

Verfahren zur quantitativen Erfassung der subjektiven Bewertung der Farbwiedergabeeigenschaften von Lampen mit unterschiedlichen Spektren

Sylvio Ring
TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik
PF 100565
D- 98693 Ilmenau
Sylvio_Ring@web.de

1. Einleitung

Die Farbwiedergabe ist ein Qualitätsmerkmal einer Lichtquelle. Die Farbwiedergabe der CIE charakterisiert, wie ähnlich die Körperfarbe eines Gegenstandes unter einem Testlicht zur Körperfarbe eines Gegenstandes unter einer Bezugslichtquelle wirkt. In Anlehnung an diesen Sachverhalt wurde eine Hybridlampe als Testlichtquelle, bestehend aus einer Kompaktleuchtstofflampe und LED-Modulen hinsichtlich ihrer Farbwiedergabeeigenschaften mit Hilfe von Probanden untersucht. Ein Halogenscheinwerfer mit seinem kontinuierlichen Strahlungsspektrum wurde als Vergleichsleuchte verwendet.

In zurück liegenden Forschungsarbeiten hat sich gezeigt, dass die bisherige Bewertung mit den Farbwiedergabeindices (z.B. CIE- R_a) die Güte der Farbwiedergabe bei diskontinuierlich spektralen Lampen, wie bei LEDs, nur unzulänglich gedeutet werden konnte. Bei einer guten visuellen Bewertung konnte dennoch ein schlechter Farbwiedergabeindex bestimmt werden. Eine Möglichkeit zur Verbesserung dieses Umstands bietet beispielsweise der subjektive Bewertungsindex (SBI) nach Jungnitsch [1], bei dem die individuellen Einschätzungen des Beobachters berücksichtigt werden. Zur Bewertung der subjektiven Beurteilung der Farbwiedergabe wurde ein Fragebogen ebenfalls nach Jungnitsch herangezogen.

Im Verlauf dieser Arbeit wurde des Weiteren nach Möglichkeiten gesucht, die qualitativen Befragungsergebnisse quantitativ zu erfassen. In der Vergangenheit trat während der subjektiven Bewertung der Testfarben ein Problem auf. Die Beobachter nahmen zwar einen Unterschied wahr, aber eine betragsmäßige Beschreibung der wahrgenommenen Farbunterschiede war nicht möglich. Hierfür sollte nach Methoden und Ansätzen gesucht werden, um diesen fehlenden Sachverhalt zu beschreiben.

2. Messaufbau

Neben vielen anderen Möglichkeiten zur Bewertung von Körperfarben, ist der direkte Vergleich der dargebotenen identischen Testfarben mit Hilfe von Untersuchungsteilnehmern am besten geeignet. Die Vorgaben für die Konstruktion beziehen sich auf die Ausführungen nach Lang und Jungnitsch [2], [1]. Es wurde ein Lichtsimulator (Bild 1) aufgebaut, welcher durch eine Trennwand in zwei Lichtboxen aufgeteilt wurde, sodass dem Beobachter zum Vergleich zwei unterschiedlich beleuchtete identische Körperfarben

dargeboten werden können. Der Proband nimmt gleichzeitig zwei unabhängige Lichtsituationen wahr, wobei sich jeweils ein Auge auf eine Lichtsituation anpasst. Dieser Zustand wird als haploskopisches Sehen bezeichnet. Beide Boxen besitzen die gleichen geometrischen Dimensionen, um störende Einflussgrößen während des Farbenvergleiches ausschließen zu können. Unterschiedliche Abmessungen könnten den Probanden bezüglich seiner Aufmerksamkeit beeinflussen und Auswirkungen auf die Messwerte haben. Alle Wände und die Bewertungsflächen der Lichtboxen sind in diesem Fall mit mattweißen Karton bespannt, welcher über aselektive Reflektionseigenschaften verfügt. Unerwünschte Effekte wie Reflektion, Blendung und Farbeinflüsse sollen so vermindert werden. In jeder Lichtbox wurde eine Lichtquelle installiert. Beide Lichtquellen unterscheiden sich bezüglich ihrer spektralen Strahlungsverteilung.

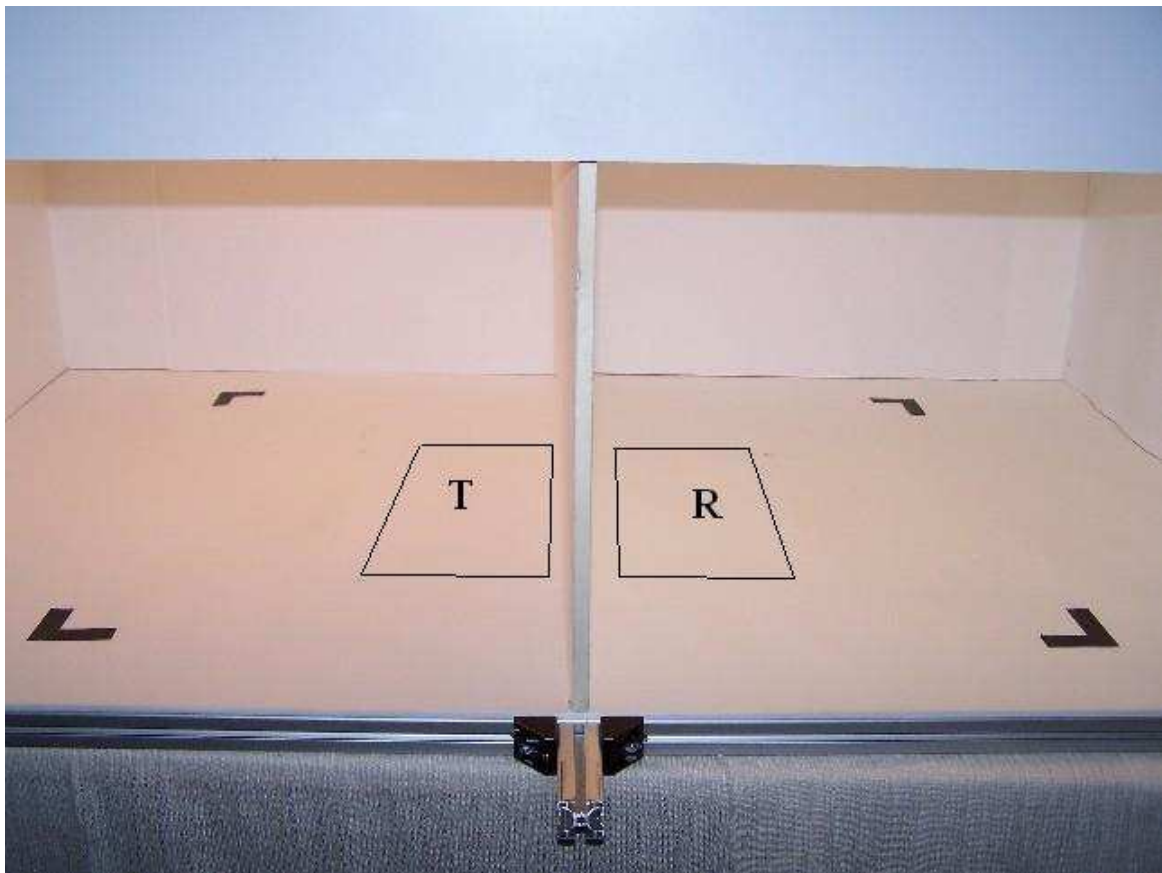


Bild 1, Lichtsimulator mit Bewertungsebenen: links Testlichtseite (T), rechts Referenzlichtseite (R)

Eine Hybridlampe, als Kombination aus Kompaktleuchtstofflampe und LED, beleuchtet die linke Lichtbox (Testlichtseite). Diese Lichtquelle besitzt ein diskontinuierliches Strahlungsspektrum und stellt die zu untersuchende Lichtquelle dar. Ein Halogenscheinwerfer beleuchtet die rechte Lichtbox (Referenzlichtseite). Diese Lampe mit ihrem kontinuierlichen Strahlungsspektrum kommt als Vergleichslichtquelle zum Einsatz.

3. Bewertung der Farbproben

Bevor die Untersuchung mit Probanden beginnen konnte, mussten bestimmte Voraussetzungen erfüllt werden. Um die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können, sollten in beiden Lichtboxen gleiche Beleuchtungsstärken (500 lx) und ähnlichste Farbtemperaturen (jeweils 3000 K und 6000 K) realisiert werden.

Es wurden 20 Personen verschiedenen Alters befragt. Die meisten Teilnehmer wiesen ein Alter zwischen 18 und 30 Jahren auf. Die Probanden wurden vor den Lichtsimulator positioniert. Die Versuchsdurchführung kann grob in 2 Phasen unterteilt werden. In der ersten Phase wählt der Proband selbst die Farbtonstufe unter Referenzbeleuchtung, die der Testfarbe unter Testbeleuchtung am ähnlichsten erscheint. Eine Anbindung an ähnliche Spektren soll dadurch realisiert werden (Abschnitt (5) und Bild 2). In der anschließenden zweiten Phase findet die subjektive Bewertung mit Hilfe eines Fragebogens statt. Hierbei wird die identische Farbprobe, jeweils unter Test -und Referenzbeleuchtung, vorgegeben. Alle übrigen Farbproben werden verdeckt, um farbliche Vermischungseffekte zwischen den dargebotenen Farbproben zu verhindern. Die Anbindung an die subjektive Bewertung nach Jungnitsch soll damit gewährleistet werden (Abschnitt (5) und Bild 3). Im Verlauf dieser zweiten Phase wird der Proband zu den wahrgenommenen Unterschieden der Farbproben befragt (Helligkeit, Leuchtkraft, Reinheit, Kräftigkeit, Farbton, Natürlichkeit und Gefallen der Testfarbe bezogen auf die Farbe unter Referenzlicht). Der Versuchsleiter notiert die abgegebene Bewertung in dem Fragebogen.



Bild 2; Phase 1: Auswahl der ähnlichsten Farbprobe



Bild 3; Phase 2: subjektive Bewertung identischer Farbproben

Die Lampenbewertung erfolgt anhand von 19 Körperfarben (Tabelle 1). Für diese Untersuchung werden Farbprobenäquivalente verwendet, welche an die CIE-Farben (1-8, 13, 14) sowie den Colorchecker von Gretag Macbeth angelehnt sind. Die Testfarben wurden der Baumann-Farbkarte entnommen. Die Farben wurden nach einem visuellen Abgleich in Farbgruppen ähnlichster Farbart zusammengefasst, da der Farbreiz einer Körperfarbe immer von in der Umgebung vorhandenen Körperfarben beeinflusst wird. Folgende Farbgruppen ergaben sich dabei: Rot, Gelb, Grün, Blau, Violett, Hautfarben und Unbunt.

Rot	Gelb	Grün	Blau
Hautfarben CIE (422)	Gelb CC (587)	Blattgrün CIE (849)	Hellblau CIE (1147)
Orange CC (415)	Gelborange CC (529)	Gelbgrün CC (766)	Cyan CC (1058)
Rot CC (264)		Blaugrün CC (1008)	Violettblau CC (1185)
Moderates rot CC (236)		Grün CC (912)	
Violett	Hautfarben	Unbunt	
Flieder CC (1240)	Altrosa CIE (313)	Weiß CC (168)	
Magenta CC (1301)		Grau 5 CC (68b)	
		Schwarz CC (14 X)	

Tabelle 1, Verwendete Testfarben aus CIE- und Colorcheckeräquivalenten (CIE, CC), in Klammern: Baumann-Bezeichnung

Als Beispiel ist in Bild 4 rechts die Palette der Farbgruppe Rot für die Referenzbeleuchtung dargestellt. Auf der linken Seite im selben Bild sind die zugehörigen Testfarben der CIE- und Colorcheckeräquivalente auf einem Streifen für die Testbeleuchtung angeordnet. Alle Farben auf dem Teststreifen sind auch auf der Farbpalette vertreten. Diese Anordnung der Farbproben unter dem Lichtsimulator gilt analog für die übrigen Farbgruppen.

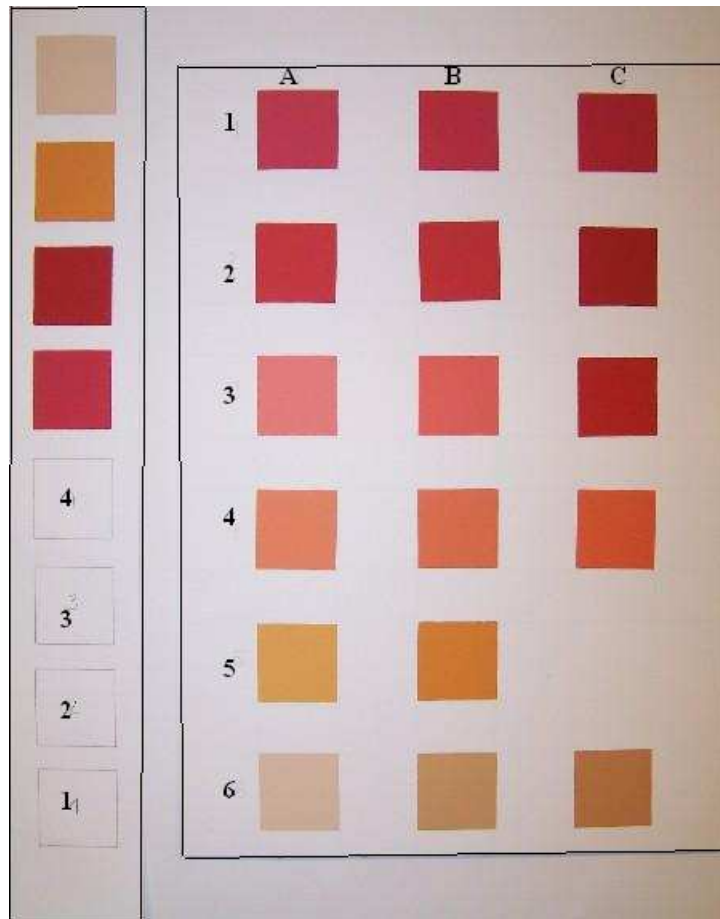


Bild 4, links: zu bewertende Testfarben; rechts: Farbpalette für die Wahl der ähnlichsten Probe

4. Auswertung

Die erhaltenen Messwerte aus der subjektiven Bewertung wurden einer Faktoranalyse unterzogen. Die abgefragten Merkmale wurden zu den Parametern Sättigung, Helligkeit und Temperatur zusammengefasst. Aus diesen Einzelwerten wurde für jede Lichtquelle der subjektive Bewertungsindex SBI nach Jungnitsch berechnet. Liegt der SBI-Wert bei 100, so wurden keine Unterschiede zwischen den Körperfarben unter Test- und Referenzlichtquelle wahrgenommen. Liegt der SBI unter dem Wert 100, so wurden die Testfarben anders wiedergegeben, als die identischen Farben unter dem Referenzlicht.

5. Quantitative Anbindung

Im nächsten Schritt sollte überprüft werden, ob sich die ermittelten Daten quantifizieren ließen. Die Probanden sahen zwar den Unterschied zwischen den Farbproben unter Test- und Referenzlichtquelle, aber eine Angabe über die Größe des Abstandes war nicht möglich. Das Problem ist ersichtlich. Die Datenbasis ist hinsichtlich ihres Skalenniveaus maximal ordinalskaliert. Die Kategorien lassen sich in eine Rangfolge bringen, aber eine Beschreibung der Abstände zwischen den Kategorien kann nicht realisiert werden. Eindeutigere Ergebnisse könnte nur eine mindestens intervallskalierte (metrische) Datenmenge liefern, deren Merkmalsausprägungen sich quantitativ mittels Zahlen darstellen lassen. Dies bedeutet, dass Rangunterschiede und Abstände zwischen den Werten gemessen werden können. Da diese Intervallskalierung nicht vorlag, wurde der Versuch unternommen, über korrelative Zusammenhänge mindestens einen quantitativen Ansatz für die wahrgenommenen Farbunterschiede zu finden. Für Korrelationsberechnungen wurden die Methoden nach Spearman Rho und Pearson verwendet. Eine Möglichkeit für den quantitativen Ansatz bildeten die im CIELAB-Farbsystem berechneten Farbkoordinaten der Farbproben unter der Test- und der Referenzbeleuchtung. Eine andere Option für einen quantitativen Ansatz bietet eine Bewertungsfunktion $\epsilon(\lambda)$ und der spezielle Farbwiedergabeindex R_i . Diese Daten wurden mit den Medianen bzw. arithmetischen Mittelwerten der subjektiven Farbprobenbewertung verglichen. Tabelle 2 gibt einen Überblick zu allen untersuchten Verfahren.

Quantitative Anbindung an	Variablen der subjektiven Bewertung		SBI	
	Vergleich mit L*a*b*-Größen		Bewertungsfunktion $\epsilon(\lambda)$	Farbabstand ΔE^*ab
Verfahren	mit Datenreduktion	ohne Datenreduktion		
Korrelation	mittel	gering - sehr gering	gering	mittel - stark
Korrelation signifikant	s	s++	ns	s+
Skalierungsansätze möglich	ja	nein, wegen der geringen Korrelation	nein, wegen nicht signifikanter Ergebnisse	ja
Verbesserung der Ergebnisse durch	höhere Probandenzahl	höhere Probandenzahl, Extremwertbereinigung	Bewichtung kritischer Farben	keine
Bewertungsverfahren	gut geeignet	möglicherweise bessere Eignung bei höheren Probandenzahlen	gut geeignet, wenn die Methode signifikante Ergebnisse liefert	gut geeignet

Quantitative Anbindung an	ähnliche Spektren	
Verfahren	spezieller Farbwiedergabeindex R_i	Vergleich Farbabstand ΔE^*ab und Wahlhäufigkeit h_w
Korrelation	nicht untersucht	gering - mittel
Korrelation signifikant	nicht untersucht	s
Skalierungsansätze möglich	nein, Ergebnisse stellen keine Verbindung her	nein, wegen Einschränkungen in der Datenmenge
Verbesserung der Ergebnisse durch	nicht untersucht	Farbproben gleichmäßiger und gleichabständiger im Farbraum verteilen
Bewertung Verfahren	nicht geeignet	geeignet, bei verbesserter Farbprobenauswahl

Bewertung der Signifikanz	
nicht signifikant	ns
signifikant	s
sehr signifikant	s+
höchst signifikant	s++
Korrelationskoeffizient r	Bewertung der Korrelation
$0,0 < r \leq 0,2$	sehr gering
$0,2 < r \leq 0,4$	gering
$0,4 < r \leq 0,6$	mittel
$0,6 < r \leq 0,8$	stark
$0,8 < r \leq 1$	sehr stark

Tabelle 2, Zusammenfassende Aussagen zu allen Verfahren

5.1 Vergleich mit $L^*a^*b^*$ -Größen

Hierbei wird überprüft, ob korrelative Zusammenhänge zwischen den charakteristischen Größen des CIELAB-Farbsystems und einzelnen Variablen der subjektiven Bewertung bestehen. In der unten aufgeführten Tabelle 3 sind die $L^*a^*b^*$ -Rechengrößen ihrem äquivalenten Merkmal gegenübergestellt. Die Beurteilung der Ergebnisse ist in Tabelle 2 ersichtlich.

CIELAB-Datensatz	Variable der subjektiven Bewertung
Farbabstand ΔE^*ab	Allgemeiner Unterschied
Helligkeitsunterschied ΔL^*	Helligkeit
Buntheitsunterschied ΔC^*ab	Sättigung
Farbtonwinkelabstand Δh^*ab	Farbverschiebung

Tabelle 3, CIELAB-Größen mit Äquivalenten der subjektiven Bewertung

Einen zweiten Ansatzpunkt bildet der direkte korrelative Vergleich zwischen dem subjektiven Bewertungsindex SBI und dem Farbabstand ΔE^*ab . In diesem Fall entfällt der Vergleich mit einzelnen Variablen der subjektiven Bewertung (Tabelle 3). Der SBI wird aus den Einzelmerkmalen bzw. Variablen der subjektiven Bewertung abgeleitet. Die Korrelationskoeffizienten zeigen, im Vergleich zum oben aufgeführten Ansatz, einen stärkeren Zusammenhang zwischen den zu vergleichenden Größen auf (Tabelle 2, Spalte: SBI).

5.2 Methode einer Bewertungsfunktion $\varepsilon(\lambda)$

Für eine mögliche Anbindung zum subjektiven Bewertungsindex SBI wurden grundlegende Eigenschaften betrachtet. Die Bewertungsfunktion $\varepsilon(\lambda)$ wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\varepsilon(\lambda) = \sum |D(\lambda)| \beta(\lambda) d\lambda$$

Die Differenzfunktion $D(\lambda)$ ist definiert als die Differenz aus dem Spektrum der Testlichtquelle subtrahiert mit der spektralen Verteilung der Referenzlichtquelle (Bild 5). Unterschiede in der spektralen Verteilung sind die Ursache für die Wahrnehmung von Farbunterschieden zwischen zu vergleichenden identischen Farbproben.

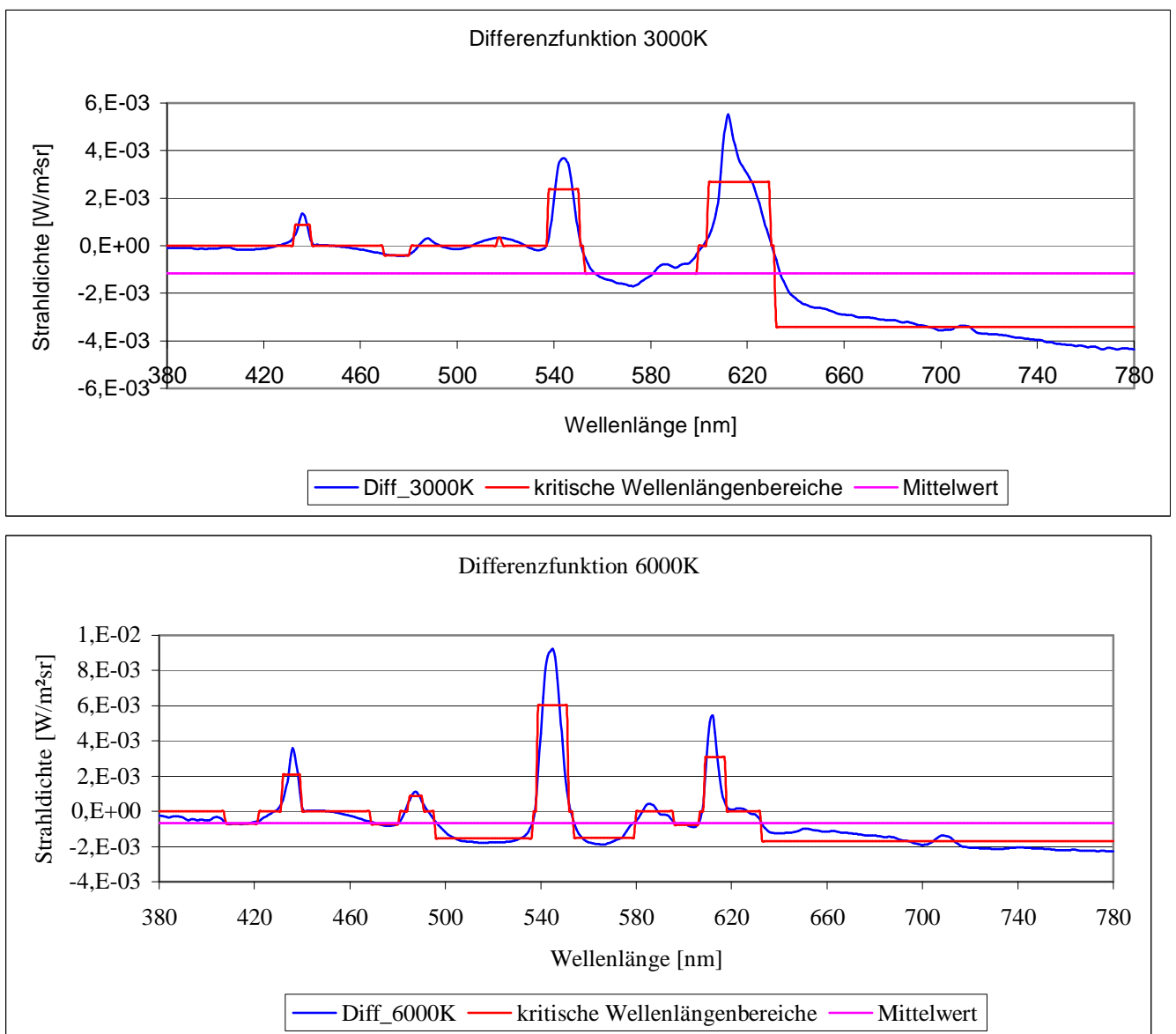


Bild 5, Differenzfunktionen bei 3000 K und 6000 K ähnlichster Farbtemperatur

Bestimmte Intervalle der Differenzfunktion beinhalten Extremwerte (Peaks in der Funktion; siehe Bild 5). Diese Intervalle werden als kritische Wellenlängenbereiche bezeichnet. Falls eine Farbprobe mit starker Ausprägung des Strahldichtefaktors $\beta(\lambda)$ im kritischen Wellenlängenbereich der Differenzfunktion liegt, sollte ein wahrnehmbarer Unterschied während der subjektiven Bewertung aufgetreten sein. Der Strahldichtefaktor ist definiert als der Quotient aus Farbreizfunktion $\phi(\lambda)$ der untersuchten Farbprobe zur Strahlungsfunktion $S(\lambda)$ der eingesetzten Lichtquelle:

$$\beta(\lambda) = \frac{\phi(\lambda)}{S(\lambda)}$$

Nach der Grundidee sollte das Ergebnis aus der Bewertungsfunktion einen indirekten Zusammenhang zum SBI herstellen. Ein großer $\varepsilon(\lambda)$ -Wert bedeutet einen großen wahrnehmbaren Unterschied und einen niedrigen SBI, ein hoher SBI sollte mit einem niedrigen $\varepsilon(\lambda)$ -Wert in Verbindung stehen. Bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt konnte jedoch noch kein korrelativer Zusammenhang nachgewiesen werden. Es zeigte sich, dass Helligkeitserscheinungen im Ergebnis die Farbeindrücke stark überwogen. Helle Farben neigten zu deutlich höheren $\varepsilon(\lambda)$ -Werten.

Trotz der fehlenden Korrelation (Tabelle 2), erscheint diese Methode ein viel versprechender Ansatz für eine quantitative Anbindung zum SBI zu sein. Eine Möglichkeit zur Problemlösung könnte in der Bewichtung der kritischen Farben liegen, welche sich bisher der korrelativen Verbindung entzogen haben.

5.3 Spezieller Farbwiedergabeindex R_i

Den Ausgangspunkt für diesen Ansatz bildete der Vergleich der Farbreizfunktion der Testfarbe unter Testbeleuchtung mit der Farbreizfunktion der identischen Testfarbe und der am meisten gewählten Testfarbe unter Referenzbeleuchtung. Es wurden R_i -Werte für identische und meist genannte Farbproben berechnet. Als kennzeichnende Lichtquelle wurde die Referenzlichtquelle verwendet. Jede Bewertung dieser Farbwiedergabemerkmale bezieht sich stets auf eine Bezugslichtart, die bekanntermaßen eine nahezu gleiche Farbart wie die zu kennzeichnenden Lichtquellen aufweisen soll. Die Bezugslichtart war in diesem Fall die Testlichtquelle. Die Berechnung des R_i für die zu bewertende Farbe erfolgte nach den Vorgaben der CIE 13.2. Die Überlegung war die, dass die Differenzen der R_i -Werte zwischen der Farbprobe unter Testbeleuchtung und meist genannter Farbprobe unter Referenzbeleuchtung kleiner wären, als die Differenzen der R_i -Werte der identischen Probenpaarung.

Der Vergleich erbrachte nicht die erhofften Ergebnisse. Dies kann mit der unterschiedlichen spektralen Verteilung der beiden Beleuchtungseinrichtungen erklärt werden. Dieses Verfahren erscheint ungeeignet für eine quantitative Anbindung an ähnliche Spektren.

5.4 Farbabstand ΔE^*_{ab} und Wahlhäufigkeit

Hierbei wird der Versuch unternommen, eine Korrelation zwischen der Wahlhäufigkeit ausgewählter ähnlichster Farbproben und dem zugehörigen ΔE^*_{ab} Farbabstand zwischen vorgegebener Farbprobe testseitig und der ähnlichsten gewählten Testfarbe auf der Referenzseite zu bestimmen. Die Überlegung für diesen Ansatz war folgende. Werden zwei Testfarben jeweils unter Test- und Referenzlicht als ähnlich zueinander wahrgenommen, sollten auch die Ergebnisse der zugehörigen Farbreizfunktionen ähnliche Werte aufweisen. Ähnliche Farbreizfunktionen bedeuten kleine Farbabstände. Dem Probanden wurde während der Befragung aufgetragen, die ähnlichste Farbprobe zu wählen. Es ist anzunehmen, dass die Wahlhäufigkeit der Probanden mit kleiner werdenden Farbabständen steigen wird. Einige Eigenschaften sind hierbei zu beachten. Die ungleichmäßige Farbprobenverteilung im Farbraum wird die Auswertung negativ beeinflussen. Farbproben mit großem Farbabstand könnten mitunter häufiger gewählt werden, da diese immer noch den kleinsten Abstand im Vergleich zu anderen Farben im Wahlbezirk aufweisen. Die Wahlhäufigkeit kann sich bei zu vielen Proben nahe der vorgegebenen Farbe in viele kleine Einzelwerte zerstreuen. Diese Methode besitzt auf Grund der genannten Nachteile keine hohe Aussagekraft.

Eine Möglichkeit zur Verbesserung liegt in der Auswahl der Farbproben. Die Farbörter vorgegebener und wählbarer Testfarben sollten gleichmäßiger und gleichabständiger im Farbenraum verteilt sein.

6. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden verschiedene Ansätze für eine quantitative Anbindung an die subjektive Bewertung von Farbproben aufgestellt und untersucht. Besonders das Verfahren mit Hilfe von CIELAB-Größen, einzelne Variablen der subjektiven Bewertung zu vergleichen, erscheint als guter Ansatz, um die wahrgenommenen Farbunterschiede in eine Skalierung zu übertragen. Im Mittelpunkt für einen quantitativen Ansatz steht zweifelsohne der Farbabstand ΔE^*_{ab} als wichtigste Grundgröße beim Vergleich identischer Testfarben. Dies beweist der negative korrelative Zusammenhang zum SBI. Somit werden die theoretischen Überlegungen, dass hohe Farbabstände mit einem niedrigen SBI einhergehen und umgekehrt, bestätigt.

Eine zweite Überlegung zur Anbindung an den SBI über eine gewichtete Bewertungsfunktion $\epsilon(\lambda)$ ist noch zu überarbeiten. Die aus den Strahldichtefaktoren $\beta(\lambda)$ und der Differenzfunktion $D(\lambda)$ zusammengefügte Gleichung erzeugt noch keine zufrieden stellende Verbindung zum SBI. Ein Lösungsansatz für Nachfolgearbeiten könnte in einer Bewichtung der kritischen Farben liegen, die sich einem korrelativen Zusammenhang entziehen.

Für eine Anbindung an ähnliche Spektren wurde in dieser Arbeit während der Untersuchung noch keine hinlänglich aussagekräftige Methode für einen quantitativen Vergleich und Auswertung gefunden.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Jungnitsch, Katharina: Subjektive Bewertung der Farbwiedergabeeigenschaften von Lampen mit unterschiedlichen Spektren, Diplomarbeit, TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, 2005
- [2] Lang, Heinwig: Farbwiedergabe in den Medien, Göttingen, Zürich, Muster-Schmidt Verlag, 1995