

# **Untersuchungen zur Bewertung der Gleichmäßigkeit von Kfz-Signallichtfunktionen**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)**

vorgelegt der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Ilmenau

von Herrn

**Dipl.-Ing. Daniel Mensch**

geboren am 30.07.1981

in Dresden, Deutschland

vorgelegt am: 29. November 2011

verteidigt am: 11. Mai 2012

Gutachter: Univ.-Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz  
Prof. Dr.-Ing. Alexander von Hoffmann  
Dr.-Ing. Karsten Köth

# Kurzfassung

Über die Beleuchtungseinrichtungen am Fahrzeug werden unter anderem Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen von vorausfahrenden und entgegenkommenden Fahrzeugen signalisiert. Neben diesem Sicherheitsaspekt dienen die Scheinwerfer und Leuchten eines Fahrzeugs dem Designer als wichtiges Gestaltungselement und Differenzierungsmerkmal. Bislang lag vor allem das Design bei Tag im Fokus. Mittlerweile soll auch bei Dämmerung oder Nacht über eine definierte Lichtsignatur, also die sichtbare leuchtende Fläche der Signalfunktion, eine eindeutige Identifikation der Marke erzielt werden.

Dazu ist es nötig, dass die leuchtende Fläche aus nahezu allen Beobachtungsrichtungen gleichmäßig erscheint. Das heißt, dass eine Beurteilung der Gleichmäßigkeit der leuchtenden Fläche aus nur einer Hauptrichtung nicht ausreicht. Innerhalb der gesetzlichen Regelungen für Signalleuchten sind bezüglich der Gleichmäßigkeit keine Anforderungen formuliert. Geeignete Methoden zur Messung und Bewertung der Gleichmäßigkeit müssen erst entwickelt werden, denn die vorhandenen werden den neuen Möglichkeiten in der Konstruktions- und Fertigungstechnik nicht gerecht. Vor allem Signalleuchten mit mehreren leuchtenden Flächen, einer Vielzahl von LED-Kammern oder tiefen Designblenden, stellen eine große Herausforderung für die Messtechnik und die Bewertungskriterien dar.

Im Mittelpunkt der Untersuchungen steht ein automatisiertes Mess- und Bewertungsverfahren zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit von Signalleuchten. Dafür erfolgt eine präzise Definition der Gleichmäßigkeit und eine Gewichtung der Einflussfaktoren. Die Ergebnisse einer psychophysikalischen Untersuchung zur Akzeptanz von Leuchtdichteunterschieden innerhalb einer leuchtenden Fläche und zwischen benachbarten leuchtenden Flächen sowie deren Anwendung innerhalb des Bewertungsverfahrens werden vorgestellt.

Eine automatische Beurteilung der Gleichmäßigkeit bedingt, dass der Auswertesoftware die genaue Lage im 3D-Raum sowie Form und Größe der leuchtenden Fläche einer Signallichtfunktion bekannt sein muss, um autark bestimmen zu können, ob diese vollständig zu sehen ist und homogen erscheint. Dazu werden mithilfe eines Goniometers, ortsaufgelöster Leuchtdichtemesstechnik und Methoden der perspektivischen Projektion mehrere Leuchtdichteverteilungen aufgenommen und unter Zuhilfenahme der zugehörigen Geometriedaten ausgewertet. Dadurch ist es möglich, Leuchtdichteverteilungen aus beliebigen Betrachtungsrichtungen mit der idealen leuchtenden Fläche zu vergleichen und über ausgewählte statistische Kriterien zu bewerten.

Des Weiteren wird ein Ansatz zur einfachen Darstellung der Messergebnisse präsentiert, welcher in seiner Form einer Lichtstärkeverteilung ähnelt und sich durch diese Einfachheit gut in einem Benchmarksystem einsetzen lässt.

# Abstract

Exterior lights are used to signal changes in velocity and direction to other road users and pedestrians. Besides this security aspect, the vehicle stylist uses the headlamps and tail lamps as an important design feature and a competitive differentiator in style communication. While previously, the daytime styling of the lights was important, recently, stylists have moved to provide a unique identification of the brand at twilight or night with a clearly defined lit area.

For this purpose, it is necessary that the lit area appears homogeneous from relevant observation directions. The homogeneity should not be rated only from a fixed point. The legal requirements are inadequate in respect to the homogeneity of tail lamps. Suitable methods to measure and rate the homogeneity must be developed. New possibilities in design and production engineering should be taken into account. Especially signal lamps with more lit areas, a high number of small optics for LED chambers or deep bezels are a big challenge for the measuring system and the associated rating methodology.

The investigation is focusing on an automated measurement and rating methodology for automotive signal lamps. Therefore, a precise definition of the term homogeneity and the rating of sensitive influencing factors are needed. Results of a psycho physical study about the acceptance of luminance differences within one lit area and between lit areas with different viewing angles and the implementation in the rating methodology will be shown.

An automatic detection and rating of the homogeneity requires that the 3D position and shape of the lit area are known. The software system must be able to assess whether the area can be seen completely and appears homogeneous. For this purpose, several luminance distributions are evaluated with the help of a goniometer, image-resolved luminance measurement techniques, CAD data of the lit area and methods of perspective projection. Thereby, it is possible to statistically evaluate luminance distributions from arbitrary observation directions and compare the shape to the ideal 3D surface.

A new approach to visualize measuring results in a simple way - similar to a light intensity distribution - will be presented. These results can now be used in a benchmarking system.

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>   | <b>15</b> |
| 1.1      | Ziel der Arbeit . . . . .                                     | 16        |
| 1.2      | Untersuchungsgegenstand und Eingrenzung . . . . .             | 17        |
| 1.3      | Aufbau der Arbeit . . . . .                                   | 19        |
| <b>2</b> | <b>Grundlagen - Stand der Technik</b>                         | <b>21</b> |
| 2.1      | Funktion der Kraftfahrzeugbeleuchtung . . . . .               | 21        |
| 2.2      | Fahrzeugtechnische Vorschriften und Richtlinien . . . . .     | 22        |
| 2.2.1    | Begriffsbestimmungen und Definitionen . . . . .               | 23        |
| 2.2.2    | Photometrische Anforderungen an Schlussleuchten . . . . .     | 25        |
| 2.3      | Visuelle Wahrnehmung von Signalleuchten . . . . .             | 26        |
| 2.3.1    | Hellempfindung . . . . .                                      | 27        |
| 2.3.2    | Sehleistung . . . . .   | 29        |
| 2.4      | Projektive Geometrie . . . . .                                | 32        |
| 2.5      | Lochkameramodell . . . . .                                    | 34        |
| 2.5.1    | Externe Transformation . . . . .                              | 35        |
| 2.5.2    | Perspektivische Transformation . . . . .                      | 36        |
| 2.5.3    | Interne Transformation . . . . .                              | 37        |
| 2.5.4    | Einfluss von Linsenverzerrungen . . . . .                     | 38        |
| 2.6      | Digitale Filter und Bildoperationen . . . . .                 | 38        |
| 2.6.1    | Glättungsfilter . . . . .                                     | 39        |
| 2.6.2    | Kantendetektion . . . . .                                     | 40        |
| 2.6.3    | Segmentierung . . . . .                                       | 40        |
| 2.6.4    | Morphologische Operatoren . . . . .                           | 42        |
| 2.7      | Zusammenfassung . . . . .                                     | 43        |
| <b>3</b> | <b>Das Gütemerkmal Gleichmäßigkeit</b>                        | <b>45</b> |
| 3.1      | Begriffsdefinition im automobilen Umfeld . . . . .            | 45        |
| 3.1.1    | Einzelne Lichtaustrittsfläche . . . . .                       | 47        |
| 3.1.2    | Mehrere Lichtaustrittsflächen . . . . .                       | 48        |
| 3.2      | Einflussfaktoren auf die Beurteilung . . . . .                | 48        |
| 3.2.1    | Betrachtungsabstand . . . . .                                 | 50        |
| 3.2.2    | Betrachtungsrichtung . . . . .                                | 51        |
| 3.2.3    | Abgrenzung der Lichtaustrittsfläche . . . . .                 | 52        |
| 3.2.4    | Abstand zwischen den Lichtaustrittsflächen . . . . .          | 53        |
| 3.3      | Ausgewählte Ansätze zur softwarebasierten Bewertung . . . . . | 54        |
| 3.3.1    | Einzelne Lichtaustrittsfläche . . . . .                       | 56        |
| 3.3.2    | Mehrere Lichtaustrittsflächen . . . . .                       | 59        |
| 3.4      | Zusammenfassung . . . . .                                     | 60        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>4</b> | <b>Lichttechnische Untersuchungen für die softwarebasierte Bewertung</b>                    | <b>63</b>  |
| 4.1      | Untersuchungen zur Kontrastempfindlichkeit . . . . .  | 66         |
| 4.1.1    | Versuchsaufbau und Durchführung . . . . .   | 66         |
| 4.1.2    | Untersuchungsergebnisse . . . . .   | 68         |
| 4.2      | Untersuchungen zur Gradientenabhängigkeit . . . . .   | 69         |
| 4.2.1    | Versuchsaufbau und Durchführung . . . . .   | 70         |
| 4.2.2    | Untersuchungsergebnisse . . . . .   | 71         |
| 4.3      | Beurteilung verschiedener Optikkonzepte . . . . .   | 74         |
| 4.3.1    | Versuchsaufbau und Durchführung . . . . .   | 74         |
| 4.3.2    | Untersuchungsergebnisse . . . . .   | 75         |
| 4.4      | Erkennung der Signatur aus unterschiedlichen Betrachtungsrichtungen . . . . .               | 77         |
| 4.4.1    | Versuchsaufbau und Durchführung . . . . .   | 77         |
| 4.4.2    | Untersuchungsergebnisse . . . . .   | 78         |
| 4.5      | Zusammenfassung . . . . .   | 80         |
| <b>5</b> | <b>Verfahren zur Bewertung der Gleichmäßigkeit</b>  | <b>83</b>  |
| 5.1      | Messung von Leuchtdichteverteilungen aus definierten Betrachtungsrichtungen                 | 84         |
| 5.1.1    | Bestandteile der Steuerungssoftware . . . . .   | 85         |
| 5.1.2    | Aufbau und Ausrichtung der einzelnen Komponenten . . . . .                                  | 86         |
| 5.1.3    | Vorbereitung und Messdurchführung . . . . .   | 88         |
| 5.2      | Bestimmung der Lichtaustrittsflächen für eine automatisierte Auswertung . . . . .           | 90         |
| 5.2.1    | Nutzung von Geometriedaten . . . . .  | 91         |
| 5.2.2    | Perspektivische Projektion der Geometriedaten . . . . .                                     | 92         |
| 5.2.3    | Positionierung der Daten über den Leuchtdichteverteilungen . . . . .                        | 93         |
| 5.3      | Auswertung der kombinierten Daten hinsichtlich der unterschiedlichen Kriterien              | 96         |
| 5.3.1    | Programmablauf . . . . .  | 97         |
| 5.3.2    | Visualisierung der Leuchtdichteverteilungen . . . . .                                       | 98         |
| 5.3.3    | Darstellung der Ergebnisse . . . . .  | 100        |
| 5.3.4    | Erläuterungen zu den einzelnen Kriterien . . . . .  | 101        |
| 5.4      | Zusammenfassung . . . . .   | 108        |
| <b>6</b> | <b>Diskussion</b>   | <b>111</b> |
| 6.1      | Modell zur Beschreibung und Bewertung der Gleichmäßigkeit . . . . .                         | 111        |
| 6.2      | Lichttechnische Untersuchungen zur Bewertung der Gleichmäßigkeit . . . . .                  | 116        |
| 6.3      | Erweiterte Kenntnis über die Informationen innerhalb einer Leuchtdichteverteilung . . . . . | 118        |
| 6.4      | Verfahren zur Messung und Bewertung von Signallichtfunktionen . . . . .                     | 119        |
| 6.5      | Übersichtliche Darstellung der Messergebnisse . . . . .                                     | 120        |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung</b>  | <b>123</b> |
| <b>8</b> | <b>Ausblick</b>   | <b>125</b> |
| 8.1      | Anpassungen innerhalb der Gesetzgebung . . . . .  | 125        |
| 8.2      | Texturen und Geometriedatenreproduktion . . . . .   | 126        |
| 8.3      | Neue Lichtquellen und Materialien . . . . .   | 127        |
| 8.4      | Simulation und Optimierung . . . . .  | 127        |
| 8.5      | Benchmarksystem für Signalleuchten . . . . .  | 128        |

---

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>A</b> | <b>Thesen</b>  | <b>131</b> |
| <b>B</b> | <b>Anhang</b>  | <b>133</b> |
| B.1      | Photometrische Grundgrößen und Zusammenhänge . . . . .       | 133        |
| B.2      | Generierung von Geometriedaten im projektiven Raum . . . . . | 135        |
| B.3      | Einzelergebnisse zu Abschnitt 4.1 . . . . .                  | 137        |
| B.4      | Einzelergebnisse und Berechnungen zu Abschnitt 4.2 . . . . . | 138        |
| B.5      | Einzelergebnisse zu Abschnitt 4.3 . . . . .                  | 140        |
| B.6      | Berechnungen zu Abschnitt 5.3.4 . . . . .                    | 141        |
| B.7      | Messbereiche für alle Signallichtfunktionen . . . . .        | 142        |
| <b>C</b> | <b>Verzeichnisse</b>   | <b>143</b> |
| C.1      | Abbildungen . . . . .  | 143        |
| C.2      | Tabellen . . . . .   | 146        |
| C.3      | Abkürzungen . . . . .  | 147        |
| C.4      | Symbole . . . . .  | 149        |
| C.5      | Veröffentlichungen . . . . .                                 | 151        |
| C.6      | Literatur . . . . .  | 153        |