

## **Subjektive Bewertungskriterien von Abblendlichtverteilungen aus der Sicht von Fahrzeugführern**

*M. de Wille<sup>1</sup>, Dr.-Ing. C. Jebas<sup>1</sup>, Prof. Dr. rer. nat. C. Neumann<sup>2</sup>;*

*<sup>1</sup> BMW Group, EK-711, Knorrstraße 147, 80788 München;*

*<sup>2</sup> Karlsruher Institut für Technologie, LTI, Engesserstr.13, 76131 Karlsruhe*

### **Abstract**

In der automobilen Lichttechnik findet seit einigen Jahren ein rasanter Wandel statt. Neue Leuchtmitteltechnologien ermöglichen es den Ingenieuren, die Lichtverteilungen noch freier anzupassen. Neben der Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben sind aber bei der Entwicklung von Scheinwerfersystemen vor allem physiologische und psychologische Faktoren zu berücksichtigen. So unterstützt eine physiologisch optimierte Scheinwerfereinstellung den Fahrer bei seiner Sehaufgabe. Das geschieht durch situationsabhängiges Ausleuchten der area of interest (AOI), ohne negative Beeinflussung des Kontrastempfindens des Fahrers durch Eigenblendung zu verursachen. Eine psychologisch optimierte Lichtverteilung stärkt das Sicherheitsempfinden des Fahrers.

Angesichts der raschen Weiterentwicklung der Scheinwerfersysteme stehen detaillierte Untersuchungen zu subjektiven Bewertungskriterien von Abblendlichtverteilungen noch aus. Somit bleibt viel Raum für Interpretationen und die Bewertung durch die Experten kann in einigen Fällen von der Bewertung durch die Fahrzeugführer differieren. Um diese Abweichungen zu vermeiden, braucht man objektive Faktoren, die die mehrheitliche Fahrermeinung repräsentieren.

Üblicherweise werden solch kundennahe Kriterien mithilfe einer oder mehrerer Probandenstudien ermittelt. Dazu müssen die Lichtverteilungen notwendigerweise vergleichbar sein und die einzelnen Faktoren müssen reproduzierbar verändert werden können. Da bei realen Scheinwerfern zu viele Variablen im Produktionsprozess einen deutlich sichtbaren Einfluss auf das Ergebnis haben, muss die Studie an einem Nachtfahrsimulator durchgeführt werden.

In dieser Arbeit wird ein Matlab-Tool entwickelt, mit dem es möglich wird, Abblendlichtverteilungen auf der Straße simulativ zu bearbeiten und individuell zu gestalten. Dadurch kann man mehrere Faktoren, wie zum Beispiel die Helligkeitsverteilung in den verschiedenen Ausleuchtungsbereichen, die Homogenität und Farbtemperatur der Lichtverteilung oder den Gradienten der Hell-Dunkel-Grenze frei verändern.

Darauf aufbauend wird dann eine ausgewählte Abblendlichtverteilung hinsichtlich dieser Kriterien verändert und dient so als Basis für eine Probandenstudie. Im Mittelpunkt steht dabei, welche Bereiche der Lichtverteilung für den Fahrzeugführer wichtig sind. Die verschiedenen Abbildungsmöglichkeiten von LED-Chips bei LED-Freiform Scheinwerfern werden ebenfalls untersucht.

Weiterhin besteht vor allem durch die LED Technologie die Möglichkeit, die Farbtemperatur der Lichtverteilung freier zu gestalten. Tiefgehende Untersuchungen zum Einfluss der Lichttemperatur auf den Fahrer stehen derzeit ebenfalls noch aus und werden Teil dieser Studie sein. Viele Faktoren können nur zu Lasten anderer Faktoren optimiert werden. Deshalb ist eine Gewichtung der Faktoren, die einen Einfluss auf die Bewertung der Probanden haben, notwendig.

## **1 Grundlegende Fragestellungen**

In dieser Arbeit werden drei verschiedene Eigenschaften von Abblendlichtverteilungen hinsichtlich der Beeinflussung des psychologischen Fahrerbefindens überprüft. Es wird getestet, in welchen Bereichen der Straße die Beleuchtungsstärke am höchsten sein muss. Entscheidende Parameter sind hierbei die Vorfeldausleuchtung sowie die Reichweite in der Distanz und Breite. Auch die Korrelation der TC 4-45 Bewertung mit dem psychologischen Wohlbefinden wird mit dieser Gruppe untersucht. Die TC 4-45 Methode ist ein von der CIE vorgestelltes Verfahren, das objektive Vergleiche von Abblendlichtverteilungen ermöglicht. Es wird in (CIE, 2010) genau beschrieben.

Eine weitere Gruppe von Lichtverteilungen wird erstellt, um den Einfluss verschiedener LED-Freiform Lichtverteilungen auf das Komfortgefühl des Fahrers zu untersuchen. Hier wird die Wirkung verschiedener Abbildungsformen von LED-Chips in den Verkehrsraum auf die subjektive Fahrerbewertung überprüft. In einer abschließenden Gruppe werden die Auswirkungen der Farbtemperatur von Abblendlichtverteilungen auf den Fahrer untersucht.

## **2 Konzeptionelles Design der Probandenstudie zur Erhebung von psychologischen Qualitätskriterien**

Ziel des Versuches ist es, Erkenntnisse über den Einfluss verschiedener Eigenschaften von Abblendlichtverteilungen auf das subjektive Komfortgefühl eines Fahrzeugführers zu gewinnen. Die direkte Frage nach dem subjektiv empfundenen Komfort ist allerdings sehr kritisch, da jede Person eine eigene Definition der Komfortkriterien hat und die Bewertungen so nicht vergleichbar sind.

Deshalb werden drei abhängige Variablen erhoben, die einen Einfluss auf das Komfortgefühl haben. Die erste Variable ist die gefühlte Sicherheit des Fahrers. Weiterhin wird der von der Lichtverteilung ausgehende Qualitätseindruck als abhängige Variable erhoben. Die Möglichkeit des entspannten Autofahrens geht als dritte abhängige Variable in die Auswertung ein. Sämtliche abhängigen Variablen werden über einen psychologischen Fragebogen gewonnen. Die Daten werden mittels einer statischen Probandenstudie mit Messwiederholung in einem Nachfahrsimulator erhoben.

Basierend auf einer Ausgangslichtverteilung werden elf Lichtverteilungen erstellt. Bei fünf dieser Lichtverteilungen wird der Lichtstrom in verschiedene Ausleuchtungsbereiche unterschiedlich stark verteilt. Von den verbleibenden sechs Lichtverteilungen bilden drei Varianten verschiedene Inhomogenitäten ab. Die restlichen drei Lichtverteilungen werden mit unterschiedlichen Farbtemperaturen dargestellt. Die Lichtverteilungen werden mit einem Matlab-Tool bearbeitet und erstellt.

Jede Lichtverteilung wird während einer zweieinhalb Minuten dauernden Fahrt auf immer derselben Strecke präsentiert. Im Anschluss an die Fahrt wird die Lichtverteilung vom Probanden bewertet. Als Ankerreiz dienen eine sehr homogene und großflächige Lichtverteilung sowie eine Lichtverteilung mit deutlichen Inhomogenitäten und einem vergleichsweise engen Ausleuchtungsbereich, die vor dem Versuchsablauf in einer Proberunde präsentiert werden. Um einen Einfluss auf die Bewertung durch zu weitreichende Fachkenntnis zu vermeiden, werden lediglich lichttechnische Laien als Probanden zugelassen.

### 3 Matlab-Tool zur Veränderung von IES-Dateien

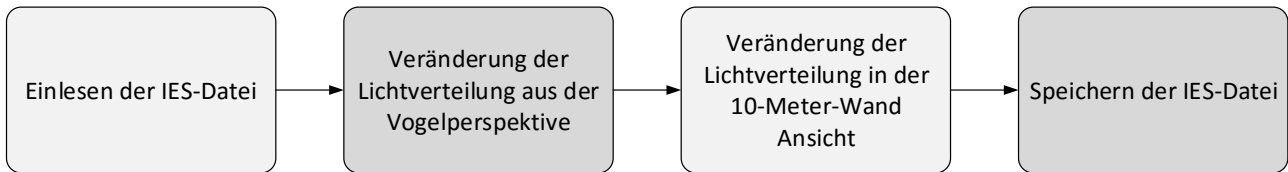


Abbildung 1: Ablauf des Matlab-Tools

Lichtverteilungen werden in IES-Dateien gespeichert und ausgewertet. Die Anforderungen an das Matlab-Tool zu deren Veränderung sind in Diagrammform in Abbildung 1 dargestellt.

Dem Benutzer wird beim Programmstart eine Auswahlmöglichkeit über die zu bearbeitende Datei gegeben. Die Beleuchtungsstärkeverteilung wird in der Vogelperspektive (Birdseyeview) und in der 10-Meter-Wand Ansicht dargestellt. In diesen beiden Darstellungen ist die Lichtverteilung individuell gestalt- und veränderbar. Nach erfolgter Einflussnahme durch den Benutzer wird die Lichtverteilung wieder in eine IES-Datei umgewandelt und gespeichert.

Die Lichtverteilung erfährt dabei keine unerwünschten Änderungen. Das Niveau des Streulichtes und die Beleuchtungsstärke an den nicht veränderten Positionen sind nach dem Programmablauf gleich wie vor dem Programmstart. Mithilfe des Tools ist es möglich, die Beleuchtungsstärke in definierten Bereichen zu verändern. Dazu können Beleuchtungsstärkeniveaus eingefügt werden, die entweder die Grundfläche eines Rechtecks, einer Ellipse oder eines Kreises haben. Die Ränder können dabei abrupt, linear oder realitätsnah verlaufen und sind in Abbildung 2 skizziert. Die Werte können wahlweise absolut eingefügt werden oder der bestehenden Beleuchtungsstärkeverteilung additiv überlagert werden.

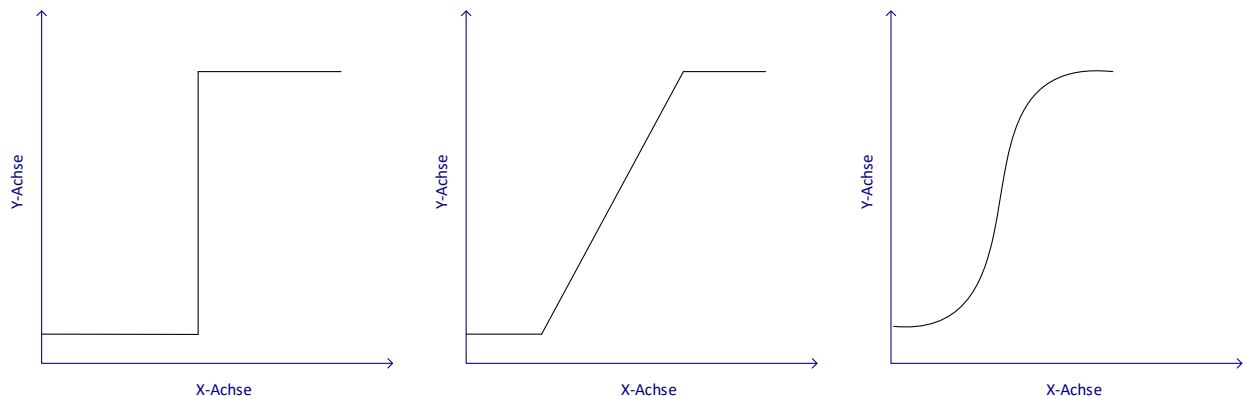


Abbildung 2: Mögliche Randverläufe der Inhomogenitäten im Matlab-Tool;  
links: abrupt, Mitte: linear, rechts: realitätsnah

### 4 Untersuchte Lichtverteilungen und Fragestellungen

Alle Lichtverteilungen haben denselben Gesamtlichtstrom. Um Unterschiede in der Bewertung auf ihre Ursache rückschließen zu können, wird eine Ausgangslichtverteilung für die Untersuchung angepasst. Es werden verschiedene Inhomogenitäten in der Birdseye-view und in der 10-Meter-Wand Ansicht eingebracht. Danach werden die Verteilungen mit

$$k_{\text{Skalierung}} = \Phi_{\text{Ausgang}} / \Phi_{\text{Verteilung}}$$

multipliziert und so dem Lichtstrom der Ausgangsverteilung angeglichen. Dadurch ergeben sich verschiedene Ausleuchtungsbereiche. Bringt man beispielsweise im Vorfeld einen dunkleren Bereich ein, erhöht sich die Reichweite in allen Zonen der TC 4-45 Bewertung.

Wie in Abschnitt 2 bereits erwähnt, werden drei Gruppen gebildet. In der ersten Gruppe werden Lichtverteilungen mit verschiedenen TC 4-45 Bewertungen untersucht. Dazu wird für eine Verteilung ein großflächiger Bereich im Vorfeld abgedunkelt. In einer weiteren Verteilung wird ein kleinerer Bereich im Vorfeld abgedunkelt. Hier ist die Beleuchtungsstärkedifferenz  $E_{diff}$  deutlich größer als bei der vorher genannten Verteilung, um die Lichtstromdifferenz möglichst konstant zu halten. Nach Multiplikation mit  $k_{Skalierung}$  ist die TC 4-45 Auswertung dieser beiden Verteilungen nahezu identisch.

Außerdem werden zwei den eben beschriebenen ähnliche Verteilungen erstellt. Hier werden allerdings helle Bereiche eingefügt, um die Größe der Zonen A, B und C zu verringern. Die fünfte Verteilung in dieser Gruppe verfügt über ein sehr breites Vorfeld, hat allerdings eine deutlich geringere Reichweite in die Ferne.

In der zweiten Gruppe von Lichtverteilungen werden die Einflüsse der verschiedenen Abbildungsmöglichkeiten von LED-Chips in LED-Freiform Scheinwerfern untersucht. Dazu wird eine Lichtverteilung mit sehr deutlich abgezeichneten LED-Chip Abbildungen erstellt. Eine weitere Verteilung weist sehr unscharfe und großflächige LED-Chip Abbildungen auf. Die dritte Verteilung bildet die LED-Chips moderat auf einer mittelgroßen Fläche in den Verkehrsraum ab.

Eine dritte Lichtverteilungsgruppe dient der Untersuchung des Einflusses der Farbtemperatur der Lichtverteilung. Dazu wird die Ausgangslichtverteilung mit drei verschiedenen Farbtemperaturen dargestellt:  $T_1 = 4000K$ ;  $T_2 = 5000K$ ;  $T_3 = 6000K$ .

Den Probanden wird nach jeder Lichtverteilung ein Fragebogen mit den folgenden drei Aussagen präsentiert:

- „Ich fühle mich mit dieser Lichtverteilung sicher im nächtlichen Straßenverkehr“
- „Die Lichtverteilung macht einen qualitativ hochwertigen Eindruck.“
- „Die Lichtverteilung ermöglicht ein entspanntes Fahren im nächtlichen Straßenverkehr.“

Diese Aussagen werden von den Probanden auf einer sechsstufigen Skala von 1 („Trifft überhaupt nicht zu“) bis 6 („Trifft voll zu“) bewertet.

## 5 Statistische Auswertung der Studienergebnisse

Nach einem Sehtest gehen die Bewertungen von 30 Probanden in die Auswertung ein. Probanden mit einem binokularen Visus  $V_{CC} < 1,0$  oder einem Kontrastsehvermögen schlechter als 10% werden dabei vom Versuch ausgeschlossen. 15 der akzeptierten Probanden sind männlich. Die anderen 15 Probandinnen sind weiblich. Die Anzahl der Sehhilfen wird ebenfalls überprüft. 16 Versuchspersonen benötigen keine Sehhilfe. Von den verbleibenden 14 Probanden tragen 12 eine Brille und 2 nutzen Kontaktlinsen.

Der jüngste Versuchsteilnehmer ist zum Zeitpunkt des Versuches 21 Jahre alt, die älteste Versuchsperson ist bei der Datenakquise 29 Jahre alt. Keiner der Probanden verfügt über lichttechnische Vorkenntnis.

Die Bewertungsdaten werden in Matrizen entsprechend der abhängigen und der unabhängigen Variablen zusammengefasst und mithilfe von Winstat ausgewertet. Ein Test auf Ausreißer führt zu dem Ergebnis, dass alle Werte in die Analyse aufgenommen werden können. Da die Stichprobe sehr klein ist ( $n=30$ ), werden die Bewertungen mit dem

$\chi^2$ -Anpassungstest auf Normalverteilung überprüft. Anschließend werden die Bewertungsgruppen mit dem Bartlett-Test auf Varianzhomogenität überprüft.

Das Signifikanzniveau wird für alle statistischen Tests auf  $\alpha = 0,05$  festgelegt. Beim Unterschreiten dieser Grenze wird die Nullhypothese abgelehnt. Das heißt, man schließt auf signifikante Unterschiede zwischen den verglichenen Datenreihen. Für p-Werte mit  $0,05 < p \leq 0,1$  wird auf eine Tendenz zum Unterschied geschlossen. Gilt  $p > 0,1$ , wird eine Entscheidung auf signifikante Unterschiede abgelehnt.

Alle Gruppen werden mit dem verbundenen ANOVA-Test analysiert. Treten signifikante Unterschiede auf, werden innerhalb der Gruppe verbundene t-Tests durchgeführt. Dabei wird das Signifikanzniveau entsprechend per Bonferroni-Korrektur angepasst. Anschließend wird die standardisierte Mittelwertdifferenz berechnet und daraus die Effektstärke nach Cohen bestimmt.

Die Zusammenfassung aller Bewertungen ist in den Abbildungen **Error! Reference source not found.** bis Abbildung 5 als Box&Whisker Diagramm graphisch aufbereitet. Hinsichtlich der Sicherheit wird die Lichtverteilung mit der großen Reichweite und einem leicht abgedunkelten Vorfeld („E-20“) signifikant besser bewertet als die Lichtverteilungen mit extrem hellen oder dunklen Vorfeldern („E-30“ und „E+40“). Bei der Bewertung des Qualitätseindrucks wird die Lichtverteilung E-30 signifikant schlechter bewertet als die Lichtverteilung mit einem breiten Vorfeld („VF-breit“). Die Möglichkeit des entspannten Fahrens wird bei der Lichtverteilung E-20 signifikant besser bewertet als bei der Lichtverteilung E-30. Die Effektstärke nach Cohen ist „mittel“.

Die Gruppe der LED-Freiform Verteilungen weist in keinem der untersuchten Aspekte signifikante Unterschiede oder Tendenzen auf.

In der Farbtemperaturgruppe wird die Lichtverteilung mit  $T_1 = 4000\text{K}$  bei den Kriterien „Sicherheit“ und „Qualitätseindruck“ signifikant schlechter bewertet als die beiden anderen Lichtverteilungen. Bei der Möglichkeit des entspannten Fahrens besteht ein signifikanter Unterschied zwischen den Lichtverteilungen mit  $T_1 = 4000\text{K}$  und  $T_2 = 5000\text{K}$ . Zwischen den Lichtverteilungen mit  $T_2 = 5000\text{K}$  und  $T_3 = 6000\text{K}$  wird lediglich beim Qualitätseindruck Signifikanz festgestellt. Die Effektstärke nach Cohen ist „stark“.

## 6 Fazit

Für die psychologische Optimierung von Ablendlichtverteilungen müssen die Lichtverteilungen möglichst ausgeglichen gestaltet werden. Eine gute Ausleuchtung der area of interest ist anzustreben. Dabei sind vor allem starke negative Inhomogenitäten („Löcher“) im Vorfeld zu vermeiden. Weitere Untersuchungen zu tolerierten Inhomogenitäten im Vorfeld können auf diesen Ergebnissen aufbauen. Ziel dieser Untersuchung sollten die akzeptablen geometrischen Größen und Abmessungen der Inhomogenitäten sowie die maximal möglichen Beleuchtungsstärkedifferenzen und der Einfluss der Gradienten am Rand der Inhomogenitäten sein.

Die Abbildung von LED-Chips in den Verkehrsraum ist im untersuchten Ausmaß unbedenklich und kann somit genutzt werden, um die area of interest bestmöglich auszuleuchten. Der Einfluss der Abbildungen von LED-Chips an einer vertikalen Wand ist allerdings nicht Teil dieser Untersuchung und muss noch überprüft werden.

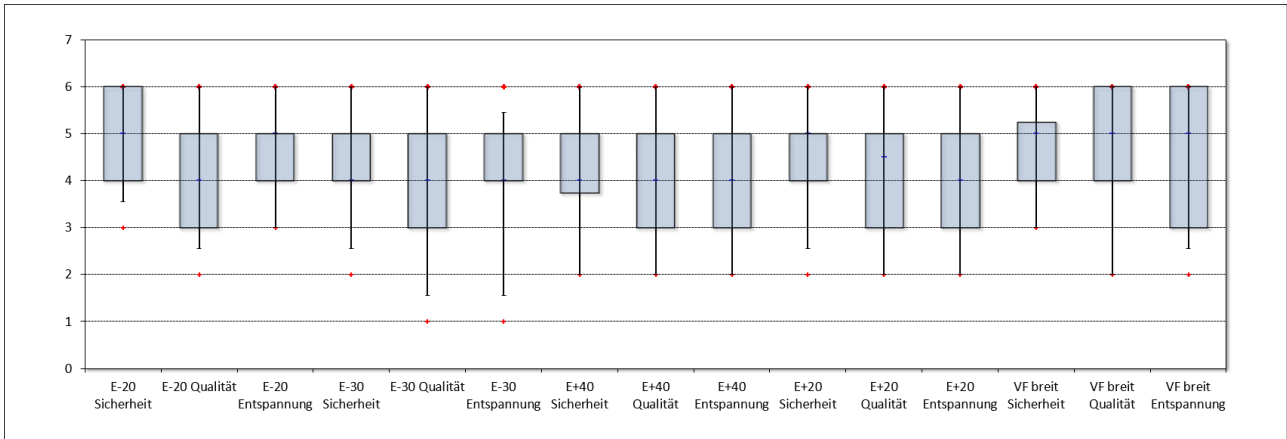
Die Farbtemperatur ist zwischen 5000 K und 6000 K zu wählen. Diese Anforderung ist analog zu den physiologischen Anforderungen. Hier wird allerdings die Blendung des Gegenverkehrs nicht beachtet. Diese ist so gering wie möglich zu halten, da bei einer Adaptation auf eine niedrigere Farbtemperatur die Blendempfindlichkeit für höhere Farbtemperaturen stärker ist.

## 7 Literaturverzeichnis

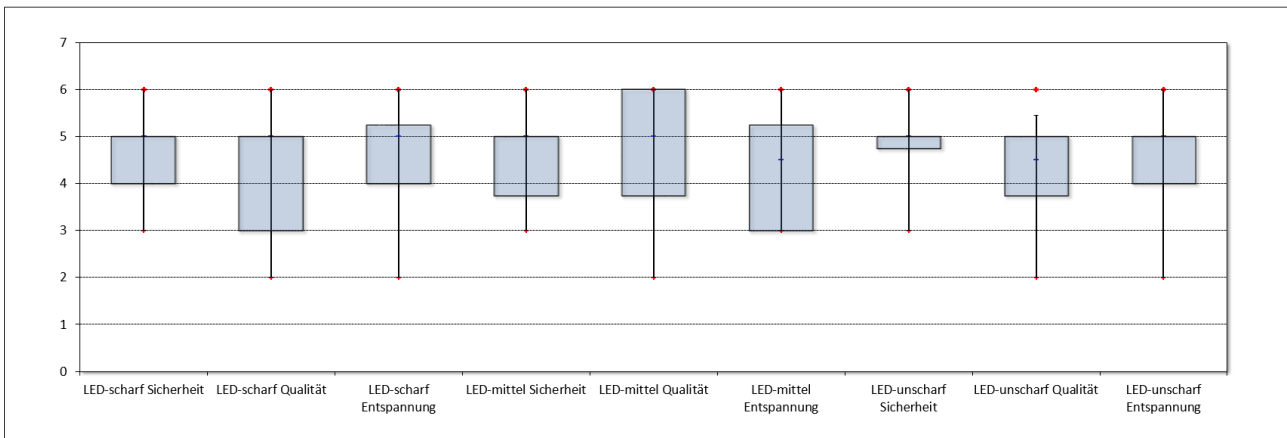
CIE. (2010). *TC 4-45: Performance Assessment Method for Vehicle Headlighting Systems*. Wien: Commission Internationale de l'Eclairage.

Hartung, J. (2009). *Statistik Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.

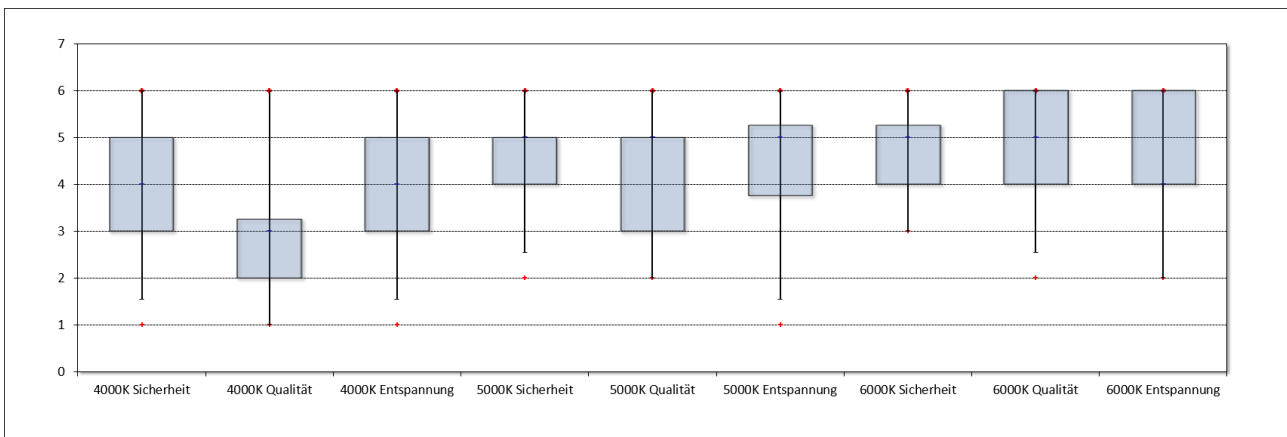
Jebas, C. (2012). *Physiologische Bewertung aktiver und passiver Lichtsysteme im Automobil*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.



**Abbildung 3: Auswertung der verschiedenen Ausleuchtungsvarianten des Verkehrsraumes**



**Abbildung 4: Auswertung der Abbildungsvarianten von LED-Chips**



**Abbildung 5: Auswertung der verschiedenen Farbtemperaturen**