

Automatisierte Bestimmung der räumlichen Lage und Form der leuchtenden Fläche einer Signalleuchte für die Beurteilung der Homogenität aus beliebigen Beobachtungsrichtungen

*Daniel Mensch
Volkswagen AG
Brieffach 1582
D-38436 Wolfsburg
daniel.mensch@volkswagen.de*

1 Einleitung

Die lichttechnischen Einrichtungen am Fahrzeug dienen der Erhöhung der Verkehrssicherheit. Über die Beleuchtung werden unter anderem Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen von vorausfahrenden und entgegenkommenden Fahrzeugen signalisiert. Neben dem Sicherheitsaspekt dienen die Scheinwerfer und Leuchten eines Fahrzeugs dem Designer als wichtiges Gestaltungselement, um der gewünschten Formsprache Ausdruck zu verleihen. Früher lag vor allem das Design bei Tag im Fokus. Mittlerweile soll auch bei Nacht über eine definierte Lichtsignatur, also die sichtbar leuchtende Fläche der Signalfunktion, eine eindeutige Identifikation der Marke ermöglicht werden. Dazu ist es nötig, dass die leuchtende Fläche aus nahezu allen Beobachtungsrichtungen vollständig zu erkennen ist und homogen erscheint.

Das heißt, dass die Beurteilung der Homogenität der leuchtenden Fläche aus nur einer Hauptrichtung nicht ausreicht. Die gesetzlichen Anforderungen, welche an die Signalleuchten gestellt werden, sind bezüglich der Homogenität als unzureichend formuliert zu bezeichnen. Geeignete Messmethoden und Bewertungsmaßstäbe zur Beurteilung der Homogenität müssen erarbeitet werden.

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit einer möglichen Messmethode zur Bestimmung der Lage und Form der leuchtenden Flächen eines Signals und den Potentialen, dieses Verfahren möglichst vollständig zu automatisieren.

2 Bewertung des Gütemerkmals Homogenität von Signalleuchten

Die Signalleuchten eines Kraftfahrzeugs dienen der Anzeige von Richtungs- und Geschwindigkeitsänderungen der Verkehrsteilnehmer. Dies wird über eine Kodierung der Lichtsignale in Form von unterschiedlichen Helligkeiten, Farben, Formen, Größen, Positionen, Texturen, Blinkfrequenzen, der Anzahl und Anordnung unterstützt [1].

In dieser Arbeit wird speziell auf die Kriterien Helligkeit, Textur und Sichtbarkeit der leuchtenden Flächen eingegangen. Diese drei Komponenten werden innerhalb der Arbeit unter dem Begriff Homogenität zusammengefasst. Zu Beginn des Abschnitts werden außerdem die existierenden gesetzlichen Anforderungen vorgestellt.

2.1 Gesetzliche Anforderungen an Kraftfahrzeugsignalleuchten

Die Typprüfung für Fahrzeuge wird innerhalb Europas in der ECE geregelt. Es ist definiert, wie Signalleuchten hinsichtlich minimaler und maximaler Lichtstärken in definierten Raumwinkelsegmenten photometrisch bewertet werden können, um die gesetzlichen Anforderungen, die an die lichttechnischen Einrichtungen am Fahrzeug gestellt werden, abzu prüfen. In dieser Arbeit sind die ECE-Regelungen 7 und 48 von besonderer Relevanz [2,3]. In diesen Regelungen werden einheitliche Anforderungen an Photometrie und Anbau von Signalleuchten gestellt.

Über die geforderten Lichtstärken wird abgesichert, dass das Fahrzeug in fernen Distanzen erkannt werden kann. Über die Größe der leuchtenden Fläche und eine definierte Richtung der Lichtstärke lässt sich die mittlere Leuchtdichte einer Leuchte bestimmen. Die mittleren Leuchtdichten sind allerdings gesetzlich, außer über teilweise vorliegende Größenanforderungen an leuchtende Flächen, nicht limitiert. Dadurch ist es möglich, Schluss- und Bremsleuchten im Fahrzeug zu verbauen, die innerhalb der gesetzlichen Anforderungen liegen, bei Betrachtung im Nahbereich aber trotzdem eine ähnliche Hellempfindung beim Betrachter hervorrufen. Dies kann zu einer Fehlinterpretation führen.

Außerdem wird nicht auf weitere relevante Anforderungen wie die Helligkeit, Textur, Form, Größe und die Sichtbarkeit der leuchtenden Fläche eingegangen. Die ECE-Regelungen fordern nur einen gleichmäßigen Verlauf der Lichtstärkewerte zwischen den definierten Messpunkten [2, Abschnitt 2.2], für die leuchtenden Flächen werden keine Anforderungen an die Gleichmäßigkeiten definiert.

Verschiedene Gremien arbeiten an angepassten Bewertungsmethoden für Signalleuchten, um die gestiegenen Anforderungen, die sich aus den neuen Design- und Fertigungsfreiheiten ergeben haben, abzudecken. Vorangegangene Arbeiten beschreiben außerdem die Leuchtdichte als maßgebliche Größe zur Bewertung von Rückleuchten [4,5]. Seit geraumer Zeit sind kommerzielle Systeme zum Messen von Leuchtdichteverteilungen verfügbar und es ist außerdem möglich, diese zu simulieren [6,7]. Neue geeignete Methoden zum Messen und Bewerten der Homogenität von Rückleuchten, die sich auf photometrische Werte beziehen, müssen gefunden und evaluiert werden.

2.2 Bekannte Verfahren zur Bewertung der Homogenität von Leuchten

In der DIN sind verschiedene Methoden zur Beurteilung der Homogenität von Signalleuchten des Straßenverkehrs definiert. Die einfachen Verfahren definieren ein maximales Verhältnis zwischen L_{\min} und L_{\max} , zum Beispiel 1:10 [8]. Wenn das Verhältnis größer wird, wird die leuchtende Fläche als nicht mehr homogen angenommen. Diese Methode ist anwendbar für leuchtende Flächen mit geringen lokalen, aber sehr großen globalen, Änderungen der Leuchtdichtewerte. Es wird also von einer an sich gleichmäßig ausgeleuchteten Fläche ausgegangen, welche aber einem Helligkeitsverlauf unterliegt.

Eine andere Methode aus dem Bereich der Arbeitsplatzbeleuchtung ist, die beleuchtete Fläche in 100 gleichgroße Felder zu unterteilen und anschließend das Verhältnis zwischen

Standardabweichung und Mittelwert der gemessenen Beleuchtungsstärken zu bestimmen [9]. Der Wert sollte kleiner gleich 1 sein, um eine gute Gleichmäßigkeit gewährleisten zu können. Allerdings handelt es sich hierbei um die Bewertung einer beleuchteten und nicht einer leuchtenden Fläche.

Inwieweit sich die genannten Verfahren für Kraftfahrzeugsignalleuchten mit ihren typischen hohen Ortsfrequenzen und großen Richtungsabhängigkeiten eignen, muss gesondert untersucht werden.

2.3 Erweiterte Definition der Homogenität in der Automobillichttechnik

Im Folgenden soll erklärt werden, welche Bestandteile Berücksichtigung finden sollten bei einer Definition der Homogenität und einem möglichen Messprinzip. Die Homogenität oder auch Gleichmäßigkeit im Allgemeinen beschreibt die Gleichheit einer Eigenschaft über die gesamte Ausdehnung eines Systems. In dieser Arbeit soll eine Unterteilung in einen Mikro- und einen Makroanteil erfolgen. Der Mikroteil besteht aus der lokalen Beschreibung der Änderungen der Ortsfrequenzen durch Facetten der Reflektoren oder Optiken auf den Lichtscheiben. Der Makroteil beschreibt die Änderung der Helligkeit über die komplette Ausdehnung der Leuchte, siehe Abbildung 1. Die Absicherung und Wahrnehmung der Effekte hängt maßgeblich vom Betrachtungsabstand, dem Sehvermögen, der Adaptationsleuchtdichte und der Betrachterposition ab.

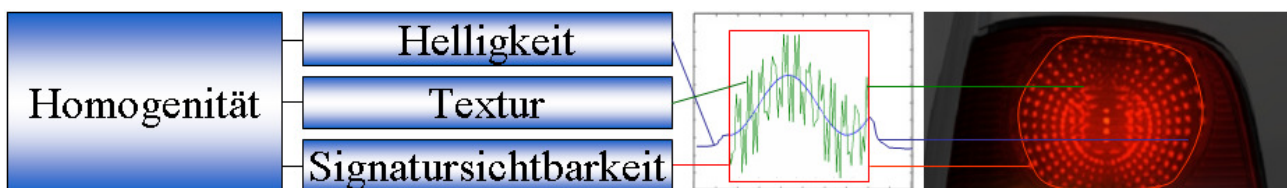


Abbildung 1: schematische Aufteilung der Homogenitätseinflüsse

Um die Homogenität einer Leuchte bewerten zu können, muss diese aus unterschiedlichen Betrachtungsrichtungen bewertet werden. Diese Anforderung geht einher mit einer weiteren Forderung der Designer: Die vollständige Erkennung der 3D-Form der leuchtenden Fläche aus möglichst allen Betrachtungswinkeln. Diese Eigenschaft der Leuchten wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Signatursichtbarkeit bezeichnet. Somit ergeben sich die folgenden drei Haupteinflüsse auf die Homogenität:

- **Helligkeit:** Die Helligkeit beschreibt die Hellempfindung, die durch die wahrgenommene Leuchtdichte von Objekten erzeugt wird. Es gilt verschiedene Aspekte zu berücksichtigen wie den Sehwinkel, das Adaptationsniveau, die Farbsaturation, Darbietungsdauer, Nichtlinearität der Hellempfindung und andere [10].
- **Textur:** Die Textur ergibt sich aus den Optiken auf den Lichtscheiben und dem Reflektor oder den Auskoppeloptiken von Lichtleitern. Über die Textur lässt sich die Form und die Dreidimensionalität einer Leuchte beschreiben. Kleine Strukturen auf den Licht-

scheiben verändern die Wirkung der Leuchte aufgrund von Reflexen und Schatten permanent. Der Designer gibt die Anmutung der Textur vor. Dies stellt eine große Herausforderung für die Optikdesigner und Lichttechniker dar, weil die optisch wirksamen Flächen nur noch in wenigen Parametern angepasst werden können.

- **Signatursichtbarkeit:** Eine weitere große Herausforderung für Simulationsprogramme und Messsysteme stellt die Signatursichtbarkeit dar, da eine Vielzahl von Ansichten berechnet oder gemessen und vor allem ausgewertet werden müssen. Aus diesen Informationen kann mit Hilfe einer idealen Vorgabe bestimmt werden, aus welchen horizontalen und vertikalen Betrachterpositionen die gewünschte Leuchtsignatur noch sichtbar ist.

Die Homogenität kann durch weitere Effekte beeinflusst werden, wie die Direkteinsicht auf die Wendel der Glühlampe, Abschattungen durch den Lampenhalter und das Lampenloch und Moiré-Effekte durch die verwendeten Optiken.

Im folgenden Abschnitt wird speziell auf die Signatursichtbarkeit und eine mögliche Messmethode zur Erfassung dieser eingegangen.

3 Messsystem zur automatischen Bestimmung der Homogenität

Eine automatische Erkennung und Bewertung der Homogenität erfordert die Kenntnis über die Lage der leuchtenden Fläche im Raum. Ein „Herumlaufen“ um die Leuchte muss entsprechend dem Vorgehen der Versuchingenieure ermöglicht werden. Wenn diese Möglichkeiten gegeben und bekannt sind, kann eine Bewertung erfolgen. Ob die Leuchte noch zu sehen ist, die Signatursichtbarkeit noch gegeben ist oder ob geometrische oder wahrnehmungsbasierte Gründe für eine schlechte Bewertung verantwortlich sind.

Im Rahmen dieser Arbeit entstand ein Testaufbau zur automatischen Aufnahme und Auswertung von Leuchtdichteaufnahmen von Signalleuchten aus beliebigen Betrachterrichtungen. Zur Berechnung der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Aufnahmen kommen Verfahren der Stereoanalyse und Photogrammetrie zum Einsatz, die zu Beginn des Abschnitts näher erläutert werden.

3.1 Grundlagen der Stereoanalyse

Die nachfolgenden Grundlagen entstammen zum Großteil den Arbeiten von Schreer und Hartley [11,12]. Die Stereoanalyse beschreibt Verfahren zur Ermittlung von Zusammenhängen in Bildern mit demselben Motiv, aber unterschiedlichen Betrachterrichtungen. Die Herausforderung besteht darin, die geometrischen Gesetzmäßigkeiten mittels eines geeigneten Modells zu beschreiben, welches die Eigenschaften der perspektivischen Projektion korrekt erhält, siehe Abbildung 2 (links).

Das Konzept des projektiven Raumes ermöglicht die mathematische Beschreibung der perspektivischen Projektion. Wesentliches Element sind die homogenen Koordinaten. Um

diese zu erzeugen wird der ein Element beschreibende Vektor um eine Dimension erweitert, wobei die zusätzliche Komponente zu 1 gesetzt wird.

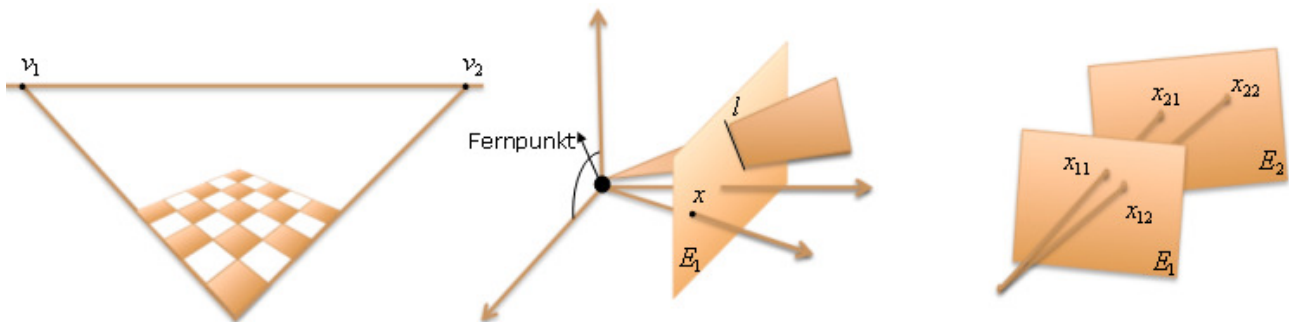


Abbildung 2: links: perspektivische Projektion, Mitte: Punkt und Gerade in homogenen Koordinaten im projektiven Raum, rechts: projektive Transformation

Im Prinzip bedeutet das, dass Punkte $(x,y)^T$ zu Geraden $(x,y,1)^T$ und Geraden zu Ebenen werden. Spezialfälle wie der Schnittpunkt zweier paralleler Geraden, lassen sich somit eindeutig beschreiben und müssen nicht gesondert behandelt werden. Im projektiven Raum liegen diese sogenannten Fernpunkte alle auf einer Geraden, der Ferngerade. Ein Modell der projektiven Ebene ist in Abbildung 2 (Mitte) zu sehen.

Mit Hilfe einer projektiven Transformation lassen sich Punkte auf einer Ebene im Raum auf eine beliebige andere Ebene überführen. Diese Transformation wird als Homographie bezeichnet und beschreibt den Zusammenhang zwischen gleichen Punkten auf unterschiedlichen Ebenen, siehe Abbildung 2 (rechts).

Um den Zusammenhang zwischen mehreren aufgenommenen Bildern desselben Motivs aber unterschiedlicher Betrachterpositionen mathematisch erfassen zu können, kommt das Modell der Lochkamera zum Einsatz. Ein Punkt X im Raum wird über die Überführung $(x,y,z)^T = (fx/z, fy/z)^T$ auf der Bildebene im Punkt x abgebildet. Sollte die optische Achse der Kamera nicht durch den Ursprung des Weltkoordinatensystems verlaufen, muss noch ein Bildmittelpunktversatz u_0, v_0 mit eingerechnet werden. Außerdem kann es bei der Verwendung einer CCD-Kamera dazu kommen, dass nicht quadratische Pixel vorliegen oder die x -Achse des Sensors nicht rechtwinklig zur y -Achse steht. All diese Parameter werden in der Kamerakalibriermatrix festgehalten:

$$K = \begin{bmatrix} \text{horizontale Skalierung } k_u & \text{Schräge } s & \text{horizontale Verschiebung } u_0 \\ 0 & \text{vertikale Skalierung } k_v & \text{vertikale Verschiebung } v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Diese Matrix beschreibt die intrinsischen Parameter der Kamera. Der Zusammenhang zwischen der Kamera und dem Weltkoordinatensystem lässt sich immer über eine Rotation und eine Translation herstellen. Diese Parameter werden als extrinsische Parameter bezeichnet. In der Praxis sollten Abbildungsfehler mit berücksichtigt werden. Mit zunehmendem radialen Abstand vom Brennpunkt können beispielsweise Linsenverzerrungen auftreten.

Die Parameter für den beschriebenen Abbildungsprozess sind nicht bekannt und müssen mit Hilfe eines Kalibrierungsschrittes bestimmt werden. Dazu können spezielle Kalibrierungsmuster eingesetzt werden, die mit der Kamera aufgenommen werden. Es erfolgt eine Schätzung der Kameraparameter über die 3D-Messpunkte und deren entsprechende korrespondierende Abbildungen. Hier sei exemplarisch das etablierte Verfahren nach Tsai genannt [13].

3.2 Vorstellung des verwendeten Stereosystems

Das für diese Arbeit aufgebaute Messsystem verwendet eine Leuchtdichtekamera der Firma Technoteam Bildverarbeitung GmbH. In Kombination mit einer Dreh- und Schwenkeinheit lässt sich ein klassisches, monokulares, Stereosystem erzeugen.

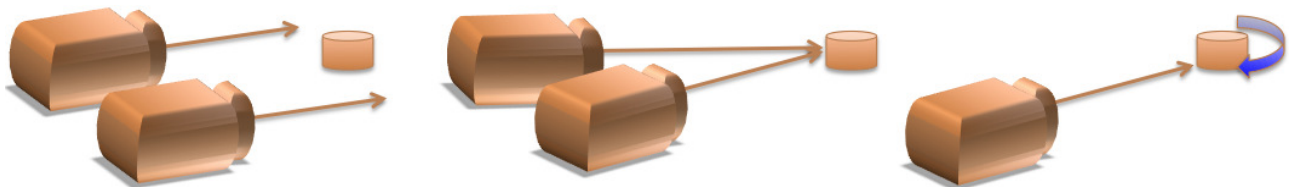


Abbildung 3: verschiedene Arten von Stereosystemen und der hier verwendete monokulare Stereosystemansatz

Als Stereosysteme werden Aufbauten bezeichnet, die in der Regel aus einer Kameraanordnung mit zwei Kameras bestehen. Im Wesentlichen wird zwischen zwei grundsätzlichen Typen unterschieden, dem achsparallelen und dem konvergenten Typ, siehe Abbildung 3. Bei ersterem sind die optischen Achsen der Kameras parallel zueinander ausgerichtet. Dadurch ergeben sich einfache mathematische Zusammenhänge. Die konvergente Anordnung, bei der die Kameras auf einen gemeinsamen Konvergenzpunkt ausgerichtet sind, ist allerdings der in der Praxis üblichere Fall. Wenn Objekte in statischen Szenen aufgenommen werden, kann der Zeitpunkt der Bildaufnahme vernachlässigt werden. Es ist damit nicht zwingend erforderlich, dass die zwei Kameras zum selben Zeitpunkt ein Bild der Szene aufnehmen. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, nur eine einzige Kamera einzusetzen und deren Position anzupassen oder das Zielobjekt zu drehen. Letztere Möglichkeit kommt bei dem hier vorgestellten Messsystem zum Einsatz. Dafür sind Modifikationen in den Rechenschritten nötig. Die Leuchte kann über die Positioniereinheit gezielt in der horizontalen und vertikalen Drehachse rotiert werden.

Die geometrischen Beziehungen korrespondierender Punkte zweier Ansichten lassen sich unabhängig vom eigentlichen Objekt über die sogenannte Fundamentalmatrix beschreiben. Diese kann bei vorliegenden intrinsischen und extrinsischen Parametern der Kamera explizit berechnet werden. Dadurch lässt sich der Suchraum für korrespondierende Punkte auf einzelne Linien, die sogenannten Epipolarlinien, reduzieren, siehe Abbildung 4. Die Epipolarlinie ist die Schnittlinie der Bildebene mit der Epipolarebene.

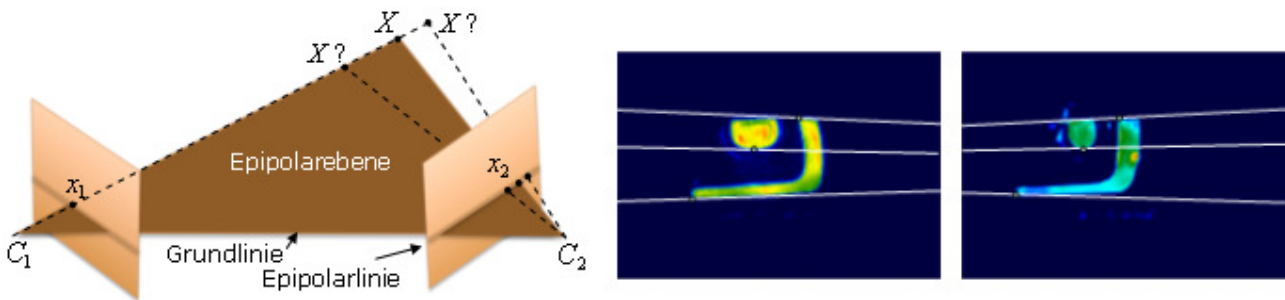


Abbildung 4: links: Definition der Epipolarlinien, rechts: zwei Ansichten des Messsystems mit exemplarischen Punkten und dazugehörigen Epipolarlinien

Anschließend können aus den gefundenen Punktkorrespondenzen die entsprechenden 3D-Punkte rekonstruiert werden. Dieses Vorgehen wird als Stereotriangulation bezeichnet und stellt eine Optimierung im Sinne des kleinsten quadratischen Abstandes zwischen den beiden optischen Strahlen eines jeden Punktkorrespondenzenpaares dar.

Zu Beginn der Messung werden innerhalb eines sehr engen horizontalen Betrachtungswinkels bei $\pm 10^\circ$ zwei Leuchtdichteverteilungen aufgenommen, aus denen mit Hilfe von Bildverarbeitungsalgorithmen die leuchtende Fläche bestimmt wird, siehe Abschnitt 3.3. Dieser Winkelbereich wurde gewählt, da aufgrund der üblichen Anforderungen an die Auslegung lichtoptischer Funktionsflächen innerhalb dieses nahen Winkelabstandes zur optischen Achse davon ausgegangen werden kann, eine ausreichend gleichmäßig leuchtende Fläche vorzufinden, wie sie für die Bestimmung der Punktkorrespondenzen benötigt wird, siehe Abbildung 5.

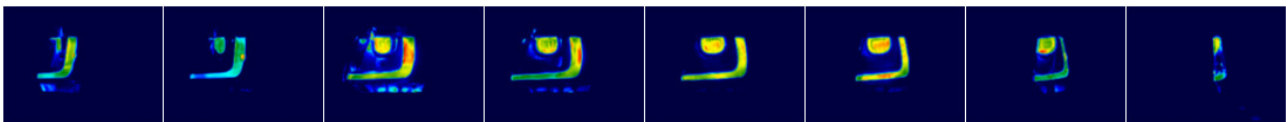


Abbildung 5: Leuchtdichteverteilungen einer Schlussleuchte aus verschiedenen Betrachtungsrichtungen weisen geometrische und quantitative Veränderungen auf

Anschließend wird diese „ideale“ leuchtende Fläche entsprechend der nächsten Kameraposition rotiert. Dadurch kann dem Messsystem angelernt werden, an welcher Stelle unter idealen Bedingungen noch Leuchtdichten zu erwarten sind. Durch die Überlagerung von aktuell gemessener und idealer Position der leuchtenden Fläche wird berechnet, ob die gewünschte Signatur noch vollständig zu sehen ist und homogen erscheint.

Abbildung 6 (rechts) zeigt die rekonstruierte 3D-Form der leuchtenden Fläche aus gemessenen Leuchtdichtemessdaten. Die Aufnahmen erfolgen vollständig automatisiert. Zu einem späteren Zeitpunkt wird auch die Bildauswertung vollständig selbständig erfolgen. Im Moment sind allerdings noch händische Berechnungsschritte nötig.

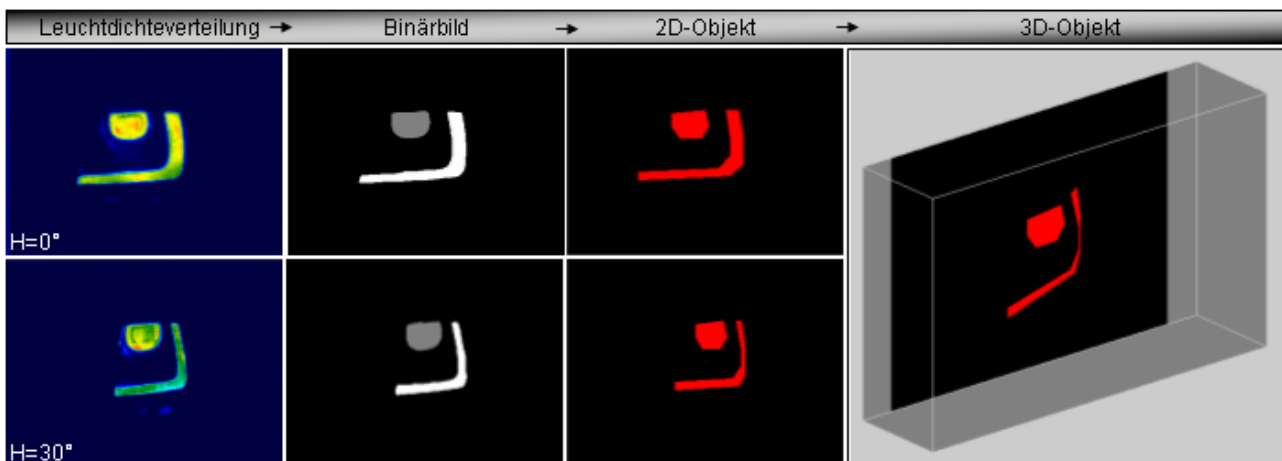


Abbildung 6: von der Leuchtdichteverteilung zum 3D-Objekt

Die momentan implementierten Algorithmen eignen sich lediglich für hart abgegrenzte leuchtende Flächen. Im Falle weich auslaufender Flächen versagt die Bestimmung der Punktkorrespondenzen, da keine einheitliche Zuordnung mehr erfolgen kann.

3.3 Automatische Bestimmung der leuchtenden Fläche

Eine automatische Detektion der leuchtenden Flächen einer Signalleuchte ist über ein Regionenbildungs- oder auch Zeilenkoinzidenzverfahren möglich, welches bereits in ähnlicher Form zur Separierung von Streulichtartefakten innerhalb von Scheinwerferlichtverteilungen erfolgreich eingesetzt wird [14].



Abbildung 7: automatische Detektion der leuchtenden Flächen, von links nach rechts: Leuchtdichteverteilung, negatives Schwellwertbild und separierte leuchtende Flächen

Um die einzelnen leuchtenden Flächen zu separieren, kommt ein negativer Schwellwertsucher zum Einsatz. Dieser ermittelt zuerst die nicht-leuchtenden Flächen in der Leuchtdichteverteilung. Anschließend ist es möglich, anhand der verbleibenden Pixel und der eventuell existierenden regionalen Abgrenzung zueinander, die Anzahl der unabhängigen leuchtenden Flächen und deren Größe und Position zu bestimmen, siehe Abbildung 7.

Die leuchtenden Flächen werden mit eindeutigen Indizes versehen. Es können minimale, mittlere und maximale Werte der Leuchtdichten und Gradienten bestimmt werden. Über Schwellwerte, die der menschlichen Wahrnehmung nachempfunden werden können, kann festgelegt werden, welche mittleren Leuchtdichteunterschiede unter verkehrstypischen

Bedingungen noch akzeptiert werden können und welche bereits zu einer Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer, zum Beispiel aufgrund von kritischen Fehlinterpretationen, führen können.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Erste Testmessungen haben die prinzipielle Tauglichkeit des Messsystems bestätigt. Es müssen weitere Algorithmen zur Kalibrierung der Kamera, zur Findung der leuchtenden Flächen und zur Bestimmung der Punktkorrespondenzen implementiert und evaluiert werden, um eine vollständige, automatische Messung für unterschiedlichste Optikkonzepte zu ermöglichen.

Um auch die Homogenitätseinflussfaktoren Helligkeit und Textur automatisch beurteilen zu können, sollen mit Hilfe einer psychophysikalischen Untersuchung subjektive Daten aufgenommen werden, um objektivierte Bewertungen zu ermöglichen. Dazu wurden bereits entsprechende Voruntersuchungen durchgeführt. Es ist sinnvoll, die dominanten Frequenzen innerhalb der leuchtenden Flächen zu bestimmen und auszuwerten.

Die Ideen dieses Messverfahrens lassen sich in die Lichtsimulation übertragen. Es kann sogar die Umstand genutzt werden, dass die „ideale“ leuchtende Fläche im Konstruktionsprogramm händisch ausgewählt oder anhand der Startpunkte der durchtretenden Strahlen einfach automatisch bestimmt werden kann. Die aufwendige Detektion dieser Flächen ist damit bereits erfüllt.

Eine zukünftige Integration des Messprinzips zum klassischen Fernfeldgoniometersystem erscheint sinnvoll, da die Leuchte für die Typprüfung und die Homogenitätsbewertung nur ein einziges Mal am Messgerät angebaut werden muss und alle dabei auftretenden geometrischen Effekte, wie die Bestimmung der Anbaulage, nur einmal als Fehlerquelle existieren.

Literatur

- [1] Karsten Koeth (2009): *Auslegung der Kraftfahrzeugbeleuchtung hinsichtlich Sicht und Signalisation*. Dissertation.
- [2] ECE Regulation No. 7: *Einheitliche Vorschriften für die Genehmigung der Begrenzungsleuchten, Schlussleuchten, Bremsleuchten und Umrissleuchten für Kraftfahrzeuge*.
- [3] ECE Regulation No. 48: *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich des Anbaus der Beleuchtungs- und Lichtsignaleinrichtungen*.
- [4] Ripperger, J. (2001): *Lichttechnische Anforderungen an Schluß- und Bremsleuchten für Kraftfahrzeuge*. Herbert Utz Verlag GmbH, München.
- [5] Armbruster, D. (2001): *Optimierung der visuellen Informationsübermittlung durch adaptive Kraftfahrzeugsignalleuchten*. Herbert Utz Verlag GmbH, München.
- [6] Häring, S. (2008): *Berechnung der Leuchtdichte/Anmutung von Leuchten in der Produktentwicklung: Methoden und Methodik*. Symposium Licht 2008, Ilmenau.
- [7] Mensch, D. (2009): *Effiziente Verarbeitung von Strahldatensätzen aus Simulation und Messung*. LUX Europa 2009, Istanbul.
- [8] DIN 67527: *Lichttechnische Eigenschaften von Signallichtern im Verkehr*. Beuth, 2001.

- [9] DIN 5035: *Beleuchtung mit künstlichem Licht, Teil 8 Arbeitsplatzleuchten - Anforderungen, Empfehlungen und Prüfung*. Beuth, 2006.
- [10] Schierz, Ch. (2007): *Wie wird Leuchtdichte subjektiv als Helligkeit wahrgenommen?* Lux Junior 2007, Dörnfeld.
- [11] Schreer, O. (2006): *Stereoanalyse und Bildsynthese*. Springer.
- [12] Hartley R., Zissermann A. (2000): *Multiple View Geometry*. Cambridge University Press.
- [13] Tsai R. (1987): *A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-The-Shelf TV Cameras and Lenses*. IEEE Journal of Robotics and Automation.
- [14] Mensch D., Kiel H., Ziehl. C. (2009): *Evaluation of stray light from peripheral areas of the luminous intensity distribution of headlamps*. LUX Europa 2009, Istanbul.