

Untersuchungen zur Farbwiedergabe durch RGBW-LED-Systeme in der Flugzeugkabine

S. Polster, saskia.polster@gmx.de, Ch. Schierz, christoph.schierz@tu-ilmenau.de
TU Ilmenau, Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau
F. Schmid, N. Kangarakis, Diehl Aerospace GmbH, Donaustr. 120, 90451 Nürnberg

Einleitung

LED-Systeme bieten neue Möglichkeiten die Atmosphäre in der Flugzeugkabine durch kontinuierliche Änderungen des Farborts und der Helligkeit der Lichtquellen zu beeinflussen. Problematisch stellt sich dabei allerdings die Charakterisierung der Farbwiedergabeeigenschaften der LED-Lichtquellen dar.

Um zu ermitteln, welche Parameter die Farbwiedergabe in der Flugzeugkabine unter RGBW-LED-Beleuchtung beeinflussen, wurde die Farbwiedergabe auf dem Weg des Lichts von der LED bis zum beleuchteten Objekt untersucht. Abbildung 1 zeigt die verschiedenen Ebenen, die vom Lichtspektrum durchlaufen werden und die dazugehörigen Einflussparameter. Auf jeder Ebene wurde die Änderung des Spektrums und des Farbwiedergabewerts, und damit der Einfluss der Leuchtelemente und Einbaugeometrie ermittelt. Zudem wurde ein Vergleich zwischen den Farbwiedergabewerten von simulierten und gemessenen Mischspektren auf der entsprechenden Ebene angestellt, um ermitteln zu können, wie aussagekräftig Simulationen auf LED-Ebene für die Vorhersage der Farbwiedergabeeigenschaften in der Flugzeugkabine sind.

Um die theoretischen Betrachtungen mit dem tatsächlichen Empfinden verknüpfen zu können, fand eine Überprüfung der Farbwiedergabequalität durch subjektive Bewertungen statt. Ziel war es zudem festzustellen, welche Aussagekraft Testfarbverfahren für die Charakterisierung der Farbwiedergabeeigenschaften von LED-Systemen haben.

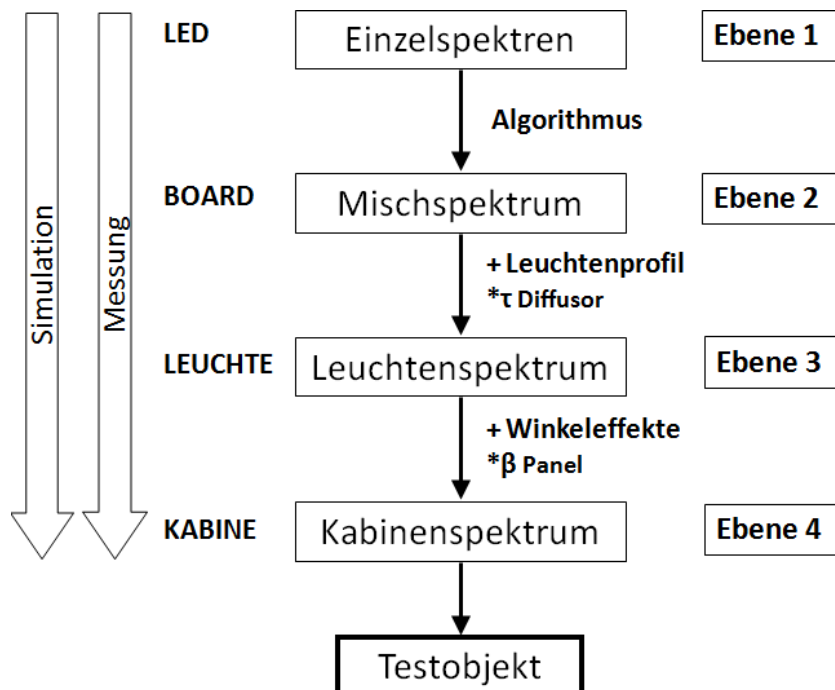


Abb. 1: Weg des Lichts von der LED bis zum Testobjekt in der Flugzeugkabine mit den entsprechenden Einflussparametern zwischen den einzelnen Ebenen.

CRI-Optimierung auf LED- und Board-Ebene

Die Möglichkeiten der Optimierung des CRI-Werts auf LED- und Board-Ebene wurden mittels Simulationen untersucht. Auf LED-Ebene lassen sich die Ausgangskomponenten für die Spektralmischung beeinflussen. Hier wurde versucht durch eine engere Vorselektion der dominanten Wellenlängen der verwendeten farbigen LEDs, bei vorgegebenem Spektrum der weißen LED, den R_a -Wert der Mischspektren auf dem Planckschen Kurvenzug zwischen 3000 K und 8000 K zu maximieren. Für die Simulation wurden immer dieselben Grundspektren verwendet und lediglich die dominante Wellenlänge in 5 nm-Schritten verschoben. Abbildung 2 zeigt die um jeweils 5 nm verschobenen blauen Grundspektren, während Abbildung 3 die dazugehörigen errechneten R_a -Werte der ermittelten Mischspektren bei Farbtemperaturen zwischen 3000 K und 8000 K zeigt. Es wird deutlich, dass durch geeignete Kombinationen von farbigen LEDs bestimmter dominanter Wellenlängen eine deutliche Anhebung des R_a -Wertes erreicht werden kann. Besonders hervorzuheben ist die Tatsache, dass ein Auffüllen der spektralen Lücken der weißen LED nicht immer wie erwartet zu einer Erhöhung des CRI-Wertes führt, sondern teilweise die Spektren mit den größten Lücken zu den höchsten Farbwiedergabewerten führen.

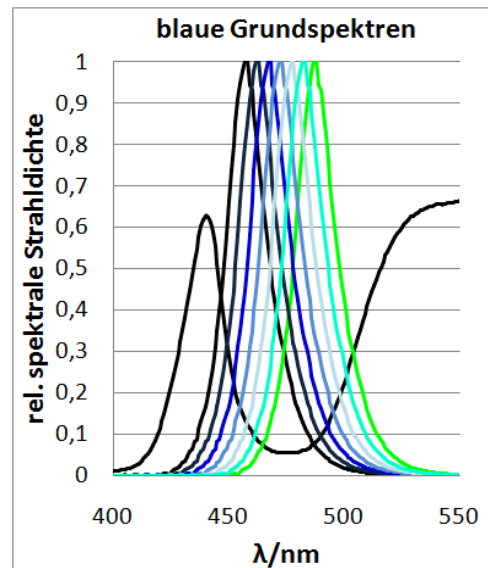


Abb. 2: Blaue Grundspektren mit um 5 nm verschobener dominanter Wellenlänge

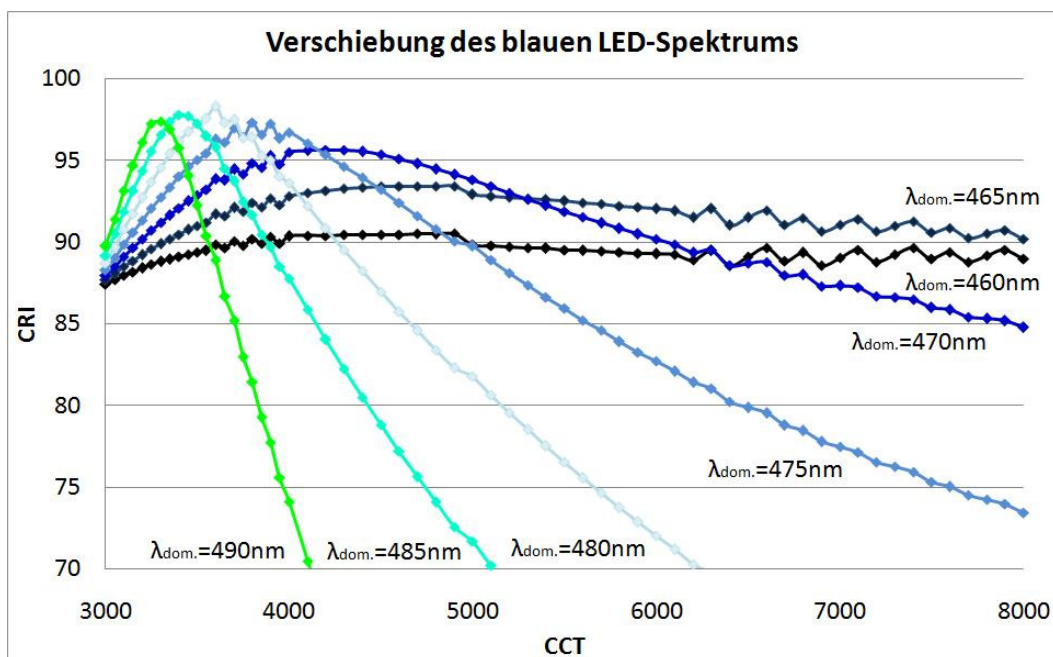


Abb. 3: R_a -Werte der Mischspektren auf dem Planckschen Strahler mit einer Farbtemperatur zwischen 3000K und 8000K bei Verwendung der unterschiedlichen blauen Grundspektren aus Abbildung 2.

Die Optimierung auf Board-Ebene basiert auf der Verwendung neuer Rechenalgorithmen, die den Anteil der farbigen LEDs in der Ermittlung des Mischspektrums an dem eingestellten Farbort erhöhen. Dies führt dann zum erwünschten Effekt, wenn der R_a -Wert der reinen weißen LED ausreichend Spielraum für Verbesserungen bietet. Abbildung 4 zeigt die Verteilung der R_a -Werte der Mischspektren im abgebildeten Abschnitt des u' - v' -

Diagramms im Bereich des Planckschen Strahlers zwischen 3000 K und 8000 K. In Abbildung 4(a) ist der Anteil der weißen LED bei der Ermittlung des Mischspektrums maximal gehalten, während bei Abbildung 4(b) der Anteil der farbigen LEDs an der Mischung maximiert wurde. Die gesamte Struktur der Verteilung ändert sich. Während der R_a -Wert auf dem Planckschen Strahler im ersten Bild nahezu konstant bleibt, liegen die R_a -Werte auf dem Planckschen Strahler im rechten Bild bei niedrigen Farbtemperaturen sehr hoch und fallen dann zu höheren Farbtemperaturen sukzessive ab. Es wird deutlich, dass durch eine Erhöhung des Anteils der farbigen LED-Spektren in der Mischung eine Verbesserung des Farbwiedergabeindex, vor allem im Bereich der niedrigen Farbtemperaturen erreicht werden kann. Diese Ergebnisse können Ausgangspunkte für weitere Untersuchungen zur LED-Spektrenmischung liefern.

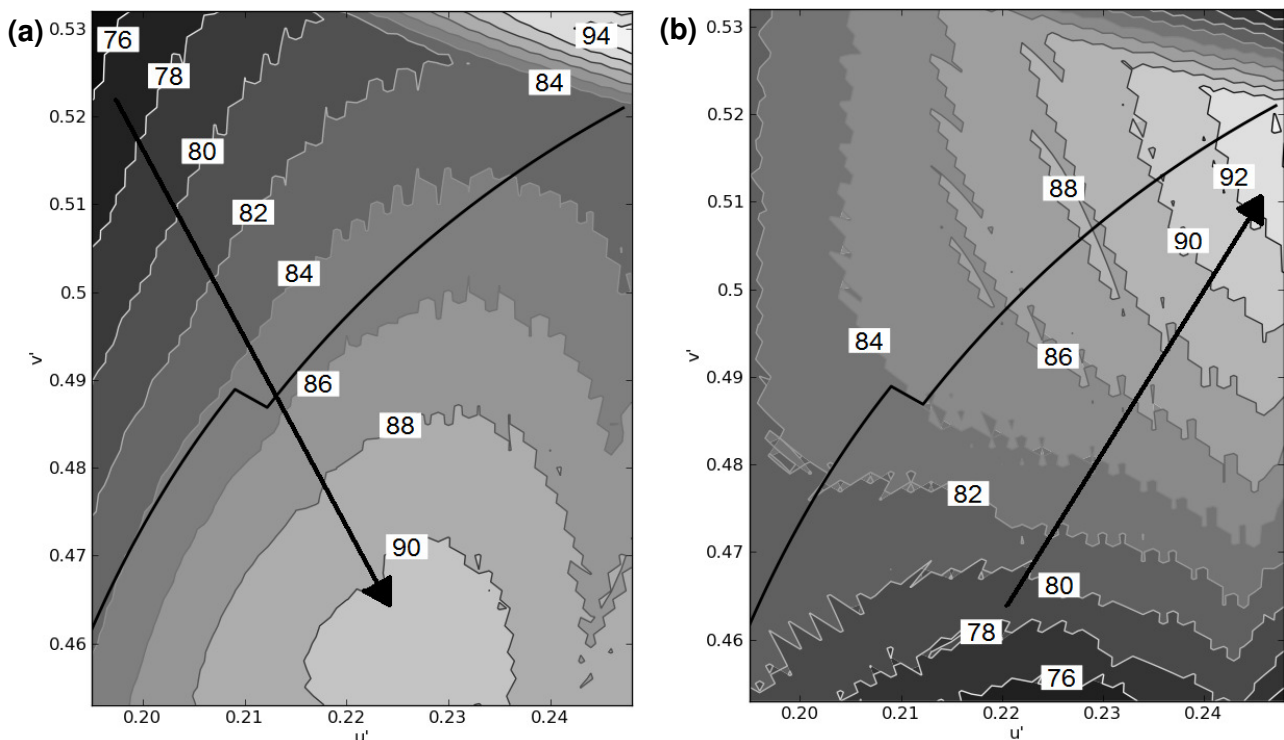


Abb. 4: Änderung der R_a -Werte Verteilung bei Wechsel von **(a)** Mischung mit maximalem Mischanteil der weißen LED zu **(b)** Mischung mit erhöhtem Farbanteil. Die grauen Linien stellen Bereiche gleichen R_a -Werts dar. Der Pfeil markiert den Verlauf eines kontinuierlichen Anstiegs der R_a -Werte.

Leuchtenelemente und Einbaugeometrie

Die Untersuchungen zeigten, dass der Einfluss der Leuchtenelemente beim Einbringen in den Lichtweg in frontaler Abstrahlrichtung sehr klein ist. Sowohl das Spektrum als auch der Farbwiedergabeindex werden kaum verändert. Beim Einbau der Leuchte in die Kabine konnten jedoch große Diskrepanzen zwischen den gemessenen Spektren auf den einzelnen Ebenen festgestellt werden. Diese sind auf Abweichungen der Abstrahlcharakteristik der LEDs vom Lambertschen Strahler zurückzuführen. Durch die starke Wechselwirkung der Abstrahlcharakteristiken und der Einbaugeometrie im Flugzeug waren deutliche Änderung des Spektrums und damit auch des Farbwiedergabeindex auszumachen. Im Zuge dieser Untersuchungen wurde auch die Validität simulierter Daten auf den einzelnen Ebenen überprüft. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass unter der Bedingung der Verwendung gleicher Grundspektren und Rechenalgorithmen auf LED-Ebene zuverlässige Voraussagen über die Farbwiedergabe simuliert werden können.

Untersuchungen zur subjektiven Wahrnehmung

In subjektiven Tests bewerteten Probanden die Farbabstände zwischen den dargestellten Objekten unter den beiden LED-Testbeleuchtungen in der Kabine, sowie Merkmale wie die Natürlichkeit und das Gefallen der Objekte. Zudem wurde für jedes Objekt bewertet, ob es dem erinnerten Erscheinungsbild des Objekts entspricht. Die in den Untersuchungen verwendeten Testobjekte stellten eine Auswahl natürlicher Objekte mit zugehörigen Farbtafeln dar, die im Umfeld der Flugzeugkabine von besonderer Relevanz sind. Ziel der Untersuchungen war es, zu ermitteln wie stark die wahrgenommenen Farbabstände mit den berechneten Farbabständen im $U^*V^*W^*$ - und CAM02-UCS-Farbraum korrelieren. Zudem wurde die Aussagekraft von Testfarbverfahren für die Charakterisierung der Farbwiedergabeeigenschaften von LED-Systemen untersucht.

Korrelation der Farbabstände

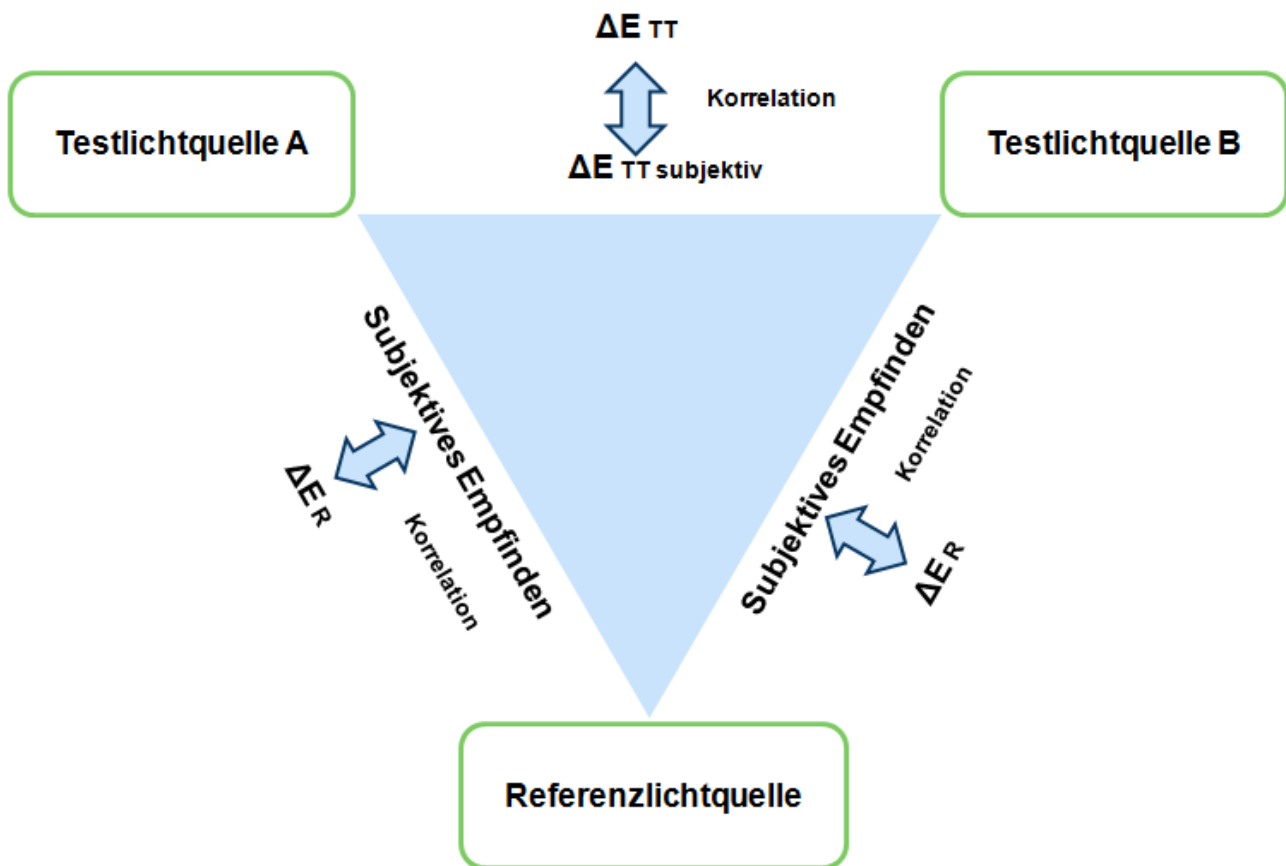


Abb. 5: Untersuchte Korrelationen zwischen den berechneten Farbwiedergabewerten und den Datensätzen aus den subjektiven Tests

Der Zusammenhang zwischen den errechneten Farbabständen und den Datensätzen aus den subjektiven Tests wurde anhand von drei Thesen überprüft. Zum einen wurde die Korrelation des subjektiv wahrgenommenen Farbabstands $\Delta E_{TT \text{ subjektiv}}$ zwischen der Farbe des Testobjekts unter Testlichtquelle A und Testlichtquelle B mit den errechneten Farbabständen E_{TT} in den Farbräumen $U^*V^*W^*$ bzw. CAM02-UCS untersucht. Für die errechneten Farbabstände im $U^*V^*W^*$ -Raum ergab sich ein Korrelationskoeffizient von 0,61, im CAM02-UCS-Raum sogar ein Koeffizient von 0,66. Damit kann von einem direkten Zusammenhang zwischen den subjektiv wahrgenommenen und den errechneten Farbabstände ausgegangen werden. Des Weiteren wurde in These 2 angenommen, dass das Testobjekt umso natürlicher empfunden wird, je kleiner der errechnete Farbabstand ΔE_R zwischen dem Testobjekt unter der Testlichtquelle und dem Testobjekt unter einer

Referenzlichtquelle ist. Hier konnte für die errechneten Farbabstände in beiden Farbsystemen keine Korrelation festgestellt werden. Der Korrelationskoeffizient im $U^*V^*W^*$ -Raum liegt bei -0,09 im CIECAM02-System bei -0,04. Die letzte These besagt, je kleiner der Farbabstand ΔE_R der Farbe unter Testbeleuchtung zu derselben Farbe unter Referenzbeleuchtung ist, desto größer ist die Anzahl der Testpersonen, die das Objekt ihrer Erinnerung entsprechend empfinden. Diese Aussage kann nach diesen Untersuchungen nicht bestätigt werden. Die Korrelationskoeffizienten liegen in beiden Farbräumen unter 0,2. Abbildung 5 stellt die Zusammenhänge der drei Thesen grafisch dar.

Der Vergleich der Ergebnisse der subjektiven Tests mit den Rechenwerten zeigt, dass die errechneten Farbabstände der Testobjekte unter den beiden Testlichtquellen im $U^*V^*W^*$ - und im CAM02-UCS-Farbraum gut mit den subjektiv empfundenen Farbabständen korrelieren. Die Korrelationskoeffizienten liegen bei 45 ausgewerteten Datensätzen über 0,6. Dagegen konnten keine Korrelationen zwischen den errechneten Farbabständen zu einer Referenzlichtquelle und den bewerteten Merkmalen wie ‚wirkt natürlicher‘, ‚gefällt besser‘ und ‚entspricht der Erinnerung des Objekts‘ festgestellt werden. Ein Vergleich der Farbwiedergabeeigenschaften zweier LED-Lichtquellen anhand der Bewertung mittels eines Testfarbverfahrens basierend auf dem ermittelten Farbabstand zu einer Referenzlichtquelle ist daher nicht aussagekräftig.

Fazit

Ergebnis dieser Untersuchungen ist, dass die Leuchtenelemente und Einbaugeometrie im untersuchten Fall nur einen sehr geringen Einfluss auf die Farbwiedergabeeigenschaften der LED-Mischspektren nehmen. Damit liefern Simulationen auf LED-Ebene valide Voraussagen über die Farbwiedergabeeigenschaften in der Flugzeugkabine. Voraussetzung dafür ist die Verwendung derselben Ausgangsspektren und Rechenalgorithmen und identische Abstrahlcharakteristiken der einzelnen LEDs. Verschiedene theoretische Methoden zur CRI-Wert-Optimierung wurden untersucht. Während bei der Optimierung auf LED-Ebene durch eine engere Vorselektion der Grundspektren der farbigen LEDs auf ein sinnvolles Kosten-Nutzen-Verhältnis zu achten ist, bietet die Verwendung neuer Rechenalgorithmen zur CRI-Wert-Optimierung auf Board-Ebene eine große Chance.

Die Evaluierung des CRI-Systems im Vergleich zum CIECAM02-Farberscheinungsmodell für die Charakterisierung der Farbwiedergabe wurde anhand subjektiver Tests zur Farbwahrnehmung vorgenommen. Der Referenzfarbabstand beschreibt den Abstand des Farborts einer Testfarbe unter einer Testlichtquelle zu deren Farbort unter einer Referenzlichtquelle. In den gängigen Testfarbverfahren wird über diesen Referenzfarbabstand die Qualität der Farbwiedergabe einer Testlichtquelle bestimmt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass in den beiden untersuchten Farbräumen $U^*V^*W^*$ und CAM02-UCS zwar die Farbabstände zwischen zwei LED-Lichtquellen gut modelliert werden, aber keine Korrelation zwischen dem Referenzfarbabstand und Attributen wie Natürlichkeit, angenehmem Erscheinungsbild und der Akzeptanz der Beleuchtung festgestellt werden konnten. Ein Vergleich der Farbwiedergabeeigenschaften zweier LED-Lichtquellen anhand der Bewertung mittels eines Testfarbverfahrens basierend auf dem ermittelten Farbabstand zu einer Referenzlichtquelle ist daher nicht aussagekräftig.