



Leitfaden zur target- bezogenen Farbkorrektur



Stand: 10.04.2014

Dr. Rico Nestler
rico.nestler@zbs-ilmenau.de

Verzeichnis

1	Einleitung	3
2	Verfahrensüberblick	4
2.1	Überblick zur Kalibrierung von Dreibereichssensoren	4
2.2	Überblick zur targetbezogenen Kalibrierung	4
2.3	Demonstrationsbeispiel	8
3	Hinweise zur Verfahrens- und Targetauswahl	11
3.1	Gegenüberstellung der Kalibrierverfahren	11
3.2	Auswahl der Farbtargets	13
3.3	Anwendungsorientierte Auswahl der Kalibrierverfahren	16
	Anhang	19
A.	Farbtargetsätze	19
B.	Beleuchtungs- und Sensordaten für die Demonstration	21
C.	Normlichter	21

„Leitfaden zur targetbezogenen Farbkorrektur“



Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e. V.

Werner-von-Siemens-Str. 10, D-98693 Ilmenau
info@zbs-ilmenau.de
www.zbs-ilmenau.de

ISSN: 1432-3346

Die nachfolgenden Darstellungen sind gemäß §23 UrhG geschützt. Die Verwendung ist nur zum persönlichen Gebrauch gestattet und bedarf in anderen Fällen der Zustimmung der Urheber. Teile der Darstellung dürfen nur zusammen mit diesem Impressum weiter verbreitet werden.

Die Urheber übernehmen für fehlerhafte Angaben und deren unmittelbare und mittelbare Folgen keine juristische Verantwortung oder Haftung.

1 Einleitung

Eine häufige Zielstellung der Farbkalibrierung besteht in der fehlerminimalen Bilddatentransformation aus dem gerätespezifischen Farbraum des Bildaufnehmers (z. B. Kamera, Scanner) in einen geräteunabhängigen Farbraum (Ziel- oder Sollraum), der eine reproduzierbare Farbwiedergabe und Farbbewertung erlaubt. Dabei sollen beispielsweise von der Idealform abweichende, exemplarstreuende Filtercharakteristika bzw. Sensorkennlinien kompensiert und/oder unbekannte Beleuchtungsspektren ausgeglichen werden. Als Korrekturverfahren haben sich hier Abbildungsvorschriften zwischen den Farbräumen (allg. Merkmalsräume) bewährt, welche mit korrespondierenden Stützstellen in den beiden Farbräumen bestimmt werden. Die Stützstellen werden durch sogenannte **Targets** gebildet. Diese können beispielsweise aus einem Satz unterschiedlich remittierender Farbkarten oder einem bereits zum Testfarbensatz zusammen gefassten Chart bestehen. Bezüglich der Targets realisiert die Abbildungsvorschrift den kleinsten mittleren Abbildungsfehler im dafür gewählten Beschreibungsraum. Dies ist im Allgemeinen der Ziel- oder Sollraum selbst oder eine Beschreibung, die aus einer nicht linearen Transformation des Zielraumes hervorgeht. Bei Auswahl einer für den jeweiligen Anwendungsfall zweckmäßigen Abbildungsvorschrift und eines geeigneten Targetsatzes wird für den gesamten genutzten Beschreibungsraum eine Minimierung des mittleren Abbildungsfehlers erreicht, was in der Mehrzahl der Anwendungsfälle zu einer deutlichen Reduzierung von Farbabweichungen führt.

Der Gegenstand des Leitfadens ist die Zusammenfassung von Verfahren zur Ermittlung und Optimierung targetbezogener Abbildungsvorschriften zwischen Farbräumen.

Das Haupteinsatzgebiet der Verfahren ist die Korrektur von Farbvalenzen einer gerätespezifischen dreidimensionalen Farbbeschreibung (Ist-Farbraum) in eine erforderliche Sollfarbbeschreibung (Soll-Farbraum), z.B. eine geräteunabhängige farbmtrische Schnittstelle (CIE-XYZ). Da die Darstellung das konkrete Einsatzgebiet (Ausgangsfarbräume) so wenig wie möglich im voraus festlegen soll, werden die zur Optimierung und Fehlerbewertung benötigten Transformationsbeziehungen allein durch Parametrierung des jeweiligen Verfahrens festgelegt und darüber hinaus keinerlei Wertebereichsbeschränkungen für Eingabe- und Ergebniswerte vorgenommen. Neben der Realisierung lokaler, wie globaler $3 \rightarrow 3$ Abbildungen stehen für die Verfahrensklassen der affinen Korrektur auch $(n > 3) \rightarrow 3$ Abbildungen zur Verfügung, die z.B. für Sensoren mit $n > 3$ primären Kanälen (Mehrbereichssensorik) einsetzbar sind.

Zur targetbasierten Kalibrierung dienen ausgewählte Targetsätze, welche mit den Bezeichnungen DIN (DIN-U / DIN-S), MCC, MSG und MDC nachfolgend gebraucht werden. Zum besseren Verständnis enthält Anhang A eine Übersicht sowie zweckdienliche Erläuterungen der verwendeten Targets.

2 Verfahrensüberblick

2.1 Überblick zur Kalibrierung von Dreibereichssensoren

Beim Einsatz von Sensoren (mit/ohne Ortsauflösung) zur Farbmessung nach dem Dreibereichsprinzip besteht das Problem, dass die primären Sensordaten im Allgemeinen keiner standardisierten valenzmetrischen Schnittstelle entsprechen. Mögliche Ursachen hierfür sind die Verletzung der Lutherbedingungen bei der Realisierung der Sensorempfindlichkeiten oder die Verwendung einer Beleuchtung, die keiner Normlichtquelle entspricht. Für reale Messsysteme ist zusätzlich immer davon auszugehen, dass bei der Signalentstehung und im Aufnahmekanal auch nicht lineare Übertragungskennlinien wirksam sind, die eine z.T. farbreizabhängige, nicht lineare Beeinflussung der primären Farbwerte nach sich ziehen können, was sich wiederum in lokalen Verzerrungen des Sensorfarbraumes äußert. Selbst bei speziellen Dreibereichssensoren mit sehr gut an die gewünschten Spektralwertkurven angepassten Empfindlichkeitsfunktionen und weitestgehend linearem Übertragungskanal werden die applikationsbedingt oft sehr hohen Genauigkeitsansprüche nicht in jedem Fall erreicht. Dies ist insbesondere auf Fertigungstoleranzen der optischen Messsystemkomponenten (Empfindlichkeit des Basismaterials, Filter) und der Beleuchtung zurückzuführen. Diese toleranzbedingten Farbortabweichungen im primären Farbraum weisen einen ebenfalls farbreiz- und damit von der Applikationsklasse abhängigen, sehr lokalen Charakter auf.

Die Farbmessung erfordert somit neben der Realisierung rückführbarer Messbedingungen das Herstellen eines exemplarbezogenen Bezugs zu einem standardisierten Farbraum (Kalibrierung). **Da ein vollständig analytisches Modell meist nicht zur Verfügung steht, muss die dazu notwendige Transformationsvorschrift targetbezogen bestimmt werden.**

2.2 Überblick zur targetbezogenen Kalibrierung

Zur Bestimmung der Abbildungsvorschrift zwischen zwei Farbräumen nutzen targetbezogene Korrekturverfahren eine **endliche Zahl bekannter Testfarben**, die sogenannten **Targets**, welche in den beiden Farbräumen korrespondierende Stützstellen bilden. Die Targets können beispielsweise aus einem Satz unterschiedlich remittierender Farbkarten oder einem bereits zum Testfarbensatz zusammengefassten Chart bestehen. Bezüglich der Targets realisiert die Abbildungsvorschrift den kleinsten mittleren Abbildungsfehler im dafür gewählten Beschreibungsraum. Dies ist im Allgemeinen der Ziel- oder Sollraum selbst oder eine Beschreibung, die aus einer nicht linearen Transformation des Zielraumes hervorgeht. Bei Auswahl einer für den jeweiligen Anwendungsfall zweckmäßigen Abbildungsvorschrift und eines geeigneten Targetsatzes wird für den gesamten genutzten Beschreibungsraum eine Verringerung des Abbildungsfehlers erreicht, was in vielen Anwendungsfällen zu einer deutlichen Reduzierung der Farbabweichungen führt.

Die targetbezogenen Kalibrierungsverfahren lassen sich nach verschiedenen Gesichtspunkten systematisieren. Einerseits kann eine Unterteilung nach dem mathematischen Charakter des gewählten Modellansatzes in **lineare** und **nicht lineare** sowie in **approximierende** oder **interpolierende** Verfahren erfolgen, andererseits ist die Gliederung nach dem zur Bewertung des resultierenden Abbildungsfehlers verwendeten Farbraum möglich. Je nach Geltungsbereich der jeweiligen Transformationsvorschrift kann weiterhin in **globale** und **lokale** Verfahren unterschieden werden (siehe Abbildung 1). Bei lokalen Verfahren wird der Farbraum in mehrere Teilräume unterteilt, welche dann separat mit unterschiedlich parametrisierten Abbildungsvorschriften behandelt werden. Weitere Klassifizierungsmöglichkeiten bestehen nach dem mathematischen Verfahren zur Ermittlung (Optimierung) der Abbildungsvorschrift (siehe Abbildung 2), nach dem Raum in dem die Bewertung des Abbildungsfehlers erfolgt oder nach der Wichtung der Targets. Die Verfahren lassen sich dementsprechend unterschiedlich systematisieren (siehe Abbildung 1 und Abbildung 2).

Abbildungsvorschrift

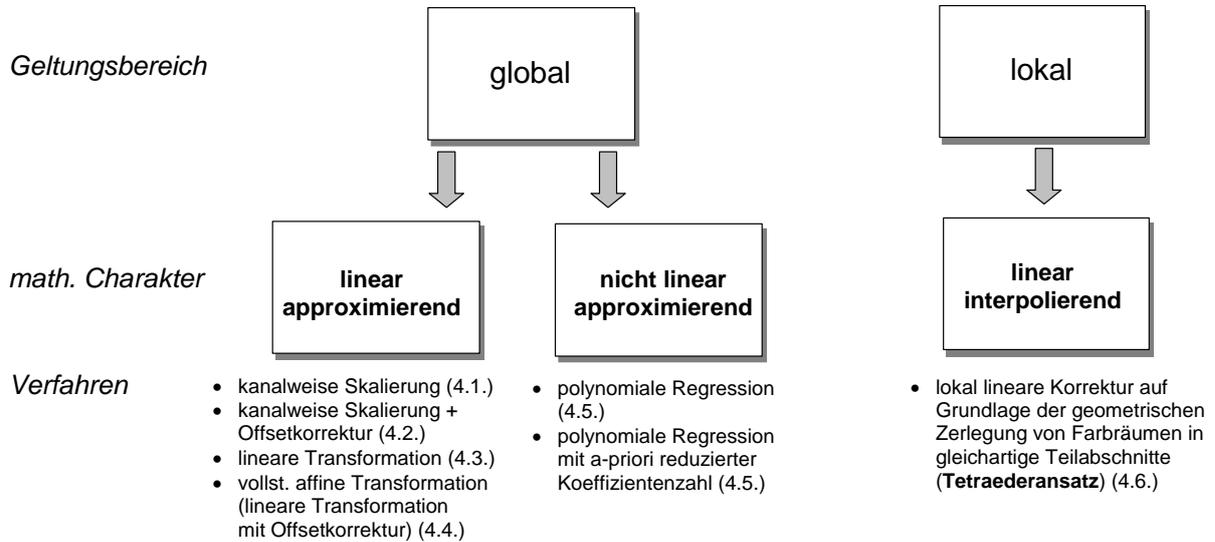


Abbildung 1 Systematisierung der Kalibrierung nach Geltungsbereich und mathematischem Charakter des gewählten Modellansatzes in Farbwerten, Einordnung der Verfahren

Optimierungsansatz

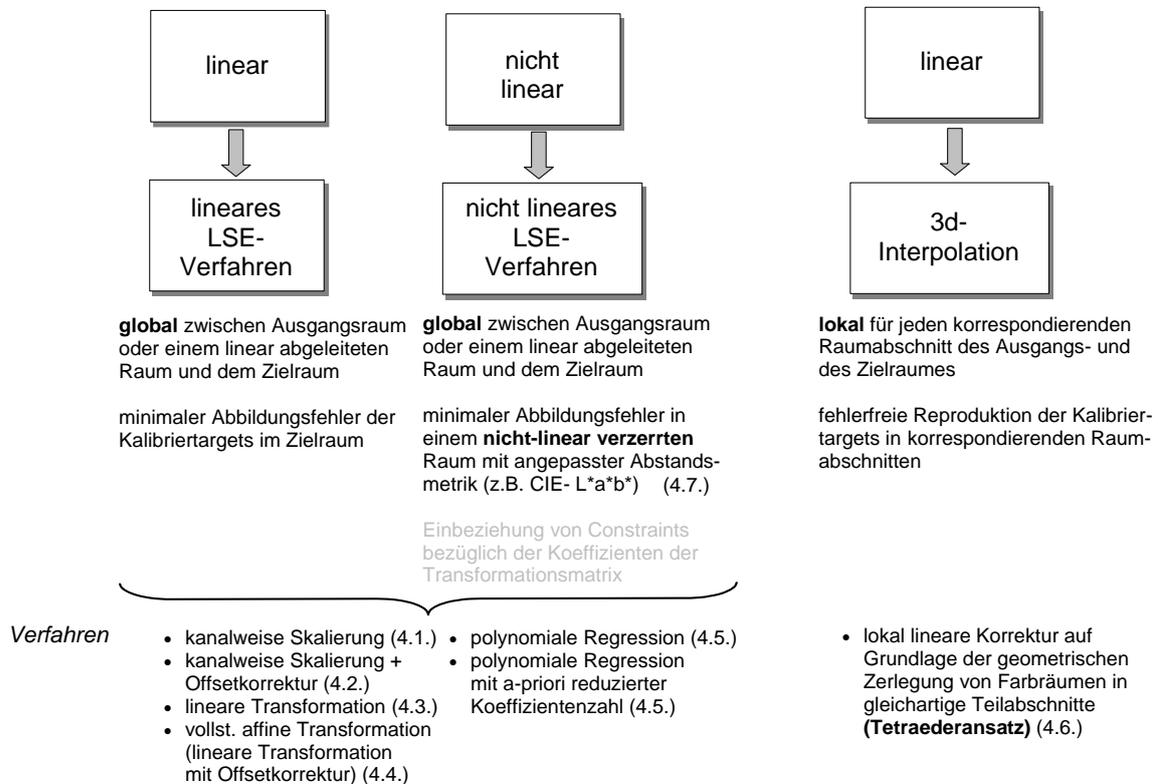


Abbildung 2 Klassifizierung der Kalibrierung hinsichtlich des Optimierungsansatzes, Einordnung der Verfahren

Für die Realisierung der globalen Farbkalibrierung sind eine Vielzahl von Abbildungsvorschriften mit unterschiedlichen Basisfunktionen denkbar. Praktisch relevant sind vor allem Ansätze, welche einen guten Kompromiss zwischen Korrekturgenauigkeit, Robustheit und Komplexität des Verfahrens darstellen. Die Komplexität des Verfahrens äußert sich meist in der Parameteranzahl, welche insbesondere Auswirkungen auf die benötigte Rechenperformance und die erforderliche Targetanzahl hat. Die Darstellung umfasst Korrekturverfahren, welche den meisten praktischen Ansprüchen genügen. Die Palette reicht von kanalweiser Skalierung bis hin zu polynomialen Regressionsansätzen (siehe Abbildung 1).

Die Kalibrierung mittels Regression erfolgt unabhängig vom gewählten Polynomgrad nach dem selben mathematischen Schema. Als Ergebnis aller Regressionsansätze steht eine Korrekturmatrix zur Verfügung, deren Größe durch die Dimensionen von Zielraum und Variablenvektor bestimmt ist. Je höher der Polynomgrad gewählt wird, um so größer wird die Dimension des Variablenvektors und damit auch die Anzahl der Regressionskoeffizienten. Theoretisch können beliebig hohe Polynomgrade gewählt werden. Aufgrund der starken Zunahme der Koeffizientenanzahl, dem damit verbundenen hohen Rechenaufwand und der Steigerung der erforderlichen Targetanzahl sowie der mangelhaften Approximation in nur spärlich mit Stützstellen besetzten Teilräumen werden in der Praxis selten Polynome größer 3. Grades eingesetzt.

Allgemeine, globale Korrekturvorschrift:

$$\underline{F}^{\text{Korr}} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1^{\text{Poly,Ist}} \\ F_2^{\text{Poly,Ist}} \\ F_3^{\text{Poly,Ist}} \\ \dots \\ F_n^{\text{Poly,Ist}} \end{bmatrix} = \underline{A} \cdot P \left\{ \underline{T} \cdot \begin{bmatrix} F_1^{\text{Ist}} \\ F_2^{\text{Ist}} \\ F_3^{\text{Ist}} \\ \dots \\ F_n^{\text{Ist}} \end{bmatrix} \right\}$$

mit $\underline{F}^{\text{Korr}}$ - korrigierte Farbvalenz, \underline{A} - zu bestimmende Korrekturmatrix, -
 P - Polynom, \underline{T} optionale Transformation der Ist-Farbvalenzen $\underline{F}_i^{\text{Ist}}$

Eine Reduzierung der Parameteranzahl von polynomialen Regressionsverfahren kann durch gezielte Ausnutzung von Sensoreigenschaften erreicht werden. So lässt sich beispielsweise die lineare Kennlinie von CCD-basierten Sensoren, welche eine Verdoppelung der Sensor-Ausgangswerte bei doppelter Beleuchtungsstärke bewirkt, für die Vereinfachung des Korrekturansatzes nutzen. Voraussetzung hierfür ist eine Farbkoordinate des Zielfarbraums mit direktem Helligkeitsbezug. Dieser Forderung entspricht beispielsweise der XYZ-Farbraum. Dem linearen Signalverhalten Rechnung tragend, können nun alle durch Y gebildeten Potenzen bzw. Mischprodukte aus dem Polynom eliminiert werden. Alle polynomialen Regressionsverfahren lassen sich auf diese Weise vereinfachen.

Die Korrekturmatrix wird mit der Zielstellung bestimmt, einen möglichst geringen mittleren Restfehler für die Kalibriertargets zu erhalten. Für die Berechnung der Matrixkoeffizienten wird auf die Methode der kleinsten Fehlerquadrate (LSE) zurückgegriffen, wobei im Fall von nicht linear abhängigen Zielräumen die optimale Matrix durch nicht lineare Methoden ermittelt werden muss.

Die nicht lineare Bestimmung der Korrekturmatrix wird auch bei der Fehlerminimierung im $L^*a^*b^*$ -Farbraum (CIELAB) erforderlich. Im Gegensatz zum XYZ-Farbraum oder RGB-Farbraum entspricht der euklidische Abstand zwischen zwei beliebig im Raum positionierten Farbvalenzen im $L^*a^*b^*$ -Farbraum annähernd dem Farbabstandsempfinden der menschlichen Sinneswahrnehmung. Maßzahlen aus dem $L^*a^*b^*$ -Farbraum lassen deshalb eine ortsunabhängige Bewertung von Farbabweichungen zu. Bezüglich der Kalibrierung ist es damit naheliegend, statt des XYZ-Farbraums den $L^*a^*b^*$ -Farbraum zur Fehlerminimierung zu nutzen.

Die Qualität der globalen Farbkalibrierung wird maßgeblich durch die Anzahl und vor allem durch die Verteilung der Testfarben im Farbraum bestimmt. Da ein für die jeweilige Aufgabenstellung geeigneter Targetsatz nicht immer physisch zur Verfügung steht, ist es sinnvoll, zumindest die vorhandenen Targets für die Approximation separat gewichten zu können. Auf Kosten der niedrig gewichteten Targets wird damit an Farborten der höher gewichteten Targets ein geringerer Restfehler erzielt. Die Möglichkeit der Targetgewichtung besteht für alle globalen Korrekturverfahren.

Das Anwenden einer globalen Abbildungsvorschrift führt zu einem systematischen Restfehler, der durch die Abweichung der realen Verhältnisse vom gewählten Modellansatz im jeweiligen Farbraumabschnitt begründet ist. Dies betrifft selbst für die zur Kalibrierung verwendeten und somit bekannten Farbtargets. Ohne differenzierte Wichtung der verwendeten Targets verringern lokale Deformationen der Farbortverteilung oder regionale Targethäufungen die Approximationsgüte im übrigen Farbraum erheblich. Nicht lineare Ansätze weisen zwar eine verbesserte Reproduktion in der Umgebung der durch Targets gebildeten Stützstellen auf, neigen jedoch im Gegensatz zu den linearen Verfahren mit zunehmender Komplexität zu einem im Vorfeld nicht bestimmbar, instabilen Verhalten bei der Abbildung unbekannter Farbvalenzen. Im Allgemeinen lässt sich die gewünschte „augengenaue“ Approximationsgüte durch den Einsatz eines globalen Korrekturansatzes nur in einem durch Farbtargets belegten begrenzten Farbraumabschnitt und somit klar definierten Applikationsfall erzielen.

Das Prinzip der lokalen Korrektur ist es, den durch die Kalibriertargets bestimmten Bereich des Sensor- bzw. Ist-Farbraumes durch das Anwenden von Transformationsvorschriften, die nur in regional begrenzten Raumabschnitten gültig und beim Übergang zwischen den Abschnitten stetig sind, in den Soll-Farbraum zu überführen. Diesem Ansatz liegt die Vorstellung zugrunde, dass sich jede stetige Funktion durch stückweise (lineare) Elemente approximieren lässt. Damit lassen sich lokale Eigenschaften der Farbräume ohne Rückwirkung auf den übrigen Farbraumbereich berücksichtigen und gleichzeitig eine hohe Approximationsgüte im gesamten betrachteten Farbraumabschnitt erzielen. Die realisierte Abbildungsvorschrift ist bezüglich der verwendeten Kalibriertargets fehlerfrei. Der Test und Nachweis der Approximationsgüte erfolgt daher sinnvoll anhand weiterer Testtargets aus diesem Farbraumabschnitt. Die Methoden dieser Verfahrensgruppe unterscheiden sich in der Art der Raumzerlegung, der Methodik zur Extraktion eines zu einer Ist-Farbvalenz gehörenden Raumelementes sowie im Ansatz zur Ermittlung der lokalen Ist-Soll-Transformationsbeziehung. Unter Berücksichtigung, dass zur Charakterisierung zumeist nur eine begrenzte Anzahl von Targets mit unregelmäßiger und z.T. spärlicher Farbraumverteilung zur Verfügung stehen, stellt die tetraedrische Zerlegung und Interpolation einen hinsichtlich Flexibilität, Beschreibungsaufwand, algorithmischer Komplexität und erzielbarer Genauigkeit geeigneten Kompromiss dar.

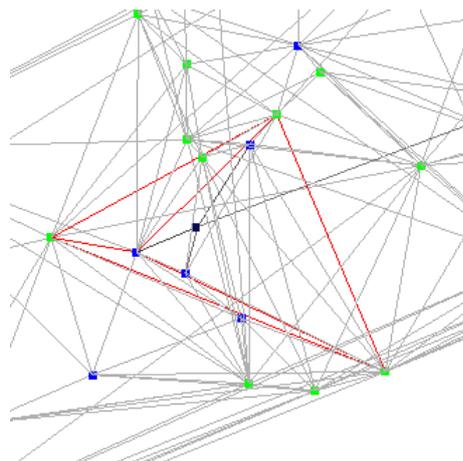


Abbildung 3: Darstellung einer Raumabschnittszerlegung zur lokal, linearen Korrektur anhand bekannter Kalibriertargets (blau, grün) und der Lage eines Testtargets (schwarz)

Der Schlüssel für den erfolgreichen Einsatz der lokalen Kalibrierung ist die Bereitstellung von nicht metameren¹ Kalibriertargets in ausreichender Anzahl möglichst innerhalb des applikativ bestimmten, d.h. durch die

¹ Metamere Targets besitzen für die verwendeten Lichtarten bei der Realisierung des Ist- oder Sollfarbraums (nahezu) identische Farbvalenzen.

Messaufgabe festgelegten Farbraumabschnitts. Da die lokale Abbildungsvorschrift auf lediglich vier Punkten beruht, wird zur Gewährleistung des Lokali t sprinzips und zur Realisierung regulärer Raumabschnitte in den Farbräumen zudem eine geeignete Verteilung der Targets gefordert. Aufgrund der im Vorfeld nicht bekannten Komplexität des zu approximierenden Zusammenhangs, ist eine gleichmässige, höchstmögliche Stützstellendichte im Ist-Farbraum hierbei der Idealfall. Das Auftreten irrelevanter Stützstellen wirkt aufgrund des lokalen Ansatzes dabei nicht störend. Im Gegensatz zu den approximierenden, globalen Ansätzen können Farbvalenzen außerhalb des durch die Kalibriertargets beschriebenen Bereiches ohne spezielle Behandlung dieses Sonderfalls (z.B. hier durch regressive Extrapolation unter Einbeziehung der nächsten Nachbarn) nicht oder nur eingeschränkt korrigiert werden. Es ist daher von Vorteil, wenn der gesamte applikativ bestimmte Farbraumabschnitt in ausreichendem Maße mit Kalibriertargets umgeben ist.

2.3 Demonstrationsbeispiel

Zur Veranschaulichung der Wirkungsweise und des Leistungsvermögens der Farbkalibrierung wird mit jedem einzelnen Verfahren folgende Kalibrierungsaufgabe gelöst:

Die digitalen Ausgangsdaten einer realen Bildaufnahmeanordnung², bestehend aus einer RGB-Matrixkamera und einer Beleuchtung mit weißen LED's, sollen derart korrigiert werden, dass ein möglichst geringer mittlerer Farbfehler für den gesamten Farbraum bei Annahme einer Tageslichtbeleuchtung (D65) und eines 2 -Normalbeobachters verbleibt. Zur Belehrung der Kalibrierverfahren wird der MDC-Targetsatz verwendet. Die Bestimmung der Restfehler erfolgt mit dem DIN-Targetsatz, dessen Targets vom MDC abweichende Farborte aufweisen. Zur Beurteilung der unterschiedlichen Wirkungsweise bei unbunten / ungesättigten sowie nahezu gesättigten Farben erfolgt die Berechnung des mittleren Farbfehlers für die Teiltargets tze DIN-U und DIN-S separat. In den jeweiligen Abbildungen zu den Kalibrierverfahren werden die Soll- und Istfarben der einzelnen Targets in Farbfeldern gegenübergestellt sowie die numerischen Werte der Farbabweichungen eingezeichnet. Zur besseren Beurteilung der Farbabweichung erfolgt zusätzlich eine Darstellung in der L*a*b*-Chrominanz-Farbebene. In Abbildung 4 sind für den unkorrigierten Fall zudem Luminanzabweichungen und Farbfehler in der Normfarbtafel (Ausschnitt) dargestellt.

² Einzelheiten zu Targetsätzen, Sensor- und Beleuchtungskennlinien können dem Anhang bzw. Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** entnommen werden.

Fehler (dE_{ab}) pro Target / mittlerer Fehler pro Targetsatz

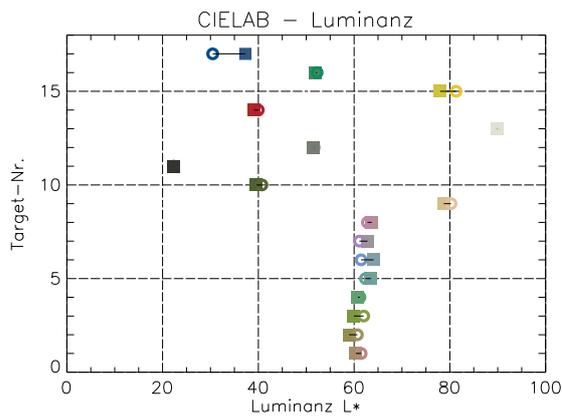
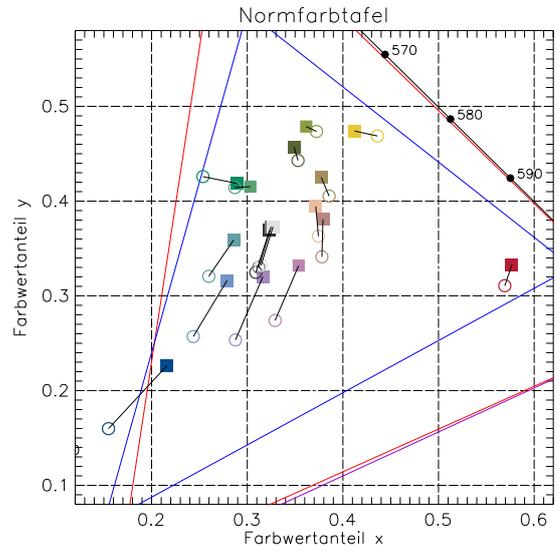
DIN-U: 13.95

$dE: 15.91$	$dE: 8.04$	$dE: 4.49$	$dE: 5.88$
$dE: 13.05$	$dE: 22.44$	$dE: 27.62$	$dE: 24.39$
$dE: 15.39$	$dE: 3.47$	$dE: 7.82$	$dE: 13.27$
$dE: 19.62$			

DIN-S: 13.42

$dE: 9.47$	$dE: 12.28$	$dE: 12.97$	$dE: 18.95$
------------	-------------	-------------	-------------

DIN gesamt: 13.83



Sollfarben: linke Farbfläche bzw. Ringe in CIELAB-Tafel
 Istfarben: rechte Farbfläche bzw. Quader in CIELAB-Tafel

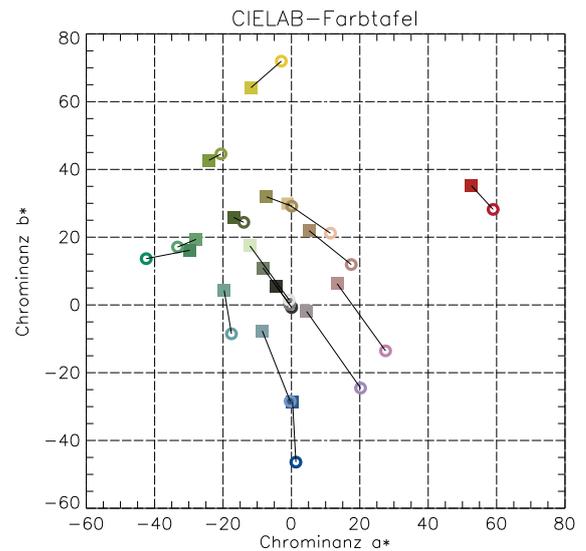


Abbildung 4 Demonstrationsbeispiel – Farbabweichung vor der Farbkorrektur

Fehler (dE_{ab}) pro Target / mittlerer Fehler pro Targetsatz

DIN-U: 2.15

dE : 1.15	dE : 3.61	dE : 0.82	dE : 3.17
dE : 1.15	dE : 0.98	dE : 3.56	dE : 2.19
dE : 2.42	dE : 1.51	dE : 5.14	dE : 1.52
dE : 0.76			

DIN-S: 5.94

dE : 4.76	dE : 4.37	dE : 7.37	dE : 7.28
-------------	-------------	-------------	-------------

DIN gesamt: 3.04

Sollfarben: linke Farbfläche bzw. Ringe in CIELAB-Tafel
Istfarben: rechte Farbfläche bzw. Quader in CIELAB-Tafel

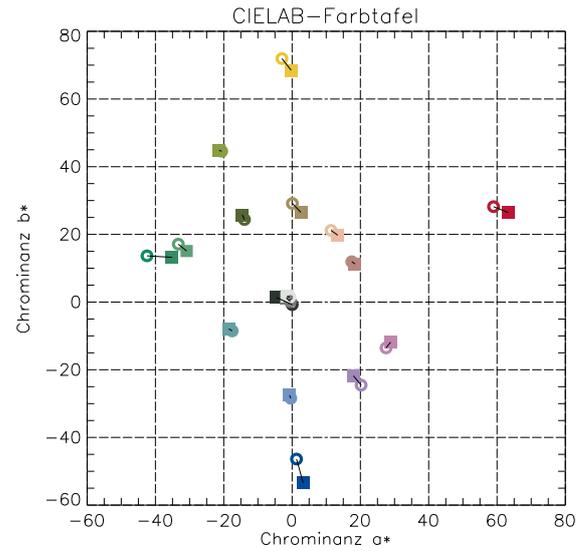


Abbildung 5 Demonstrationsbeispiel - Restfehler nach der quadratischen Regression ($mType = SECOND_ORDER$)

3 Hinweise zur Verfahrens- und Targetauswahl

3.1 Gegenüberstellung der Kalibrierverfahren

Die targetbasierten Verfahren bilden eine gute Grundlage zur Lösung von Farbraumkorrekturen in der praktischen Anwendung. Die Verfahren weisen unterschiedliche Komplexität und Anforderungen auf. Die erreichbare Güte³ der Farbkalibrierung hängt dabei von mehreren Einflussfaktoren und Randbedingungen ab und kann letztlich nur für den konkreten Anwendungsfall benannt werden.

Zu den gütebestimmenden Faktoren zählen im Wesentlichen:

- Spektrale Kennlinien des Sensors und der Beleuchtung, Übertragungskennlinie im Aufnahme-kanal⁴ (Ist-Bedingungen, gerätespezifischer Ist-Farbraum)
- Auswahl der Sollvorgaben (Lichtart, Color-Matching-Funktion)
- Freiheitsgrade der Abbildungsvorschrift und Optimierungskriterium
- Anzahl, Verteilung und Wichtung der Farbtargets

Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Farbkalibrierung ist die Auswahl farbtauglicher Sensorik und Beleuchtung. Die spektrale Empfindlichkeiten der mehrkanaligen Sensorik sollte über eine Abbildungsvorschrift (Matrizierung) mit möglichst geringen Freiheitsgraden der gewählten Color-Matching-Funktion (CMF, z.B. XYZ-Normspektralwertfunktion) angenähert werden können. Gleiches gilt für die Beleuchtung, dessen Spektrum⁵ möglichst der vorgegeben Soll-Lichtart entspricht oder über einfache Abbildung adaptierbar ist.

In Abhängigkeit von der Zielstellung des konkreten Anwendungsfalls und den bestehenden Ist-Bedingungen sind die Sollvorgaben auszuwählen.

Eine Zielstellung besteht oft in der fehlerminimalen Farbkorrektur bezüglich der menschlichen Wahrnehmung. Dabei werden als Sollvorgaben eine von der CIE definierte XYZ-Normspektralwertfunktion (2°- oder 10°-Normalbeobachter) und eine Normlichtart (A, D65) gewählt. Falls Einfluss auf die Ist-Bedingungen genommen werden kann, sind diese entsprechend den Normvorgaben zu optimieren. Aufgrund mangelnder bzw. unrentabler Technologie ist dies oft nur eingeschränkt möglich. Für die gewählte Beleuchtung ist dabei generell ein über den gesamten sichtbaren Spektralbereich (VIS) breitbandiges Beleuchtungsspektrum mit möglichst wenigen Spitzen (Peaks) anzustreben.

Bei einer Reihe von Anwendungen, insbesondere Anwendungen der industriellen Farbklassifikation, ist die Farbkalibrierung hinsichtlich der CIE-Normierung nicht erforderlich. Die Zielstellung der Farbkalibrierung besteht hier zumeist in der Reproduzierbarkeit von Farbmessungen, wobei Exemplarstreuungen von Sensor und Beleuchtung sowie Alterungserscheinungen korrigiert werden müssen. Als Color-Matching-Funktionen können hier beispielsweise die durchschnittlichen spektralen Empfindlichkeiten des mehrkanaligen Sensors dienen. Das durchschnittliche Beleuchtungsspektrum des Leuchtmittels lässt sich als Soll-Lichtart nutzen. Bei Unkenntnis des exakten Beleuchtungsspektrums kann alternativ auch auf die von der CIE definierten technischen Lichtarten (z.B. F1-F12) zurückgegriffen werden. Diese Zielstellung stellt geringere Anforderungen an die Farbkalibrierung als die Farbkorrektur bezüglich der CIE-Normierung. Die Vorgaben an Sensor und Beleuchtung für eine qualitativ hochwertige Farberfassung bleiben davon jedoch unberührt.

³ gemessen am mittleren Restfehler eines Testtargetsatzes

⁴ Datenerfassung und hardwarenahe Signalverarbeitung

⁵ sichtbarer Bereich, bei Fluoreszenzeffekten auch UV

Mit Zunahme der Freiheitsgrade bzw. der Komplexität einer Abbildungsvorschrift lassen sich nicht lineare Zusammenhänge zwischen den spektralen Ist- und Sollfunktionen besser modellieren. Damit steigt auch das Potential für eine qualitativ hochwertige Farbkorrektur. Bei der globalen Farbkalibrierung mittels polynomialer Regression sinkt beispielsweise der Restfehler eines Targetsatzes mit Zunahme des Polynomgrades bzw. der Polynomkoeffizientenanzahl deutlich (siehe Tabelle 1). Die erhöhte Koeffizientenanzahl führt jedoch zu einem erhöhten Rechenaufwand und einer größeren Anzahl⁶ von erforderlichen Farbtargets, so dass bei der Auswahl des Polynomgrades meist ein Kompromiss eingegangen werden muss.

Verfahren			Kalibrierung + Test			Test		
			MDC			DIN		
	Besonderheit	Koeff. ⁷	Optimier.-Krit.			Optimier.-Krit.		
			$\overline{dE}_{\text{Lab}}$	$\overline{dE}_{\text{Lab}}^2$	$\overline{dE}_{\text{XYZ}}^2$	$\overline{dE}_{\text{Lab}}$	$\overline{dE}_{\text{Lab}}^2$	$\overline{dE}_{\text{XYZ}}^2$
ohne Korrektur	-	-	14,03	226,67	81,98	13,83	237,78	101,66
Skalierung	-	1	7,64	86,9	16,05	8,17	97,85	18,99
Skalierung+Offset	-	2	7,66	79,68	15,26	8,48	94,88	17,34
lineare Transformation	-	3	3,83	24,16	3,12	4,11	31,11	6,11
	Lab-optimiert		3,71	19,79	6,06	4,05	25,39	9,83
lineare Regression	-	4	4,15	25,09	2,97	4,45	30,96	5,54
polynomiale Regression 2.Grades	Y: linear	7	3,82	22,37	2,65	3,95	25,88	4,97
	-	10	2,68	11,36	1,32	3,04	13,61	2,9
	Lab-optimiert		2,68	11,36	1,32	3,05	13,56	2,89
polynomiale Regression 3.Grades	Y: linear	11	3,73	22,51	2,41	3,55	23,01	3,6
	-	20	1,98	6,58	0,67	2,25	9,62	1,51
	Lab-optimiert		1,98	6,58	0,67	2,24	9,62	1,52
Lokale, lineare Korrektur	Extrapolation NN-Regression	4	0,00	0,00	0,00	2,08	6,88	1,17

Tabelle 1 Gegenüberstellung der Kalibrierverfahren am Beispiel der Targetsätze MDC (Kalibrierung und Test) sowie DIN (nur Test), die mittleren Restfehler des jeweiligen Optimierungskriteriums sind gelb, des Kalibrier-Targetsatzes (MDC) blau und des unabhängigen Test-Targetsatzes (DIN) grün dargestellt

Aus Tabelle 1 ist ersichtlich, dass durch die Kalibrierverfahren der mittlere Restfehler⁸ im CIE-L*a*b-Farbraum erheblich reduziert wird. Eine deutliche Verringerung des Restfehlers wird beim Übergang von der kanalweisen Skalierung zur linearen Transformation erreicht. Die Einbeziehung eines kanalweisen Offsets führt dagegen zu keiner nennenswerten Ergebnisverbesserung, was in der Natur der vorliegenden Kalibrierungsaufgabe begründet ist. Bei der polynomialen Regression sinkt der Restfehler mit zunehmender Koeffizientenanzahl weiter ab. Im vorliegenden Demonstrationsbeispiel werden die besten Resultate mit der lokalen, linearen Korrektur erreicht, wobei Testtargets außerhalb des Triangulationskörpers durch Regression der nächsten Nachbarn abgebildet werden. Durch nicht lineare Optimierung im CIE-L*a*b-Farbraum kann insbesondere bei Transformationen mit geringer Koeffizientenanzahl eine Verbesserung erreicht werden.

⁶ mindestens Koeffizientenanzahl + 1

⁷ Koeffizienten pro Farbkanal und Teilraum

⁸ Zum Verständnis der Tabellenwerte ist zu beachten, dass bei dem verwendeten LSE-Optimierungsansatz die Summe der Farbabweichungsquadrate im jeweiligen Optimierungsfarbraum (gelb dargestellt) minimiert wird. Neben der nicht linearen Transformation der Farbabstände in den CIE-L*a*b-Farbraum führt dies dazu, dass trotz Zunahme der Koeffizientenanzahl vereinzelt größere Restfehlersummen auftreten.

Bei Betrachtung der benötigten Rechen- und Speicherperformance muss zwischen der Farbkalibrierung (Bestimmung der Abbildungsvorschrift) und der eigentlichen Farbkorrektur (Abbildung) unterschieden werden.

Bei den globalen Verfahren wächst der Aufwand für Kalibrierung und Korrektur gleichermaßen mit der Zunahme der Koeffizienten. Somit stellt die kanalweise Skalierung in beiderlei Hinsicht das schnellste Verfahren aller betrachteten Kalibrieransätze dar. Die polynomiale Regression 3. Grades ist bei den globalen Verfahren am rechenintensivsten. Die Struktur der Abbildungsvorschrift ermöglicht jedoch eine einfache Hardwareimplementierung für die Farbkorrektur, so dass trotz großer Koeffizientenzahl ein hoher Datendurchsatz erreicht werden kann. Für die Kalibrierung ist ebenfalls eine Hardwareumsetzung, wenn auch wesentlich komplexer, denkbar. Bei Anwendung der nicht linearen Optimierung im $L^*a^*b^*$ -Farbraum muss für die Kalibrierung ein starker Zuwachs an Rechenzeit in Kauf genommen werden. Die Rechenzeit ist zudem datenabhängig, was eine Zeitabschätzung erschwert. Da sich die Struktur der Abbildungsvorschrift nicht ändert, verursacht die anschließende Farbkorrektur identische Rechenzeiten und Speicheraufwände wie Verfahren ohne nicht lineare Optimierung.

Bei der lokalen, linearen Kalibrierung ist im Vergleich zu den globalen Verfahren zusätzlicher Rechenaufwand für die Triangulation sowie für die Organisation einer effizienten Suchstruktur erforderlich. In Verbindung mit der linearen Abbildungsvorschrift (vier Koeffizienten pro Teilfarbraum) sind dennoch relativ geringe Rechenzeiten für die Kalibrierung möglich. Bei der Korrektur wirkt sich vor allem die Suche nach dem zugehörigen Raumabschnitt in der Datenpräsentation (Baumstruktur) verzögernd aus, so dass die Performance der globalen Verfahren in der Regel nicht erreicht wird. Im Gegensatz zu den globalen Verfahren wachsen Rechenzeit und Speicherbedarf für die Korrektur mit der Anzahl der Kalibriertargets.

3.2 Auswahl der Farbtargets

Die Qualität der Farbkalibrierung wird weiterhin durch die verwendeten Farbtargets beeinflusst. Dabei sind Anzahl, Verteilung im Farbraum und Wichtung der Targets maßgeblich.

Die minimal erforderliche Anzahl der Farbtargets zur Bestimmung einer Abbildungsvorschrift ergibt sich aus deren Freiheitsgraden. Für die globalen Kalibrierverfahren bedeutet dies, dass die Targetanzahl⁹ größer als die Koeffizientenzahl¹⁰ sein muss. Diese minimale Targetmenge ist eine notwendige Bedingung für die Lösbarkeit des LSE-Ansatzes, für eine qualitativ hochwertige Kalibrierung ist sie jedoch selten ausreichend. Insbesondere die polynomialen Regressionsansätze erfordern wesentlich mehr Targets als zur Gewährleistung der numerischen Lösbarkeit notwendig sind. Hinsichtlich der Algorithmik besteht keine obere Begrenzung der Targetanzahl. In der Praxis wird die Targetanzahl jedoch durch die Summe der Kosten (Herstellungskosten, Targetfläche, Rechenaufwand etc.) limitiert.

Im Allgemeinen ist eine möglichst gleichmäßige und dichte Verteilung der Farbtargets im gesamten Farbraum anzustreben. Durch diese gleichmäßige, hohe Stützstellendichte kann jeder Teilraum optimal im Rahmen der Freiheitsgrade einer Abbildungsvorschrift korrigiert werden. Unbesetzte oder spärlich besetzte Regionen können die Abbildungsvorschrift nicht oder nur ungenügend einschränken, was vor allem bei hohen Freiheitsgraden zu fatalen Fehlkorrekturen in diesen Regionen führen kann. Tabelle 2 bzw. Abbildung 6 und Abbildung 7 verdeutlichen dies für die polynomiale Regression 3. Grades. Der hier verwendete Kalibriertargetsatz (MCC) reicht mit 24 Stützstellen nicht für die Korrektur im gesamten Farbraum aus. Dagegen führt

⁹ Hier zählen grundsätzlich nur Targets mit unterschiedlichen Farbtönen.

¹⁰ pro Farbkanal

eine Erhöhung der Targetanzahl und verbesserte Positionierung im Farbraum, wie sie beispielsweise beim MSG-Targetsatz vorliegt, zu guten Ergebnissen.

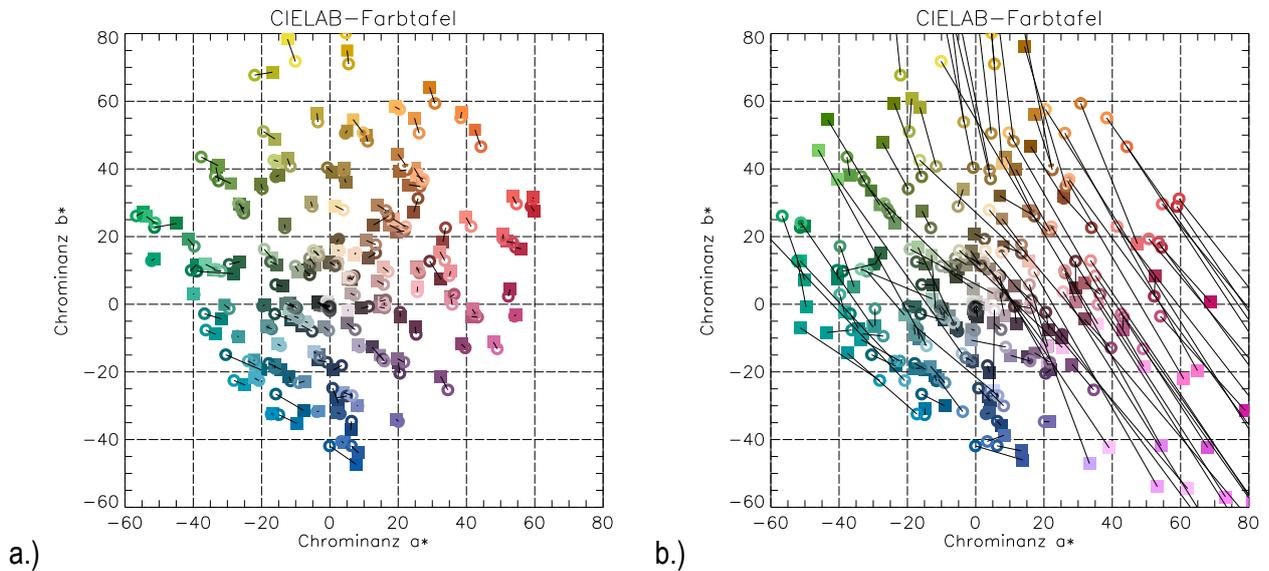


Abbildung 6 Restfehler für den Targetsatz MDC nach der polynomialen Regression 3. Grades mit a.) gut besetztem Kalibriertargetsatz MSG und b.) spärlich besetztem Kalibriertargetsatz MCC, Farborte der Sollfarben sind ringförmig und die Farborte der Istfarben sind quadratisch dargestellt

Fehler (dE_{ab}) pro Target / mittlerer Fehler pro Targetsatz

DIN-U: 14,27

dE : 2.16	dE : 13.21	dE : 15.37	dE : 18.89
dE : 3.46	dE : 16.20	dE : 8.37	dE : 14.68
dE : 75.27	dE : 6.26	dE : 2.87	dE : 0.21
dE : 8.55			

DIN-S: 27,79

dE : 35.31	dE : 45.73	dE : 9.81	dE : 20.31
--------------	--------------	-------------	--------------

DIN gesamt: 17.45

Sollfarben: linke Farbfläche bzw. Ringe in CIELAB-Tafel
Istfarben: rechte Farbfläche bzw. Quader in CIELAB-Tafel

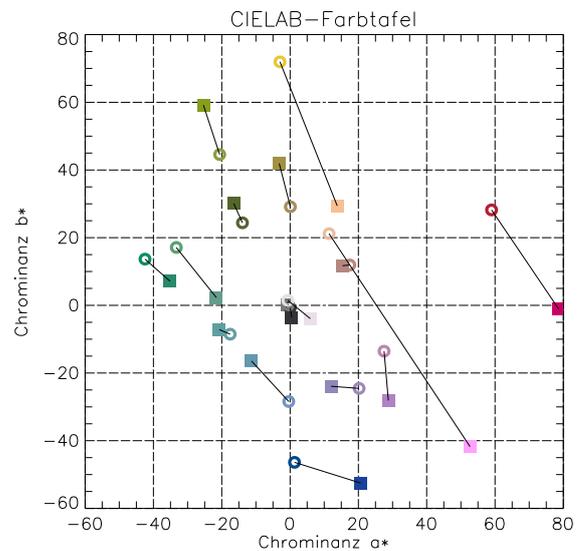


Abbildung 7 Demonstrationsbeispiel - Restfehler nach der polynomialen Regression 3. Grades mit spärlich besetztem Kalibriertargetsatz (MCC)

Ein besonderes Augenmerk bei der Targetauswahl kommt dem Hüllbereich des applikativ genutzten Teilfarbraums zu. Vor allem bei der lokalen Kalibrierung und den polynomialen Regressionsverfahren sind zur Vermeidung von fehlerträchtigen Extrapolationen¹¹ Farbtargets am Rand des genutzten Teilfarbraums zu platzieren.

¹¹ Bei lokalen Kalibrieransätzen muss eine Ausnahmebehandlung mittels Regression der Nachbartargets erfolgen. Bei der polynomialen Regression besteht die Gefahr von Fehlkorrekturen durch mangelnde Stützstellendichte.

Generell und bei den lokalen Kalibrierverfahren¹² besonders ist auf die Verwendung von nicht metameren¹³ Farbtargets zu achten. Dabei bezieht sich die Metamerie auf die jeweiligen Soll-Vorgaben und Ist-Bedingungen (Lichtart, CMF). Durch gezielte Targetauswahl ist also zu vermeiden, dass zwei Farbtargets mit unterschiedlichem Spektrum unter Soll-Vorgaben auf getrennte Farborte abgebildet werden, während gleichzeitig unter Ist-Bedingungen ein und derselbe Farbort vorliegt. Gleiches gilt in umgekehrten Richtung, wobei mit dieser Form der Metamerie besser umgegangen werden kann.

Über die Realisierung einer gleichmäßigen und dichten Targetverteilung im Farbraum hinaus, kann in Abhängigkeit von der Applikation eine Targetwichtung zur Verbesserung der Farbkalibrierung beitragen. Damit lassen sich sinnbildlich zusätzliche virtuelle Targets generieren, welche die Ausgleichsrechnung in die gewünschte Richtung beeinflussen. In einem gut besetzten Farbraum kann beispielsweise eine stärkere Targetwichtung in Teilräumen mit hoher Dichte zu einer statistischen Verbesserung des Gesamtfehlers beitragen. Es ist zu erwähnen, dass durch die Wichtung keine zusätzlichen Stützstellen im Farbraum entstehen, womit die Wichtung keinen vollwertigen Ersatz für physisch vorhandene Targets darstellt.

Bei einer Reihe von Applikationen ist die Abdeckung des gesamten Farbraums nicht zwingend erforderlich und nicht selten kontraproduktiv. Durch Konzentration auf den applikativ betrachteten Teilfarbraum sind geringere Restfehler bei vergleichsweise niedriger Targetanzahl möglich. So kann beispielsweise für eine Anwendung in der Dentalmedizin (z.B. Farbmessung an Zähnen zur Farbanpassung von Prothesen) die Targetauswahl auf den Teilraum der möglichen Zahnfarben beschränkt werden.

Zur Veranschaulichung der Effekte bei der Targetauswahl wurden kommerziell verfügbare Targetsätze mit unterschiedlicher Targetanzahl und Verteilung (siehe Anhang) zur gegenseitigen Kalibrierung und Prüfung verwendet. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse für zwei globale Verfahren (lineare Transformation und polynomiale Regression 3. Grades) sowie für die lokale, lineare Kalibrierung aufgeführt.

Test-targets	keine Kalib.	Kalibriertargets											
		DIN (17)			MCC (24)			MSG (78)			MDC (168)		
DIN	13,83	4,38	- ¹⁴	0,00 (0)	4,13	17,45	1,79 (47)	4,33	2,91	3,27 (6)	4,11	2,25	2,18 (18)
MCC	14,96	4,21	-	4,61 (46)	3,90	1,00	0,00 (0)	4,62	3,04	1,79 (0)	4,46	3,10	2,06 (17)
MSG	15,35	6,72	-	4,46 (83)	6,32	41,73	2,60 (83)	5,08	2,90	0,00 (0)	5,85	3,71	2,29 (69)
MDC	14,03	4,42	-	4,04 (53)	4,17	30,09	2,59 (47)	4,05	2,53	3,53 (20)	3,83	1,98	0,00 (0)

Tabelle 2 Gegenseitige Kalibrierung und Prüfung mit unterschiedlichen Targetsätzen; mittlere Farbabweichung $\overline{dE}_{\text{Lab}}$ des jeweiligen Testtargetsatzes ohne Kalibrierung (rot), mit linearer Transformation (grün), mit polynomialer Regression (gelb) und mit lokaler, linearer Kalibrierung ohne Extrapolation (cyano, prozentualer Anteil unkorrigierter Targets in Klammern); blaue, kursive Darstellung der Fehlerwerte bei Gleichheit von Kalibrier- und Testtargetsatz; Erhebliche Fehlerkorrekturen bzw. hohe prozentuale Anteile unkorrigierter Targets sind rot dargestellt

Aus Tabelle 2 ist ersichtlich, dass sich Targetanzahl und Targetverteilung in Abhängigkeit vom gewählten Kalibrierverfahren auf die Güte der Kalibrierung auswirken. Während bei der globalen, linearen Kalibrierung

¹² Der interpolierende Ansatz der lokalen Farbkalibrierung erlaubt keine Mehrdeutigkeiten in der Abbildung. Bei den approximierenden Verfahren ist die Lösbarkeit der Abbildungsaufgabe zwar nicht gefährdet, Mehrdeutigkeiten tragen jedoch kaum positiv zur Bestimmung der Abbildungsvorschrift bei.

¹³ Metamere Targets besitzen für die verwendeten Lichtarten bei der Realisierung des Ist- oder Sollfarbraums (nahezu) identische Farbvalenzen.

¹⁴ Für die polynomiale Regression 3. Grades reicht die Targetanzahl nicht aus.

bereits wenige Targets zum Erreichen einer hohen¹⁵ Kalibrierqualität ausreichen, sind bei der polynomialen Regression erheblich mehr Targets erforderlich. Für die lokale, lineare Korrektur ist insbesondere die Targetverteilung maßgeblich. So fällt die Anzahl der Testtargets, welche außerhalb des Triangulationskörpers liegen und einer Sonderbehandlung bedürfen, beim Targetsatz MDC trotz größer Targetanzahl erwartungsgemäß höher aus als beim Targetsatz MSG. Bei den Targetsätzen DIN und MCC ist dieser Anteil unakzeptabel groß und auch durch lokale Regression nur mit unbefriedigend Ergebnis behandelbar.

3.3 Anwendungsorientierte Auswahl der Kalibrierverfahren

Eine sinnvolle Auswahl von Kalibrierverfahren kann nur im Kontext des konkreten Anwendungsfalls erfolgen. In der Regel werden die Auswahlmöglichkeiten durch Zielvorgaben und Randbedingungen bereits erheblich eingeschränkt. Anhand einiger solcher Vorgaben und Randbedingungen (siehe Tabelle 3) sollen in Tabelle 4 Empfehlungen für einzelne Verfahren gegeben werden.

Nr.	Benennung	vorteilhafte Randbedingungen	nachteilige Randbedingungen
①	Targetsatz	Nicht metamere Targets sind in großer Anzahl und mit gleichmäßiger Verteilung im gesamten applikativ genutzten Farbraum nutzbar.	Kostenbedingt (z.B. Beschränkungen in der Targetfläche) steht nur eine geringe Anzahl an Targets (z.B. 10) zur Verfügung.
②	Spektrale Sensorempfindlichkeit	Optimierte spektrale Empfindlichkeitskennlinien mit linearer Beziehung zu genormten Color-Matching-Funktionen	Spektrale Empfindlichkeitskennlinien mit nicht linearer Beziehung zu genormten Color-Matching-Funktionen
③	Linearität der Sensorik	Lineares Verhalten des Sensors bzgl. der Beleuchtung, lineare Übertragungskennlinie bei der sensornahen Signalverarbeitung (im Aufnahmekanal), keine Offsets	Nicht lineare Übertragungskennlinien bei der Signalentstehung und in der Signalverarbeitungspipeline (im Aufnahmekanal), Offsets
④	Beleuchtung	Breitbandige Beleuchtung ohne dominante Peaks (möglichst Normlicht-Entsprechung), z.B. Halogenlampen, Xenon-Kurzbogen-Lampen	Breitbandige Beleuchtung mit deutlichen Peaks, z.B. Leuchtstofflampen, Halogen-Metaldampf-Lampen, weiße LED
⑤	Rechentechnik ¹⁶	Rechenleistung und Speicher für die Korrektur von Farbdaten (Einzel-, Serienmessung, Farbbilder etc.) mit Reserven vorhanden	Rechenleistung und Speicher sind limitiert (Sharing mit anderen Prozessen)
⑥	Zeitvorgabe für die Kalibrierung	Offline-Kalibrierung in Wartungszyklen oder Umrüstphasen, sonstige unkritische Zeitvorgaben	Schnelle Online-Kalibrierung zwischen/während Messungen (z.B. Bildaufnahme mit Targetfläche, dann Kalibrierung, dann Korrektur des Bildes)
⑦	Zeitvorgabe für die Korrektur	Großes Zeitbudget für die Einzelkorrektur, Online-Korrekturen mit niedrigen Taktraten und geringem Datenaufkommen	Hohe Korrekturgeschwindigkeit erforderlich, Online-Korrektur (z.B. Bilddaten in Video-Echtzeit)

Tabelle 3 Wesentliche Randbedingungen für die Bewertung des Einsatzes von Kalibrierverfahren, vorteilhafte (grün) und nachteilige (rot) Ausbildung

¹⁵ In Anbetracht des qualitativen Korrekturpotentials des jeweiligen Ansatzes

¹⁶ Es wird von einer universellen Rechenplattform (z.B. PC, keine Hardwareimplementierung von Algorithmen) ausgegangen.

Zielstellung	Randbedingungen	Globale Kalibrierverfahren							Lokale, lineare Kalib.
		Skalierung		Lineare Regr.		Polynom. Regression			
		-	Offset	-	L*a*b*	-	Y: lin.	L*a*b*	
① Farbkorrektur mit Bezug zur menschlichen Wahrnehmung, standardisierte Sollvorgaben (z.B. CIE L*a*b*, Normlicht); geringer Restfehler	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	-	-	○	+	+	+	++	++
	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	--	--	-	○	+	+	++	++
	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	--	--	-	○	+	○	++	++
	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	--	--	-	○	○	○	+	+
	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	-	-	○	-	○	○	-	+
	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	-	-	○	--	--	-	--	--
	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	--	--	-	--	--	--	--	--
② Farbkorrektur mit standardisierten Sollvorgaben (z.B. XYZ, Normlicht); geringer Restfehler	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	--	--	○	-	++	+	+	++
	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	--	--	-	-	++	○	○	++
	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	--	--	-	-	+	○	○	+
	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	-	-	○	--	+	+	--	○
	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	-	-	○	--	--	-	--	--
	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	--	--	-	--	--	-	--	--
③ Farbkorrektur mit standardisierten Sollvorgaben; größerer Restfehler zulässig (z.B. Umstimmung der Farbtemperatur)	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	-	○	+	○	++	+	+	++
	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	-	○	+	○	+	○	○	○
	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	+	+	++	--	--	+	--	--
	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	○	+	○	--	--	-	--	--
	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	-	-	-	--	--	--	--	--
④ Farbkorrektur zum Ausgleich von Exemplarstreuung und Alterung der Sensorik und Beleuchtung, keine standardisierten Sollvorgaben (z.B. durchschnittliche spektrale Sensor- und Beleuchtungskennlinien)	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	○	○	+	○	++	+	+	++
	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	-	-	○	-	++	+	+	++
	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	-	-	○	○	+	○	○	+
	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	○	○	+	-	+	+	-	○
	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	○	○	+	○	-	+	-	○
	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	○	○	+	○	-	○	-	-
	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	○	○	+	--	--	○	--	--
	① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	○	○	+	--	--	○	--	--
① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦	-	-	○	--	--	-	--	--	

Tabelle 4 Bewertung von Kalibrierverfahren im Kontext ausgewählter Zielvorgaben und Randbedingungen, Bewertung: sehr gut (++), gut (+), befriedigend (○), schlecht (-), sehr schlecht (--); beste Eignung (grün)

Der konkrete Anwendungsfall wird sich nur selten deckungsgleich auf einen der in Tabelle 4 skizzierten Fälle abbilden lassen. Die Empfehlungen können aber als grobe Richtlinie für die Verfahrensauswahl dienen.

Beispiele: ① ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ Typische Kalibrierungsaufgabe für punktförmig messende Farbsensoren

④ ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ Typische Kalibrierungsaufgabe zur Reproduzierbarkeit von Farbbilddaten

einer CCD-Kamera (Offline-Kalibrierung mit kompaktem Kalibrierkörper)

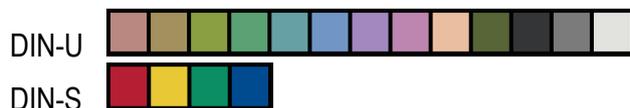
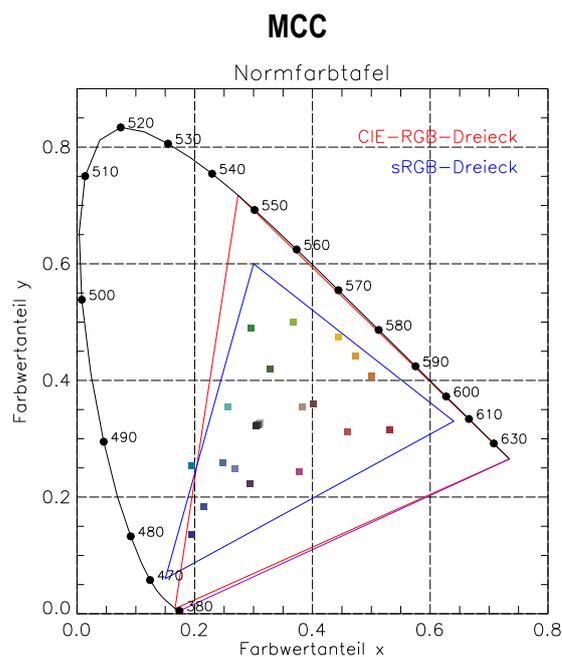
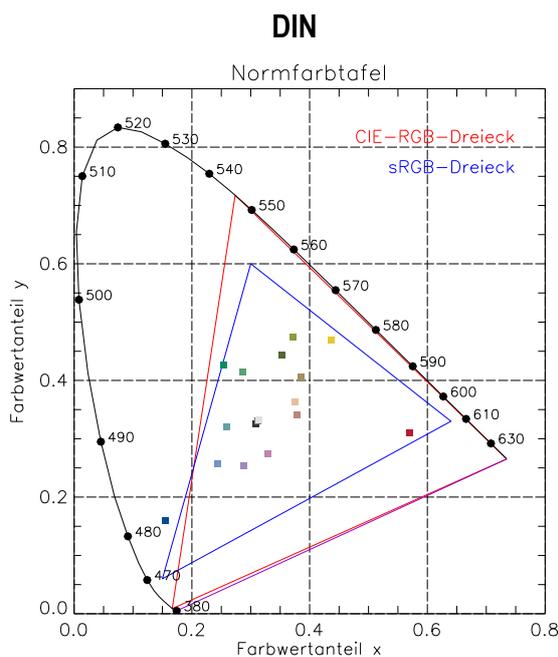
Anhang

A. Farbtargetsätze

Für die Demonstration der Eigenschaften der Kalibrierverfahren und deren Parametrierung werden Targetsätze genutzt, welche kommerziell als Farbcharts verfügbar sind. Im Einzelnen sind dies

- DIN – Testfarbensatz (DIN),
- Macbeth Color Checker (MCC),
- Macbeth Color Checker SG (MSG),
- Macbeth Color Checker DC (MDC).

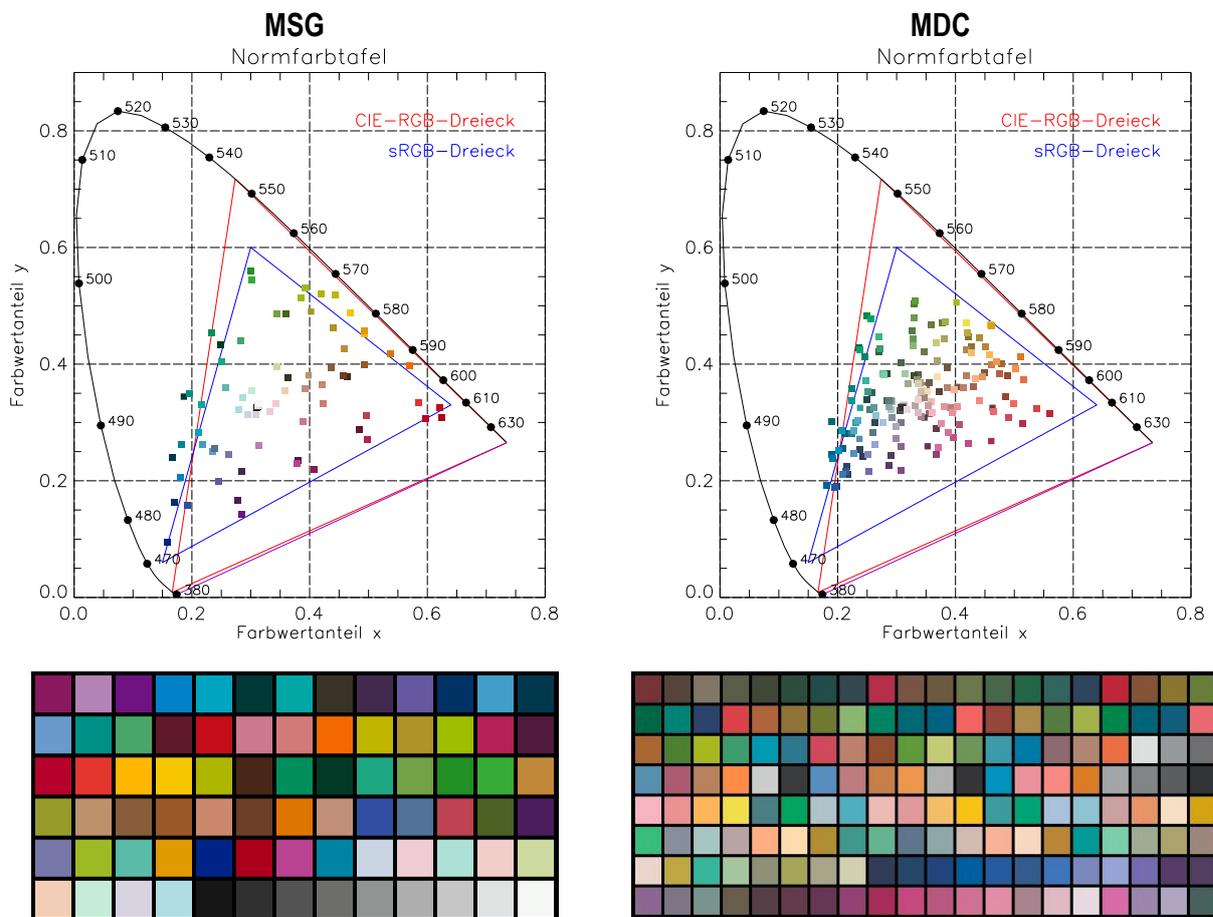
In dieser Dokumentation werden die Bezeichnungen in Klammern zur Kennzeichnung der Targetsätze genutzt. Für die bessere Veranschaulichung einiger Eigenschaften wird der DIN-Testfarbensatz nach der Farbsättigung in zwei Gruppen, ungesättigt und unbunte Farben (DIN-U) und nahezu gesättigte Farben (DIN-S), unterteilt. Zur Optimierung der Targetverteilung wurden die umfangreicheren Targetsätze (MSG, MDC) reduziert. Weitere Erläuterungen der einzelnen Farbsätze enthalten die nachfolgenden Abbildungen.



17 Farbtargets (in DIN 6169 Teil 6 definiert):
1-8: Targets mit mittlerer Buntheit und ähnlichem Hellbezugswert ($Y \approx 30$); **9-12:** Targets mit höherer Buntheit und unterschiedlichem Hellbezugswert; **13:** helle Hautfarbe; **14:** blattgrün; **15-17:** Graukeil;
 Targets 1-8 und 13-17 zu DIN-U zusammengestellt,
 Targets 9-12 zu DIN-S zusammengestellt

24 Farbtargets des Macbeth ColorChecker Color Rendition Chart:
1-12: Targets mit unterschiedlicher Buntheit, teilweise mit Bezug zu natürlichen Objekten (z.B. himmelblau, blattgrün, dunkle und helle Hautfarbe); **13-18:** Primärfarben (R,G,B,Ye,Mg,Cy); **19-24:** Graukeil

Abbildung 8 Ausgewählte, kommerziell verfügbare Targetsätze mit geringer Targetanzahl



78 ausgewählte Targets aus 140 Targets des **GretagMacbeth ColorChecker SG** (semi gloss): Für die digitale Photographie entwickelt (Farbmanagement von Digitalkameras, Weißabgleich, Shadingkorrektur, Erfassung von ICC-Profilen), Oberfläche: seidenmatt

Im Original enthalten: 24 Macbeth ColorChecker Targets (Achtung: abweichende Farborte), 9 weitere unbunte Targets (Graukeil), 14 weitere Hauttöne, 9 weitere Near-Neutral-Farben, 40 weitere Targets mit hoher Buntheit und unterschiedlichem Hellbezugswert, 44 Targets (3 unterschiedliche Grautöne) als Chart-Rahmen (für Weißabgleich und Shadingkorrektur)

Bei der Auswahl wurde vor allem eine Reduzierung der unbunten Targets und Hauttöne vorgenommen.

168 ausgewählte Targets aus 237 Targets des **GretagMacbeth ColorChecker DC**:

Für die digitale Photographie entwickelt (Farbmanagement von Digitalkameras, Weißabgleich, Shadingkorrektur), Oberfläche: matt, 8 Targets hochglänzend

Im Original enthalten: 168 Targets mit unterschiedlicher Buntheit und Hellbezugswert (inklusive Grauskala) und gleichmäßiger Verteilung im Farbraum, 8 hochglänzende Farbfelder (Primärfarben: R, G, B, Mg, Ye, Cy; Schwarz, Weiß), 60 Targets (3 unterschiedliche Grautöne) als Chart-Rahmen und ein zentrales, großflächiges Weißtarget (für Weißabgleich und Shadingkorrektur)

Die Auswahl enthält die 168 gleichmäßig verteilten Farbtargets.

Abbildung 9 Ausgewählte, kommerziell verfügbare Targetsätze mit hoher Targetanzahl

B. Beleuchtungs- und Sensordaten für die Demonstration

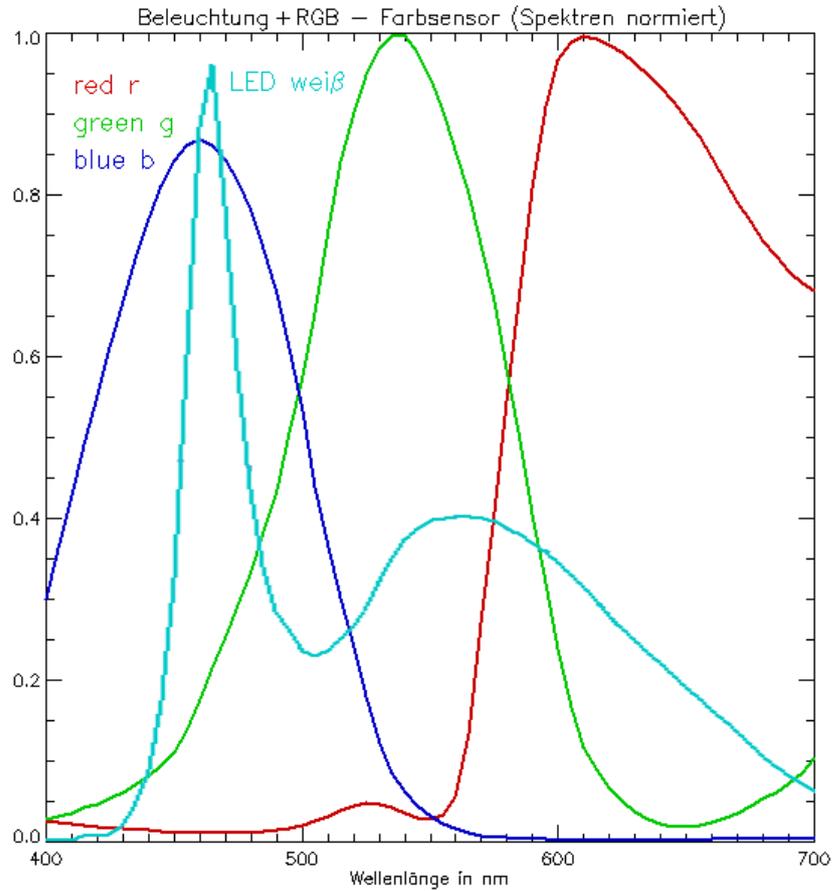
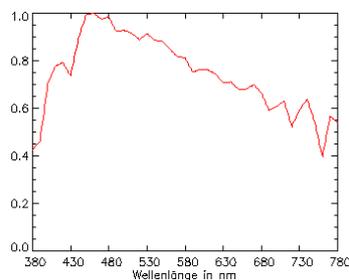


Abbildung 10 Ist-Bedingungen des Demonstrationsbeispiels - spektrale Kennlinien eines RGB-Sensors und der LED-Beleuchtung

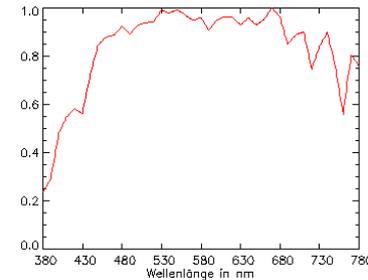
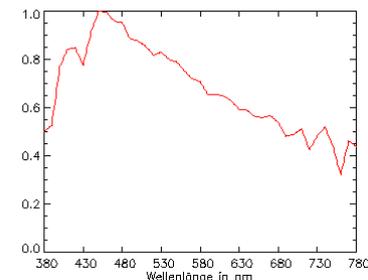
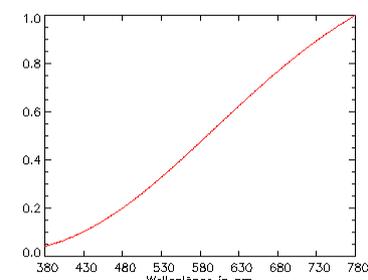
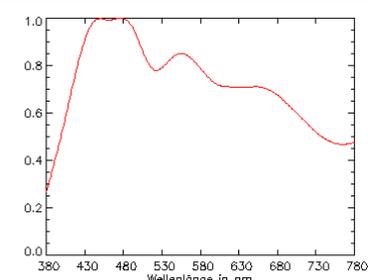
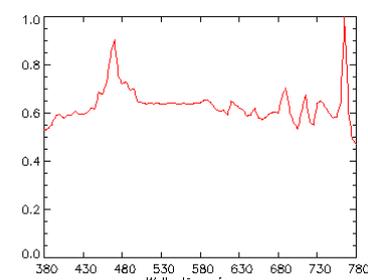
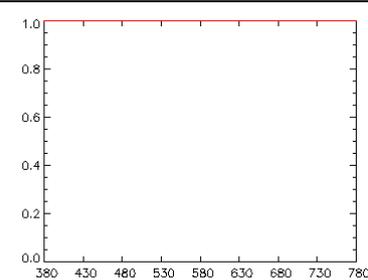
C. Normlichter

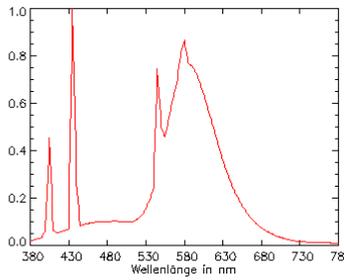
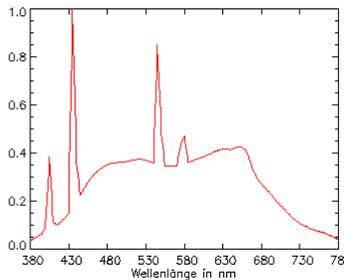
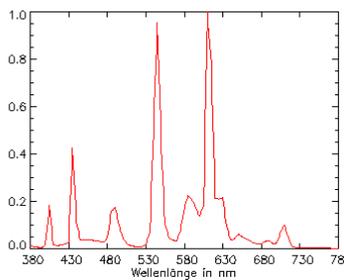
CIE-Normlichtarten (CIE Standard Illuminants) gemäß DIN 5033 (Teil 7), DIN 6172

D65



1964 eingeführt repräsentiert das durchschnittliche Tageslicht (Farbtemperatur $T = 6500$ K) ohne Bezug zu einer technisch realisierbaren Lichtquelle

D50		1964 eingeführt repräsentiert das durchschnittliche Tageslicht (T = 6500 K) ohne Bezug zu einer technischen Lichtquelle
D75		1964 eingeführt repräsentiert das durchschnittliche Tageslicht (T = 7500 K)
A		1931 eingeführt repräsentiert eine Glühlampen-Lichtquelle (T = 2856K)
C		1931 eingeführt repräsentiert das durchschnittliche Tageslicht (T = 6774 K)
XE		angenäherte Beschreibung von Xenon-Hochdruck-Kurzbogenlampen
E		äquienergetische Modellbeleuchtung

F4		gewöhnliche repräsentative Fluoreszenzlampe aus CIE-Publ.Nr 15.2.
F8		repräsentative breitbandige Fluoreszenzlampe aus CIE-Publ.Nr 15.2.
F12		repräsentative schmalbandige Fluoreszenzlampe aus CIE-Publ.Nr 15.2.