

Multispektraler CMOS-Sensor und dessen Eignungsbewertung für Lichtanwendungen

Stephan Junger¹, Rico Nestler^{2,3}, Daniel Gäbler⁴

¹Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, Am Wolfsmantel 33, 91058 Erlangen, stephan.junger@iis.fraunhofer.de

²Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung, Werner-von-Siemens-Str. 10, 98693 Ilmenau, rico.nestler@zbs-ilmenau.de

³Technische Universität Ilmenau, FG GDV, Postfach 100 565, D-98684 Ilmenau, rico.nestler@tu-ilmenau.de

⁴X-FAB Semiconductor Foundries AG, Haarbergstr. 67, 99097 Erfurt, daniel.gaebler@xfab.com

Zusammenfassung Spektral einstellbare LED-basierte Beleuchtungssysteme („tunable white“, „tunable spectrum“) müssen trotz Veränderlichkeit der Beiträge der verwendeten LEDs stets eine stabile spektrale Emission aufweisen. Exemplarstreuungen, wie auch Drifteffekte aufgrund von Temperaturabhängigkeit und Alterung können durch eine sensorische Erfassung des emittierten Lichtes und aktiver Regelung der Leuchte kompensiert werden. In diesem Beitrag werden dafür spektral mehrkanalige Sensoren vorgestellt, deren Filterwirkung durch optische Nanostrukturen in Metallschichten erzielt wird. Diese *plasmonische* Filterfunktion kann in etablierter CMOS-Halbleitertechnologie hergestellt werden und ermöglicht kostengünstige Multispektralsensoren mit 8 oder mehr spektral unterschiedlich selektiven Kanälen. Aus der damit verfügbaren sensorischen Information sind neben der genauen Erfassung colorimetrischer Größen von Farbreizen (Farborte, Leuchtdichten) auch Schätzungen der spektralen Zusammensetzung möglich, um z. B. gewünschte spektrale Leuchtencharakteristiken gezielt nachregeln zu können.

1 Einleitung

Leistungs-LEDs sind ideale Bauelemente, um effiziente Beleuchtungssysteme mit neuartigen Eigenschaften zu realisieren. Hochwertige und farblich oder spektral einstellbare Leuchtenlösungen für den breiten Einsatz in verschiedenen Anwendungen und mit

unterschiedlichen Ansprüchen erfordern jedoch die Einhaltung stabiler Verhältnisse primär der realisierten spektralen Lichtzusammensetzung (Farbreiz) als auch daraus ableitbar colorimetrisch (wie z. B. Farbtemperatur). Die Aufgabe wird insbesondere bei Lichtmischungen aus unterschiedlichen LED-Typen, wie in Abbildung 1 dargestellt, erschwert, da die spektralen und integralen Eigenschaften exemplarbezogen individuell sein können. Neben diesen Exemplarstreuungen ist auch das LED-Typspezifische Feld- bzw. das Betriebsverhalten, z. B. der Einfluss von Temperatur und Alterung, eine ganz wesentliche Ursache für subjektive und/oder objektive Veränderungen der Leuchteigenschaften über der Zeit oder von Leuchte zu Leuchte. Letzteres ist insbesondere bei der Verwendung mehrerer gleichartiger Leuchten in einem Raum oder für die Erzeugung bestimmter, nur spektral definierbarer Lichtwirkungen (Leuchten für die Bildverarbeitung oder für biologische Zwecke) problematisch.

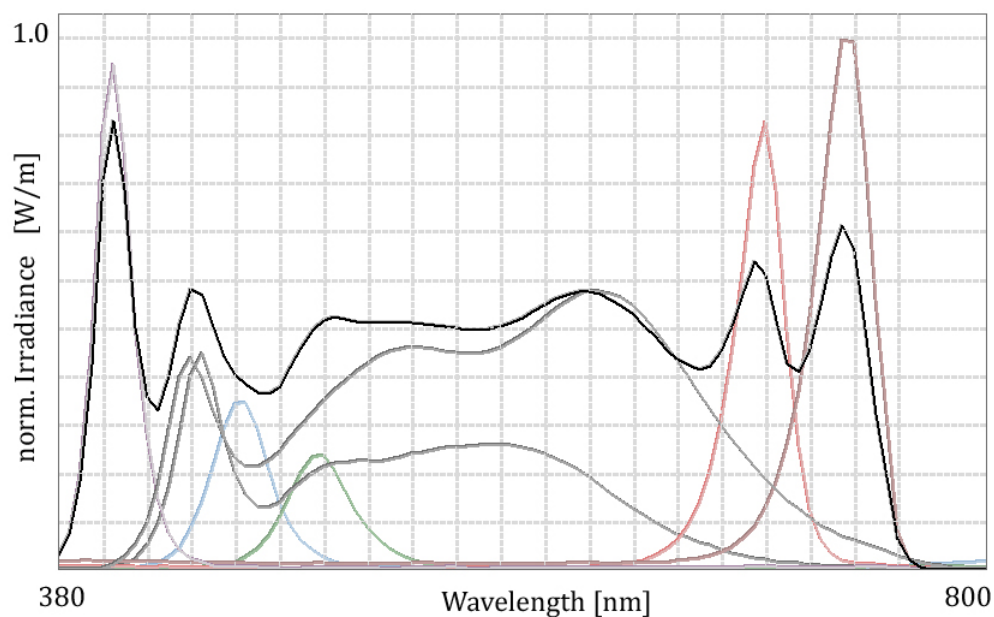


Abbildung 1: Spektrale D65-Tageslichtsynthese (schwarze Kurve) aus z.B. 7 LED-Lichtern.

Die sich auf Helligkeit und die spektrale Lichtzusammensetzung auswirkenden Effekte können durch LED-Auswahl (Binning) und aufwendige Modellierung des Driftverhaltens mit entsprechender Ansteuerung und Stabilisierung zwar reduziert werden, die Erstellung der erforderlichen LED-Modelle erfordert aber eine aufwendige, typspezifische Charakterisierung jeder verwendeten LED bei den verschiedenen Betriebsbedingungen. Die Möglichkeit der kontinuierlichen sensorischen Erfassung und Charakterisierung der durch die Leuchte im Arbeitsraum erzeugten Lichteigenschaften und die aktive Beeinflussung der spektralen Lichtzusammensetzung (Regelung) ermöglicht bessere Ergebnisse bei gleichzeitig einfacherer Leuchtenansteuerung. Damit können ausgehend von der aktuell erzeugten Lichtsituation die gewünschten Verhältnisse nachgeregelt werden. Wenn dabei Multispektral-Sensoren mit mehr als 3 spektralen Kanälen verwendet werden, ist, über die Bestimmung integraler colorimetrischer Eigenschaften der Leuchte hinaus, auch eine spektrale Schätzung der Lichtzusammensetzung möglich,

die wesentlich mehr Information zur Regelung enthält. Die Wichtigkeit der spektralen Betrachtung für die eindeutige Charakterisierung von Leuchteigenschaften, sowie die Konsequenzen für die sensorische Erfassung und die Sensordatenverarbeitung wurden an dieser Stelle bereits im letzten Jahr erörtert [2].

Die Bedeutung spektral oder farblich einstellbarer Beleuchtungssysteme („tunable white“, „tunable spectrum“) am Markt nimmt stetig zu. Aus technologischen Gründen besitzt die spektrale LED-Lichtsynthese durch Mischen, d. h. durch Kombination der energetischen Beiträge verschiedener LED-Typen, in einem Leuchtenmodul eine besonders hohe Relevanz. Um die genannten Vorteile der sensorischen Überwachung und aktiven Regelung in möglichst vielen Beleuchtungsanwendungen zu ermöglichen, sind kostengünstige Sensoren, Verarbeitungs- und Ansteuereinheiten erforderlich. Dieser Beitrag demonstriert in diesem Kontext Multispektral-Sensoren, die in einem erweiterten CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) Halbleiterprozess hergestellt werden. Optische Nanostrukturen in Metallschichten des Prozesses bewirken eine spektrale Filterung („On-Chip-Filterfunktion“), so dass zusammen mit den darunter liegenden Photodioden ein hochintegriertes Sensorelement entsteht, das durch weitere sensornahe Verarbeitungseinheiten ergänzt werden kann. Diese zusätzliche optische Funktionalität erweitert die Möglichkeiten des CMOS-Prozesses im Sinne von „More than Moore“.

2 Technologische Betrachtungen

Am Markt existierende colorimetrische Multispektralsensoren mit 3 Kanälen nutzen zumeist konventionelle Filtertechnologien, z. B. Absorptionsfilter, die auf roten, grünen oder blauen Pigmentfiltern (RGB) ähnlich den bei Bildsensoren verwendeten Bayerfiltern basieren. Alternativ dazu werden auch dielektrische Filter (Interferenzfilter) verwendet, deren spektrale Filtereigenschaften per spezifischem Design definiert werden können, z. B. um die Spektralwertkurven bestimmter standardisierter Farbräume (vorzugsweise Farbdarstellungen, wie CIE-XYZ) möglichst genau nachzubilden. In all diesen Fällen ist eine technologisch aufwendige, nachträgliche Abscheidung der Filter bzw. einer Vielzahl von Filterschichten auf siliziumbasierte Photodioden erforderlich (Postprocessing). Farbsensoren ist zudem gemein, dass die damit realisierten reduzierten Farbreizdarstellungen bzw. Farbräume sensor- oder gerätespezifisch sind und erst nach Korrektur zu mehr oder weniger guten, Farbreiz-mehrdeutigen (metameren) colorimetrischen Kennwerten des gemessenen spektralen Farbreizes verrechnet werden können.

Der Filteransatz mit optischen Nanostrukturen ist dagegen direkt im CMOS-Halbleiterprozess realisierbar und führt zu hochintegrierten Sensorelementen, die sich bei hohen Stückzahlen sehr kostengünstig fertigen lassen. Das physikalische Prinzip der spektralen Filterung beruht auf Resonanzen von Oberflächenplasmonen, weshalb die Filter kurz als *plasmonische* Filter bezeichnet werden. Das Prinzip wurde bereits u. a. in [1] näher vorgestellt. Durch lithographische Prozessierung von Metallschichten entstehen strukturierte Metallfilme, die bei bestimmten Wellenlängen eine hohe, bandpassfilterartige

Transmission aufweisen. Die Resonanzwellenlängen der Filter können bei konstanter Schichtdicke allein durch das Design der lateralen Geometrie der metallischen Nanostrukturen definiert werden, was eine günstige Voraussetzung für eine Fertigung in Halbleiterprozessen darstellt und zudem eine gute Skalierbarkeit für gleichzeitig viele verschiedene spektrale Filter auf einem Chip bietet. Durch Kombination der Filterfunktion mit unterschiedlichen Empfängern und weiteren optisch wirksamen Elementen lassen sich spektral vielkanalige Sensormodule in großer Variantenvielfalt erzeugen.

Die Abbildung 2 zeigt den Prototypen eines integrierten Sensors, der im Rahmen des aktuell laufenden Verbundprojektes „Feedback-System für intelligente LED-basierte Leuchten“ (FEEDLED) umgesetzt wurde. Der gezeigte $2,5 \times 2,5 \text{ mm}^2$ große Chip besteht aus einem 16-kanaligen Photodiodenarray, das mit verschiedenen plasmonischen Filtern versehen ist. Die geometrische Anordnung der den Sensorkanälen zugeordneten optisch sensitiven Flächen der Photodioden kann beliebig komplex gestaltet werden. Jeder Kanal verfügt über einen integrierten Verstärker, der den Anforderungen unterschiedlicher Leuchtenanwendungen Rechnung tragend sowohl als Transimpedanz- als auch als integrierender Ladungsverstärker mit einstellbarer Verstärkung betrieben werden kann. Weitere sensornahe Verarbeitungskomponenten (On-Chip), wie AD-Wandler sowie zukünftig auch Arithmetikeinheiten und Speicher, sollen später die Umsetzung von autarken integrierten Sensormodulen ermöglichen.

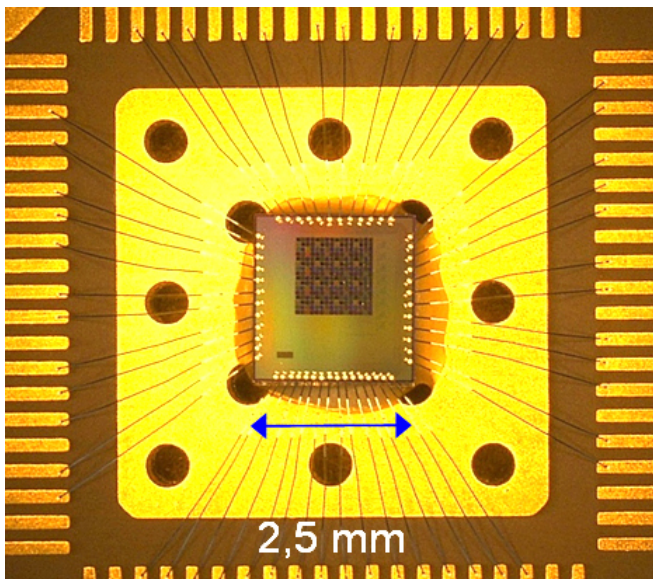


Abbildung 2: „Chip-on-board“-Aufbau eines Prototypen mit 16-kanaligem plasmonischen Multispektralsensor.

auf denselben Farbreiz. Diese im Vergleich zu bekannten Farb- oder Mehrkanalsensoren erheblich umfangreichere, gleichzeitig weniger metamere „Farbreizsignatur“ ist eine wichtige Voraussetzung für die im Weiteren beabsichtigten Verarbeitungsschritte.

Die Sensorkanalkonfiguration des Testmusters wurde für Anwendungen mit Farbreizen

Die Ausgangssignale der 16 Kanäle sind im Prototypen für Testzwecke einzeln und analog zugänglich. Zusätzlich ist ein Multiplexer implementiert, der die Signale aller integrierten spektralen Kanäle zeitlich nacheinander über eine Signalleitung ausgibt. In Abbildung 3 ist das Ergebnis eines Funktionstests, der Messung der Kanalantworten bei Bestrahlung der Sensorfläche mit einer spektral breitbandigen Lichtzusammensetzung dargestellt. Die signalstärkste Kanalantwort (in Abbildung 3 grün markiert) kennzeichnet eine Photodiode ohne plasmonischen Filter, deren Signalwert die Anpassung der Signalverarbeitung an den Dynamikumfang eines konkreten Messszenarios erlaubt. In den Kanalantworten widerspiegelt sich das spezifische Verhalten der Sensorkanäle



Abbildung 3: Erfasste mehrkanalige Sensorsignatur einer Leuchte mit spektral breitbandiger Lichtzusammensetzung aus Kanalantworten des plasmonischen Sensormoduls.

in einem spektralen Wellenlängenbereich von $\lambda = 300 - 900$ nm spezifiziert. Beim Design wurden allgemeine Anforderungen an die spektralen Kanalcharakteristiken (Bandbreite, Überlappung, Unabhängigkeit, Kondition), wie in [2] abgeleitet, berücksichtigt. Ein Schwerpunkt, insbesondere für Anwendungen mit colorimetrischen Zielgrößen, bildet der VIS von $\lambda = 400 - 740$ nm. Zur spektralen Charakterisierung der Kanalempfindlichkeiten wurden Sensorantworten für Spektralreize in diesen Bereichen aufgezeichnet. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis dieser spektralen Charakterisierung der Photodiode mit einem Filter, dessen Transmission subjektiv als grünlich empfunden wird (Grünfilter). Im Vergleich zur Messung (in Abbildung 4, grüne Kurve) ist das zugehörige Simulationsergebnis (in Abbildung 4, schwarze Kurve) dargestellt. Es zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem Messergebnis ist.

Ein weiteres Beispiel für einen Bandpassfilter, in diesem Fall bei 600 nm, ist in Abbildung 5 dargestellt. Die gemessene spektrale Charakteristik (in Abbildung 5, gelbe Kurve) ist hier etwas breiter als in der Simulation (in Abbildung 5, schwarze Kurve). Die Ursachensuche dafür ist aktuell noch nicht abgeschlossen. Festzuhalten ist, dass diese gegenüber den Designvorgaben und den Simulationen veränderte spektrale Gestalt der Kanalcharakteristiken die Verwertungsmöglichkeiten der Sensorinformation für die in Betracht kommenden Anwendungen nicht grundsätzlich einschränkt, sofern diese reproduzierbar sind.

Fasst man die Messungen ausgewählter VIS-Kanäle des Sensorprototypen in einer Darstellung zusammen, so ergeben sich die in Abbildung 6 dargestellten Verhältnisse. Der für colorimetrische Betrachtungen relevante Wellenlängenbereich wird durch die vorliegende Kanalkonfiguration gut abgedeckt. Die Filter weisen eine gute, individuelle spektrale Selektivität mit hinreichenden wechselseitigen Überlappungen auf.

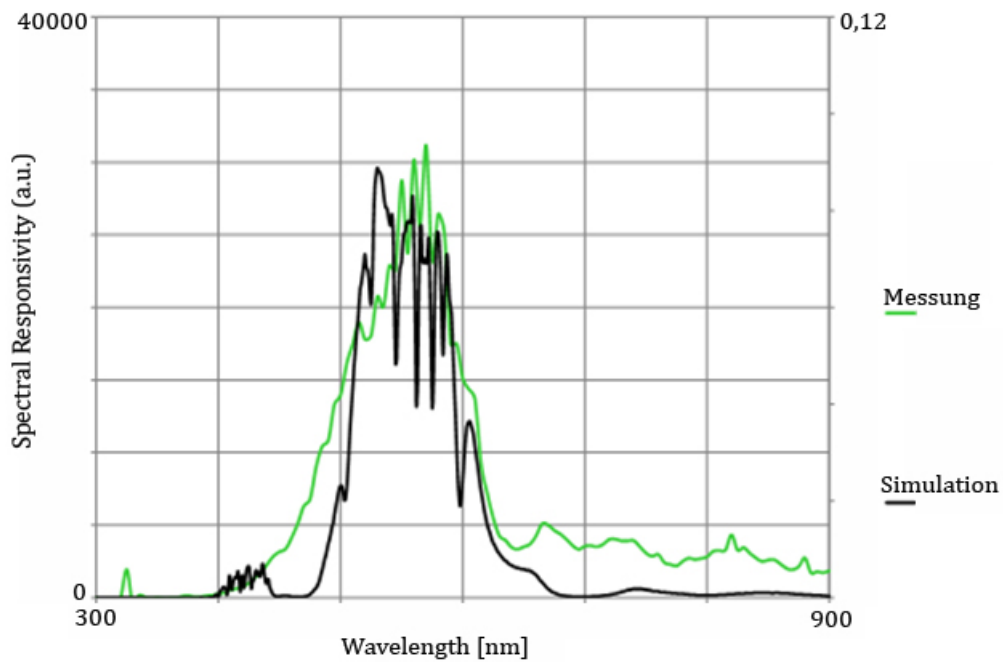


Abbildung 4: Exemplarischer Vergleich zwischen Messung und Simulation der spektralen Empfindlichkeit eines Fotodetektors mit plasmonischem Grünfilter.

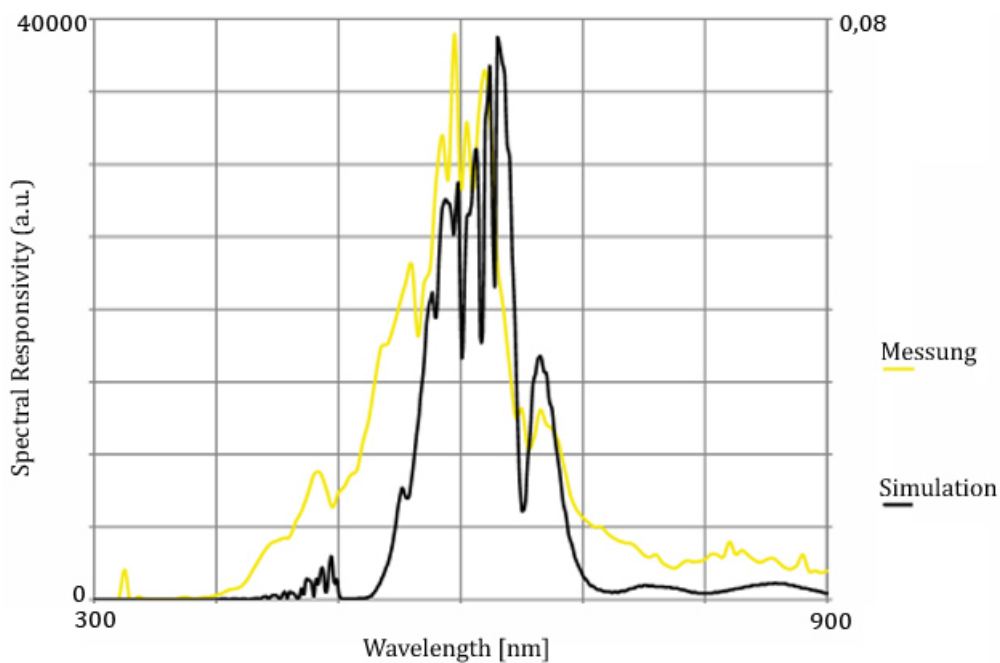


Abbildung 5: Exemplarischer Vergleich zwischen Messung und Simulation der spektralen Empfindlichkeit eines Fotodetektors mit plasmonischem Gelbfilter.

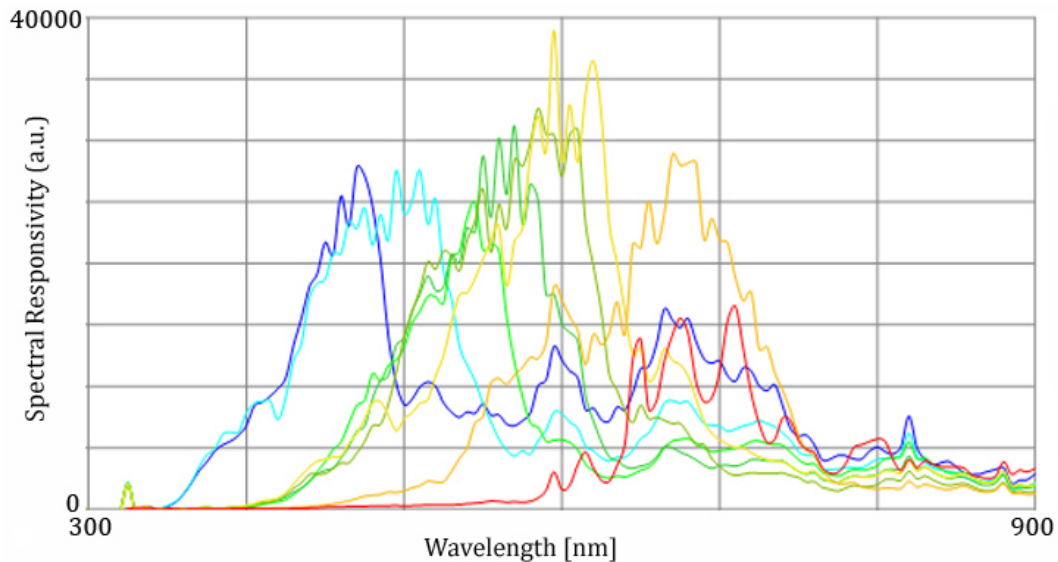


Abbildung 6: Plasmonische spektrale VIS-Sensorkanalkonfiguration aus 8 Kanälen.

3 Bewertung der Sensorkonfiguration für Lichtanwendungen

Gegenstand dieses Abschnittes ist die Bewertung der vorliegenden Sensorkonfiguration aus der Sicht von Messaufgaben in Beleuchtungsanwendungen. Hierbei wird im Besonderen auf die Qualifizierung des Sensormoduls für spektrale Farbreizschätzungen Wert gelegt. Die Grundlage bilden die in [2] diskutierten Aspekte und Schlußfolgerungen für ein geeignetes Sensordesign sowie die dort bereits dargestellten Möglichkeiten zur multikanaligen Sensorsignalverarbeitung. Darüber hinaus soll diskutiert werden, welche leuchtenbeschreibenden Zielgrößen bereits mit dem jetzt erreichten Realisierungsstand umgesetzt werden können.

3.1 Qualifizierung des Sensormoduls für spektrale Schätzungen

Die formale Aufgabe der Sensorsignalverarbeitung ist die Überführung des mehrkanaligen Raums der Sensorantwort in den Raum der jeweiligen Zielgröße (skalärer Kennwert, Spektrum oder Steuersignale für eine Lichtsynthese). Die Relation zwischen den unabhängigen Freiheitsgraden der gemessenen Sensorantwort und den erforderlichen Freiheitsgraden der Zielgrößenbeschreibung legen den Charakter des Problems fest. Im Fall spektraler Schätzungen von Farbreizen, deren Vielfalt einen Zielraum mit einer zum Sensorraum in der Regel erheblich größeren Zahl von Freiheitsgraden benötigt, liegt ein inverses, schlecht gestelltes Problem vor. Derartige Problemstellungen bedürfen neben der Messung selbst einer Berücksichtigung von zusätzlichem einschränkenden a priori-Wissen und -Annahmen, um die Zielgrößen konsistent und robust abzuleiten.

Die Frage der Robustheit und Stabilität ist insbesondere für den Feldeinsatz, d. h. den

Umgang mit inneren und äußeren Abweichungen zum erwarteten Messsystemverhalten und zur erwarteten Messaufgabe, wesentlich. Für die Überwachung von Leuchten und Lichtsynthesen liegt vergleichsweise viel einschränkende Information vor, z. B. über Emissionscharakteristiken der beteiligten Lichter (siehe Abbildung 1), über das Mischprinzip, über globale Gestaltseigenschaften der Farbreizklasse der Anwendung. Es kann daher von günstigen Verhältnissen für die spektrale Schätzung nach dem Prinzip der targetbezogenen regularisierten Pseudoinversen, wie z.B. vorgestellt u. a. in [3], ausgegangen werden. Die wichtigste Voraussetzung für die Umsetzung dieses Ansatzes stellt die Unterscheidbarkeit typischer Farbreize einer Messaufgabenklasse im Raum der Sensorantworten dar. Eine ganz bestimmte spektrale Zusammensetzung der Sensorkanalempfindlichkeiten ist dafür hingegen nicht erforderlich. Diese kann je nach technologischen Möglichkeiten umgesetzt werden. Die Anpassung des Sensors an eine Messaufgabe erfolgt im Rahmen der Verrechnung der Sensordaten und muss nicht bereits beim Sensordesign berücksichtigt werden.

Wie bereits in [2] dargestellt, ziehen die Qualifizierung der spektralen Sensorkonfiguration für Farbreizschätzungen und die Erhöhung der Robustheit der Sensorkonfiguration antagonistische Forderungen für ein optimales Design nach sich. Bewertet man die vorliegende Kanalauswahl aus Abbildung 6 für die Messaufgabenklasse „Farbreizschätzung von VIS- und LED-Lichtern“, so ergibt sich das folgende Bild. Die realisierten Sensorkanalempfindlichkeiten

- sind kanalweise sehr unterschiedlich spektral zusammengesetzt, breitbandig und wechselseitig stark überlappend, führen somit für breitbandige Farbreize und Farbreizveränderungen zur größtmöglichen nutzbaren Zahl sensorischer Freiheitsgrade,
- besitzen zahlreiche kanalweise gegenläufige Flanken in spektralen Bereichen, wo insbesondere LED-Farbreize stark variabel sein können bzw. wo zur spektralen Beschreibung ausreichende sensorische Freiheitsgrade erforderlich sein werden,
- erlauben kein Erkennen von Farbreizänderungen, die nur auf die VIS-Ränder $\lambda < 420$ nm bzw. $\lambda > 720$ nm begrenzt sind (Beobachtermetamerie) und
- führen durch den lokal nicht monotonen Verlauf zu mehrdeutigen Kanalantworten für sehr schmalbandige Farbreize und Farbreizänderungen.

Für die konkrete Messaufgabe insbesondere einschränkend und damit wichtiges Ziel der weiteren technologischen Entwicklung der optischen Filtereigenschaften wird daher die Abdeckung der Randbereiche des VIS sein.

Neben der vorstehenden qualitativen Bewertung kann auch über Maßzahlen, z. B. die referenzfreie Bewertung der insgesamten Kondition der Sensorkonfiguration¹ bzw. die Ausweisung der linear unabhängigen Kanäle bzw. Kanalantworten für ausgewählte Farbreizkonstellationen und Farbreizintervalle, eine objektive Bewertung und Qualifizierung des Sensors erfolgen.

Die referenzfreie Bewertung der Sensorkonfiguration kommt mit einer modifizierten

¹siehe dazu Ausführungen in [2], Abschnitt „Allgemeine Anforderungen an Sensorelemente“

Konditionszahl von $\kappa_2 = 25.1$, $\kappa_2 \geq 1$ zu einem für schlecht-konditionierte, inverse Problemstellungen guten Wert. Er charakterisiert eine Sensorkonfiguration, die hinsichtlich des Durchgriffs von inneren oder äußeren Toleranzen auf die Verrechnungszielgrößen der Sensorantworten robuste Eigenschaften zeigt, bzw. wo diese Wirkungen gut durch eine Abgleichkalibrierung, z. B. zwischen Sensorexemplaren, kompensiert werden können. Der optimale Wert $\kappa_2 = 1$ kennzeichnet einen Sensor, dessen Kanalantworten vollständig unabhängig sind. Aus spektraler Sicht ist dies nur mit nicht überlappenden Kanalempfindlichkeiten realisierbar. Im Fall des Prototypen lassen sich weitere signifikante Verbesserungen der Konditionszahl durch Absenken der Kanalempfindlichkeiten außerhalb der jeweiligen Hauptmoden erzielen. Die technologische Umsetzung dieser Zielstellung ist Gegenstand der laufenden Arbeiten.

Geht man von einem linearen Sensorverhalten aus, bei dem sich eine Kanalantwort aus unabhängigen „Spektralantworten“ auf die einen Farbreiz bestimmenden Spektralreize zusammensetzt, so lässt sich das Verhalten der Sensorkonfiguration auch wellenlängenintervall-spezifisch bewerten. In Abbildung 7 sind exemplarisch für gaußförmige spektrale Farbreizzusammensetzungen mit einer Halbwertsbreite von $\Delta\lambda = 40\text{nm}$ die Zahl der linear unabhängigen Kanalantworten bzw. Kanalempfindlichkeiten (primären sensorischen Freiheitsgrade) der Sensorkonfiguration aus Abbildung 6 dargestellt. Die Ableitung erfolgt durch „targetbezogene“ Konditionsbewertung mittels Singulärwertzerlegung einer „targetbezogenen“ Gerätematrix, die aus der Wechselwirkung der Sensorkanäle mit einem Farbreiz resultiert. Die Singulärwerte der Zerlegung erlauben Rückschlüsse zur linearen Abhängigkeit der spektralen Sensorkonfiguration bzw. der Sensorantworten, zu Metamerien im Fall bestimmter Farbreize und zur Gesamtkonditionszahl κ_2 . Auf dieser Grundlage ist eine optimierte Kanalauswahl für durch bekannte Farbreize bestimmte Messaufgaben möglich.

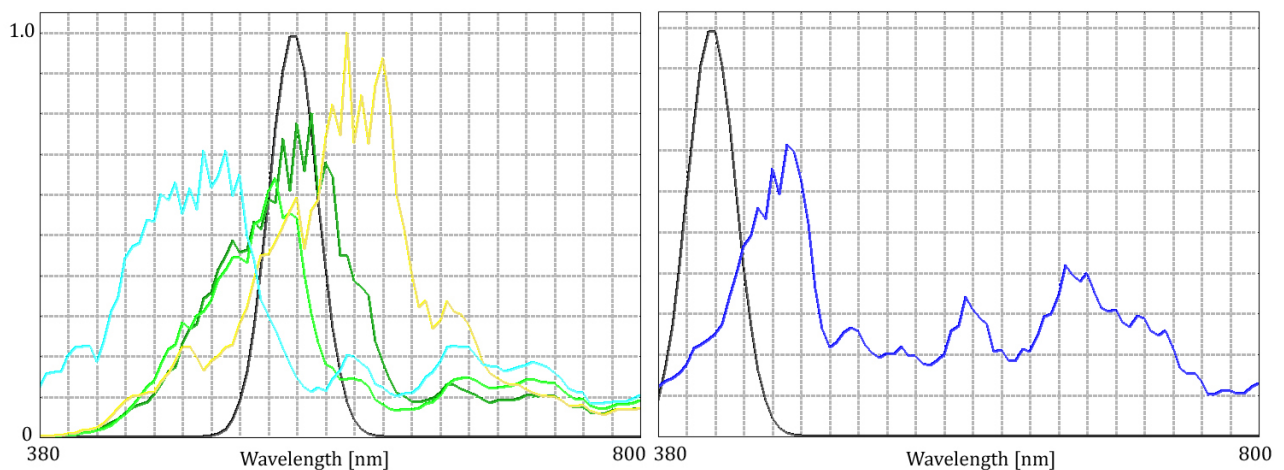


Abbildung 7: Primäre sensorische Freiheitsgrade der Sensorkonfiguration aus Abbildung 6 bei gaußförmigen spektralen Farbreizzusammensetzungen in der VIS-Bandmitte (links) und am kurzwelligen VIS-Rand (rechts).

Die hier ausgewiesenen Verhältnisse entsprechen den zur Beschreibung von Farbreizveränderungen im ausgewerteten Wellenlängenintervall nutzbaren sensorischen Freiheitsgraden. Übereinstimmend zur oben qualitativ bewerteten Situation stehen am

Rand nur sehr begrenzte sensorische Informationen (1 Freiheitsgrad) und im mittleren Intervall verhältnismäßig viele sensorische Informationen (4 Freiheitsgrade) für die Beschreibung der Zielgröße zur Verfügung. Bei Vergrößerung der Bandbreite nimmt die nutzbare Zahl sensorischer Freiheitsgrade zu. Dies resultiert einerseits aus den großen Überlappungen der Kanalempfindlichkeiten über die Hauptmoden hinaus und der stark kanalspezifischen spektralen Gestalt. Auf der anderen Seite erfordern diese Verhältnisse zur Begrenzung des Kalibrier- und Abgleichaufwandes stabile technologische Reproduktionsgüten der Filterfunktion oder erfordern andernfalls eine exemplarbezogene individuelle spektrale Kalibrierung [2].

In der Folge sollen die Sensoren im Zusammenhang mit konkreten Messaufgaben bewertet werden. Dabei werden Fragen der bestmöglichen anwendungsspezifischen Sensorkonfiguration aus einer gegebenen Varietät aus messtechnischen aber unter ökonomischen Gesichtspunkten sowie der Umgang mit realen Messbedingungen eine wichtige Rolle spielen.

3.2 Ableitung von spektralen und colorimetrischen Farbreiz-Beschreibungen aus multikanaligen Sensorantworten

Der aktuell erreichte Realisierungsstand des plasmonischen Sensormoduls erlaubt spektrale Schätzungen erfasster Farbreize. Bedingt durch die oben genannten Einschränkungen, die die sensorische Erkenn- und Unterscheidbarkeit von Farbreizunterschieden beeinflussen, sind die Einsatzmöglichkeiten derzeit noch begrenzt. Das nachfolgende Beispiel zeigt die Ergebnisse der spektralen Schätzung für Lichtszenarien eines 4-kanaligen LED-Lichtsynthesystems. Die primären Lichter sind in Abbildung 8 dargestellt. Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der spektralen Schätzung nach dem Prinzip der targetbezogenen regularisierten Pseudoinversen für die untersuchte VIS-Sensorkonfiguration. Die Schätzungen sind konsistent und durch die spezielle Regularisierung robust im

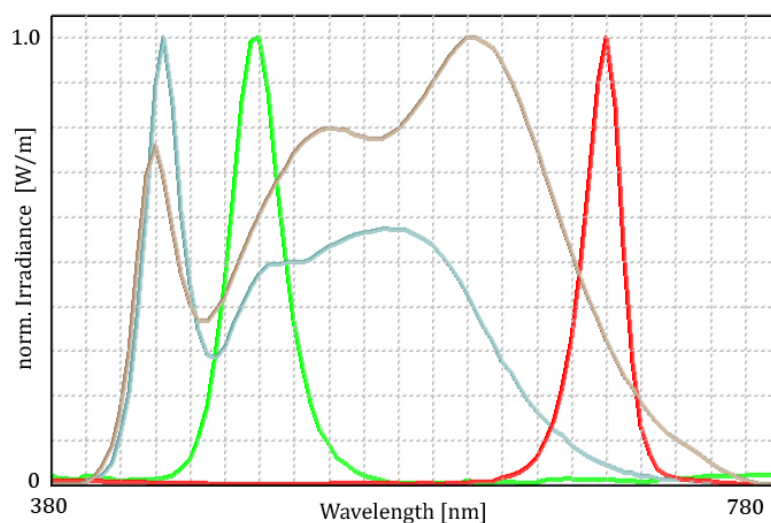


Abbildung 8: Primäre Lichter einer 4-kanaligen LED-Lichtquelle mit 2 schmalbandigen, monochromatischen LED und 2 breitbandigen Weißlicht-LED.

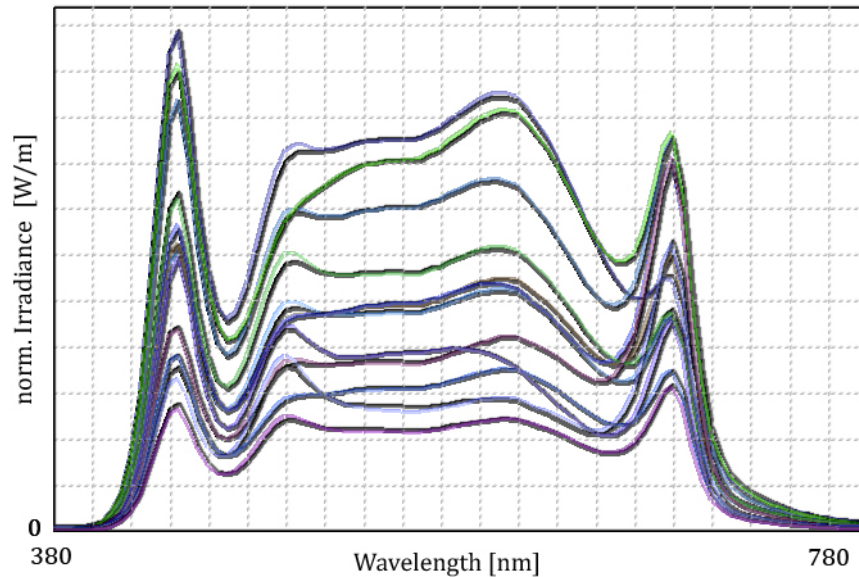


Abbildung 9: Vergleich spektraler Schätzungen von LED-Lichtsynthesen (schwarz) mit den tatsächlich erzeugten spektralen Lichtzusammensetzungen (farbig).

Einsatz unter realen Bedingungen. Für LED-basierte Lichtsynthesen sind im Fall einer kontinuierlichen Erfassung darauf aufbauend Steuergrößen zur eindeutigen Beeinflussung und Regelung der erzeugten Lichtcharakteristik (Feedback-System), z. B. zum Ausgleich von Drifts, ableitbar.

Als (farb)metrische Vorstufe des menschlichen Hellempfindens ist die Leuchtdichte in einer Vielzahl von Licht-Anwendungen, die Bezug auf die visuelle Lichtwirkung auf Menschen nehmen, interessant. Die möglichst genaue sensorische Erfassung dieses Kennwertes („Ambient-Light-Sensor“) ist daher von großem applikativen Interesse und daher bereits auf unterschiedliche Art und Weise technisch umgesetzt.

Die Leuchtdichte V_λ ist ein von der spektralen Zusammensetzung eines Farbreizes $\phi(\lambda)$ bestimmter colorimetrischer Kennwert. Er ist durch Wichtung des Farbreizes mit dem relativen spektralen Hellempfindlichkeitsgrad² $V(\lambda)$ und nachfolgender integraler Auswertung gegeben. Für den kontinuierlichen bzw. einen spektral abgetasteten Farbreiz $\underline{\phi}$ gilt

$$V_\lambda \propto \int_{380}^{780} V(\lambda) \cdot \phi(\lambda) \cdot d\lambda \approx \underline{V}^T \cdot \underline{\phi} . \quad (1)$$

Die r -kanalige Sensorantwort plasmonischer Sensoren $\underline{T} = (T_1, \dots, T_r)^T$ beinhaltet durch filterprinzipbedingte und technologische Limitierungen des Designs der Kanalempfindlichkeiten $\underline{G} = (G_1, \dots, G_r)^T$ keinen Kanalwert l , der durch $G_l \propto V$ eine hinreichend gute Korrelation zum Leuchtdichte-Kennwert aufweist. Dennoch ist es möglich, durch eine targetbezogen-optimierte Projektion des Sensorraumes $V_\lambda^* = \underline{I}^{V_\lambda} \cdot \underline{T}$ auf eine V_λ -entsprechende Raumgerade eine gute Schätzung des Kennwertes mit skaler Güte zu realisieren. Im Gegensatz zur spektralen Farbreizschätzung aus

²für Tag- oder Nachtsehen

den Sensorantworten ist die zugrunde liegende Problemstellung nicht invers schlecht-konditioniert, sondern gut bestimmt.

Dieses Prinzip referenzfrei umgesetzt, d. h. als optimierte Raum-Projektion für sämtliche Spektralreize, ergibt mit der Sensorkonfiguration aus Abbildung 6 die in Abbildung 10 dargestellte approximierte $V(\lambda)$ -Kurve. Die Leuchtdichte-Kennwerte beliebiger und breitbandiger Farbreize, z. B. typische Tageslichter oder LED-basierte Tageslichtsynthesen, wie in Abbildung 1, lassen sich bereits damit genauer als 4% zum Normwert aus Gleichung 1 schätzen.

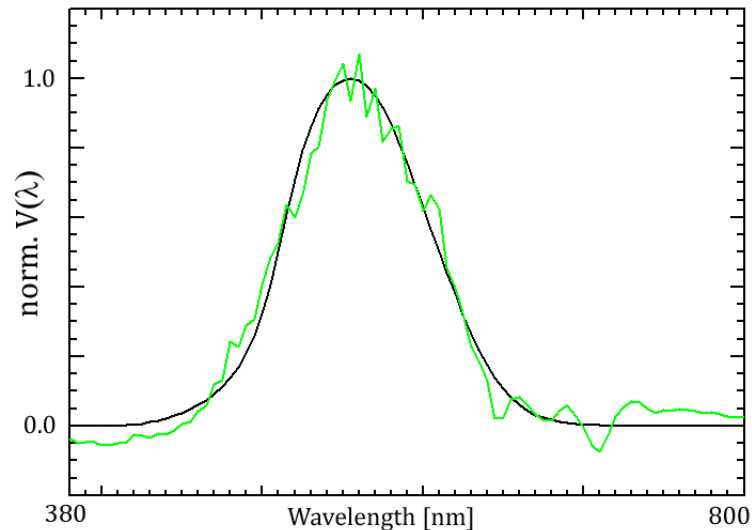


Abbildung 10: Referenzfreie Schätzung der $V(\lambda)$ -Kurve (schwarz) aus einer Spektralreiz-optimierten Projektion des mehrkanaligen Sensorraums von Abbildung 6 (grüne Kurve).

Erheblich höhere Güten und gleichzeitig ein verringerter Kalibrieraufwand sind unter den vorliegenden Bedingungen bei Einschränkung auf bestimmte Farbreizumfänge möglich. Die Untersuchung der Nutzbarkeit dieses Ansatzes unter Anwendungsbedingungen und der Vergleich mit etablierten Ambient-Light-Sensoren werden Gegenstand der weiteren Arbeit sein.

4 Zusammenfassung & Ausblick

Im Beitrag wurde der aktuelle Entwicklungsstand von Sensoren mit in CMOS-Technologie realisierbarer plasmonischer Filterfunktion im Kontext der Überwachung von Leuchten bzw. Lichtenwendungen diskutiert. Es wurde gezeigt, dass die auf dieser Grundlage technologisch realisierbaren vielkanaligen Sensorelemente aus Sicht der damit bereitstellbaren sensorischen Information, deren potentielle Verwertungsmöglichkeiten im Rahmen der Sensorsignalverarbeitung aber auch aus Sicht von Fertigung und Kosten großes Potential für den zukünftigen Einsatz in anspruchsvollen Lichtenwendungen mit hohen Stückzahlen besitzen.

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.

Die Zielstellung des Vorhabens ist die Qualifizierung plasmonischer Sensorbaugruppen für den Einsatz in Leuchten in den Bereichen Medizin, Automotive oder der Nahrungsmittelproduktion.



Literatur

- [1] S. Junger, N. Verwaal, W. Tschekalinskij, N. Weber: Farb- und Mehrkanalsensoren in erweiterter CMOS-Technologie. In 19. Workshop Farbbildverarbeitung, Berlin, GfaI e.V. (Hrsg.), 2013, S. 33–43, ISBN: 978-3-942709-08-8
- [2] R. Nestler, R. Jahn, K.-H. Franke, S. Junger, D. Gäbler: Einsatz hyperspektraler Sensoren zur Überwachung intelligenter LED-basierter Lichtquellen – eine Fallstudie. In 21. Workshop Farbbildverarbeitung, Koblenz, D. Paulus, M. Häselich, D. Dröge (Hrsg.), 2015, S. 50–64, URN: nbn:de:kola-12755
- [3] R. Nestler, K.-H. Franke: Quasispektraler Mehrbereichsmessansatz durch Einsatz eines iterativ regularisierten targetbezogenen Interpolators. In 12. Workshop Farbbildverarbeitung, 5.–6.10.2006, Ilmenau, S. 33–43, ISSN: 1432-3346