

Multispektrale Farbbildrekonstruktion mit sieben Kanälen

Dipl.-Ing. Stephan Helling Enrico Seidel
Institut für Technische Elektronik
RWTH Aachen
Templergraben 55, 52056 Aachen
helling@ite.rwth-aachen.de

Dr. Wolfram Biehlig
JENOPTIK LDT GmbH
Fasaneninsel 1, 07548 Gera
wolfram.biehlig@jenoptik.com

1. KURZFASSUNG

Im Labor wurde eine Multispektralkamera mit sieben Kanälen aufgebaut. Als Bildsensor dient eine Graustufenkamera mit 8 Bit Farbtiefe. Vor dem Sensor befindet sich ein Filtrerrad mit sieben Filtern. Damit werden pro Umlauf des Filtrerrades sieben spektrale Farbauszüge generiert, auf deren Grundlage das Remissionsspektrum der Vorlage geschätzt wird. Hierzu wird ein Kameramodell entwickelt, das die Kanalantworten der Kamera auf eine beliebige spektrale Verteilung am Eingang liefert. Es werden vier dem Kamera-Modell annähernd inverse Funktionen berechnet, die das originale Spektrum aus den sieben spektralen Auszügen schätzen. Die resultierenden Farben werden mit den Originalfarben verglichen, wobei der Farbabstand ΔE_{94} im Lab-Farbraum als Gütekriterium für die Schätzung herangezogen wird.

2. EXPERIMENTELLER AUFBAU

In einem gemeinsamen Projekt des Instituts für Technische Elektronik und der Firma Jenoptik LDT GmbH wurde eine Multispektralkamera mit sieben Kanälen entwickelt. Die Vorteile der Multispektraltechnik sind bei der Aufnahme und Wiedergabe zum einen in der Verringerung von Metamerieeffekten zu sehen, zum anderen können gesättigtere Farben wiedergegeben werden, als dies mit herkömmlichen Bildsystemen der Fall ist. Ein weiterer großer Vorteil besteht in der Möglichkeit, nicht nur die Farbe, sondern den von einer Vorlage ausgehenden physikalischen Farbreiz aufnehmen zu können. Damit eignen sich die Bilder gut für die Darstellung auf dem bei der Jenoptik LDT GmbH entwickelten Laser-Display, dessen Farbraum weit über den sRGB-Farbraum hinausgeht. Die von der Multispektralkamera erzeugten Bilddaten nutzen diesen vergrößerten Farbraum aus. Auch das am Institut für Technische Elektronik entwickelte sechskanalige Multispektraldisplay bietet einen erweiterten Farbraum und ist für die Darstellung der aufgenommenen Bilder somit gut geeignet. Darüber hinaus können die Bilder natürlich auch auf jedem üblichen Wiedergabesystem dargestellt werden.

Die Multispektralkamera besteht im Kern aus einer Graustufenkamera, deren Sensor über eine Auflösung von 1029*1292 Pixel verfügt. Intern arbeitet der Sensor mit 10 Bit, es werden allerdings nur 8 Bit herausgeführt. Vor dem Sensor rotiert ein Filtrerrad, in das sieben Farbfilter mit Bandpaßcharakteristik eingelassen sind. Die Transmissionsmaxima der einzelnen Filter sind gleichabständig zwischen 400 nm und 700 nm angeordnet. Ihre Halbwertsbreite beträgt 40 nm (Abb. 1).

Es ist gelungen, die benötigte Aufnahmezeit für alle sieben Farbbildauszüge zusammen auf weniger als eine Sekunde zu reduzieren. Damit ist die Aufnahme bewegter Objekte zwar noch nicht

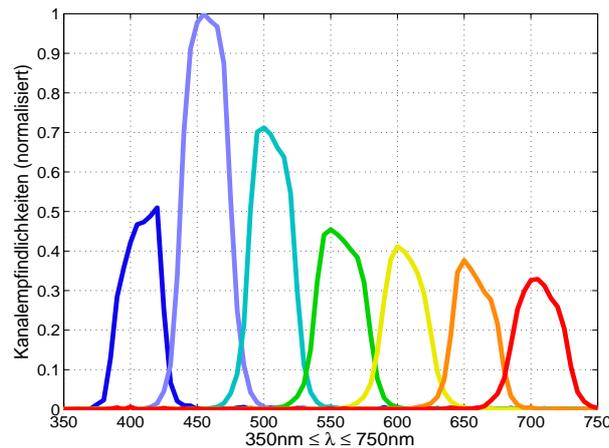


ABBILDUNG 1. Kanalempfindlichkeiten der Multispektralkamera

möglich; jedoch bedeutet dies einen beachtlichen Geschwindigkeitsvorteil gegenüber anderen Multispektralkameras, die für einzelne Kanäle teilweise Belichtungszeiten in der Größenordnung von Minuten benötigen. Aufgrund ihrer geringen Abmessungen bietet die Kamera darüber hinaus den Vorteil der Mobilität und kann nicht nur im Studio, sondern auch in der freien Natur eingesetzt werden.

Entsprechend der Filterzahl liefert die Kamera sieben Farbauszüge, die zu einem PC übertragen werden. Dort erfolgt die spektrale Schätzung für jeden Bildpunkt. Dazu benötigt die Software die Aufnahme einer Weißkachel, die nur dann aktualisiert werden muß, wenn ein Lichtwechsel auftritt. Die rekonstruierten Spektren stehen anschließend im PC zur Weiterverarbeitung zur Verfügung, es können nun beliebige Lichtquellen eingerechnet werden, um das Aussehen des Originals bei verschiedenen Beleuchtungen zu simulieren. Letztendlich können die Bilddaten beispielsweise in Form von Lab-Werten gespeichert werden.

3. MODELLIERUNG DER KAMERA

Für die spektrale Schätzung der aufgenommenen Vorlage ist die genaue Kenntnis der Übertragungsfunktion der Kamera notwendig [6, 7]. Mit ihrer Hilfe kann das Kameraverhalten auf einem Rechner simuliert werden. So wird im ersten Schritt ein Modell erstellt, das das Ausgangssignal eines jeden Kanals als Reaktion auf eine beliebige spektrale Verteilung am Eingang liefert. Das Ausgangssignal g_i des Kanals i der Kamera ist eine integrale Größe und läßt sich allgemein ausdrücken als

$$(1) \quad g_i = k_i \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S(\lambda) \beta(\lambda) o(\lambda) \tau_i(\lambda) E(\lambda) d\lambda.$$

Dabei sind k_i : Normierungskonstante (beinhaltet die Belichtungszeit und die Kanalverstärkung), $S(\lambda)$: spektrale Verteilung der Lichtquelle, $\beta(\lambda)$: spektrale Remission der Vorlage, $\tau_i(\lambda)$:

Transmissionskurve des Filters i , $E(\lambda)$: spektrale Empfindlichkeit des Sensors und $o(\lambda)$: spektrale Übertragungsfunktion der Optik. Hier wird vereinfachend $o(\lambda) \equiv 1$ angenommen. Wir setzen $\lambda_{min} = 350 \text{ nm}$ und $\lambda_{max} = 750 \text{ nm}$.

Aufgrund der schlechten softwaremäßigen Handhabbarkeit des Integrals werden die zu integrierenden Größen innerhalb des Intervalls $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ an n Stellen äquidistant abgetastet und in Matrizen gespeichert, so daß sich das Integral auf eine Reihe von Matrix- und Vektoroperationen reduziert. Man erhält für den Ausgangsvektor der Kamera

$$(2) \quad \vec{G} = (g_1 \ \cdots \ g_7)^T = \mathbf{K} \mathbf{T}^T \mathbf{E} \mathbf{S} \vec{\beta}$$

Dabei sind

$$\begin{aligned} \mathbf{K} &= \text{diag}(k_1 \ \cdots \ k_7) && (7 \times 7) \\ \mathbf{T} &= (\vec{\tau}_1 \ \cdots \ \vec{\tau}_7) && (n \times 7) \\ \mathbf{E} &= \text{diag}(E(\lambda_1) \ \cdots \ E(\lambda_n)) && (n \times n) \\ \mathbf{S} &= \text{diag}(S(\lambda_1) \ \cdots \ S(\lambda_n)) && (n \times n) \\ \vec{\beta} &= (\beta(\lambda_1) \ \cdots \ \beta(\lambda_n))^T && (n \times 1) \\ \vec{\tau}_i &= (\tau_i(\lambda_1) \ \cdots \ \tau_i(\lambda_n))^T && (n \times 1) \end{aligned}$$

Auch bei absoluter Dunkelheit ist der Wert eines realen Pixels nicht gleich Null. Zusätzlich ist der Zusammenhang zwischen Eingangsgrößen und Kamerasignal nicht so streng linear, wie im Modell zunächst angenommen wird. Dieser Zusammenhang läßt sich mit einer Verzerrung modellieren, die auf die linearen Werte g_i angewendet wird. Die quadratische Gleichung

$$y_i = a g_i^2 + b g_i + c$$

mit den für unseren Aufbau bestimmten Parametern $a = 0.33$, $b = 0.9$ und $c = 5.3$ führt zu einer guten Übereinstimmung zwischen dem Modell und dem realen Verhalten der Kamera. Dabei kann der Parameter c als der Wert eines Pixels bei absoluter Dunkelheit (Schwarzwert) interpretiert werden.

Die Sättigung eines Pixels ab einem Signalpegel von $g_{i,sat} = 255$ wird sowohl bei der realen Kamera als auch im Modell vermieden. Bei der Kamera wird die Belichtungszeit für den jeweiligen Kanal von einem Algorithmus so eingestellt, daß bei Präsentation einer Weißvorlage gerade ein Wert von etwa 250 erreicht wird. Im Modell geschieht dies in analoger Weise und schlägt sich in der Wahl der Parameter k_i , bzw. der Matrix \mathbf{K} , nieder. Damit ist - abgesehen von Selbstleuchtern und tolerablen Glanzeffekten beispielsweise an Körperkanten - eine Sättigung ausgeschlossen und ein möglichst großes Signal-Rausch-Verhältnis gewährleistet.

4. SPEKTRALE SCHÄTZUNG

Ziel der spektralen Schätzung ist die Rekonstruktion des originalen Remissionsspektrums $\beta(\lambda)$ des aufgenommenen Objekts auf Basis der sieben Farbauszüge. Das rekonstruierte Spektrum darf die bei der Aufnahme verwendete Beleuchtung nicht mehr beinhalten. Die Schätzung stellt also prinzipiell eine Invertierung der Übertragungsfunktion \mathbf{H} der Kamera (Bildung der Inversen \mathbf{H}_{inv}) dar, so daß für die geschätzten Spektren \vec{F}_{est} gilt

$$\vec{F}_{est} = \mathbf{H}_{inv} \vec{Y},$$

Beleuchtung	$\Delta E_{94,mittel}$
A	0.641
B	0.344
C	0.344
D65	0.347
E	0.338
G	0.8
P	1.42
Xe	0.367

TABELLE 1. Simulation des Einflusses verschiedener Beleuchtungen auf das mittlere ΔE_{94} der spektralen Schätzung (hier: mittels optimierter Wiener-Inversen, s.u.)

mit $\vec{Y} = (y_1 \ \cdots \ y_7)$.

Leider sind die Kanalübertragungsfunktionen (Glg. 1) der Kamera keine eindeutigen Funktionen, und \mathbf{H} ist keine quadratische Matrix. Damit ist eine analytische Invertierung nicht möglich. Dies liegt in der integralen Beschaffenheit der Kamerasignale begründet. Anschaulich erkennbar ist dies an der Eigenschaft der Kamera, daß theoretisch beliebig viele unterschiedliche Spektren denkbar sind, die am Ausgang der Kamera zu demselben Signalvektor führen [5].

Der Farbreiz ϕ_λ , den eine Kamera aufnimmt, besteht aus dem Produkt der spektralen Verteilung der Beleuchtung $S(\lambda)$ und der Objektremission $\beta(\lambda)$. Ist die Beleuchtung bekannt (beispielsweise in einem Studio), so läßt sich das Remissionsspektrum im Nachhinein mittels einer Division des geschätzten Farbreizes durch das Beleuchtungsspektrum berechnen. Bei der hier vorgestellten mobilen Multispektralkamera ist jedoch davon auszugehen, daß die Lichtverhältnisse im allgemeinen unbekannt sind. Es musste also ein Verfahren entwickelt werden, das den Einfluß der Beleuchtung auf das geschätzte Spektrum minimiert.

Zu diesem Zweck betrachtet die Software die sieben Aufnahmen einer Weißkachel, deren spektrale Remission $\beta_{\text{weiß}}(\lambda)$ bekannt sein und einen möglichst flachen Verlauf aufweisen muß. Damit enthält der Vektor $\vec{\beta}$ im Idealfall ausschließlich Einsen. Aus der Weißkachelaufnahme des 4. Filters (Transmissionsmaximum bei $\lambda_{max} = 550 \text{ nm}$), die im allgemeinen die meiste Energie beinhaltet, wird ein Mittelwert gebildet. Für alle anderen Auszüge werden Faktoren berechnet, so daß deren Mittelwert gleich dem des 4. Filters ist. Die so gefundenen Verstärkungen werden in die Matrix \mathbf{K} (Glg. 2) eingerechnet. Damit wird erreicht, daß der Einfluß der Beleuchtung aus dem Integral nach vorne gezogen wird. Mathematisch korrekt ist dieser Schritt eigentlich nur für konstante Beleuchtung wie Gleichenergieweiß, Simulationen mit Normlichtarten haben allerdings gezeigt, daß der entstehende Farbfehler sehr gering und praktisch unabhängig von der verwendeten Lichtart ist (siehe Tabelle 1).

Im folgenden werden numerische Verfahren vorgestellt, die bei der Berechnung einer inversen, beleuchtungskorrigierten Übertragungsfunktion \mathbf{H}_{inv} zur Anwendung kommen.

4.1. Bildung der Pseudoinversen. Diese Variante der Invertierung der Übertragungsfunktion stellt die simpelste, im Ergebnis aber auch schlechteste Herangehensweise dar [1]. Die Matrix

\mathbf{H} ist von der Dimension $7 \times n$, abhängig von der Anzahl n der spektralen Abtastwerte (hier: $n = 81$). Die Pseudoinverse \mathbf{H}^+ der Übertragungsfunktion \mathbf{H} ist definiert als

$$\mathbf{H}^+ = \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{H}^T)^{-1}.$$

(Allgemein bezeichnen \mathbf{A}^{-1} die Inverse und \mathbf{A}^+ die Pseudoinverse einer Matrix \mathbf{A} .) Alle mit der Pseudoinversen rekonstruierten Spektren haben gemein, daß sie eine starke Welligkeit beinhalten, in der sich die sieben Kanalempfindlichkeiten $\tau_i(\lambda)$ der Kamera widerspiegeln.

Berechnet man den Farbabstand ΔE_{94} zwischen den geschätzten Spektren und den Originalspektren, so ergeben sich trotz der ausgeprägten Welligkeit relativ geringe Werte. Durch die geschickte Wahl von Parametern kann man erreichen, daß sich Über- und Unterschwingen bei der integralen Berechnung der Normfarbwerte näherungsweise aufheben. Für eine spektrale Schätzung ist diese Methode allerdings aufgrund der Welligkeit nicht geeignet, da natürliche Remissionsspektren in aller Regel einen glatten und stetig differenzierbaren Verlauf aufweisen.

4.2. Die regressive Bestimmung der Inversen. Bei dieser Variante wird dem Kameramodell ein Spektraldatensatz \mathbf{F} , wie z.B. der von Vrhel [4], präsentiert. Die Matrix \mathbf{F} enthält 355 gleichabständig abgetastete Spektren. Das Modell berechnet daraus die resultierenden Signalvektoren \vec{Y} der Kamera, die in der Matrix \mathbf{Y} zusammengefaßt werden. Die so gewonnenen Daten werden dann für die folgende Rechnung benutzt:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &= \mathbf{H}\mathbf{F} \\ \Rightarrow (\mathbf{Y}\mathbf{F}^+)^+ &= \mathbf{H}^+ \\ \Rightarrow \mathbf{H}^+ &= \mathbf{F}\mathbf{Y}^+ \end{aligned}$$

Ein Nachteil dieser Methode ist in der notwendigen Festlegung auf einen bestimmten Spektraldatensatz bei der Generierung der Ausgangsvektoren \vec{Y} zu sehen. Damit "trainiert" man die Inverse auf die in dem Satz vertretenen Spektren. Als Folge davon werden Spektren, die aus diesem Spektraldatensatz stammen oder diesen sehr ähnlich sind, recht gut rekonstruiert. Die Inverse kann hingegen zu schlechteren Ergebnissen führen, wenn Spektren geschätzt werden sollen, die sich von denen im verwendeten Datensatz stark unterscheiden.

Damit sind für eine sinnvolle spektrale Schätzung Kenntnisse über die zu erwartenden Spektren notwendig. Dies ist etwa bei der multispektralen Archivierung von Gemälden der Fall, bei denen die Farbpigmente zuvor spektral vermessen und für die Optimierung der Inversen benutzt werden können [2, 8, 9]. Für die Ermittlung einer generell verwendbaren inversen Übertragungsfunktion bietet sich diese Methode hingegen nicht an.

4.3. Schätzung mit der Wiener-Inversen. Die Wiener-Inverse berücksichtigt die Tatsache, daß natürliche Spektren im allgemeinen einen glatten Verlauf und keine Sprünge aufweisen. Daher sind nebeneinander liegende Abtastwerte stark korreliert. In der Korrelationsmatrix

$$\mathbf{R}_{xx}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & \rho & \rho^2 & \dots & \rho^{n-1} \\ \rho & 1 & \rho & \dots & \rho^{n-2} \\ \rho^2 & \rho & 1 & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \rho \\ \rho^{n-1} & \rho^{n-2} & \dots & \rho & 1 \end{pmatrix}$$

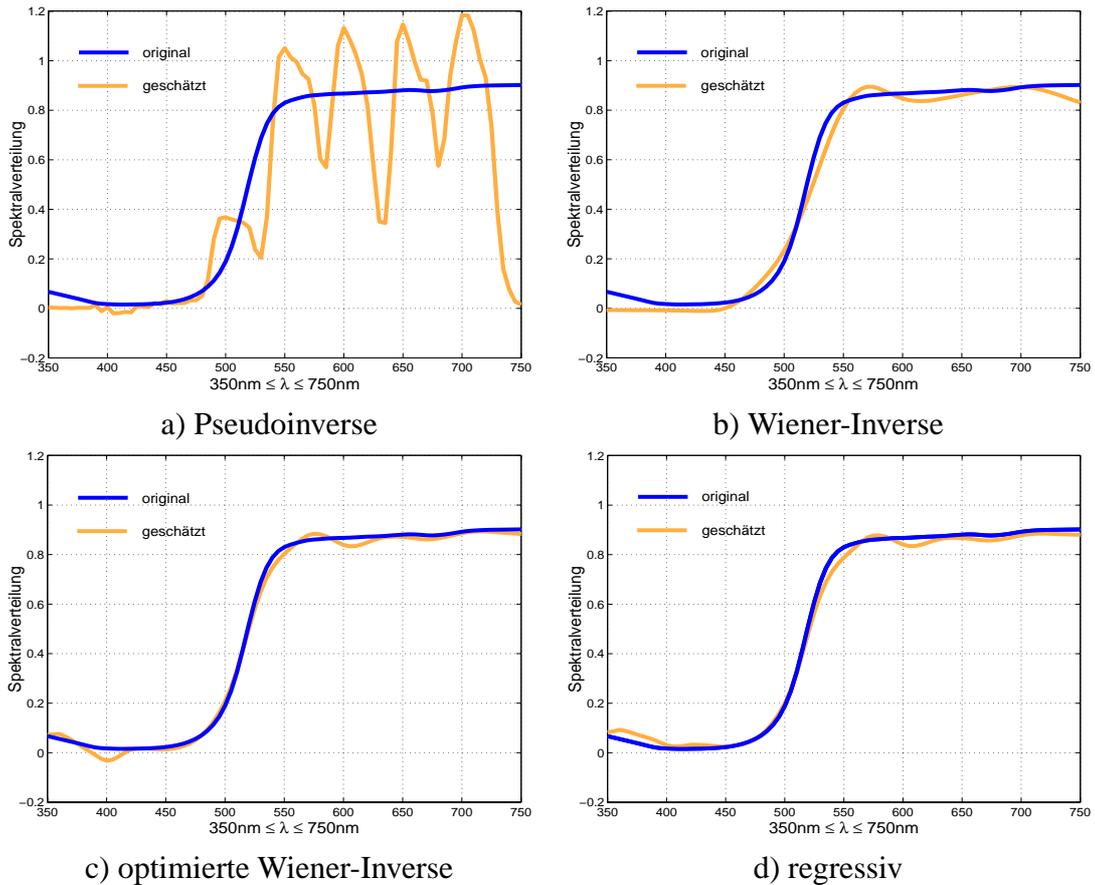


ABBILDUNG 2. Vergleich der vier Schätzverfahren am Beispiel des Spektrums eines Gelbtönen

beschreibt $\rho < 1$ diesen Korrelationskoeffizienten. Die inverse Übertragungsfunktion ergibt sich dann zu

$$\mathbf{H}_{inv} = \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{H}^T)^{-1}.$$

Für $\rho = 0.99$ liefert diese Inverse gute Rekonstruktionsergebnisse. Die Ergebnisse lassen sich auf einen bestimmten Spektraldatensatz \mathbf{F} optimieren, wenn statt der festen Korrelationsmatrix die Matrix

$$\mathbf{R}_{xx}^{-1} = \mathbf{F} \mathbf{F}^T$$

benutzt wird.

Abb. 2 zeigt einen Vergleich der vier vorgestellten Schätzverfahren am Beispiel eines Gelbtönen.

5. ERGEBNISSE

Um die beschriebenen Rekonstruktionsverfahren vergleichen zu können, wurde das Testchart ColorChecker DC von GretagMachbeth spektral vermessen und mit der Multispektralkamera aufgenommen. Als Lichtquelle diente eine ebenfalls spektral vermessene Halogenbeleuchtung. Für

Schätzverfahren	Kamera		Modell	
	$\Delta E_{94,mittel}$	$\Delta E_{94,max}$	$\Delta E_{94,mittel}$	$\Delta E_{94,max}$
Pseudoinverse	2.67	6.24	2.45	5.08
Regression	0.864	7.66	0.376	1.58
Wiener, $\rho = 0.99$	1.04	7.34	0.517	1.86
Wiener, optimiert auf Datensatz	1.1	7.96	0.501	2.63

TABELLE 2. Vergleich der bei den unterschiedlichen Schätzverfahren erreichten Farbabstände zwischen Original und Reproduktion, verwendet wurde der ColorChecker DC.

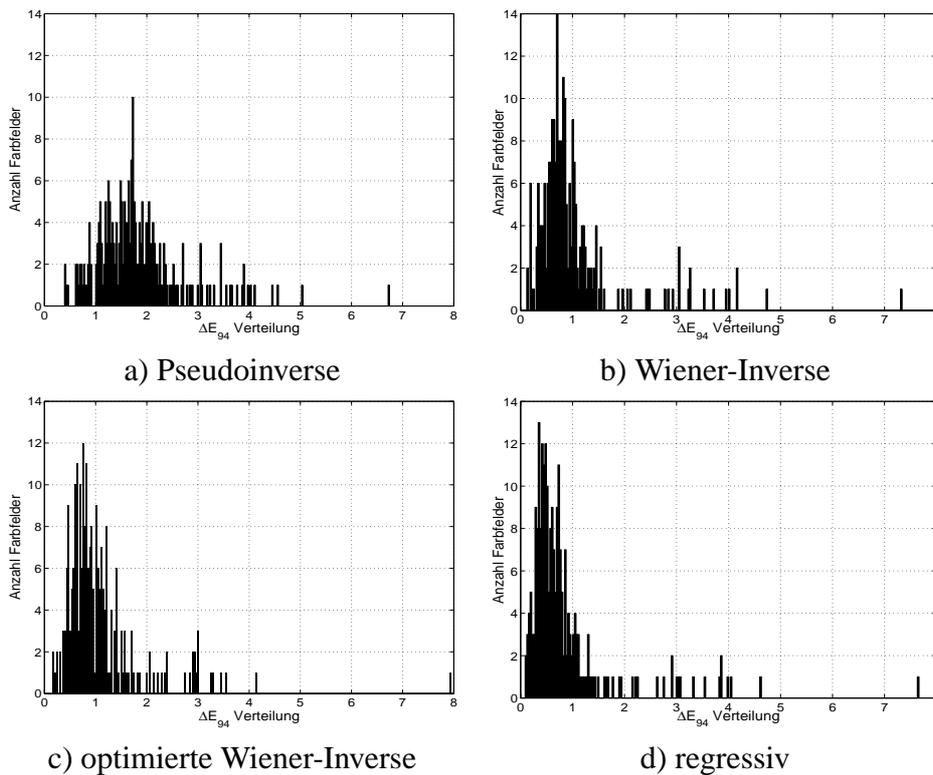


ABBILDUNG 3. Histogramme der mit der realen Kamera erreichten ΔE_{94} -Werte. Als Bildmaterial diente der ColorChecker DC.

jeden Bildpunkt wurde das Spektrum nach den angegebenen Verfahren auf Basis der Ausgangssignale der realen Kamera und der Modellkamera geschätzt. Als Gütekriterium diente der Farbabstand ΔE_{94} im Lab-Farbraum zwischen dem gemessenen und dem rekonstruierten Spektrum, Bezugsweiß war dabei D65. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die mit den verschiedenen Verfahren erreichten Farbabstände.

Die theoretisch erreichbaren Werte fallen etwa um den Faktor 2 besser aus als die tatsächlich mit der Kamera erreichten Werte. Der Grund hierfür ist vor allem im Sensorrauschen der Kamera

zu sehen. Der hohe Wert von $\Delta E_{94,max} \approx 8$ in der linken Spalte stammt aus einem einzelnen, tiefschwarzen Spektrum, das von der Kamera nicht korrekt erkannt wird, da der Einfluß des Rauschens hier besonders stark ins Gewicht fällt. Alle anderen Werte liegen unter 5 (siehe ΔE_{94} -Verteilung in Abb. 3).

6. ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde eine Multispektralkamera mit sieben Kanälen aufgebaut und im Rechner modelliert. Es wurden Verfahren implementiert und verglichen, die aus den Farbauszügen das originale Remissionsspektrum schätzen. Als Gütekriterium diente der Farbabstand ΔE_{94} im Lab-Farbraum zwischen dem originalen und dem geschätzten Spektrum bei Beleuchtung mit D65.

Die gefundenen, inversen Übertragungsfunktionen H_{inv} der Kamera sind nach dem Weißabgleich innerhalb vernünftiger Grenzen lichtunabhängig und erfordern damit keine Kenntnisse über die spektrale Verteilung der Beleuchtung. Benötigt wird allein die Aufnahme einer Weißkachel bei einem Lichtwechsel. Dadurch wird der angestrebte mobile Einsatz der Kamera ermöglicht, aufwändige Spektralmessungen der Lichtquelle entfallen.

Eine komplette Farbbildaufnahme mit dem experimentellen Aufbau beansprucht im Moment etwa eine Sekunde und liegt damit in aller Regel unter der von anderen Multispektralkameras benötigten Zeitspanne.

LITERATUR

- [1] König, Friedhelm: *Die Charakterisierung von Farbsensoren*, Dissertation, Aachen, 2001
- [2] Haneishi, Hideaki; Hasegawa, Takayuki; Hosoi, Asako; Yokoyama, Yasuaki: *System design for accurately estimating spectral reflectance of art paintings*, Department of Information and Image Science, Chiba University
- [3] Pratt, W. K.: *Digital Image Processing*, Wiley Inter Science
- [4] Vrhel, M. J.; Gershon, R.; Iwan, L. S.: *Measurement and Analysis of Object Reflectance Spectra*, Color Res. Appl. 19, No. 1, 1991, pp 4-9
- [5] Praefcke, Werner: *Multispektrale Verarbeitung und Reproduktion von Farbtönen*, Fortschritt-Berichte VDI, Nr. 680, Dissertation, Aachen, 2001
- [6] Healey, Glenn E.; Kondepudy, Raghava: *Radiometric CCD Camera Calibration and Noise Estimation*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 16, No. 3, March 1994
- [7] Hardeberg, Jon Yngve; Brettel, Hans; Schmitt, Francis: *Spectral characterisation of electronic cameras*, Signal and Image Processing Department, École Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, France
- [8] Imai, Francisco H.; Berns, Roy S.: *High-Resolution Multi-Spectral Image Archives - A Hybrid Approach*, Munsell Color Science Laboratory, Rochester Institute of Technology, Rochester, New York
- [9] Yokoyama, Yasuaki; Tsumura, Norimichi; Haneishi, Hideaki; Miyake, Yoichi: *A New Color Management System Based on Human Perception and its Application to Recording and Reproduction of Art Paintings*, The Fifth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications