

## Homogenitätsbewertung flächiger Lichtquellen und Leuchten

Christoph Hupe  
Master-Student TU-Ilmenau (Optronik)  
D-98693 Ilmenau  
christoph.hupe@tu-ilmenau.de

### Einleitung

„Kraftfahrzeuge [...] müssen hinten mit zwei ausreichend wirkenden Schlussleuchten für rotes Licht ausgerüstet sein“, [1] schreibt die StVZO vor. Die rückseitig am Fahrzeug angebrachten Leuchten eines Kfz bilden das „Signalbild“ für den nachfolgenden Verkehr. Dabei dient die Schlussleuchte der Kenntlichmachung der Position des Fahrzeuges. Die Anforderungen an Heckleuchten sind für den europäischen Verkehrsraum (Europäische Union) in der ECE (*Economic Commission for Europe*) R7 festgelegt. Die Regelungen beinhalten insbesondere die lichttechnischen Bestimmungen und Anforderungen an die Produktion [2].

Bedingt durch neue Technologien in der Licht- und Halbleitertechnik wird das klassische, zuletzt meist rechteckig ausgeprägte Heckleuchtendesign abgelöst. Ersetzt wird es durch eine Vielfalt an verschiedenen Formen und Lichtquellen [3].

Ist der Blickpunkt der Entwicklung von Heckleuchten in der Vergangenheit der Erfüllung der Signalfunktion geschuldet gewesen, so sind nun Designmerkmale und die Prägung von Markensymbolen zusätzlich in den Fokus gerückt [4]. Da Heckleuchten besonders bei Dunkelheit das elementare, rückwärtige Alleinstellungsmerkmal eines Fabrikates oder einer Modellreihe darstellen, sind Form und Anordnung der Lichtquellen mitunter komplex und sehr differenziert. Zur Realisierung des gewünschten Designs bieten sich mehrere Techniken, bzw. Systeme an. Ein vielversprechendes Leuchtsystem sind Lichtleiter. Diese Technik ermöglicht u.a. dreidimensional modellierte Leuchtflächen und -körper, welche mitunter sehr abstrakte Geometrien darstellen. Eine weitere, *noch* nicht serienreife Möglichkeit Schlussleuchten zu gestalten, stellt die OLED-Technologie dar.

Sowohl Lichtleiter, als auch OLED bieten die Möglichkeit als Flächenleuchte eingesetzt zu werden. Die Verwendung im Premiumsegment, dem Innovationen zur Einführung oft vorbehalten sind, verlangt neben den physikalischen Größen wie Lichtausbeute, ähnliche Farbtemperatur und Lichtstärke weitere Eigenschaften für die Charakterisierung. Aus ästhetischen Gründen soll dabei derzeit eine gleichmäßig helle Oberfläche realisiert werden um eine hochwertige Anmutung zu erzeugen. Definitionen zur Beurteilungen von Gleichmäßigkeit und Homogenität von selbstleuchtenden Flächen sind bisher vornehmlich

---

im Zusammenhang mit der Qualität von Displays und deren Hintergrundbeleuchtung vorhanden [5]. Vor dem Hintergrund der Schlussleuchten von PKW ist bisher keine Aussage über die Anforderungen an die Leuchtdichtehomogenität getroffen worden. Für die Industrie stellt sich hier die Frage in wie weit hier Minimalanforderungen geschaffen werden müssen, damit Schlussleuchten vom Kunden als homogen akzeptiert werden.

## **Aufgabenstellung**

Ziel dieser Untersuchung soll es sein, zu erforschen, welche wesentlichen Anforderungen an die Homogenität von flächigen Lichtquellen gestellt werden müssen, damit diese als hochwertige Schlussleuchten im Automobilbereich eingesetzt werden können. Dabei werden bestehende Berechnungsgrundlagen genutzt, um diese mit den subjektiv wahrgenommenen Eindrücken zu vergleichen.

Zunächst soll ein Überblick über verschiedene Berechnungsmodelle gegeben werden. Hier sollen die zu untersuchenden Einflussgrößen wie Kontrast, Größe und Gradient des Leuchtdichteunterschiedes näher beschrieben werden. Bereits vorhandene Untersuchungen werden diskutiert. Ein nach den ECE - Vorschriften ausgelegter Demonstrator, der im Wesentlichen aus einem umgebauten CRT-Monitor besteht, wird kurz vorgestellt.

An diesem Demonstrator bewertet anschließend eine Probandengruppe exemplarisch die ihnen dargebotenen Inhomogenitäten. Es handelt sich dabei um gezielt hergestellte Inhomogenitäten, deren Lage und lichttechnische Eigenschaften bekannt sind. Durch Veränderung der variablen Parameter bestimmen die Probanden Grenzwerte, die die Inhomogenitäten nach bestimmten Attributen (in)akzeptabel erscheinen lassen.

Diese Werte werden nach statistischen Gesichtspunkten ausgewertet und es wird geprüft, ob sich hieraus allgemeingültige Aussagen über Bewertungskriterien zur Homogenität ableiten lassen. Diese Aussagen sollen es dem Hersteller ermöglichen, das Leuchtendesign in der Art zu gestalten, dass für den Betrachter homogen leuchtende, ästhetische Flächen entstehen.

Daraus werden drei konkrete Thesen abgeleitet, welche es zu prüfen gilt:

- I. Die wahrgenommene Homogenität von identischen Leuchtdichteverteilungen ist vom Design der Leuchte abhängig.
- II. Eine messbar vorhandene Ungleichmäßigkeit kann dennoch als homogen wahrgenommen werden.

- 
- III. Inhomogen wahrgenommene Flächen werden in bestimmten Grenzen als homogen akzeptiert.

### **Bewertungsverfahren im Überblick**

Dieses Kapitel soll einen Überblick über Verfahren und Methoden geben, die die Bewertung der Leuchtdichtehomogenität ermöglichen. Dazu ist es zunächst nötig den Begriff „Homogenität“ zu klären. Homogenität, vom griechischen *homoios*, also gleich, meint die Gleichartigkeit, also die gleiche Beschaffenheit eines Systems. Bezogen auf die Leuchtdichte einer Fläche bedeutet dies, dass der Betrag der Leuchtdichte örtlich aufgelöst identisch ist. Umgekehrt liegt eine Inhomogenität vor, wenn an verschiedenen Orten der Fläche verschiedene Leuchtdichtewerte auftreten. Weiterhin wird vielfach der Begriff „Gleichmäßigkeit“ genutzt. Nach Diekmann [6] bezeichnet Gleichmäßigkeit Leuchtdichteverhältnisse gemäß Definition des CIE-Standardbetrachters, während Homogenität Einflussgrößen auf die visuelle Wahrnehmung berücksichtigt.

Eckert [7] gibt allgemeine Gleichungen zur Bestimmung der Gleichmäßigkeit an. Genannt werden diese Gleichungen im Zusammenhang mit der Straßenbeleuchtung durch ortsfeste und am Kraftfahrzeug befindliche Beleuchtungseinrichtungen. Dabei bestimmt er die Gesamtgleichmäßigkeiten einer Fläche durch folgende beiden Gleichungen:

$$g_1 = \frac{L_{min}}{L_m} \text{ und } g_2 = \frac{L_{min}}{L_{max}}$$

$L_m$  gibt die mittlere Leuchtdichte des Bewertungsfeldes an. Die längs einer Linie zu beurteilende Gleichmäßigkeit leitet Kleinkes [8] entsprechend mit:

$$GS_1 = \frac{L_{j,min}}{LS_j} \text{ und } GS_2 = \frac{L_{j,min}}{L_{j,max}}$$

ab. Dabei ist  $LS_j$  die mittlere Leuchtdichte längs eines Strahls (Linie). Außerdem gibt er eine Quergleichmäßigkeit mit:

$$GQ = \frac{LS_{min}}{LS_{max}}$$

---

an. Neben der Leuchtdichte, kann auch die Beleuchtungsstärke als bestimmende Größe für die Gleichmäßigkeit herangezogen werden. Dabei sollen die gleichen Zusammenhänge gelten wie bei der Leuchtdichte [9]:

$$g_1 = \frac{E_{min}}{E_m} \text{ und } g_2 = \frac{E_{max}}{E_{min}}$$

$E_m$  stellt die mittlere Beleuchtungsstärke des Feldes dar. Gall gibt an, dass die Leuchtdichthehomogenität am ehesten mit  $g_1$  wiedergegeben wird.

Die Bewertung der Gleichmäßigkeiten der Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz geschieht nach DIN 5035-8. Dabei wird ebenfalls die Gleichmäßigkeit  $g_2$  verwendet. Weiterhin wird das Verhältnis der Standardabweichung  $s$  aller Einzelwerte der Beleuchtungsstärke zur mittleren Beleuchtungsstärke einer Fläche als Gleichmäßigkeit  $g_3$  angegeben:

$$g_3 = \frac{s}{\bar{E}}$$

$$\text{Mit } s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}$$

$n$  gibt die Anzahl der Einzelwerte der Beleuchtungsstärke an,  $\bar{E}$  ist der Mittelwert der Beleuchtungsstärke. Zu beachten ist, dass niedrige  $g_3$ -Werte eine hohe Gleichmäßigkeit offen legen, wohingegen hohe  $g_2$ -Werte eine niedrige Gleichmäßigkeit bedeuten [10].

Diekmann und Gerloff [6] nennen weitere etablierte Standards, die von ISO (International Organization of Standardisation), VESA (Video Electronics Standard Association) und SPWG (Standard Panels Working Group) herrühren.

In der Industrie werden diese Richtgrößen genutzt, um Anforderungen an Displays und Panels zu überprüfen. Für Flachbildschirme dient vorrangig der VESA-Standard. Aus fünf, bzw. neun Messungen senkrecht zur Messfläche wird die Leuchtdichte erfasst und Minimal- und Maximalwert ins Verhältnis gesetzt:

$$U_{VESA} = 100\% \cdot \frac{L_{min}}{L_{max}}$$

wobei ein Ergebnis von 100% die höchste zu erreichende Gleichmäßigkeit darstellt.  
 Eine weitere Möglichkeit, wie der Grad der Gleichmäßigkeit für Flachbildschirme und Büroanwendungen zu beschreiben ist, kann in ISO 13406-2 nachgelesen werden:

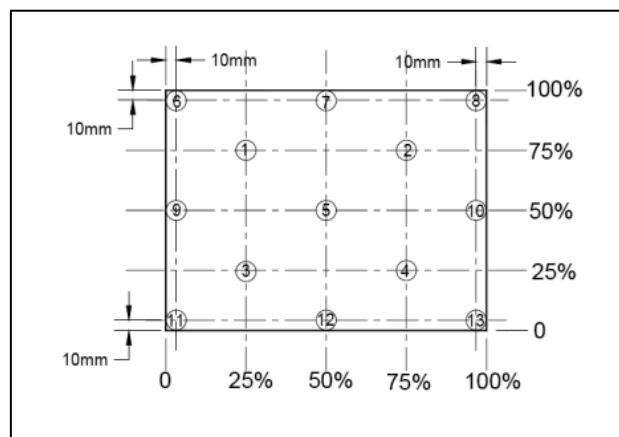
$$U_{ISO} = \frac{L_{max}}{L_{min}}$$

Diese relativ aufwendige und komplizierte Messung (abhängig von Position der Augen, Betrachtungswinkel, Bildschirmgröße), besteht aus mindestens drei Messpunkten aus denen analog zu VESA die Minimal- und Maximalwerte ermittelt werden. Ein Wert des Betrages „eins“ stellt eine gleichmäßig leuchtende Fläche als Ergebnis dar. Laut obiger Gleichung wird eine ungleichmäßigere Leuchtdichteverteilung durch ein Ergebnis, welches größer eins ist, charakterisiert. Je nach Rahmenbedingungen liegt der maximal tolerierbare Wert bei 1,3 oder 1,7.

Soll ein Bildschirm nach SPWG-Vorschrift klassifiziert werden, sind 13 Messpunkte auf der Messfläche zu wählen und nach folgendem Muster zu bewerten:

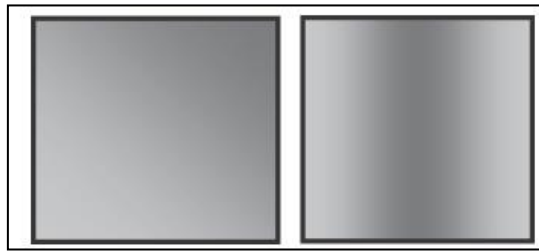
$$U_{SPWG} = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max}} \cdot 100\%$$

Ein Unterschied zu den anderen Normen besteht darin, dass die bestmögliche Leuchtdichteverteilung mit 0% angegeben wird. Nachstehend aufgeführt ist das Messfeld nach SPWG-Vorschrift.



Punkteraster zur Bestimmung der Gleichmäßigkeit nach SPWG (Quelle: STANDARD PANEL WORKING GROUP, 2007)

Nachteilig bei allen bisher vorgestellten Verfahren ist, dass ausschließlich Minimal-, Maximal- und Mittelwerte (bzw. Standardabweichung) Verwendung finden. Ein oder mehrere möglicherweise auftretende Leuchtdichtegradienten über die Leuchtfläche oder gar Strukturen finden keine Berücksichtigung. Solche Leuchtdichteänderungen beeinflussen die wahrnehmbare Homogenität einer Fläche mitunter jedoch eklatant.



mögliche Leuchtdichteverteilungen einer quadratischen Fläche (Quelle: OSADirect)

Einen Ansatz, der diese Misere beheben soll, liefern Diekmann und Gerloff [6] im Rahmen des OLED100.eu - Projektes. Die zwei dort entwickelten Modelle nutzen die Leuchtdichtehomogenität als Maßzahl für homogene Leuchtdichteverteilungen. Unter Berücksichtigung des maximalen Gradienten wird das erste Modell zur Bestimmung der „Homogenität“ verwendet, während im zweiten Modell ein mittlerer Leuchtdichtegradient mit einbezogen wird, um eine „mittlere Homogenität“ zu definieren. Für beide Modelle muss grundlegend der Abstand zwischen zwei Messpunkten bestimmt werden. Nach Pythagoras ergibt sich dieser als:

$$d_{ij} = \sqrt{(\vec{i} - \vec{j})^2}$$

Desweiteren wird eine mittlere Leuchtdichte der Messfläche als Mittelwert über alle 13 Messfelder bestimmt:

$$L_{mean} = \frac{1}{13} \sum_{i=1}^{13} L_i$$

Hieraus wird die Homogenität H bestimmt:

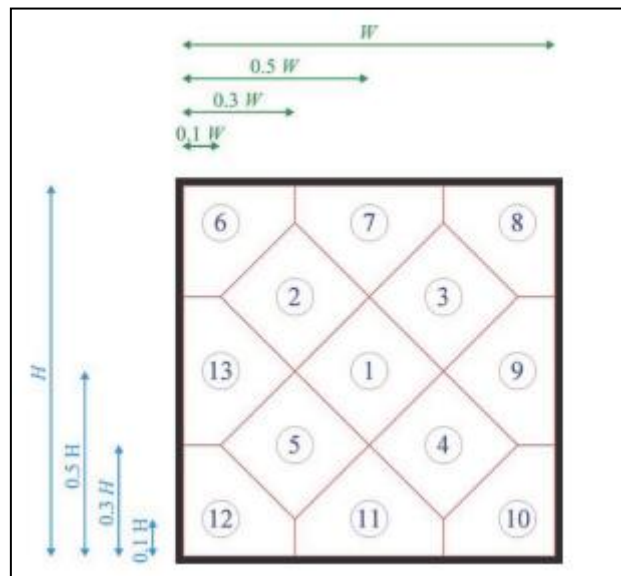
$$H = 1 - \text{Max} \left[ \frac{|(L_i - L_j)|}{d_{ij}^\epsilon} \right] / \frac{L_{mean}}{(\text{Max}[d_{ij}])^\epsilon}$$

Unter Berücksichtigung aller Gradienten geben die beiden Autoren das zweite Modell folgendermaßen an:

$$H_{mean} = 1 - \frac{\sum \left[ \frac{|L_i - L_j|}{(d_{ij})^\varepsilon} \right]}{\sum \frac{L_{mean}}{(d_{ij})^\varepsilon}}$$

$L_{i,j}$  sind die in den Punkten  $i$  und  $j$  gemessenen Leuchtdichtewerte,  $\varepsilon$  ist ein Korrektorexponent, der dazu dienen soll, die Homogenitätswerte an die visuelle Wahrnehmung anzupassen. Ist dies der Fall, wird jedoch nicht die Rangfolge der bewerteten Flächen verändert, sondern lediglich der relative Abstand zueinander anders skaliert.  $\varepsilon$  ist frei wählbar und soll die Bewertung auch für Laien durch einfaches Ausprobieren möglich machen.

Einen Überblick über den Messaufbau nach welchem die vorangestellten Rechnungen erfolgen, gibt die nachfolgende Abbildung.



OLED-Messfläche nach Diekmann und Gerloff (Quelle: OSADirect)

Weiterhin wird eine Skala angegeben, die helfen soll, die erreichte Homogenität einzuordnen. Dabei stehen Werte zwischen 80% bis 100% für sehr homogene Flächen, auf denen keine Helligkeitsschwankungen feststellbar sind. Ab einem Homogenitätswert von 60% kann je nach Art der Anwendung von einer hinreichenden großen Homogenität gesprochen werden, wohingegen Werte zwischen 40% und 60% als inhomogen

---

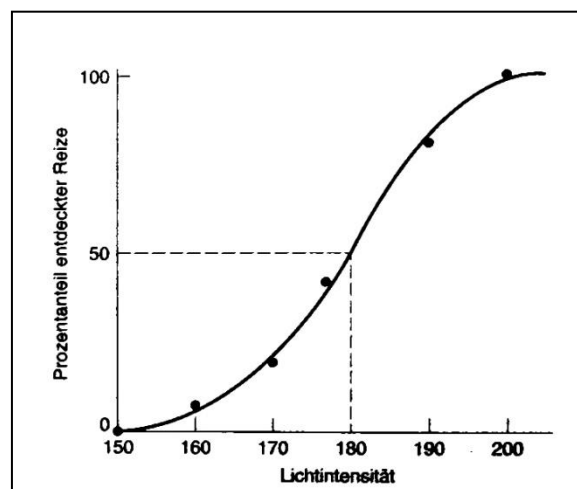
bezeichnet werden und sich für den Betrachter als störend wirken. Werte unter 40% werden pauschal als inhomogen angegeben.

In ihren Versuchen wählen Diekmann und Gerloff einen  $\varepsilon$ -Wert von 0,5 um nutzbare Ergebnisse für die verwendeten Leuchtdichtemuster zu erhalten. In diesem Zusammenhang wird auch darauf hingewiesen, dass bisher nicht von einer allgemeinen Anwendbarkeit der Formeln auszugehen ist.

## Versuchsentwicklung

### Versuchsmethodik und -szenarien

Im Rahmen dieser Untersuchung wird die „Methode der konstanten Stimuli“ angewandt, um die Homogenitätsschwelle zu bestimmen. Als Quelle für die nachfolgenden Ausführungen dient Goldstein [11]. Für diesen ist die Konstanzmethode, von Fechner als „Methode der richtigen oder falschen Fälle“ bezeichnet, im Gegensatz zur Grenzmethode, genauer. Daher wird diese Methode trotz des höheren Zeitaufwands ausgewählt. Dabei werden dem Probanden die Reize in zufälliger Reihenfolge (mehrfach) dargeboten, wobei der stärkste Reiz (große Homogenität) eindeutig über der Wahrnehmungsschwelle und der niedrigste Reiz (starke Inhomogenität) deutlich unter der Wahrnehmungsschwelle zu finden ist. Alle anderen Reize liegen zwischen diesen Extremwerten. Ein Beispiel für das Ergebnis eines solchen Experiments liefert die nachfolgende Darstellung (fiktives Experiment).



Ergebnis eines möglichen Experiments, bei dem die Schwelle zum Entdecken eines Lichtpunktes mit der Konstanzmethode gemessen wird. Eine Wahrscheinlichkeit von 50% markiert die Reizschwelle(Quelle: Goldstein, 1997)



---

Der Proband beurteilt jeden Reiz und antwortet entsprechend mit „Ja“ (homogen) oder „Nein“ (inhomogen). Dies geschieht mit Hilfe eines Tasters, der über zwei Tastknöpfe verfügt. Durch die Zufällige Wiedergabe der Reize werden außerdem Fehler aufgrund von Perseverationstendenzen vermieden. Diese Methode bietet weiterhin den Vorteil, dass sich Probanden weniger stark gegenseitig beeinflussen, wenn die Teilnahme am Experiment gleichzeitig erfolgt.

Entsprechend der Thesen aus Kapitel zwei sollen zwei Arten von Stimulusflächen untersucht werden. Das ist zum einen eine Rechteckfläche, die keine diskontinuierliche Leuchtdichteverteilung aufweist (theoretische Form) und zum anderen eine praxisnahe Fläche, die mögliche Designelemente einer Schlussleuchte besitzt (Nachbildung BMW F10). Abbildungen dazu sind im Abschnitt 5.6 zu finden.

Konkret ergeben sich für diesen Versuch sieben Szenarien:

- I. Niveauänderung Rechteck: Rechteckfläche - der Leuchtdichtegradient erstreckt sich beginnend an der linken Seite der Leuchfläche bis zur rechten Seite; die Leuchtdichte wird rechts schrittweise so lange angehoben, bis eine homogene Fläche entsteht,
- II. Niveauänderung BMW: BMW F10-Schlussleuchte – der Leuchtdichtegradient erstreckt sich beginnend an der linken Seite der Leuchfläche bis zur rechten Seite; die Leuchtdichte wird rechts schrittweise so lange angehoben, bis eine homogene Fläche entsteht,
- III. Ausweitung Rechteck\_1: Rechteckfläche – die leuchtende Fläche ist in zwei Leuchtdichteniveaus ( $\Delta L_1$ ) geteilt; der Übergang vom linken zum rechten Leuchtdichteniveau wird schrittweise breiter gestaltet, bis der Gradient über die gesamte Testfläche reicht,
- IV. Ausweitung BMW\_1: BMW F10-Schlussleuchte – die leuchtende Fläche ist in zwei Leuchtdichteniveaus ( $\Delta L_1$ ) geteilt; der Übergang vom linken zum rechten Leuchtdichteniveau wird schrittweise breiter gestaltet, bis der Gradient über die gesamte Testfläche reicht,
- V. Ausweitung Rechteck\_2: Rechteckfläche – die leuchtende Fläche ist in zwei Leuchtdichteniveaus ( $\Delta L_2$ ) geteilt; der Übergang vom linken zum rechten Leuchtdichteniveau wird schrittweise breiter gestaltet, bis der Gradient über die gesamte Testfläche reicht,

- 
- VI. Ausweitung BMW\_2: BMW F10-Schlussleuchte – die leuchtende Fläche ist in zwei Leuchtdichteniveaus ( $\Delta L_2$ ) geteilt; der Übergang vom linken zum rechten Leuchtdichteniveau wird schrittweise breiter gestaltet, bis der Gradient über die gesamte Testfläche reicht,
- VII. Streifenänderung: BMW F10-Schlussleuchte – drei verschiedene Streifen (Segmente) in der Leuchtfläche werden in ihrer Leuchtdichte schrittweise variiert (verringert); ein Leuchtdichtegradient tritt dabei nicht auf.

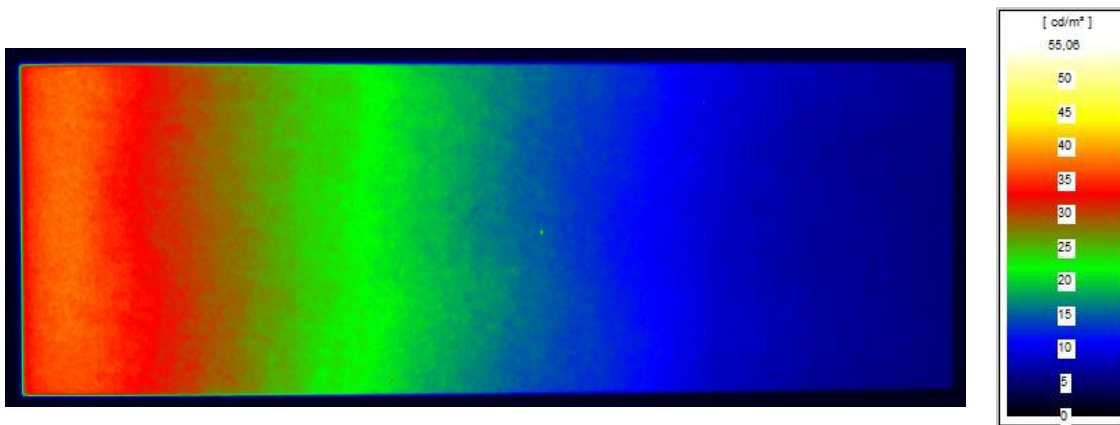
Diese sieben Szenarien werden von jedem Probanden zweimal durchlaufen. Dabei wird im ersten Durchgang beurteilt, ob eine Inhomogenität wahrnehmbar ist. Das heißt, dass nur dann auf das Attribut „homogen“ entschieden wird, wenn keine Inhomogenität festgestellt werden kann. In diesem Zusammenhang wird im Weiteren von „Wahrnehmung“ gesprochen. Beim zweiten Durchgang wird nach dem Gesichtspunkt der Akzeptanz entschieden. Der Proband beurteilt, ob Inhomogenitäten bis zu einem gewissen Grad noch für eine reale Schlussleuchte akzeptabel wären. In diesem Zusammenhang wird von „Akzeptanz“ gesprochen.

### Realisierung der Versuchsszenarien

Anschließend werden die Versuchsszenarien näher beschrieben und exemplarisch erklärt. Die generierten Inhomogenitäten werden als PowerPoint Präsentation zusammengefasst. Die Versuchsdurchführung selbst geschieht ebenfalls MATLAB-gesteuert. Jede Folie wird dabei eine Sekunde gezeigt. Anschließend hat der Proband zwei Sekunden zusätzliche Bedenkzeit für seine Antwort, während am keine Abbildungen gezeigt werden.

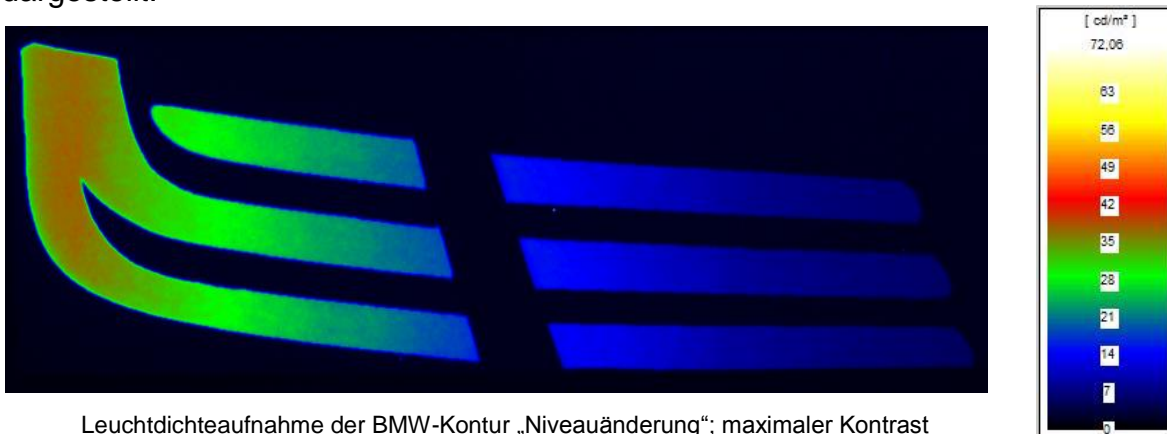
### Niveauänderung

Das Szenario „Niveauänderung“ ist gegliedert in zwei Bereiche. Zum einen ist das die Rechteckform und zum anderen die BMW-Kontur. Beiden gemeinsam ist, dass sich der Leuchtdichtegradient längs über die gesamte Fläche erstreckt. Die linke Seite ist die hellere von beiden mit etwa  $38 \text{ cd/m}^2$ , während rechts ein Minimalwert von knapp mehr als  $4 \text{ cd/m}^2$  erreicht wird. Es ergibt sich somit ein maximales Kontrastverhältnis von 8:1. Zur besseren Vorstellung werden nachstehend einige Beispiele gezeigt.



Leuchtdichteaufnahme der Rechteckfläche "Niveauänderung"; maximaler Kontrast

Bei den weiteren Folien für dieses Szenario ist der Kontrast schrittweise geringer, die Leuchtdichte auf der rechten Seite höher. Dies geht soweit, dass zwischen linkem und rechtem Rand kein Leuchtdichtegradient mehr vorhanden ist. Der gleiche Sachverhalt gilt für die BMW-Kontur. Ausgangspunkt dafür ist die oben zusehende Rechteck-fläche, die mit der Schablone der BMW-Leuchte „ausgestochen“ wird. Die Gesamt-ausdehnung der Leuchte bleibt dadurch unverändert, lediglich die Zwischenräume werden schwarz dargestellt.

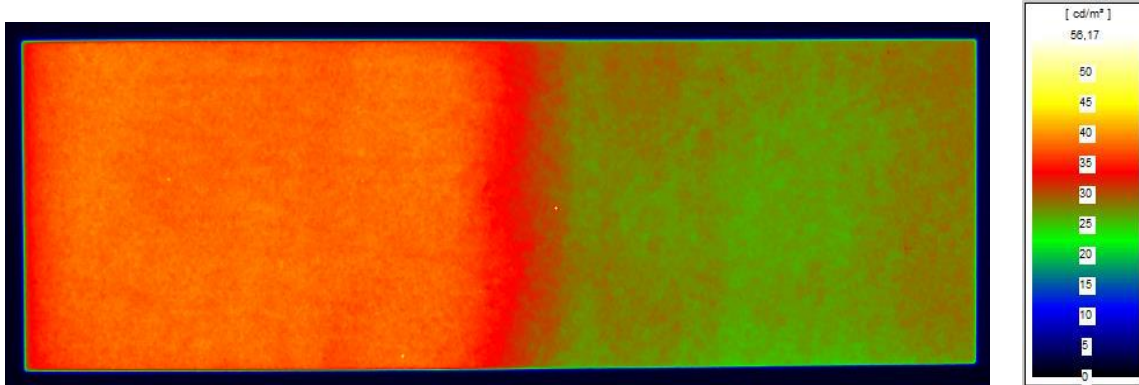


Leuchtdichteaufnahme der BMW-Kontur „Niveauänderung“; maximaler Kontrast

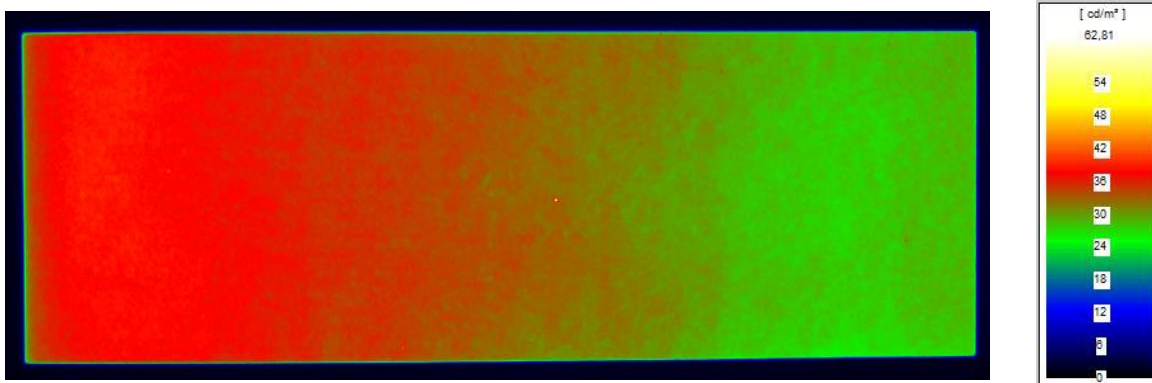
### Gradientenausweitung

Für dieses Szenario ist das Kontrastverhältnis zwischen linker und rechter Hälfte der Testfläche fest vorgegeben. Es werden rechts zwei verschiedene Leuchtdichteniveaus angenommen. Niveau1 meint ein  $\Delta L$  von  $16 \text{ cd/m}^2$  und Niveau2 ein  $\Delta L$  zwischen links und rechts von  $10 \text{ cd/m}^2$ . Auch hier ist die rechte Seite die dunklere (links konstant  $38 \text{ cd/m}^2$ ). Der Leuchtdichteunterschied bleibt also bei allen Folien konstant. Variable ist hier die räumliche Ausdehnung des Gradienten. Dieser Gradient befindet sich mittig der Testfläche, sodass beide Seiten gleich groß sind. Angegeben wird die Ausdehnung des Leuchtdichtegefälles in % der Gesamtlänge der Fläche (BMW-Kontur und Rechteck

besitzen auch hier die identischen Außenmaße). Stufenweise in Abständen von 5% wird der Gradienten von 15% auf 100% „ausgeweitet“. Die folgenden Leuchtdichteaufnahmen verdeutlichen diesen Sachverhalt.



Leuchtdichteaufnahme "Gradientenausweitung" 15%; Rechteck - Niveau2



Leuchtdichteaufnahme "Gradientenausweitung" 65%; Rechteck - Niveau2



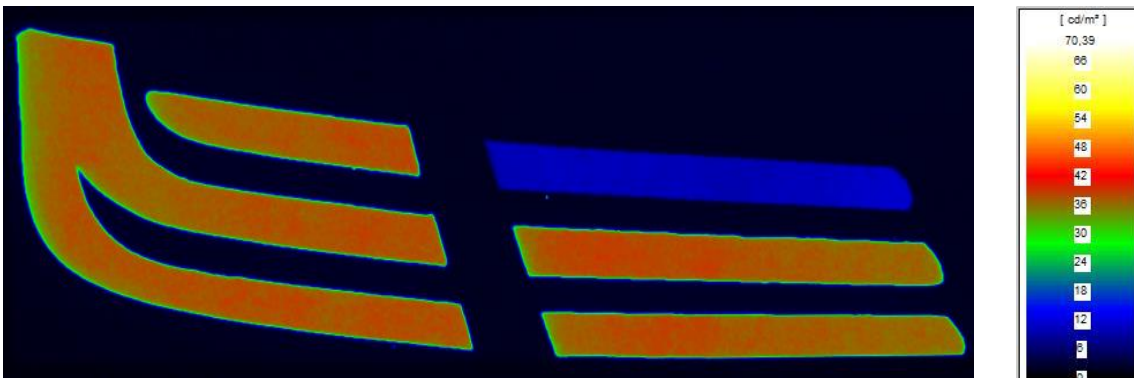
Leuchtdichteaufnahme "Gradientenausweitung" 15%; BMW - Niveau1



Leuchtdichteaufnahme "Gradientenausweitung 65%; BMW - Niveau1

### Streifenänderung

Bei diesem Szenario wird nur die BMW-Kontur verwendet. Es soll überprüft werden, wie das Probandenurteil ausfällt, sollten ganze Segmente der Leuchte eine andere Leuchtdichte aufweisen. Zu diesem Zweck wird immer einer der rechten drei Streifen dunkler dargestellt. Die Nennleuchtdichte der Leuchte beträgt auch hier  $38 \text{ cd/m}^2$ . Die Leuchtdichte der Streifen wird in einem Bereich von  $10 \text{ cd/m}^2$  bis  $38 \text{ cd/m}^2$  variiert (20 Abstufungen). Jeder der drei Streifen wird mit jeder der 20 Leuchtdichtestufen abgebildet.

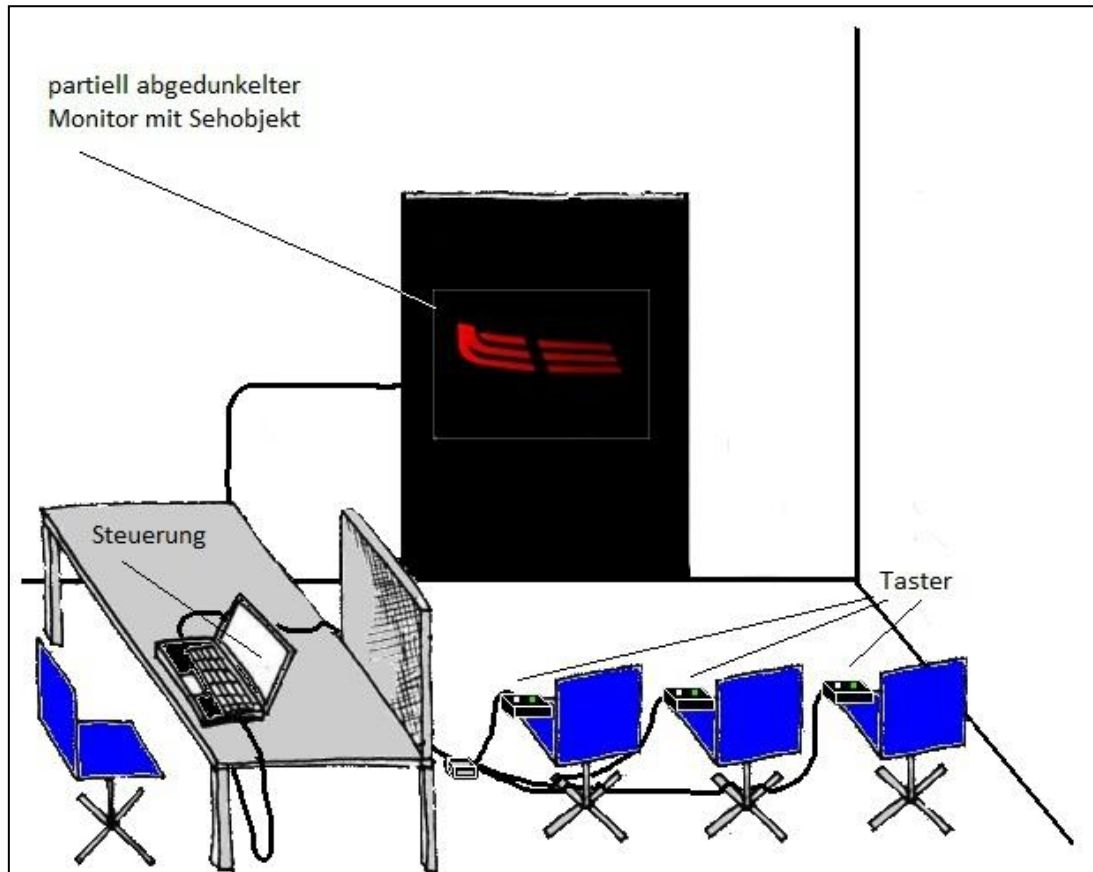


Leuchtdichteaufnahme "Streifenänderung", oberer Streifen auf  $10 \text{ cd/m}^2$  gesetzt

### Experimenteller Aufbau und Versuchsdurchführung

Der Versuch findet im Dunkellabor des L-LABs in Lippstadt statt. In diesem dunkel ausgekleideten Raum sind die Probanden und der Monitor mit den Sehobjekten durch lichtdichte schwarze Vorhänge vom Versuchsleiter abgetrennt. Im Abstand von drei Metern sitzen die Probanden orthogonal zum Bildschirm. Dieser Monitor ist mit schwarzem Tuch soweit abgedeckt, dass nur eine Öffnung von der maximalen Größe des Sehobjektes bleibt. Es ist für die Probanden also nicht mehr ersichtlich, dass es sich um einen modifizierten Röhrenmonitor handelt. Die Sehobjekte werden in Form einer von MATLAB gesteuerten PowerPoint-Präsentation automatisiert wiedergegeben. Zur Bewertung der Sehobjekte dienen Taster, die mir zwei Tasten (grün und schwarz) die Antwortmöglichkeiten „homogen“ und „inhomogen“ bieten. Über einen USB-Anschluss

sind die Taster mit dem Steuerungs-Rechner verbunden. Dort werden sowohl der Zeitpunkt des Tastendrucks als auch die jeweilige Taste erfasst und dem entsprechenden Sehobjekt und Probanden zugeordnet. Das Ergebnis wird für jedes Versuchsszenario in einem Excel-Dokument gespeichert. Eine Übersicht des Aufbaus wird in der folgenden Skizze gegeben.



Skizze des Versuchsaufbaus (Quelle: modifiziert aus Leibenger, 2006)

## Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

Für die „Niveauänderung“ lässt sich festhalten, dass die untersuchten Flächen bereits als homogen akzeptiert werden, auch wenn Inhomogenitäten wahrnehmbar sind. Dies ist mitunter mit der Erwartungshaltung der Probanden zu erklären. Es kann also angenommen werden, dass schwach ausgeprägte Inhomogenitäten in einer Schlussleuchte durchaus zu erwarten sind und deshalb nicht negativ bewertet werden. Der Unterschied zwischen BMW-Kontur und Rechteckfläche zeigt auf, dass die strukturierte Leuchte insgesamt besser bewertet wird, was die Homogenität anbelangt. Ein möglicher Grund ist die vertikale Trennung in zwei Teile. Dadurch kann der Horizontal ausgerichtete Gradient als weniger stark empfunden werden. Außerdem ist die leuchtende Fläche in Streifen aufgeteilt. Diese Streifen „folgen“ jedoch nicht exakt dem

---

Leuchtdichtegefälle. Über die Länge der Streifen betrachtet, nimmt der Leuchtdichtegradient im Vergleich zur horizontalen Ausrichtung also nicht gleichförmig ab. Des Weiteren entstammt die Leuchtenkontur einer real existierenden Schlussleuchte. Es besteht daher die Möglichkeit, dass reale Leuchten generell besser bewertet werden, als eine hypothetische, rechteckige, große Fläche.

Insgesamt ergibt sich für die „Gradientenausweitung“ ein ähnlicher Eindruck wie für die „Niveauänderung“. Die BMW-Kontur wird kontinuierlich homogener bewertet, obwohl identische Leuchtdichteverhältnisse vorliegen. Die Gründe hierfür sind nicht ganz identisch mit den oben genannten. In diesem Zusammenhang ist die dunkle vertikale Unterteilung in der BMW-Kontur, für den „schmalen“ Gradienten wesentlicher Bestandteil der homogenen Beurteilung. Ebenso wie diese Unterteilung ist auch der Leuchtdichtegradient mittig auf der Stimulusfläche platziert. Wird der Gradient recht schmal gewählt, liegt er gänzlich im Bereich der Unterteilung und ist somit nicht mehr in der Leuchtfläche selber zu finden. Wird der Gradient „breiter“ gewählt, ist er zwar sichtbar, wird aber bereits aufgrund seiner Ausdehnung weniger stark wahrgenommen. Auf diese Weise ist die homogenere Bewertung der Kontur zu erklären. Dass die Sehobjekte auch bei diesen Szenarien bezüglich ihrer Akzeptanz besser bewertet werden, ist mit den gleichen Effekten wie bei der Niveauänderung zu erklären.

Schließlich muss noch auf die Leuchtdichteänderung einzelner Streifen der BMW-Kontur eingegangen werden. Es wird die Leuchtdichte der drei rechten Streifen in der Kontur jeweils einzeln getrennt voneinander verringert, wobei immer die gleichen Leuchtdichteverhältnisse hergestellt werden. Weitere Inhomogenitäten (in Form von Gradienten o.ä.) treten in diesem Fall nicht auf. Eine Leuchtdichteverringeringung des unteren Streifens von 45% führt zum Erreichen des Schwellenwerts. Für die beiden anderen Streifen ergibt sich ein etwas höherer Schwellenwert von ca. 60% des Betrags der ursprünglichen Leuchtdichte. Analog dazu liegen die Ergebnisse für die Grenzwerte entsprechend höher. Bei etwas weniger als 40% Leuchtdichteverringeringung des unteren Streifens, akzeptiert das Probandenkollektiv (zu 80%) die Gesamtfläche als homogen. Bei den beiden anderen Streifen darf die Differenz nur etwa 30% betragen, um den gleichen Grenzwert einzuhalten.

Es zeigt sich ein insgesamt recht einheitliches Bild, werden einzelne Teile der Kontur mit einer niedrigeren Leuchtdichte betrieben. Der untere Streifen wird von den Probanden als am wenigsten kritisch bewertet. Das liegt womöglich daran, dass der Streifen am Rand der Kontur zu finden ist. Der mittlere Streifen kann im Gegensatz dazu mit der Leuchtdichte

---

der oberen und unteren Streifen verglichen werden, wodurch Leuchtdichtedifferenzen eher ins Auge fallen können. Dass der obere Streifen ähnlich kritisch vom Auge des Probanden beobachtet wird, mag damit zu begründen sein, dass der obere Rand der Kontur eher in den Blickpunkt tritt.

## **Zusammenfassung und Ausblick**

Ausgehend von den drei aufgestellten Hypothesen wurden bisher genutzte Modelle zur Bestimmung von der Homogenität, bzw. Gleichmäßigkeit leuchtender Flächen aufgeführt und gegenüber gestellt. Mit Hilfe von Probandentests, galt es zu prüfen ob und in wie weit diese Modelle in der Lage sind die Homogenität tatsächlich wiederzugeben. Dazu mussten Probanden Stimuli in Form von nachgebildeten Schlussleuchten mit definierten Leuchtdichteverteilungen hinsichtlich ihrer Homogenität beurteilen. Es musste entschieden werden, ob eine Fläche als homogen oder als inhomogen einzustufen ist. Unterschieden wurde weiterhin zwischen der absoluten Wahrnehmbarkeit von Inhomogenitäten und der Inhomogenitäten, die vorhanden sein können, ohne dass eine PKW-Heckleuchte inakzeptabel bezüglich ihrer Homogenität erscheint. Die Aussagen der Probanden bestätigten die aufgestellten Hypothesen für die untersuchten Verhältnisse. Demnach werden Flächen unterschiedlichen Designs, aber identischer Leuchtdichteverhältnisse, als verschieden homogen eingestuft. Es hängt also von Design ab, wie groß Leuchtdichtekontraste sein dürfen, um für das menschliche Auge wahrnehmbar zu sein. Zum Beispiel können „Leuchtdichteaussetzer“ entlang eines Gradienten dessen Wahrnehmung mindern. Weiterhin hat sich herausgestellt, dass Leuchtdichteunterschiede erst ab einem Kontrast-Abstands-Verhältnis (Leuchtdichtegradient) wahrgenommen werden, obwohl messbar eindeutig Inhomogenitäten vorhanden sind. Schließlich konnte auch bestätigt werden, dass Flächen eine akzeptable Homogenität besitzen, auch wenn weiterhin Inhomogenitäten wahrzunehmen sind. Diese Aussagen gelten vorerst ausschließlich für die untersuchten Situationen. Um allgemeine Aussagen treffen zu können, sind weitere Untersuchungen und Versuche nötig. Das heißt, dass zum einen weitere Leuchten-designs bezüglich der hier ausgewählten Kriterien zu prüfen und zu vergleichen sind. Zum anderen gibt es Verbesserungen für den Versuchsaufbau selbst. Es ist ein anderes Wiedergabemedium zu finden, um tatsächlich allen Forderungen der ECE-R7 nachzukommen und somit auch Ergebnisse zu generieren, die mit realen Schlussleuchten noch besser vergleichbar sind. Auch in den Abmessungen sollte das neue Wiedergabesystem größere Dimensionen erreichen. Somit ist es möglich wesentlich



---

mehr und verschiedenere Leuchtendesigns abzubilden und zu vergleichen. Als Stichwort seien hier die vertikal angeordneten Schlussleuchten des Volvos C60 zu nennen. In diesem Zusammenhang wäre zu überprüfen, ob vertikal ausgerichtete Leuchtdichtegradien in anderer Art wahrgenommen werden, als identische Gradienten in horizontaler Lage. Desweiteren muss über die Erweiterung des Tasters der Probanden nachgedacht werden. Um Homogenitäten besser klassifizieren zu können, müssen mehrere Abstufungs-möglichkeiten bestehen. Denkbar ist eine Klassifizierung in Stufen von 20%, sodass fünf Tasten eingesetzt werden können. Auf diese Weise wird auch die Vergleichbarkeit mit den Modellen aus der Literatur verbessert. Diese teilen Homogenität meist in Stufen, was im vorliegenden Versuch nicht geschah, da binär geantwortet wurde (nur „homogen“ oder „inhomogen“). Daher können bestehende Klassifikationen weder bestätigt, noch als unbrauchbar eingestuft werden. Die bisher genutzten Modelle können in Ihrer Anwendbarkeit für PKW-Schlussleuchten nicht überzeugen. Vielversprechend scheinen jedoch die Ansätze aus dem OLED100.eu-Projekt, die nicht nur Minima und Maxima der Leuchtdichtevertellung nutzen, sondern auch den Leuchtdichtegradien einbeziehen. Dadurch kann mit der bisherigen Umsetzung eine mäßige Korrelation mit den Probandendaten erzielt werden. Jedoch muss in diesem Zusammenhang auf zukünftige Untersuchungen verwiesen werden, deren Ziel es sein muss, diese oder andere Ansätze an die Bedingungen von Schlussleuchten anzupassen, um so die Korrelation zu erhöhen.

Zusammenfassend kann die vorliegende Untersuchung also als Einstieg in diese Thematik angesehen werden. Es sind Vorschläge zur Verbesserung der Wahrnehmung von Homogenitäten daraus ableitbar und es werden Probleme bei der Homogenitätsbestimmung aufgezeigt.

---

## Literaturverzeichnis

- [1] B. d. J. „Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung § 53,“ 21 April 2009. [Online]. [Zugriff am 09 November 2011].
- [2] B. u. S. Bundesministerium für Verkehr, 2011. [Online]. Available: [www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB-LA/ece-regelungen.html?nn=35602#doc20394bodyText2](http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB-LA/ece-regelungen.html?nn=35602#doc20394bodyText2). [Zugriff am 08 November 2011].
- [3] J. Ripperger, *Lichttechnische Anforderungen an Schluß- und Bremsleuchten für Kraftfahrzeuge*, Darmstadt: Herbert Utz Verlag - Wissenschaft, 2000.
- [4] A. Kaltenbach, *Entwicklung einer intelligenten Heckleuchte zur adaptiven Anpassung der Lichtsignale an variable Sichtbedingungen*, Ilmenau: Technische Universität Ilmenau, 2009.
- [5] T. Gerloff, D. Friedrich und K. Diekmann, „Die Leuchtdichtehomogenität von organischen Leuchtdioden,“ pp. 64-69, 2011.
- [6] Diekmann und Gerloff, „Luminance Homogeneity of OLED Lighting Tiles - A Route to Standardisation,“ *OSADIRECT*, pp. 24 - 27, September 2009.
- [7] M. Eckert, *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr*, München: Verlag Technik GmbH, Berlin, 1993.
- [8] M. Kleinkes, *Objektivierte Bewertung des Gütemerkmals Homogenität für Scheinwerfer-Lichtverteilungen*, Bielefeld: Universität Bielefeld, 2003.
- [9] R. Baer, *Beleuchtungstechnik Grundlagen*, Berlin: Verlag Technik GmbH, 1990.
- [10] DIN, *DIN 5035-8*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2007.
- [11] E. B. Goldstein, *Wahrnehmungspsychologie*, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag GmbH, 1997.
- [12] D. Gall, *Grundlagen der Lichttechnik Kompendium*, Ilmenau: Richard Pflaum Verlag GmbH & Co. KG München, 2004.
- [13] R. Baer, *Beleuchtungstechnik Grundlagen*, Berlin: Verlag Technik GmbH, 1996.
- [14] M. Richter, *Einführung in die Farbmetrik*, Berlin: de Gruyter, 1981.
- [15] C. Schierz, *Farbmetrik*, TU Ilmenau, Wintersemester 2009/2010.
- [16] C. Schierz, *Physiologische Optik*, TU Ilmenau, Sommersemester 2010.
- [17] H.-J. Hentschel, *Licht und Beleuchtung*, Heidelberg: Hüthig, 2002.

- 
- [18] S. Völker, *Hell- und Kontrastempfindung - ein Beitrag zur Entwicklung von Zielfunktionen für die Auslegung von Kraftfahrzeug-Scheinwerfern*, Paderborn: Universität Paderborn, 2006.
- [19] M. Leibenger, *Kontrastempfindlichkeit unter mesopischen Adaptationsbedingungen*, Paderborn: Universität Paderborn, 2006.
- [20] Schlag, Petermann, Weller und Schulze, *Mehr Licht, Mehr Sicht, Mehr Sicherheit?*, Wiesbaden: GWV Fachverlag GmbH, 2009.
- [21] A. Cohen, *Blickverhalten des Fahrzeuglenkers als Komponente des Verkehrssicherheitsverhalten*, Köln: TÜV Rheinland: H. Häcker, 1987.
- [22] S. Pedersen, „Wikipedia.org Artikel: Kathodenstrahlröhre,“ [Online]. Available: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9b/CRT\\_color\\_enhanced.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9b/CRT_color_enhanced.png). [Zugriff am 08 Februar 2012].
- [23] V. GmbH, *Visusmessgerät R22*, 2002.