

Spektrale Charakterisierung einer Multispektralkamera

Julie Klein, Johannes Brauers und Til Aach

Lehrstuhl für Bildverarbeitung, RWTH Aachen University

Templergraben 55, D-52056 Aachen

eMail: julie.klein@lfb.rwth-aachen.de

URL: <http://www.lfb.rwth-aachen.de>

Zusammenfassung Präzise Farbaufnahmen erfordern eine exakte spektrale und radiometrische Kalibration des Aufnahmesystems. In diesem Beitrag wird die spektrale Kalibration einer Multispektralkamera mit Hilfe eines Monochromators vorgestellt, der in Verbindung mit einer geeigneten Lichtquelle an seinem Ausgang schmalbandige Emissionsspektren zur Verfügung stellt. Diese Spektren werden sowohl von der zu kalibrierenden Kamera als auch von einem Referenz-Spektralfotometer aufgenommen. Durch eine Auswertung der von der Kamera gemessenen Werte in Bezug auf die Messwerte des Spektralfotometers kann dann die spektrale Empfindlichkeit der Multispektralkamera bestimmt werden. Die aus einem monochromen Sensor und optischen Bandpassfiltern bestehende Multispektralkamera kann mit zwei Methoden kalibriert werden: Sensor und Bandpassfilter werden entweder gleichzeitig als ein Gesamtsystem oder separat vermessen. Die Referenzmessungen mit dem Spektralfotometer sind erforderlich, da die schmalbandigen Spektren am Ausgang des Monochromators nicht beliebig schmal sind, sondern eine gewisse Breite aufweisen und die Spektren sich daher überlappen. Mehrere Algorithmen werden evaluiert, um diese überlappenden Emissionsspektren zu berücksichtigen.

1 Einleitung

Die spektrale Charakterisierung einer Kamera ist ein weitverbreitetes Problem, bei dem aus dem Graustufenwert eines Pixels und dem bekannten Spektrum der einfallenden Strahlung die spektrale Empfindlichkeit der Kamera ermittelt werden soll. Wenn diese Empfindlichkeit bekannt ist, ist eine genaue Erfassung der Farben möglich.

Die von der Kamera aufzunehmenden Spektren können durch ein Kalibrationsmuster [10, 1, 2, 12], durch einen Monochromator [9] oder mit optischen Filtern [12, 4, 6] erzeugt werden. Die Messungen sind nicht frei von Rauschen und die aufgenommenen Spektren nicht unbedingt linear unabhängig. Deshalb kann die spektrale Kurve des Sensors nicht

direkt durch eine Inversion des Systems berechnet werden. Zur Rekonstruktion der spektralen Empfindlichkeit der Kamera aus den aufgenommenen Beleuchtungsspektren und den daraus folgenden Grauwerten der Kamera gibt es verschiedene Lösungswege, wie zum Beispiel die Benutzung von Haupteigenvektoren [5], eine Wiener Schätzung [11], eine lineare Approximation [10] oder die Minimierung einer Kostenfunktion [9].

Üblicherweise werden diese Kalibrationsmethoden auf RGB-Kameras angewandt. In diesem Beitrag hingegen wird eine Multispektralkamera spektral kalibriert, die einen monochromen Sensor und ein Filterrad mit sieben optischen Bandpassfiltern enthält [3]. Die auf den Sensor einfallende Strahlung wird dabei von einem Monochromator erzeugt. Wegen des besonderen Aufbaus der Multispektralkamera kann der Graustufensensor sowohl mit als auch ohne die Bandpassfilter kalibriert werden. Sobald die Transmissionskurven der Bandpassfilter bekannt sind, erlaubt dies also zwei verschiedene spektrale Kalibrationsmethoden der Multispektralkamera: Entweder werden Sensor und Bandpassfilter als ein Gesamtsystem charakterisiert, oder separat. Die Multiplikation der beiden Spektralkurven ergibt dann die spektrale Empfindlichkeitskurve der Multispektralkamera.

Die spektrale Charakterisierung der sieben Farbkanäle der Kamera wird im nächsten Abschnitt genau erläutert. Im Abschnitt 3 werden der Messaufbau beschrieben und die Ergebnisse der verschiedenen Kalibrationsverfahren verglichen. Schließlich wird diese Arbeit mit einer Zusammenfassung abgeschlossen.

2 Schätzverfahren und Kalibrationen

Wenn eine Strahlung mit dem Strahlungsvektor $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^{a \times 1}$ auf ein Pixel einer Kamera mit der spektralen Empfindlichkeit $\mathbf{s} \in \mathbb{R}^{a \times 1}$ einfällt, ergibt sich der Grauwert $w \in \mathbb{R}$, der durch

$$w = \mathbf{g}^T \cdot \mathbf{s} + n \quad (1)$$

mit dem Rauschen $n \in \mathbb{R}$ ausgedrückt wird. Die Spektren $\mathbf{s}$ und $\mathbf{g}$ werden gleichmäßig mit a Werten abgetastet. Um die Spektralkurve der Kamera bestimmen zu können, werden m verschiedene einfallende Strahlungen benutzt und es muss $m \geq a$ gelten, sonst kann die Empfindlichkeitskurve nicht bestimmt werden. Die m einfallenden Spektren werden in der Matrix

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} \mathbf{g}_1^T \\ \mathbf{g}_2^T \\ \vdots \\ \mathbf{g}_m^T \end{pmatrix} \quad (2)$$

zusammengefasst, mit $\mathbf{G} \in \mathbb{R}^{m \times a}$. Daraus folgen die m gemessenen Grauwerte des Pixels

$$\mathbf{w} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (3)$$

wobei $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ und $\mathbf{n} \in \mathbb{R}^{m \times 1}$.

Wenn $m > a$ sind die einfallenden Strahlungen nicht linear unabhängig. Auch wenn $m = a$ können sie nicht linear unabhängig sein, da sie vom Monochromator erzeugt werden und nicht beliebig schmal sind. Wegen des Messrauschens $\mathbf{n}$ und der linearen Abhängigkeit der einfallenden Strahlungen kann die Spektralempfindlichkeitskurve nicht einfach mit Hilfe der inversen Matrix zu $\mathbf{G}$ berechnet werden. Mehrere Verfahren erlauben die Schätzung der spektralen Empfindlichkeit $\mathbf{s}$, wie zum Beispiel das Verfahren der Haupteigenvektoren [5], eine lineare Schätzung [10] oder die Wiener-Schätzung.

2.1 Haupteigenvektoren

Mit dem Verfahren der Haupteigenvektoren wird die spektrale Schätzung robuster gegenüber Rauschen, indem nur die Eigenvektoren aus der Singulärwertzerlegung mit den größten Singulärwerten in Betracht gezogen werden [5]. Aus der Singulärwertzerlegung der Matrix $\mathbf{G}$ ergibt sich

$$\mathbf{G} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{V}^T \quad (4)$$

mit den unitären Matrizen $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{m \times \text{rg}(\mathbf{G})}$ und $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^{n \times \text{rg}(\mathbf{G})}$ und der Diagonalmatrix $\mathbf{W} \in \mathbb{R}^{\text{rg}(\mathbf{G}) \times \text{rg}(\mathbf{G})}$ mit den Singulärwerten der Matrix $\mathbf{G}$, wobei $\text{rg}(\mathbf{G})$ der Rang der Matrix $\mathbf{G}$ ist. Wenn nur die γ ersten Singulärwerte weiter verwendet werden und die anderen zu Null gesetzt werden, erhält man die Matrix $\mathbf{G}_\gamma$. Die Inverse dieser Matrix ist

$$\mathbf{G}_\gamma^{-1} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{W}_\gamma^{-1} \cdot \mathbf{U}^T \quad (5)$$

wobei $\mathbf{W}_\gamma^{-1}$ eine Diagonalmatrix ist, deren Diagonale die Kehrwerte der γ ersten Singulärwerte $\lambda_1 \cdots \lambda_\gamma$ von $\mathbf{G}$ und $(\text{rg}(\mathbf{G}) - \gamma)$ Nullen enthält:

$$\mathbf{W}_\gamma^{-1} = \begin{pmatrix} 1/\lambda_1 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 1/\lambda_2 & 0 & & & & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & & & \vdots \\ 0 & & 0 & 1/\lambda_\gamma & 0 & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & 0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 & 0 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{\text{rg}(\mathbf{G}) \times \text{rg}(\mathbf{G})} \quad (6)$$

Die spektrale Empfindlichkeit der Kamera, die mit dem Verfahren der Haupteigenvektoren berechnet wird, ist dann

$$\hat{\mathbf{s}} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{W}_\gamma^{-1} \cdot \mathbf{U}^T \cdot \mathbf{w} \quad (7)$$

2.2 Lineare Schätzung

Bei der linearen Schätzung der Empfindlichkeitskurve aus [10] werden folgende Bedingungen in die Approximation mit einbezogen: Die spektrale Empfindlichkeit des Sensors ist positiv, glatt und unimodal (besitzt also nur ein klares Maximum). Als Fehlerfunktion wird die Funktion

$$f = \|\mathbf{G} \cdot \mathbf{s} - \mathbf{w}\|^2 + \mu (\mathbf{s}^T \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{s}) \quad (8)$$

mit der Matrix

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{a \times a} \quad (9)$$

benutzt. Der Glattheitsterm $\mathbf{s}^T \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{s}$, der dem Quadrat der ersten Ableitung des Signals $\mathbf{s}$ entspricht, wird mit Hilfe des wählbaren Faktors μ gewichtet. Durch Minimierung der Fehlerfunktion ergibt sich die geschätzte spektrale Charakteristik der Kamera [10] zu

$$\hat{\mathbf{s}} = (\mathbf{G}^T \cdot \mathbf{G} + \mu \cdot \mathbf{D})^{-1} \cdot \mathbf{G}^T \cdot \mathbf{w} \quad (10)$$

Der Einfluss des Faktors μ wird im Abschnitt 3.1 beschrieben.

2.3 Wiener-Schätzung

Die Wiener-Schätzung berücksichtigt die Kovarianz $\mathbf{R}_{ss}$ des zu suchenden Signals $\mathbf{s}$ und die Kovarianz $\mathbf{R}_{nn}$ des Rauschens $\mathbf{n}$, um das Signal zu schätzen. Mit diesem Verfahren ergibt sich die geschätzte spektrale Empfindlichkeit des Sensors zu

$$\hat{\mathbf{s}} = \mathbf{R}_{ss} \cdot \mathbf{G}^T \cdot \left(\mathbf{G} \cdot \mathbf{R}_{ss} \cdot \mathbf{G}^T + \mathbf{R}_{nn} \right)^{-1} \cdot \mathbf{w} \quad (11)$$

Die Kovarianzmatrix $\mathbf{R}_{ss}$ der spektralen Empfindlichkeit $\mathbf{s}$ wird häufig durch ein autoregressives Modell

$$\mathbf{R}_{ss} = \sigma_s^2 \cdot \begin{pmatrix} 1 & \rho & \rho^2 & \dots & \rho^{n-1} \\ \rho & 1 & \rho & \dots & \rho^{n-2} \\ \rho^2 & \rho & 1 & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \rho \\ \rho^{n-1} & \rho^{n-2} & \dots & \rho & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

beschrieben, wobei σ_s^2 die Varianz der Empfindlichkeitskurve $\mathbf{s}$ ist und $\rho < 1$ ein Korrelationsfaktor. Wegen des glatten Verlaufs der Empfindlichkeitskurve des monochromen Sensors und der Transmissionskurven der Filter wird $\rho = 0.99$ benutzt. Da das Messrauschen $\mathbf{n}$ unkorreliert ist, wird seine Kovarianzmatrix $\mathbf{R}_{nn}$ durch eine Diagonalmatrix, deren Werte die Varianz σ_n^2 des Rauschens $\mathbf{n}$ enthalten, angenähert.

2.4 Gesamt- und separate Kalibration

Zur spektralen Charakterisierung der Multispektralkamera können zwei verschiedenen Kalibrationsmethoden verwendet werden. Auf der einen Seite kann die Multispektralkamera als ein Gesamtsystem betrachtet werden, d. h. der Graustufensensor und die Bandpassfilter werden als Einheit mit dem Monochromator gemessen und aus den Messdaten werden die Spektralempfindlichkeiten der Multispektralkamera bestimmt. Diese Kalibration wird *Gesamtkalibration* genannt. Auf der anderen Seite ist es bei der *separaten Kalibration* möglich, die Spektralempfindlichkeit des Graustufensensors zu bestimmen und die Transmissionskurven der Bandpassfilter separat mit dem Spektralfotometer zu vermessen. Die Spektralempfindlichkeit der Multispektralkamera ergibt sich dann durch Multiplikation der beiden Messergebnisse, siehe Abb. 1.

3 Ergebnisse

Der Messaufbau mit dem Monochromator der Firma Newport ist in Abb. 2 dargestellt und beschrieben. Der Monochromator besitzt die Brennweite $f = 130$ mm und das Gitter ermöglicht die Einstellung von Strahlung im Bereich $200 \dots 1600$ nm. Die für die Kalibration verwendete Multispektralkamera besteht aus der Graustufenkamera IDS uEye UI2240 (CCD Sensor Sony ICX205 mit einem IR-cut Filter) und einem motorisierten Filterrad mit sieben Bandpassfiltern, das vor der Kamera platziert ist. Das für die Referenzmessungen eingesetzte Spektralradiometer ist ein Konica-Minolta Spektroradiometer CS-2000, das das Spektrum zwischen 380 und 780 nm im 1 nm Abstand abtastet. Als Lichtquelle

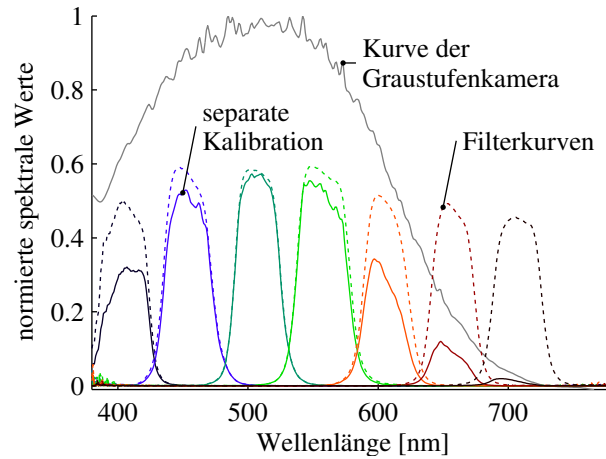


Abbildung 1: Für die separate Kalibration der Multispektralkamera wird die Graustufenkamera spektral charakterisiert (graue Linie) und die Transmissionskurven der Bandpassfilter werden vermessen (gestrichelte farbige Linien). Die spektrale Empfindlichkeiten der Multispektralkamera (durchgezogene farbige Linien) entspricht dann der Multiplikation der Kurve der monochromen Kamera mit den Filterkurven. Die Empfindlichkeitskurven der sieben Bandpassfilter sind mit sieben verschiedenen Farben gekennzeichnet.

kann wahlweise eine Xenon- oder Halogen-Lichtquelle eingesetzt werden, wobei in diesem Beitrag die Halogen-Lichtquelle verwendet wird.

3.1 Parameter der Schätzverfahren

Bei dem Verfahren, das die Eigenvektoren benutzt (Abschnitt 2.1), kann die Anzahl γ der beibehaltenen Eigenvektoren gewählt werden. Wenn zu viele Eigenvektoren zur Rekonstruktion benutzt werden, führt der Einfluss des Rauschens wieder zu einer schlechten Rekonstruktion; wenn zu wenig Eigenvektoren benutzt werden, gibt es nicht mehr genug Information, um die Spektralkurven rekonstruieren zu können. In dieser Arbeit werden die Spektren mit $a = 401$ Werten abgetastet und der Wert $\gamma = 175$ verwendet.

Für die lineare Schätzung aus dem Abschnitt 2.2 muss μ so gewählt werden, dass die rekonstruierten Kurven nicht zu viel Rauschen enthalten und dass sie auch realistisch bleiben. Wie Abb. 3 zeigt, führen Werte $\mu > 0.001$ zu falschen Empfindlichkeitskurven für das Filter mit der Zentralwellenlänge 400 nm. Mit Werten $\mu \leq 0.0001$ sind die spektralen Charakteristiken nicht mehr glatt. Deshalb wird der Wert $\mu = 0.001$ für die lineare Schätzung verwendet.

3.2 Gesamt- und separate Kalibration

Wie vorher erklärt, kann die Multispektralkamera entweder durch eine Gesamtkalibration oder durch eine separate Kalibration charakterisiert werden. Die spektralen Kurven, die mit den beiden Kalibrationsverfahren und mit der linearen Schätzung aus [10] rekonstruiert wurden, sind in Abb. 4 zu sehen.

Die große Ähnlichkeit der Kurven bestätigt zunächst einmal prinzipiell das Verfahren. Wenn alle Schätzverfahren betrachtet werden, ist im Durchschnitt die Halbwertsbreite

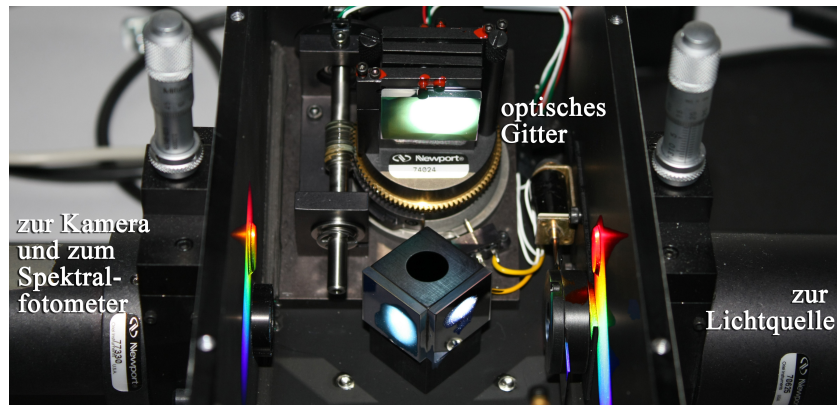


Abbildung 2: Monochromator, der bei den Messungen eingesetzt wird. Die Strahlung der Lichtquelle am Eingang des Monochromators (rechts) trifft über Spiegel auf das optische Gitter in der Mitte und wird dadurch gebeugt. Am Ausgang steht schmalbandige Strahlung zur Verfügung, die entweder von der zu messenden Kamera oder dem Spektralfotometer (Ausgang links) aufgenommen wird.

mit der Gesamtkalibration 0.46 nm kleiner als mit der separaten Kalibration; die Zentralwellenlängen mit der Gesamtkalibration sind um -1.65 nm gegenüber den Zentralwellenlängen mit der separaten Kalibration verschoben.

3.3 Vergleich der Verfahren

Die Ergebnisse der sechs Rekonstruktionsverfahren (d.h. der sechs möglichen Kombinationen aus den drei Schätzverfahren und den zwei Kalibrationsarten) sind in Abb. 5 gezeigt. Die spektralen Charakteristiken der sieben Farbkanäle der Multispektralkamera werden dabei auf den Wellenlängenbereich begrenzt, in dem sie nicht null sind.

Die mit den verschiedenen Verfahren rekonstruierten Spektralkurven sind jeweils sehr ähnlich. Der siebte Farbkanal wird allerdings bei zwei Verfahren schlecht geschätzt: bei der separaten Kalibration mit Haupteigenvektoren und bei der Gesamtkalibration mit Wiener-Schätzung. Das Haupteigenvektorenverfahren rekonstruiert eine Spektralkurve für den monochromen Sensor, deren Werten um 700 nm so klein sind und deren Rauschen so stark ist, dass die Multiplikation dieser Kurven mit der Transmissionskurve des siebten Farbkanals zu einer stark verrauschten Spektralkurve für den Farbkanal führt. Bei der Wiener-Schätzung ist das Problem, dass bei dem siebten Farbkanal die Werte der Matrix $\mathbf{G} \cdot \mathbf{R}_{ss} \cdot \mathbf{G}^T$ kleiner als die der Matrix $\mathbf{R}_{nn}$ werden und die Rekonstruktion deshalb fehler schlägt. Außerdem wird der erste Farbkanal bei der Gesamtkalibration mit linearer Schätzung zu breit geschätzt, weil er zu nah am Rand des Messbereiches des Spektralfotometers liegt.

Die Halbwertsbreiten (oder Bandbreiten), die bei der separaten Kalibration mit der linearen Schätzung berechnet werden, sind immer größer als die Halbwertsbreiten aus den zwei anderen Schätzverfahren, siehe Abb. 5. Durchschnittlich sind sie um 0.34 nm größer als die Halbwertsbreiten des Verfahrens der Haupteigenvektoren und der Wiener-Schätzung, was vernachlässigbar ist. Ansonsten gibt es keine große Unterschiede, was die zentrale Wellenlänge oder die Halbwertsbreite der drei Schätzverfahren betrifft.

Die Mittelwerte der Halbwertsbreiten und der Zentralwellenlängen jedes Farbkanals wer-

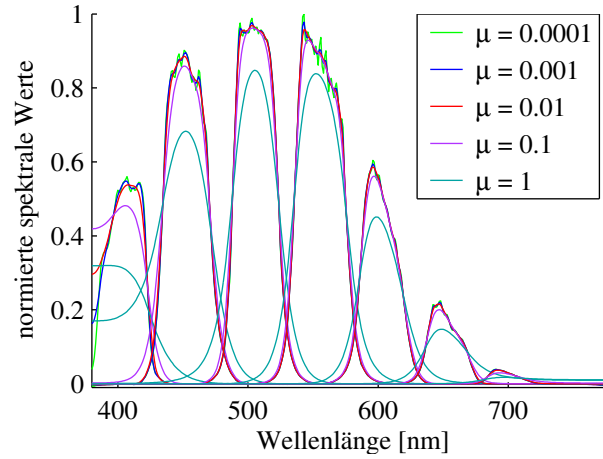


Abbildung 3: Lineare Schätzung der spektralen Empfindlichkeitskurve der Multispektralkamera mit verschiedenen Parametern μ . Für zu kleine Werte von μ enthalten die geschätzten Kurven viel Rauschen; für zu große Werte sind die Kurven nicht mehr realistisch.

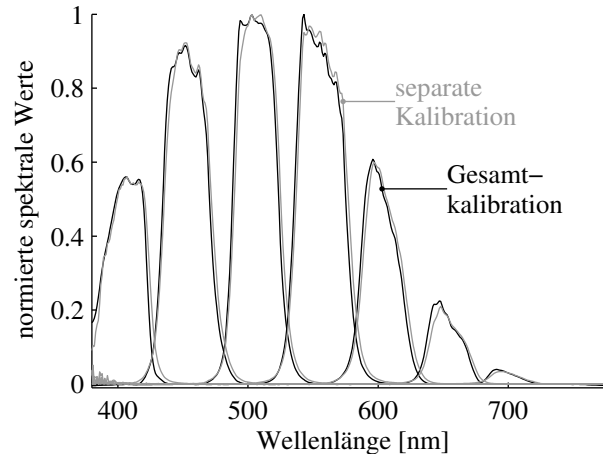


Abbildung 4: Ergebnisse der spektralen Charakterisierung der Multispektralkamera mit der Gesamtkalibration (in schwarz) und der separaten Kalibration (in grau).

den in Tab. 1 zusammengefasst. Sie werden für die Ergebnisse der sechs Rekonstruktionsverfahren berechnet und durch die Standardabweichungen ergänzt. Die großen Abweichungen bei dem siebten Farbkanal wurden bereits im vorigen Abschnitt erklärt. Die Werte, die im Abschnitt 3.2 gegeben wurden, berücksichtigen nur die sechs ersten Farbkanäle. Mit Standardabweichungen kleiner als 1.08 nm für die Halbwertsbreiten und kleiner als 1.23 nm für die Zentralwellenlängen kann auf eine gute Rekonstruktion der spektralen Empfindlichkeitskurven zurückgeschlossen werden.

Die sieben Farbkanäle unserer Multispektralkamera haben also die Zentralwellenlängen 406, 453, 507, 556, 603, 653 und 696 nm und ihre Halbwertsbreiten liegen zwischen 29 und 40 nm. Der Anteil des siebten Farbkanals ist aber dabei sehr gering – auf den IR-cut Filter des monochromen Sensors muss also verzichtet werden, um diese siebenkanalige Multispektralkamera zu verbessern.

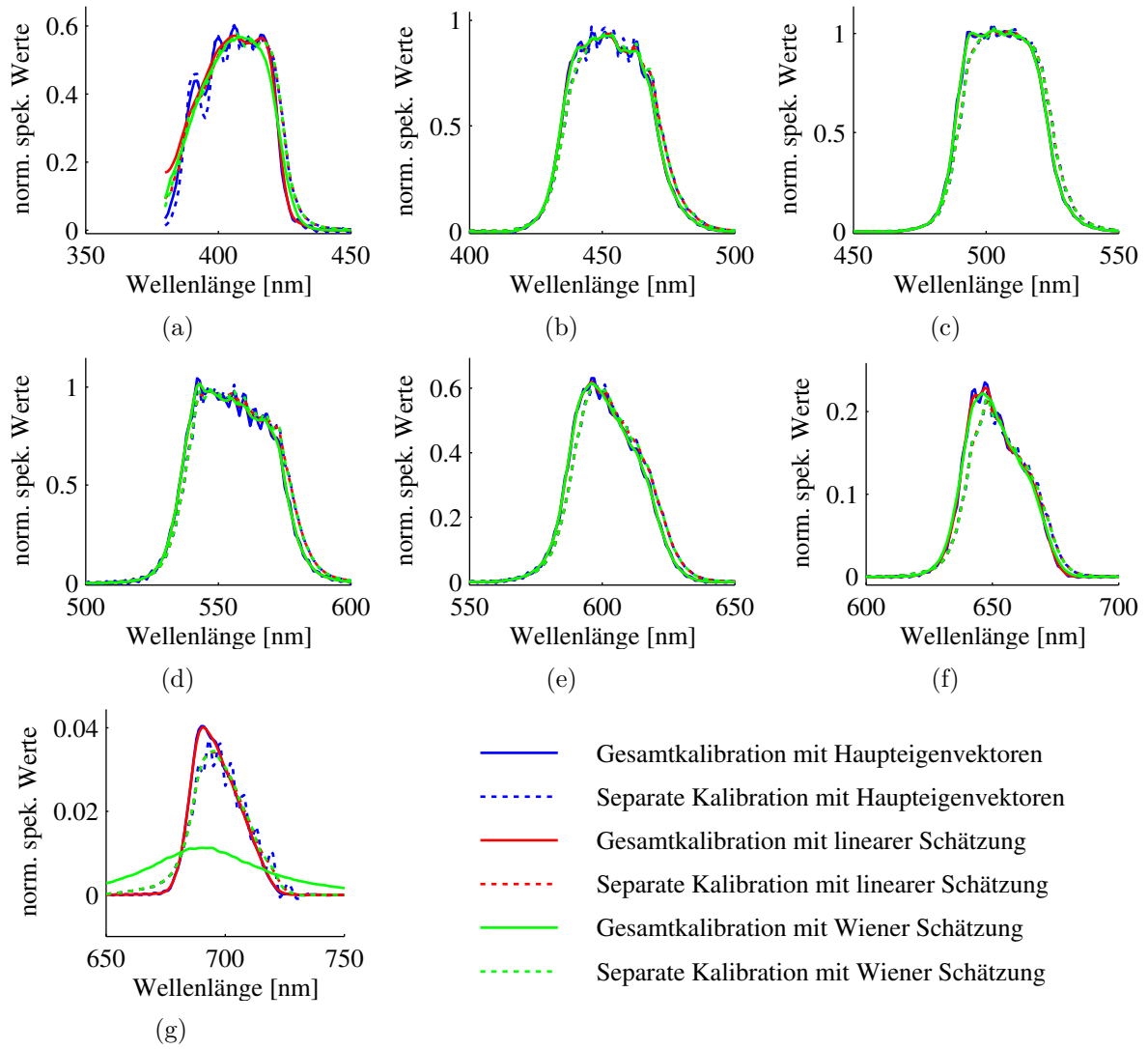


Abbildung 5: Ergebnisse der Rekonstruktion der spektralen Empfindlichkeitskurven für die sieben Farbkanäle der Multispektralkamera mit den sechs verschiedenen Verfahren. Die Zentralwellenlängen der Farbkanäle reichen von ca. 400 nm für den Farbkanal 1 (a) bis ca. 700 nm für den Farbkanal 7 (g), in 50 nm Schritten. Die spektralen Werte sind auf den maximalen Wert der sieben Farbkanäle normiert.

Tabelle 1: Mittelwerte (Mitt.) und Standardabweichungen (Std.) der Halbwertsbreite und der Zentralwellenlänge der sieben Kanäle der Multispektralkamera in nm. Diese Werte werden anhand der sechs rekonstruierten Spektralkurven (mit drei verschiedenen Schätzungen und zwei verschiedenen Kalibrationen) von jedem Farbkanal berechnet.

		Kan. 1	Kan. 2	Kan. 3	Kan. 4	Kan. 5	Kan. 6	Kan. 7
Halbwertsbreite	Mitt.	36.19	37.01	35.67	39.96	31.29	28.71	28.86
	Std.	1.08	0.35	0.08	0.63	0.16	0.31	11.81
Zentralwellenlänge	Mitt.	405.69	453.21	506.59	556.21	602.50	652.53	695.94
	Std.	0.63	0.74	0.88	1.02	1.03	1.23	2.55

4 Zusammenfassung

Es wurde ein Versuchsaufbau vorgestellt, in dem eine Multispektralkamera mit Hilfe eines Monochromators und eines Spektralfotometers spektral charakterisiert wird. Um die Empfindlichkeitskurven der Kamera zu schätzen, wurden drei verschiedene Schätzverfahren unter Berücksichtigung der Bandbreite der Strahlung am Ausgang des Monochromators evaluiert. Die Multispektralkamera wurde außerdem mit zwei verschiedenen Methoden kalibriert: Ihre Komponenten wurden sowohl als ein gesamtes System betrachtet als auch separat kalibriert. Die Ergebnisse der zwei Methoden unterscheiden sich kaum und lassen daher auf eine korrekte spektrale Kalibration der Multispektralkamera zurückschließen. Die Ergebnisse der drei Schätzverfahren sind leicht unterschiedlich. Das Schätzverfahren mit den Haupteigenvektoren ist sehr rauschempfindlich. Die lineare Schätzung bei der Gesamtkalibration resultiert in zu breiten Spektralkurven und sollte eher für die separate Kalibration verwendet werden. Die separate Kalibration mit der Wiener-Schätzung ergibt gute Spektralkurven; die Gesamtkalibration rekonstruiert aber den letzten Farbkanal schlecht, weil seine Empfindlichkeit zu klein ist.

5 Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, Vorhaben AA5/2-1).

Literatur

- [1] ALSAM, ALI und GRAHAM FINLAYSON: *Recovering Spectral Sensitivities with Uncertainty*. In: *Proc. IS&Ts 1st European Conference on Color in Graphics, Imaging, and Vision (CGIV)*, Seiten 22–26, Poitiers, Frankreich, April 2002.
- [2] BARNARD, KOBUS und BRIAN FUNT: *Camera Characterization for Color Research*. Color Research & Application, 27(3):152 – 163, 2002.
- [3] BRAUERS, JOHANNES, NILS SCHULTE und TIL AACH: *Multispectral Filter-Wheel Cameras: Geometric Distortion Model and Compensation Algorithms*. IEEE Transactions on Image Processing, 17(12):2368–2380, Dezember 2008.

- [4] BÜTTNER, CARSTEN, KLAUS BOBEY und BERND SCHLICHTING: *Spectral Sensitivity Estimation of Digital Cameras*. In: *Proc. IS&Ts 3rd European Conference on Color in Graphics, Imaging, and Vision (CGIV)*, Seiten 70–74, Leeds, UK, Juni 2006.
- [5] HARDEBERG, JON YNGVE, HANS BRETTEL und FRANCIS SCHMITT: *Spectral Characterisation of Electronic Cameras*. In: *Electronic Imaging: Processing, Printing, and Publishing in Color, Proc. SPIE*, Band 3409, Seiten 100–109, Zürich, Schweiz, Mai 1998.
- [6] HAWKINS, D. S. und P. GREEN: *Spectral Characterisation of a Digital Still Camera Through a Single Integrating Exposure*. In: *Proc. IS&Ts 4th European Conference on Color in Graphics, Imaging, and Vision (CGIV)*, Seiten 477–480, Terrassa, Spanien, Juni 2008.
- [7] HELLING, STEPHAN, ENRICO SEIDEL und WOLFRAM BIEHLING: *Multispektrale Farbbildrekonstruktion mit sieben Kanälen*. In: *9. Workshop Farbbildverarbeitung*, Seiten 91–98, Ostfildern-Nellingen, Deutschland, Oktober 2003.
- [8] PARK, SEUNG OK, HONG SUK KIM und JUNG MAN PARK: *Development of Spectral Sensitivity Measurement System of Image Sensor Devices*. In: *Proc. IS&T/SID 3rd Color Imaging Conference (CIC): Color Science, Systems and Applications*, Scottsdale, Arizona, USA, November 1995.
- [9] PARMAR, MANU, FRANCISCO IMAI, SUNG HO PARK und JOYCE FARRELL: *A Database of High Dynamic Range Visible and Near-infrared Multispectral Images*. In: *IS&T/SPIE Electronic Imaging*, San Jose, CA, USA, Januar 2008.
- [10] PAULUS, DIETRICH, JOACHIM HORNEGGER und LÁSZLÓ CSINK: *Linear Approximation of Sensitivity Curve Calibration*. In: *8. Workshop Farbbildverarbeitung*, Ilmenau, Deutschland, Oktober 2002.
- [11] PRATT, WILLIAM K.: *Digital Image Processing: PIKS Inside*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 2001.
- [12] VURPILLOT, VIRGINIE, ANNE-CLAIRE LEGRAND und ALAIN TREMEAU: *Spectral Sensitivity Estimation for Color Camera Calibration*. In: *Proc. IS&Ts 3rd European Conference on Color in Graphics, Imaging, and Vision (CGIV)*, Seiten 302–306, Leeds, UK, Juni 2006.