

Spektrale Eigenschaften einer HDR-Kamera

Wolfram Hans, Florian Bäckermann, Stefan Müller, and Dietrich Paulus

University of Koblenz-Landau
Active Vision
{hans,bakerman,stefanm,paulus}@uni-koblenz.de,
<http://www.uni-koblenz.de/agas>

Abstract. HDR („high-dynamic range“) bezeichnet eine Technik, die gegenüber bisherigen Bildformaten einen deutlich größeren Dynamikumfang umfasst. In der Computergrafik ist sie z. B. aus dem Bereich *Image Based Lighting* nicht mehr wegzudenken. Über die Qualität solcher Kamerasysteme in Hinblick auf ihre Eignung als „Messgerät“ ist noch wenig bekannt. Gerade in extremen Beleuchtungssituationen ist eine Aussage über die Qualität der Messung wünschenswert. In diesem Beitrag werden die spektralen Eigenschaften der HDRC Videokamera (IMS Chips), Modell GEVILUX CAM1xCL untersucht. Durch den zugrunde liegenden Messaufbau wurden für HDR jedoch nur moderate Bestrahlungsstärken erreicht. Zur Validierung der gewonnenen Daten wurde eine weitere Versuchsreihe mit Farbprüfmustern durchgeführt.

1 Grundlagen

Nachdem in [7] ein gemeinsames Modell der Bildentstehung erarbeitet wurde, taucht die Frage auf, wie sich die dort verwendete HDR-Kamera in Bezug auf Licht verhält. In diesem Beitrag liegt daher ein Schwerpunkt auf der spektralen Vermessung der Sensorantwort in Anlehnung an [5,2]. Weitere Fragen bezgl. der Linearität von Ein- und Ausgangsgrößen werden ebenfalls kurz angesprochen. Die eingesetzten Komponenten und Messmethoden lassen jedoch eine detailliertere Aussage diesbezüglich nicht zu, da der Vorteil des hohen Dynamikbereichs der Kamera damit nicht ausgeschöpft werden kann. Statt dessen werden die Ergebnisse bei geringen Strahldichten vorgestellt.

Zentraler Bestandteil ist das Bildentstehungsmodell aus [7] mit der vereinfachten Formel (1). Die Sensorantwort $f^{(k)}$ ergibt sich aus dem Integral über das Produkt aus der ausgesendeten Strahldichte L_o eines Flächenelements dA_e mit der spektralen Empfindlichkeit R_k des Sensors in den Grenzen des sichtbaren Wellenlängenbereiches. Dabei bezeichnet k den Kamerakanal; üblicherweise r, g und b.

$$\begin{aligned} f^{(k)} &= \int_{\lambda} L_o(\lambda, dA_e) \cdot R_k(\lambda) \cdot d\lambda \\ &= \int_{\lambda} E^{\text{konstant}}(\lambda, dA_e) \cdot \rho(\lambda, dA_e) \cdot R_k(\lambda) \cdot d\lambda \end{aligned} \quad (1)$$



Fig. 1. Sensordaten unbearbeitet

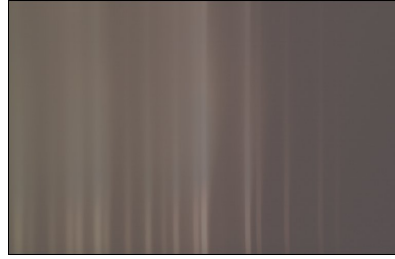


Fig. 2. Sensordaten verstärkt

Die Strahldichte L_o selbst berechnet sich aus der einfallenden Bestrahlungsstärke E , multipliziert mit den Reflektionseigenschaften ρ des Flächenelements. Im vereinfachten Fall wird die Bestrahlungsstärke als konstant aus allen Raumrichtungen angenommen.

Um eine Aussage über die spektralen Eigenschaften und damit letztlich $R_k(\lambda)$ treffen zu können, wird die HDR-Kamera mit Licht bestimmter Wellenlängen bestrahlt. Zudem besitzen Spektralfarben die maximal mögliche Farbsättigung. Deshalb werden verschiedene Verfahren untersucht, die den Sensor mit definierten Wellenlängen beleuchten. Dazu werden Experimente mit Spektrallampen, Prismen und einem Monochromator durchgeführt. In einem weiteren Versuch werden Farbprüfmuster verwendet, um die Ergebnisse zu stützen. Die dabei verwendeten Verfahren finden sich in [9,8,10].

Diskrete Spektrallinien Die grundlegende Idee des ersten Versuchsaufbaus ist, die bekannten Spektrallinien bestimmter chemischer Elemente zu nutzen, um den Sensor mit einer bekannten Wellenlänge zu beleuchten. Im Laufe der Experimente zeigt dieser Ansatz Schwächen, die im Folgenden beschrieben werden.

Zunächst erzeugen die zur Verfügung stehenden Spektrallampen eine zu geringe Bestrahlungsstärke. Wird das Licht durch ein Prisma weiter spektral aufgespaltet, erzeugt der Kamerasensor weitestgehend Signale, die im Rauschen untergehen (Fig. 1).

Desweiteren können die verwendeten Linsen das Licht nicht hinreichend genau fokussieren. Hinzu kommt, dass bei Leuchtmitteln mit vergleichsweise engen Spektrallinien die Trennung nicht sauber erfolgt. Exemplarisch ist dies für einen Ausschnitt des Spektrums von HgCd in Fig. 2 dargestellt. Hochwertige Linsensysteme können dem entgegenwirken, steigern jedoch den experimentellen Aufwand.

Schließlich konnte auch die Vorgabe, dass am Ort des Sensors eine über die Wellenlänge konstante Bestrahlungsstärke herrscht, nicht erfüllt werden, da die Spektrallinien selbst unterschiedliche Intensitäten aufweisen. Eine entsprechende Nivellierung auf die niedrigste Bestrahlungsstärke ist bei den geringen Strahlungsleistungen nicht sinnvoll.

Aus den vorgenannten Gründen wird ein Alternative zur der Vermessung des Kamerasensors mit den Spektrallampen gesucht und der folgende Ansatz betrachtet.

Kontinuierliches Spektrum Der Anspruch, maximal gesättigte Farben und damit Spektralfarben zu nutzen, um den Sensor zu vermessen, wurde auch in dem zweiten Experiment beibehalten.

Statt der Spektrallampen (mit 10 – 55W) wird nun eine Wolframdraht-Glühlampe verwendet, die mit 100W eine deutlich höhere Strahlungsleistung besitzt. Eine weitere positive Eigenschaft dieser Lichtquelle ist die sehr gute Annäherung an den Planck'schen Strahler mit seinem kontinuierlichen Spektrum.

Auch hier wird das Licht mit Hilfe eines Prismas spektral aufgeteilt. Durch das vollständige Spektrum ist die Bestrahlungsstärke am Ort des Sensors im Vergleich zu den Spektrallinien deutlich höher.

Dieser Vorteil steht gegenüber, dass nun nicht mehr bekannt ist, an welchem Ort des Spektrums (und damit des Sensors) welche Wellenlänge vorliegt. Eine Kalibrierung über bekannte Spektrallinien (z. B. aus dem vorausgegangenen Versuch) ist bei dem gegebenen Versuchsaufbau nicht möglich.

Damit bleibt die Option, einen Teil des Spektrums über einen Spalt herauszufiltern und dessen Wellenlänge bspw. mit einem Monochromator zu messen.

Diese Lösung führt jedoch konsequenterweise zu einem Versuchsaufbau, bei dem aus weißem Licht mit Hilfe des Monochromators die gewünschte Wellenlänge herausgefiltert wird.

Monochromator Der hier eingesetzte Monochromator (*DMC1-03* von Optometrics) arbeitet mit einem holographischen Beugungsgitter. Damit wird das einfallende Licht spektral aufgespaltet und über ein Spiegel- und Spaltsystem schließlich die gewünschte Wellenlängen ausgekoppelt.

Die Genauigkeit hängt dabei von der gewählten Spaltbreite ab. Im vorliegenden Fall von $300\mu\text{m}$ Spaltbreite ist die Wellenlänge auf $\pm 2\text{nm}$ genau. Mit dem manuellen Stellrad des Monochromators lässt sich so ausreichend präzise die gewünschte Wellenlänge einstellen.

Durch den sehr schmalbandigen Ausschnitt des Spektrum wird nur ein geringer Teil der einfallenden Strahlungsleistung den Monochromator verlassen. Die eingangsseitig maximale Bestrahlungsstärke ist außerdem auf $100\text{W}/\text{cm}^2$ begrenzt, da er sonst Schaden nimmt.

Dadurch bleiben ausgangsseitig nur etwa $0,020\text{W}/\text{m}^2$ zur Verfügung, die den Sensor erreichen. Trotz des Einsatzes einer Lichtbogenlampe mit mehr als $300000\text{cd}/\text{m}^2$ kann auch hier nicht von Aufnahmen im hohen Dynamikbereich gesprochen werden. Letztlich sind Messreihen mit 5, 10, 15 und $20\text{ mW}/\text{m}^2$ entstanden.

Eine konstante Bestrahlungsstärke wurde dadurch erzielt, dass der Lichtstrahl über einen Spiegel entweder auf den Sensor oder auf eine Photozelle abgelenkt wird (Fig. 3). Durch Verschieben der Lichtquelle oder (De-)Fokussierung

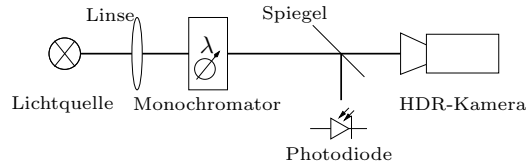


Fig. 3. Versuchsaufbau

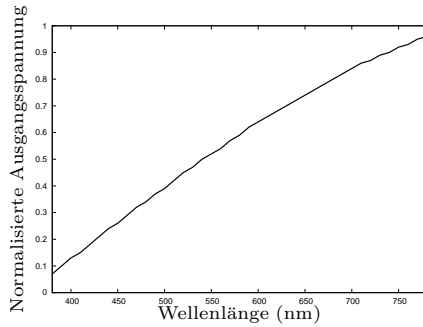


Fig. 4. $V(\text{nm})$ -Kennlinie des OPT101

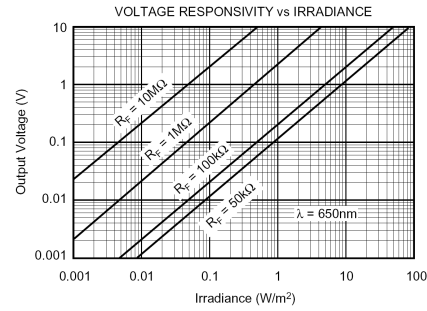


Fig. 5. $V(\text{W}/\text{m}^2)$ -Kennlinien des OPT101 aus [3]

kann die Strahlstärke variiert werden. Eine Beeinflussung der Lichtmenge durch den Einsatz von Polarisationsfiltern wurde verworfen, da diese selbst zuviel Licht absorbieren.

Während die Bestrahlungsstärke auf den Zielwert justiert wird, führt der Strahlengang zu dem Phototransistor *OPT101*, der über einen Impedanzwandler an ein Voltmeter angeschlossen ist. Der Verlauf der normalisierten Ausgangsspannung im interessierenden Bereich von 380 – 780nm ist in Fig. 4 zu sehen.

Je nach äußerer Beschaltung kann die Kennlinie (Ausgangsspannung über Bestrahlungsstärke) verschoben und so der Messbereich angepasst werden (Fig. 5). Im vorliegenden Fall konnte die gesamte Messung mit einem Rückkopplungswiderstand R_F des Operationsverstärkers von $10\text{M}\Omega$ durchgeführt werden und liefert dabei Ausgangsspannungen von 10 – 520mV

Ist die gewünschte Bestrahlungsstärke eingestellt, wird der Spiegel umgeklappt und das Licht fällt mit der gleichen Intensität auf den Sensor der Kamera.

Der Sensor der HDR-Kamera selbst besitzt ein Bayer-Pattern. Die interne Berechnung eines Farbwertes aus den RGB-Werten kann dabei deaktiviert werden. Aus einem „Makropixel“ können somit vier Werte gewonnen werden, wobei für den Grünkanal zwei Ausgabewerte zur Verfügung stehen.

2 Auswertung

Die in den Experimenten eingesetzten Komponenten sind für den den Lehrbetrieb konzipiert; somit entsprechen die optischen Elemente zwar Laborbedingun-

gen, besitzen aber keine hochpräzisen Eigenschaften.¹ Die Verfahren sind aber auf Untersuchungen mit präziseren Messgeräten übertragbar.

Der in der Theorie gut funktionierende Versuchsaufbau erweist sich im Verlauf der Experimente als fehleranfällig. Neben ungleichmäßig abbrennenden Kohlestäben im Falle der Bogenlampe kommen trotz größter Sorgfalt Schwankungen bei der manuellen Einrichtung der Stellgrößen hinzu.

Durch das monochromatische Licht ist die Betrachtung von Farbfehlern nicht relevant. Sonstige Abbildungsfehler (Öffnungs-, Asymmetriefehler und Verzeichnung) werden vernachlässigt, da für den Fall der spektralen Vermessung das Objektiv der Kamera entfernt wurde. Die Eigenschaft der Linse vor dem Monochromator beeinflusst dessen Ausgang nicht signifikant.

Stochastische Effekte wie Rauschen werden durch die Mittelwertbildung der Sensorantwort über zehn Bilder weitgehend eliminiert.

Unter Berücksichtigung der Rahmenbedingung sind die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse zu werten.

2.1 Spektrale Vermessung

Ausgehend von (1) ergibt sich bei diesem Versuchsaufbau die spektrale Empfindlichkeit R_k direkt aus den Messungen.

Der Aufwand bei der Durchführung des Experimentes wird durch den nachfolgend beschriebenen manuellen Abgleich stark erhöht. Neben den Wellenlängen, die am Monochromator in 10nm-Schritten von 380nm bis 780nm eingestellt werden, muss die Strahlungsleistung der Lichtquelle so variiert werden, dass am Sensor eine konstante Bestrahlungsstärke auftrifft. Bei deren Messung mit dem Phototransistor ist dessen Kennlinie zu berücksichtigen.

Dazu wird die für eine bestimmte Wellenlänge erwartete Spannung im Vorfeld ermittelt. Während des Experimentes wird dann die Strahldichte so verändert, dass die zur Wellenlänge gehörende Spannung am Voltmeter beobachtet wird. Dadurch wird die wellenlängenabhängige Kennlinie eliminiert und man erhält eine konstante Bestrahlungsstärke.

Da in der Bogenlampe Kohlestäbe abbrennen, die leichte Verunreinigungen besitzen, gibt es mitunter Schwankungen in der Strahlungsleistung auch während einer Messung. Um den Effekt zu kompensieren, wird das Sensorausgangssignal vor der Auswertung über zehn Bilder gemittelt.

Die Spaltöffnung des Monochromators ist nicht ausreichend breit, um die gesamte Sensorfläche zu beleuchten. Deshalb werden die Sensordaten bei ausgeschalteter Fixed-Pattern-Noise-Korrektur um den Dunkelstromanteil reduziert. Dieser wird ebenfalls zur Minimierung statistischer Effekte über zehn Bilder gemittelt. Inhomogenitäten des Sensors werden dadurch nicht berücksichtigt.

Die Messwerte des Sensors sind in Fig. 6 am Beispiel des 1. Grünkanals für 500nm und $0,20\text{mW/m}^2$ dargestellt. Dabei ist die Abbildung des Spaltes deutlich zu erkennen.

¹ Die für den Aufbau der Experimente verwendete Apparatur stammt größtenteils aus dem Institut für Integrierte Naturwissenschaften der Universität Koblenz-Landau.

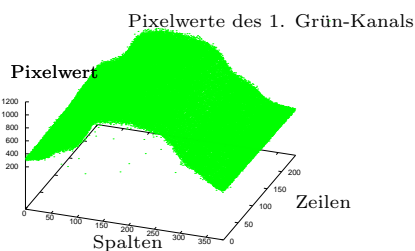


Fig. 6. Sensordaten des 1. Grünkanals für 500nm und 0,20mW/m²

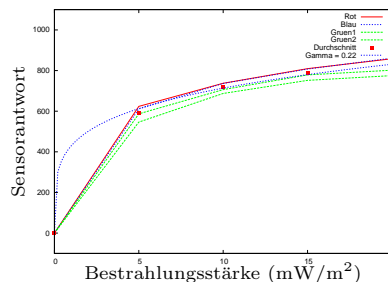


Fig. 7. Vergleich der Sensorantwort mit der Gamma-Funktion ($\gamma^{0,22}$)

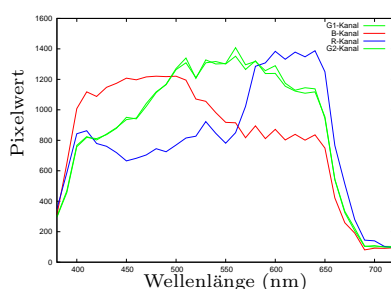


Fig. 8. Spektrale Empfindlichkeit

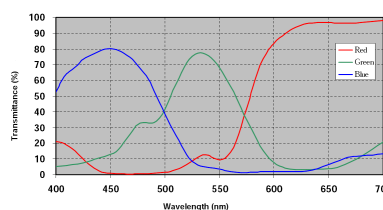


Fig. 9. Transmissionskurven lt. Hersteller (Quelle: IMS-Chips)

Für die Bestimmung der spektralen Sensorantwort werden nur die Sensorelemente berücksichtigt, die ein ausreichend hohes Ausgangssignal liefern, d. h. die Pixel der Flanken und aus dunklen Bereichen des Sensors gehen nicht mit in die Auswertung ein. Dafür werden nur 30% der hellsten Pixel genutzt.

In Fig. 7 ist das Verhalten des Sensors über die verschiedenen Bestrahlungsstärken dargestellt. Vergleicht man den Mittelwert aller vier Pattern-Elemente mit einer Gamma-Kurve mit dem Exponenten 0,22, ergibt sich eine sehr gute Annäherung daran.

Die für die verschiedenen Filterflächen des Bayer-Pattern ermittelten Sensorantworten sind schließlich in Fig. 8 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Kurven der beiden Grünkanäle erwartungskonform sehr dicht zusammen liegen. Die Verdopplung der Grün- und damit hauptsächlich der Helligkeitsinformation ist in der klassischen Videotechnik sehr sinnvoll. Für multispektrale Anwendungen ist dagegen ein weiterer, unabhängiger Farbkanal wünschenswert.

Der signifikante Abfall der Empfindlichkeiten ab 600nm ist auf das Infrarot-Sperrfilter des Sensors zurückzuführen; die kleineren Schwankungen auf die beschriebenen Versuchsbedingungen. Vergleicht man die gewonnenen Werte mit dem Kurvenverlauf eines vom Hersteller ermittelten Transmissionsverhalten, ist weitgehend eine Übereinstimmung festzustellen (Fig. 9). Selbst das lokale Maximum im roten Kanal bei 540nm ist zu erkennen.

2.2 Farbprüfmuster

Anders als im vorausgegangenen Versuch kann die spektrale Empfindlichkeit R_k nicht direkt ermittelt werden, da keine Zuordnung der Farbfelder zu einer Wellenlänge möglich ist. Vielmehr ist die Sensorantwort $f^{(k)}$ und das vom Farbprüfmuster ausgesandte Spektrum L_o aus Gleichung (1) bekannt.

Für die Auswertung der Ergebnisse wird das Verfahren genutzt, das in [10] beschrieben wird. Dazu wird die Gleichung (1) diskretisiert und man erhält

$$f^{(k)} = \sum_{\lambda=1}^N L_{o,\lambda} \cdot R_{k,\lambda} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{f} = \mathbf{LR}. \quad (2)$$

Die nötigen spektralen Messungen werden mit dem *EyeOne* von *GretagMacbeth* durchgeführt. Damit können sowohl Lichtquellen als auch Oberflächen in 10nm-Schritten vermessen werden. Allerdings erfolgt dies nur bis zu einer Wellenlängenbereich von 730nm. Damit ergeben sich $N = 36$ Stützstellen für das Spektrum.

Gemessen wurden die Colorchecker mit 24 und 140 Feldern und die verwendete Lichtquelle (D65, Fig.10).

Aus Gleichung (2) lässt sich folgende Optimierungsbedingung (3) ableiten, wenn Fehler zwischen Sensorantwort und Sensorempfindlichkeit minimiert werden soll:

$$\| \mathbf{LR} - \mathbf{f} \|^2 \quad \rightarrow \quad \min. \quad (3)$$

Weitere Randbedingungen für die Sensorantwort sind deren Positivität, Glätte und Unimodalität. Sie werden eingeführt, um das unterbestimmte Gleichungssystem zu lösen [10].

Dazu zählt auch die Beschränkung des Ranges der Matrix \mathbf{L} . Darüber lässt der Einfluss von kleinen Schwankungen z. B. durch (Quantisierungs)Rauschen steuern, da nur Werte genutzt werden, die über einem Schwellwert liegen. Für die Auswertung wird in diesem Fall der Rang auf den Wert 7 beschränkt.

Die so mit den Mitteln der linearen Algebra gewonnene Annäherung der Sensorempfindlichkeit ist in Fig. 11 zu sehen. Trotz der umfangreichen Daten aus den 140 Prüffeldern gehen im Vergleich zu Fig. 8 und 9 Details verloren.

3 Ausblick und Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag bietet einen Ausgangspunkt, von dem weitere Experimente mit der HDR-Kamera durchgeführt werden können.

Aus Gründen der Reproduzierbarkeit und Effizienz empfehlen wir einen Monochromator, der automatisch durchgestimmt werden kann. Außerdem sollte dessen zulässige Eingangsstahlstärke oder vielmehr ausgangsseitige Leistung höher als bei dem hier verwendeten Modell liegen.

Insbesondere die Bestrahlung mit einer höheren Lichtleistung ist für hochdynamische Aufnahmen bedeutsam. Die lässt sich z. B. durch den Einsatz von

VIII

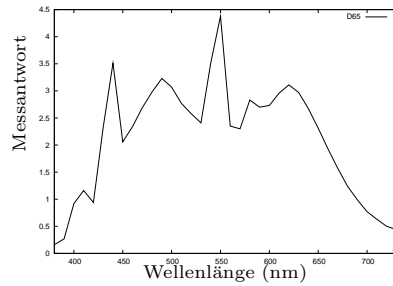


Fig. 10. Spektrale Verteilung der verwendeten Lichtquelle (D65)

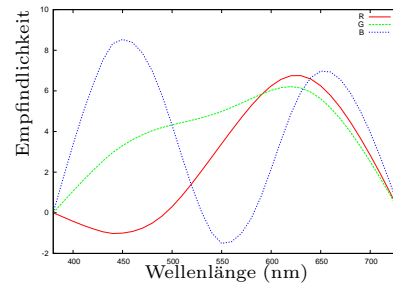


Fig. 11. Lineare Näherung der Sensorempfindlichkeit

verschiedener Laserlichtquellen erreichen. Diese sind üblicherweise monochromatisch und die Wellenlängen bekannt.

Eine weitere Frage in diesem Zusammenhang ist die Form des Gamuts bei verschiedenen Bestrahlungsstärken die den Sensor erreichen sowie dessen Photometrische Konsistenz im Bildentstehungsprozess.

Da in den Experimenten sämtliche Korrekturmechanismen (wie Fixed-Pattern-Noise-Korrektur, RGB-Ausgabe mit Defektpixelinterpolation u.ä.) der Kamera deaktiviert wurden, sind deren Einflüsse selbst noch zu prüfen, da diese im alltäglichen Einsatz meist aktiviert sind, d. h. genutzt werden.

Anders als bei den Fragestellungen, die erhöhten gerätetechnischen Aufwand bedeuten, sind die Antworten der übrigen Fragen Ziel weiterer Untersuchungen.

Insbesondere der (kombinierte) Einsatz mehrerer Leuchtmittel, um die Zahl der Messpunkte, die zur Lösung des Gleichungssystems herangezogen werden, zu erhöhen.

Dennoch konnten wir im Rahmen der Möglichkeiten die HDR-Kamera spektral vermessen. Anders als üblich wurden die vier Felder des Bayer-Pattern separat betrachtet. Dabei konnte jedoch keine signifikante Abweichung der Grün-Kanäle festgestellt werden. Für multispektrale Anwendungen empfiehlt es sich daher, die historisch für die Helligkeit genutzte zweite Grünfläche durch eine andere Farbe zu ersetzen.

Der Vergleich der spektralen Vermessung mit den Ergebnissen des Herstellers sind verhältnismäßig gut. Die Kamerasensitivitätsbestimmung mittels Farbprüfmuster zeigt dagegen Anfälligkeiten bei verrauschten Messwerten, was sich durch eine Erhöhung der Stichprobe ändern sollte. Ansonsten empfiehlt sich trotz aufwändigerer Messungen die Bestimmung der spektralen Eigenschaften über monochromatisches Licht.

References

1. Florian Bäcker mann. Kalibrierung von hdr-kameras. Master's thesis, Universität Koblenz Landau, Campus Koblenz, Fachbereich 4 Informatik, Institut für Computervisualisitik, 2007.
2. Kobus Barnard and Brian V. Funt. Camera characterization for color research. *Color Research and Application*, 27(3):153–164, 2002.
3. Burr-Brown. Monolithic photodiode and single-supply transimpedance amplifier, 1998. Datenblatt zum OPT 101.
4. Paul E. Debevec and J. Malik. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. *Computer Graphics*, 31(Annual Conference Series):369–378, 1997.
5. Graham D. Finlayson and A. Alsam. Recovering spectral sensitivities with uncertainty. In *Proceedings of the First international Conference CGIV* [11], pages 22–26.
6. K.-H. Franke, editor. *8. Workshop Farbbildverarbeitung*, Ilmenau, 2002. Schriftenreihe des Zentrums für Bild- und Signalverarbeitung.
7. Wolfram Hans, Thorsten Grosch, Tobias Feldmann, Dietrich Paulus, and Stefan Müller. Modell der bildentstehung mit hdr-kameras. In *12. Workshop Farbbildverarbeitung*, pages 97–108, 10 2006.
8. Corvin Idler. Farbkalibrierung. Studienarbeit, 2003.
9. Dietrich Paulus, Vinh Hong, Corvin Idler, Joachim Hornegger, and L. Csink. Sensitivity curve approximation using linear algebra. In *CGIV 2004 – Second European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision* [12], pages 207–212.
10. Dietrich Paulus, Joachim Hornegger, and L. Csink. Linear approximation of sensitivity curve calibration. In Franke [6], pages 3–10.
11. The Society for Imaging Science and Technology. *Proceedings of the First international Conference CGIV*, Poitiers, France, 4 2002.
12. The Society for Imaging Science and Technology. *CGIV 2004 – Second European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision*, volume 2, Aachen, Germany, 4 2004.