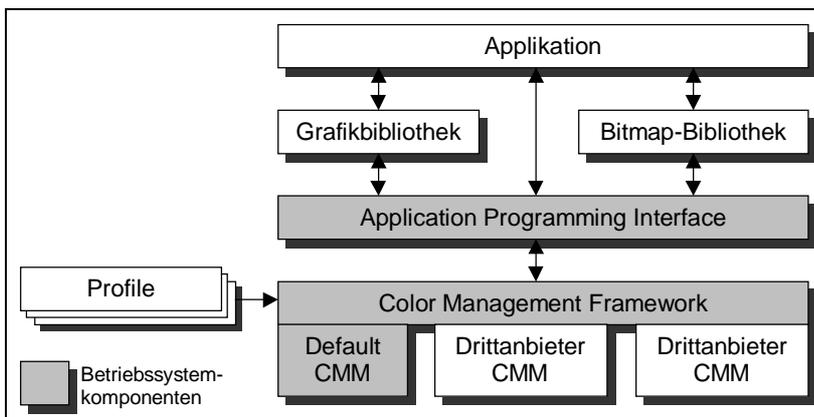
- Perceptual Intent: Alle Farben werden beim Gamut Mapping expandiert bzw. komprimiert, um die Verhältnisse zwischen den Farben zu erhalten. Ziel ist also die Optimierung der Gradation. Allerdings gibt es kein allgemein akzeptiertes Verfahren, so daß verschiedene algorithmische Lösungen vorliegen.
- Relative Colorimetric Intent: Die Ausgabefarben sind mit den Eingabefarben identisch, wenn sie innerhalb des Ausgabefarbumfanges liegen. Wenn der Farbumfang des Ausgabegerätes kleiner als der des Eingabegerätes ist, werden die nicht darstellbaren Farben durch die nächste darstellbare Farbe ersetzt. Der Weißpunkt des Eingabegerätes wird auf den des Ausgabegerätes verschoben, damit werden alle Farben relativ zum Weißpunkt verschoben. Diese Option wird zum Proof von Ausdrucken verwendet.
- Absolute Colorimetric Intent: Ähnlich dem Relative Colorimetric Intent bleiben die Farben erhalten, nicht darstellbare Farben werden durch die nächste darstellbare Farbe ersetzt. Der Weißpunkt des Eingabegerätes bleibt erhalten. Dies ist eine farbmetrisch exakte Transformation, die dann angewandt wird, wenn die Farbumfänge von Ein- und Ausgabe annähernd gleich sind.
- Saturation Intent: Die Sättigung der Farben wird beibehalten, u.U. auch auf Kosten der Genauigkeit von Buntton und Helligkeit. Besonders bei Farbgrafiken mit vorwiegend gesättigten Farben soll diese Option Vorteile bringen.

Bekannte Algorithmen für Farbraumtransformationen, die hier nur kurz genannt werden sollen, sind die lineare Matrizierung, die Matrizierung höherer Ordnung, Interpolationsmodelle auf der Basis von Look-up-Tabellen und nichtlineare Farbmischgleichungen. Für Farbkameras und Farbmonitore ist in der Regel eine lineare Matrizierung ausreichend. Für die Umwandlung von XYZ nach CMYK müssen Farbmischgleichungen z.B. nach Neugebauer eingesetzt werden, die aufgrund der zeitaufwendigen Berechnung häufig als Transformationstabellen realisiert werden.

Farbproduktion mit Farbmanagementsystemen

Die Farbmanagementsysteme (CMS) als Mittler zwischen Ein- und Ausgabegeräten bestehen aus mehreren Komponenten (Abb. 1):

- den Farbprofilen als standardisierte Beschreibung der Farbeigenschaften (insbesondere des Farbumfanges und der Gradation) eines Gerätes in Bezug zu einem geräteunabhängigen Standard-Farbraum (spezifiziert durch das ICC)
- den Color Management Modulen (CMM) als Komponenten, die aus den Profilen unter Berücksichtigung der Rendering Intents die Farbtransformationen berechnen und diese durchführen
- dem Color Management Framework als Verwaltungsplattform für Farbprofile, CMMs und Rendering Intents sowie als Application Programming Interface (API) für Bildbearbeitungsanwendungen.

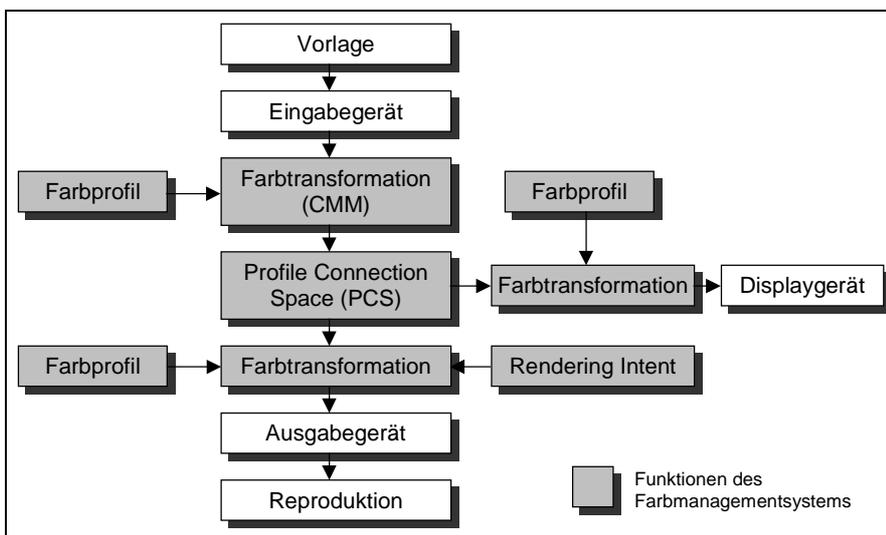


Für eine einheitliche Nutzung des Farbmanagements ist es unerlässlich, daß Kernelemente des Systems in das Betriebssystem integriert werden.

Inzwischen gibt es mit dem Apple ColorSync 2.6 für Macintosh und dem ICM 2.0 für Windows 98 / Windows 2000 eine gut funktionierende Anwendungsunterstützung.

Abb. 1: Komponenten des Farbmanagementsystems

Der Reproduktionsprozeß mit Unterstützung des Farbmanagementsystems wird in Abb. 2 gezeigt. Durch die Color Matching Module können die aufeinanderfolgenden Transformationen auch zwecks Beschleunigung zu einer Transformation zusammengefaßt werden.



Als Bindeglied zwischen den Eingabe- und Ausgabefarbräumen dienen geräteunabhängige CIE-Standard-Farbräume (Profile Connection Space, PCS). Hierfür sind der XYZ- und der L*a*b*-Farbraum mit dem Weißpunkt von D50/2° festgelegt worden. Im Gegensatz zur Fernsehtechnik, wo D65 als Standard-Weiß genutzt wird, verwendet die Druckindustrie D50 als Normalweiß.

Abb. 2: Prozeß der Farbproduktion

Die Nutzung des Farbmanagements erfolgt in den Schritten Initialisierung, Zuordnung von Profilen zu Eingabegeräten bzw. zu Bildern aus fremden Quellen, Festlegung des Rendering Intents und Durchführung der Transformation. Eine interessante Funktion des CMS ist die Simulation der Farbwiedergabeeigenschaften eines Gerätes auf einem anderen Gerät, vorzugsweise der Simulation von Druckergebnissen auf dem Monitor oder einem Prüfdrucker, d.h. dem Proof. Dies geschieht mittels sogenannten „Device Link Profiles“.

Erstellung von Farbprofilen

Die wichtigste Rolle in Farbmanagementsystemen spielen die Farbprofile, die die Farbeigenschaften des entsprechenden Gerätes genau wiedergeben müssen. Farbprofile gelten allerdings nur im kalibrierten Zustand eines Gerätes; sie ersetzen also nicht die Kalibrierung, sondern können sie höchstens vereinfachen. Die Erstellung der Farbprofile erfordert eine hohe Sorgfalt und setzt Farbmeßgeräte sowie spezialisierte Software voraus.

Üblicherweise werden Farbprofile anhand von mehrfarbigen Vorlagen, die das gesamte Farbspektrum überdecken und deren farbmetrische Parameter bekannt sind, bestimmt. Für Eingabegeräte verwendet man Vorlagen nach ANSI IT8.7 mit 252 Feldern, die eingescannt werden. Aus der Relation zwischen den rechnerisch bestimmten und vorgegebenen (d.h. vom Hersteller der Vorlage mitgeteilten bzw. mit Farbmeßgerät gemessenen) Farbwerten kann das Profil abgeleitet werden. Bei Ausgabegeräten wird eine rechnerisch definierte Vorlage ausgegeben, die anschließend Feld für Feld farbmetrisch vermessen wird. Das Profil wird ebenfalls aus den festgestellten Differenzen bestimmt. Wegen der nichtlinearen Wiedergabecharakteristik von Druckern besteht die Vorlage nach BVD/FOGRA aus 938 Feldern. Recht einfach gestaltet sich die Kalibrierung von Monitoren, da hier im Minimalfall lediglich 3 Farbvalenzen für eine lineare Matrizierung ermittelt werden müssen. Besser ist jedoch eine Ausgleichsrechnung über eine größere Anzahl von Farbvalenzen.

Zur Charakterisierung von Bilddaten, die aus (in farbmetrischer Hinsicht) unbekanntem Quellen stammen und in das Grafiksystem integriert werden sollen, muß das Farbmanagementsystem Default-Profile bereitstellen, die den zu erwartenden Eigenschaften möglichst nahe kommen. Weitere Vorteile der Integration von Default-Profilen ergeben sich daraus, daß die Transformationen in den PCS bzw. aus dem PCS optimal gestaltet werden können und bei der Verwendung von Default-Profilen auf der Eingabe- und Ausgabeseite auf vorgefertigte Transformationen zurückgegriffen werden kann.

Der sRGB-Farbraum

Für das Farbmanagement unter MS-Windows und darüber hinaus wurde der Standard-RGB- oder sRGB-Farbraum als Default-Farbraum entwickelt [Nielsen98]. Ein Eingabe- bzw. Ausgabegerät, das konform zu diesem Farbraum ist, benötigt demzufolge kein eigenes Farbprofil. Der Vorteil des Bezugs auf einen standardisierten RGB-Farbraum besteht darin, daß man unabhängig von sich ändernden Spezifikationen des Farbmanagements ist. Der sRGB-Farbraum ist durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

- Primärfarbvalenzen nach ITU-R BT.709 (RGB-Farbraum für HDTV-Produktion und Programmaustausch),

	Rot	Grün	Blau	Weißpunkt (D65)
X	0,6400	0,3000	0,1500	0,3127
Y	0,3300	0,6000	0,0600	0,3291
Z	0,0300	0,1000	0,7900	0,3583

- Displayhelligkeit = 80 cd/m²
- Offset der Displaykennlinie (R, G und B) = 0,055
- Gamma der Displaykennlinie (R, G und B) = 2,4

Die Displaykennlinie wird entsprechend dem CIE 122 Standard zur Displaykennzeichnung durch folgende Gleichung beschrieben:

$$V_{sRGB} = \left[\frac{(V'_{sRGB} + 0,055)}{1,055} \right]^{2,4}$$

Zur sRGB-Farbraumdefinition gehört weiterhin die Vorschrift zur Transformation dieser RGB-Werte in den XYZ-Farbraum sowie ein entsprechendes ICC-Farbprofil.

Die Gamma-Charakteristik von Monitoren

Der Begriff des Monitorgammas geht bis in das Jahr 1890 zurück und bezieht sich auf das Verhältnis von Elektronenfluß zu Steuerspannung in Elektronenröhren. Die Stärke des fließenden Stromes I_k hängt über eine Potenzfunktion von der Steuerspannung U_d ab. Der Exponent dieser Potenzfunktion wird als Gamma bezeichnet:

$$I_k \approx U_d^{5/2}, \gamma = 5/2 = 2,5 \quad 0 \leq U_d \leq 1$$

Bei Bildröhren weist die Sättigungscharakteristik der Phosphorleuchtdichte bezüglich der Stromstärke ebenfalls eine Potenzfunktion mit einem Exponenten von 0,9 auf. Insgesamt ergibt sich für Bildröhren ein Gamma von etwa 2,2. Mehr Details finden sich in [Kato97].

Der Zusammenhang zwischen Bildschirmhelligkeit Y und Eingangsspannung X kann aufgrund von Offsets allgemein so geschrieben werden:

$$Y = (aX + b)^\gamma + c$$

In der sRGB-Spezifikation ist $a = 1/1,055$, $b = 0,055/1,055$, $c = 0$ und $\gamma = 2,4$. Wenn man diese Funktion durch die vereinfachte Funktion $Y = X^\gamma$ approximiert, ergibt sich ein γ von 2,2 in Übereinstimmung mit den obigen Ausführungen.

Die Konsequenz dieser Gammakennlinie ist, daß die Wiedergabe von Grauwerten nichtlinear ist und insbesondere mittlere Grauwerte zu dunkel wiedergegeben werden. Zum Beispiel folgt für einen Eingangswert von $X = 0,5$ und $\gamma = 2,5$ ein Y von 0,177. Die Nichtlinearität führt ebenfalls zur Verfälschung der Farbdarstellung.

Um die Bilddaten farbrichtig darzustellen, ist eine Kompensation der Gammakennlinie, d.h. eine Gammakorrektur, erforderlich. Lineare RGB-Werte, wie sie von einer Bilderfassungseinheit erzeugt werden, müssen entsprechend einer Potenzfunktion mit dem Exponent $1/\gamma \approx 0,45$ vorverzerrt werden. Diese Vorverzerrung wird in Abhängigkeit von der Systemplattform zu unterschiedlichen Anteilen auf die Applikation und das Betriebssystem aufgeteilt, so daß man aus Sicht der Applikation ein unterschiedliches Systemgamma vorfindet. Unter MS-Windows erfolgt keine Gammakorrektur, dies ist Sache der Applikation.

Demonstration der Notwendigkeit von Farbmanagementsystemen

Um die Notwendigkeit des Einsatzes von Farbmanagementsystemen zu zeigen, wurden experimentelle Untersuchungen mit dem Ziel durchgeführt, die Qualität der Farbwiedergabe auf einem System ohne Farbmanagement einzuschätzen. Dazu wurde eine Photovorlage Kodak Q-60R1 nach IT8.7/2 mit einem farbkalibrierten Scanner eingescannt und ohne weitere Bearbeitung mittels „Paint Shop Pro“ auf einem modernen Tintenstrahldrucker ausgedruckt. Mit einem Spektralphotometer wurden alle Felder des Ausdrucks vermessen und den vom Hersteller angegebenen Werten der Kalibriervorlage gegenübergestellt.

Die Ergebnisse zeigen, daß der Farbumfang des Tintenstrahldruckers zu klein ist, um alle Farben der Vorlage korrekt wiedergeben zu können. Insbesondere wurden Cyan-, Grün- und Orangetöne falsch wiedergegeben. Der mittlere Fehler ΔE_{Lab} beträgt 11,4, der minimale Fehler 2,05 und der maximale Fehler 39,3. Einen Überblick über die Farbverschiebungen geben die Abb. 3 und 4. Es ist zu erwarten, daß durch ein durchgängiges Farbmanagement diese Fehler reduziert werden können, obwohl die prinzipbedingten Einschränkungen von Druckern bestehen bleiben.

Zusammenfassung

Farbmanagementsysteme gewährleisten eine optimale Qualität der Farbwiedergabe auf unterschiedlichen Ausgabegeräten durch die standardisierte Beschreibung der Farbeigenschaften. Dabei ist die Minimierung des farbmetrischen Fehlers nicht der einzige Aspekt der Farbraumanpassung, sondern ebenfalls die Gewährleistung der Unterscheidbarkeit von Farben, d.h. die Optimierung der Fehlerverteilung. Als einfach handhabbarer Zugang zu Farbmanagementsystemen, insbesondere zur einfachen Charakterisierung von Eingabegeräten wie z.B. Kameras bietet sich der sRGB-Farbraum an, da eine Kalibrierung nur auf der Basis dieses Raumes erfolgen muß. In weiteren Studien werden die Eigenschaften von Farbmanagementsystemen detaillierter untersucht.

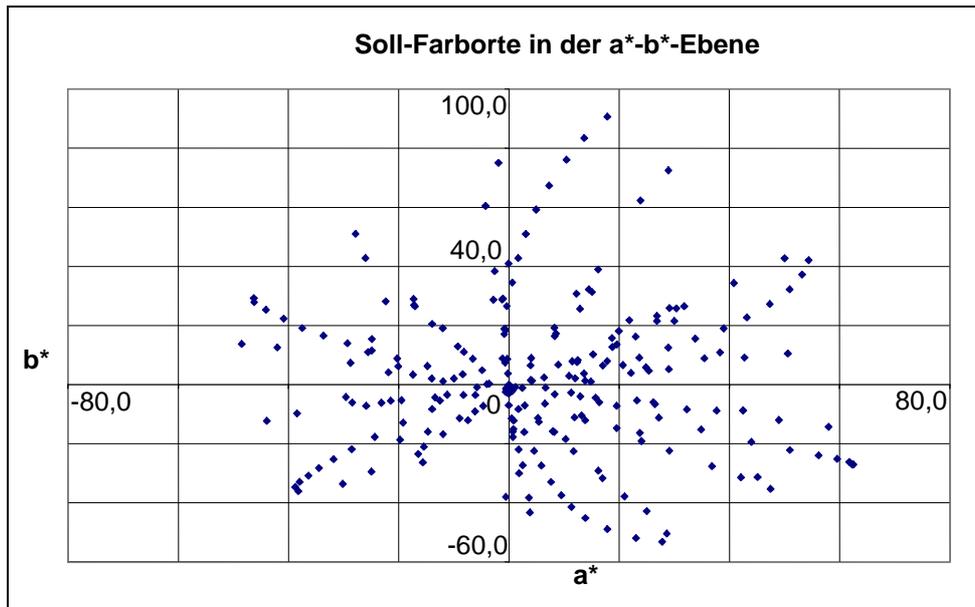


Abb. 3: Farborde der Patches der fotografischen Referenzvorlage (nach Kodak)

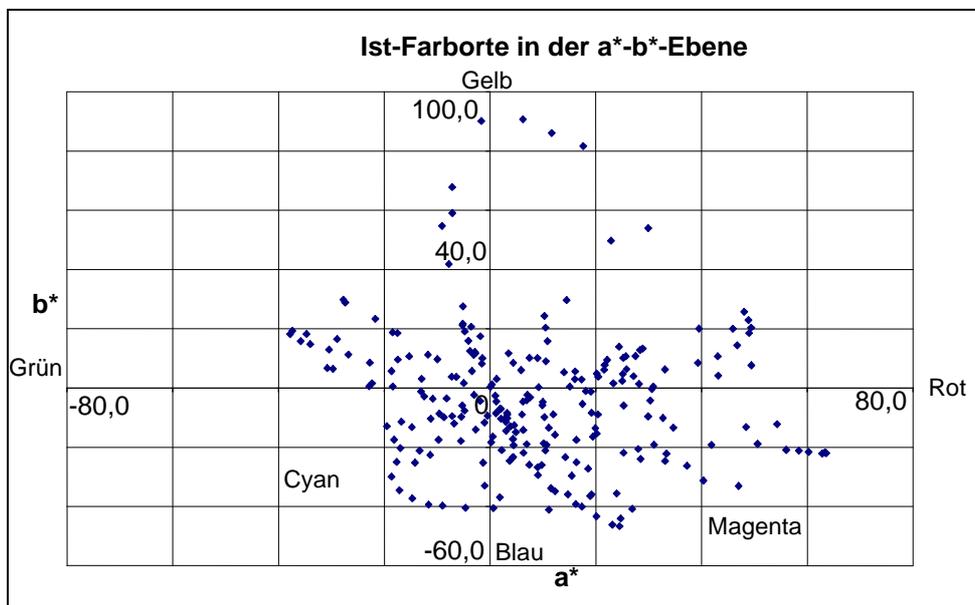


Abb. 4: Gemessene Farborde der Patches auf dem Tintenstrahldruck

Literatur

Giorgianni, Edward J.; Madden, Thomas E.: Digital Color Management: Encoding Solutions. Reading: Addison-Wesley, 1998, ISBN 0-201-63426-0

International Color Consortium: Specification ICC.1:1998-09 File Format for Color Profiles

- Katoh, Naoya; Deguchi, Tatsuya: Reconsideration of CRT Monitor Characteristics. Fifth Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications. IS&T, 1997, S. 33-40
- Lang, Heinwig: Farbwiedergabe in den Medien: Fernsehen, Film, Druck. Göttingen: Muster-Schmidt, 1995, ISBN 3-7881-4052-6
- Nielsen, Mary; Stokes, Michael: The Creation of the sRGB ICC Profile. Sixth Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications, 1998, S. 253-257