

*Stubenrauch, Nicole; Schierz, Christoph*

***Variation von Spektralwertfunktionen für unterschiedliche Probanden und Lichtsituationen***

**URN:** <urn:nbn:de:gbv:ilm1-2017200282>

---

*Original published in:*

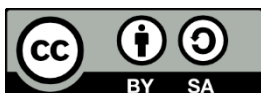
Licht 2016 : Karlsruhe, 25.-28. September : Tagungsband - Proceedings. - Karlsruhe: KIT Scientific Publishing. - (2016), p. 739-746.

*Original published:* 2016

*ISBN:* 978-3-7315-0564-8

*DOI:* [10.5445/KSP/1000057817](https://doi.org/10.5445/KSP/1000057817)

[*Visited:* 2017-05-15]



This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License (CC BY-SA 3.0 DE)  
<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>

# Variation von Spektralwertfunktionen für unterschiedliche Probanden und Lichtsituationen

Stubenrauch, N.; Schierz, Ch., TU Ilmenau

## Problemstellung und Forschungsfragen

LEDs gleicher Farbtemperatur und gleichen Farbortes können für verschiedene Beobachter sehr unterschiedlich aussehen, da die bekannten Spektralwertfunktionen nicht alle Spektren gut beschreiben. Außerdem sind die Funktionen für alle Probanden und Versuchsbedingungen einheitlich. Aber welchen Einfluss hat die Linsenvergilbung und Charakteristik der Makula? Wie beeinflussen andere Umstände, wie das Streulicht im Auge und das genutzte Spektrum, die Farbwahrnehmung?

## Stand der Wissenschaft/Technik

Der Großteil der heutigen Messtechnik nutzt die Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 für das 2° Beobachterfeld. Daneben existieren verschiedene andere Spektralwertfunktionen, zum Beispiel die der CIE 1964 (10°) oder die Funktionen der CIE von 2006. Des Weiteren gibt es jüngere Untersuchungen von CSUTI und POLSTER, deren Funktionen eine deutlich bessere Übereinstimmung von berechneter und wahrgenommener Farbe erreichen. Es ist zu vermuten, dass einige Funktionen besser für ältere Probanden, für Versuchsbedingungen mit einem großen Beleuchtungsniveau oder andere Rahmenbedingungen, passen. Außerdem ist der Einfluss der Beobachterfeldgröße wichtig (2° oder 10°).

## Forschungshypothesen

- Die Spektralwertfunktionen unterschiedlicher Altersgruppen und Versuchsbedingungen, wie der Leuchtdichte, unterscheiden sich signifikant voneinander.
- Der Einfluss des Alters tritt beim Vergleich von LED-Lichtfeldern abhängig vom Spektrum unterschiedlich stark hervor. Für jedes Spektrum kann ein Metamerieindex rechnerisch hervorgesagt werden.
- Der Einfluss der retinalen Leuchtdichte tritt beim Vergleich von LED-Lichtfeldern abhängig vom Spektrum unterschiedlich stark hervor. Für jedes Spektrum kann ein Metamerieindex rechnerisch hervorgesagt werden.

## Versuchsaufbau

Der Proband bewertet Farbunterschiede in einem mittig geteilten, kreisrunden, leuchtendem Testzeichen, umgeben von einer gleichmäßigen Beleuchtung. Beide Feldhälften unterscheiden sich im Spektrum, wobei der Farbort gleich bleibt. Das Referenzfeld bleibt gleich und das Testfeld variiert in einem Muster von etwa 100 Farbörtern. Durch sechs farbige und drei weiße LEDs, mit denen die Spektren flexibel erzeugt werden, können unterschiedlichste Kombinationen von den Probanden bewertet werden.

## Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

In bisherigen Studien haben die Funktionen von POLSTER unabhängig vom Alter der Probanden die besten Ergebnisse geliefert. Die Untersuchung der Linsenvergilbung zeigt wie erwartet eine große Streuung und erschwert die Gruppierung der Probanden.

# Variation of the color matching functions for different subjects and lighting situations

Stubenrauch, N.; Schierz, Ch., TU Ilmenau

## Research issue

LEDs with identical color temperatures and chromaticity coordinates do not always appear the same for a human observer. This is due to the fact, that the known color matching functions are not fully appropriate for most of the spectra. There cannot be one color matching function for all people and circumstances. But which differences exist between people of different states of lens-yellowing and different characteristic of the macula? How do other circumstances, like more scattered light or a spectrum with more peaks, influence the color perception?

## State of science/technology

The majority of color measurement devices use the CIE 1931 tristimulus values for the 2° visual angle observer. However, other color matching functions exist, for example the CIE 1964 (10°) values or the functions published by CIE in 2006. In addition recent investigation from CSUTI and POLSTER results in better fitting curves. Maybe some set of curves are best for older people or for other viewing conditions, like different luminance levels. Equally important is the influence of the viewing field size (2° or 10°).

## Research hypothesis

- Color matching functions, best fitting for different groups of conditions differ significantly.
- The influence of the age on color perception differs dependent on the spectrum. A metamerism index can be predicted.
- The influence of the retinal luminance on color perception differs dependent on the spectrum. A metamerism index can be predicted.

## Experimental setup

The subject has to evaluate color differences between two semicircular luminous areas. It is placed in front of a uniform illuminated field, looking at the test symbol. Each area contains another spectrum, but nearly the same color coordinates. One semicircular area remains steady as a reference. The other changes its color within a narrow pattern of about 100 chromaticity points. The provided LEDs of the circular test symbol are white (2700 K, 4100 K, 6560 K) and colored (dominant wavelengths 655 nm, 627 nm, 505.5 nm, 530 nm, 447.5 nm and 470 nm). Thereby different combinations of spectra can be investigated by diverse subjects.

## Results in comparison with previous findings

In previous studies POLSTER`S color matching functions show the best agreement between color difference and human perception, independent to the subject age. The estimation of the lens yellowing demonstrates the huge variance between observers and make grouping difficult.

# Variation von Spektralwertfunktionen für unterschiedliche Probanden und Lichtsituationen

*Stubenrauch, N.; Schierz, Ch.,  
Fachgebiet Lichttechnik / TU Ilmenau  
Postfach 100565, 98693 Ilmenau*

## Zusammenfassung

Um aus spektralen Verteilungen Farbkoordinaten zu berechnen existieren seit 1931 die 2° Normspektralwertfunktionen der CIE, welche den farbmtrischen Normalbeobachter definieren. Von Anfang an standen diese Funktionen unter Kritik, weil der Unterschied zwischen Normalbeobachter und individueller Farbwahrnehmung groß sein kann. Dies fällt besonders bei LED-Anwendungen auf. Es wurden weitere alternative Spektralwertfunktionen vorgeschlagen. Aufgrund der Unterschiede zwischen den Menschen (z.B. Alterseinflüsse) und den Versuchsbedingungen (z.B. Beleuchtungsniveau, Spektren im Umfeld, Feldgröße) unterscheiden sich diese stark. Hier wird untersucht, wie verschiedene Einflüsse die Spektralwertfunktionen verändern und wie man den Restfehler mit Metamerieindexen beschreiben kann um diese für Anwendungen korrigieren zu können.

## 1 Motivation

### 1.1 Bekannte Spektralwertfunktionen und ihre Unterschiede

LEDs mit identischem Farbort können für unterschiedliche Beobachter stark unterschiedlich aussehen. Messtechnisch werden die Farbörter meist mit den Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 [CIE 15:2004] bewertet und gebinnt. Neben diesen gibt es noch weitere Spektralwertfunktionen für 2° und 10°-Beobachterfeldgröße. Zum Beispiel die Normspektralwertfunktionen der CIE von 1964 für 10°-Felder [CIE 15:2004] und ihre Nachfolger von 2006 (2° und 10°) [CIE 170-1:2006]. Außerdem wurden weitere Variationen der bekannten Funktionen vorgeschlagen. So haben JUDD & VOS [Ops86] bereits 1978 die Funktionen von 1931 überarbeitet und weiterentwickelt. CSUTI & SCHANDA [Csu11] sowie POLSTER [Pol14] haben an Beispielen gezeigt, dass durch eine Verschiebung der angenommenen Empfindlichkeit der S-Zapfen die Übereinstimmung von messtechnisch metameren Spektren mit der visuellen Empfindung deutlich verbessert werden kann.

Bei dieser Vielfalt an Untersuchungen und Spektralwertfunktionen wird deutlich, dass es keine allgemeingültigen Funktionen geben kann, die mit dem Sehen aller Menschen gut übereinstimmt. Zu dieser Erkenntnis ist auch SARKAR gekommen und hat in seinen Untersuchungen acht Beobachtergruppen klassifiziert [Sar10]. Diese Gruppen unterscheiden sich teilweise sehr deutlich in ihren Spektralwertfunktionen. In der Praxis weist dieses Verfahren jedoch große Probleme auf, da immer Beobachter verschiedener Gruppen eine Lichtsituation betrachten.

Viele Ursachen für die Unterschiede in den Spektralwertfunktionen sind bekannt [Web88]. Teilweise sind diese auf die unterschiedlichen Versuchsbedingungen zurückzuführen. Je nach verwendeter Leuchtdichte bei Objekt und Umfeld schwankt der Einfluss der Stäb-

chen [Sti58] und durch die Wahl von Größe und Anordnung des Testzeichens beeinflusst die Gelbfärbung der Makula die Farbwahrnehmung unterschiedlich.

Auch die Probandengruppen unterscheiden sich zwischen den Versuchen deutlich. Durch das unterschiedliche Alter ist die Linsenvergilbung unterschiedlich stark ausgeprägt und verändert die Spektren auf der Netzhaut teilweise deutlich [Pok87]. Außerdem ist bekannt, dass es nicht nur drei Gruppen von Zapfen gibt, sondern diese Untergruppen aufweisen. Es gibt bisher jedoch keinen einfachen Test um die Häufigkeit der Untergruppen von Zapfen zu ermitteln.

Es ist also durchaus möglich, dass alle Studien für ihren Versuchsaufbau und für ihr Probandenkollektiv die bestmöglichen Spektralwertfunktionen ermittelt haben. Diese stellen jedoch nicht die bestmögliche Lösung für die Allgemeinheit dar.

## **1.2 Alterseinfluss**

Wie zuvor erwähnt, verändert sich die menschliche Linse im Alter, sie vergilbt. Es steht außer Frage, dass sich die Transmission absolut und spektral verringert und sich dadurch die Spektralwertfunktionen verändern. In vielen bisherigen Untersuchungen hat sich aber gezeigt, dass altersabhängige Funktionen, wie sie mit den Normspektralwertfunktionen der CIE von 2006 existieren, keine guten Übereinstimmungen zu den visuellen Urteilen liefern. Funktionen, welche altersangepasst sind, ergeben keine signifikant besseren Abgleichergebnisse als die Standardfunktionen für 32-jährige Probanden [Nor93]. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Linsenalterung sich zwischen den Menschen, auch unter Ausschluss von Augenkrankheiten, wie dem grauen Star, sehr stark unterscheidet. Die genauen Ursachen für diese Unterschiede sind unklar. Eine Vermutung liegt im Ausmaß der okularen UV-Exposition [Pok87].

## **1.3 Einfluss der Leuchtdichten von Testzeichen und Umfeld**

Ein großer Unterschied der bekannten Untersuchungen liegt in den Leuchtdichten von Testzeichen und Umfeld. Je nach retinalem Beleuchtungsniveau unterscheidet sich der Einfluss der Stäbchen auf die Farb- und Helligkeitswahrnehmung deutlich [Sti58].

Frühe Untersuchungen haben mit Temperaturstrahlern und entsprechenden Filtern gearbeitet, um Spektren gezielt zu verändern und Farbörter zu erreichen. Da man sich vor allem mit Körperfarben beschäftigt hat, wurden in Versuchsaufbauten nur vergleichbar geringe Leuchtdichten verwendet. Heute wird der Einfluss von hohen Leuchtdichten immer wichtiger, da sie auch in der Praxis verwendet werden. Der Unterschied der Beleuchtungsstärke im Auge und folglich auch der Beteiligung der Stäbchen soll untersucht werden.

## **1.4 Metamerieindex**

Selbst unter der Annahme eines idealen Normalbeobachters gibt es immer noch Diskrepanzen zwischen wahrgenommenen und rechnerisch identischen Farben. Aufgrund von Intra- und Interbeobachterstreuungen (z.B. unterschiedliche Untergruppen einzelner Rezeptoren [Sto08]) wird es immer einen Bereich und keinen exakten Wert für einen Abgleich geben. Außerdem ist es oft der Fall, dass verschiedene Probandengruppen (z.B. verschiedene Altersklassen) Farben zusätzlich aus verschiedenen Beobachterfeldgrößen se-

hen. Daher ist es wichtig abschätzen zu können, wie groß der Einfluss dieser Unterschiede für das jeweilige verwendete Spektrum ist.

Mit dem Metamerieindex für Beobachterfeldgröße (MIB) hat POLSTER eine Möglichkeit geliefert, diesen Einfluss zu beschreiben [Pol14]. Dabei gleicht sie zwei Spektren im  $2^\circ$  Farbraum aufeinander ab und berechnet im Anschluss den Farbabstand im  $10^\circ$  Farbraum. Der Farbabstand in der UCS-Farbtabelle der CIE von 1976 stellt dann den Wert für den MIB dar. Dabei hat sich gezeigt, dass der MIB in einem für die Praxis bedeutenden Bereich variiert.

## 2 Forschungsfragen

- Die Spektralwertfunktionen unterschiedlicher Altersgruppen und Versuchsbedingungen, wie der Leuchtdichte, unterscheiden sich signifikant voneinander.
- Der Einfluss des Alters tritt beim Vergleich von LED-Lichtfeldern abhängig vom Spektrum unterschiedlich stark hervor. Für jedes Spektrum kann ein Metamerieindex rechnerisch hervorgesagt werden.
- Der Einfluss der retinalen Beleuchtungsstärke tritt beim Vergleich von LED-Lichtfeldern abhängig vom Spektrum unterschiedlich stark hervor. Für jedes Spektrum kann ein Metamerieindex rechnerisch hervorgesagt werden.

## 3 Versuchsvorbereitung

### 3.1 Mechanischer Aufbau

Zur Untersuchung wurde eine Abmusterungskabine entworfen, welche eine Vielzahl an Variationen an Testzeichen und Umfeld erlaubt (Abb. 1) [Haa15].

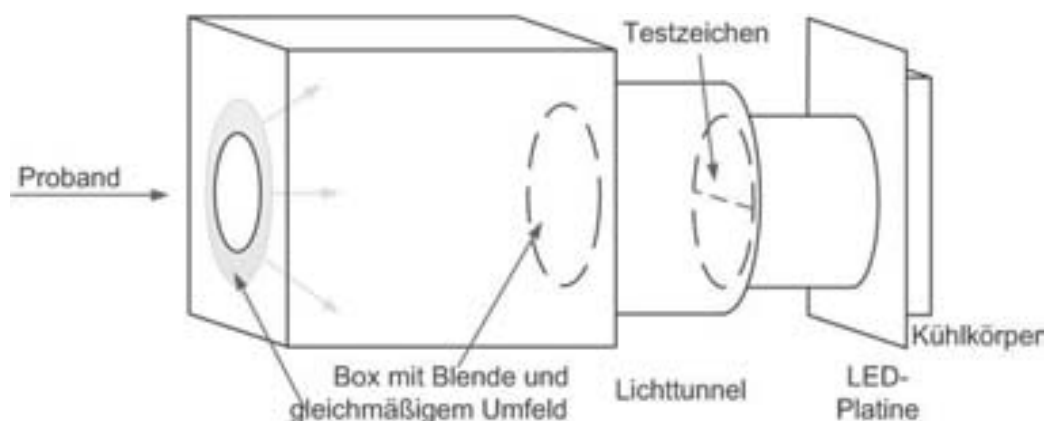


Abb. 1: Versuchsaufbau zur Bewertung von Farbunterschieden

Der Proband sitzt auf einem höhenverstellbaren Stuhl vor der Box (L: 1,37 m; B: 0,66 m, H: 0,66 m). Der Kopf ist mit Hilfe einer Kinn-Kopf-Stütze fixiert. Die Betrachtung des Testzeichens erfolgt monokular. Beim Blick in die Box ist das Testzeichen etwa 1 m entfernt. Mit Hilfe einer Blende 0,3m vor dem Testzeichen kann dessen sichtbare Größe variiert werden. Hier sind Beobachterfeldgrößen von  $2^\circ$  und  $10^\circ$  vorgesehen. Durch einen Lichttunnel wird der Einfluss der Umfeldbeleuchtung auf das Testzeichen minimal gehalten. Eine LED-Platine zur Erzeugung der Testzeichenspektren ist hinter einem Mischzylinder, bestehend aus zwei Kammern, angebracht und kann bei Bedarf getauscht werden.

### 3.2 Spektren

Die LED-Platine im Versuchsaufbau ist, genau wie der Mischzylinder und das Testzeichen, in zwei Teile geteilt. Auf jeder befinden sich sechs verschiedene farbige LEDs (dominante Wellenlängen von 655nm, 627nm, 505,5nm, 530nm, 470nm, 447,5nm), sowie drei weiße LED-Typen unterschiedlicher ähnlichster Farbtemperatur (2700K, 4100K, 6560K). Durch diese verschiedenen LEDs kann ein großer Gamut aufgespannt (Abb. 2) und eine Vielzahl an Spektralverteilungen realisiert werden.

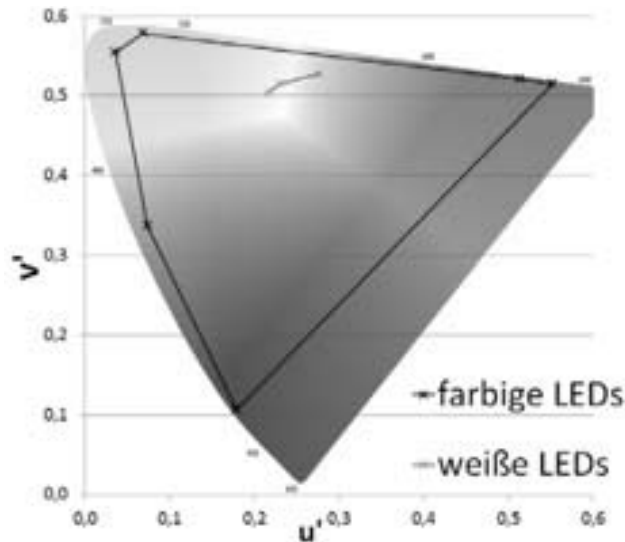


Abb. 2: Gamut, welcher mit den verwendeten LEDs aufgespannt wird

Für die Umfeldbeleuchtung wurden die weißen LEDs genutzt, welche auch auf der Platine verbaut sind. Die Umfeldbeleuchtung kann somit im weißen Bereich weitgehend an die Farbe des Testzeichens angepasst werden, sodass sie sich nur im Spektrum unterscheiden.

### 3.3 Verfahren

Mit einer selbst erstellten Software ist es möglich, ein Raster von Farbörtern in einem zuvor festgelegten Farbenraum zu definieren (voreingestellt sind CIE 1931 2°, CIE 1964 10°, CIE 2006 2° & 10°, TUIL 06 2° & 10°). Im Versuch wird eine Testzeichenhälfte als Referenz konstant bleiben und die zweite innerhalb eines Rasters (Abb. 3) leicht variiert. Beide Spektren sind dabei, trotz gleichen Farbortes, deutlich unterschiedlich. Aufgabe des Probanden wird es sein, die beiden Hälften des Testzeichens auf Gleichheit zu bewerten.

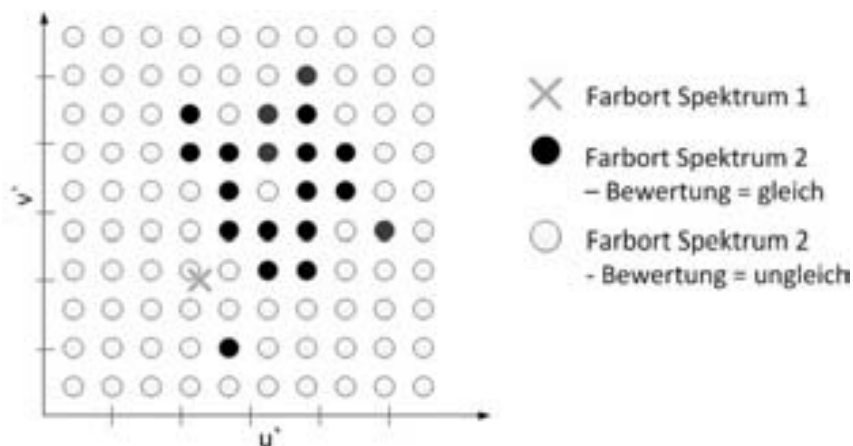


Abb. 3: Raster der abzufragenden Farbörter

Für die Durchführung der Versuche wird es verschiedene Kombinationen an Spektren mit unterschiedlichen Primärwellenlängen geben. Außerdem wird mit der Umfeldleuchtdichte der Einfluss von Streulicht im Auge variiert. Die Farbe des Umfeldes wird, wie zuvor beschrieben, an das Testzeichen angepasst.

### **3.4 Probanden**

Bei dem zu wählenden Probandenkollektiv ist darauf zu achten, dass einzelne Probandengruppen gut abgrenzbar sind. So sind mindestens zwei Altersgruppen zu wählen, welche zur genaueren Charakterisierung auf ihre Linsenvergilbung untersucht werden. Die Farbtüchtigkeit aller Probanden wird vor dem Versuch getestet.

Um die Intraobserverstreuung zu ermitteln, wird eine kleine Probandengruppe mehrmals zu unterschiedlichen Tageszeiten untersucht. Außerdem werden beide Augen einzeln getestet.

### **3.5 Flimmerphotometer**

Zur Einschätzung der Linsenalterung wurde ein Flimmerphotometer entworfen, mit welchem es möglich ist, die Vergilbung zu ermitteln. Die Probanden werden in Altersgruppen sortiert und Abschätzungen zur Auswirkungen auf die Farbwahrnehmung getroffen. [Pöh16]

## **4 Auswertung**

### **4.1 Beste Spektralwertfunktionen**

Im Anschluss an die Versuche werden die Antworttraster der Probanden für die verschiedenen Umfeldbedingungen und Spektren ausgewertet. Für verschiedene Farbsysteme wird der Farbort vom Referenzspektrum sowie der Mittelwert, der mit gleich bewerteten Testspektren, berechnet. Somit wird das beste Farbsystem für die jeweilige Probandengruppe ermittelt. Dabei wird auch untersucht, welche Verschiebung der Spektralwertfunktion des S-Zapfens für welche Altersgruppe die beste Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den wahrgenommenen Werten ergibt.

### **4.2 Metamerieindex für LEDs**

Um die Unsicherheiten zwischen den Probanden beschreiben zu können, erfolgt eine Analyse von Ausdehnung und Orientierung der mit gleich bewerteten Farbörter. Je weiter die Probandenurteile streuen, umso größer ist der entsprechende Metamerieindex. Die Indexe für die Metamerie für verschiedene Beobachterwinkel, Umgebungsleuchtdichten und Altersgruppen sollen zu einem Robustheitsmaß für das Spektrum vereint werden. Dieser drückt aus, wie stark sich die Wahrnehmung einer Lichtquelle für verschiedene Beobachter und unterschiedliche Betrachtungsbedingungen ändert. Außerdem gilt es allgemeingültige Regeln zu finden, mit denen auch neue Spektren bewertet werden können.



## 5 Ausblick

Ziel der Untersuchung ist es festzustellen, wie sich die Spektralwertfunktionen für verschiedene Probandengruppen und Versuchsbedingungen unterscheiden. Für ideale Spektralwertfunktionen können die Abweichungen mit einem Robustheitsmaß, zusammengesetzt aus mehreren Metamerindexen, beschrieben werden.



Die Untersuchungen finden in Zusammenarbeit mit den Praxispartnern OSRAM Opto Semiconductors GmbH und Zumtobel Lighting GmbH statt und wurde im Rahmen des Projektes UNILED II (Förderkennzeichen: 13N13395) vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

## 6 Quellen

- [Sto08] Stockman, A.: Physiologically-based color matching functions. In (Society for Imaging Science and Technology Hrsg.): 16<sup>th</sup> Color and Imaging Conference. Final Program and Proceedings, 2008; 1-5 (5).
- [Ops86] Opstelten, J.; Rinzema, G.; Stierum, A.: New Insights in chromaticity and tolerance areas of fluorescent lamps. Report: LA 1005/86, 1986
- [Csu11] Csuti, P. et al.: Improved color matching functions for better visual matching of LED sources. In (CIE Hrsg.): 27th Session, 2011; S. 10–15
- [Pol14] Polster, S.: Neue Spektralwertfunktionen für die korrekte Bewertung von LED-Spektren und Einführung eines Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit. Dissertation, Ilmenau, 2014
- [Sar10] Sarkar, A. et al.: Toward Reducing Observer Metamerism in Industrial Applications: . Colorimetric Observer Categories and Observer Classification. In (Society for Imaging Science and Technology Hrsg.): 18th Color and Imaging Conference. Final Program and Proceedings, 2010; S. 307–313 [10]
- [Web88] Webster, M. A.; MacLeod, D. I.: Factors underlying individual differences in the color matches of normal observers. In Journal of the Optical Society of America, 1988; S. 1722–1735
- [Sti58] Stiles, W. S.; Burch, J. M.: N.P.L. Colour-matching Investigation: Final Report. In International Journal of Optics, 1958, 1958; S.1–26.
- [Pok87] Pokorny, J.; Smith, V. C.; Lutze, M.: Aging of the human lens. In Applied Optics, 1987, 1987; S. 1437–1440
- [Nor93] North, A. D.; Fairchild, M. D.: Measuring Color-Matching Functions Part II. New Data for Assessing Observer Metamerism. In Color Research & Application, 1993; S. 163–170]
- [Smi94] Smith, G. et al.: Color recognition and discrimination under full-moon light. In Applied Optics, 1994; S. 4741–4748
- [Sto08] Stockman, A.: Physiologically-based color matching functions. In (Society for Imaging Science and Technology Hrsg.): 16<sup>th</sup> Color and Imaging Conference. Final Program and Proceedings, 2008; 1-5 (5).
- [Haa15] Haag, S.; Hartwig, U. M.: Aufbau einer Untersuchungskabine zur Abmusterung von Lichtfarben. Projektseminar, Ilmenau, 2015
- [Pöh16] Pöhler, S.; Batuchtin, I.; Zhi, S.: Aufbau eines Flimmerphotometers zur Untersuchung der altersabhängigen Vergilbung der Augenlinse. Projektseminar, Ilmenau, 2016