

## **FARBDISKRIMINATION IN ABHÄNGIGKEIT VON WEISSPUNKT UND FARBVERLAUF**

1. Kramer, G.<sup>1</sup>, 2. Schierz, C.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>) Lighting Engineering Group, Technische Universität Ilmenau,  
Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau, Germany  
christoph.schierz@tu-ilmenau.de

### **ABSTRACT**

Im Hinblick auf den Entwurf eines Farbortgruppierungsverfahrens für Leuchtstoffkonvertierte weiße LEDs werden die Ergebnisse von Untersuchungen mit Testpersonen zur physiologischen Wahrnehmung von Farbdiskriminationsschwellen in Abhängigkeit von ähnlichster Farbtemperatur und Farbverlauf vorgestellt. Die empirisch ermittelten Schwellen werden unter Benutzung von Transformationen nach VON KRIES auf abweichende Adaptationsbedingungen erweitert und mit MACADAMs Ergebnissen verglichen.

Schlagworte: Farbdiskrimination, Psychophysik, chromatische Adaptation

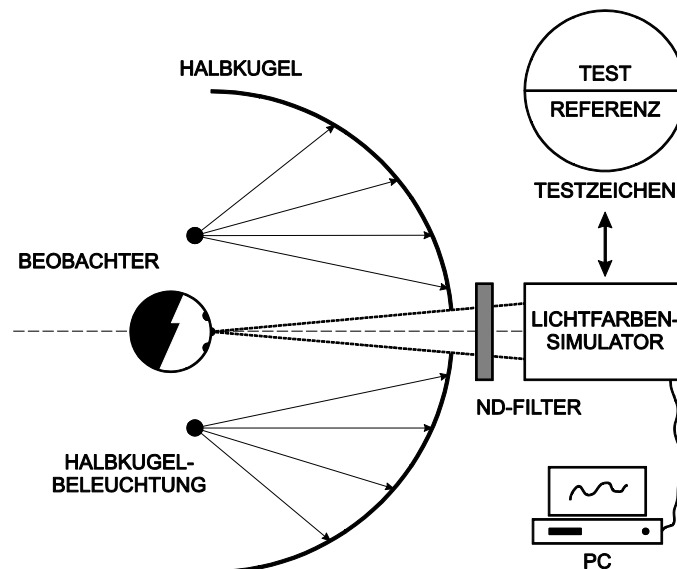
### **EINLEITUNG**

Halbleiter und Leuchtstoff von Licht emittierenden Dioden (LEDs) unterliegen technologischen Einflüssen, die sichtbare Farbunterschiede zwischen den produzierten LEDs hervorrufen können. Eine mögliche negative Bewertung daraus resultierender sichtbarer Farbunterschiede ist bereits durch Studien nachgewiesen worden (z. B. [Bie10, S. 109 ff.]). Um die Auswirkungen dieser technologiebezogenen Farbortstreuung zu minimieren, werden LEDs farbmetrisch vermessen und anschließend in Gruppen (Bins) sortiert. Die Grenzen der Bins beruhen dabei bis heute auf den Studien MACADAMs aus den 1940er Jahren [Mac42]. MACADAM ließ damals ein in etwa 50 cd/m<sup>2</sup> helles Testzeichen durch einen einzelnen Beobachter hinsichtlich der Farbdiskrimination bewerten. Basis dabei war ein 2°-Gesichtsfeld. Das Umfeld wurde stets mit Normlichtart C beleuchtet. Das Testzeichen simulierte einen harten, abrupten Farbübergang. Die Anwendung von MACADAMs Ergebnissen auf moderne LED-Applikationen ist aus folgenden Gründen kritisch zu hinterfragen: a) LED-Applikationen haben in der Regel höhere Leuchtdichten als die damals untersuchten. b) Das realisierte 2°-Gesichtsfeld hat nur

begrenzte praktische Relevanz [Ric80, S. 107 ff.]. c) MACADAMs Studien liefern ausschließlich Ergebnisse in einem Umfeld mit Normlichtart C und besitzen somit auch nur für diesen Fall ihre Gültigkeit. d) Zusätzlich zu dem untersuchten harten Farbübergang sind in heutigen LED-Anwendungen auch abweichende Farbverläufe von Interesse. e) Die Tests wurden lediglich mit einem einzelnen Beobachter durchgeführt.

## VERSUCHSAUFBAU

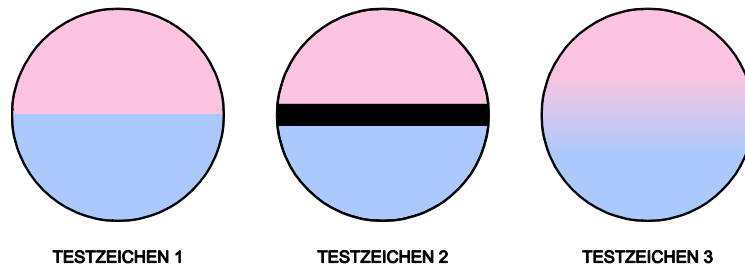
Abb. 1 zeigt den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Versuchsaufbau. Der Beobachter sitzt im Mittelpunkt einer auf der Innenseite diffus weiß lackierten Halbkugel und betrachtet ein Testzeichen. Der Abstand beträgt 750 mm. Die Beobachtung erfolgt binokular mit einer Winkelgröße des Testzeichens von  $10^\circ$ . Eine Beleuchtungseinheit liefert in Verbindung mit der Halbkugel ein der Referenzvalenz farbig angepasstes Umfeld.



**Abb. 1:** Versuchsaufbau

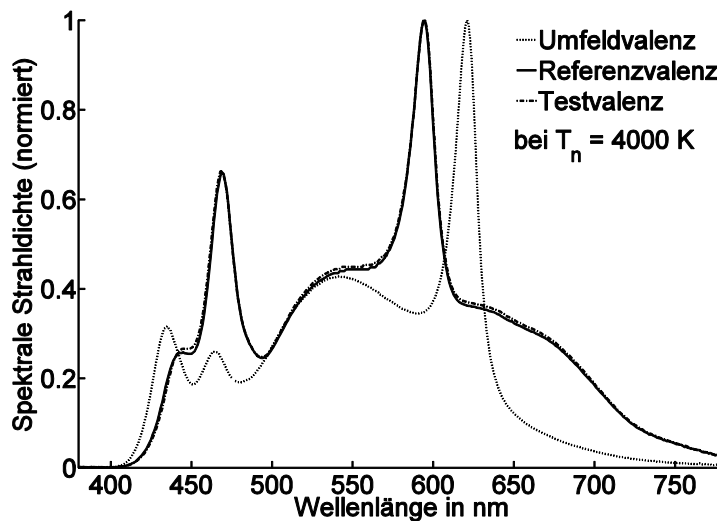
Es wurden drei Testzeichen (Abb. 2) untersucht, wobei sich die damit realisierten Farbübergänge an gängigen Applikationen orientieren. Innerhalb der jeweiligen Testzeichenhälfte wurde der Farbverlauf homogen gestaltet. Die untersuchten Farborte lagen auf ausgewählten Weißpunkten des ANSI-Binning-Standards ( $T_n = 2700\text{ K}$ ,  $T_n = 4000\text{ K}$  und  $T_n = 6500\text{ K}$  gemäß [Ans08]). Die Testvalenzen wurden in einem quadratischen Raster gleichmäßig um die jeweilige Referenzvalenz verteilt. Dadurch entfällt ein möglicher Einfluss der Methodik auf das erzielte Ergebnis, insbesondere auf die Orientierung der Schwellwertkurve im entsprechenden Farbsystem/-raum. Die Testzeichenleuchtdichte wurde auf  $800\text{ cd/m}^2$  gesetzt, die Umfeldleuchtdichte auf  $200\text{ cd/m}^2$ . Der Leuchtdichteunterschied

zwischen den beiden Testzeichenhälften betrug bei der Variation des Farbabstandes stets weniger als 3%.



**Abb. 2:**        **Untersuchte Testzeichen. Von links nach rechts: Farbübergang „hart“, „Abstand“ und „weich“.**

Das Testzeichen wurde mit einem breitbandigen Spektrum hinterleuchtet, wobei Referenz- und Testvalenz nahezu identische spektrale Verteilungen aufwiesen (Abb. 3). Das Dimming der Farbvalenzen erfolgte mit einer Frequenz von  $247 \text{ Hz} \pm 5 \text{ Hz}$ .

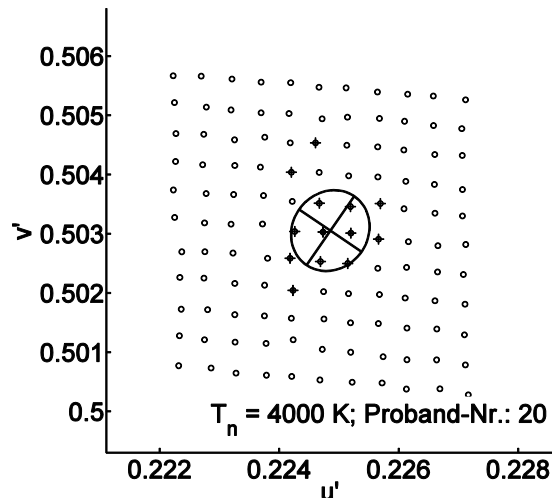


**Abb. 3:**        **Spektraler Verlauf bei  $T_n = 4000 \text{ K}$  und Testzeichen 1**

## METHODE

Zunächst wurde die Form der Schwellwertkurve definiert: Es wurde analog zu [Bro52a]; [Bro56] eine Ellipse gewählt, in deren Mittelpunkt sich die Referenzvalenz befindet. Für die einzelnen Untersuchungen wurde jeweils ein Probandenkollektiv von mindestens 20 Teilnehmern herangezogen. Um bei Auffälligkeiten eine mögliche Farbfehlsichtigkeit ausschließen zu können, wurde in Anlehnung an [Bie10, S. 41] vorab die Farbtüchtigkeit mittels eines modifizierten Farbtests von VELHAGEN [Bro11] und dem ungesättigten Farblegetest von

LANTHONY geprüft. Zusätzlich wurde die Sehschärfe durch das Präsentieren von acht Landoltringen (Öffnung: 0,3 mm) in einem Abstand von 75 cm (Visus: ca. 0,7) abgefragt. Nach einer chromatischen Adaptation von 60 s wurden die Probanden aufgefordert, randomisiert dargebotene Farbdifferenzen gemäß der Fragestellung "Sind Referenz- und Testvalenz in Farbe gleich?" mit den Antwortmöglichkeiten „gleich“ bzw. „ungleich“ zu beantworten (Abb. 4). Die Probanden teilten ihre Beurteilung dem Versuchsleiter mündlich mit.

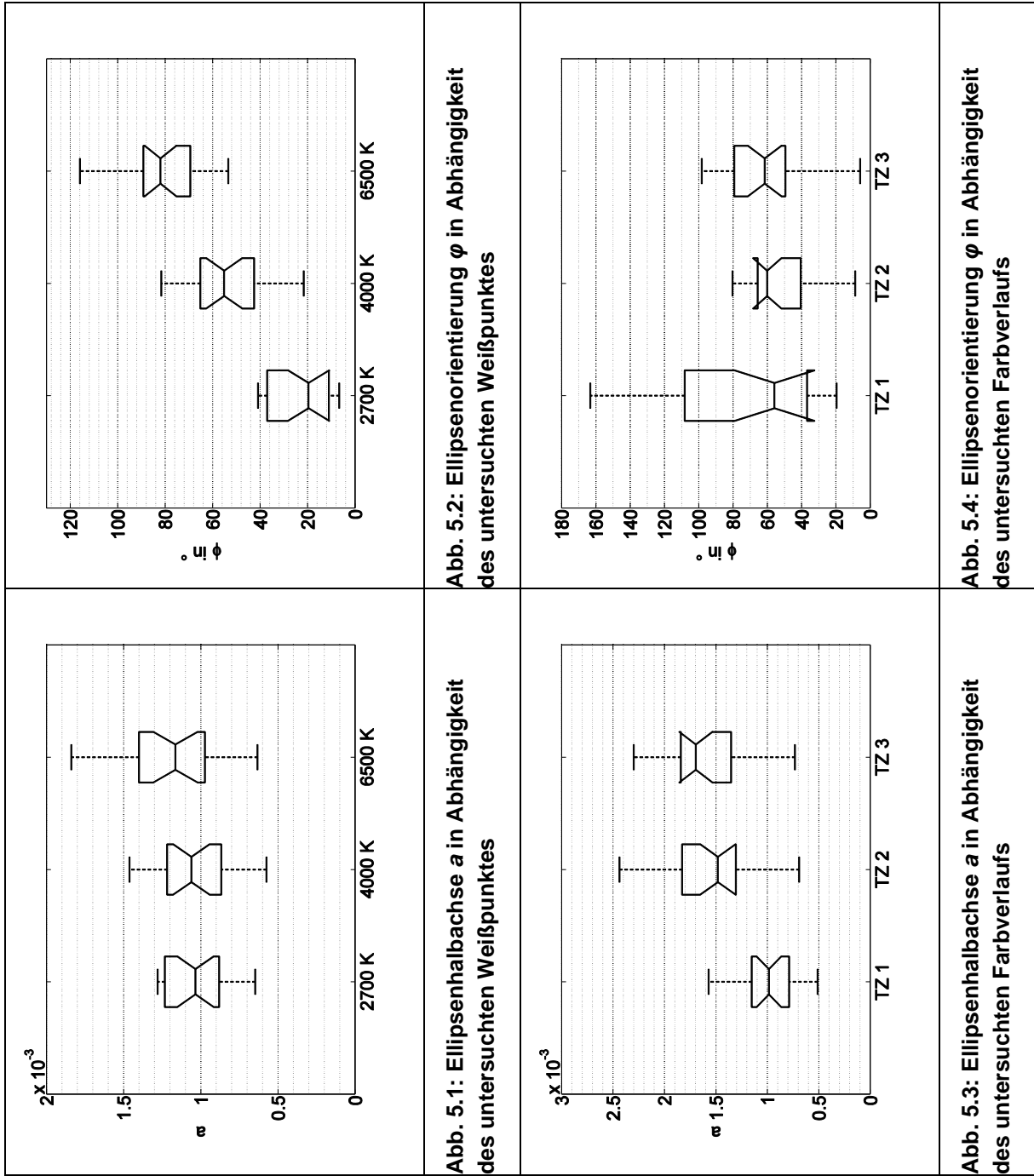


**Abb. 4:** Farbdiskriminationsellipse und Antwortverhalten einer Versuchsperson. An den Positionen der nicht gefüllten Kreise ist die Antwort „ungleich“, an denen der mit „+“ gefüllten Kreise, „gleich“. Die Referenzvalenz befindet sich im Schnittpunkt der beiden Ellipsenachsen.

Die Bestimmung der Schwellwertellipsen erfolgte analog [Ric75] durch Maximierung des skalaren Funktionswerts einer Log-Likelihoodfunktion  $\ln L$ . Die empirische Untersuchung wurde in zwei Blöcke aufgeteilt. Im ersten Block wurde die Abhängigkeit der Farbdiskrimination vom dargebotenen Weißpunkt untersucht. Dabei wurden bei drei Farbtemperaturen von 22 Probanden, 7986 Farbabstände abgefragt. Das Alter der Probanden lag zwischen 22 und 48 Jahren (Mittelwert: 28,4 Jahre, Standardabweichung: 7,2 Jahre). 14 Probanden waren männlich und acht weiblich. Im zweiten Block wurde der Einfluss des Farbverlaufs auf die Farbdiskrimination untersucht. Die Versuchsdurchführung erfolgte dabei im Rahmen einer Masterarbeit [Gra14]. Von 23 Probanden wurden somit 8349 Farbunterschiede bei einer ähnlichsten Farbtemperatur von 4000 K bewertet. Das Alter der Probanden lag zwischen 22 und 54 Jahren (Mittelwert: 31,0 Jahre, Standardabweichung: 9,4 Jahre). Zwölf Probanden waren männlich und elf weiblich.

## ERGEBNISSE

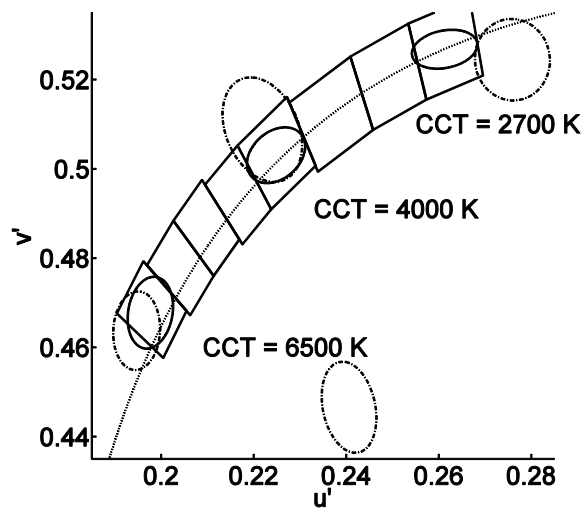
Abb. 5.1 bis 5.4 zeigen ausgewählte Ergebnisse der beiden Untersuchungsblöcke.



Sämtliche Ellipsenparameter beziehen sich dabei auf die CIE ( $u'$ ,  $v'$ ) Farbtafel 1976. Weißpunktvariation. Die Ellipsenhalbachse  $a$  zeigt keine signifikante Änderung in Abhängigkeit des untersuchten Weißpunktes. Die Ellipsenorientierung  $\varphi$  ändert sich hingegen signifikant. Farbverlaufsvariation. Die Ellipsenhalbachse  $a$  weist einen signifikanten Sprung zwischen Testzeichen 1 und 2 bzw. 1 und 3 auf. Die Ellipsenorientierung ändert sich nicht.

## SCHLUSSFOLGERUNG

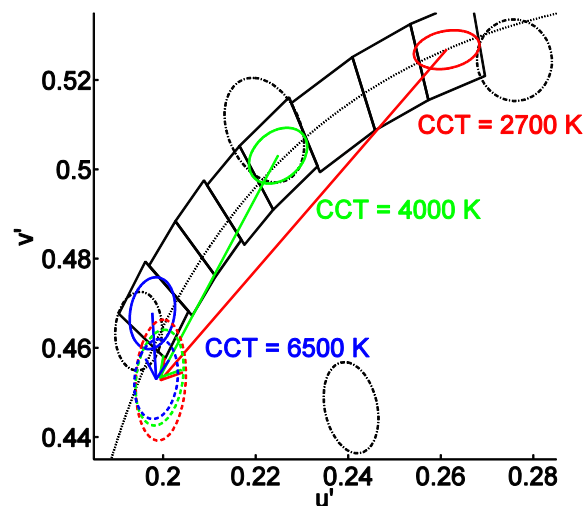
Abb. 6 zeigt die Ergebnisse dieser Arbeit (Untersuchungsblock 1) verglichen mit denen von MACADAM. Zur besseren Erkennbarkeit sind sämtlich Ellipsen um den Faktor 7 vergrößert dargestellt.



**Abb. 6:** MACADAM-Ellipsen (gestrichelt) und die Ellipsen dieser Arbeit (durchgezogen) im Vergleich. Zur besseren Erkennbarkeit sind sämtliche Ellipsen siebenfach vergrößert dargestellt.

Bei  $T_n = 6500$  K zeigt sich eine gute Übereinstimmung der einzelnen Ergebnisse. Die Ellipsen gleichen sich in guter Näherung hinsichtlich Größe und Orientierung. Bei den beiden weiteren Weißpunkten stehen die Ellipsen dieser Arbeit nahezu senkrecht zu denen von MACADAM.

Um die Ursache hierfür zu ermitteln, wurde eine echte VON KRIES Transformation durchgeführt. Die Ellipsen dieser Arbeit wurden dabei zu den Adaptationsbedingungen bei MACADAM (Normlichtart C bei etwa 6800 K;  $L = 23,87 \text{ cd/m}^2$  nach [Mac42]) transformiert. Als Ergebnis erhält man eine Ellipsenschaar, die sich in ihrer Orientierung gleichen (Abb. 7). Die Unterschiede in den Ergebnissen beider Arbeiten können daher mit den unterschiedlichen Adaptationsbedingungen begründet werden und sind wohl nicht in den Leuchtdichteunterschieden begründet.



**Abb. 7:** MACADAM-Ellipsen und transformierte Ellipsen dieser Arbeit im Vergleich. Zur besseren Erkennbarkeit sind sämtliche Ellipsen siebenfach vergrößert dargestellt.

## DANKSAGUNG

Diese Arbeit entstand im Rahmen einer Projektarbeit zur Erarbeitung normativer Grundlagen eines Gütesiegels für LED-Leuchten (Performance-Quality-Label [PQL] für LED-Leuchten). Das IGF-Vorhaben 14 LBG der Forschungsvereinigung Elektrotechnik beim ZVEI e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

## LITERATUR

- [Ans08] AMERICAN NATIONAL STANDARD LIGHTING GROUP (Ed.): ANSI\_NEMA\_ANSLG C78.377-2008. American national standard for electric lamps. Specifications for the chromaticity of solid state lighting products. 2008.
- [Bie10] BIESKE, K.: Über die Wahrnehmung von Lichtfarbenänderungen zur Entwicklung dynamischer Beleuchtungssysteme. Dissertation an der TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik. Osnabrück: Der andere Verlag, 2010.
- [Bro52a] BROWN, W. R. J.: Statistics of color-matching data. J. Opt. Soc. Am. V42 N4 (1952) p. 252 ff.
- [Bro56] BROWN, W. R. J.; HOWE, W. G.; JACKSON, J. E.: Multivariate normality of the color-matching process. J. Opt. Soc. Am. V46 N1 (1956) p. 46 ff.
- [Bro11] BROSCHMANN, D.; KUCHENBECKER, J.: Tafeln zur Prüfung des Farbensinnes. 34. Aufl. Stuttgart: Thieme, 2011.
- [Gra14] GRABER, M.: Untersuchung des Einflusses von Farbverläufen auf die physio-/psychologische Wahrnehmung von Farbdifferenzen. Masterarbeit an der TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik. Ilmenau: 2014.
- [Mac42] MACADAM, D. L.: Visual sensitivities to color differences in daylight. J. Opt. Soc. Am. V32 N5 (1942) p. 247 ff.
- [Mac43] MACADAM, D. L.: Specification of small chromaticity differences. J. O. S. A. V33 (1943) p. 18 ff.
- [Ric75] RICH, R. M.; BILLMEYER, F. W.; HOWE, W. G.: Method for deriving color-difference-perceptibility for surface-color samples. J. Opt. Soc. Am. V65 N8 (1975) p. 956 ff.
- [Ric80] RICHTER, M.: Einführung in die Farbmeterik. 2. Aufl. Berlin: de Gruyter, 1980.