

Aufgabenbezogene Auswahl von Farbfiltern für optoelektronische Systeme

Ralf Reulke

Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung,
Rutherfordstrasse 2,
D-12489 Berlin,
Tel.: (030) 67055 518; Fax: (030) 67055 529
eMail: Ralf.Reulke@dlr.de
URL: <http://sensorsystems.dlr.de/TS/>

Karl-Heinz Franke

Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Informatik und Automatisierung
Fachgebiet Graphische Datenverarbeitung
Postfach 100565
D-98648 Ilmenau
Tel.: (03677) 668485; Fax: (03677) 668464
EMail: karl-heinz.franke@prakinf.tu-ilmenau.de
URL: <http://kb-bmts.rz.tu-ilmenau.de/franke>

1. Einleitung

Bei der Entwicklung von optoelektronischen Sensoren für die Abtastung von farbigen Vorlagen ist die maximale Abtastgeschwindigkeit ein wesentlicher Parameter des Systems, was insbesondere in den Farbkanälen zu Einschränkungen des Signal-Rausch-Verhältnis führen kann. Nimmt man die Empfindlichkeit und die Abbildungsverhältnisse des Sensors als gegeben, kann das SNR nur durch die Bestrahlungsstärke der Strahlungsquelle und die spektrale Bandbreite der Farbfilter vergrößert werden. Die Bestrahlungsstärke ist jedoch durch die thermische Belastbarkeit der Vorlage begrenzt. Bei gegebenem Sensor müssen also zur Optimierung des SNR die Spektralfilter so breitbandig wie möglich gewählt werden, wobei die resultierende Farbqualität nicht beeinträchtigt werden sollte. Ziel ist also eine Filterkombination zu finden, die angepasst an die Eigenschaften der Vorlage ein maximales SNR gewährleistet. Dazu werden experimentelle und theoretische Untersuchungen und Lösungsansätze vorgestellt. Hintergrund für diesen Beitrag ist das Design von abbildenden Sensoren für die Abtastung von farbigen Vorlagen.

2. Colorimetrische Auslegung

Der Prozess der Signalwandlung kann durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$g_i(\vec{x}, t) = c \int dx' dt' d\mathbf{I}' \cdot H(\vec{x}, \vec{x}', t, t', \mathbf{I}') \cdot f(\vec{x}', t', \mathbf{I}') + \mathbf{x}(\vec{x}, t)$$

f ist die auf den Sensor fallende Strahlung, g_i das gemessene Signal im i -ten spektralen Band (z.B. die in der CCD generierten Ladungen), ζ ein Rauschen, \vec{x} der Ortsvektor, t die Zeit und \mathbf{I} die Wellenlänge. Die Gleichung geht für zeitinvariante und isoplanare Systeme bezüglich Ort und Zeit in ein Faltungsintegral mit H als Faltungskern über.

Unter Colorimetrie soll im folgenden die physiologisch bewertete Reaktion des Systems auf eine unstrukturierte (homogene) Strahlungsquelle verstanden werden. Sie ist der Teil des Signalerzeugungsprozess, der sich in $H(\mathbf{I})$ und der Größe c vor dem Integral widerspiegelt. Parallel dazu ist noch das Verhältnis des Signal zum Betrag des Rauschens ζ , das SNR (signal to noise ratio) für die Beschreibung der Photo-/Colorimetrie von Bedeutung.

Die Reaktion des Systems auf (reguläre) geometrische Strukturen sowie der Einfluss der Verarbeitungselektronik wird durch den Faltungskern $H(\vec{x}, \vec{x}', t, t')$ beschrieben.

Diese bei abbildenden Systemen als Point Spread Function (PSF) bekannte Größe ist für die weiteren Betrachtungen insofern von Interesse, als sie bei der Bewertung der verfügbaren Freiheitsgrade (z.B. Optik, Sensorfläche, Integrationszeit) für die Optimierung des SNR beachtet werden muss.

Die beiden Größen (SNR und PSF) sind also grundlegende Parameter für die Beschreibung einer Kamera und stehen in einem engen Zusammenhang zu einem wie auch immer zu definierenden Auflösungs begriff.

Signalberechnung

Dazu untersucht man den Strahlungsfluss durch ein abbildendes Objektiv mit dem Öffnungsverhältnis D_0/f (f ist die Brennweite der Optik). $\langle n_{ph} \rangle$ sei die mittlere Anzahl der Photonen, die auf die Sensorfläche A_0 treffen und während der Messzeit τ im Mittel wirksam werden. Es wird dabei angenommen, dass es über die Sensorfläche keine örtlichen Abhängigkeiten, z.B. der Empfindlichkeit, gibt. Das gemessene Signal ist dann

$$\langle s \rangle = t \cdot \frac{p}{4} \cdot \left(\frac{D_0}{f} \right)^2 \cdot A_0 \cos^4 q_b \int d\mathbf{l} R_{DN}(\mathbf{l}) \cdot T(\mathbf{l}) \cdot L_0(\mathbf{l})$$

L_0 ist die Strahldichte vor dem Sensor, T die Transmission des gesamten Systems, die neben der Optik auch die Spektralfilter beschreibt.

Die Funktion $\cos^4 q_b$ drückt den typischen Randabfall der Bildhelligkeit aus, der durch andere Effekte noch verstärkt werden kann.

Die Größe R_{DN} ist die spektrale Empfindlichkeit des Detektors (z.B. das CCD-Element) und beschreibt unter anderem die Quanteneffektivität der Generation von Elektronen-Loch-Paaren im Halbleiter.

Aus der obigen Gleichung wird deutlich, dass folgende Größen beeinflusst werden können:

- Integrationszeit
Ist festgelegt durch die Scangeschwindigkeit der Vorlage und ist demzufolge nach oben beschränkt.
- Optik
Eine größere Öffnung beeinträchtigt sowohl die Auflösung, als auch die Tiefenschärfe und kann damit nicht beliebig groß werden.
- Detektorfläche
Größere Detektoren führen bei festgelegter Auflösung zu einer Vergrößerung der ausgeleuchteten Fläche in der Fokalebene. Diese ist ebenfalls oben beschränkt durch die verfügbaren Optiken und den Preis der optischen Bauelemente. Ausserdem wirken vergrößerte Sensorfläche und sinkende Bestrahlungsstärke unter den oben angegebenen Bedingungen gegenläufig.
- Empfindlichkeit des Detektors

Schwankt geringfügig zwischen den verschiedenen Anbietern von CCD-Sensoren. Allerdings muss die sensornahe Elektronik sehr sorgfältig aufgebaut werden.

- Transmission
Insbesondere die Filterwahl hat einen gravierenden Einfluss.
- Strahldichte (Strahlungsfluss)
Ist durch die damit einhergehende thermische Belastung der Vorlage begrenzt.

Eine wirkliche Optimierung ist lediglich bei den verwendeten Spektralfiltern möglich. Um eine hohe Abtastgenauigkeit bei Filmen zu erzielen, werden häufig schmalbandige Metallinterferenzfilter verwendet, die ihre Mittelwellenlänge an den Maxima der Farbschichtempfindlichkeiten haben. Der Nachteil dieser Filter besteht neben der geringen spektralen Bandbreite auch in einer Winkelabhängigkeit der Mittenwellenlänge. Das erfordert eine aufwendige telezentrischen Optik. Diesen Effekt zeigen Absorptionsfilter nicht, können allerdings eine spektrale Bandbreite haben, die eine farbechte Abbildung nicht mehr zulassen.

Das Problem besteht also darin, eine Filterkombination zu finden, die neben dieser Farbechtheit möglichst auch maximale Gesamtempfindlichkeit und damit maximales Signal-/Rauschverhältnis des Systems ermöglicht.

3. Experimenteller Aufbau

Um die Reaktion einer Kamera auf einen Farbreiz zu bestimmen, müssen die physikalischen Eigenschaften der Messanordnung, wie die spektrale Emission der Strahlungsquelle, die spektrale Transmission der Farbfilter und die spektrale Empfindlichkeit der Kamera bestimmt werden. Ausserdem müssen die spektralen Eigenschaften des Testtargets bekannt sein.

Der Messaufbau (Abb. 5) besteht aus einem Leuchttisch und einer S/W-Kamera, deren analoge Ausgangssignale mit einem Framegrabber digitalisiert werden.

Die folgende Abbildung zeigt die spektrale Bestrahlungsstärke (in relativen Einheiten) als Funktion der Wellenlänge.

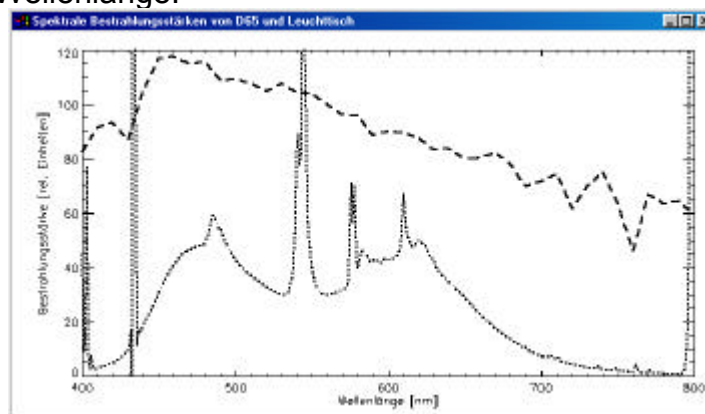


Abb. 1 Spektrale Bestrahlungsstärke von D65 (- -) und Leuchttisch (···)

Insbesondere der kommerziell erworbene Leuchttisch zeigt einige charakteristische Maxima, die bei der Datenauswertung berücksichtigt werden müssen.

Abb. 2 zeigt die spektrale Transmission der Farbfilter (--), die CIE-XYZ Normvalenzen (···) und die spektrale Empfindlichkeit der verwendeten Kamera (- -), alle auf 1 normiert.

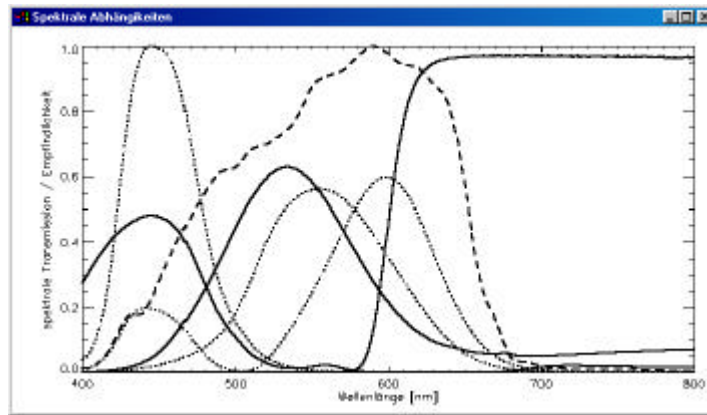


Abb. 2 Spektrale Abhängigkeiten (siehe Text)

Die Kameraempfindlichkeit steigt mit zunehmender Wellenlänge an und schneidet mittels eines cut off Filters die Strahlung im nahen Infrarot ab. Die spektrale Empfindlichkeit der Kamera wurde direkt mit einem (radiometrisch kalibrierten) Monochromator ermittelt.

Die Bestimmung der spektralen Transmission der Farbfilter erfolgte mit dem kommerziellen System „LAMBDA 19“ der Firma Perkin-Elmer. Die verwendeten Filter sind vergleichsweise breitbandig und überlappen stark, ähnlich wie die Normvalenzen.

Als Testchart diente ein RGB-Target der PrintOpen Software mit 105 Testfarben, das auf transparenter Folie ausgegeben und mit einem Spektralphotometer (X-Rite) vermessen wurde.

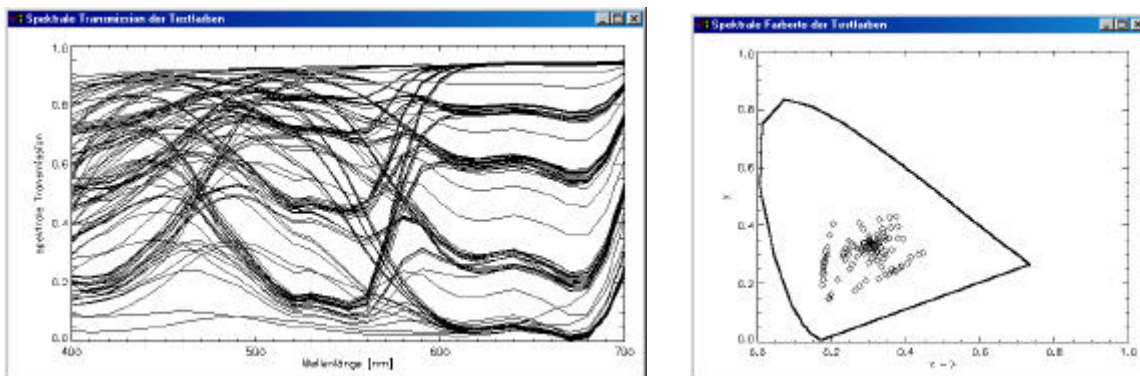


Abb. 3 Spektrale Transmission und Farborte der Testfarben

Abb. 3 zeigt die spektrale Transmission und Farborte der Testfarben. Aus dieser Darstellung wird deutlich, dass zum einen ein großer Bereich des Farbraumes abgedeckt wird und andererseits die Druckfolie und -farben ihre Transparenz im nahen Infrarot verändern.

4. Untersuchungen zur spektralen Auslegung

Für die Kamera sind drei spektrale Kanäle A, B und C im sichtbaren Wellenlängenbereich vorgesehen.

Es wird zunächst der Einfluss der variierenden spektralen Bandbreite von Transmissionsfiltern theoretisch untersucht. Dazu wird ein Satz von Filtern mit einer normalverteilten spektralen Transmission und variabler Bandbreite (σ) eingeführt. Außerdem wird mit der Standardquelle D65/2 und der CIE-XYZ Farbschnittstelle gearbeitet.

Anhand eines realen Beispiels wird ein Datensatz mit einer SW-Kamera und dem oben beschriebenen Farbfiltersatz vermessen. Die Ableitung der Transformationsmatrix und die Genauigkeitsuntersuchung zeigen die Wirksamkeit dieses Ansatzes.

Es soll im folgenden zuerst kurz auf den mathematischen Hintergrund eingegangen werden.

Optimierungsmethode

Das Ziel der Optimierung besteht in der Bestimmung einer Transformationsmatrix \mathbf{M} zur linearen Abbildung der A-, B- und C-Werte der Kamera in CIE-XYZ-Farbwerte.

$$\begin{pmatrix} X_{Korr} \\ Y_{Korr} \\ Z_{Korr} \end{pmatrix} = \mathbf{M}_{3,3} \cdot \begin{pmatrix} A_{cam} \\ B_{cam} \\ C_{cam} \end{pmatrix}$$

Als Optimierungskriterium wurde die Minimierung der Summe der Fehlerquadrate zwischen dem durch Matrizierung erzielbaren korrigierten XYZ-Farbwert und dem Soll-XYZ-Farbwert gewählt.

$$d = \sum_{i=0}^{Anz} (X_{iSoll} - X_{iKorr})^2 + (Y_{iSoll} - Y_{iKorr})^2 + (Z_{iSoll} - Z_{iKorr})^2 \rightarrow \min$$

Hierbei wurden die o.g. Testfarben berücksichtigt.

Die XYZ-Soll-Farbwerte nach CIE Norm, X_{iSoll} , Y_{iSoll} , und Z_{iSoll} , bestimmen sich aus der Verrechnung der gegebenen Transmissionsverläufe:

$$\begin{aligned} X_{iSoll} &= x_{norm} \cdot \sum_I D_{65}(\mathbf{I}) \cdot X_{CIE}(\mathbf{I}) \cdot F_i(\mathbf{I}) \\ Y_{iSoll} &= y_{norm} \cdot \sum_I D_{65}(\mathbf{I}) \cdot Y_{EBU}(\mathbf{I}) \cdot F_i(\mathbf{I}) \\ Z_{iSoll} &= z_{norm} \cdot \sum_I D_{65}(\mathbf{I}) \cdot Z_{EBU}(\mathbf{I}) \cdot F_i(\mathbf{I}) \end{aligned}$$

Die Ist-Werte A_i , B_i und C_i bestimmen sich nach:

$$\begin{aligned} A_i &= a_{norm} \cdot \sum_I D_{65}(\mathbf{I}) \cdot A_{gauss}(\mathbf{I}) \cdot F_i(\mathbf{I}) \\ B_i &= b_{norm} \cdot \sum_I D_{65}(\mathbf{I}) \cdot B_{gauss}(\mathbf{I}) \cdot F_i(\mathbf{I}) \\ C_i &= c_{norm} \cdot \sum_I D_{65}(\mathbf{I}) \cdot C_{gauss}(\mathbf{I}) \cdot F_i(\mathbf{I}) \end{aligned}$$

Die Ableitung der Transformationsmatrix \mathbf{M} findet man in (1). Die Fehler werden als Abstand zwischen den Ist und Soll-Werten im Lab-Raum bestimmt.

5. Ergebnisse

Theoretische Untersuchungen

Die Maxima der Filterfunktion wurde auf die Wellenlänge [440 nm, 540 nm, 600 nm] gelegt. Die spektrale Bandbreite variierte von $\sigma=10\text{nm}$ bis $\sigma=70\text{nm}$. Die Rechnungen zeigen, dass ein mittlerer Fehler bis $\sigma=50\text{nm}$ unter $\Delta E = 5$ im Lab Raum bleibt. Dabei verbessert sich aber das SNR um den Faktor 5, was aus der Fläche unter der Transmissionskurve folgt.

Das beschriebene Ergebnis hängt nicht sonderlich stark von der Lage der Schwerpunkswellenlänge ab, wenn sie nicht mehr als ca. 20 nm um die vorgegebene Schwerpunkswellenlänge herum variiert.

Experimentelle Untersuchungen

Die Messung des Testchart (Abb. 6) erfolgten nacheinander mit dem roten, grünen und blauen Filter. Eine Messung ohne die Folie erlaubte die Korrektur der Variation der räumlichen Bestrahlungsstärke und des Kamerasignals. Außerdem musste der Dunkelstrom berücksichtigt werden. Anschließend wurden die RGB-Signale der einzelnen Farben analysiert und in XYZ-Werte umgerechnet. Die Ableitung des Filters erfolgte in der oben beschriebenen Art und Weise.

Als problematisch erwies sich die Tatsache, dass der Dynamikbereich der Messanordnung mit 8 Bit zu gering war. Insbesondere bei dunkleren Farben führte das schlechtere SNR zu größeren Fehlern. Ein Vergleich der originalen und rekonstruierten Farben des Testchart zeigen Abb. 7 und Abb. 8.

Schließt man 15 % der Messwerte mit dramatischen Fehlern als Ausreißer aus, wird im Mittel ein Fehler von $\Delta E = 5$ erzielt. Die folgende Abbildung zeigt den beschriebenen Zusammenhang zwischen dem (integralen) Messwert und dem Farbfehler.

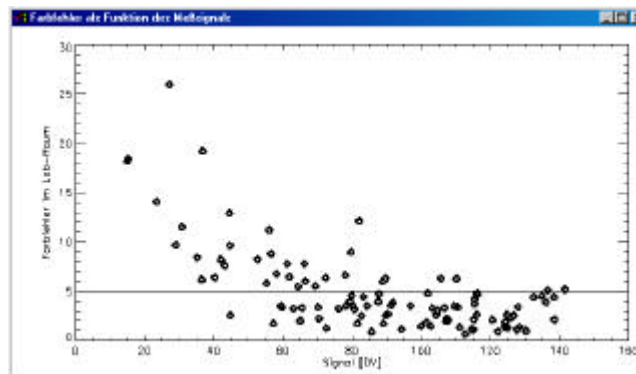


Abb. 4 Farbfehler als Funktion des Messwertes

6. Zusammenfassung

Der beschriebene Ansatz zeigt, dass für die Abtastung farbiger Vorlagen breitbandige Filter gut geeignet sind. Neben einer mehrfach bessere Radiometrie lässt sich eine ausreichende Qualität der Farbdarstellung erzielen.

7. Literatur

1. K.-H. Franke, T. Pomierski, R. Reulke, "Targetbezogene True-Color Kalibrierung", 5. Workshop Farbbildverarbeitung, 1999, Technischen Universität Ilmenau, Fachgebiet GDV
2. R. Reulke, K.-H. Franke, P. Fricker, T. Pomierski, R. Sandau, M. von Schönermark, C. Tornow, L. Wiest, "Target Related Multispectral and True Colour Optimization of the Colour Channels of the LH Systems ADS40", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B1. Amsterdam 2000; pp.244

Farbige Abbildungen

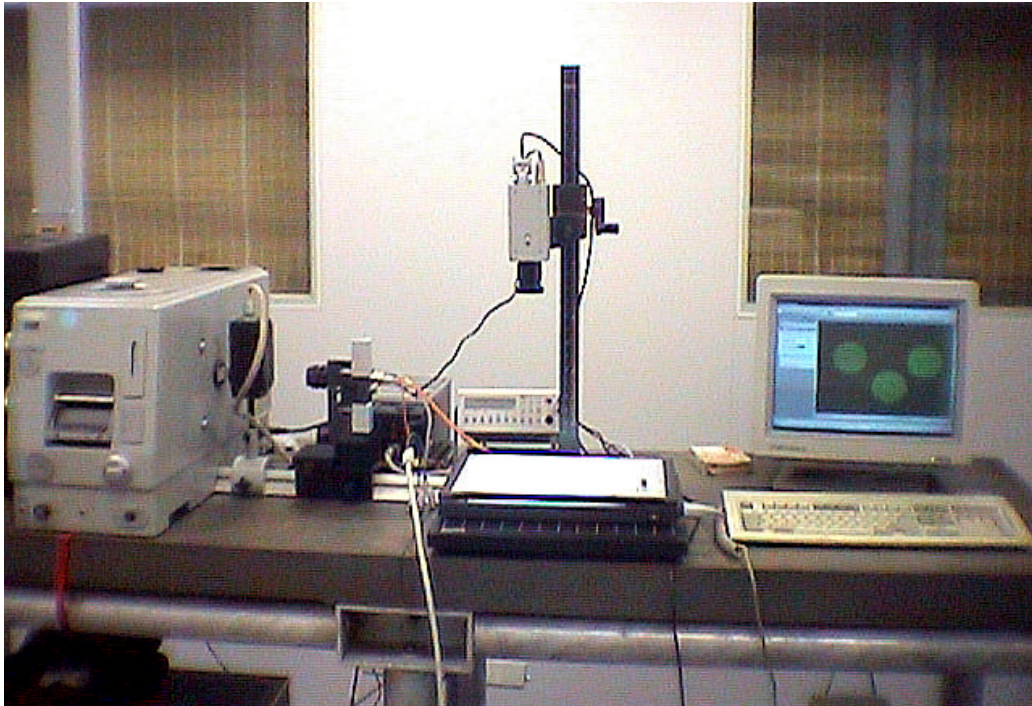


Abb. 5 Messaufbau mit Monochromator

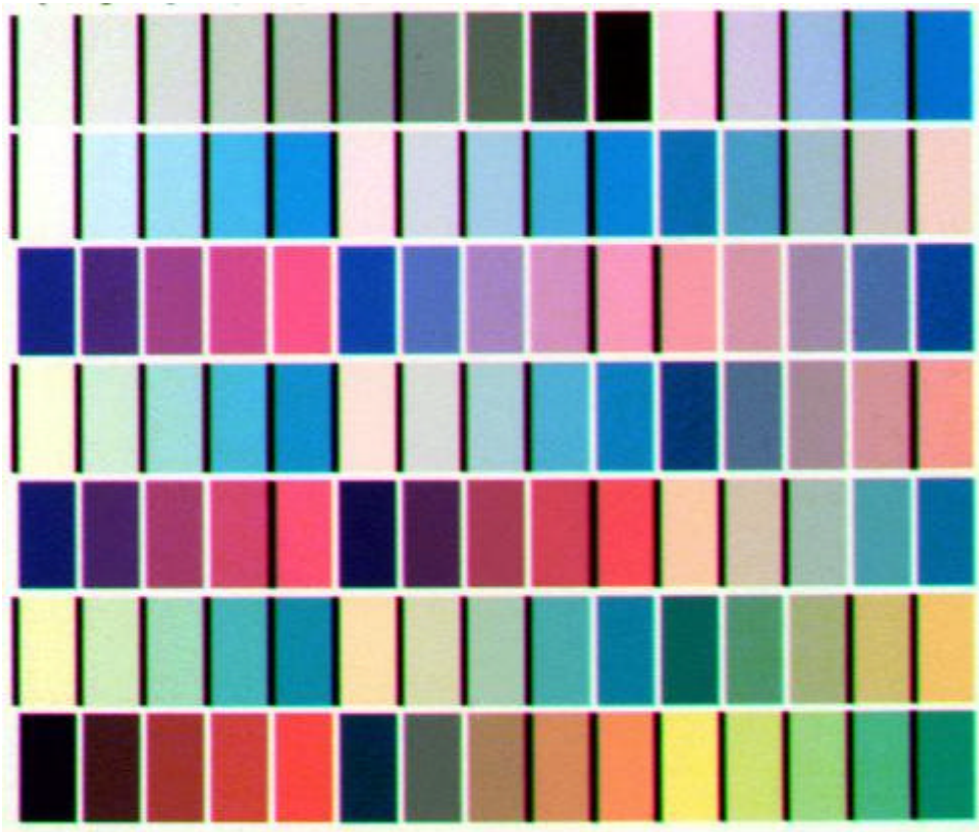


Abb. 6 Testchart, Messung



Abb. 7 Testchart, Vorlage



Abb. 8 Testchart, Rekonstruktion