

Heterogene Farbregistrierung von typgleichen Spektralsensoren

Paul Myland, M.Sc.; Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh;

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Hochschulstraße 4a,
64289 Darmstadt

myland@lichttechnik.tu-darmstadt.de

Zusammenfassung

Intelligente Beleuchtung in Innenräumen, welche dynamisch auf die Bedürfnisse des Menschen eingeht, benötigt Sensoren, um die aktuelle Beleuchtungssituation im Raum zu erfassen. Zur Regelung des Beleuchtungsfarbortes sind dabei optische Sensoren mit mindestens drei Kanälen erforderlich, um das trichromatische Sehen des Menschen technisch nachzubilden. Bereits typgleiche Farbsensoren weisen produktionsbedingte Differenzen in ihren spektralen Kanalempfindlichkeiten auf. Sollen also in einem farbortgeregelten Beleuchtungssystem mehrere Farbsensoren parallel eingesetzt werden, ist sicherzustellen, dass die Unterschiede in der Farbregistrierung der Sensoren für die Regelung mathematisch korrigiert werden. Diese Anforderung gilt für weitere Anwendungsbereiche der Sensoren wie Farbauswahl und -abgleich, Authentifizierung sowie Farb- und Spektralanalyse von Materialien und Flüssigkeiten in gleichem Maß.

Das standardisierte Vorgehen zur Farbkorrektur von Sensorantworten in den CIE-XYZ-Farbraum nach ISO 17321-1:2012 sieht die Bestimmung und Anwendung einer Transformationsmatrix zwischen dem Sensorfarbraum und dem XYZ-Farbraum vor. Dabei kann über die Berechnung von Sensorantworten bei bekannten spektralen Empfindlichkeiten oder über standardisierte Reflexionstargets vorgegangen werden. In diesem Beitrag werden zunächst die realen spektralen Empfindlichkeiten von 24 typgleichen Farbsensoren den im Datenblatt angegebenen Kurven gegenübergestellt. Ausgehend davon werden beispielhaft die Farbabstände für Testfarborte eines Colorcheckers berechnet, welche sich ergeben, wenn die über die Kurven eines Referenzsensors bestimmte Transformationsmatrix für alle 24 Sensoren verwendet wird. Um in der Praxis nicht tatsächlich für jeden Sensor eine eigene Transformationsmatrix bestimmen zu müssen, wird abschließend die Realisierbarkeit eines Binning-Verfahrens für die untersuchten Sensoren eruiert.



Abstract

Intelligent indoor lighting that responds dynamically to the human users' needs in terms of illumination levels and comfort requires sensors to detect the current lighting situation in the room. Optical sensors with at least three channels are required to control the chromaticity of the lighting in order to technically simulate the trichromatic vision of humans. Color sensors of the same type already exhibit production-related differences in the spectral sensitivity of their channels. Therefore, if several color sensors are to be used in parallel in a chromaticity-controlled lighting system, it must be ensured that the differences in the color registration of the sensors are mathematically corrected. This requirement applies equally to other application areas, such as color selection and matching, authentication, as well as color and spectral analysis of materials and liquids.

The standardized procedure for color correction of sensor responses into the CIE XYZ color space according to ISO 17321-1:2012 is to determine and apply a transformation matrix between the sensor color space and the XYZ color space. This can be done by calculating sensor responses in case that the spectral sensitivities are known, or by using standardized reflectance targets. In this paper, the real spectral sensitivities of 24 color sensors of the same type are first compared with the curves given in the data sheet. From these sensitivities, the resulting color distances for multiple test chromaticity coordinates of a color checker are calculated by using the same transformation matrix determined from a single reference sensor for all 24 sensors. In order to avoid having to determine a separate transformation matrix for each sensor in practice, the feasibility of a binning procedure is explored for the investigated sensors.

Index Terms: color sensing; nano-optical interference filters; color correction; color sensor binning

1 Einleitung

Eine lichttechnische Vision der näheren Zukunft ist die intelligente Beleuchtung in Innenräumen, welche auf die Bedürfnisse des Menschen hinsichtlich Blickverhalten, Nutzerpräferenz und natürlichem Lichteinfall dynamisch eingeht. Sie ist als Weiterentwicklung von steuerbarer, über Bussysteme verbundener Beleuchtung zu verstehen. Für eine solche dynamisch geregelte, intelligente Beleuchtung werden dabei verschiedenste Sensoren benötigt, um eine situations- und anwendungsgerechte Innenraumbeleuchtung zu gewährleisten. Aus lichttechnischer Sicht ist dabei die sensorische Erfassung von im Raum realisierten Beleuchtungsstärken sowie des Weißpunkts der vorhandenen Lichtbedingungen, im Idealfall sogar deren spektraler Zusammensetzung, von besonderem Interesse. Nur

mit solchen Echtzeit-Sensordaten als Eingang, kann eine intelligente Raumbeleuchtung dynamisch auf die lokal erforderlichen Beleuchtungsstärken, den präferierten Weißpunkt bzw. die optimale spektrale Strahldichtevertelung unter Berücksichtigung des bereits im Raum vorhandenen Lichts reagieren.

Für die Umsetzung außerhalb von einer Laborumgebung ist es dabei nicht praktikabel, vollwertige Spektroradiometer für diese lichtmesstechnischen Aufgaben einzusetzen. Stattdessen ist die Verwendung kleinerer und vor allem preisgünstigerer Farbsensoren denkbar. Damit auf Basis der Sensordaten solcher Farbsensoren intelligente Systeme korrekte Entscheidungen treffen können, muss der in den eingesetzten Sensoren stattfindende Wandlungsprozess von optischer Strahlung zu elektrischen Signalen bekannt sein.

Problematisch ist hierbei, dass die Sensoren produktionsbedingten Schwankungen unterliegen. Spätestens wenn mehrere Sensoren parallel eingesetzt werden sollen, müssen die Sensoren auf eine möglichst einheitliche Farbregistrierung kalibriert werden. Dieser Beitrag geht dem Ansatz eines Binnings von typgleichen Sensoren mit ähnlichem Verhalten nach, um den Aufwand einer individuellen Sensorkalibrierung beim Einsatz von Farbsensoren in hohen Stückzahlen zu umgehen. In Kapitel 2 wird dazu ein grundlegendes Modell für die Funktionsweise eines Farbsensors vorgestellt. In Kapitel 3 werden 24 typgleiche Sensoren hinsichtlich ihrer Abweichungen in den spektralen Empfindlichkeiten untersucht. Kapitel 4 widmet sich anschließend einer Abschätzung der Auswirkungen dieser Sensorunterschiede bei der Erfassung von Farborten und gibt einen Ausblick darauf, ob halbleiterbasierte Farbsensoren ähnlich wie LEDs in Bins eingeteilt werden könnten. Kapitel 5 bietet eine abschließende Zusammenfassung der Ergebnisse sowie einen kurzen Ausblick auf zukünftige Fragestellungen.

2 Modell eines Farbsensors

Ein Farbsensor kann nach Gleichung (1) modelliert werden [1]. Das Integral über das Farbreizspektrum $\varphi(\lambda)$ und der spektralen Empfindlichkeit $s_k(\lambda)$ ergibt in Abhängigkeit mit der Belichtungszeit e und des Verstärkungsfaktors κ den Ausgabewert c_k eines Farbsensorkanals k . Das Farbreizspektrum $\varphi(\lambda)$ setzt sich für den Fall, dass mit dem Farbsensor eine angeleuchtete Fläche aufgenommen wird, aus dem Reflexionsspektrum $r(\lambda)$ der Oberfläche sowie der spektralen Bestrahlungsstärke des Beleuchtungsspektrums $E(\lambda)$ zusammen. Die Funktion F in Gleichung (1) ermöglicht die Abbildung von nichtlinearem Verhalten in dem Sensormodell. Der Term n_k modelliert additives Rauschen, welches die Sensorantworten beaufschlagt.

$$\begin{aligned}
 c_k &= F(\kappa, e, S) \\
 S &= \int \varphi(\lambda) \cdot s_k(\lambda) d\lambda + n_k \\
 &= \int r(\lambda) \cdot E(\lambda) \cdot s_k(\lambda) d\lambda + n_k
 \end{aligned} \tag{1}$$

Für die hier vorgestellten Untersuchungen werden die drei Kanäle eines realen Farbsensors (siehe Abb. 1) betrachtet, welche in ihrer spektralen Gestaltung dem menschlichen Farbsehen mit den verschiedenen Zapfentypen angenähert sind (siehe Abb. 3). Die spektralen Empfindlichkeiten werden hierbei über nanooptische Interferenzfilter mit Gauß'scher Übertragungsfunktion direkt in CMOS-Silizium-Technologie auf den Photodioden realisiert.



Abb. 1: Untersuchter Farbsensor auf einer Platine mit rückseitiger Kontaktierung und Ausfräsungen zur Befestigung. Unter der Gehäuseöffnung sind die Photodioden mit den verschiedenen Interferenzfiltern der Sensorkanäle zu erkennen.

Für die Untersuchungen in dieser Arbeit wird der Sensor mit einer festen Integrationszeit und festem Verstärkungsfaktor betrachtet. Aus diesem Grund kann die Funktion F in Gleichung (1) für eine festgelegte Belichtungszeit e und fixen Verstärkungsfaktor κ als einfache Multiplikation mit einer Proportionalitätskonstante δ angenommen werden. Angesichts der digitalen Auflösung der Sensorantworten c_k von jeweils 16 Bit bei diesem spezifischen Sensortyp sind die diskretisierungsbedingten Abweichungen zwischen dem Modell und den realen Sensorantworten sehr gering. Das Integral aus Gleichung (1) wird im weiteren Verlauf durch diskrete Summation in $\Delta \lambda = 1$ nm Schritten angenähert.

$$c_{Xk} = \delta \cdot \sum \varphi(\lambda) \cdot s_{Xk}(\lambda) \cdot \Delta \lambda + n_{Xk} \tag{2}$$

Die daraus resultierenden Farbkoordinaten werden vom Farbsensor nach Ablauf der Integrationszeit als Zählerstände ausgegeben, so dass für eine farbmessige Nutzung

der Sensordaten zunächst eine entsprechende Sensorkalibrierung durchgeführt werden muss.

2.1 Farbsensorkalibrierung auf Standardnormalbeobachter

Grundlage aller Farbberechnungen bis heute ist der 1931 durch die CIE (Commission Internationale de l’Eclairage) definierte 2 ° Standardnormalbeobachter [2], der das menschliche Farbsehen mathematisch abbildet. Aus den unterschiedlichen Empfindlichkeiten der drei Zapfentypen im menschlichen Auge folgen die Normspektralwertfunktionen $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$ des Standardnormalbeobachters. Auf Basis dieser Normspektralwertfunktionen sowie unter Kenntnis des Farbreizspektrums $\varphi(\lambda)$ lassen sich die zugehörigen, den Farbeindruck beschreibenden Tristimuluswerte $X Y Z$ nach CIE Empfehlung 15.2 [2] berechnen.

Diese Farbkoordinaten des Standardnormalbeobachters sind im Allgemeinen unterschiedlich zu den Ausgabewerten eines Farbsensors in der gleichen Szene. Aus diesem Grund benötigen Farbsensoren in der Praxis eine Farbkorrektur: Die Ausgabewerte müssen mit möglichst geringem Fehler auf die entsprechenden Tristimuluswerte abgebildet werden. Der technische Standard zur Durchführung von Farbkorrekturen in digitalen Kamerasystemen ist in ISO-Norm ISO17321-1:2012 [3] festgehalten. Dort wird eine lineare Abbildung in Form einer Matrixtransformation nach Gleichung (3) beschrieben sowie eine Vorgehensweise zur Berechnung der entsprechenden Transformationsmatrix $M_{3 \times 3}$ vorgeschlagen.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}^T = M_{3 \times 3} \begin{pmatrix} c_X \\ c_Y \\ c_Z \end{pmatrix}^T \quad (3)$$

Der grundlegende Ansatz zur Berechnung von $M_{3 \times 3}$ ist dabei Gleichung (4), also eine Minimierung des mittleren quadratischen Fehlers durch die Abbildung.

$$M_{3 \times 3} = \arg \min_M \{ |XYZ - M \cdot C_{XYZ}|^2 \} \quad (4)$$

Zur Bestimmung der Transformationsmatrix werden sowohl reale Sensorantworten als auch die zugehörigen Tristimuluswerte benötigt. Dies lässt sich realisieren, indem der Sensor einer Reihe von Farbreizspektren ausgesetzt und neben der resultierenden Sensorantwort auch das Spektrum des Farbreizes mit Hilfe eines Spektrometers aufgenommen wird. Aus dem erfassten Spektrum lassen sich im

Anschluss die entsprechend zugehörigen $X Y Z$ -Werte berechnen. Für den betrachteten Sensor ist damit eine Farbkorrekturvorschrift gefunden, die in Bezug auf die Menge der zur Kalibrierung verwendeten Farbreizspektren einen minimalen mittleren quadratischen Abbildungsfehler liefert. Es zeigt sich im Folgenden, dass diese Transformationsmatrizen nicht von einem Sensor auf einen anderen Sensor des gleichen Typs übertragen werden können, ohne große Farbfehler in Kauf zu nehmen.

3 Unterschiedliche Farbaufnahme typgleicher Spektralsensoren

Dieses Kapitel hat die produktionsbedingten Differenzen in der Farbregistrierung typgleicher Farbsensoren zum Inhalt. Für die exakte Bestimmung der spektralen Sensorkanalempfindlichkeiten wird in der Literatur häufig ein Monochromator verwendet [1,4–8]. Dieser erzeugt extrem schmalbandige Farbreizspektren, deren Maximum sich über den gesamten Empfindlichkeitsbereich des Sensors variabel einstellen lässt. Gleichzeitig kommt ein Spektroradiometer zum Einsatz, um die Farbreizspektren zu den Sensorantworten messtechnisch zu erfassen. Ausgehend von dem in Abschnitt 2 aus Gleichung (1) abgeleiteten Modell lässt sich die spektrale Empfindlichkeit eines Sensorkanals k aus den Sensorantworten auf die schmalbandigen Farbreize sowie dem Integral über dem Farbreizspektrum ermitteln [9,10]:

$$s_k(\lambda) = \frac{F^{-1}(c_k(\varphi_\lambda)) - n_k}{e \cdot \int \varphi(\lambda) d\lambda} \approx \frac{c_k(\varphi_\lambda) - \bar{n}_k}{\delta \cdot \sum \varphi(\lambda) \Delta\lambda} \quad (5)$$

Die Zufallsvariable \bar{n}_k , welche das Rauschen der Sensorantworten im Modell beschreibt, wird durch ihren Mittelwert bei Dunkelheit \bar{n}_k grob angenähert [1]. Dabei werden sensorwertabhängige und damit insbesondere bestrahlungsstärkeabhängige Rauschvorgänge vernachlässigt.

Die mit Hilfe des Monochromators aufgenommenen und anschließend mit Hilfe von Gleichung (5) berechneten spektralen Empfindlichkeitskurven der 24 realen typgleichen Farbsensoren sind in Abb. 3 aufgetragen. Der Monochromator ist dabei auf eine Ausgangshalbwertsbreite von 2 nm eingestellt. Das eingesetzte Spektroradiometer besitzt ein Wellenlängenauflösungsvermögen von bis zu 0,2 nm.

Die unruhigen Verläufe der Kurven über der Wellenlänge entspringen den Interferenzfilterschichten, welche die Empfindlichkeitskurven des CIE

Standardnormalbeobachters auf den Photodioden realisieren sollen. Typisch für diese Interferenzfiltertechnologie ist die mit größeren Wellenlängen sinkende Frequenz der vielen lokalen Maxima und Minima auf den Empfindlichkeitskurven. Durch Schichtdickenvariationen zwischen den einzelnen Farbsensoren kommt es außerdem dazu, dass diese lokalen Maxima und Minima für verschiedene Farbsensoren bei unterschiedlichen Wellenlängen auftreten.

Statt auf das Maximum der Y-Empfindlichkeit wird hier auf die Empfindlichkeit bei 555 nm im Y-Kanal normiert. Dies liegt darin begründet, dass die gemessenen Empfindlichkeitskurven in Abb. 3 aufgrund der Interferenzstrukturen ihre Maxima im Y-Kanal an sehr verschiedenen Wellenlängen erreichen, so dass die globalen Maxima somit nicht den Schwerpunkten der Empfindlichkeitsverteilung über der Wellenlänge entsprechen. Mit der Normierung auf den Empfindlichkeitswert bei 555 nm ist daher eine bessere Vergleichbarkeit der normierten Empfindlichkeitskurven gegeben.

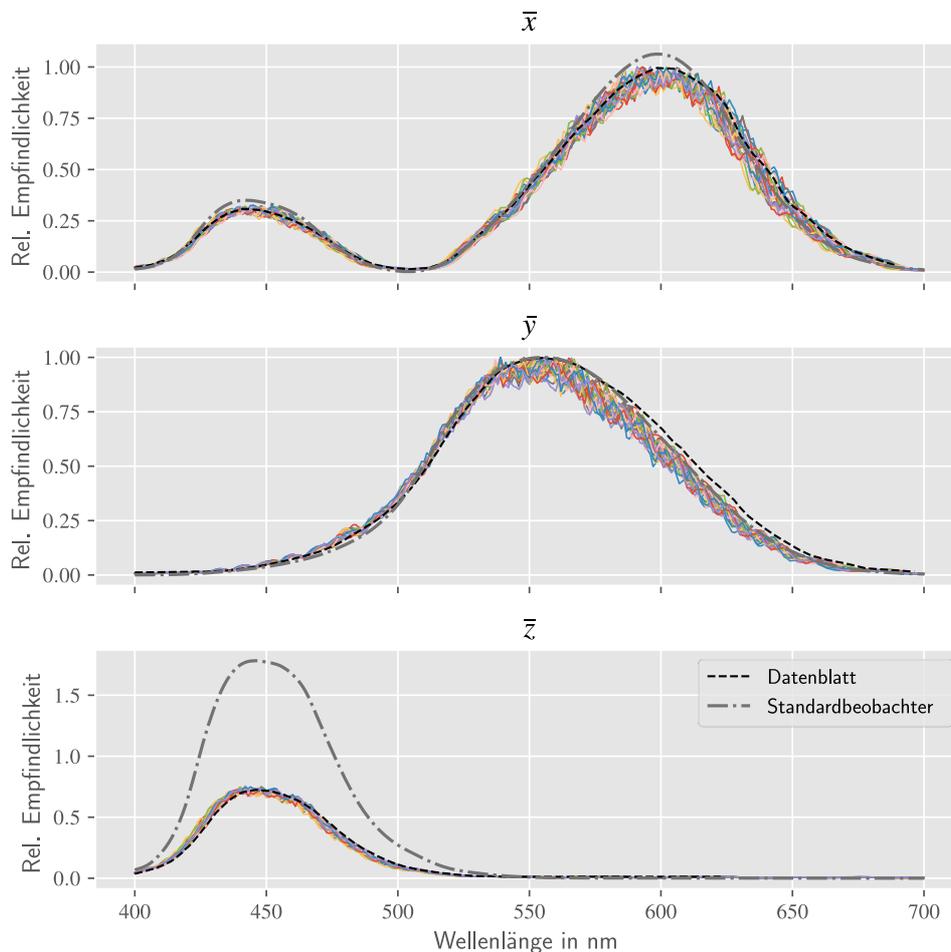


Abb. 3: An einem Monochromatormesstand über Gleichung (5) in 1 nm-Schritten ermittelte spektrale Empfindlichkeitskurven von 24 typgleichen Farbsensoren, normiert auf ihre Empfindlichkeit bei 555 nm im Y-Kanal.

Der eingangs in diesem Abschnitt beschriebene Ansatz, jeden einzelnen Sensor über Messungen am Monochromator zu charakterisieren, ist zeitlich aufwändig und für industrielle Anwendungen mit großen Stückzahlen nicht praktikabel. Aus diesem Grund wird im nächsten Abschnitt die Möglichkeit betrachtet, Farbsensoren in Bins einzuteilen, um von Sensoren, die sich ähnlich auf gleiche Farbreize verhalten, nur jeweils ein Exemplar charakterisieren zu müssen.

4 Ausblick auf Sensor-Binning

Als Alternative zur detaillierten Charakterisierung jedes einzelnen Sensors könnte die Gruppierung von Sensoren mit gleichem Verhalten in Cluster sowie die anschließende Verwendung von clusterspezifischen Transformationsmatrizen einen massiven Geschwindigkeits- und Aufwandsvorteil bieten. Das Potential dieses Ansatzes wurde bereits für die Bestimmung von Lichtfarben gezeigt [11]. An dieser Stelle soll nun betrachtet werden, inwiefern dieser Ansatz auch auf die Bestimmung von Oberflächenfarben mit Spektrosensoren übertragen werden kann. Abb. 4 veranschaulicht das Vorgehen.

Zunächst werden die Sensorantworten der 24 in dieser Arbeit betrachteten Farbsensoren aus den gemessenen Spektralempfindlichkeiten der Sensoren für einen Satz von Prüfstimuli "C" berechnet. Ein agglomerativer Cluster-Algorithmus wird dann auf die Ausgangsdaten der Sensoren angewendet, um die Sensorgruppen mit ähnlicher Farbregistrierung zu definieren. Unter der Vorgabe der gewünschten Anzahl an Gruppen werden dabei, ausgehend von einem individuellen Cluster für jeden einzelnen Sensor, solange Sensor-Gruppen mit ihren Nachbarn vereinigt, bis die final gewünschte Anzahl an Clustern erreicht ist. Für die Konzeptprüfung in diesem Beitrag wird die sogenannte Ward-Methode [12] als Verknüpfungskriterium verwendet, welche die Cluster so zusammenfügt, dass schrittweise die Varianz innerhalb der Cluster (gemessen über einen Index basierend auf der Summe der Abstands-Quadrate zum Clustermittelwert) minimiert wird.

Die Cluster-Mittelpunkte werden dann verwendet, um eine Farbkorrekturmatrix aus einem Satz bekannter Farbreize "L" zu bestimmen, die auf alle Sensoren innerhalb desselben Bins angewendet wird.

Die Verwendung eines einzigen warmweißen, phosphorkonvertierten LED-Spektrums als Prüfstimulus „C“ hat sich als ausreichend erwiesen, um eine Klassifizierung der Sensoren zu Farbkorrekturzwecken bei Verwendung einer 3x3-Matrix zu erreichen (Hintergründe dazu siehe [11]). Als Eingangsdaten „L“ für die Matrixberechnung werden für diesen Beitrag zu Oberflächenfarben die 99 TM-30-18 [13,14] Reflexionsgradfunktionen unter D65-Beleuchtung verwendet.

Alle Farbkoordinatenberechnungen werden mit LuxPy [14] durchgeführt.

Die Performance des Binning-Ansatzes wird im Folgenden anhand von 8 Testfarbreizen (Felder eines Color Checkers [15]) als Satz von Testreizen „T“ und ihren CIE a^*b^* -Koordinaten visualisiert und ausgewertet. Für die Untersuchung kleiner Farbabstände bietet sich dabei eine Auswertung mit der CIEDE2000-Formel an, welche die menschliche Empfindung von Farbdifferenzen besser widerspiegelt als der euklidische Abstand in $X Y Z$ [16–19].

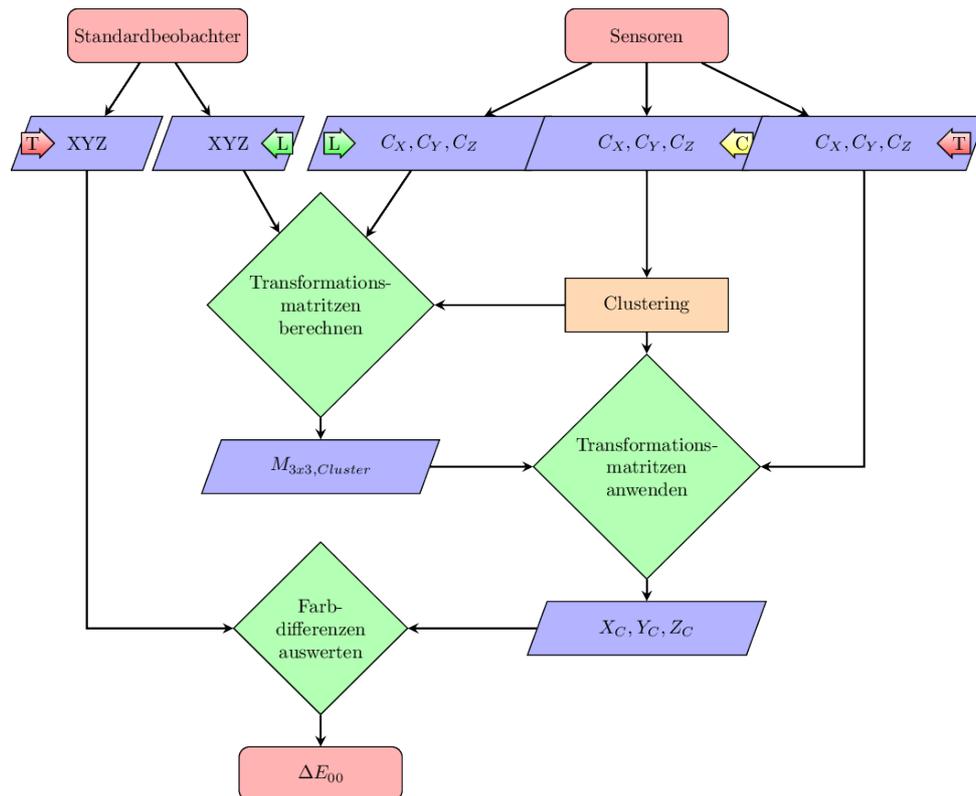


Abb. 4: Übersicht der Zwischenschritte zur Berechnung von wahrnehmungsgetreuen Differenzen in der Farbaufnahme von per Sensorbinning farbkorrigierten Farbsensoren über die CIEDE2000 Farbabstandsformel im CIELAB-Farbraum

Wird zunächst nur eine einzige Transformationsmatrix aus den Sensorantworten berechnet (entspricht dem Fall, dass alle Sensoren in das gleiche Cluster eingeteilt werden), ergeben sich für die Testspektren große Farbunterschiede zwischen den transformierten Sensorausgabewerten und dem wahren Farbort (berechnet über den CIE 1931 2° Standardbeobachter). Dieses Szenario ist in Abb. 5 dargestellt, die transformierten Sensorantworten weichen für alle Testspektren im Mittel um $\Delta E_{00} = 1,45$ vom Standardbeobachter ab, maximal um $\Delta E_{00} = 7,2$. Dabei entsteht für die untersuchten 24 Sensoren der überwiegende Anteil des Farbunterschiedes auf der a^* -Achse.

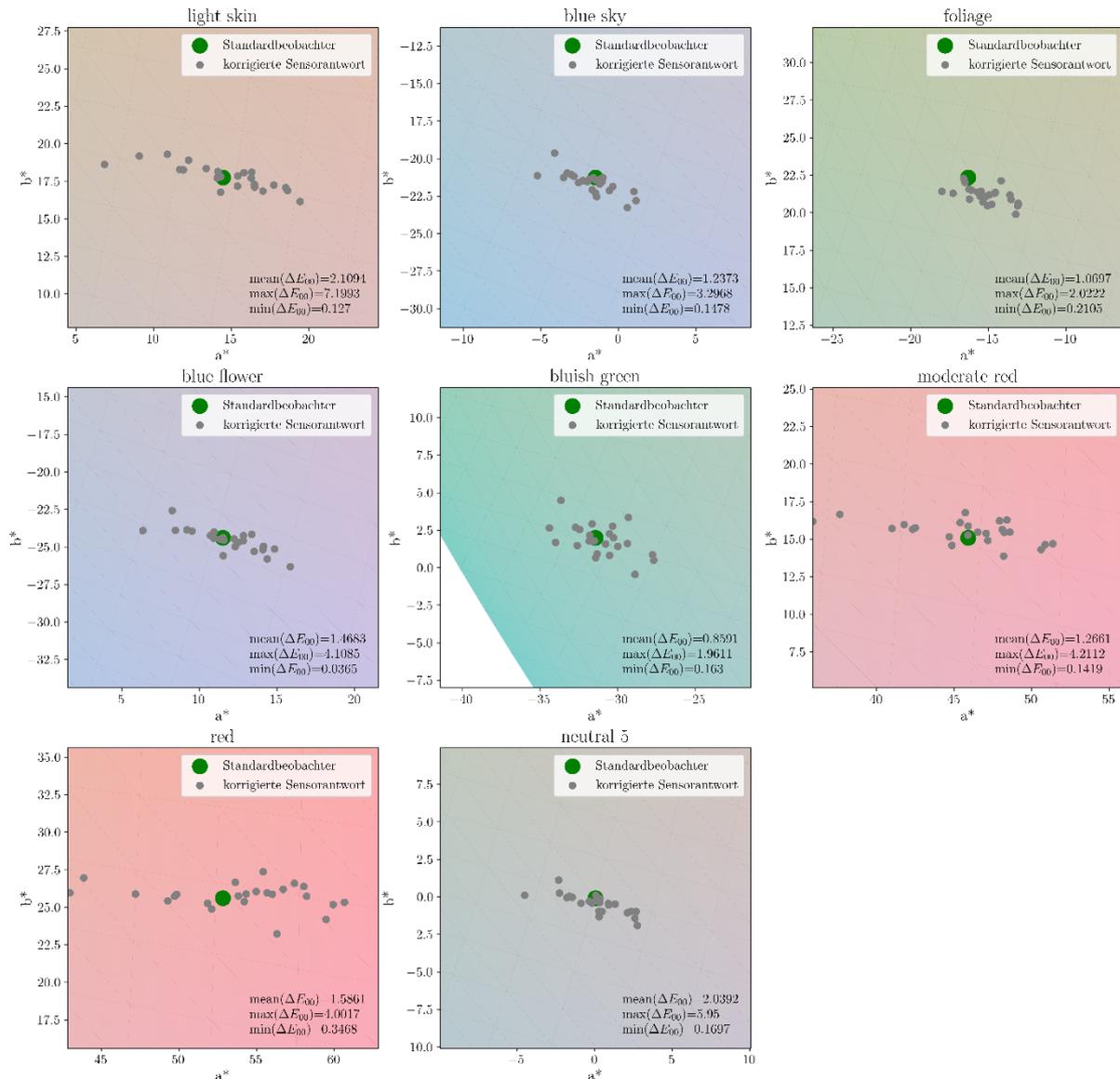


Abb. 1: Über 24 typgleiche Sensoren beobachtete Farborte von 8 Testfeldern eines Colorcheckers unter D65 Beleuchtung im Vergleich zum wahren Farbort des Farbreizes. Die Sensorantworten der verschiedenen Sensoren werden vor der Darstellung mit einer über die mittleren Sensorantworten auf die IES TM-30-18-Reflexionsspektren bestimmten Transformationsmatrix in den CIE XYZ Farbraum transformiert und anschließend in $L^*a^*b^*$ -Koordinaten umgerechnet. Zu erkennen ist, dass die registrierten Farborte der Sensoren deutlich um den wahren Farbort streuen.

Werden die Sensoren beispielsweise in 5 Cluster eingeteilt und clusterspezifische Transformationsmatrizen verwendet, ergeben sich für die Testspektren deutlich

geringere Farbunterschiede zwischen den transformierten Sensorausgabewerten und dem wahren Farbort (Abb. 6).

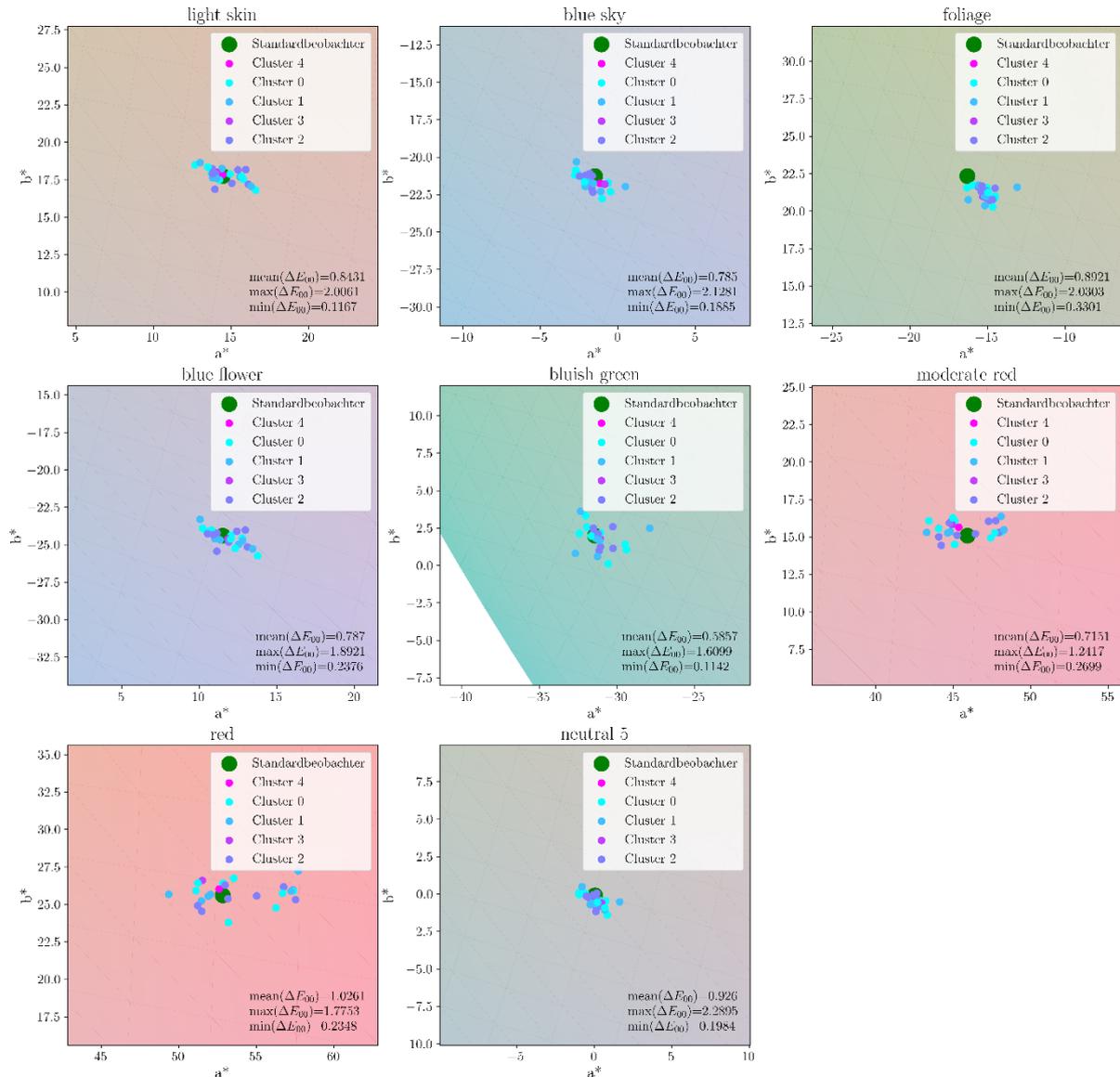


Abb. 2: Über 24 typgleiche Sensoren beobachtete Farborte von 8 Testfeldern eines Colorcheckers unter D65 Beleuchtung im Vergleich zum wahren Farbort des Spektrums. Die Sensoren werden anhand ihrer Sensorantworten auf ein warmweißes, phosphorkonvertiertes LED-Spektrum in 5 Cluster eingeteilt und für jedes Cluster eine Transformationsmatrix nach CIE XYZ berechnet. Die Sensorantworten der verschiedenen Sensoren werden dann mit der Transformationsmatrix ihres Clusters in den CIE XYZ Farbraum transformiert und anschließend in L*a*b*-Koordinaten umgerechnet. Für alle Testspektren sinkt die Streuung der Sensor-Farborte um den wahren Farbort des Spektrums durch die Anwendung des Binnings deutlich.

Auch die mit nur einer Transformationsmatrix erkennbare Dominanz der a*-Achse für die Farbunterschiede ist in diesem Fall stark verringert. Die transformierten

Sensorantworten weichen für alle Testspektren im Mittel nur noch um $\Delta E_{00} = 0,82$ vom Standardbeobachter ab, was einer Verringerung um 43% gegenüber der Verwendung einer allgemeinen Korrekturmatrix für alle Sensoren entspricht.

Weiterhin ist zu beobachten, dass sich für die gegebene Stichprobe an typgleichen Farbsensoren bereits mit lediglich fünf Clustern sowie fünf zugehörigen, clusterspezifischen Transformationsmatrizen die registrierten Farbunterschiede auf den Testfarben auf einen Maximalwert von $\Delta E_{00} = 2,29$ begrenzen lassen, was mit einer Verringerung des Maximalfehlers von 68% einhergeht.

5 Zusammenfassung und Fazit

In dieser Arbeit wurde ein neuer Binning-Ansatz für Farbsensoren auf seine Anwendbarkeit für die Erfassung von Oberflächenfarben untersucht. Insbesondere in Systemen mit mehreren parallel arbeitenden Farbsensoren besteht das Problem, dass erhebliche Abweichungen bei der Farbregistrierung auftreten können, selbst zwischen Farbsensoren des gleichen Typs. Eine adäquate Korrektur dieser Fehler ist erforderlich, um eine zuverlässige Farberfassung für die Systemsteuerung zu gewährleisten. Die Standardverfahren der Farbkorrektur sind jedoch entweder unpraktisch in der Massenanwendung (z.B. bei dem Versuch, für jeden Farbsensor eine eigene Farbkorrekturmatrix zu ermitteln) oder führen immer noch zu großen Abweichungen von der Grundwahrheit (z.B. bei der Verwendung einer einzigen Transformationsmatrix, die auf Datenblattkurven basiert oder aus den Mitteln einer begrenzten Anzahl von Sensormessungen ermittelt wurde). Um diese Probleme zu überwinden, wurde gezeigt, dass die Sensorantworten auf einen Satz von Prüfstimuli verwendet werden können, um charakteristische Sensorcluster zu definieren. Durch eine clusterweise Farbkorrektur, die aus den jeweiligen Cluster-Mittelpunkten ermittelt wurde, können die Unterschiede in der Farbregistrierung von Oberflächenfarben zwischen einzelnen Sensoren sowie deren Abweichungen von der Grundwahrheit deutlich reduziert werden.

Somit ist die vorliegende Arbeit, die zukünftige Entwicklungen in Richtung Standardisierung impliziert, von hoher praktischer Relevanz nicht nur für den Bereich der Beleuchtung, sondern überall wo Farbsensoren entweder für die eigentliche Erkennung und Farbunterscheidung oder als integraler Bestandteil zur Systemsteuerung eingesetzt werden. In diesem Zusammenhang muss der vorgeschlagene Binning-Ansatz in Zukunft um eine Vordefinition von festen charakteristischen Clustern erweitert werden, wie z. B. die Farbortvierecke des ANSI-Binning-Standards für weiße LEDs. Anstatt für jede neue Stichprobe identischer Farbsensoren eine neue Cluster-Zuordnung zu erstellen, erlaubt die Verwendung solcher vordefinierten Cluster eine generische Sensorklassifizierung, die, wie oben beschrieben, durch eine einfache einmalige Messung beurteilt werden kann. Hierfür

wird jedoch wiederum eine wesentlich größere Anzahl gleichartiger Farbsensoren als die im Rahmen dieses Konzeptpapiers betrachteten 24 Exemplare benötigt, um die Generalisierbarkeit auf ein notwendiges Maß zu erhöhen. Darüber hinaus gilt es herauszufinden, ob sich das vorliegende Konzept auf andere Farbsensortechnologien übertragen lässt, die nicht auf nano-optischen Interferenzfiltern basieren. Zukünftige Forschung sollte eine mögliche Erweiterung des Ansatzes über die Erfassung von Farbe hinaus betrachten, wie beispielsweise die sensorbasierte Abschätzung der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) in der Gartenbaubeleuchtung oder die Erfassung anderer photometrischer Größen.

6 Literatur

- [1] P.L. Vora, J.E. Farrell, J.D. Tietz, D.H. Brainard, Digital color cameras-1-Response models, Hewlett-Packard Laboratories, 1997.
- [2] CIE 015:2004, Colorimetry, third ed., Commission Internationale de l'Éclairage, 2004.
- [3] ISO 17321-1:2012, Graphic technology and photography — Colour characterization of digital still cameras (DSCs), Part 1: Stimuli, metrology and test procedures, International Organization for Standardization, 2012.
- [4] EMVA, EMVA Standard 1288: Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras Release 3.1, European Machine Vision Association, 2016.
- [5] G. Finlayson, M.M. Darrodi, M. Mackiewicz, Rank-based camera spectral sensitivity estimation, *Journal of the Optical Society of America A* 33 (2016) 589–599. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.33.000589>.
- [6] E. Walowit, H. Buhr, D. Wüller, Multidimensional Estimation of Spectral Sensitivities, *Color and Imaging Conference* (2017) 1–6.
- [7] J. Jiang, D. Liu, J. Gu, S. Susstrunk, What is the space of spectral sensitivity functions for digital color cameras?, in: *2013 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV)*, IEEE, 2013, pp. 168–179.
- [8] P. Urban, M. Desch, K. Happel, D. Spiehl, Recovering camera sensitivities using target-based reflectances captured under multiple LED-illuminations, in: *Proc. of Workshop on Color Image Processing*, 2010, pp. 9–16.
- [9] P.M. Hubel, D. Sherman, J.E. Farrell, A comparison of methods of sensor spectral sensitivity estimation, in: *Color and Imaging Conference*, 1994, pp. 45–48.
- [10] P.L. Vora, J.E. Farrell, J.D. Tietz, D.H. Brainard, Digital color cameras—2—Spectral response, Hewlett-Packard Laboratories, 1997.

- [11] P. Myland, S. Babilon, T.Q. Khanh, Tackling Heterogeneous Color Registration: Binning Color Sensors, *Sensors (Basel)* 21 (2021).
<https://doi.org/10.3390/s21092950>.
- [12] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, M. Perrot, E. Duchesnay, Scikit-learn: Machine Learning in Python, *Journal of Machine Learning Research* 12 (2011) 2825–2830.
- [13] Illuminating Engineering Society of North America, ANSI/IES-TM-30-18 Method for Evaluating Light Source Colour Rendition, New York, 2018.
- [14] K.A.G. Smet, Tutorial: The LuxPy Python Toolbox for Lighting and Color Science, *LEUKOS* 16 (2020) 179–201.
<https://doi.org/10.1080/15502724.2018.1518717>.
- [15] C.S. McCamy, H. Marcus, J.G. Davidson, others, A color-rendition chart, *J. App. Photog. Eng* 2 (1976) 95–99.
- [16] M.R. Luo, G. Cui, B. Rigg, The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000, *Color Research & Application* 26 (2001) 340–350.
<https://doi.org/10.1002/col.1049>.
- [17] ISO 11664-4:2008(E)/CIE S 014-4/E:2007, Colorimetry - Part 4: 1976 L*a*b* Colour Space, International Organization for Standardization, CIE, 2007.
- [18] CIE 142-2001, Improvement to Industrial Colour-Difference Evaluation, International Organization for Standardization, CIE, 2001.
- [19] G. Sharma, W. Wu, E.N. Dalal, The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations, *Color Research & Application* 30 (2005) 21–30.
<https://doi.org/10.1002/col.20070>.