

Sensorisches spektrales Leuchten-Feedbacksystem für anspruchsvolle Lichtanwendungen

Rico Nestler^{1,2}, Kai Fischer¹, Karl-Heinz Franke¹,
Stefan Junger³, Daniel Gäbler⁴

¹Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung, Werner-von-Siemens-Str. 10,
98693 Ilmenau, kai.fischer@zbs-ilmenau.de

²Technische Universität Ilmenau, Fak. MB, FG. QBV, Postfach 100 565,
D-98684 Ilmenau, rico.nestler@tu-ilmenau.de

³Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, Am Wolfsmantel 33, 91058 Erlangen

⁴X-FAB Semiconductor Foundries AG, Haarbergstr. 67, 99097 Erfurt

Zusammenfassung Hybride LED-basierte, spektral einstellbare Beleuchtungssysteme können nur durch entsprechende sensorische Überwachung und Beeinflussung zeitlich stabile spektrale Eigenschaften realisieren. Die Notwendigkeit dafür resultiert aus der typabhängigen Veränderlichkeit der Beiträge der zur Lichterzeugung verwendeten LEDs, die insbesondere aus Exemplarstreuungen und Drifteffekten aufgrund von Temperatur und Alterung resultieren. Für viele anspruchsvolle Leuchtenanwendungen, zum Beispiel in Medizin, Druck, Studioteknik oder der Bildverarbeitung, sind aber spektral definierte und konstante Leuchteneigenschaften unbedingt erforderlich.

Gegenstand dieses Beitrages sind daher Überlegungen zur Realisierung eines Leuchten-integrierbaren Feedbacksystems basierend auf multispektralen Sensoren, deren Filterwirkung kostengünstig durch optische Nanostrukturen in Metallschichten (plasmonisch) erzielt wird. Die aus der sensorischen Information gewonnenen spektralen Schätzungen sind die Grundlage für die Regelung der spektralen Leuchtencharakteristik mit einem vorgeschlagenen linearen, skalierbaren Mehrkanal-Regleransatz. Die Funktion der Regelung wird für ein praktisches Leuchtenszenario evaluiert, deren Güte mit einer in der Entwicklungsphase vorhandenen echten spektralen Überwachung und daraus ermittelten spektral-colorimetrischen Leuchtenkennwerten (CRI) nachgewiesen. Die Einsatzrandbedingungen des vorgestellten Lösungsansatzes werden abschließend diskutiert.

1 Einleitung und Motivation

LEDs sind ideale Bauelemente, um effiziente Beleuchtungssysteme mit neuartigen Eigenschaften zu realisieren. Hochwertige und spektral einstellbare Leuchtenlösungen für den breiten Einsatz in verschiedenen Anwendungen und mit unterschiedlichen Ansprüchen erfordern jedoch die Einhaltung stabiler Verhältnisse der umgesetzten Leuchteneigenschaften.

Neben der zur Szenenausleuchtung bereitgestellten integralen Strahlungsleistung (Strahlungsfluss bzw. Lichtstrom) ist gerade die spektrale Lichtzusammensetzung (Strahlungsflussdichte) einer Leuchte verantwortlich für den durch Licht-Objekt-Wechselwirkungen subjektiv oder technisch farblich wahrnehmbaren Szeneninhalt. Beispiele für in diesem Sinne anspruchsvolle Leuchtenanwendungen finden sich in der Medizin, im Bereich der Druckreproduktion, der Studioteknik sowie in der Bildverarbeitung ganz allgemein. Darüber hinaus sind erste Anwendungen im Bereich der Allgemeinbeleuchtung bekannt, die im Gegensatz zur bestehenden, eher colorimetrisch (Weißpunkt) geprägten Leuchtenbewertung den spektralen Aspekten der Lichterzeugung verstärkt Aufmerksamkeit schenken. Das Ziel ist dabei, zum Beispiel über die spektrale Zusammensetzung bestimmte biologische Lichtwirkungen in Organismen (Human Centric Lighting) zu erzielen. In all diesen LED-Anwendungen ist die zeitliche Konstanz der spektralen Lichtzusammensetzung eine bedeutsame Randbedingung des Leuchteneinsatzes und damit ein wichtiges Kriterium zur Leuchtenauswahl.

Die Gewährleistung von spektraler, zeitlicher Stabilität ist insbesondere bei hybrid, das heißt aus unterschiedlichen LED-Typen¹, erzeugten Lichtmischungen anspruchsvoll. Neben Exemplarstreuungen ist insbesondere das LED-typspezifische Betriebs- und Driftverhalten, zum Beispiel der Einfluss von Temperatur und Alterung auf den optischen Wirkungsgrad, eine ganz wesentliche Ursache für spektrale Veränderungen der Leuchteneigenschaften über der Zeit oder zwischen baugleichen Leuchtenmodulen unterschiedlichen Alters [1].

Die den Wirkungsgrad (Intensität) und auch die spektrale Lichtzusammensetzung der beteiligten LED-Lichter beeinflussenden Effekte können durch geschickte Vorauswahl (Chargenbinning) und/oder Behandlung (Voralterung) sowie aufwendigen Modellierungen des Driftverhaltens reduziert werden. Die Erstellung der erforderlichen physikalischen Zusammenhänge erfordert aber eine zumeist aufwendige, typspezifische Charakterisierung jeder verwendeten LED für verschiedene Betriebsbedingungen. Dies setzt sich in einem entsprechend hohen Aufwand bei der Leuchtenumsetzung, zum Beispiel zur Gewährleistung entsprechend stabilisierter thermischer und elektrischer Verhältnisse und beim Leuchtenbetrieb, zum Beispiel durch wiederholt erforderliche Kalibrierungen, fort. Diese Vorgehensweise ist nur im Bereich hochpreisiger Leuchten für Spezialanwendungen gerechtfertigt und bleibt diesen vorbehalten [2] [3].

Wird anstelle dessen das in den Arbeitsraum der Leuchte abgegebene Licht kontinuierlich sensorisch erfasst und auf dieser Grundlage aktiv beeinflusst (geregelt), so sind vergleichbare Ergebnisse bei gleichzeitig erheblich einfacherem Leuchtenansatz

¹ unterschiedlichen lichterzeugenden Prinzipien, Ladungsträgerrekombination oder Lumineszenz von Wellenlängen-Konverter-Leuchtstoffen

und kleinerem Preis möglich. Eine wesentliche Rolle spielen dabei kostengünstige Multispektral-Sensoren, deren sensorische Information oft ausreichend für die Regelung vielkanalig erzeugter Lichtzusammensetzungen ist. Damit werden die Voraussetzungen für technische Lösungen geschaffen, die oben dargestellte Anwendungsfelder und auch preissensitive Massenanwendungen optimal bedienen können.

Die Bedeutung der durchgängig spektralen Betrachtung für die eindeutige Definition und Charakterisierung von Leuchteigenschaften, sowie die Notwendigkeit für eine spektral vielkanalige sensorische Erfassung und Sensordatenverarbeitung wurden an dieser Stelle bereits 2015 hervorgehoben [4]. Mit multikanaligen sensorischen Daten eröffnet sich unter bestimmten Voraussetzungen die Möglichkeit, das Problem der Überwachung auf spektraler Ebene zu diskutieren. Gegenstand dieses Beitrags sind Überlegungen zur Realisierung eines Leuchten-integrierbaren Feedbacksystems. Die Grundlage dafür bilden spektrale Schätzungen kontinuierlich erfasster spektraler Lichtreize einer Leuchte aus den Daten eines Mehrbereichssensors (siehe Abschnitt 2). Aus diesen Messungen werden in der Folge mit einem linearen Mehrkanal-Regleransatz die Stellgrößen der Lichterzeugung beeinflusst und nachgeführt (siehe Abschnitt 3). Am Ende wird in Abschnitt 4 das vorgestellte Konzept des spektralen Leuchtenfeedbacksystems für ein praktisches Anwendungsszenario einer medizinischen Leuchte zur Abmusterung und Dokumentation evaluiert.

2 Multispektrale Signalverarbeitung für den Einsatz im Leuchtenfeedbacksystem

2.1 Mehrbereichs-Sensoren mit plasmonisch erzeugter Filterwirkung

Um die genannten Vorteile einer sensorischen Überwachung und aktiven Regelung in möglichst vielen, auch preissensitiven Beleuchtungsanwendungen zu ermöglichen, sind kostengünstige, miniaturisierte Sensoren, Verarbeitungs- und Ansteuereinheiten, die integraler Bestandteil von Leuchten sind, erforderlich.

In diesem Beitrag werden zur Überwachung Multispektral-Sensoren betrachtet, die monolithisch in einem erweiterten CMOS-(Complementary Metal-Oxide Semiconductor)-Halbleiterprozess hergestellt werden können. Im Prozess erzeugte optische Nanostrukturen in Metallschichten bewirken eine plasmonisch verursachte spektrale Filterung („On-Chip-Filterfunktion“), so dass zusammen mit darunter liegenden Photodioden ein Sensorelement entsteht. Durch Variation der geometrischen Parameter der Nanostrukturen kann das optische Verhalten verändert und gestaltet werden. Es entstehen so integrierte vielkanalige Sensoren mit spektral unterschiedlichen Sensorelementen in nahezu beliebiger geometrischer Anordnung, die durch sensornahe Verarbeitungseinheiten (Verstärker, ADU usw.) ergänzt werden können. Die Umsetzbarkeit sowohl elektrischer als auch optischer Funktionalität im gleichen Herstellungsprozess und ohne PostProcessing sichert sehr geringe Stückkosten.

Unter anderem in [4] wurden multispektrale plasmonische Sensoren speziell in Hinblick

auf den zukünftigen Einsatz in aktiv geregelten Leuchten betrachtet. Dabei standen zunächst Kriterien für einen zielgerichteten optischen Sensorentwurf und zur Bewertung der sensorischen Information in technologischen Umsetzungen im Mittelpunkt. In [5] wurde am Beispiel eines im Vorhaben FEEDLED (FKZ:16ES0262-16ES0266) prototypisch umgesetzten Sensormoduls dessen grundsätzliche Eignung für Lichtanwendungen diskutiert und nachgewiesen. Derzeit stehen miniaturisierte Sensormodule (siehe Abbildung 1a) zur Verfügung, die bis zu 16 spektrale Kanäle im VIS-NIR inklusive Referenzelementen in Kombination mit sensornaher Verarbeitung und Signalaufbereitung umsetzen. Die Sensorempfindlichkeiten sind breitbandig mit einer für dieses Filterprinzip typischen spektralen Signatur (siehe Abbildung 1b). Im Gegensatz zu konventionellen Filtertechnologien sind diese jedoch zeitlich, zum Beispiel gegenüber thermischen Einflüssen, außerordentlich stabil.

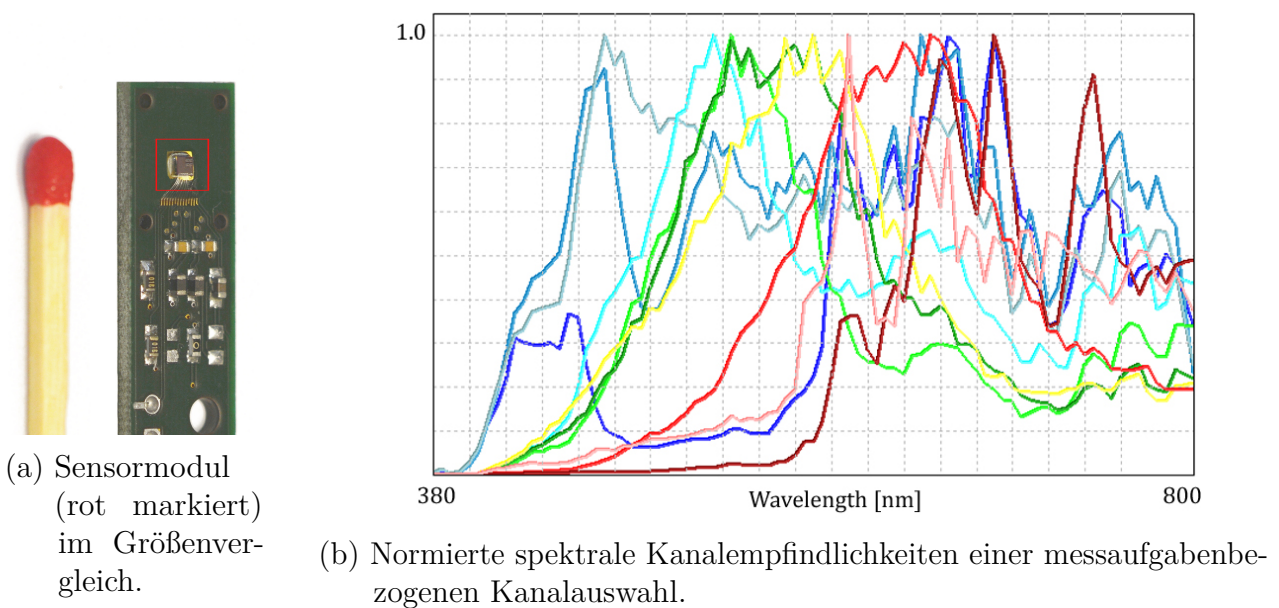


Abbildung 1: Im Vorhaben FEEDLED (FKZ:16ES0262-16ES0266) prototypisch umgesetzter plasmonischer Sensor / Sensormodul.

2.2 Spektralnahe Messungen mit Mehrbereichs-Sensoren

Die formale Aufgabe der Sensorsignalverarbeitung für den Einsatz im Leuchtenfeedbacksystem ist die Überführung der mehrkanaligen Sensorantwort in den Raum der benötigten applikationsbezogenen Zielgröße (colorimetrischer Kennwert, Spektrumschätzung oder Steuersignale zum Beispiel für eine Lichtsynthese). Dabei gehen wir grundsätzlich von folgendem linearen Signalentstehungsmodell aus.

Die allgemein r -kanalige Antwort des Sensorelementes $\underline{R} = (r_1, \dots, r_r)^T \in \mathbb{R}^{r \times 1}$ auf einen hinreichend fein diskretisierten spektralen Reiz $\underline{S} = (s_1, \dots, s_a)^T \in \mathbb{R}^{a \times 1}$ ist algebraisch kompakt beschreibbar durch

$$\mathbb{R}^a \rightarrow \mathbb{R}^r : \quad \underline{R} = \underline{G} \cdot \underline{S} + \underline{N} . \quad (1)$$

Hierbei ist $\underline{G} \in \mathbb{R}^{r \times a}$ die „Geräte“matrix, welche die r wirksamen spektralen Empfindlichkeiten des Sensors inklusive aller weiteren, zwischen Reizquelle und den Sen-

sorelementen wirksamen spektral selektiven Einflüsse beinhaltet. $\underline{N} \in \mathbb{R}^{r \times 1}$ ist die Messunsicherheit im Raum der Sensorantworten. Im Weiteren gehen wir zunächst davon aus, dass die Realisierungen der Messunsicherheit $\underline{N} = (n_1 \equiv N(0, \sigma_1(r_1)), \dots, n_r)$ zu jedem Messzeitpunkt jeweils kanalbezogenen Zufallsprozessen unterliegen, über die nur bekannt ist, dass diese mittelwertfrei, zeitlich dekorreliert und nahezu normalverteilt sind.

Alle bekannten Messprinzipien zur Farbreizcharakterisierung (Dreibereich-, Mehrbereich- oder Spektralansatz) unterscheiden sich in dieser Betrachtung nur im Aufbau der Gerätematrix \underline{G} und den daraus resultierenden algebraischen Eigenschaften (Rang, Kondition, Freiheitsgrade $f \leq r$ der Reizbeschreibung). Über die Analyse des Ausdrucks $\underline{G}^T \cdot \underline{G}$ ist in gleicher Weise, wie mit der in [4] diskutierten Konditionszahl einer Gerätematrix, eine quantitative Einschätzung der vorliegenden Sensorkonfiguration aus Sicht der Konditionierung und Stabilität sowie deren zielgerichtete Gestaltung möglich.

An dieser Stelle soll die für multispektrale Systeme bzw. den Mehrbereichsansatz typische Relation $3 < r \ll a$ gelten. Der damit verbundene Informationsverlust auf maximal r reizbeschreibende Freiheitsgrade bei der Abbildung in den Sensorraum, der gegenständlich im Phänomen der Beobachtermetamerie deutlich wird, schränkt die Anwendbarkeit des Messprinzips ein. Wenn die Unterscheidbarkeit charakteristischer spektraler Signaturen einer Messaufgabe im Raum der Sensorantworten sicher gestellt werden kann, sind die Voraussetzungen für die Ermittlung spektraler Zielgrößen mit Einschränkungen gegeben. Der tatsächlich realisierte Freiheitsgradumfang f , der von einer Sensorkonfiguration bereit gestellt wird, ist bei Mehrbereichssystemen infolge der oft angestrebten energetisch vorteilhaften starken spektralen Überlappung der Kanalempfindlichkeiten (siehe Abbildung 1b) oft kleiner als die Kanalzahl und stets reizabhängig. Die damit verbundenen Fragen zu grundsätzlichen Anforderungen an spektrale Mehrbereichssensorkonfigurationen und Konsequenzen für den Entwurf und die Umsetzung optischer Funktionen wurden im Kontext der Leuchtenüberwachung unter anderem in [4] [5] erörtert.

Die Filterfunktionen multispektraler Sensoren ermöglichen sowohl von der Anzahl als auch vom Charakter der spektralen Kanalempfindlichkeiten her keine echten spektralen Messungen. Erst über zusätzliche Annahmen und zusätzliches stabilisierendes Randwissen lassen sich aus den Messwerten brauchbare, konsistente Approximationen eines erfassten Spektrums schätzen. Die Approximation besteht normalerweise darin, ausgehend von den Sensormesswerten \underline{R} eines Reizes \underline{S} auf ein mögliches Spektrum $\tilde{\underline{S}}$ zu schließen, so dass Konsistenz zur Beobachtung (Messung) und weiterer, mehr oder weniger restriktiver, „bekannter“ Eigenschaften der Schätzgröße besteht.

Die gesuchte lineare Abbildung $\underline{G}^{-1} \in \mathbb{R}^{a \times r}$ als Umkehrung von Gleichung (1) ist mehrdeutig und streng genommen nicht existent. Dies folgt aus dem Dimensionssatz der linearen Algebra. Damit gehört die spektrale Schätzung zur Klasse der schlecht bestimmten, inversen Probleme mit allen Konsequenzen dieser Problemklasse. Eine Umkehrung ist in diesem Fall nur möglich, wenn sich die a -dimensionale Beschreibung von \underline{S} auf höchstens $f \leq r$ Freiheitsgrade (bestimmende Größen) einschränken lässt. Die nicht durch Messung bestimmbar Freiheitsgrade ($a - f$) müssen durch Herstellung und Nutzung innerer Zusammenhänge im Zielraum, zum Beispiel f targetbezogene

Modellfunktionen (siehe Abbildung 3), geeignet fixiert werden.

Die Art und Weise dieses als Regularisierung bezeichneten Vorgangs unterscheidet die bekannten Methoden zur spektralen Schätzung aus geringer aufgelösten, multispektralen Messungen. Diese umfassen direkte Umkehrungen über regularisierte Pseudoinverse² oder messaufgabenbezogen oder empirisch abgeleiteten Basisfunktionen und entsprechenden Schätzverfahren³. Die konkrete Verfahrensauswahl richtet sich grundsätzlich nach dem gewählten Modellansatz zur Beschreibung der Datenentstehung (ebenfalls meist empirisch), der bestehenden sensorprinzipbedingten Informationslücke ($a - f$) und der mit der Messaufgabe verbundenen a priori-Information.

Im vorliegenden Fall sind neben den multispektralen Sensorantworten einer bestimmten spektralen Sensorkonfiguration, die zur Lichtsynthese verwendeten Lichter (siehe zum Beispiel in Abbildung 2 Lichter einer 7-kanaligen spektralen Lichtsynthese) eine den Lösungsraum für messursächliche spektrale Reize vergleichsweise stark einschränkende und damit stabilisierende Informationsquelle. Daraus sollen weitestgehend unabhängig von dem konkreten Sensor unter Berücksichtigung des zur Verfügung stehenden Messaufgabenrandwissens konsistente Reizschätzungen erfolgen können.

Zur spektralen Schätzung wird im konkreten Fall das Prinzip der regularisierten Pseudoinversen favorisiert. Es ist leicht an wechselnde Sensorkonfigurationen und Messaufgaben anpassbar, je nach erforderlicher Güte zum Beispiel durch Messproblempartitionierung skalierbar und mit Blick auf die potentiellen Zielsysteme einer Leuchtenanwendung ressourceneffizient umsetzbar. Die Ableitung der geeigneten Pseudoinversen ist hier der eigentliche Gegenstand des Schätzverfahrens im Rahmen der spektralen Sensorkalibrierung.

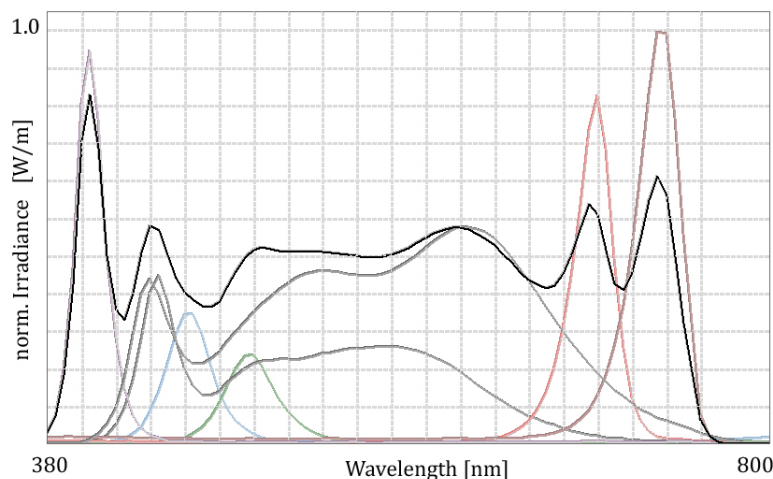


Abbildung 2: Hybride spektrale Tageslichtsynthese (Tageslicht D65-schwarze Kurve) aus 7 mit einem evolutionären Auswahlverfahren nach [1] bestimmten LED-Lichtern.

Zur Konstruktion linearer Umkehrungen der Gerätematrix \underline{G} existieren in der Literatur verschiedene Verfahren mit grundsätzlich ähnlichem Kern. Maximum Likelihood-

²global, lineare Wiener-Inverse bis allgemein lokal, nicht linear regularisierte Inverse aus indirekten MAP-Schätzungen

³PCA-/SVD-Ansatz, Kernel-Regression aus Primärdaten-Hyperräumen [6]

Schätzer versuchen die Ableitung von $\underline{\underline{G}}_{\text{ML}}^{-1}$ indirekt, in gut bestimmter Vorwärtsrichtung $\mathbb{R}^a \rightarrow \mathbb{R}^r$, wobei in der Regel ein lineares Signalmodell, wie Gleichung (1), zugrunde gelegt wird. Das Ziel ist eine Inverse $\underline{\underline{G}}_{\text{ML}}^{-1}$, die zunächst für beliebige Messungen \underline{R} spektraler Reize stets zu Schätzungen $\underline{\hat{S}}$ mit normminimalem Fehler im Zielraum $\|\underline{\hat{S}}(\underline{R}) - \underline{S}\|_2$ führt. Das Optimierungsziel dieses Ansatzes, der mit Ausnahme der Eigenschaften des Sensors unregularisiert ist, ist gleichbedeutend mit der Forderung $\underline{\underline{G}}_{\text{ML}}^{-1} \cdot \underline{\underline{G}} \equiv \underline{\underline{I}}$ (=Einheitsmatrix).

Vereinfacht man das Signalmodell durch Annahme einer nicht mehr kanalbezogenen Messunsicherheit, so führt die ML-Schätzung auf die sogenannte Moore-Penrose- oder Least-Square-Inverse $\underline{\underline{G}}_{\text{LS}}^{-1}$, die formal auch algebraisch aus $\underline{\underline{G}}_{\text{LS}}^{-1} = (\underline{\underline{G}}^T \cdot \underline{\underline{G}})^{-1} \cdot \underline{\underline{G}}^T$ gewonnen werden kann. Hierbei ist zu bemerken, dass diese Form der Invertierung im vorliegenden Fall wegen $r < a$ aufgrund der Singularität des Matrixproduktes $\underline{\underline{G}}^T \cdot \underline{\underline{G}}$ infolge $\text{rang}(\underline{\underline{G}}^T \cdot \underline{\underline{G}}) < a$ nicht umsetzbar ist.

Durch Einschränkung der Gültigkeit der Inversen auf einen bestimmten Umfang von Spektren $\underline{\underline{K}} \in \mathbb{R}^{a \times l}$ mit $l \geq r$ kann das Singularitätsproblem behandelt werden. Der resultierende algebraische Ausdruck $\underline{\underline{G}}_{\text{Target/LS}}^{-1} = \underline{\underline{K}} \cdot (\underline{\underline{G}} \cdot \underline{\underline{K}})^T \cdot (\underline{\underline{G}} \cdot \underline{\underline{K}} \cdot \underline{\underline{K}}^T \cdot \underline{\underline{G}}^T)^{-1}$, der eine normminimale Lösung nur für $\underline{\underline{K}}$ -ähnliche spektrale Signaturen \underline{S}_k gewährleistet, ist trotz regulären Charakters aller Matrixausdrücke in den meisten praktischen Fällen wegen spektraler Instabilität der damit erzielten Reizschätzungen nicht verwendbar.

In [7] wurde ein Verfahren zur iterativen Ableitung einer messaufgabenbezogenen regularisierten MAP-Inversen $\underline{\underline{G}}_{\text{Target/MAP}}^{-1}$ vorgestellt und erfolgreich zur Schätzung von Remissionsspektren aus Messungen mit einem 6-kanaligen Multispektralsensor angewendet. Die Verrechnungsvorschrift $\underline{\underline{G}}_{\text{Target/MAP}}^{-1}$ wird hier im Rahmen einer MAP-Schätzung für Messaufgabenklassen ermittelt. Dabei werden zusätzliche Randbedingungen sowohl bezüglich der Inversen als auch bezüglich des zu rekonstruierenden Contents, zum Beispiel Norm, Non-Negativity [8], Stetigkeit [9] genutzt, um konsistente spektrale Schätzungen mit erwarteten Lösungseigenschaften auch bei schwieriger Datengrundlage sicher zu stellen.

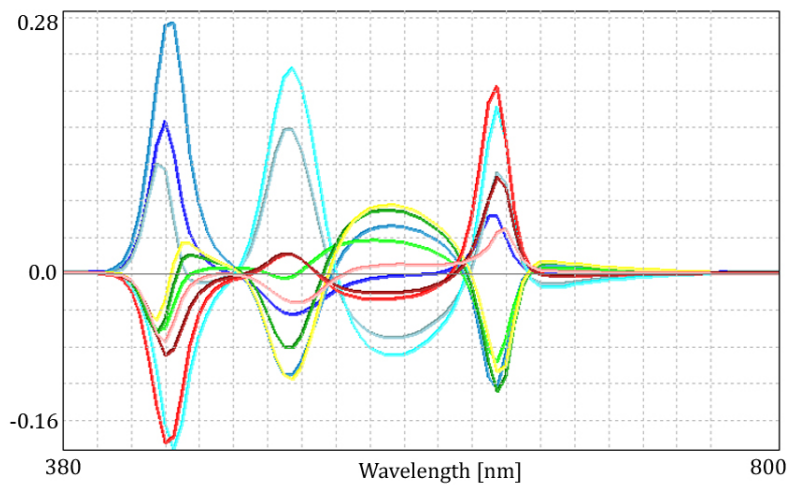


Abbildung 3: Messaufgabenbezogene MAP-Inverse $\underline{\underline{G}}_{\text{4KanalLED/MAP}}^{-1}$ für spektrale Schätzungen von Lichtreizen einer 4-kanaligen LED-Lichtsynthese mit der Sensorkonfiguration aus Abbildung 1b.

Obgleich die resultierenden Funktionale zur Ableitung der Verrechnungsvorschrift $\underline{G}_{\text{Target/Map}}^{-1}$ hier nichtlinear sind und damit einer iterativen Lösungsannäherung bedürfen, liegt im Ergebnis (siehe Abbildung 3) eine im algebraischen Sinne verwendbare Inverse für die Erzeugung intensitätsproportionaler Schätzungen spektraler Reize aus Sensorantworten mit

$$\mathbb{R}^r \rightarrow \mathbb{R}^a : \quad \tilde{S} \propto \underline{G}_{\text{4KanalLED/Map}}^{-1} \cdot \underline{R} \quad (2)$$

vor. Diese Form erlaubt die schnelle Realisierung von spektralen Schätzungen selbst auf ressourcenbeschränkten, in Leuchten verbaubaren Controller-Plattformen.

3 Mehrkanalregler für den Einsatz im Leuchtenfeedbacksystem

3.1 Ableiten von Regelgrößen aus spektralen Reizschätzungen

Im Gegensatz zu bekannten Ansätzen einer sensorischen Regelung von Mehrkanal-LED-Anordnungen, die meist colorimetrische Primärdaten oder Leuchtenkennwerte (Farborte, Weißpunkte) verwenden [10], werden hier die Größen durchgängig auf einer spektralen, bzw. maximal sensorisch-metameren Ebene abgeleitet. Die Grundlage bildet die spektrale Schätzung des durch die Leuchte zu jedem Zeitpunkt im Arbeitsraum erzeugten Lichtes. Abweichungen zu spektralen Vorgaben sollen sich in entsprechenden Regelgrößen widerspiegeln⁴.

Der Vorteil dieser Herangehensweise liegt in der Skalierbarkeit des zu regelnden LED-Umfangs, der nur durch die Menge der aus der Messaufgabe resultierenden unabhängigen Sensorkanäle f beschränkt wird. Dagegen ist bei der reinen Farbortterfassung oder -regelung, die Menge der einsetzbaren LED-Lichter, bei bekannter oder fester Strahlstärke, ohne weitere Nebenbedingungen auf drei begrenzt.

Um aus einer spektralen Schätzung die zugrundeliegenden Ansteuerwerte der einzelnen LED, beziehungsweise die Größen für die Regelung ableiten zu können, ist es zunächst notwendig, die lichterzeugenden Elemente des Leuchtensystems spektral zu charakterisieren. An dieser Stelle soll davon ausgegangen werden, dass zwischen den LED-Ansteuerwerten und dem erzeugten Strahlungsfluss stets eine lineare Beziehung besteht und unterschiedliche Ansteuerungen sich nur gering in spektralen Drifts widerspiegeln. Derartige Bedingungen werden sehr gut bei PWM-betriebenen LED-Leuchtmitteln realisiert. Auch für den analogen stromgesteuerten Betrieb der LED-Lichter sind diese Verhältnisse um vordefinierte Arbeitspunkte, wo die Strom-Strahlungsfluss-Charakteristik annähernd linear ist, gut umsetzbar.

Für die weiterführenden Betrachtungen zur Erzeugung der Regelgrößen ist es unter diesen Voraussetzungen sinnvoll, die erfassten Spektren der LED in Matrixschreibweise zusammenzufassen. Eine Lichtsynthese aus $p \leq f$ Lichtern kann so linear wie folgt beschrieben werden.

$$\underline{S}_{\text{LEDs}} = \underline{L} \cdot \underline{A} \quad (3)$$

⁴Zum Beispiel zur Absicherung des farblichen Erscheinungsbildes von beleuchteten Objekten.

Hierbei sind $\underline{L} \in \mathbb{R}^{a \times p}$ die in einer Matrix zusammengeführten Spektren der Lichter, $\underline{A} \in \mathbb{R}^{p \times 1}$ die Ansteuerwerte, die zu intensitätsproportionalen Strahlungsflussdichtebeiträgen zum resultierenden Spektrum der mehrkanaligen Lichtsynthese $\underline{S}_{\text{LEDs}} \in \mathbb{R}^{a \times 1}$ führen. Diese Darstellung erlaubt die Herstellung einer einfachen algebraischen Beziehung zur Ermittlung von Ansteuerungswerten aus spektralen Größen. Da in diesem Zusammenhang meist $\text{rang}(\underline{L}) = p$ gilt, kann hier das Prinzip der Pseudoinversen, ergänzt um weitere Plausibilitätskontrollen, genutzt werden. Mit einer geeignet ermittelten Inversen \underline{L}^{-1} lassen sich gesuchte Ansteuerwerte oder Ansteuerwertänderungen gemäß

$$\tilde{\underline{A}} = \underline{L}^{-1} \cdot \underline{S} \text{ bzw. } \Delta \tilde{\underline{A}} = \underline{L}^{-1} \cdot \Delta \underline{S} \quad (4)$$

ableiten. Im Zusammenhang mit der hier vorliegenden Regelungsaufgabe können daraus sowohl Führungsgrößen bestimmt als auch Transkodierungen von festgestellten spektralen Abweichungen in Ansteuerwerte vorgenommen werden.

3.2 Mehrkanaliger Regelansatz

Für den Regelungsansatz, gibt es zahlreiche bekannte Umsetzungsmöglichkeiten mit unterschiedlicher Güte für verschiedene Einsatzgebiete, die auf den Anwendungsfall einer LED-Regelung angepasst werden können.

Die einfachste Variante stellt in diesem Zusammenhang ein Proportional-(P)-Regler dar, der die gesuchten Ansteuergrößen lediglich auf Basis der aktuellen spektralen Abweichung, also der Differenz zwischen gemessenen Ist- und vorgegebenen Soll-Spektrum, entsprechend transkodiert in den Ansteuer Raum mit einem Skalierungsfaktor errechnet. Unter Verwendung des P-Reglers lassen sich auch im eingeregelter Zustand teilweise erhebliche Restabweichungen zu spektralen Vorgaben feststellen, da hierbei keine schrittweise Annäherung an die Führungsgröße stattfindet. Dieser Ansatz ist für einen mehrkanaligen spektralen Regler als Bestandteil eines Leuchtenfeedbacksystems aber auch ungeeignet, weil der zeitliche Charakter der Regelgrößen (zum Beispiel durch allmähliche Intensitätsdrifts) diesem Reglerverhalten nicht entspricht. Um dieser Eigenschaft entgegen zu wirken, kann der Regler um weitere, zeitlich wirksame Komponenten erweitert werden. Dabei ist im Kontext der Eigenschaften der zur Regelung verwendeten Stellgröße (aus der sensorischen Erfassung) auf eine angemessene Parametrierung zu achten, da ungünstige Konfigurationen die Regelung in einen instabilen Zustand versetzen können.

Die bei guter Lichterauswahl (siehe Beispiel in Abbildung 2) geringen Querabhängigkeiten zwischen den energetischen Beiträgen der LED im gemischten (geregelten) Lichtreiz erlauben einen Mehrkanal-Regleransatz, in dem jedem LED-Kanal ein eigenständiger, individuell parametrierbarer Regelkreis zugeordnet wird. Noch vorhandene Abhängigkeiten zwischen den Komponenten der mehrkanaligen Regelgröße können in diesem Fall als kanalbezogene Störgrößen angesehen und in diesem Rahmen durch den jeweiligen Regler teilweise kompensiert werden. Eigene Untersuchungen zu alternativen Verfahren der Regelkreisentkopplung haben gezeigt, dass diese Vorgehensweise begründet ist.

4 Anwendungsevaluierung

4.1 Messaufbau

Zur praktischen Evaluierung der entwickelten Verfahren wurde ein Demonstrator umgesetzt, dessen Komponenten die Evaluierung des gesamten Leuchtenfeedbacksystems, bestehend aus sensorischer spektralnaher Überwachung und Regelung, erlauben. Der grundlegende Aufbau des Demonstrators ist in Abbildung 4 dargestellt.

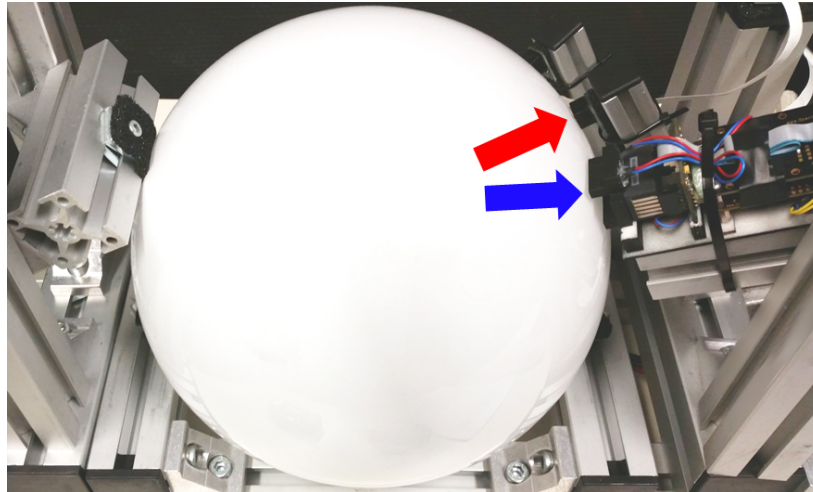


Abbildung 4: Messaufbau bestehend aus Diffusor, Leuchtenmodul zur Lichterzeugung sowie plasmonischem Sensor (roter Pfeil) und Spektrometer (blauer Pfeil) zur Lichtmessung.

In der Mitte des Aufbaus befindet sich eine weiße Kuppel, die als Diffusor für von unten eingekoppeltes Licht wirkt und dieses möglichst homogen auf ihrer Oberfläche verteilt. Zur Lichterzeugung werden Leuchtenmodule verwendet, die aus verschiedenen Leuchtdioden bestehen und das Erzeugen von unterschiedlichen, anwendungsspezifischen Lichtszenarien ermöglichen. Die räumlich enge Anordnung der LED⁵ sichert ähnliche Mischungsverhältnisse auf einem großen Teil der Kugeloberfläche. Die zur Untersuchung verwendeten Leuchtenmodule umfassen einerseits LED-Zusammenstellungen, die zur Approximation von Tageslichtern über ein entwickeltes Optimierungsverfahren des ZBS e.V. ermittelt wurden und andererseits kommerziell verfügbare LED-Zusammenstellungen, die beispielsweise in Bühnenscheinwerfern oder in Leuchten für medizinische Anwendungen verbaut werden. Die Berechnung und Generation der Steuersignale für das Leuchtenmodul und die im vorherigen Abschnitt ausgeführten Mess- und Regelungsalgorithmen sind so umgesetzt, dass diese auf kostengünstigen SoC-Einheiten portierbar und lauffähig sind. Damit die erzeugten Steuersignale in analoge Ansteuerungen umgewandelt werden können, ist zusätzlich ein Controller-Baustein notwendig.

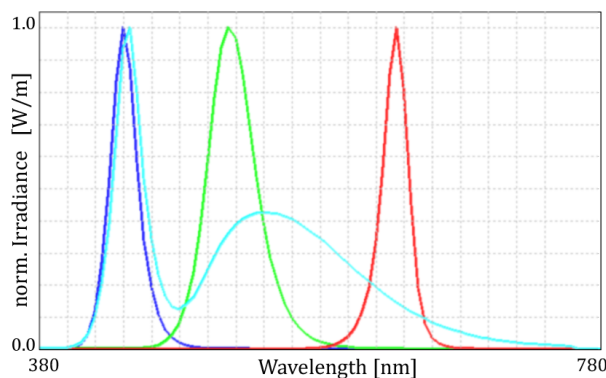
Zur Erfassung der auf der Oberfläche der Kuppel erzielten Lichtmischung, wird ein multispektral-messendes Sensorelement mit den unter Abschnitt 2.2 ausgeführten

⁵Punktstrahlermodell

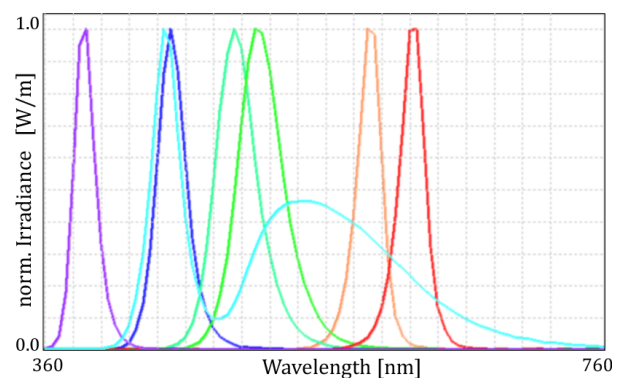
Eigenschaften verwendet. Um die geregelten Lichtmischungen in metrischen Bezug zu spektralen Vorgaben (Ground Truth) zu bringen, wurde für die Evaluierungsphase zusätzlich ein Spektrometer in den Demonstrator integriert.

4.2 Evaluierung der spektralen Schätz- und Regelungsalgorithmen anhand eines ausgewählten Lichtszenarios

Im Rahmen der Evaluierung soll die spektrale Mess- und Regelungsfähigkeit für Lichtmischungen, hier erzeugt durch ein Vierkanal (RGBW) LED-Modul (Osram Ostar Stage) nachgewiesen werden. Das eingesetzte Lichtmodul besitzt sowohl Leuchtdioden mit monochromatischem Charakter (RGB), als auch eine LED, die mit Hilfe von Konverterleuchtstoff weißes Licht erzeugt (W). Die gemessenen spektralen Beschreibungen der Komponenten der mehrkanaligen Lichterzeugung in diesem Modul sind in Abbildung 5a visualisiert.



(a) Spektrale Beschreibung der Leuchtdioden des hier getesteten Lichtszenarios mit „Osram Ostar Stage“ (RGBW).



(b) Leuchtdioden des Moduls „LuxiGen LZ7-04MU00“ (RGBW-Amber-Cyan-Violet) für Folgeuntersuchungen.

Abbildung 5: Spektrale Beschreibungen zweier hybrider LED-Module

Die zur Evaluierung der Regelung dargestellten Tests mit dem Modul 5a sollen die Fähigkeit zum Ausgleich von alters- oder temperaturbedingten LED-spezifischen Intensitätsdrifts nachweisen. Die gewählten Lichtzusammensetzungen sind exemplarisch für in der Dermatologie eingesetzte Leuchten. Hier sichert eine funktionierende Driftkompensation die zeitliche Stabilität der spektralen Zusammensetzung sowohl nach jedem Einschaltvorgang, als auch über längere Zeiträume hinweg. Ein Funktionsnachweis wird unter Einsatz der oben beschriebenen Leuchte anhand zweier Testläufe durchgeführt, in denen Fremdlicht, dessen spektrale Charakteristik den im Leuchtenmodul eingesetzten LED-Lichtern entspricht, zusätzlich in den Arbeitsraum der Leuchte eingespeist wird. Durch das Fremdlicht können Intensitätsdrifts von LED-Lichtern simuliert werden, die sich durch thermische und alterungsbedingte Eigenschaften der Bauelemente nur allmählich bemerkbar machen würden.

Im Rahmen der Tests wird nachfolgende Schrittfolge sowohl für eine Störung (Drift) im Bereich der roten LED (Testlauf 1, Abbildung 6) als auch für den gleichzeitigen Drift im Bereich der roten und grünen Leuchtdiode (Testlauf 2, Abbildung 7) durchgeführt.

1. Erfassen der spektralen und colorimetrischen Charakterisierungen des eingeregulierten Zustandes
2. Nach 20 Schritten: Einspeisen von Fremdlicht zur Simulation von Driftverhalten (positiver Drift) und Erfassen der daraus resultierenden Einflüsse auf die Qualitätsmaße
3. Nach 39 Schritten: Erfassen der Qualitätsmaße im eingeregulierten Zustand unter Drifteinfluss
4. Nach 40 Schritten: Abschalten der Driftsimulation (\equiv negativer Drift) und Erfassen der daraus resultierenden Einflüsse auf die Qualitätsmaße
5. Nach 70 Schritten: Erfassen der Qualitätsmaße im eingeregulierten Zustand nach abgeschalteter Driftsimulation (Status quo)

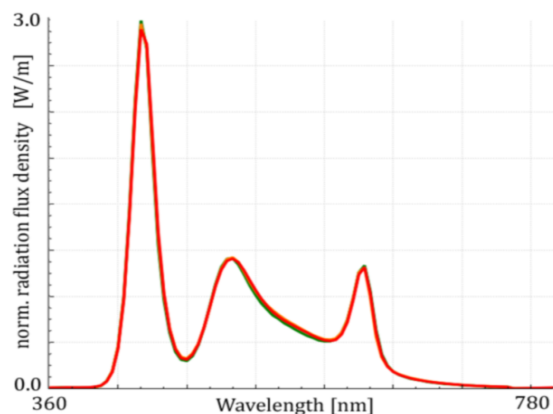
Zur Beschreibung der Güte der Messung und Regelung wird die durch das Spektrometer erfasste Lichtmischung $\underline{s}^{\text{Mischung}}$ als Ground-Truth mit der jeweiligen spektralen Vorgabe des Reglers $\underline{s}^{\text{Vorgabe}}$ verglichen. Für eine aussagekräftige und leicht zu interpretierende Repräsentation der spektralen Abweichungen, wird der mittlere absolute Fehler (MAE) verwendet, welcher die gemittelte Betragsdifferenz der Spektren über alle a Wellenlängenzustellen beschreibt. Dieser berechnet sich gemäß

$$MAE = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a |(s_i^{\text{Mischung}} - s_i^{\text{Vorgabe}})| \quad (5)$$

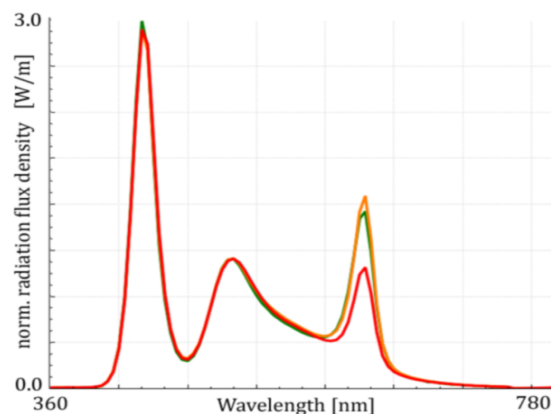
Zusätzlich dazu wird die spektrale Abweichung prozentual in Relation zur „Fläche“ unter der Referenz angegeben. Zur Charakterisierung der spektralen Licht-Objekt-Wechselwirkungen und der resultierenden colorimetrischen Konsequenzen werden die spektralen Unterschiede ergänzend in Form des Farbwiedergabeindex (Color Rendering Index) bewertet. Der Farbwiedergabeindex ist ein wichtiger Gütekennwert von Leuchten. Er bewertet die Farberscheinung *ausgewählter*⁶ Targets unter den vorliegenden Lichtbedingungen, im Vergleich zu einer Referenzlichtquelle. Die Referenz ist in diesem Fall die spektrale Sollvorgabe der Regelung. Zur Berechnung des CRI wurde hier der erweiterte Targetsatz gemäß DIN6169 mit 14 Testfarben genutzt.

In den Abbildungen 6 und 7 ist der zeitliche Ablauf der beiden Testläufe mit den dazugehörigen Messungen und Güte Merkmalen dargestellt. Wie sich feststellen lässt, werden durch die simulierten Drifts spektrale Abweichungen der Leuchtencharakteristik von bis zu 13.95% verursacht, die sich insbesondere in einer Verringerung des Farbwiedergabeindex auf bis zu 75.5 widerspiegeln. Im Kontext dermatologischer Aufgaben schränken die Auswirkungen von spektralen Drifts die Wiedergabeeigenschaften und damit die Einsetzbarkeit derartiger Leuchten zur Diagnose und Dokumentation zeitlich veränderlicher Hautmerkmale stark ein. Durch sensorische Überwachung und Regelung mit den im Abschnitt 3 beschriebenen Ansatz ist es möglich, den spektralen Fehler auf unter 5% beschränken und den CRI-Wert über 96 zu halten. Damit sind

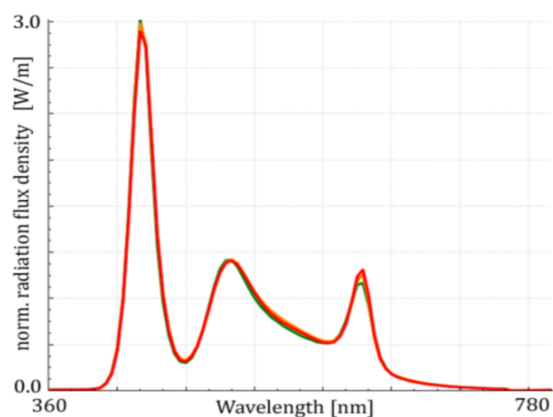
⁶Die CRI-Bewertung ist nur aussagekräftig für die Farbstoffeigenschaften der Targets im ausgewählten Set.



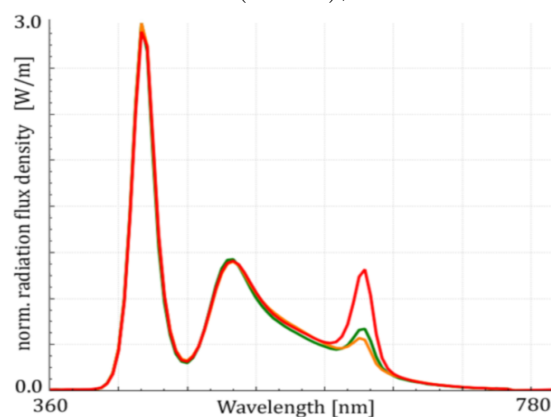
(a) Eingeregelter Zustand
MAE: 0.0168 (3.59%), CRI: 96.386



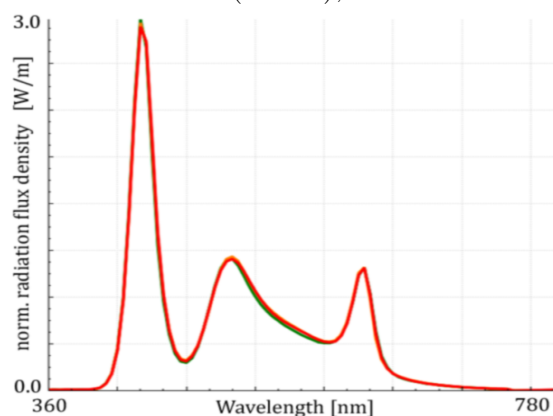
(b) Einspeisen einer Driftsimulation (positiver Drift)
MAE: 0.0441 (9.46%), CRI: 75.586



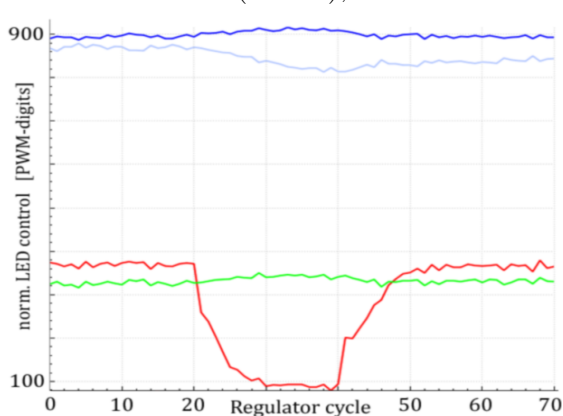
(c) Eingeregelter Zustand unter Drifteinfluss
MAE: 0.0191 (4.09%), CRI: 97.914



(d) Abschalten der Driftsimulation (\equiv negativer Drift)
MAE: 0.0441 (9.45%), CRI: 77.288

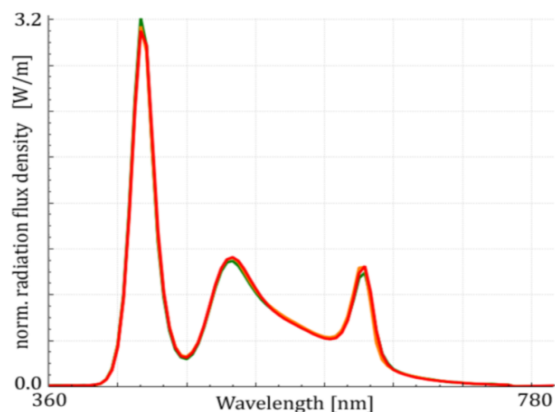


(e) Eingeregelter Zustand nach Abschalten der Driftsimulation
MAE: 0.0159 (3.41%), CRI: 96.854

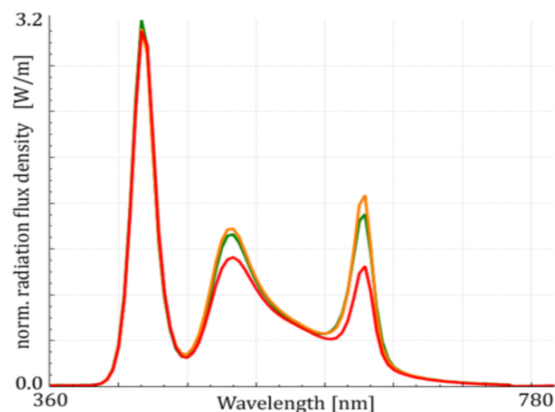


(f) Verlauf der Steuergrößen der LED Rot, Grün, Blau und Weiß

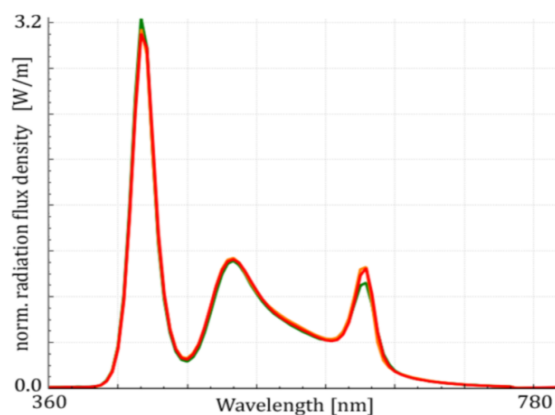
Abbildung 6: Zeitliche und spektrale Bewertung der Stufen des Testfalls 1: Sollvorgabe der Regelung (rot), spektrale Rekonstruktion (orange) und spektrale Messung (Ground Truth, grün)



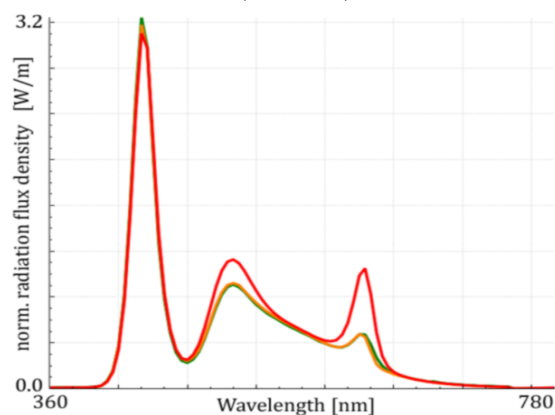
(a) Eingeregelter Zustand
MAE: 0.0162 (3.48%), CRI: 98.906



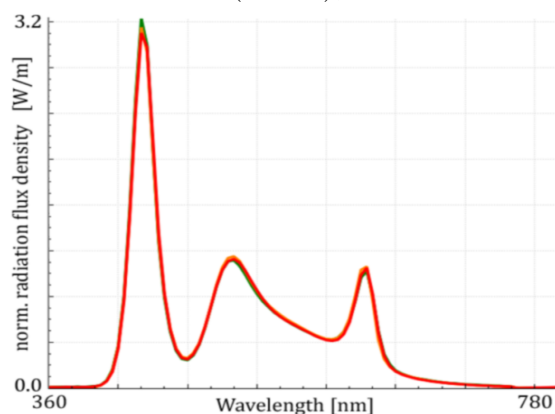
(b) Einspeisen einer Driftsimulation (positiver Drift)
MAE: 0.0567 (12.17%), CRI: 83.513



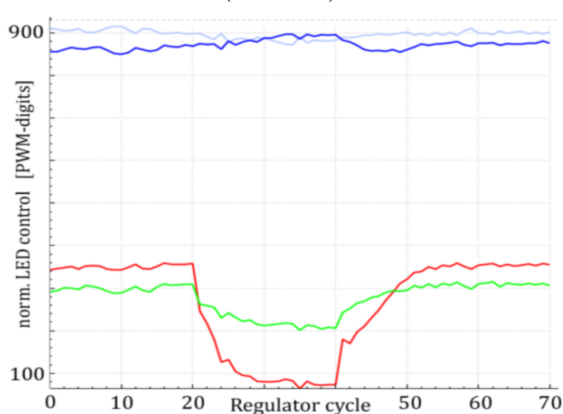
(c) Eingeregelter Zustand unter Drifteinfluss
MAE: 0.0199 (4.27%), CRI: 98.526



(d) Abschalten der Driftsimulation (\equiv negativer Drift)
MAE: 0.065 (13.95%), CRI: 79.696



(e) Eingeregelter Zustand nach Abschalten der Driftsimulation
MAE: 0.0136 (2.92%), CRI: 98.6



(f) Verlauf der Steuergrößen der LED Rot, Grün, Blau und Weiß

Abbildung 7: Zeitliche und spektrale Bewertung der Stufen des Testfalls 2: Sollvorgabe der Regelung (rot), spektrale Rekonstruktion (orange) und spektrale Messung (Ground Truth, grün)

die Voraussetzungen für eine Leuchte mit zeitlich konstanter Lichtzusammensetzung gegeben.

Die spektralen Abweichungen der Lichtmischung von der Regler-Sollvorgabe im eingeregten Zustand, wie sie beispielsweise in Grafik 6c und 7c im Bereich um etwa 640nm verbleiben, sind Folge der Metamerie⁷ des aktuell verwendeten Sensorexemplars. In den vorliegenden Situationen resultieren aus den sensorischen Daten spektrale Schätzungen (siehe orange Kurven), die der Führungsgröße trotz bestehender Abweichungen scheinbar bereits entsprechen. Der hier vorgestellte Regleransatz wäre jedoch in Lage, je nach Charakter der sensorischen Information und damit Güte der resultierenden spektralen Schätzung auch genauere Ergebnisse zu erzielen. In der Bewertung ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass die Messpositionen von Spektrometer und Regler-Sensor im Demonstrator leicht voneinander abweichen.

Mit zunehmender Menge an Lichtern werden genauere Approximationen und Nachbildungen spektraler Lichtszenarien möglich. In der weiteren Arbeit sollen daher die Ergebnisse zur spektralen Schätzung und Regelung marktverfügbarer, höherkanaliger LED-Module (zum Beispiel 7-Kanal-LED-Modul in Abbildung 5b) evaluiert werden. Mit steigender Zahl der die Lichtmischung bestimmenden Komponenten erhöht sich im Fall individueller Drifteigenschaften die Notwendigkeit zur Regelung und gleichzeitig die Ansprüche an die Regelungslösung.

5 Zusammenfassung & Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde ein Feedbacksystem für Leuchten in kostensensitiven, aber anspruchsvollen Anwendungen vorgestellt. Auf der Grundlage der sensorischen Überwachung der durch die Leuchte erzeugten spektralen Lichtsituation mit einem Mehrbereichssensor soll diese entsprechend einer spektralen Vorgabe geregelt und damit eine vorgegebene Lichtzusammensetzung auch über lange Zeiträume konstant gehalten werden. Im Mittelpunkt der Darstellung stand die Diskussion und Konzeption eines mehrkanaligen Regleransatzes für diesen Zweck, der für eine praxisnahe LED-Leuchtenkonfiguration erfolgreich evaluiert wurde. Die Ergebnisse sollen zukünftig Bestandteil von LED-Leuchten mit neuen Gebrauchseigenschaften werden.

Dieser Beitrag dokumentiert Ergebnisse des Verbundprojektes „Feedback-System für intelligente LED-basierte Leuchten“ (FEEDLED, FKZ:16ES0262-16ES0266), das im BMBF-Förderschwerpunkt „Intelligente Beleuchtung“ verankert ist. Im Rahmen des Vorhabens sollen plasmonische Sensorbaugruppen für den Einsatz in Leuchten für die Medizin, den Automotivesektor oder die Nahrungsmittelproduktion qualifiziert werden.



⁷Die begrenzte Fähigkeit spektrale Unterschiede um eine spektrale Signatur im Sensorraum zu erkennen.

Literatur

- [1] Hufeland C., Jahn R., Nestler R. und Franke K.-H. „Methodischer Ansatz einer Normlichtquelle für Farbmesssysteme nach dem Dreibereichsverfahren“. In: *Workshop Farbbildverarbeitung* 13 (2007), S. 3–12.
- [2] Image Engineering GmbH & Co. KG. *LED-basierte Kalibrierlichtquelle CAL1*. <https://www.image-engineering.de/products/equipment/illumination-devices/379-cal1>.
- [3] Khanh T. Q. und Quangd V. Q. „LED-Systeme mit variablen Spektren - Dynamisches Licht, Hohe Farbqualität, Farborteinstellung“. In: *LICHT - Organ der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft / des Normenausschusses Lichttechnik* 1-2 (2015), S. 72–78.
- [4] Nestler R., Jahn R., Franke K.-H., Junger S. und Gäbler D. „Einsatz hyperspektraler Sensoren zur Überwachung intelligenter LED-basierter Lichtquellen“. In: *Workshop Farbbildverarbeitung* 21 (2015), S. 50–64.
- [5] Junger S., Nestler R. und Gäbler D. „Multispektraler CMOS-Sensor und dessen Eignungsbewertung für Lichtenwendungen“. In: *Workshop Farbbildverarbeitung* 22 (2016), S. 9–21.
- [6] Heikinen V. *Kernel methods for estimation and classification of data from spectral imaging*. University of Eastern Finland, 2011. ISBN: 978-952-61-0423-2.
- [7] Nestler R. und Franke K.-H. „Quasispektraler Mehrbereichsmessansatz durch Einsatz eines iterativ regularisierten targetbezogenen Interpolators“. In: *Workshop Farbbildverarbeitung* 12 (2006), S. 33–43. ISSN: 1432-3346.
- [8] Lawson C. L. und Hanson R. J. *Solving Least Squares Problems*. PrenticeHall, 1987.
- [9] Strong D. und Chan T. „Edge-preserving and scale-dependent properties of total variation regularization“. In: *Workshop Farbbildverarbeitung* 6 (2003), S. 165–187.
- [10] Hailer F. und Nimz T. *Optimierung der Absolutgenauigkeit von True Color Farbsensoren zur regelung von n-farbigen LED-Leuchten*. <http://www.mazet.de/de/downloads/produkt-kundeninformationen/white-paper/item/104-optimierung-der-absolutgenauigkeit-von-true-color-farbsensoren-zur-regelung-von-n-farbigen-led-leuchten.html>. 2015.