

Beitrag zum Tagungsband „LICHT 2004“ in Dortmund

Autoren: Volkenand, Kai
Blankenhagen, Carsten
Gall, Dietrich

Adresse: Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Fachgebiet Lichttechnik
Unterer Berggraben 10
98693 Ilmenau

e-Mail: knorex@compuserve.de
Carsten.Blankenhagen@tu-ilmenau.de
Dietrich.Gall@tu-ilmenau.de

Titel: „Farbmetrische Anforderungen an Lichtwerbeanlagen“

1. Einleitung

Bei der aufmerksamen abendlichen Betrachtung von Lichtwerbeanlagen, welche mit Hochspannungsleuchtröhren ausgestattet sind, ist sicher jedem schon einmal aufgefallen, dass es zum Teil erhebliche Leuchtdichteunterschiede und auch Farbdifferenzen zwischen verschiedenen Buchstaben bzw. Schriftzügen gibt. Diese Probleme resultieren einerseits aus den Herstellungstoleranzen eines handgefertigten Produktes, zum anderen aber auch aus den bislang nicht eindeutig festgeschriebenen Toleranzgrenzen und lichttechnischen Parametern innerhalb derer sich die leuchtenden Elemente einer Lichtreklame bewegen sollten. Als Resultat dieser fehlenden Richtlinien wurden u.a. folgende sichtbare optische Mängel beobachtet:

- unterschiedliche absolute Leuchtdichten verschiedener Buchstaben innerhalb eines Schriftzuges
- kontinuierliche Helligkeitsabfälle innerhalb der Buchstaben bzw. ganzer leuchtender Flächen
- sichtbare Farbverläufe innerhalb eines Lichtelementes
(ein und derselbe Leuchtstoff)

Aus diesen Gründen erschien es angebracht, innerhalb eines Forschungsprojektes einerseits die Ursachen für diese Unregelmäßigkeiten aufzudecken und andererseits einige

Toleranzgrenzen für die wahrnehmbaren Leuchtdichte- und Farbunterschiede (zugeschnitten auf die Bedingungen der Lichtwerbeanlagen) zu ermitteln. Für die Anlagenhersteller besteht dann die Möglichkeit, diese Toleranzen zu berücksichtigen und dem Kunden eine selbst auferlegte Qualitätsnorm zu bieten. Im Hinblick auf die fortschreitende Entwicklung und Vereinfachung der Lichtmesstechnik mit ortsauflösenden Mess-Eigenschaften ist der Zeitpunkt der optischen Überprüfung lichttechnischer und farbmetrischer Parameter von Lichtelementen einer Werbeanlage durch den Kunden nicht mehr fern. Die Anforderungen, welche dann im Vergleich zu früher (punktuelle Messmethoden) an die Röhren gestellt werden, verlangen neben einer gesteigerten Produktqualität aber auch sinnvolle Parameter-Grenzen innerhalb derer die Fertigung wirtschaftlich und damit das Produkt marktfähig bleibt. Im Rahmen einer Literaturrecherche im PATON der TU Ilmenau konnten keine relevanten Untersuchungen oder Patente zu Leuchtdichte- und Farbverläufen an Lichtwerbeanlagen gefunden werden. Innerhalb der Lichtwerbebranche beruft man sich mangels anderer Erkenntnisse und Untersuchungen immer noch auf die Ellipsen von Mac Adam (1944) obwohl die Untersuchungsbedingungen von denen der Lichtreklame sehr deutlich abweichen.

2. *Versuchsbeschreibung*

Um in der einleitend angegebenen Richtung einen Vorstoß zu wagen und einige Erkenntnisse bezüglich wahrnehmbarer Leuchtdichte- und Farbunterschiede bei Lichtwerbeanlagen zu gewinnen, wurden anhand von Monitorsimulationen Leuchtdichte- und Farbunterschiede sowie –verläufe dargestellt und von insgesamt 16 Testpersonen verschiedenen Alters und Geschlechts beurteilt. Weiterhin erfolgte eine Leuchtdichtetoleranzuntersuchung an einer einstellbaren realen Lichtwerbeanlage im Labor. Die Untersuchungsbedingungen wurden aus ortsauflösenden Feldmessungen realer Lichtwerbeanlagen gewonnen und im Labor nachgestellt. Dabei ergab sich eine mittlere Umgebungsleuchtdichte von $2,5\text{cd/m}^2$, welche als Umfeld-Adaptationsleuchtdichte angeboten wurde, die Leuchtdichte zwischen den Buchstaben betrug im Mittel $1,5\text{cd/m}^2$, welche um die zu vergleichenden Sehobjekte herum auf dem 17"-Simulations-Monitor erzeugt wurden.

Zunächst erfolgten die Untersuchungen an bildmässig liegenden, unmittelbar aneinander grenzenden, quadratischen Sehobjekten, welche sich einerseits nur in der Helligkeit und andererseits nur durch die Farbkoordinate der Quadrate voneinander unterschieden. Die Testfragebögen enthielten folgende Bewertungsskalen:

Helligkeitsunterschied erkennbar
 ja nein

Helligkeitsunterschied ist
 kaum erkennbar deutlich erkennbar

Farbunterschied erkennbar
ja nein
O O

Farbunterschied ist
minimal gerade noch akzeptabel zu groß
O O

Bei den Farbuntersuchungen enthielt ein Quadrat immer die ursprüngliche Farbe, während das andere von dieser Farbe auf den Rot- Grün- Blau- oder Weißpunkt hinzu in seinen Koordinaten verändert wurde. Die Helligkeitsanpassung wurde dabei durch die Verminderung der Farbintensität der „reinen“ Monitorfarbe gewährleistet.

Um die sinnesphysiologische Wahrnehmung eines Schriftelementes in einer Werbeanlage an sich in die Untersuchungen einzubetten, wurde der Schriftzug „HILFE“ auf dem Monitor gezeigt. Dabei wurde ein Buchstabe komplett in seiner Leuchtdichte verändert und ein weiterer mit einem kontinuierlichen Leuchtdichteabfall versehen. Die Versuchspersonen sollten hier zum einen den betreffenden Buchstaben erkennen und zum anderen vermerken, ob sie ihn bemängeln würden. Dabei wurden die Buchstaben so dimensioniert, dass sie die Bedingungen für optimale Formenerkennbarkeit [1] erfüllen. Die Bewertungsskala sah wie folgt aus:

Helligkeitsunterschied bemerkt in Buchstabe
H I L F E
O O O O O

Buchstabe
noch gut an der Grenze auszuwecheln
O O



Bild 1 Leuchtdichteunterschied und –verlauf bei den Monitorsimulationen

Für die Untersuchungen zu den Farbverlaufsunterschieden wurde ein Buchstabe des Schriftzuges „HILFE“ in seiner Farbkoordinate verändert, während die anderen Buchstaben wieder die Monitorfarben Blau, Gelb, Grün und Rot repräsentierten. Die Helligkeit wurde ebenfalls so angepasst, dass möglichst kein Leuchtdichteunterschied zwischen dem farblich abweichenden Buchstaben vorhanden war. Die so simulierte Farbdifferenz eines Leuchtbuchstabens entspricht praktisch dem Austausch einer HSLR (Leuchtstoff-Alterung / Abweichungen bei der Evakuierung) in einer Schrift, wenn diese aus einer anderen Charge hergestellt wurde.

Bezüglich der erwähnten Leuchtdichtetoleranzuntersuchungen an einer einstellbaren realen Lichtwerbeanlage kamen zwei Demonstrationsmuster zum Einsatz, welche insgesamt 4 verschiedene Hochspannungsleuchtröhren hinter austauschbaren, diffus transmittierenden Plexiglasscheiben enthielten. Die Leuchtstoffe dieser Röhren hatten folgende Farbkoordinaten:

- blau → $x = 0,1541$ $y = 0,0790$
- grün → $x = 0,2494$ $y = 0,6288$
- purpur → $x = 0,5513$ $y = 0,2697$
- weiß → $x = 0,3241$ $y = 0,3435$

Die Versuche unterteilten sich in direkte Sicht auf die Röhren (ohne diffuse Abdeckungen) und in Gehäusebetrieb (farbige Plexiglasscheiben). Bei den Messungen wurde jeweils eine der nebeneinander befindlichen Röhren auf eine feste Stromstärke eingestellt und die andere, von verschiedenen Ausgangssituationen ausgehend, durch die Probanden an deren Helligkeit möglichst gut angeglichen.



Bild 2 Dimmbare Hochspannungsleuchtröhren im Gehäuse mit Plexiglasscheiben

Dabei musste die von den Versuchspersonen einstellbare Röhre solange herabgeregelt werden, bis beide Röhren gleich hell erschienen. Dieser Vorgang wurde mehrmals wiederholt und anschließend die ganze Prozedur umgekehrt. Das heißt, jetzt war die einstellbare Röhre heraufzuregeln, bis beide Helligkeiten (visueller Leuchtdichteabgleich) übereinzustimmen schienen. Anschließend wurden vom Versuchsleiter beide Röhren auf gleiche Leuchtdichten eingestellt und nun waren die einstellbaren Röhren (ebenfalls mehrmals) solange von den Probanden zu dimmen bzw. zu übersteuern, bis ein Leuchtdichteunterschied erkannt wurde.

3. Einige ausgewählte Untersuchungsergebnisse

Zur Auswertung der beschriebenen Versuche wurde zunächst die verwendete 21-teilige Ordinalskala neu aufgeteilt, wobei jeweils 3 Felder zu einem zusammengefasst und mit einem Zahlenwert belegt wurden:

○○○|○○○|○○○|○○○|○○○|○○○|○○○
 1 2 3 4 5 6 7

Bei den Leuchtdichte- und Farbunterscheidungen erfolgte weiterhin eine Unterteilung in verschiedene Gruppen, welche mit Hilfe statistischer Methoden gebildet wurden. Dabei wurde eine Note von 3,5 der neu aufgeteilten Ordinalskala als letzter Wert innerhalb eines akzeptierten/tolerierten Gebietes definiert. Darüberliegende Noten wurden als nicht mehr tolerierbare Leuchtdichtedifferenz/Farbabstand gewertet.

Bei den Helligkeitsbewertungen der nebeneinanderliegenden Quadrate ergaben sich folgende Resultate:

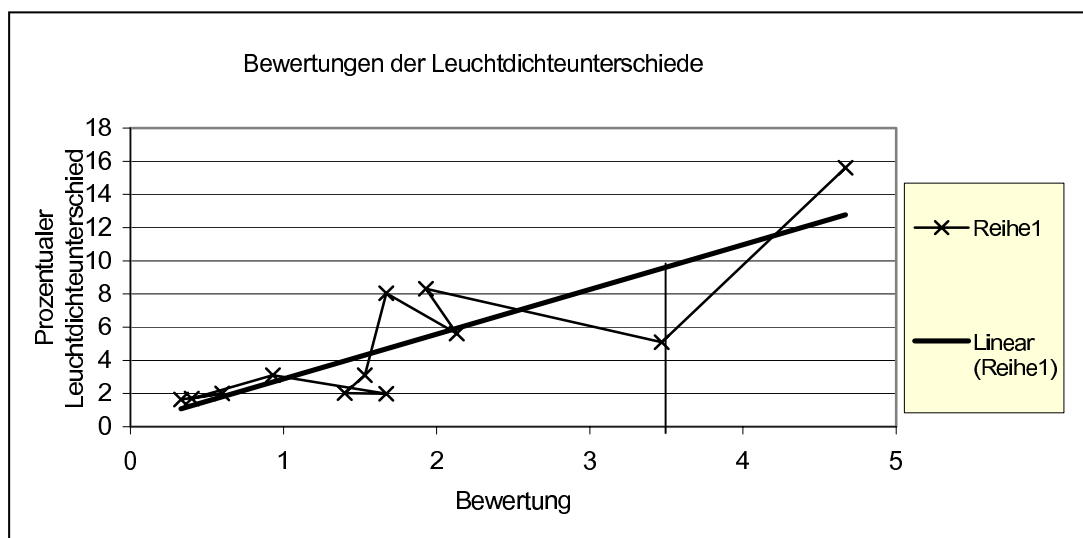


Bild 3 Prozentualer Leuchtdichtevergleich (Helligkeit) am Beispiel der blauen Sehobjekte

Die Auswertung der anderen Sehobjektfarben bezüglich ihrer Helligkeit erfolgte analog und lieferte folgende Werte:

- rote Quadrate → $\Delta L Z$ 6,1%
- grüne Quadrate → $\Delta L Z$ 5,8%
- blaue Quadrate → $\Delta L Z$ 9,5%
- gelbe Quadrate → $\Delta L Z$ 4,8%
- weiße Quadrate → $\Delta L Z$ 5,3%

Damit ergibt sich als Gesamtaussage dieser Untersuchungen für die gerade noch tolerierbaren Leuchtdichteunterschiede direkt aufeinandertreffender Flächen (außer blau) ein Durchschnittswert von ungefähr $\Delta LZ6\%$.

Bei den Farbvariationen an den quadratischen Sehobjekten sollte grundsätzlich geklärt werden, inwieweit man „harte“ Farbübergänge erkennt und toleriert. Für die Darstellung der ermittelten Farbabstände ist die Auswahl eines geeigneten Farbsystems für Selbstleuchter (mit passenden Randbedingungen) sehr schwierig, weil die zur Verfügung stehenden derzeit keine, dem menschlichen Empfinden absolut entsprechende Skalierung besitzen. Die nachfolgenden Bilder zeigen die vergrößerte Darstellung der akzeptierten Farbtoleranzen im CIE-UCS-Diagramm (u, v – Diagramm) wobei die Akzeptanzgebiete gekennzeichnet sind.

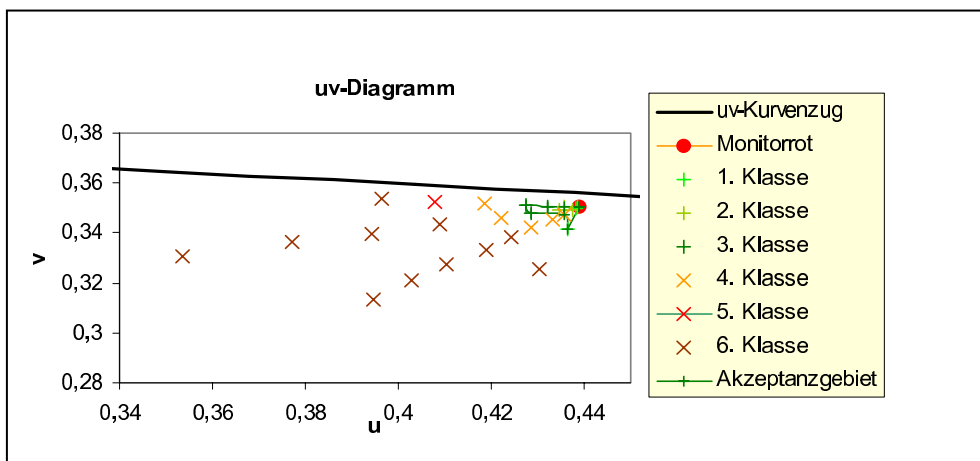


Bild 4 Tolerierte Farbabstände „ROT“ (vergr. Ausschnitt aus CIE-UCS-Diagramm)

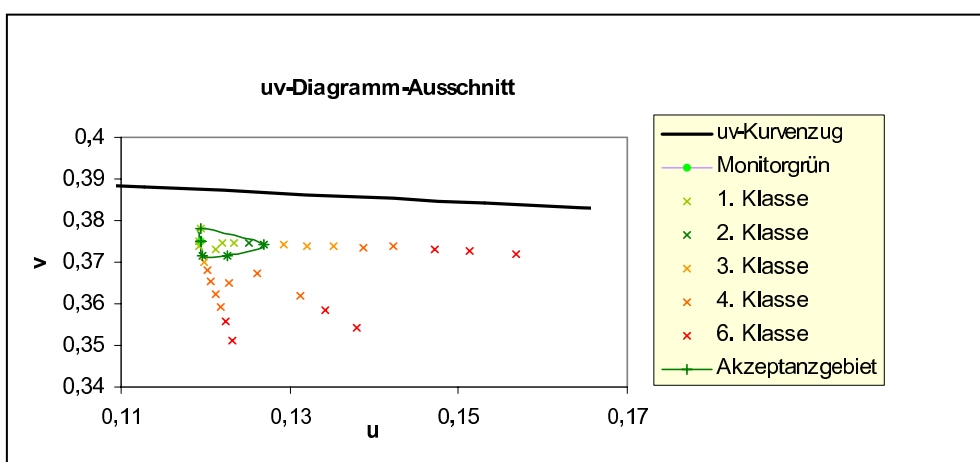


Bild 5 Tolerierte Farbabstände „GRÜN“ (vergr. Ausschnitt aus CIE-UCS-Diagramm)

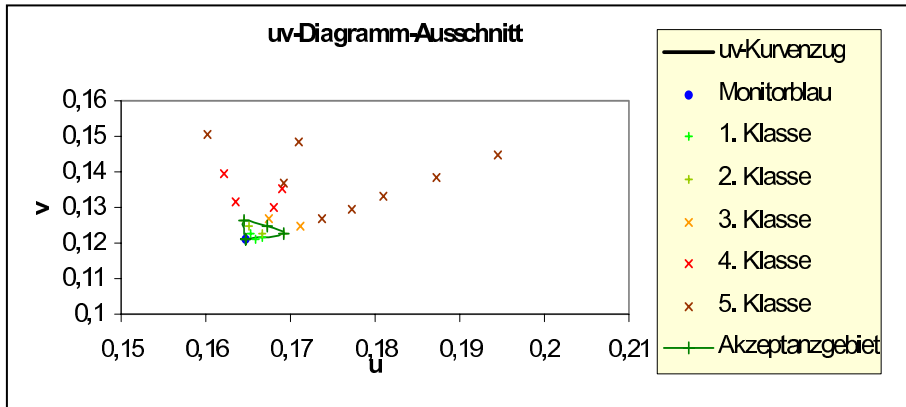


Bild 6 Tolerierte Farbabstände „BLAU“ (vergr. Ausschnitt aus CIE-UCS-Diagramm)

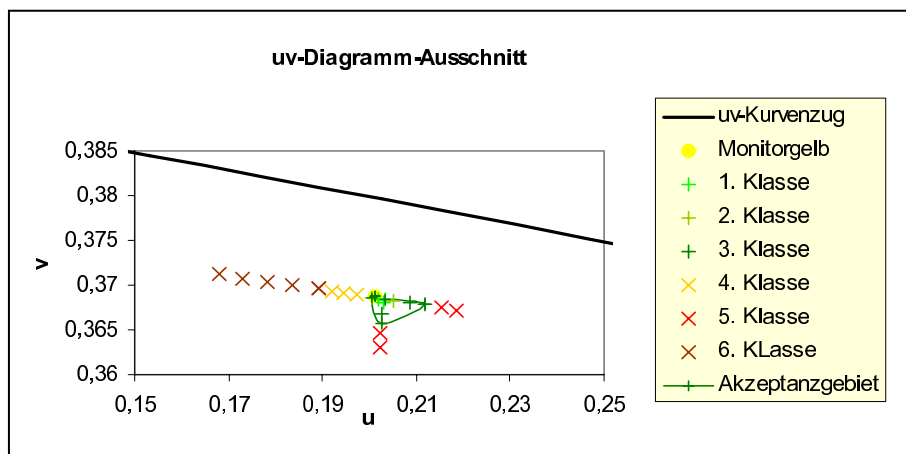


Bild 7 Tolerierte Farbabstände „GELB“ (vergr. Ausschnitt aus CIE-UCS-Diagramm)

Aufgrund der angesprochenen, mit ihren Eigenschaften für Selbstleuchter nicht optimal geeigneten bzw. angepassten Farbsysteme ist die anschließende Endauswertung dieser Diagramme schwierig. Die erhaltenen Zahlenwerte entsprechen bisher keinem empfindungsgemäßen Farbabstand, stellen aber eine gute Datenbasis für weitere Folgeuntersuchungen dar.

Ähnlich wie bei den nebeneinander liegenden quadratischen Sehobjekten erfolgte die Auswertung der Leuchtdichtedifferenzen zwischen einzelnen Buchstaben des Schriftzuges „HILFE“. Die Ergebnisse wurden unterteilt in noch tolerierte Werte für eine gleichmäßige Buchstabenausleuchtung und in eine Buchstabenausleuchtung mit Helligkeitsverlauf.

- rote Schrift → gleichmäßig: $\Delta LZ48\%$ mit Verlauf: $\Delta LZ63\%$
- grüne Schrift → gleichmäßig: $\Delta LZ65\%$ mit Verlauf: $\Delta LZ75\%$
- blaue Schrift → gleichmäßig: $\Delta LZ45\%$ mit Verlauf: $\Delta LZ54\%$
- gelbe Schrift → gleichmäßig: $\Delta LZ55\%$ mit Verlauf: $\Delta LZ74\%$

Die drastisch großen Unterschiede der Resultate zu den aneinander stoßenden quadratischen Sehobjekten resultieren einerseits aus dem Buchstabenabstand im Schriftzug, vor allem aber aus dem sinnesphysiologischen Einfluß der Erfassung von Wort und Inhalt/Bedeutung gegenüber den „schmucklosen“ farbigen Quadraten. Als Endresultat ist abzuleiten, dass geringfügige Leuchtdichteunterschiede in Schriftzügen wesentlich weniger stören als dieselben bei großen farbig ausgeleuchteten Flächen.

Zu den tolerierten Farbabständen innerhalb des Schriftzuges „HILFE“ gelten bezüglich fehlender empfindungsmäßig gleichabständiger Farbsysteme dieselben Bemerkungen wie bei den Farbtoleranzen zu den quadratischen Sehobjekten. Allerdings wurden die Akzeptanzgebiete hier gleich in eine Darstellung im $a_{99}b_{99}$ -Diagramm übernommen, da sie wesentlich größer als bei den farbigen Quadraten und damit deutlich besser zu erkennen sind.

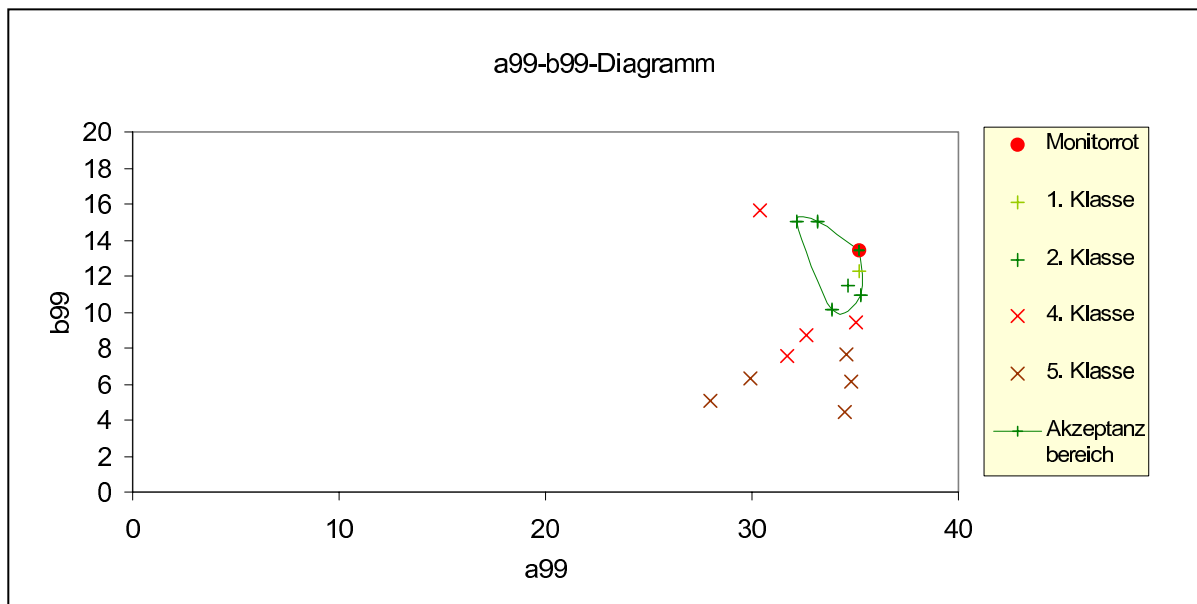


Bild 8 Tolerierte Farbabstände für rote Leuchtschrift (Ausschnitt aus $a_{99}b_{99}$ -Diagramm)

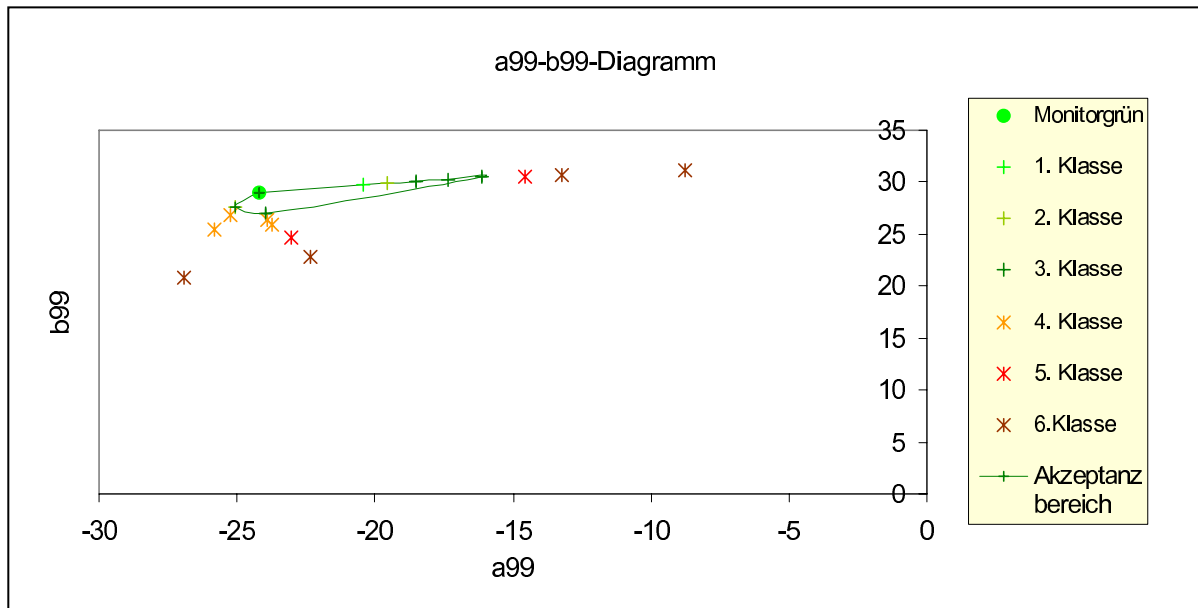


Bild 9 Tolerierte Farbabstände für grüne Leuchtschrift (Ausschnitt aus a₉₉b₉₉-Diagramm)

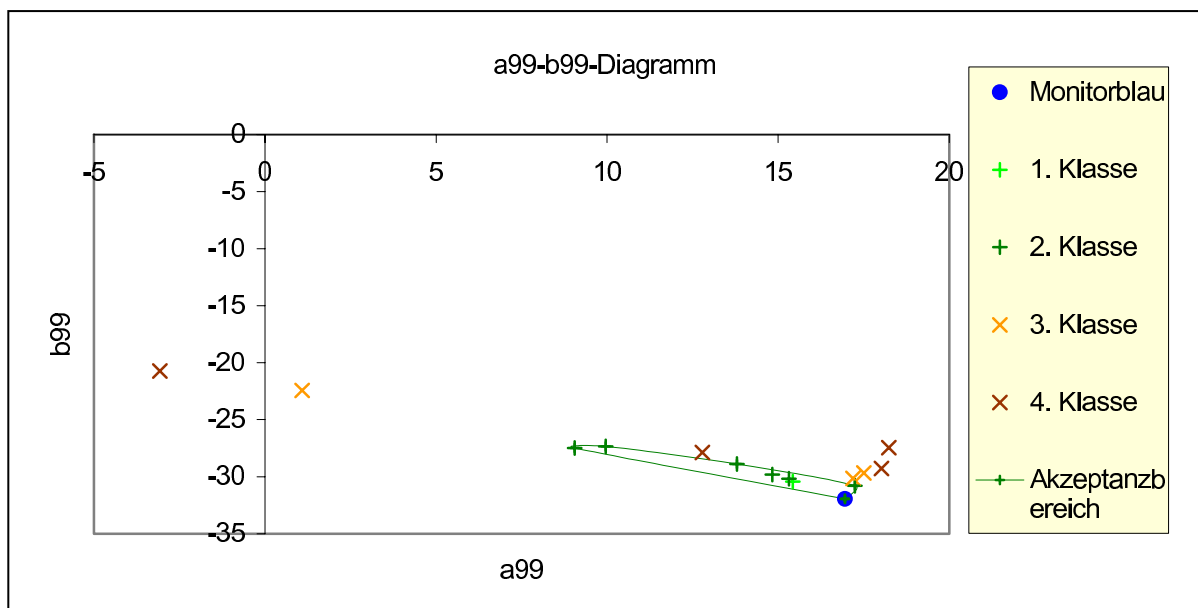


Bild 10 Tolerierte Farbabstände für blaue Leuchtschrift (Ausschnitt aus a₉₉b₉₉-Diagramm)

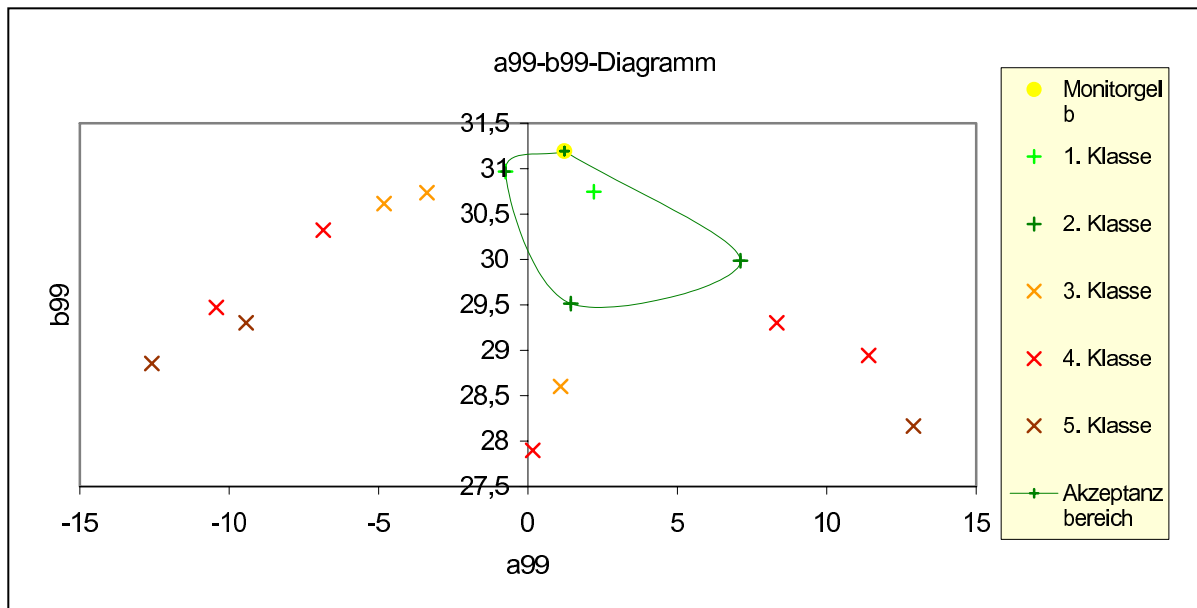


Bild 11 Tolerierte Farbabstände für gelbe Leuchtschrift (Ausschnitt aus a99b99-Diagramm)

Auch hier gelten als Erklärung für die deutlich größeren Differenzbereiche der Farbunterschiede gegenüber den farbigen Quadraten dieselben Aussagen wie bereits bei den Leuchtdichtetoleranzuntersuchungen: Der unmittelbare sinnesphysiologische Einfluß der inhaltlichen Erfassung des Schriftzuges blendet andere Empfindungen aus oder unterdrückt diese spürbar, so dass im Ergebnis hier wesentlich größere Farbtoleranzen als bei einfarbigen aneinander stoßenden Flächen ohne weiteren Informationsgehalt akzeptiert werden.

Bei den dimmbaren Hochspannungsleuchtröhren-Demonstrationsmustern mit hinterleuchteten farbigen Plexiglasscheiben kam heraus, dass die Versuchspersonen den Helligkeitsabgleich sehr gut vornehmen konnten. Allerdings fiel auf, dass die Leuchtdichte Anpassung bei fast allen Variationen vom hellen Niveau her genauer gelingt als vom dunklen. Die durchschnittlich eingestellten Werte lagen bei einer Abweichung von 0,2...10,5% von der Vergleichsleuchtdichte. Der gesamte Versuchsablauf wurde bei den vier genannten Röhren mit und ohne diffuse Abdeckungen bei insgesamt drei festen Ausgangs-Leuchtdichteniveaus absolviert. Diese Gleichheits- bzw. Unterschiedserkennbarkeitsuntersuchungen ähneln den Monitor-Versuchen, jedoch liegen die Leuchtdichten der Selbstleuchter hier wesentlich höher (bis zu mehreren tausend cd/m^2). Als abschließende Gesamt-Endaussage dieser Messungen (über alle Varianten und Farben) konnte keine der fünf Versuchspersonen innerhalb von $\Delta L=10\%$ um den Ausgangswert herum mit Gewissheit einen Leuchtdichteunterschied detektieren.

4. Ausblick

Betrachtet man die vorliegenden Untersuchungen insgesamt, so ist festzustellen, dass es zunächst mit relativ einfachen Mitteln möglich ist, das bislang nur unzureichend bearbeitete Wissensgebiet nach zulässigen Farb- und Leuchtdichtetoleranzen bei Selbstleuchtern unter definierten Beobachtungsbedingungen zu erforschen und erste orientierende Grenzwerte anzugeben. Dabei sind aber immer die Untersuchungsbedingungen mit Randparametern zu berücksichtigen und zu definieren.

Mangels wissenschaftlich fundierter Forschungsergebnisse einfach pauschal die längst bekannten Resultate der damals vortrefflichen Untersuchungen von Mac Adam für alle möglichen Arten von Lichtelementen anzuwenden ist nicht nur sehr oberflächlich und einseitig, sondern auch grundlegend falsch. Die Mac Adam – Ellipsen wurden auf zwei Photometerfeldern von $L=50\text{cd/m}^2$ bei einer angebotenen Umfeldleuchtdichte von $L=25\text{cd/m}^2$ bestimmt und sind nicht einfach so auf andere Leuchtdichtebereiche wie z.B. das mesopische Sehen ($0,01\dots30\text{cd/m}^2$) übertragbar. Schwierigkeiten bereitet derzeit auch die Darstellung von Messergebnissen in gängigen Farbsystemen, da die ermittelten Geometrien der Grenzwerte bzw. Akzeptanzbereiche in der Darstellung nicht dem physiologisch vom Menschen empfundenen Farbunterschied /-abstand entsprechen. Den komplexen sinnesphysiologischen Prozess der menschlichen Farbwahrnehmung mathematisch umfassend und erschöpfend zu beschreiben, ist Aufgabe aktueller und künftiger Forschung. Weitere offene Fragen bezüglich der Lichtwerbeanlagen sind z.B. die Übertragung der ermittelten Resultate auf reale Leuchtschriften und die eventuelle Veränderung der tolerierten Leuchtdichtebereiche/Farbkoordinaten bei hohen Leuchtdichten.

Um über in diesem Sinne weiterführende Fragen erstmalig fundierte wissenschaftliche Erkenntnisse zu erlangen, läuft derzeit am Fachgebiet Lichttechnik der TU Ilmenau ein aktuelles Forschungsprojekt zu Untersuchungen von Farbtoleranzen. Diese werden bei verschiedenen Adaptationsniveaus getrennt für Selbst- und Nichtselbstleuchter ermittelt. Sie sollen Aufschluss über optimale Farbmischalgorithmen für neuartige Beleuchtungslösungen im Innenraum auch unter Berücksichtigung aktueller circadianer Gesundheitsaspekte geben.

5. Literatur

- [1] Gut, Gerhard: Handbuch der Lichtwerbung, Deutsche Verlags Anstalt Stuttgart, 1974
- [2] Baer, Roland: Beleuchtungstechnik Grundlagen, Verlag Technik Berlin, 1996
- [3] Lindner, H.; Knoche, K.: Sehleistung des optischen Analysators,
TH Ilmenau, Ausgabe 1976
- [4] Lindner, H.; Knoche, K.: Anpassungsleistung des optischen Analysators,
TH Ilmenau, Ausgabe 1976
- [5] MacAdam, David L.: Color Measurement-Theme and Variations,
Second Revised Edition, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1985
- [6] Richter, Manfred: Einführung in die Farbmeterik, 2. Auflage,
Walter de Gruyter-Berlin-New York, 1981