

ENTWICKLUNG EINER HYPERSPEKTRALKAMERA UNTER VERWENDUNG EINER FILTERTECHNOLOGIE MIT STARK VOM EINFALLSWINKEL DES LICHTS ABHÄNGIGEM TRANSMISSIONSVERHALTEN

Ruggaber, B., Krüger, U. und Schmidt, F.

TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ilmenau

Kontakt: benjamin.ruggaber@technoteam.de

Zusammenfassung Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit Einflussgrößen welche beim Einsatz einer Hyperspektralkamera berücksichtigt werden müssen. Diese Einflussgrößen können direkt von den Eigenschaften der verwendeten Filtertechnologie abgeleitet werden. Alle Betrachtungen beziehen sich auf die Zielsetzung, farbmétrische Kennwerte von LEDs, unter Verwendung einer Hyperspektralkamera, zu bestimmen.

1 Einleitung

Die Charakterisierung von Lichtquellen bezüglich ihrer ortsabhängigen radiometrischen, photometrischen und farbmétrischen Eigenschaften gewinnt zunehmend an Bedeutung. Dies ist vor allem auf das gestiegene Qualitätsbewusstsein bei der Verwendung von Lichtquellen zurückzuführen. Mit der zunehmenden Etablierung von Leuchtdioden (abgekürzt mit LED vom engl. *light emitting diode*) in den unterschiedlichen Bereichen ergeben sich neue Möglichkeiten der Gestaltung von Lichtquellen, aber auch neue Herausforderungen.

Insbesondere die Notwendigkeit einer farbmétrischen Charakterisierung, also die Ermittlung von Kennwerten welche den Farbeindruck des Spektrums einer Lichtquelle auf einen menschlichen Betrachter quantitativ beschreiben, ist mit dem zunehmenden Einsatz von LEDs gestiegen.

Die Notwendigkeit LEDs bezüglich ihrer farbmétrischen Eigenschaften zu charakterisieren, begründet sich hauptsächlich dadurch, dass um die Beleuchtungsaufgaben herkömmlicher Lichtquellen wahrnehmen zu können, mehrere bis viele LEDs unmittelbar nebeneinander betrieben werden müssen. Durch die unmittelbare Nähe der LEDs zueinander, können jedoch schon kleine Farbunterschiede zwischen den LEDs von einem menschlichen Betrachter wahrgenommen und als störend empfunden werden.

Da die Eigenschaften von LEDs gewissen produktionsbedingten Schwankungen unterworfen sind, muss sichergestellt werden, dass nur LEDs mit quasi identischen Eigenschaften in einer jeweiligen Beleuchtungsaufgabe verwendet werden.

Aus dieser Problematik heraus ergibt sich für die Messtechnik eine Vielzahl an Aufgabenstellungen, welche alle eine Charakterisierung der LEDs, bezüglich ihrer farbmétrischen Eigenschaften beinhalten:

- LEDs müssen bezüglich ihrer farbmétrischen Eigenschaften sortiert werden, damit nur LEDs mit quasi identischen Eigenschaften in einer Beleuchtungsaufgabe verwendet werden (Binning).
- Die Ansteuerung einzelner LEDs (LED-Segmente) muss so eingestellt werden, dass Unterschiede in deren farbmétrischen Eigenschaften ausgeglichen werden.

Die Charakterisierung von farbmétrischen Eigenschaften erfolgt oft durch die Bestimmung von Normfarbwerten (bzw. Normfarbwertanteilen CIExy). Daher können

die oben formulierten Aufgabenstellungen prinzipiell durch die Charakterisierung der LEDs, unter Verwendung herkömmlicher ortsauflösender Messmittel, welche auf dem Dreibereichsverfahren basieren, gelöst werden [1]. Bildauflösend messende Systeme, basierend auf dem Dreibereichsverfahren bestehen in der Regel aus einem abbildenden optischen System, mehreren Filtern, welche sequenziell in den Strahlengang eingebracht werden können und einer Detektormatrix. Die sequenzielle Einbringung der Filter in den Strahlengang erfolgt zumeist durch ein Filterrad. Damit die Ausgangssignale eines derartigen Systems, einen direkten Zusammenhang zu farbmtrischen Größen besitzen, müssen die spektralen Empfindlichkeiten des Systems z.B. an die Normspektralwertfunktionen (CIE 1931) angepasst werden.

In zunehmendem Maße steigt jedoch das Interesse daran „vollständige“ spektrale Daten einer Lichtquelle zu ermitteln. Daten dieser Art können mit einem System basierend auf dem Dreibereichsverfahren oft nur unzureichend oder nur eingeschränkt ermittelt werden [2].

Neben diesem Umstand existieren Erkenntnisse [3], die nahelegen, dass die oft in Systemen, basierend auf dem Dreibereichsverfahren, realisierten Normspektralwertfunktionen (CIE 1931), zur Bewertung von LED-Lichtquellen, ungeeignet bzw. nicht ausreichend sind.

Hier bietet die Ermittlung des Spektrums einer Lichtquelle die notwendige Flexibilität, auch von den Normspektralwertfunktionen abweichende Bewertungsfunktionen, zu verwenden.

Abhilfe können hier sogenannte Hyperspektralkameras schaffen, welche in der Lage sind, das Spektrum einer Lichtquelle orts aufgelöst zu ermitteln. Hyperspektralkameras bestehen typischerweise aus einem Objektiv, einem elektrisch durchstimmbaren Filter und einer Detektormatrix. Die Transmission des durchstimmbaren Filters besitzt in der Regel Bandpasscharakteristik, man spricht hierbei von sogenannten Kanälen. Wobei der Bandpass über einen gewissen spektralen Arbeitsbereich verschoben werden kann, wodurch in Verbindung mit dem Objektiv und der Detektormatrix, die orts aufgelöste sequentielle Abtastung des Spektrums einer Lichtquelle ermöglicht wird. Die Anzahl bzw. Auswahl der zur Messung eines Spektrums verwendeten Kanäle obliegt dem Nutzer der Hyperspektralkamera. Wesentlicher Vorteil einer Hyperspektralkamera ist, dass die Lichtquelle durch das mit einer Hyperspektralkamera ermittelte Spektrum, quasi vollständig charakterisiert werden kann, aber auch, dass das so ermittelte Spektrum nachträglich mit beliebigen Funktionen gewichtet werden kann (CIE1931, Blue Light Hazard etc.). Es besteht keine Beschränkung auf die Art und Weise wie ein Spektrum gewichtet wird, wie es z.B. bei Systemen basierend auf dem Dreibereichsverfahren der Fall ist.

Die orts aufgelöste Bestimmung von Spektren, unter Verwendung einer Hyperspektralkamera, hat ganz offensichtliche Vorteile, stellt aber auch eine besondere Herausforderung dar. Dies liegt zum einen daran, dass durch die orts aufgelöste Bestimmung eines Spektrums ein großes Volumen an Daten entsteht, welches softwaretechnisch, unter Verwendung von Kalibrierdaten, verarbeitet werden muss. Und zum anderen daran, dass Systeme dieser Art relativ umfangreich charakterisiert werden müssen, damit diese als Messmittel verwendet werden können. Zusätzlich wird in der Messtechnik vom Nutzer eines Messmittels, um die „Qualität“ der Messergebnisse interpretieren zu können, stets ein gewisses Verständnis für das Messprinzip und teilweise sogar a priori Wissen über das Messobjekt selbst vorausgesetzt. Bei der Verwendung einer Hyperspektralkamera gilt dies vielleicht sogar in besonderem Maße. Dies liegt daran, dass bei der Verwendung einer Hyperspektralkamera die Auswahl der Kanäle, welche zur

Rekonstruktion eines Spektrums verwendet werden, ganz dem Nutzer des Messmittels überlassen ist. D.h. der Nutzer kann prinzipiell stets einen Kompromiss zwischen Messzeit und akzeptabler Messabweichung erzielen bzw. kann die für ein jeweiliges Messobjekt optimale Anzahl und Auswahl an Kanälen treffen.

Neben diesen Aspekten besitzt die in der vorliegenden Arbeit verwendete Filtertechnologie besondere Eigenschaften, welche beim Betrieb der Hyperspektralkamera, vom Nutzer berücksichtigt werden sollten. Diese Eigenschaften bzw. deren Auswirkungen auf eine Messung sollen nachfolgend betrachtet werden. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Bestimmung von Normfarbwertanteilen (CIE1931) von LEDs.

2 Hyperspektralkamera

Die in der vorliegenden Arbeit betrachtete Hyperspektralkamera wurde bereits in [4] vorgestellt. Das dort vorgestellte System verwendet ein endozentrisches Objektiv mit einer Brennweite von 50 mm. Als Filtertechnologie wird ein durchstimmbarer Flüssigkristallfilter verwendet [5] dessen Arbeitsbereich zwischen 400 nm und 720 nm liegt. Die Transmissionen des Filters, für eine Auswahl an Kanälen, sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.

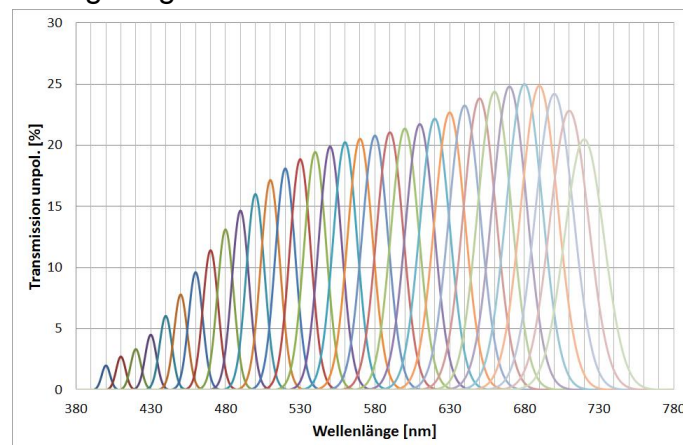


Abbildung 1: Transmission des LCTF (beispielhaft) in 10 nm Schritten

Die aus einer Messung mit einer Hyperspektralkamera resultierenden Daten können durch einen Bildstapel (Abbildung 2) dargestellt werden. Für jedes Pixel kann ein Grauwertvektor gebildet werden, wobei es das Ziel ist, aus jedem Grauwertvektor das Spektrum der Lichtquelle $L_{e\lambda}(\lambda)$ zu berechnen.

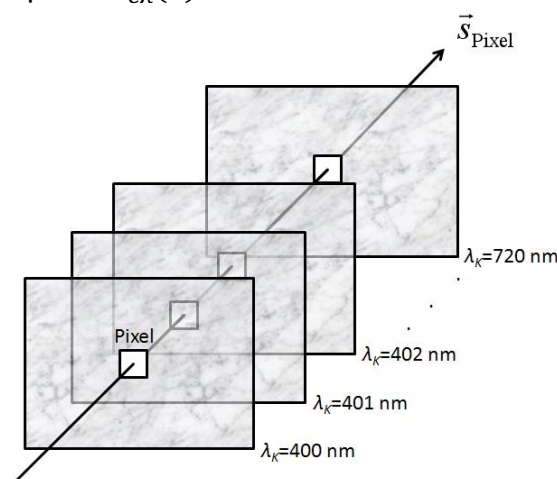


Abbildung 2: Grauwertvektor durch einen Bildstapel

Ein jeweiliges Element eines Grauwertvektors (Signalentstehung) kann über nachfolgende Formel, unter Verwendung der spektralen Empfindlichkeit $R_{L,Pixel,K}(\lambda)$, modelliert werden [6]:

$$s_{Pixel,K} = \int_{\Delta\lambda_K} L_{e\lambda}(\lambda) \cdot R_{L,Pixel,K}(\lambda) d\lambda \quad (2.1)$$

Damit die Signalentstehung über diese Formel beschrieben werden kann, müssen entsprechende Korrekturen wie z.B. Korrekturen bezüglich des Dunkelsignals und der Nichtlinearität durchgeführt werden. Bei $s_{Pixel,K}$ handelt es sich daher um ein bereits, bezüglich gewisser Effekte, korrigiertes Ausgangssignal der Hyperspektralkamera.

3 Rekonstruktion

Die Rekonstruktion des Spektrums einer Lichtquelle anhand eines Grauwertvektors eines Bildstapels (Abbildung 2) kann auf unterschiedliche Weisen erfolgen [6]. Nachfolgend soll jedoch nur auf die Rekonstruktion eines Spektrums unter Verwendung von Formel (3.1) eingegangen werden. Alle Betrachtungen beschränken sich auf die in [4] definierte niederdimensionale Abtastung, unter Verwendung der Splineinterpolation. Durch die Verwendung von Ansätzen, welche im Bereich der niederdimensionalen Abtastung angesiedelt sind, kann vor allem bei relativ glatten Spektren, die zur Rekonstruktion eines Spektrums benötigte Kanalanzahl (Messzeit), deutlich reduziert werden.

Der bei der niederdimensionalen Abtastung verfolgte Ansatz, zur Rekonstruktion eines Spektrums, basiert auf der Annahme, dass das zu rekonstruierende Spektrum, über den Integrationsbereich von Formel (3.1) als konstant angesehen werden kann. Wodurch Formel (2.1) in Formel (3.1) überführt werden kann. Formel (3.1) beschreibt die Rekonstruktion eines Abtastpunktes, für einen jeweiligen Kanal K der Hyperspektralkamera.

$$L_{e\lambda}(\lambda_K) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{s_{Pixel,K}}{\int_{\Delta\lambda_K} R_{L,Pixel,K}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (3.1)$$

Bei $L_{e\lambda}(\lambda_K)$ handelt es sich um die spektrale Strahldichte an der Wellenlänge λ_K . Ein Element eines Grauwertvektors, ist mit $s_{Pixel,K}$ gegeben. Die spektrale Empfindlichkeit des Kanals K an einem Pixel ist mit $R_{L,Pixel,K}(\lambda)$ gegeben.

Das Integral in Formel (3.1) muss für jedes Pixel eines jeweiligen Bildes, des Bildstapels aus Abbildung 2, ermittelt werden. Ein Element $s_{Pixel,K}$ eines jeweiligen Grauwertvektors muss demnach durch die entsprechend wirksame spektrale Empfindlichkeit eines Kanals dividiert werden. Hierdurch kann eine Normalisierung der Grauwerte erreicht werden (siehe nachfolgende Abbildung). Der normalisierte Grauwert muss einer Wellenlänge λ_K zugewiesen werden, in der Regel erfolgt diese Zuweisung zur Schwerpunktwellenlänge der jeweiligen spektralen Empfindlichkeit. Diese Zuweisung, eines normalisierten Grauwerts zu einer Wellenlänge, kann als Wellenlängenkalibrierung verstanden werden.

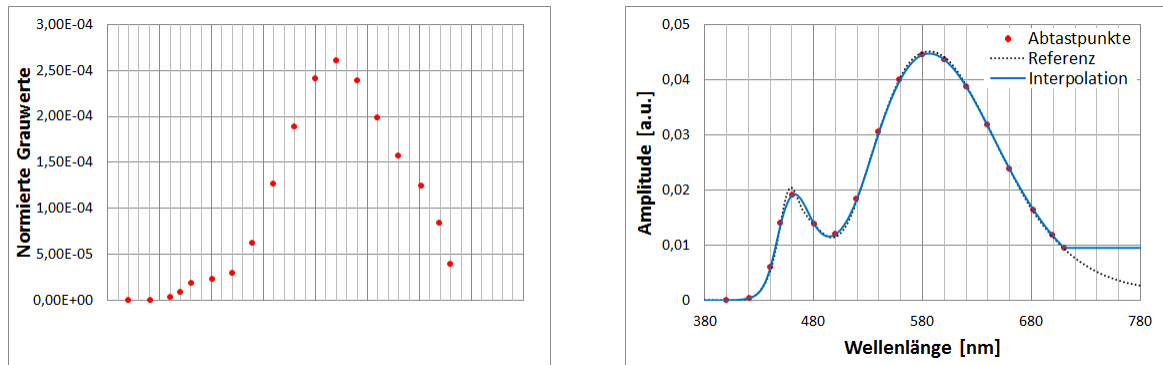


Abbildung 3: Normalisierung der Grauwerte und Zuordnung zu einer Wellenlänge am Beispiel einer warmweißen LED (Simulation)

Das Rekonstruktionsergebnis, unter Verwendung von Formel (3.1), hängt maßgeblich von der Kanalanzahl und der Position der verwendeten Kanäle ab. Des Weiteren wird das Rekonstruktionsergebnis davon abhängen, wie gut die Annahme, einer konstanten spektralen Strahldichte über den Integrationsbereich, aus Formel (3.1), für ein jeweiliges Spektrum erfüllt ist (endliche Bandbreite der Kanäle siehe Abbildung 1). In der Regel führen diese Punkte zu systematischen Abweichungen zwischen dem rekonstruierten Spektrum (Interpolation in Abbildung 3) der Lichtquelle und dem tatsächlichen Spektrum (Referenz in Abbildung 3) der Lichtquelle.

Es kann daher sinnvoll sein, in Abhängigkeit des Spektrums der Lichtquelle, die Kanalanzahl bzw. die Position der Abtastpunkte für eine Messung entsprechend anzupassen. Hier ist es z.B. vorstellbar, dass bestimmte spektrale Charakteristiken einer Lichtquelle (blau Peak einer weißen LED) engmaschiger abgetastet werden als andere. Wodurch die Messzeit und die Messgenauigkeit optimiert werden können. Denkbar wäre ebenfalls eine teilweise oder vollständige Entfaltung der Spektren. Dieser Aspekt soll in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht näher betrachtet werden. Eine weitere Ursache für systematische Abweichungen stellt die Tatsache dar, dass der Arbeitsbereich der Hyperspektralkamera eingeschränkt ist (400 nm – 720 nm) hierdurch fehlen Informationen für die Berechnung von Normfarbwertanteile welche in der Regel für Spektren im Bereich von 380 nm – 780 nm berechnet werden.

Die oben beschriebenen Einflüsse führen zu den in Abbildung 3 dargestellten Abweichungen zwischen dem rekonstruierten Spektrum (Interpolation) und dem Referenzspektrum (Referenz). Berechnet man für beide Spektren die Normfarbwertanteile, so erhält man die in nachfolgender Abbildung dargestellte Abweichung zwischen den Normfarbwertanteilen.

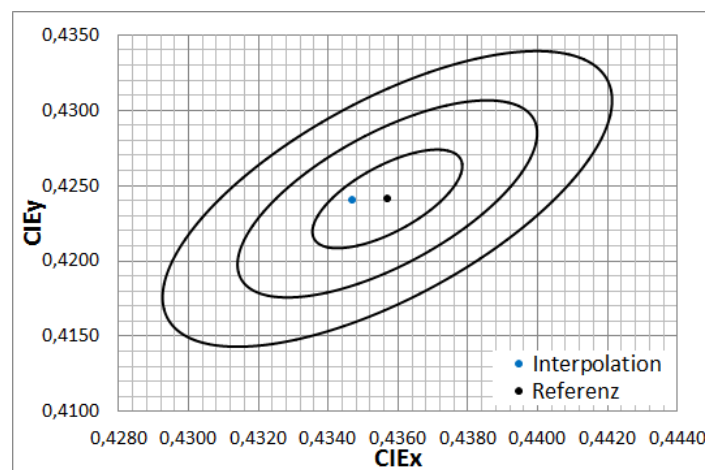


Abbildung 4: Messabweichung zwischen Referenz und simulierter Messung. Dargestellt sind die MacAdam Ellipsen für 1, 2 und 3 SDCM.

Die in Abbildung 3 und Abbildung 4 dargestellten Ergebnisse wurden unter Verwendung einer Simulation erzielt. D.h. das eigentliche Spektrum einer warmweißen Lichtquelle wurde mit einem Spektrometer (mit Kanälen mit geringer Halbwertsbreite) ermittelt. Unter Verwendung der für die Hyperspektralkamera bekannten spektralen Empfindlichkeit, können so, unter Verwendung von Formel (2.1) und dem mit einem Spektrometer gemessenen Spektrum, die Ausgangssignale der Hyperspektralkamera, welche aus einer Messung an diesem Spektrum resultieren, simuliert werden. Aus den oben erzielten Ergebnissen kann geschlussfolgert werden, dass die durch die oben beschriebenen Effekte resultierenden systematischen Abweichungen, im Idealfall (Simulation), innerhalb von 1 SDCM (*Standard Deviation of Colour Matching*) liegen. Betrachtungen dieser Art ermöglichen es, die systematischen Abweichungen, welche bei einer jeweiligen Messung und anschließender Rekonstruktion resultieren, abzuschätzen. Neben der Abschätzung der systematischen Abweichungen, kann auch die Auswirkung einer anderen Auswahl an Kanälen auf die Messung simuliert werden (Optimierung).

4 Ortsabhängige spektrale Empfindlichkeit

Gemäß Formel (3.1) muss ein gemessener Grauwert, zur Rekonstruktion eines Abtastpunktes, durch das Integral, der für ein jeweiliges Pixel wirksamen spektralen Empfindlichkeit, dividiert werden.

Verändert sich die spektrale Empfindlichkeit, von Pixel zu Pixel, lediglich in ihrem integralen Wert, so können diese Unterschiede durch die Betrachtung einer homogenen Lichtquelle mit Lambertcharakteristik, im Rahmen einer Kalibrierung, festgestellt und damit korrigiert werden (Korrektur des Randlichtabfalls). Die Korrektur des Randlichtabfalls entspricht der Normalisierung der Grauwerte aus Abbildung 3. Verändert sich die spektrale Empfindlichkeit lediglich in ihrem integralen Wert über die Detektormatrix hinweg, so muss die spektrale Empfindlichkeit, lediglich für einen Ort auf der Detektormatrix ermittelt werden, um eine Zuordnung eines Abtastpunktes (Formel (3.1)) zur Schwerpunktwellenlänge zu ermöglichen.

Verändert sich die spektrale Empfindlichkeit nicht nur in ihrem integralen Wert sondern auch in ihrer spektralen Form (Wellenlängenshift), so würde bei einer Messung und der oben beschriebenen Vorgehensweise, eine ortsabhängige systematische Messabweichung resultieren. Dies liegt daran, dass bei einer Veränderung der spektralen Empfindlichkeit in ihrer spektralen Form, der Randlichtabfall vom Spektrum einer jeweiligen Lichtquelle abhängt und zusätzlich eine pixelabhängige Wellenlängenskala entsteht.

Die Problematik einer sowohl in ihrem integralen Wert als auch in ihrer spektralen Form von Pixel zu Pixel unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeit besteht immer dann, wenn Filtertechnologien in einem endozentrischen Strahlengang verwendet werden, deren Transmissionsgrad stark vom Einfallswinkel des Lichts abhängt. Dies ist bei der vorliegenden Filtertechnologie der Fall.

Die Unterschiede in der spektralen Empfindlichkeit von Pixel zu Pixel können leicht anhand der unterschiedlichen Winkel der Hauptstrahlen, bezüglich der optischen Achse, verstanden werden. Einen weiteren Einfluss haben hierbei die unterschiedlichen Öffnungswinkel der Strahlkegel.

Effekte dieser Art können immer über eine Kalibrierung berücksichtigt und damit auch korrigiert werden [6]. Dies bedeutet aber einen nicht zu unterschätzenden zusätzlichen Aufwand. Eine bessere Möglichkeit, die in der vorliegenden Arbeit näher betrachtet werden soll, ist die Verwendung eines bildseitig telezentrischen Objektivs und Anordnung des Filters in dem bildseitigen telezentrisch Strahlengang. Vorzug

dieser Variante ist, dass die Probleme einer ortsabhängigen spektralen Empfindlichkeit deutlich reduziert werden können und zusätzlich der, mit dem ursprünglich verwendeten 50 mm Objektiv, relativ eingeschränkter Sichtbereich, erweitert werden kann.

Eine Untersuchung beider Systeme, also dem System mit einem 50 mm Objektiv und einem System unter Verwendung des telezentrischen Objektivs ist nachfolgend dargestellt. Gemessen wurden hier die spektralen Empfindlichkeiten für ausgewählte Regionen auf der Detektormatrix (links unten, rechts unten und auf der optischen Achse). Aus den dort gemessenen spektralen Empfindlichkeiten wurden die Schwerpunktwellenlängen ermittelt. Diese stellen einen guten Kennwert für die Ortsabhängigkeit der spektralen Empfindlichkeit dar, da diese Wellenlängen die Wellenlängenskala des Messsystems verkörpern.

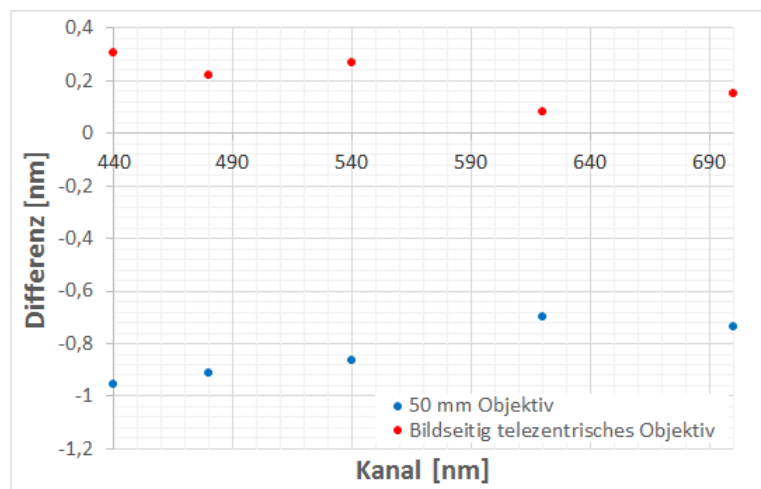


Abbildung 5: Gegenüberstellung des Wellenlängenshifts für das System mit einem 50 mm Objektiv und für ein bildseitig telezentrisches Objektiv.

Für die Darstellung in Abbildung 5 wurden die Schwerpunktwellenlängen der spektralen Empfindlichkeiten für eine Region links unten auf der Matrix und die Schwerpunktwellenlängen der spektralen Empfindlichkeiten für eine Region rechts unten auf der Matrix voneinander subtrahiert. Die Verläufe machen deutlich, dass durch die Verwendung eines bildseitig telezentrischen Objektivs, die Ortsabhängigkeit der spektralen Empfindlichkeit deutlich reduziert werden kann.

5 Temperaturabhängigkeit der spektralen Empfindlichkeit

Die Untersuchungen aus [6] ergaben, dass die Transmission des LCTF eine starke Temperaturabhängigkeit aufweist, welche aber durch eine Korrektur [7] deutlich reduziert werden kann.

Um das Langzeitverhalten der Hyperspektralkamera und vor allem die Wirkungsweise der Korrektur zu untersuchen wurden Langzeitmessungen an einer stabilisierten warmweißen LED durchgeführt. Hierfür wurde das Spektrum der stabilisierten Lichtquelle über einen Zeitraum von 380 min, unter Verwendung der Hyperspektralkamera, wiederholt gemessen. Während dieses Zeitraums veränderte sich die LCTF-Temperatur von ca. 23 °C auf 29 °C.

Aus den rekonstruierten Spektren wurden die Normfarbwertanteile sowie die relative Leuchtdichte berechnet. Die daraus resultierenden Verläufe sind in Abbildung 6 dargestellt.

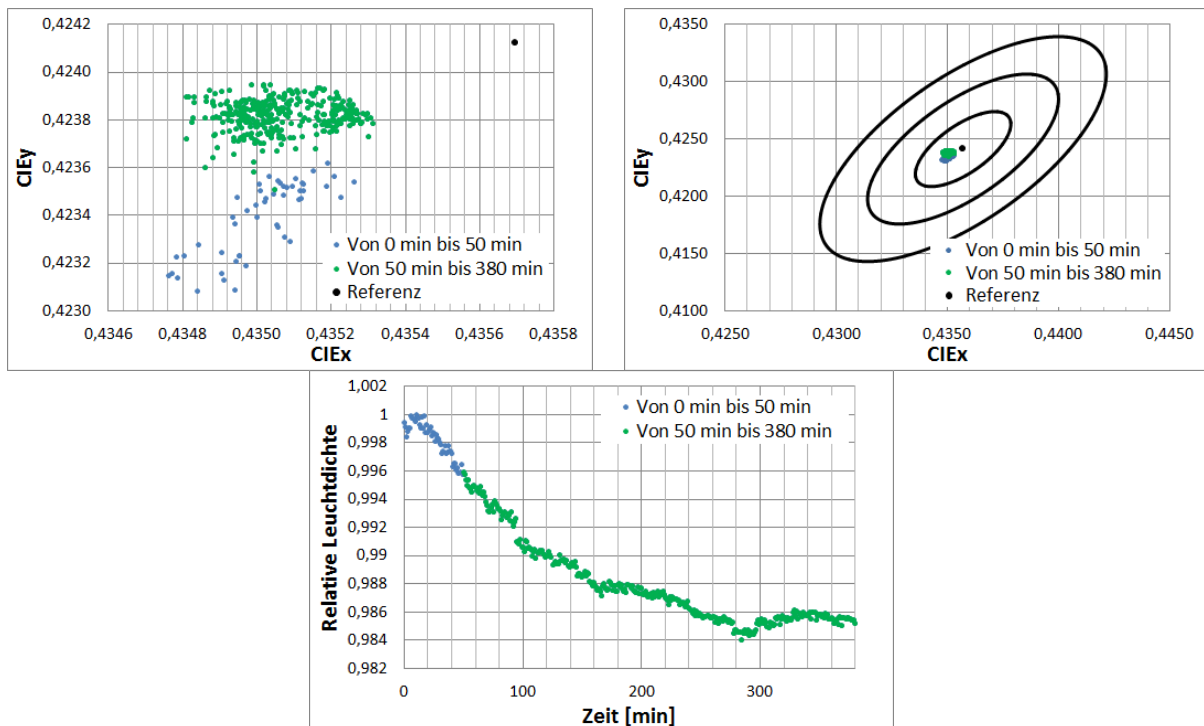


Abbildung 6: Ergebnisse einer Langzeitmessung an einer stabilisierten Lichtquelle, berechnete Normfarbwertanteile in der Detailansicht (oben links), berechnete Normfarbwertanteile im Bezug zu 3 SDCM (oben rechts) und die relative Leuchtdichte als Funktion der Zeit (unten).

Die Untersuchungen ergaben, dass der zeitliche Verlauf der Temperatur des LCTF und der zeitliche Verlauf der relativen Leuchtdichte nahezu vollständig miteinander korreliert sind. Daraus wird geschlossen, dass die Veränderung der relativen Leuchtdichte maßgeblich durch eine Veränderung der LCTF-Temperatur verursacht wird. D.h. trotz der Korrektur verbleiben geringe systematische Abweichungen, welche maßgeblich davon abhängen, bei welcher LCTF-Temperatur die spektrale Empfindlichkeit der Hyperspektralkamera (25 °C) bestimmt wurde und welche Temperatur das LCTF bei einer Messung besitzt.

Im betrachteten Temperaturbereich bewegen sich die ermittelten Normfarbwertanteile innerhalb von 1 SDCM, während sich die relative Leuchtdichte um ca. 1,5 % verändert.

Für Anwendungsfälle, bei welchen die verbleibenden systematischen Abweichungen als zu groß angesehen werden, empfiehlt es sich eine Thermostatisierung des LCTF durchzuführen.

6 Zusammenfassung und Fazit

In der vorliegenden Arbeit wurden unterschiedliche Quellen für systematische Messabweichungen, bei der Verwendung einer Hyperspektralkamera, vorgestellt. Die als relevant erkannten Effekte sind:

- Die endliche Bandbreite der Kanäle der Hyperspektralkamera, die Kanalanzahl sowie die Kanalposition
- Der eingeschränkte Arbeitsbereich (400 nm bis 720 nm)
- Die ortsabhängige spektrale Empfindlichkeit
- Die Temperaturabhängigkeit der spektralen Empfindlichkeit

Die oben genannten Effekte müssen beim Einsatz einer Hyperspektralkamera stets berücksichtigt werden. Durch Simulationen kann der Einfluss einiger Effekte, in Abhängigkeit des Messobjektes, abgeschätzt werden bzw. eine geeignete Kanalauswahl getroffen werden. Durch die Verwendung eines bildseitig telezentrischen Objektivs kann die ortsabhängige spektrale Empfindlichkeit deutlich reduziert werden, was künftig zu einem reduzierten Kalibrieraufwand bei Systemen dieser Art führen wird.

7 Quellen

- [1] TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH. (2013, Dezember) Firmenhomepage TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ilmenau. [Online]. <http://www.technoteam.de/>
- [2] F. H. Imai und R. S. Berns, "Spectral estimation using trichromatic digital cameras," Proc. of the International Symposium on Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archives, Chiba University Japan, 1999.
- [3] S. Polster, "Neue Spektralwertfunktion für die korrekte Bewertung von LED-Spektren und Einführung eines Metamerie-Index für Beobachtungsfeldgrößenunabhängigkeit," TU Ilmenau, Dissertation 2014.
- [4] B. Ruggaber, "Ortsaufgelöste Bestimmung von spektralen Strahlungsfunktionen mit einer Hyperspektralkamera," in *Tagungsband LuxJunior*, Dörfeld, 2013.
- [5] Perkin Elmer. (2013, August) Perkin Elmer Firmenhomepage. [Online]. <http://www.perkinelmer.com/Catalog/Product/ID/VARISPC>
- [6] B. Ruggaber, "Ortsaufgelöste Bestimmung von colorimetrischen Größen mit einer Hyperspektralkamera," TU Ilmenau, Dissertation 2014.
- [7] Cambridge Research & Instrumentation Inc. (CRI), "VariSpec Liquid Crystal Tunable Filter - User`s Manual," CRI, Produktdokumentation 2006.