

## Farbkalibrierung mittels linearer Transformation

J. Michel<sup>1</sup>, V. Hong<sup>1</sup>, D. Paulus<sup>1</sup>, C. Münzenmayer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Computervisualistik, Universität Koblenz-Landau, Universitätsstr. 1, 56070  
Koblenz – Germany, {jmichel,hong,paulus}@uni-koblenz.de

<sup>2</sup> Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, Am Wolfsmantel 33,  
91058 Erlangen mzn@iis.fraunhofer.de

**Zusammenfassung.** In diesem Paper wird ein zweistufiges Verfahren zur Farbkalibrierung vorgestellt, welches auf [2, 6, 5] basiert. Unter Farbkalibrierung ist in diesem Kontext die farbmetrische Charakterisierung und die Normierung von Bilderfassungsgeräten zu verstehen, die dem Ziel dient, aufgenommene Szenen in Szenen unter zuvor definierten Referenzbedingungen zu überführen. Ausgangspunkt für das Verfahren ist eine Referenzszene, die unter zuvor festgelegten Bedingungen aufgenommen wurde. Weiterhin existiert eine Menge von zu kalibrierenden Szenen, die unter gleichen Bedingungen aufgenommen wurden. Im ersten Schritt des Verfahrens wird eine lineare Transformation bestimmt, die die Farbwerte der zu kalibrierenden Szenen auf die der Referenzszene abbildet. Im zweiten Schritt werden mit der ermittelten Transformation die zu kalibrierenden Szenen in Szenen unter Referenzbedingungen überführt.

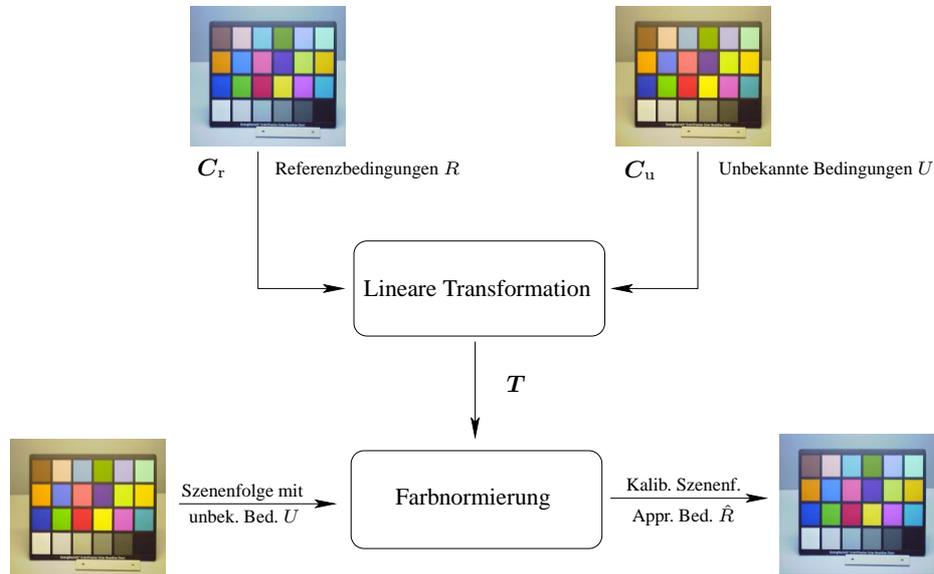
### 1 Einleitung

Eine in der digitalen Bildverarbeitung häufig vorkommende Aufgabe ist der direkte Vergleich von Farbbildern. Beispiele hierfür sind medizinische Aufnahmen wie z. B. mikroskopische und endoskopische Bilder, die Objekterkennung oder auch die Qualitätskontrolle in Bereich der Industrie, bei der es um die Erkennung von Produktionsfehlern geht. Als sehr störend werden hier Faktoren empfunden, die die Farbinformationen ungewollt beeinflussen oder verfälschen. Diese Störeinflüsse können unter anderem in sich verändernden Beleuchtungsverhältnissen oder dem Einsatz verschiedener Bilderfassungsgeräte begründet sein. Mit einer Farbkalibrierung können diese negativen Faktoren kompensiert werden.

Konkret geht es in diesem Beitrag darum, Bilderfassungsgeräte wie Scanner oder digitale (Video-) Kameras farbmetrisch zu charakterisieren. Diese Charakterisierung ermöglicht es letztendlich, die erzeugten Farbwerte, die in einem gerätespezifischen Farbraum<sup>3</sup> vorliegen, in einen geräteunabhängigen Normfarbraum<sup>4</sup> gemäß wohldefinierten Bedingungen zu überführen. Die hier vorgestellte Farbkalibrierung wird im RGB-Farbraum durchgeführt, ermöglicht aber dennoch eine Normlicht-Szenenbeleuchtung zu approximieren und vom Bilderfassungsgerät zu abstrahieren. Es wird also in erster Linie eine Invarianz bezüglich der Szenenbeleuchtung und des verwendeten Bilderfassungsgerätes angestrebt.

<sup>3</sup> Der geräteabhängige Farbraum wird von den Sensorelementen (CCD-Chips) aufgespannt.

<sup>4</sup> Normfarbräume sind unter anderem CIE<sup>5</sup> XYZ oder CIE L\*a\*b\*.



**Abb. 1.** Ein schematischer Überblick über das grundlegende Verfahren.

In Abschnitt 2 werden das Vorgehen und die verschiedenen Vorverarbeitungsschritte im Einzelnen beschrieben. In Abschnitt 3 werden die durchgeführten Experimente und deren Ergebnisse vorgestellt und Abschnitt 4 gibt eine kurze Zusammenfassung.

## 2 Vorgehen

In Abb. 1 ist das in diesem Beitrag verwendete Verfahren dargestellt. Ausgangspunkt ist zum einen eine Szenenaufnahme unter Referenzbedingungen  $R$  und zum anderen die zu kalibrierende Szenenaufnahme mit unbekannt bedingten Umständen  $U$  gegeben. Beide Aufnahmen enthalten dasselbe Farbkalibrierermuster. Bei der in der Referenzszene vorherrschenden Beleuchtung kann es sich um eine Normlichtart wie CIE D65, D50, A, B, C oder eine beliebige andere handeln, die approximiert werden soll. Zunächst wird zwischen einer zu kalibrierenden Szene und der Referenzszene ein linearer Zusammenhang in Form einer linearen Transformationsmatrix hergestellt (vgl. Abschnitt 2.1). Im Anschluß daran können Szenen mit denselben unbekannt bedingten Umständen  $U$  in Szenen unter ähnlichen Bedingungen  $\hat{R}$  wie die der Referenzbedingungen mittels dieser Transformationsmatrix überführt werden (vgl. Abschnitt 2.2).

### 2.1 Bestimmung der Transformationsmatrix

Die Grundannahme des Verfahrens ist, dass eine Funktion  $\Phi$  existiert, die Farbvektoren  $c_u \in [0, 255]^3$  unter unbekannt bedingten Umständen<sup>6</sup> Farbvektoren  $c_r \in [0, 255]^3$

<sup>6</sup> Dies umfasst sowohl die unbekannt bedingte Beleuchtungscharakteristik in der Szene, als auch die Sensitivitätsfunktionen der Sensorelemente des Bilderfassungsgeräts.

unter Referenzbedingungen zuordnet (s. Gleichung 1).

$$\Phi : [0, 255]^3 \rightarrow [0, 255]^3 \quad \text{mit} \quad \Phi(\mathbf{c}_u) = \mathbf{c}_r \quad (1)$$

Aus den  $n$  Farbflächen eines Farbkalibrierungsmusters werden jeweils  $n$  RGB-Farbvektoren  $\mathbf{c}_{ri}$  aus der Referenzszene und  $\mathbf{c}_{ui}$  aus der zu kalibrierenden Szene mit  $i = 1, \dots, n$  gewonnen.  $\mathbf{c}_{ri}$  bzw.  $\mathbf{c}_{ui}$  ist dabei der Farbvektor der  $i$ -ten Farbfläche des Kalibrierungsmusters aus Referenzszene bzw. der zu kalibrierenden Szene. Diese Farbvektoren werden in den Matrizen  $\mathbf{C}_r$  und  $\mathbf{C}_u$  zusammengefasst, wobei  $\mathbf{C}$  für „color“, der Index  $r$  für die Referenzszene und der Index  $u$  für die unkalibrierte Szene stehen:

$$\mathbf{C}_r = [\mathbf{c}_{ri}]_{i=1, \dots, n} \quad \text{mit} \quad \mathbf{c}_{ri} = (R_{ri}, G_{ri}, B_{ri})^T \quad (2)$$

$$\mathbf{C}_u = [\mathbf{c}_{ui}]_{i=1, \dots, n} \quad \text{mit} \quad \mathbf{c}_{ui} = (R_{ui}, G_{ui}, B_{ui})^T \quad (3)$$

In diesem Beitrag wird, in Anlehnung an das vereinfachte Bildentstehungsmodell wie z. B. aus [7], von einer linearen Zuordnungsfunktion  $\Phi$  mit  $\Phi(\mathbf{c}) = \mathbf{T}\mathbf{c}$  ausgegangen. D. h. gesucht ist eine Transformationsmatrix  $\mathbf{T}$ , die für jeden Farbvektor  $\mathbf{c}_u$  eine möglichst gute Approximierung des korrespondierenden Farbvektors  $\mathbf{c}_r$  unter der Referenzbedingung liefert.

$$\forall i \in \{1, \dots, n\} : \mathbf{c}_r \approx \Phi(\mathbf{c}_u) \quad (4)$$

Die Referenzbedingungen werden durch die RGB-Ausgabe des Erfassungsgerätes für die Referenzszene dargestellt, die sowohl Beleuchtungseinflüsse, Sensorcharakteristiken, als auch Objekteigenschaften der Szene enthält[7].

Die Transformationsmatrix  $\mathbf{T}$  kann mit Matrizen verschiedener Dimension wie z. B.  $3 \times 3$ ,  $3 \times 4$  und  $3 \times 10$  beschrieben werden[6, 5]. Bei der  $3 \times 3$  Transformationsmatrix können beliebige affine Transformationen im RGB-Raum mit Ausnahme der Translation beschrieben werden. Bei  $3 \times 4$  Version werden die RGB-Vektoren als homogene Koordinaten ausgedrückt, damit auch eine konstante Translation im RGB-Raum in der Transformationsmatrix möglich ist. Bei der Berechnung einer Transformationsmatrix der Dimension  $3 \times 10$  wird die Zuordnungsfunktion  $\Phi$  durch ein Polynom zweiten Grades beschrieben. Die Transformationsmatrix  $\mathbf{T}$  wurde mit Hilfe der Singulärwertzerlegung bestimmt.

## 2.2 Der Normierungsschritt

In dem Normierungsschritt werden Szenen, die unter denselben Bedingungen wie die der im vorherigen Schritt zu kalibrierenden Szene entstanden sind, in Szenen unter der Referenzbedingung überführt. Zu diesem Zweck wird die in 2.1 erwähnte lineare Transformation  $\Phi$  auf alle Pixel eines Eingabebildes angewendet. Man erhält die zugehörige Approximation der Referenzbedingungen, die auf den  $n$  Patches des Kalibrierungsmusters als Stützstellen basiert. Die Approximation ist nur dann hinreichend genau, wenn die Szene statisch bleibt. Wenn sich beispielsweise die Beleuchtung in der zu normierenden Szene ändert, muss neu kalibriert werden. Ansonsten kann das in der zu normierenden Szene eingebrachte Kalibrierungsmuster nach dem Kalibrierungsschritt entfernt werden.

### 2.3 Vorverarbeitung und Nachverarbeitung

Um die Qualität und die Robustheit der Kalibrierung zu erhöhen, können zusätzliche Vor- und Nachverarbeitungsschritte in das in Abb. 1 vorgestellte Verfahren eingebaut werden.

Als Vorverarbeitung werden eine Linearisierung der RGB-Werte des Eingabegeräts und die Chromatizitäts-Normierung berücksichtigt, die sich auf die RGB-Matrizen  $C_r$  und  $C_u$  beziehen.

Als Nachverarbeitung wird die Intensitäts-Normierung verwendet.

*RGB-Linearisierung:* Da die radiometrischen Antwortfunktionen<sup>7</sup> der Sensoren vieler Aufnahmesysteme nicht linear sind [2, 8], müssen diese erst linearisiert werden. Dies ist insbesondere wichtig, da sonst die Annahme einer linearen Zuordnungsfunktion  $\Phi$  nicht zutrifft. Zu diesem Zweck wurden die sechs Graupatches des GretagMacbeth ColorChecker Kalibrierungsmusters mit Hilfe eines Spektralphotometers vermessen und mit der mittleren Intensität der RGB-Ausgabe für diese Patches in Beziehung gesetzt<sup>8</sup>. Die sechs Graupatches des Kalibrierungsmusters weisen den gleichen Abstand bezüglich ihrer spektralen Reflektivitäten zueinander auf – die Reflektivitäten von 0 bis 1 sind also äquidistant auf sie verteilt.

*Chromatizitäts-Normierung:* Ziel dieser Normierung ist es, die Einflüsse der Beleuchtungsintensität in der Szene für die Transformation zu eliminieren. Dabei wird angenommen, dass die Antwortfunktionen der Kamera für die einzelnen Farbkanäle linear sind. D. h. eine Skalierung der Beleuchtungsintensität um einen Faktor beeinflusst die Farbwerte in dem Bild um denselben Faktor [1]. Der Einfluß der Beleuchtungsintensität kann dadurch reduziert werden, dass jeder Farbpixel durch seine Intensität dividiert wird.

*Intensitäts-Normierung:* Die Intensitäts-Normierung soll sicherstellen, dass die Helligkeit in der Szene konstant bleibt. Dafür wird jedes Zeilenelement von  $T$  durch seine Zeilensumme dividiert [6]. Die Zeilensummen der so normierten Transformationsmatrizen beträgt 1, wodurch sichergestellt ist, dass durch die Transformation mit dieser Matrix der ursprüngliche Wertebereich erhalten bleibt.

## 3 Experimente

Für die Experimente wurden verschiedene Szenen unter einer Just Pantone Color Viewing Light Normlicht-Box mit einer CCD<sup>9</sup>-Chip-Kamera (Sony DFW-X700) erfasst. Zur Evaluierung wurden sieben Testszenen jeweils unter den Standardbeleuchtungen CIE D50 und CWF<sup>10</sup> aufgenommen. Als Farbkalibrierungsmuster kam ein GretagMacbeth ColorChecker zum Einsatz.

<sup>7</sup> Relation zwischen Kamera-Output und Intensität des einfallenden Lichtes [3]

<sup>8</sup> Dank an Herrn Prof. Slowak (Fachhochschule Koblenz) für die photometrische Vermessung des Kalibrierungsmusters

<sup>9</sup> Charge Coupled Device

<sup>10</sup> Cool White Fluorescent-Store



**Abb. 2.** Aufnahmen von der zweiten Szene unter verschiedenen Bedingungen (Links: CWF-Beleuchtungsbedingungen; Mitte: Referenzbedingungen (D50); Rechts: Approximation)



**Abb. 3.** Aufnahmen von der vierten Szene unter verschiedenen Bedingungen (Links: CWF-Beleuchtungsbedingungen; Mitte: Referenzbedingungen (D50); Rechts: Approximation)

Auf Basis der ersten Szene der Testreihe wurde die Transformationsmatrix bestimmt, die bei gegebener CWF-Beleuchtung die D50-Referenzbeleuchtung approximiert. Die restlichen Testszeneen enthielten unterschiedliche Zusammenstellungen von alltäglichen Büroartikeln.

Für die Bewertung der Kalibrierungsgüte wurden zwei Bewertungsfunktionen verwendet, CIELAB und MSE<sup>11</sup>. Mit der Farbmeterik CIELAB wird der euklidische Farbabstand zweier Farbvektoren im CIE  $L^*a^*b^*$ -Farbraum bestimmt. In diesem Paper wurde der gemittelte CIELAB-Wert zwischen zwei Bildern verwendet. Beim MSE wird der gemittelte, quadratische euklidische Abstand zweier RGB-Bilder betrachtet.

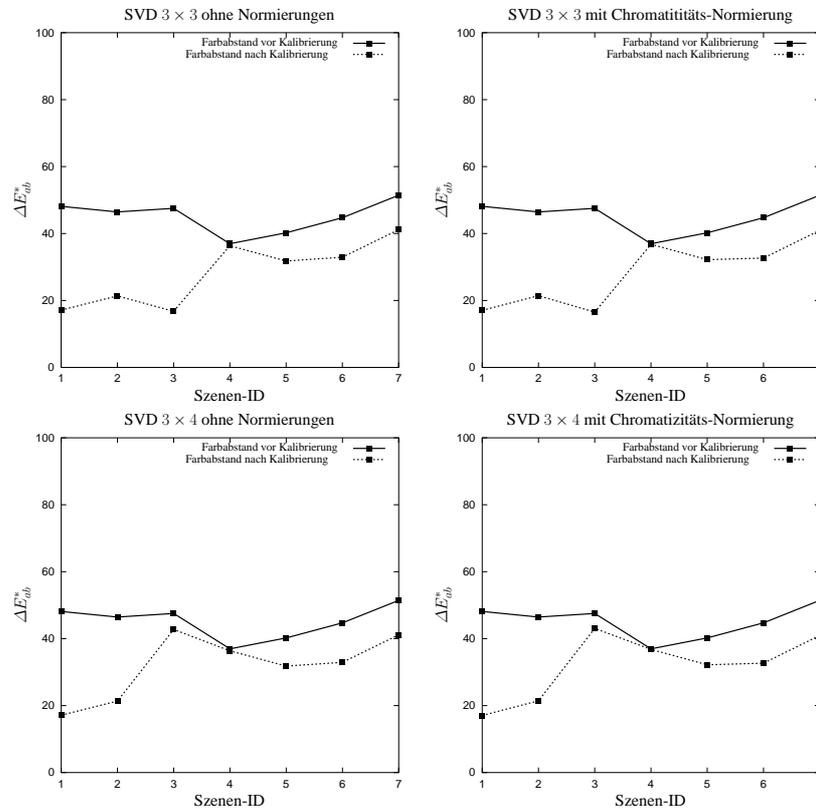
Für die Evaluation wurden nur die Transformationsmatrizen der Dimensionen  $3 \times 3$  und  $3 \times 4$  näher betrachtet. Außerdem wurde die Intensitäts-Normierung in diesem Paper nicht berücksichtigt, da die Experimente in [4] zeigten, dass die Kalibrierungsergebnisse durch diese Normierung signifikant verschlechtert wurden.

In Abb. 2 und 3 sind exemplarisch das Ausgangsbild (links), das Referenzbild (mitte) und rechts dessen Approximation mit dem SVD  $3 \times 4$ -Verfahren<sup>12</sup> und der Chromatizitäts-Normierung der zweiten und vierten Szene der Testreihe aufgeführt. Während mit der zweiten Szene gute Kalibrierergebnisse erzielt wurden, liefert die vierte Szene die schlechtesten Ergebnisse im Experiment.

Die Ergebnisse der Kalibrierung für die Testszeneen sind in Abb. 4 mit CIELAB ( $\Delta E_{ab}^*$ ) als Farbmeterik und in Abb. 5 mit MSE als Farbabstand aufgeführt. Für die

<sup>11</sup> Mean Square Error

<sup>12</sup> Berechnung einer Transformationsmatrix der Dimension  $3 \times 4$  mit Hilfe der Singulärwertzerlegung (SVD).



**Abb. 4.** Kalibrierergebnisse beurteilt nach CIELAB

Berechnung dieser Farbabstände wurden jeweils die gesamten Aufnahmen pixelweise miteinander verglichen. Die durchgezogene Linie beschreibt den Farbabstand zwischen den beiden Beleuchtungsarten vor der Kalibrierung pro Szene an. Die gestrichelte Linie gibt den Farbabstand zwischen der D50-Szenenaufnahme und deren Approximation an.

In Abb. 4 ist erkennbar, dass der Farbabstand zwischen Approximation und Referenzbild (D50-Beleuchtung) kleiner ist, als dies vor der Kalibrierung zwischen Referenzbild und zu kalibrierender Szene (CWF-Beleuchtung) der Fall war. Weiterhin fällt auf, dass die Verwendung der Chromatizitäts-Normierung keinen großen Einfluß auf die Kalibrierungsergebnisse hat (vgl. linke Spalte mit rechter Spalte). Die Wahl des Transformationsverfahrens (SVD  $3 \times 3$ <sup>13</sup> vs. SVD  $3 \times 4$ ) zeigt mit einer einzigen Ausnahme (s. Szenen-ID 3) keinen nennenswerten Unterschied in Bezug auf die Kalibrierung.

In Abb. 5 sticht hervor, dass die Ergebnisse mit MSE als Bewertungskriterium sehr stark szenenabhängig sind. Bei einigen Szenen wie z. B. die Szene 4 war der betrachtete

<sup>13</sup> Berechnung einer Transformationsmatrix der Dimension  $3 \times 3$  mit Hilfe der Singulärwertzerlegung (SVD).

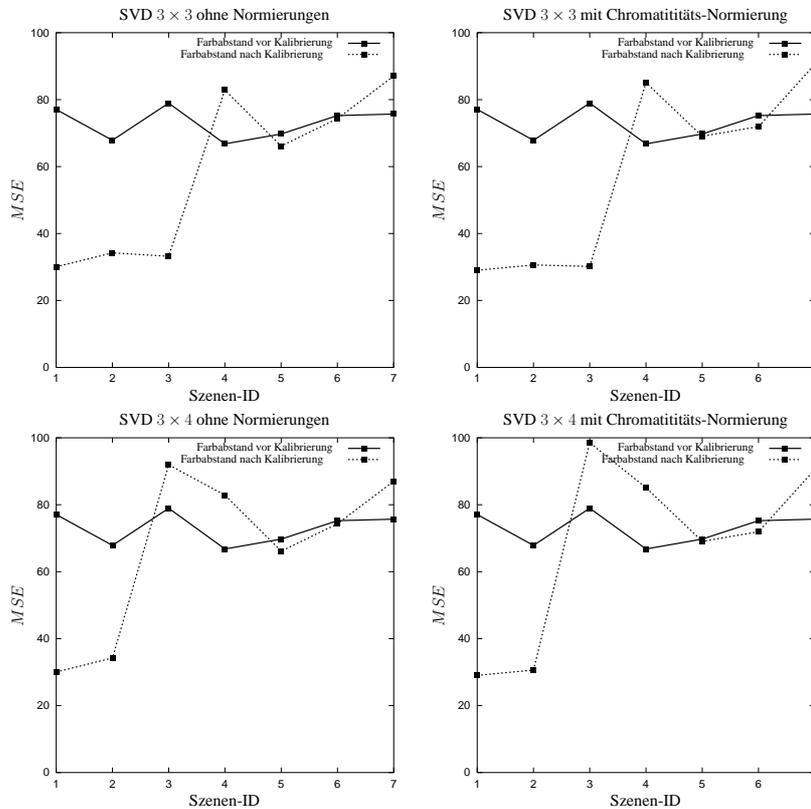


Abb. 5. Kalibrierergebnisse beurteilt nach MSE

Farbabstand nach der Kalibrierung sogar größer als zuvor. Analog zu Abb. 4 fällt auf, dass die Verwendung der  $3 \times 4$ - und  $3 \times 3$ -Transformationsmatrizen ähnliche Ergebnisse liefert. Der Einsatz der Chromatizitäts-Normierung wirkte sich bei beiden eingesetzten Transformationsverfahren kaum auf die Performanz der Farbkalibrierung aus.

## 4 Fazit

In diesem Beitrag wurde ein zweistufiges Verfahren zur Farbkalibrierung mittels linearer Transformation vorgestellt. Im ersten Schritt wurde eine Transformationsmatrix ermittelt, die einen linearen Zusammenhang zwischen einer Szene unter unbekanntem Bedingungen und einer Szene mit Referenzbedingungen herstellt. Mithilfe dieser Transformationsmatrix konnten Szenen mit den gleichen unbekanntem Bedingungen in Szenen mit Bedingungen ähnlich denen der Referenzbedingungen überführt werden.

Die Evaluation hat gezeigt, dass die Ergebnisse der Farbkalibrierung sehr stark szenenabhängig sind. Dies fällt besonders bei Verwendung des MSE als Evaluationskri-

terium auf. Insgesamt sind die ermittelten Ergebnisse der Experimente nicht sehr zufriedenstellend. Eine mögliche Ursache hierfür ist, dass die Lichtbox die Szene nicht homogen ausleuchtet. Denn in [4] wurde gezeigt, dass Szenen, die homogener als die verwendete Lichtbox ausgeleuchtet waren, deutlich bessere Ergebnisse liefern.

In den hier vorgestellten Ergebnissen wurde ein GretagMacbeth ColorChecker Kalibriermuster mit 24 Farbpatches verwendet. Eine weitere Evaluation bzgl. des Einsatzes anderer Farbkalibriermustern (mit mehr Farbpatches und somit mehr Stützstellen für die Transformationsberechnung) wäre anzudenken.

In diesem Beitrag wurden lediglich Szenen unter CFW-Beleuchtung in Szenen unter D50-Beleuchtung überführt. Man sollte daher auch andere Beleuchtungen in weiteren Tests mitberücksichtigen.

Bei den Experimenten wurde lediglich zwischen den Beleuchtungsarten transformiert, wobei das Bilderfassungsgerät gleich blieb. Nach dem Bildentstehungsmodell [7] lassen sich auch Änderungen der Sensorcharakteristik in einer linearen Transformation ausdrücken.

## Literatur

1. Graham D. Finlayson, Bernt Schiele, and James L. Crowley. Comprehensive colour image normalization. *Lecture Notes in Computer Science*, 1406:475–490, 1998. 1406.
2. Jon Y. Hardeberg. Transformations and colour consistency for the colour facsimile. Master's thesis, Norwegian Institute of Science and Technology; Trondheim, Norway, 1995.
3. Corvin Idler. Farbkalibrierung. Studienarbeit, 2003.
4. Jochen Michel. Farbkalibrierung mittels linearer Transformation. Studienarbeit, 2004.
5. Christian Münzenmayer, Frederic Naujokat, Steffen Mühldorfer, B Mayinger, and Thomas Wittenberg. Lineare Farbkorrektur zur automatischen Gewebeerkenntnis in der Endoskopie des Ösophagus. In *Bildverarbeitung für die Medizin 2004, Proc. des Workshops vom 29.-30. März 2004 in Berlin*, pages 15–19, Berlin, 2004. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
6. Frederic Naujokat. Automatische Farbkalibrierung für Endoskopische und Mikroskopische Aufnahmesysteme. Bachelorarbeit, 2003.
7. Dietrich Paulus, Joachim Hornegger, and L. Csink. Linear approximation of sensitivity curve calibration. In K.-H. Franke, editor, *8. Workshop Farbbildverarbeitung*, pages 3–10, Ilmenau, 2002. Schriftenreihe des Zentrums für Bild- und Signalverarbeitung.
8. F. Schmidt and U. Krueger. Eigenschaften von digitalen 1Chip-CCD-Kameras bei der Anwendung zur Farbbeurteilung und Farbdarstellung, 2000.