

Parametrierung digitaler Farbkameras auf Basis einer spektralen Charakterisierung

Carsten Büttner¹, Klaus Bobey¹ und Bernd Schlichting²

¹Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK)

Fakultät Naturwissenschaften und Technik, Göttingen

eMail: {buettner,bobey}@hawk-hhg.de

²KAPPA opto-electronics GmbH, Gleichen

eMail: b.schlichting@kappa.de

Zusammenfassung. Die spektrale Charakterisierung von Farbbildsensoren ist eine wichtige Voraussetzung zur Parametrierung von Farbkorrektur- und Farbkonstanzalgorithmen. Es wird ein Verfahren zur Spektralschätzung der Sensorempfindlichkeit aus seinen Reaktionen auf einen Farbprobensatz vorgestellt. Die hohe Güte des beschriebenen Verfahrens wird durch die gezielte Auswahl eines geeigneten Farbprobensatzes und Optimierung der Messbedingungen erreicht.

1 Einleitung

Die Aufnahme, Verarbeitung und Wiedergabe farbiger Bilder erlangt in vielen Gebieten der Industrie, Medizin und Forschung immer größere Bedeutung. In verschiedenen medizinischen Anwendungen sind Farbbildaufnahme- und -wiedergabesysteme gefordert, die ein farbtreu reproduziertes Livebild ermöglichen. Im Rahmen eines Forschungsprojektes¹ an der Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK) und dem Kooperationspartner KAPPA opto-electronics GmbH werden Verfahren zur Charakterisierung von Farbkameras ermittelt, die eine gezielte Anpassung der Kamera und ihrer internen Verarbeitungsalgorithmen an die Anwendung ermöglichen sowie die Reproduzierbarkeit in der Serienfertigung gewährleisten. Dabei stellt die spektrale Charakterisierung von Farbbildsensoren eine wichtige Voraussetzung zur Auswahl und Parametrierung von Farbkorrektur- und Farbkonstanzalgorithmen dar.

Bislang werden Farbkameras meistens anhand ihrer Ausgangsdaten bei Verwendung einer definierten Lichtquelle und einer Farbtestkarte abgeglichen. Dazu muss die Möglichkeit gegeben sein, eine Farbtestkarte in das Anwendungssystem einzubringen oder ein Abgleichsystem einzurichten, dessen Quelle über die gleiche spektrale Strahlungsverteilung wie die des Anwendungssystems verfügt. Unser Ansatz einer flexiblen Anpassung an unterschiedliche Anwendungen basiert auf einer spektralen Modellierung des Anwendungssystems. Die spektrale Strahlungsverteilung der Quelle geht als Messgröße in das Modell ein. Es können aber auch beispielsweise Normlichtarten verwendet werden ohne entsprechende Strahlungsquellen zur Verfügung zu haben. Auch die Farbproben gehen nur anhand ihrer spektralen Transmission oder Reflexion in das Modell ein. Somit können sowohl typische Testkarten wie ein Macbeth ColorChecker oder auch für die Anwendung charakteristische Objekte wie Haut- oder Gewebeprobe verwendet werden.

¹gefördert vom Land Niedersachsen und aus Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung

Das Modell setzt die Kenntnis der spektralen Empfindlichkeit des Bildsensors voraus. Diese Angabe wird vom Sensorhersteller nur als typischer Verlauf und oft nur in einem begrenzten Wellenlängenbereich angegeben. Um verschiedene Sensortypen (bzw. die entsprechenden Kameras) oder sogar jeden individuellen Sensor eines Typs vermessen zu können, streben wir ein Messverfahren an, das gut handhab- und schnell durchführbar ist. Es sollte also mit wenig Kalibrierungsaufwand stabile und reproduzierbare Ergebnisse liefern. Zu diesem Zweck verfolgen wir den Ansatz eines indirekten Messverfahrens auf Basis spektral breitbandiger Farbproben. Dabei wird anhand der Sensorausgabedaten als Reaktion auf einen Satz Farbproben ein Rückschluss auf die spektrale Empfindlichkeit des Sensors durchgeführt. Ein weiterer Vorteil im Einsatz breitbandiger Farbproben liegt in der Nähe zu den typischen Anwendungsbedingungen, für die schließlich optimale Verarbeitungsparameter auf Basis dieser Messung ermittelt werden sollen. Nicht zuletzt sind auch die Kosten gegenüber einem monochromatischen Messaufbau wesentlich geringer.

Zur Schätzung der spektralen Sensorempfindlichkeit wird ein Modell für die Kamera benötigt. Die Charakterisierung soll sich nur auf den Sensor und die notwendige Analogelektronik einschließlich des Analog-Digital-Umsetzers beziehen. Die Spektralschätzung erfolgt also direkt auf Basis der digitalisierten Sensorrohdaten ohne, wie in anderen Arbeiten [4, 8], nachgeschaltete Verarbeitungsalgorithmen berücksichtigen zu müssen. Die spektrale Empfindlichkeit des k -ten Kanals eines Farbsensors wird hier mit $s_k(\lambda)$ bezeichnet (hier gilt $k = 3$ für die verwendeten RGB-Sensoren). Die Reaktion r_k jedes Kanals auf eine spektrale Strahlungsverteilung wird zunächst durch das lineare Kameramodell

$$r_k = t_{integ} \cdot \int s_k(\lambda) S(\lambda) \beta(\lambda) d(\lambda) \quad (1)$$

beschrieben. Dabei ist t_{integ} die Integrationszeit der Kamera, $S(\lambda)$ die spektrale Strahlungsverteilung der Lichtquelle und $\beta(\lambda)$ die spektrale Reflexion oder Transmission eines Objekts (z. B. eines Filters). Dieses Modell kann in guter Näherung für integrierende Bildsensoren angenommen werden. In der Praxis werden die kontinuierlichen Funktionen in Abhängigkeit der Wellenlänge λ durch diskrete Funktionen ersetzt, um schnelle numerische Berechnungen durchführen zu können. In der spektralen Messtechnik sind auch ohnehin nur begrenzte Wellenlängenaufösungen erreichbar. In unserem Modell wird, wenn nicht anders angegeben, der Wellenlängenbereich 380 nm bis 750 nm mit einer Intervallbreite von 10 nm verwendet. Damit ergeben sich $N = 38$ spektrale Stützstellen.

In der Notation der linearen Algebra wird Beziehung (1) zu

$$r_k = t_{integ} \cdot \mathbf{s}_k^T \cdot \mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\beta} \quad (2)$$

mit der Diagonalmatrix \mathbf{S} , die das diskrete Spektrum der Strahlungsquelle $S(\lambda_i)$ enthält, und dem Spaltenvektor $\boldsymbol{\beta}$, der das Transmissions- oder Reflexionsspektrum $\beta(\lambda_i)$ eines Objekts (Filter) enthält. Der Index i kennzeichnet diskrete Funktionswerte. Im Folgenden werden die Strahlungsquelle und die Objektspektren zu einer Farbprobenmatrix \mathbf{C} mit $\mathbf{C}_j = \mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\beta}$ für jede Farbprobe j zusammengefasst.

2 Methoden

Es gibt bereits eine Reihe von Verfahren, um aus den Kamerareaktionen auf spektral gemessene Farbproben die spektrale Empfindlichkeit der Kamera zu schätzen. Dabei wurde bereits mehrfach gezeigt, dass nur durch die Berechnung der Pseudo-Inversen \mathbf{C}^+ ohne Berücksichtigung

von Nebenbedingungen kaum ein brauchbares Ergebnis zu erzielen ist (z. B. [1, 3, 9]). Die Lösung ist hier sehr stark vom Rauschen abhängig. Deshalb wurden von verschiedenen Autoren zusätzliche Nebenbedingungen vorgeschlagen und auch unterschiedliche mathematische Verfahren zur Lösungsbestimmung eingesetzt (s. z. B. [6, 1, 4, 2, 3, 9, 7]). Von den Autoren wurden maßgeblich Verfahren unter Nutzung der linearen und der quadratischen Programmierung getestet, wobei die quadratische Programmierung als das beste Werkzeug erachtet wird. Es lässt sich durch die flexible Erweiterbarkeit mit zusätzlichen Nebenbedingungen bequem und zielführend einsetzen.

Die Kriterien für die Minimumsuche können unter den hier gegebenen Rahmenbedingungen auf zwei wesentliche reduziert werden: der absolute quadratische Fehler für jede Farbprobe gegeben durch

$$d_j^2 = (r_{kj} - \mathbf{s}_k^T \cdot \mathbf{C}_j)^2 \quad \forall j \quad (3)$$

und die Glattheit der Spektralwertfunktion, gegeben durch das Quadrat der zweiten Differenzen an jeder spektralen Stützstelle entsprechend

$$D_i^2 = \left(\begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_{k,i-1} & s_{k,i} & s_{k,i+1} \end{bmatrix}^T \right)^2 \quad \forall 2 \leq i \leq N-1 \quad (4)$$

Zur Gewichtung der beiden Kriterien wird ein zusätzlicher Faktor eingesetzt, der später empirisch zu ermitteln ist. Die quadratische Bewertung in der Zielfunktion führt zu einer ausgewogenen Berücksichtigung aller d_j und D_i . Dies scheint ein entscheidender Vorteil gegenüber des in [4] vorgestellten Ansatzes mittels linearer Programmierung zu sein. Eine jeweils getrennte Bewertung von mittlerer und maximaler Abweichung wird damit überflüssig. Stark einschränkende Kriterien wie beim Einsatz von Basisfunktionen [3] oder Uni-Modalität [1] würden hier zu große Abweichungen verursachen. Auch das Kriterium der Positivität der Spektralwertfunktionen, welches von vielen Autoren verwendet wird, findet hier keine Berücksichtigung, da beispielsweise ein Kanalübersprechen (zeitbezogen) als negativer Anteil spektral modelliert werden kann. In [1] wird die Minimierung des relativen Fehlers für jede Farbprobe, beschrieben durch

$$d_j^2 = \left(\mathbf{s}_k^T \cdot \frac{\mathbf{C}_j}{r_{kj}} - 1 \right)^2 \quad \forall j \quad (5)$$

vorgeschlagen. Die Vorteile bei der Verwendung des relativen Fehlers bezüglich der Verringerung des Fehlers im rg-Koordinatensystem können nicht bestätigt werden. Dieser Ansatz führt sogar zu einer Erhöhung der Unsicherheit in der Spektralschätzung, da die Farbproben, die eine geringe Sensoraussteuerung und somit auch ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis verursachen, stärker bewertet werden. Auf den Ansatz, im Rahmen der Spektralschätzung auch eine Nichtlinearität in den Kameraausgabewerten zu bestimmen, wird im Kapitel zu den praktischen Ergebnissen gesondert eingegangen.

Zur Beurteilung der Güte des Ergebnisses werden zwei Kriterien angeführt: der normierte euklidische Abstand zwischen Kamerareaktion \mathbf{r}_j und spektraler Rückrechnung $\mathbf{s}^T \cdot \mathbf{C}_j$ nach

$$e_{RGB,j} = \frac{\sqrt{(r_{R,j} - \mathbf{s}_R^T \cdot \mathbf{C}_j)^2 + (r_{G,j} - \mathbf{s}_G^T \cdot \mathbf{C}_j)^2 + (r_{B,j} - \mathbf{s}_B^T \cdot \mathbf{C}_j)^2}}{\sqrt{r_{R,ref}^2 + r_{G,ref}^2 + r_{B,ref}^2}} \quad (6)$$

und der entsprechende chromatische Abstand im rg-Diagramm, der durch

$$e_{rg,j} = \sqrt{\left(\frac{r_{R,j}}{\sum \mathbf{r}_j} - \frac{\mathbf{s}_R^T \cdot \mathbf{C}_j}{\sum \mathbf{s}^T \cdot \mathbf{C}_j}\right)^2 + \left(\frac{r_{G,j}}{\sum \mathbf{r}_j} - \frac{\mathbf{s}_G^T \cdot \mathbf{C}_j}{\sum \mathbf{s}^T \cdot \mathbf{C}_j}\right)^2} \quad (7)$$

gegeben ist. Der Index *ref* bezeichnet die Kamerareaktion auf die spektrale Strahlungsverteilung $S(\lambda)$ der Lichtquelle. Während die Spektralschätzung für jeden Kanal getrennt durchgeführt wird, bewerten beide Gütekriterien das Gesamtergebnis der Spektralschätzung aller Kanäle. Diese Kriterien wurden ausgewählt, da sie sich auf die Größen beziehen, die schließlich die Eingangsgrößen für die Parameteroptimierung für Farbkorrektur- und Farbkonstanzalgorithmen darstellen.

Mit der Zielstellung, einen möglichst einfach handhab- und schnell durchführbaren Messablauf zu konzipieren, kann nur eine begrenzte Anzahl ausgewählter Farbproben für die Spektralschätzung verwendet werden. Für die Auswahl optimaler Farbproben ist den Autoren bislang kein Ansatz aus der Literatur bekannt. Oft wird auf den Munsell ColorChecker zurückgegriffen [6, 1, 3]. In anderen Arbeiten (z. B. [4, 5]) werden Filterfolien von der Firma Roscolux verwendet, derer es bereits einige hundert zur Auswahl gibt. Diese sollen auch hier zum Einsatz kommen.

Für dieses Messverfahren wird eine Auswahl von 60 Filtern getroffen (etwa doppelt so viel wie ursprünglich Stützstellen geschätzt werden sollten: 400 nm bis 700 nm in 10 nm Schritten). Dadurch sollte eine ausreichende Überbestimmtheit des zu lösenden Gleichungssystems gegeben sein. Zur Auswahl geeigneter Farbproben wird das nachfolgend beschriebene Verfahren getestet.

Zur Lösung des Optimierungsproblems werden Algorithmen der MATLAB Optimization Toolbox verwendet. Das Lösen von Optimierungsproblemen mittels quadratischer Programmierung ist mit der Extremwertbestimmung bei mehrdimensionalen Funktionen unter Nebenbedingungen zu vergleichen. Daher liefern die Algorithmen neben dem ermittelten Lösungsvektor einen Satz Lagrange-Multiplikatoren entsprechend der Anzahl der Nebenbedingungen. Die Lagrange-Multiplikatoren liefern eine Aussage über den Einfluss der jeweiligen Nebenbedingung zur Bestimmung des Optimums. Deshalb werden die Proben ausgewählt, deren Minimierungsbedingung mit den betragsmäßig größten Lagrange-Multiplikatoren bewertet wird. In der Simulation wird sehr schnell deutlich, dass einige Proben eindeutig auszuwählen sind, die gesamte Auswahl aber stark vom Rauschen im jeweiligen Simulationsdurchlauf abhängig ist (s. Abschnitt Simulation). Deshalb wird die Simulationsroutine vielfach ausgeführt (Test mit 1000 Durchläufen), um schließlich eine statistische Auswertung betreiben zu können. Mit der daraus resultierenden Probenauswahl wurden die hier vorgestellten praktischen Ergebnisse erzielt.

3 Simulation

Die Simulation dient dem Test des spektralen Schätzverfahrens durch Modellierung der realen Kamera (KAPPA DXc100). Die Berechnung der Kamerareaktion erfolgt entsprechend Beziehung (2), wobei die spektrale Empfindlichkeit s des Sensors zunächst dem Datenblatt des verwendeten Sensors Kodak KAI-1020CM entnommen wurde (s. Abb. 1). Die dargestellten Spektralwertfunktionen resultieren aus der Sensorempfindlichkeit und einem zusätzlichen optischen Filter zur Sperrung des NIR-Bereichs. Auf Basis dieses Modells werden die Kame-

rareaktionen auf die ausgewählten Farbproben, die beim nachfolgend vorgestellten Farbkameramessplatz verwendet werden, berechnet. Es ist noch anzumerken, dass die Berechnung der Kamerareaktion für einen Wellenlängenbereich von 380 nm bis 1000 nm und 10 nm Intervallbreite erfolgte, um den Empfindlichkeitsbereich des Sensors abzudecken. Die spätere Spektralschätzung erfolgte schließlich in dem eingangs genannten Wellenlängenbereich.

Zur Simulation realer Kamerareaktionen für den Test des spektralen Schätzverfahrens werden die berechneten idealen Reaktionswerte durch simulierte Rauscheinflüsse modifiziert. Das verwendete Rauschmodell berücksichtigt drei elementare Rauschgrößen: das Dunkelsignalrauschen, das Photonenrauschen und die PRNU². Unter Verwendung der oben beschriebenen Methode erfolgt schließlich die Spektralschätzung aus den rauschbehafteten Kamerareaktionen. In Abbildung 1 sind die Datenblattangabe als Modelleingangsgröße und die erfolgte Spektralschätzung gegenübergestellt. Es sind nur leichte Schwächen in der Schätzung des Rotkanals

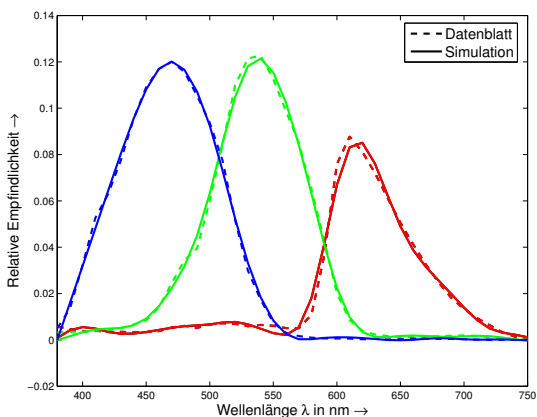


Abbildung 1: Simulationsergebnis: Spektrale Empfindlichkeit des KAI-1020CM mit Filter

erkennbar. Die Fehlerbewertung wird später anhand der praktischen Ergebnisse durchgeführt. Die Abfolge der oben beschriebenen Schritte wird als ein Simulationsdurchlauf bezeichnet. Zur Ermittlung geeigneter Farbproben wurden 196 spektral vermessene Filterfolien für die Simulation verwendet. Zur Auswahl der 60 am besten geeigneten Farbproben wurde die statistische Verteilung der Lagrange-Multiplikatoren bei 1000 Simulationsdurchläufen, wie im Methoden-Abschnitt beschrieben, herangezogen. Da diese Auswahl spezifisch für den verwendeten Messaufbau und den verwendeten Sensor ermittelt wurde, wird das Verfahren an zwei verschiedenen Kameras, der KAPPA DXc100 (Sensor Kodak KAI-1020CM) und der KAPPA DX40 (Sensor Sony ICX285AQ), getestet.

4 Praktische Ergebnisse

Für die praktische Umsetzung wurde der in Abbildung 2 dargestellte Farbkameramessplatz konzipiert. Der Farbkameramessplatz besteht im Wesentlichen aus einer stabilen Wolfram-

²PRNU - Photo Response Non-Uniformity

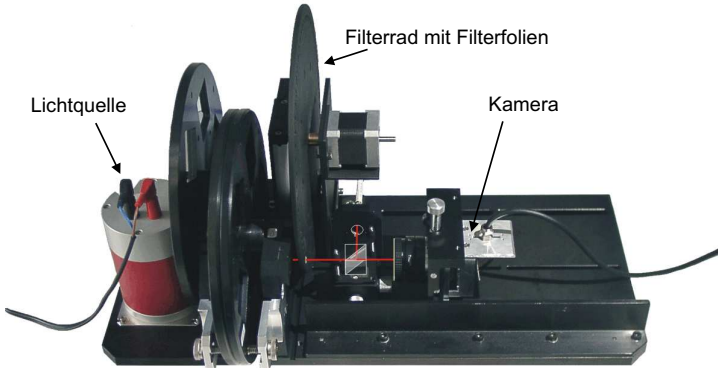


Abbildung 2: Farbkameramessplatz

Halogen-Lichtquelle, verschiedenen Filtern zur Modifikation der spektralen Strahlungsverteilung der Lichtquelle, einem schrittmotorgetriebenen Filterrad zur Aufnahme der ausgewählten Filterfolien und einem Strahlteiler, der die gleichzeitige spektrale Referenzmessung und Aufnahme der Kamerabildaten ermöglicht. Vor der Verwendung des Messplatzes müssen alle spektral wirkenden Komponenten, vor allem der Strahlteiler, spektral charakterisiert werden. Anschließend kann mit den oben beschriebenen Methoden die Spektralschätzung für jede Kamera durchgeführt werden. In Abbildung 3 werden die Ergebnisse für die beiden Kameras DXc100 und DX40 von KAPPA dargestellt.

In der Praxis liefert die Spektralschätzung auf Basis des angenommenen linearen Modells nur sinnvolle Ergebnisse, wenn vorher eine Korrektur der Nichtlinearität der Kamerareaktionen durchgeführt wird. Die verwendeten Kameras weisen zwar nur ein geringfügig nichtlineares Verhalten auf, aber selbst dies führt bereits zu erheblichen Fehlern in der Spektralschätzung. Die Bestimmung der Nichtlinearität wurde nach [5] durch Variation der Integrationszeit durchgeführt und durch ein Polynom 2. Ordnung approximiert. Das Polynomfitting lässt sich ebenfalls als Nebenbedingung in das Verfahren zur Spektralschätzung integrieren, zeigt aber nur eine begrenzte Güte und erhöht insgesamt die Unsicherheit des Schätzverfahrens auf Grund der zusätzlich zu schätzenden Polynomkoeffizienten. Die Messmethode nach [5] lässt sich hingegen einfach und schnell durchführen und führt zu einer sicheren Bestimmung des zusätzlichen Modellparameters \mathcal{F} . Mit diesem muss Beziehung (2) für den allgemeinen Fall zu

$$r_k = \mathcal{F}(\nu_k) = \mathcal{F}(t_{integ} \cdot \mathbf{s}_k^T \cdot \mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\beta}) \quad (8)$$

erweitert werden. Die Spektralschätzung wird schließlich auf Basis der linearisierten Kamerareaktionen ν durchgeführt. Die Unsicherheiten in der Spektralschätzung werden in erster Linie durch Rauschen verursacht. Deshalb wird zur Verbesserung des Schätzergebnisses das Signal-Rausch-Verhältnis in den Kamerareaktionen für jede Farbprobe optimiert. Durch eine Anpassung der Integrationszeit t_{integ} wird für eine optimale Aussteuerung der Farbkanäle gesorgt, so dass der maximal hervorgerufene Signalwert eines Kanals zu einer maximalen Aussteuerung des Bildsensors führt.

Das Ergebnis der Spektralschätzung aus den korrigierten Kamerareaktionen ist in Abbildung 3 (a) im Vergleich zu den Datenblattangaben dargestellt. Es sind leichte Abweichungen im

Funktionsverlauf und eine Restwelligkeit im Bereich geringer Empfindlichkeitswerte erkennbar. Diese durch stärkere Gewichtung des Glattheitskriteriums zu unterdrücken, scheint nicht zielführend, weil dadurch auch eine Abflachung des eigentlich recht spitzen Verlaufs des Rotkanals erzwungen werden würde. In Abb. 3 (b) und (c) sind die Fehlerauswertungen nach den Beziehungen (6) und (7) dargestellt. Im Vergleich zum Fehler bei Verwendung der Datenblattangabe lässt sich jeweils eine deutliche Verbesserung erkennen. Die durchschnittliche normierte Vektordifferenz nach Spektralschätzung beträgt jeweils 2,5 und 1,8 Promille, der durchschnittliche Abstand der rg-Koordinaten 2,1 und 1,9 Promille für die beiden Kameras und den verwendeten Probensatz.

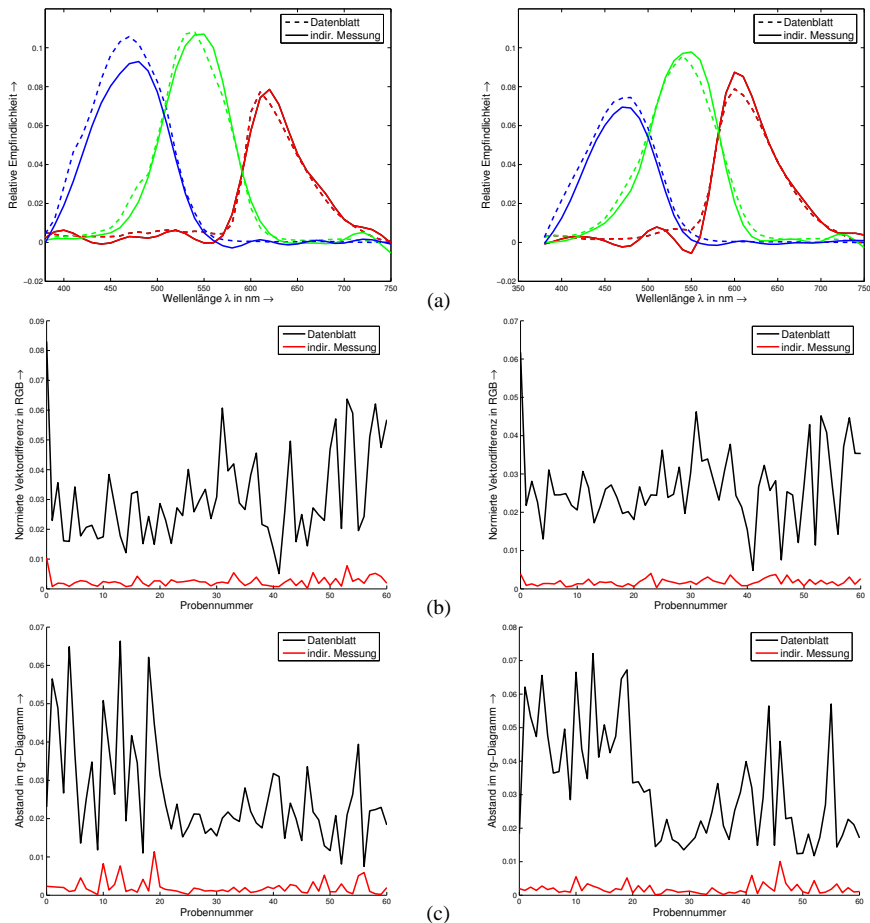


Abbildung 3: Praxisergebnisse: jeweils links für KAPPA DXc100 und rechts für KAPPA DX40: Spektralwertfunktionen (a), normierte Farbvektordifferenz (b) und Abstand im rg-Diagramm (c)

5 Diskussion und Ausblick

Die praktischen Ergebnisse zeigen, dass das vorgestellte Verfahren grundsätzlich zu gut verwertbaren Spektralschätzungen führt. Es sind noch starke Welligkeiten in den Bereichen geringer Empfindlichkeit zu erkennen. Diese können durch verschiedene Einflussgrößen verursacht werden. Es können weitere bislang nicht berücksichtigte Effekte in der Kameraelektronik verantwortlich sein. Eine Schwäche im derzeitigen Messaufbau stellt aber auch die spektrale Referenzmessung im Wellenlängenbereich unter 450 nm dar. Die Messunsicherheiten erhöhen sich hier beträchtlich, die Messdaten unterhalb von 380 nm sind nicht mehr verwertbar. Weiterhin wird zur Spektralschätzung nur der Wellenlängenbereich von 380 nm bis 750 nm berücksichtigt. Es besteht die Vermutung, dass Strahlung außerhalb dieses Wellenlängenbereichs für eine Ladungsträgergeneration im Sensor sorgt. Im Bereich größerer Wellenlängen führt aber die Einbeziehung zusätzlicher Stützstellen zu größeren Unsicherheiten im Schätzergebnis und im Bereich kürzerer Wellenlängen erlaubt das derzeit zur Verfügung stehende Spektrometer keine hinreichend genauen Messungen. Eine Verbesserung des praktischen Ergebnisses wird nach Rekonfigurierung des Spektrometers mit einem anderen Reflexionsgitter erwartet.

Die Methode zur Farbprobenauswahl zeigt einen sehr guten Ansatz. In der Simulation hat sich die Güte in der Spektralschätzung unter Verwendung aller Farbproben gegenüber der getroffenen Auswahl kaum verändert. In der Praxis wurde schon im hier gezeigten ersten Ansatz gute Ergebnisse erzielt. Um die Güte der Spektralschätzung besser bewerten zu können, sind eine monochromatische Referenzmessung und eine Fehlerauswertung nach den beschriebenen Methoden unter Verwendung eines unabhängigen Farbprobensatzes geplant.

Literatur

- [1] K. Barnard and B. Funt. Camera Characterization for Color Research. Number 3 in Color Research and Application, Vol. 27, pages 153–164, 2002.
- [2] Kobus Barnard. *Practical Colour Constancy*. PhD thesis, Simon Fraser University, School of Computing Science, 1999.
- [3] G. D. Finlayson, S. Hordley, and P. M. Hubel. Recovering Device Sensitivities with Quadratic Programming. IS&T/SID Sixth Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications, pages 90–95, 1998.
- [4] Friedhelm König. *Die Charakterisierung von Farbsensoren*. Dissertation, RWTH Aachen, Fakultät ET & IT, 2001.
- [5] Udo Krüger. *Ausgewählte Aspekte der orts aufgelösten Erfassung stationärer Licht- und Farbverteilungen*. Dissertation, TU Ilmenau, Fakultät E/I, 2004.
- [6] D. Paulus, V. Hong, C. Idler, J. Hornegger, and L. Csink. Sensitivity Curve Approximation using linear Algebra. Second European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision, pages 207–212, 2004.
- [7] G. Sharma and H. J. Trussell. Characterization of scanner sensitivity. IS&T/SID Color Imaging Conference: Transforms & Transportability of Color, pages 103–107, 1993.
- [8] P. L. Vora, J. E. Farrell, J. D. Tietz, and D. H. Brainard. Digital color cameras - 1 - Response models. Technical report, Hewlett-Packard Laboratories, 1997. Available from <http://www.hpl.hp.com/techreports/97/HPL-97-53.html>.
- [9] P. L. Vora, J. E. Farrell, J. D. Tietz, and D. H. Brainard. Digital color cameras - 2 - Spectral response. Technical report, Hewlett-Packard Laboratories, 1997. Available from <http://www.hpl.hp.com/techreports/97/HPL-97-54.html>.