

Targetbezogene True-Color-Kalibrierung

Karl-Heinz Franke, Torsten Pomierski, Technische Universität Ilmenau
Ralf Reulke, DLR Berlin, Institut für Weltraumsensorik
e-Mail: Karl-Heinz.Franke@prakinf.tu-ilmenau.de
URL: <http://www.zbs-ilmenau.de>

1. Einleitung

Für die Erzeugung von True-Color-Bildern ist die Realisierung der Spektralwertkurven für eine vereinbarte farbvalenzmetrische Schnittstelle erforderlich. Bei Standardfarbkameras wird diese durch die Kamerahersteller mit mehr oder minder großen Toleranzen realisiert. Für hohe farbmetrische Ansprüche lassen sich Algorithmen zur Nachkalibrierung anwenden, die in der Regel ein Set von Testfarben verwenden und ein Farbabstandsmaß in RGB oder besser in einem empfindungsmäßig gleichabstimmigem Farbraum minimieren.

Anders als in Standardfarbkameras werden in Bildsensoren für die Fernerkundung relativ schmalbandige Spektralkanäle eingesetzt, deren Bandmitten und Halbwertsbreiten eher durch die Fernerkundung (Pflanzenstreß, geologische Daten, Wasserqualität) als durch die menschliche Farbwahrnehmung bestimmt sind. Dazu kommen weitere Aufgaben, wie etwa die 3D-Vermessung von Geländedaten. Dennoch gibt es einen nicht unbeträchtlichen Kundenkreis, der zugleich True-Color-Bilder wünscht.

Am Beispiel einer flugzeuggetragenen Farbzeilen-Stereo-Kamera wird das Problem der Farbkalibrierung derartiger Fernerkundungstechnik diskutiert. Die Kamera verfügt in einer Fokalebene über drei panchromatische Kanäle für die Gewinnung von Stereodaten (Forward-, Nadir- und Backwardzeile) und über drei weitere Spektralkanäle für die Fernerkundung, die im visuellen Bereich liegen. Die Filterrestriktionen aus der Fernerkundung lassen die "exakte" Realisierung der Spektralwertkurven nicht zu.

2. Grundlagen

Farbvalenzen $\underline{F} = \{ R, G, B \}^T$ beschreiben die Farbwahrnehmung des menschlichen visuellen Systems bezüglich eines Farbsynthesystems und sind letzten Endes über die Vergleichsmethode definiert. Die RGB-CIE-Valenzen gehen als chronologisch erste farbmetrische Schnittstelle von drei schmalbandigen Reizen (10 nm) bei 700nm (R), 546nm (B) und 436nm (B) aus. Da technische Systeme der Farbsynthese z.B. bei Farbfernsehgeräten und Monitoren von den spektralen Reizen der Leuchtphosphore ausgehen müssen, sind modifizierte farbmetrische Schnittstellen relevant. Für den Europäischen Raum ist dies die EBU-Norm (EBU: European Broadcasting Union) mit Bezug auf die sogenannten EBU-Phosphore.

Für jeden Farbreiz $\varphi(\lambda)$ muß durch Wichtung der normierten spektralen Dichten der EBU-Leuchtphosphore $p_R(\lambda)$, $p_G(\lambda)$, $p_B(\lambda)$ mit R, G, B ein Synthesereiz erzeugt werden, der über die Zäpfchen-Empfindlichkeit

$$\underline{z} = \{ z_1, z_2, z_3 \}^T = \{ \bar{p}, \bar{d}, \bar{t} \}^T \quad (1)$$

zum identischen Farbeindruck \underline{F} wie im Falle des Reizes $\varphi(\lambda)$ führt.

$$\int_{380nm}^{780nm} d\lambda z_i(\lambda) \varphi(\lambda) = \int_{380nm}^{780nm} d\lambda z_i(\lambda) [R p_R(\lambda) + G p_G(\lambda) + B p_B(\lambda)] \quad (2)$$

Eine True-Color-Kamera liefert diese Gewichte R, G, B.

$$\underline{E} = \{R, G, B\}^T = k \int_{\lambda} d\lambda \varphi(\lambda) \underline{s}(\lambda) \quad (3)$$

$$\underline{s} = \{s_1, s_2, s_3\}^T \rightarrow \text{Gesamtempfindlichkeiten der drei Kamerakanäle}$$

Einsetzen von (3) in (2) und Betrachtung schmalbandiger Reize $\varphi(\lambda) = \delta(\lambda - \lambda_0)$ führt mit

$$k \int_{\lambda} d\lambda \delta(\lambda - \lambda_0) \underline{s}(\lambda) = k \underline{s}(\lambda_0) \quad (4)$$

$$\int_{380nm}^{780nm} d\lambda z_i(\lambda) \delta(\lambda - \lambda_0) = z_i(\lambda_0)$$

auf das lineare Gleichungssystem zur Bestimmung der erforderlichen Empfindlichkeiten der drei Sensorkanäle \underline{s} an der Stelle λ_0 .

$$\underline{z}(\lambda_0) = \left[\int_{380nm}^{780nm} d\lambda \underline{z}(\lambda) \underline{p}^T(\lambda) \right] \cdot k \underline{s}(\lambda_0) \quad (5)$$

Die Variation von λ_0 ($\lambda_0 \in [380nm, 780nm]$) führt auf die Spektralwertkurven der EBU Leuchtphosphore,

$$\underline{z}(\lambda) = \{s_1(\lambda), s_2(\lambda), s_3(\lambda)\}^T = \{\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)\}^T \quad (6)$$

die für True-Color-Kameras einschließlich ihrer negativen Anteile (!) als Gesamtsensorempfindlichkeiten zu realisieren sind. Mit der i.a. einheitlichen Empfindlichkeit $s(\lambda)$ des Sensormaterials und den Luther-Bedingungen

$$\underline{s}(\lambda) = \underline{s}^*(\lambda) \cdot s(\lambda) \quad (7)$$

lassen sich die erforderlichen Filterkurven $\underline{s}^*(\lambda)$ mit ebenfalls negativen Anteilen separieren. Diese technisch nicht realisierbaren Transmissionsfunktionen werden in Farbkameras über lineare Transformationen aus realisierbaren Filterkurven approximiert.

$$\underline{s}^*(\lambda) \approx \underline{T} \underline{s}_c^*(\lambda) \quad (8)$$

Voraussetzungen sind dabei drei breitbandige Filterkurven $\underline{s}_c^*(\lambda)$ mit unterschiedlichen Bandmitten und hinreichendem Überlappungsbereich, die das gesamte visuelle Spektrum abdecken.

3. Targetbezogene Farbkalibrierung

Bei der Fernerkundung sind die eingesetzten Spektralkanäle in ihren Bandmitten und Halbwertsbreiten durch Fernerkundungsaufgaben (Pflanzenstreß, unterschiedliche Wälder, Wiesen, Feldfrüchte und deren Reifegrad, Böden, Wasserqualitäten u.ä.) bestimmt und nur in engen Grenzen variierbar. Dies steht im Widerspruch zur Erzeugung von True-Color-Bildern. Um dennoch die Kundenwünsche nach True-Color erfüllen zu können, stellt sich die Frage der Approximation unter den Randbedingungen der Fernerkundung. Den dort gestellten Anforderungen entsprechend wird das Problem mit Bezug auf die Gesamtsensorempfindlichkeiten diskutiert. Zur Verfügung stehen drei Spektralkanäle im lang-, mittel- und kurzwelligem Bereich des visuellen Spektrums

$$\underline{s}_s(\lambda) = \{ s_l(\lambda), s_m(\lambda), s_k(\lambda) \}^T \quad (9)$$

und ein panchromatischer Kanal $s_p(\lambda)$, der nahezu das gesamte visuelle Spektrum überdeckt.

$$\underline{s}_{ADC}(\lambda) = \{ s_l(\lambda), s_m(\lambda), s_k(\lambda), s_p(\lambda) \}^T \quad (10)$$

3.1 Spektrale MSE - Approximation

Unter Berücksichtigung des bereits in (2) vorausgesetzten und für das Auge (Netzhautgrube) erfüllten Superpositionsprinzips dürfte eine gute Approximation der Spektralwertkurven selbst für alle Farbreize optimal sein. Als Gütefunktion für die Minimierung des Mean Square Errors (MSE) ergibt sich:

$$Q_\lambda = \sum_i \left(\underline{s}(\lambda_i) - \underline{M}_\lambda \underline{s}_{ADC}(\lambda_i) \right)^T \cdot \left(\underline{s}(\lambda_i) - \underline{M}_\lambda \underline{s}_{ADC}(\lambda_i) \right) \quad (11)$$

$$\lambda_i = 380nm + i \Delta\lambda, \quad \Delta\lambda = 10nm$$

Die 4 x 3 - Matrix \underline{M}_λ bildet, bedingt durch die Restriktionen in \underline{s}_{ADC} , den spektralen Kurvenzug (blaue Quadrate in Abb.1) nur unzureichend ab (grüne Quadrate). Eine targetunabhängige Lösung ist also nicht zu erwarten. Quantitativ läßt sich diese Aussage erhärten, wenn man die in Luftbildern zu erwartenden Targets betrachtet. In Abb. 2 sind 65 ausgewählte NASA - Reflektanzen, die in 10nm - Schritten tabelliert vorlagen, sowie die 17 DIN - Testfarben im CIE- $L^*a^*b^*$ - Raum dargestellt. Es ergeben sich Farbabstände ΔE von 6.09 für die DIN - Testfarben und 3.89 für die NASA - Reflektanzen bei D_{65} - Beleuchtung und Bodennähe.

3.2 Optimierung der Farbwerte der zu erwartenden Targets

Bessere Ergebnisse lassen sich bei Bezug auf die Farbwerte der zu erwartenden Targets (u.U. bei Integration der 17 DIN - Testfarben) erreichen.

$$Q_T = \sum_{i=1}^{Anz} \left(\underline{E}_{i\ soll} - \underline{M}_T \underline{E}_{i\ ist} \right)^T \left(\underline{E}_{i\ soll} - \underline{M}_T \underline{E}_{i\ ist} \right) \quad (12)$$

(Anz: hier 65 Farborte aus NASA - Reflektanzen und 17 DIN - Testfarben)
 Zunächst wurde auf Bodennähe und D_{65} orientiert.

$$E_{i \text{ soll}} = k \sum_{\lambda} D_{65}(\lambda) \underline{s}(\lambda) \beta_i(\lambda) = \{R_i, G_i, B_i\}^T$$

$$E_{i \text{ ist}} = k_{ADC} \sum_{\lambda} D_{65}(\lambda) \underline{s}_{ADC}(\lambda) \beta_i(\lambda) = \{L_i, M_i, K_i, P_i\}^T \quad (13)$$

Bei Verzicht auf den panchromatischen Kanal, d.h. Verwendung von $\underline{s}_s(\lambda)$ statt $\underline{s}_{ADC}(\lambda)$ in Gleichung (13), ergeben sich mittlere Abweichungen von $\Delta E = 5.86$ (DIN) bzw. $\Delta E = 2.41$ (NASA), die zumindest bei den Testfarben noch weit über der Schwelle des Wahrnehmbaren von $\Delta E = 3.0$ liegen. Da es sich um mittlere Abweichungen handelt, muß auch bei den NASA - Reflektanzen mit wahrnehmbaren Differenzen gerechnet werden. Wesentlich besser sehen die Ergebnisse bei Hinzunahme des panchromatischen Kanals in Gleichung (13) mit $\Delta E = 2.31$ (DIN) und $\Delta E = 1.47$ (NASA) aus. Die Optimierung der Bandmitten der Spektralkanäle im Rahmen der vorgegebenen Freiheitsgrade mittels adaptiver Stochastik liefert sogar $\Delta E = 1.39$ bzw. $\Delta E = 1.14$ (Abb. 3).

Die Variation weiterer Parameter (Dachbreite und Anstieg des panchromatischen Kanals) brachte keine signifikanten Verbesserungen.

3.3 Nichtlineare Anpassung

Eine noch bessere Approximation der zu erwartenden Targetvalenzen kann durch einen nichtlinearen Ansatz bezüglich der Ist-Werte der ADC-Kanäle, im einfachsten Falle durch Hinzunahme von quadratischen Termen wie in Gleichung (14) erfolgen.

$$Q_N = \sum_{i=1}^{Anz} \left(E_{i \text{ ist}} - \underline{M}_N \{ E_{i \text{ ist}}^T, L^2, M^2, K^2, P^2 \}^T \right)^T \cdot \left(E_{i \text{ ist}} - \underline{M}_N \{ E_{i \text{ ist}}^T, L^2, M^2, K^2, P^2 \}^T \right) \quad (14)$$

($\Delta E = 1.56$ bzw. 1.38 gegenüber 2.31 bzw. 1.48 , in beiden Fällen ohne Veränderungen in den Filterkurven, Abb.4)

Die je nach Aufwand verbesserbare Annäherung der Zieltargets durch nichtlineare Ansätze führt jedoch u.U. zu einer extremen Verzerrung des Farbraumes zwischen den Zieltargets. Daneben wird die Approximation der Chrominanzwerte stark helligkeitsabhängig. Bei Auftreten weiterer, zur Optimierung nicht verwendeter Reflektanzen oder Veränderungen in den Aufnahmebedingungen muß mit extremen Abweichungen in den Farbvalenzen gerechnet werden.

4. Der Einfluß von Sonnenstand, Atmosphäre und Flugdaten

Aus den Betrachtungen von Kapitel 3 ergibt sich als zu bevorzugende Lösung die lineare Approximation der Targetvalenzen unter Verwendung der drei spektralen und des panchromatischen Kanals inclusive der Bandmittenoptimierung in den vorgegebenen Freiheitsgraden. Die auf den 65 ausgewählten NASA - Reflektanzen bei D_{65} beruhende Lösung \underline{M}_T wurde mittels weiterer 31 NASA - Reflektanzen validiert und führte für diese mit einem $\Delta E = 0.99$ zu sehr guten Ergebnissen.

Bei der realen Anwendung derartiger Kameras wird unter Berücksichtigung der konkreten Aufnahmebedingungen mit wesentlichen Veränderungen in den Farbrei-

zen bei gleichen Targetreflektanzen zu rechnen sein. Das betrifft nicht nur die Intensität sondern auch die Farborte der Targets. Erfahrungsgemäß ist zunehmende Flughöhe und sinkende Visibility mit einer starken Entsättigung aller Farbvalenzen verbunden. Dieser Effekt wurde mit dem Ziel untersucht, Aussagen über die Stabilität der Approximationsgüte bei Verwendung der ermittelten Transformationsmatrix \underline{M}_T abzuleiten.

Zu diesem Zweck wurden die D_{65} - Aufnahmebedingungen durch näherungsweise reale Strahldichtebeiträge aus einem DATA-Cube des Institutes für Weltraumsensorik der DLR ersetzt. Auf diese Weise können Sensorblickrichtung, Aerosoltyp, Visibility, Sensorhöhe, Bodenhöhe und Zinitwinkel der Sonne variiert und berücksichtigt werden. In den Abbildungen 5 und 6 zeigen sich für zwei Beispiele die erwarteten, grundsätzlichen Einflüsse. Neben der Entsättigung führt die bei allen realen Aufnahmebedingungen steigende Bedämpfung im langwelligem VIS-Bereich zu einer Verschiebung der Farborte in Richtung blau. Die Lösung erwies sich mit einem ΔE von ca. 1.15 als robust genug, so daß auf eine Optimierung in Abhängigkeit von den Flugparametern verzichtet werden kann.

5. Differenzierbarkeit und Streuung

Die gute Approximation der Targetvalenzen im Mittel läßt noch entscheidende Fragen offen. So ist einerseits zu überprüfen, ob visuell unterscheidbare Targetvalenzen auch im Kamerabild unterscheidbar bleiben. Wegen der Linearität der Transformation dürfte die Überprüfung kritischer, d.h. der kleinsten Farbdifferenzen zwischen Targetpaaren ausreichen.

Target A	Target B	ΔE EBU	ΔE ADC
Yellow Corn	Wheat	2.11	3.30
Flax	Birch Leaves	3.93	2.91
Oats	Tomatoes	3.13	2.93
Unaltered Rocks	Quartz Beach Sand	3.23	2.31
Altocumulus Clouds	Wet Snow	2.11	2.44

Die in der Tabelle gezeigten Targetpaare sind charakteristisch für diese kritischen Fälle und zeigen, daß die Farbabstände in ihrer Größenordnung erhalten bleiben. Die kritischen Fälle betreffen oft Farbvalenzen von Targetpaaren, die allein durch die Farbvalenzen auch mit dem Auge kaum unterscheidbar sind. Insgesamt ist nicht zu erwarten, daß die Differenzierbarkeit leidet.

Andererseits muß auch bei gutem mittleren ΔE noch nachgewiesen werden, daß die maximalen Einzelabweichungen möglichst unter der visuellen Wahrnehmungsschwelle bleiben. Die Histogrammanalyse der Farbabweichungen zwischen visueller Wahrnehmung und Kamerabild weist lediglich für drei Reflektanzen $\Delta E = 3.5$, für drei Reflektanzen $\Delta E = 4$ und für eine Reflektanz $\Delta E = 4.5$ aus (Abb. 7). Die kritischen Fälle liegen damit knapp über der visuellen Wahrnehmungsschwelle von $\Delta E = 3.0$. Dies gilt für unveränderte Filterparameter. Die Optimierung der Bandmitten der spektralen Kanäle in den durch die Fernerkundung tolerierten Grenzen mittels adaptiver Stochastik führt bei gleichzeitiger, ebenfalls erlaubter Verbreiterung der Dachbreite des panchromatischen Kanals dazu, daß die Einzelabweichungen aller Targetvalenzen auf $\Delta E_{\max} < 3$ beschränkt werden können (Abb. 8).

6. Farbabstandsmaß ΔE und photographische Bewertungsverfahren

Photographische Verfahren der Bewertung von Farbabständen und deren Akzeptanz beruhen auf dem visuellen Vergleich von Original und gefilterten Bildern. Dabei werden abgestufte Filtersätze für rot, grün und blau mit definierten Transmissionsgraden $\tau(\lambda)$ verwendet. Für photographische Luftbildaufnahmen werden Abweichungen durch die Kodak Color Compensating Filter CC05R, CC05G und CC05B als visuell nicht wahrnehmbar und damit akzeptierbar eingeschätzt. Auf der Basis der Farbreize der DIN - Testfarben bei D_{65} und der bekannten Filtertransmissionen wurden die entsprechenden Abweichungen ΔE im CIE - $L^*a^*b^*$ - Farbraum berechnet.

Rot - Filter		Grün - Filter		Blau - Filter	
Typ	$\Delta E - L^*a^*b^*$	Typ	$\Delta E - L^*a^*b^*$	Typ	$\Delta E - L^*a^*b^*$
CC025R	1.64	CC025G	1.81	CC025B	1.40
CC05R	2.34	CC05G	2.65	CC05B	2.13
CC10R	3.92	CC10G	4.40	CC10B	3.52
CC20R	7.15	CC20G	8.57	CC20B	7.02
CC30R	10.44	CC30G	12.69	CC30B	10.65
CC40R	14.41	CC40G	17.89	CC40B	14.62
CC50R	18.28	CC50G	23.16	CC50B	23.16

Es ist abzulesen, daß die Grundaussage der photographischen Methode mit der Wahrnehmungsgrenze $\Delta E < 3$ übereinstimmt. Die Abb. 9 spiegelt dies trotz aller hier nicht behandelten Probleme der Farbwiedergabegeräte am Beispiel des Kodak - Filtersatzes CCxxR anschaulich wider.

Zusammenfassung

Der Beitrag sollte deutlich machen, daß bei starker applikationsspezifischer Einschränkung in den verwendeten Farbfiltern "True Color" im eigentlichen Sinne nicht möglich ist. Dennoch können bei der Nutzung aller verbleibenden Freiheitsgrade und der ebenfalls applikationsspezifischen Targets gegebenenfalls sehr gute Näherungen erzielt werden, die u.U. unter dem visuell Wahrnehmbaren liegen.

Schrifttum:

- /1/ K.-H. Franke: Grundlagen der Farbbildverarbeitung. Foliensatz zur Vorlesung, TU Ilmenau, 1998
- /2/ R. Sandau, P. Fricker: Digital Photogrammetric Cameras - Possibilities and Problems. Workshop "Digital Aerial Cameras for Photogrammetry and Remote Sensing", Stuttgart, 25.01.1999

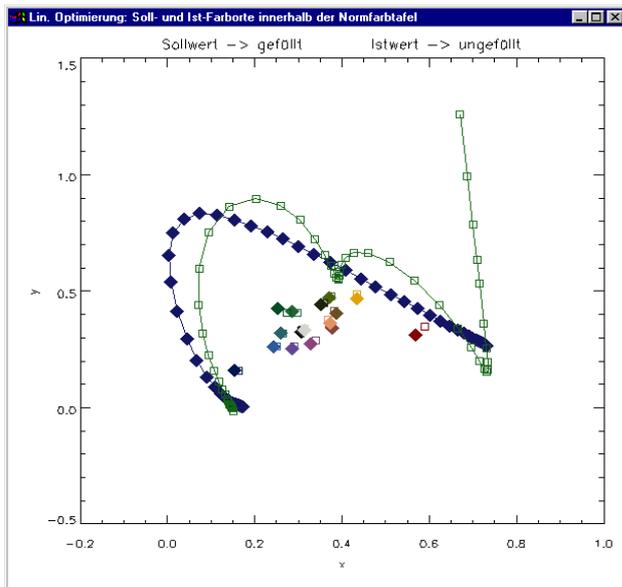


Abb. 1: Approximation des spektralen Kurvenzuges

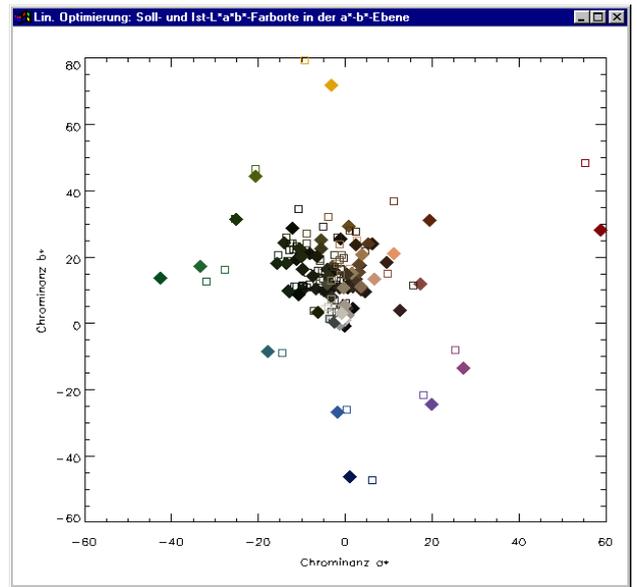


Abb. 2: NASA - Targets bei Approx. gem. Abb. 1

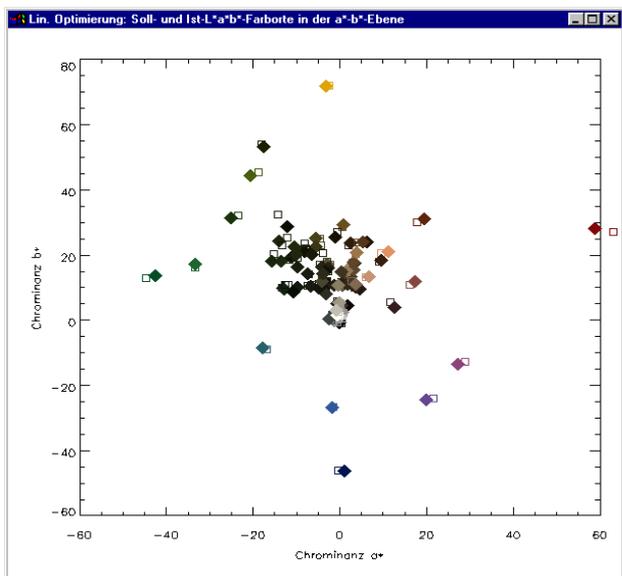


Abb. 3: Targetbezogene Optimierung mit Veränderung der Filter

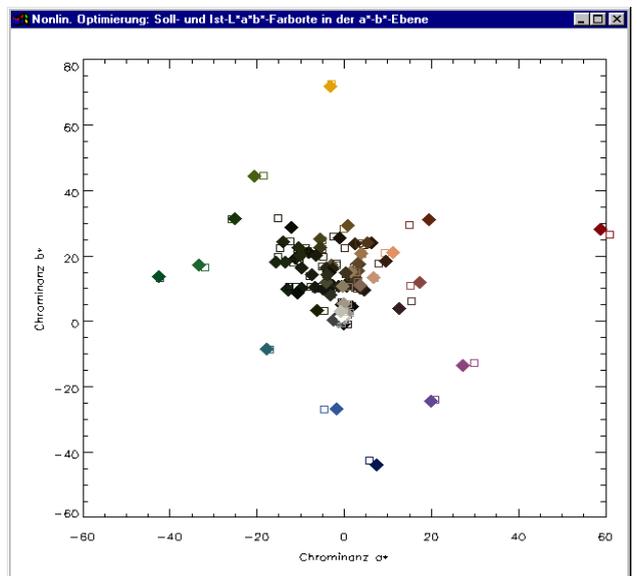


Abb. 4: Nichtlineare Optimierung ohne Veränderung der Filter

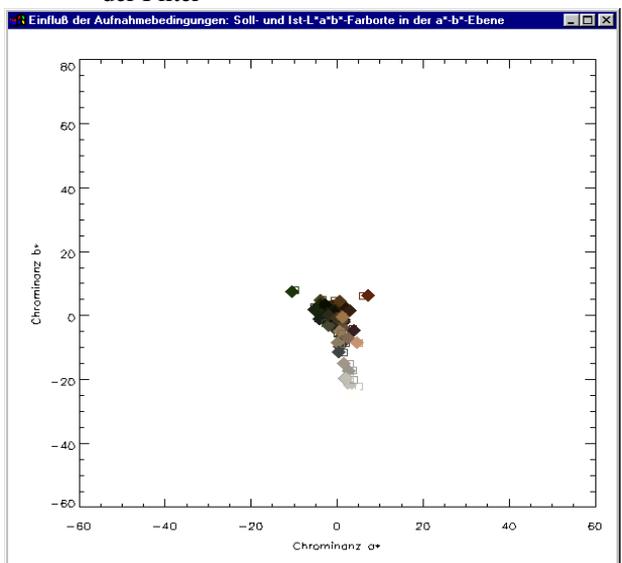


Abb. 5: Visibility 10km, Flughöhe 7.5km, Sonnenzenit 15°, Aerosol rural

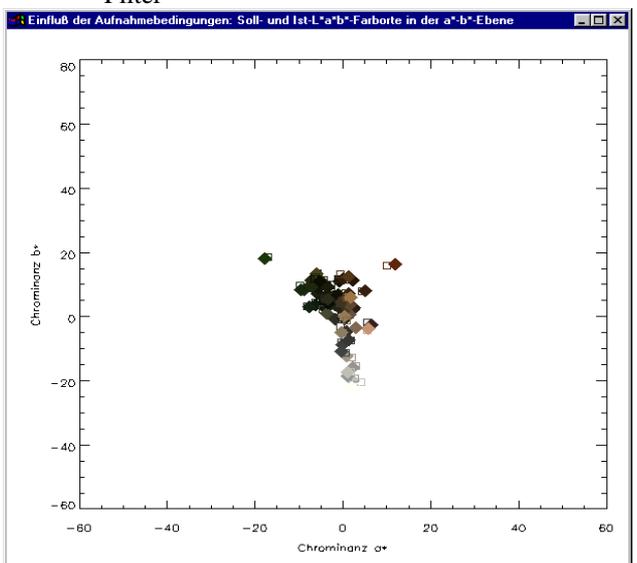


Abb. 6: Visibility 23km, Flughöhe 7.5km, Sonnenzenit 30°, Aerosol rural

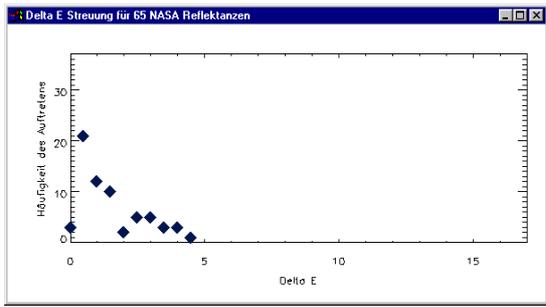


Abb. 7: ΔE -Histogramm für Targetoptimierung ohne Änderung der Filterkurven

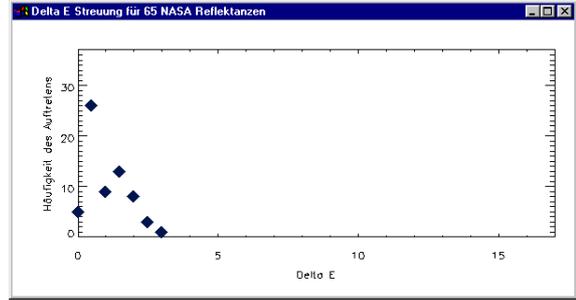
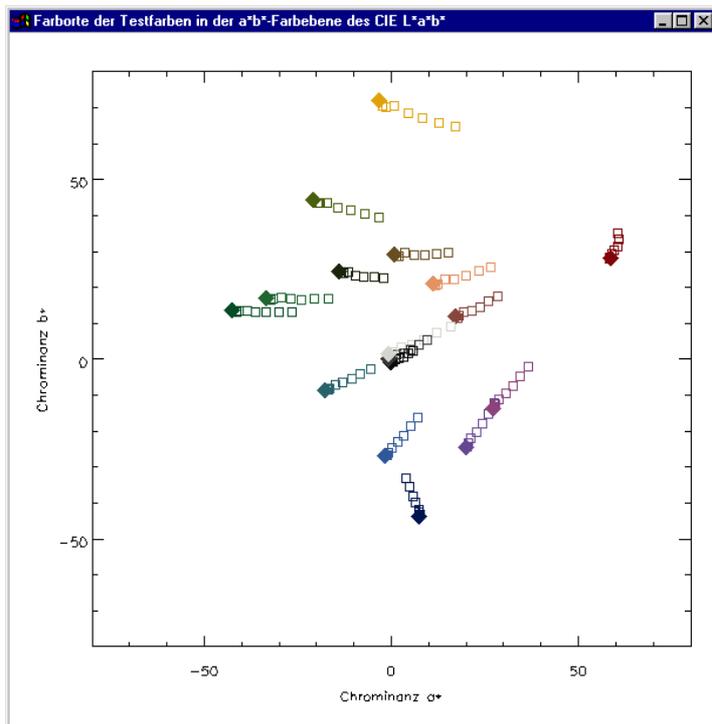


Abb. 8: ΔE -Histogramm für Targetoptimierung und Optimierung der Filterkurven



Veränderung der Farborte der Testfarben durch die CcxxR - Filter



Referenz: Testfarbensatz

CC025R



CC05R



CC10R



CC20R



CC30R



CC40R



CC50R



Abb. 9: Veranschaulichung zum Farbabstandsmaß und photographischen Methoden der Bewertung von Farbabständen