

## **„Softwarebasierte Ausrichtung und Bewertung von Lichtverteilungen“**

**Autoren: Henning Kiel\*, Daniel Mensch\*\***

\*Volkswagen AG, Brieffach 1582, 38436 Wolfsburg, [henning.kiel@volkswagen.de](mailto:henning.kiel@volkswagen.de)

\*\*Volkswagen AG, Brieffach 1582, 38436 Wolfsburg, [daniel.mensch@volkswagen.de](mailto:daniel.mensch@volkswagen.de)

### **Kurzfassung**

Im Entwicklungsprozess von Scheinwerfern und Leuchten sind eine objektive Bewertung und der Vergleich von lichttechnischen Konzepten von maßgeblicher Bedeutung. Die Leistungsfähigkeit wird dabei durch gemessene oder simulierte Lichtverteilungen bewertet. Den Bewertungsmassstab bilden hauptsächlich photometrische Grenzwerte, die scharf für bestimmte Winkel der Verteilung definiert sind. Diese Lichtverteilungen werden typischerweise unter unterschiedlichen Bedingungen erzeugt und dargestellt, was die Vergleichbarkeit erschwert.

Werden speziell Abblendlichtscheinwerfer photometrisch vermessen, so muss zuvor eine Ausrichtung, also eine Zuordnung der Lichtverteilung des Scheinwerfers zu den zu bewertenden Winkeln erfolgen. Dies erfolgt visuell und somit subjektiv durch einen Prüfer anhand der Hell-Dunkel-Grenze und ist daher Unsicherheiten unterworfen. Die Grundlagen für eine photometrisch basierte und somit objektive Bewertung und Ausrichtung sind in der Literatur beschrieben. Des Weiteren erfolgt die Zuordnung der Hell-Dunkel-Grenze in der CAD-basierten Auslegung der Reflektorflächen durch die Berechnung und Positionierung idealisierter Wendelabbildungen.

Um die Lichtverteilungen aus der Messung und aus der Simulation gemäß der Prüfvorschriften vergleichen zu können, wurde eine softwarebasierte Methode zur einheitlichen, reproduzierbaren Ausrichtung bereitgestellt und evaluiert. Die Photometrie des Abblendlichts sowie von anderen Lichtfunktionen kann darüber hinaus bewertet, statistisch ausgewertet oder dessen Deviation bestimmt werden. Dadurch ist es beispielsweise möglich, die Entwicklungsschritte eines Konzepts sowie die Toleranzen der Fertigung eines Scheinwerfers oder einer Leuchte zu analysieren. Effekte, wie der Einfluss des Nahfeldes bei Messungen, können winkelaufgelöst evaluiert werden. Auch in der Simulation wird dadurch eine effektive Analyse und Optimierung der Modellierungen erreicht. Nicht zuletzt kann mit dieser Methode die Simulation sinnvoll mit der Messung der Photometrie verglichen werden.

## Vergleich von photometrischen Werten aus Messung und Simulation

Die Volkswagen AG sichert Konzepte von Scheinwerfern und Leuchten schon in einer frühen Phase der Entwicklung hinsichtlich thermischer, visueller und lichttechnischer Anforderungen ab. Für neue Designentwürfe werden optische Funktionsflächen ausgelegt, das Konzept im Strak vervollständigt und anschließend mittels Lichtsimulation hinsichtlich gesetzlicher und interner Vorgaben geprüft [vHKKH05]. Um quantitativ hinreichend genaue Werte simulieren zu können, muss die Lichtsimulation evaluiert und die Modellierung optimiert werden. Die Modellierung muss den Fall der gesetzlichen Typprüfung hinreichend genau abbilden können. Schematisch stellt sich dieser Vergleich wie folgt dar:

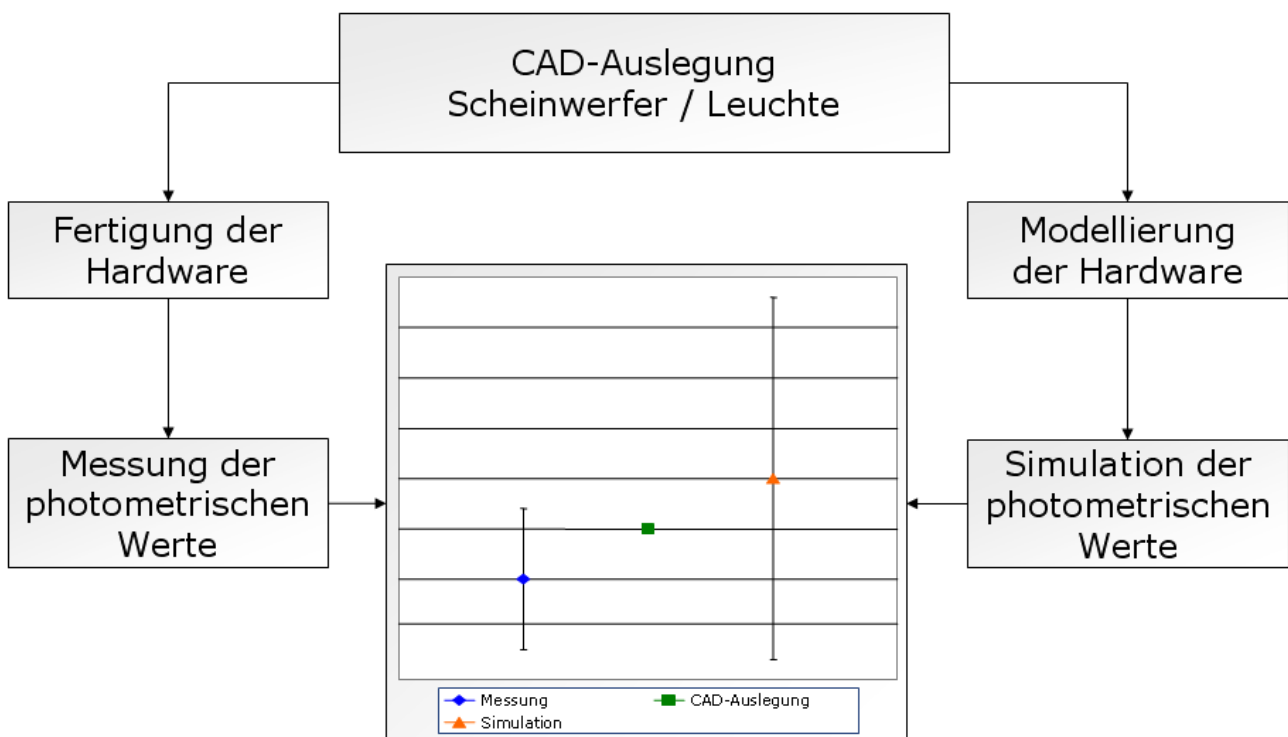


Abbildung 1: Schema des Vergleichs der Werte aus Messung und Simulation

Demnach beschreibt die Auslegung auf Basis von CAD-Geometrien den Ausgangswert. Das real gefertigte Bauteil und dessen lichttechnische Funktion, gemessen in der photometrischen Typprüfung, unterliegt systematischen und zufälligen Abweichungen bezogen auf die ideale CAD-Auslegung. Toleranzen der Werkzeuge oder Abweichungen der Messung verursachen dies. Die Modellierung der Lichtsimulation soll nun das reale Bauteil hinreichend genau beschreiben. Der simulierte Wert unterliegt wiederum Abweichungen, verursacht durch unzureichende Modellierungen oder die statistischen Unsicherheiten der Monte-Carlo-Simulation. Wie Abbildung 1 zeigt, unterscheiden sich die photometrischen Größen in Schätzwert und der beigeordneten Unsicherheit. Will man die Werte sinnvoll miteinander vergleichen, müssen die Unsicherheiten bekannt sein.

## Messung der Photometrie am Scheinwerfer in Abblendlichtfunktion

Die lichttechnische Messung der Typprüfung von Scheinwerfern und Leuchten ist durch länderspezifische Vorschriften und Gesetze geregelt [ECE], [FMV], [SAE]. Es werden unter anderem die Messmethode, Messmitteltypen sowie Vorgaben und photometrische Grenzwerte für die Auswertung darin festgelegt. Beispielsweise ergibt sich aus der ECE R112, die Vorschriften für Scheinwerfer mit Glühlampen beinhaltet, in Verbindung mit der ECE R37, die Vorschriften für Glühlampen spezifiziert, sowie aus allgemeinen Richtlinien [gtb05] der in Abbildung 2 dargestellte Arbeitsablauf.

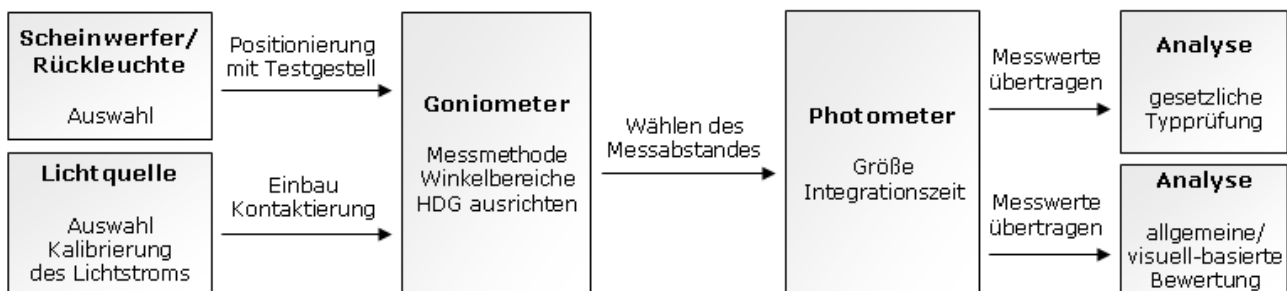


Abbildung 2: Vereinfachter Arbeitsablauf einer photometrischen Typprüfung

Diese Messmethode beinhaltet die Bereitstellung einer kalibrierten Messlampe sowie deren Montage im ausgewählten Scheinwerfer. Beides wird auf dem Goniometer in einem Testgestell positioniert. Für Scheinwerfer muss ein Vorgang der Ausrichtung anhand der Hell-Dunkel-Grenze und mittels einer Einstellwand vorgenommen werden. Dieser Vorgang wird in den nachfolgenden Abschnitten detailliert untersucht. Die Messung erfolgt durch ein Photometer in einem definierten Messabstand unter der Vorgabe der Einhaltung der Fernfeldbedingung. Es wird die Beleuchtungsstärke  $E$  gemessen, die den Winkeln  $H$  und  $V$  zugewiesen wird. Damit können die photometrischen Grenzwerte der lichttechnischen Vorschriften überprüft werden. Neben der Bewertung einzelner Prüfpunkte können so Verteilungen der Beleuchtungsstärke  $E(H, V)$  oder der Lichtstärke  $I(H, V)$ , wie in Abbildung 3 dargestellt, erzeugt werden.

## Ausrichtung der Hell-Dunkel-Grenze einer Abblendlichtfunktion

Gemäß ECE R112 (6.2.1-6.2.4) besteht die Hell-Dunkel-Grenze aus einem waagerechten Teil, der bei 1% Neigung beziehungsweise  $H = -0,57^\circ$  positioniert werden soll, und einem 15°- oder 45°-Anstieg, der ab  $V = 0^\circ$  beginnt. Ziel ist es, durch diesen Gradienten dem Fahrer möglichst viel Sichtweite bereitzustellen und gleichzeitig die Blendung des Gegenverkehrs gering zu halten. Die Einstellung dieses Gradienten bestimmt somit die Abblendlichtfunktion am Fahrzeug maßgeblich.

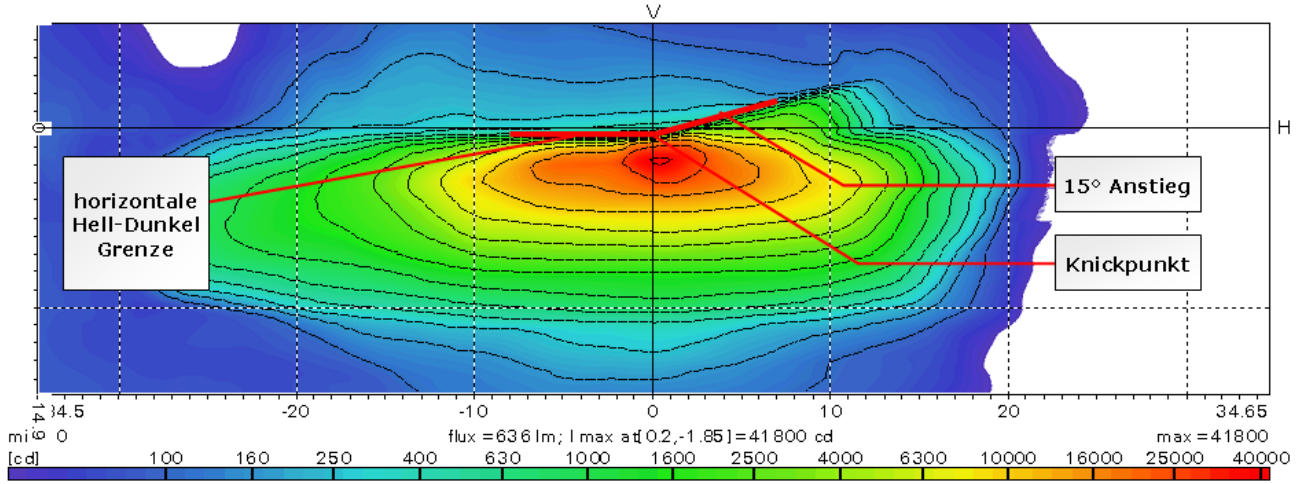


Abbildung 3: Lichtstärkeverteilung  $I(H, V)$  einer Abblendlichtfunktion mit markierter Hell-Dunkel-Grenze

Die Einstellung wird visuell durch einen Prüfer an der in 10 m Abstand befindlichen Einstellwand vorgenommen. Dieser bewertet die Gradienten und positioniert den Scheinwerfer manuell, bis die Hell-Dunkel-Grenze und der Knickpunkt in der vorgegebenen Lage erscheinen. Zufällige Abweichungen können bei diesem Vorgang beispielsweise durch eingeschränkte Sehschärfe des Prüfers bei niedriger Umfeldleuchtdichte, die Bestimmung des Gradienten an unterschiedlichen Orten durch qualitativ schlechte Hell-Dunkel-Grenzen, durch unterschiedliche lichttechnische Eigenschaften der Einstellwände oder durch Hystereseeffekte der mechanischen Einstellmechanik hervorgerufen werden. Systematische Abweichungen ergeben sich beispielsweise durch die unterschiedlichen Auslegungen der Prüfer, an welcher Stelle der Gradient am schärfsten ist. Es ist aus der Praxis bekannt, dass dieser Einfluss bedeutend ist. In [Pol98], [Man00] werden solche Toleranzen der visuellen Einstellung untersucht. Folgende Werte wurden ermittelt:

- H4 Scheinwerfersystem:  $\pm 0,073^\circ$
- R2 Scheinwerfersystem:  $\pm 0,145^\circ$
- Nebelscheinwerfersystem:  $\pm 0,158^\circ$

Der Bezug der visuellen Bewertung der Hell-Dunkel-Grenze zur Photometrie des Gradienten kann mittels einer diskreten Abtastung und der Subtraktion der logarithmischen Werte hergestellt werden [Bra86], [SC95]. Eine der möglichen Methoden nach [Bra86] ist in Gleichung 1 dargestellt:

$$G = \log_{10}(V(n)) - \log_{10}(V(n + 0.1)) \quad (1)$$

Die G-Wert-basierende Methode der Bewertung des Gradienten wird ab 2008 in die ECE übernommen und als alternative Methode für eine Ausrichtung mittels des Photogoniometers be-

reitgestellt. Dabei wird der Gradient der Hell-Dunkel-Grenze sowie des Anstieges an einem einzigen oder wenigen diskreten Winkeln abgetastet, der maximale G-Wert und somit die Lage des Gradienten ermittelt und ein Offset-Winkel für die Goniometereinstellung bereitgestellt. Ein ähnliches Vorgehen ist auch in der amerikanischen Norm SAE J1383 [SAE] enthalten.

Somit existieren mindestens zwei grundsätzlich unterschiedliche Methoden der Ausrichtung. Die visuelle Methode entspricht direkt der menschlichen Empfindung, ist aber durch große systematische wie auch zufällige Abweichungen gekennzeichnet. Sie ist nur eingeschränkt reproduzierbar bei vergleichenden Messungen. Die Ausrichtung mittels des Goniometers und der G-Wert-Methode verursacht systematische Abweichungen durch die Modellierung der visuellen Empfindung sowie der diskreten, begrenzten Abtastung der Gradienten. Zufällige Abweichungen sind hauptsächlich durch die Messmethode zu erwarten. In einer simulierten Lichtverteilung hingegen wird die Position des Gradienten durch die Positionierung idealisierter Wendelabbildungen beim Auslegungsprozess bestimmt. Ein Bezug zur visuellen Ausrichtung ist nicht direkt gegeben.

In der Praxis des Entwicklungsprozesses müssen Lichtverteilungen von unterschiedlichen Messeinrichtungen und Prüfern mit Simulationen verglichen werden. Somit und im Kontext einer einheitlichen Bewertung wurde ein Softwaretool zur reproduzierbaren, stabilen Ausrichtung anhand von bereits gemessenen Lichtverteilungen konzipiert.

## Der „HDGizer“

Im Rahmen einer umfassenden Verarbeitung und Bewertung von gemessenen und simulierten Lichtverteilungen von Scheinwerfern und Leuchten wurden von den Autoren diverse Softwaremodule entwickelt und methodisch in Matlab© (MATrix LABoratory) umgesetzt. Matlab stellt Routinen für Aufgabenstellungen wie Dateihandling, Verarbeitung von Matrizen bzw. Bildverarbeitung zur Verfügung. Methoden für die Berechnung von Beleuchtungsstärken sowie Leuchtdichten auf frei definierbaren Oberflächen wurden bereits in vorherigen Arbeiten bereitgestellt [vH99] und optimiert. So können in dem „*HDGizer*“ genannten Modul gängige Formate für Lichtverteilungen wie \*.ies, \*.lmt, \*.lid, \*.dis, \*.din, \*.lsv, \*.fta, \*.csv sowie strahlendatenbasierte Formate wie \*.dis oder \*.ray eingelesen und geschrieben werden. Die Verteilungen werden bei Bedarf zudem verschoben und rotiert, aber auch inter- und extrapoliert. Somit werden nicht-konforme Verteilungen für die Ausrichtung und Bewertung nutzbar gemacht.

Während dem Messingenieur für die Ausrichtung eine Einstellwand mit der Markierung der Soll-Hell-Dunkel-Grenze zur Verfügung steht, muss für eine softwarebasierte Ausrichtung eine solche Soll-Hell-Dunkel-Grenze als Matrix bereitgestellt werden. Deren Position und Ausprägung als 15°-Anstieg oder als 45°-„Z“-Anstieg ist an der ECE orientiert, besitzt aber auch

den Freiheitsgrad der Anpassung der gültigen Winkelbereiche  $(-5^\circ \pm n)L \leq H \leq (5^\circ \pm n)R$ , mit  $n$  als Korrekturwert.

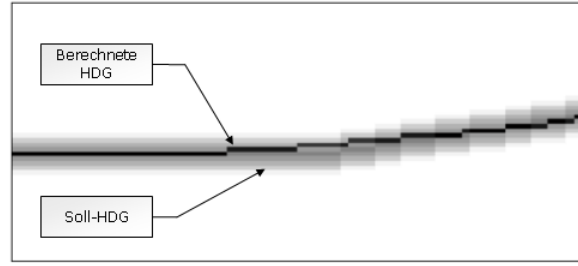


Abbildung 4: Prinzip einer berechneten und einer Soll-Hell-Dunkel-Grenze als Matrix

In Anlehnung an die reale Positionierung des Gradienten der Lichtverteilung auf die Markierung der Einstellwand und deren begrenzt scharfe Abbildung wurden die Werte der Soll-Matrix gaußförmig verschmiert. Somit ist auch eine Bewertung des Abstandes des errechneten Gradienten von der Soll-Position beachtet. Dies führt zu einer weiteren Stabilisierung der Ausrichtung, siehe Abbildung 4.

Die Berechnung der Hell-Dunkel-Grenze nach der G-Wert-Methode aus der Lichtverteilung, wie in Abbildung 5 dargestellt, bewertet die Schärfe über die gesamte Breite  $H$ , wie in Abbildung 17(a) oder 17(b) gezeigt. Dies ist ebenfalls an die visuelle Praxis angelehnt, bei der scharfe Abschnitte der Hell-Dunkel-Grenze bevorzugt zur Positionierung herangezogen werden. Die Berechnung am Ort des niederwertigen Pixels erzeugt eine systematische Abweichung des Schätzwertes um die halbe Schrittweite  $\Delta V$ .

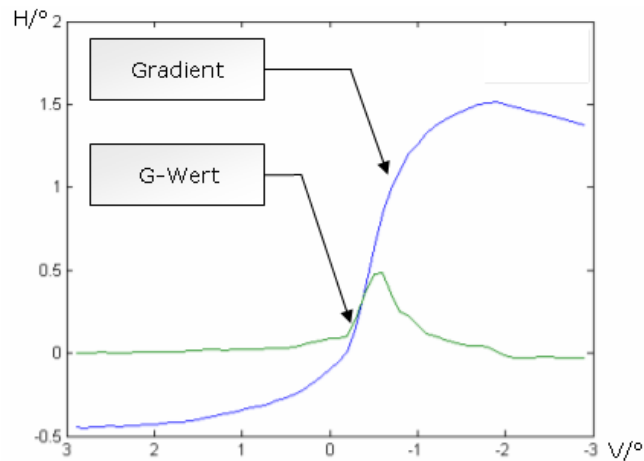


Abbildung 5: Berechnung des Gradienten mittels G-Wert

Werden nun die Matrix der Soll-Hell-Dunkel-Grenze und die Matrix des Gradienten der Lichtverteilung ausgerichtet, so erfolgt dies durch zeilen- und spaltenweises Verschieben. Die Übereinstimmung wird dabei mittels Pearson-Korrelation bewertet, das Maximum ermittelt und die

Position abgespeichert. Im Gegensatz zu einer messgerätebasierten Positionsfindung, die den Ort der Hell-Dunkel-Grenze und den Ort des Knickpunktes nacheinander und nur an wenigen Stellen ermittelt und ausrichtet, kann mittels *HDGizer* ein globales Optimum gefunden werden.

Anschließend können so positionierte Lichtverteilungen abgespeichert aber auch statistisch verrechnet werden, um Mittelwerte und Standardabweichungen zu erhalten. Der zusammengefasste Ablauf ist in Abbildung 6 dargestellt.

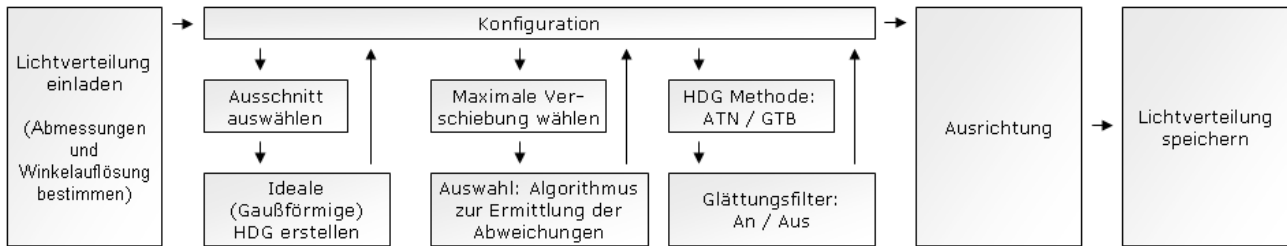


Abbildung 6: Ablaufplan der *HDGizer*-basierten Ausrichtung

## Verifizierung der Methoden zur Ausrichtung

Der Verifizierung des *HDGizers* liegt die These zu Grunde, dass die Qualität der Ausrichtung über die statistische Auswertung mehrerer ausgerichteter Lichtverteilungen eines Scheinwerfertyps bewertet werden kann. Wird der Scheinwerfer ausgerichtet, so wird die systematische Abweichung hauptsächlich durch die Methode bestimmt, während in der Wiederholung die zufälligen Abweichungen auftreten. Diese sind bei der visuellen Methode groß, können bei der messgerätebasierten Methode ebenfalls auftreten, sind aber bei der *HDGizer*-basierten Methode und im Falle einer einzigen Lichtverteilung ausgeschlossen. Die Abweichungen der Winkel  $H$  und  $V$  führen zu einer Streuung der Werte  $E(H, V)$ , die bei homogenen Verteilungen eher klein, am Gradienten aber besonders groß sein muss und die durch die Standardabweichung ausgedrückt werden kann. Werden die zufälligen Abweichungen der Winkel minimiert, so müssen die Standardabweichungen kleiner werden. Eine übersichtliche Darstellung der Verteilung ergibt sich aus der prozentualen Standardabweichung, wie in Abbildung 9 dargestellt.

Üblicherweise werden Messungen eines Scheinwerfertyps in den Laboren an unterschiedlichen Scheinwerfern durchgeführt und verglichen, weswegen für die Evaluierung der Ausrichtemethode die zufälligen Abweichungen der Messobjekte zu berücksichtigen sind. Deshalb wurden zehn Messobjekte eines Typs und Modells aus einer Charge herangezogen, um typische Bedingungen eines Vergleiches bereitzustellen.

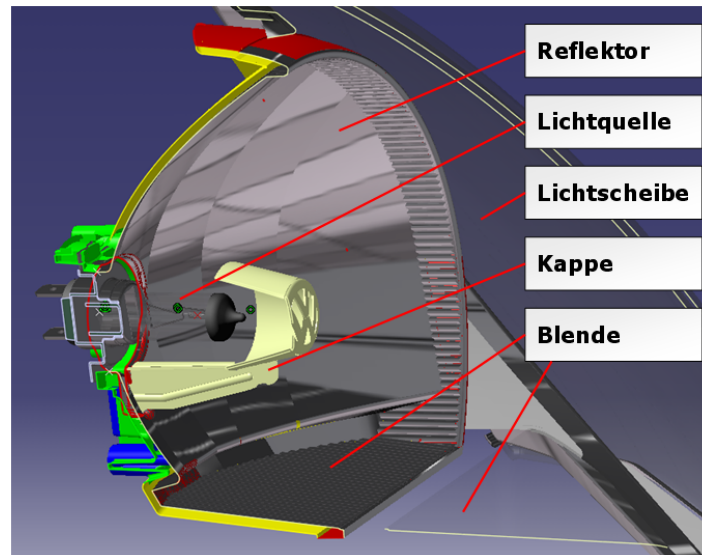


Abbildung 7: CAD-Darstellung der Messobjekte

Wie Abbildung 7 zeigt, wurde ein Reflexionssystem ausgewählt, um repräsentative und vergleichsweise kritische Eigenschaften der Hell-Dunkel-Grenze bewerten zu können. Die Scheinwerfer wurden gemäß ECE R112 mit jeweils einer Messlampe bestückt, visuell ausgerichtet und vermessen. Es wurden zudem unterschiedliche Komponentenpaarungen untersucht, um die photometrischen Einflüsse von Lichtscheibe und Blenden zu untersuchen. Dies geschah auf einer identischen Anlage und weitgehend identischen Randbedingungen, um die statistische Bewertung der Scheinwerfer und Lampen sowie die Ausrichtemethoden bei minimalen Messgeräte- und Umgebungseinflüssen zu beurteilen. Es erfolgte zudem eine Ausrichtung durch das Photogoniometer gemäß [WP206] nach G-Wert-Methode, wodurch Korrekturwerte der Winkel  $H$  und  $V$  erhalten wurden, die in der Softwareausrichtung verwendet werden konnten. Die gemessenen Lichtverteilungen wurden anschließend im *HDGizer* ausgerichtet und statistisch ausgewertet. Die allgemeine Qualität der Hell-Dunkel-Grenze dieses Reflexionsscheinwerfers kann visuell und photometrisch als repräsentativ bis überdurchschnittlich gut gelten. Gradienten aus Projektionsscheinwerfern sind deutlich schärfer, linearer und damit einfacher auszurichten. Leider sind auf dem Markt auch qualitativ deutlich schlechtere Scheinwerfer zu finden, die verschmierte, nicht waagrecht verlaufende Hell-Dunkel-Grenzen, aufweisen.

Der erste Vergleich wurde für die Paarung Lichtquelle und Reflektor, also ohne Strahlenkappe, Blende und Lichtscheibe, durchgeführt. Abbildung 8 stellt die Verteilung der Mittelwerte der Lichtstärken aus zehn Lichtverteilungen dar, wobei deren Ausrichtung visuell am Goniometer erfolgte.



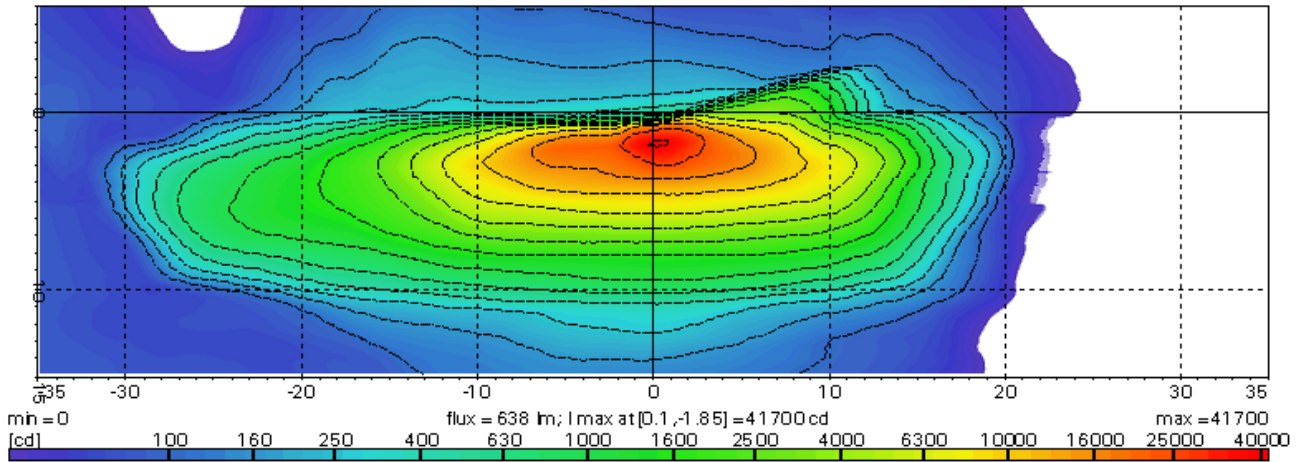


Abbildung 8: Mittelwerte der zehn visuell ausgerichteten Lichtstärkeverteilungen

Werden für diese Mittelwerte  $\hat{I}(H, V)$  die relativen, prozentualen Standardabweichungen angegeben, ergibt sich die in Abbildung 9 dargestellte Verteilung.

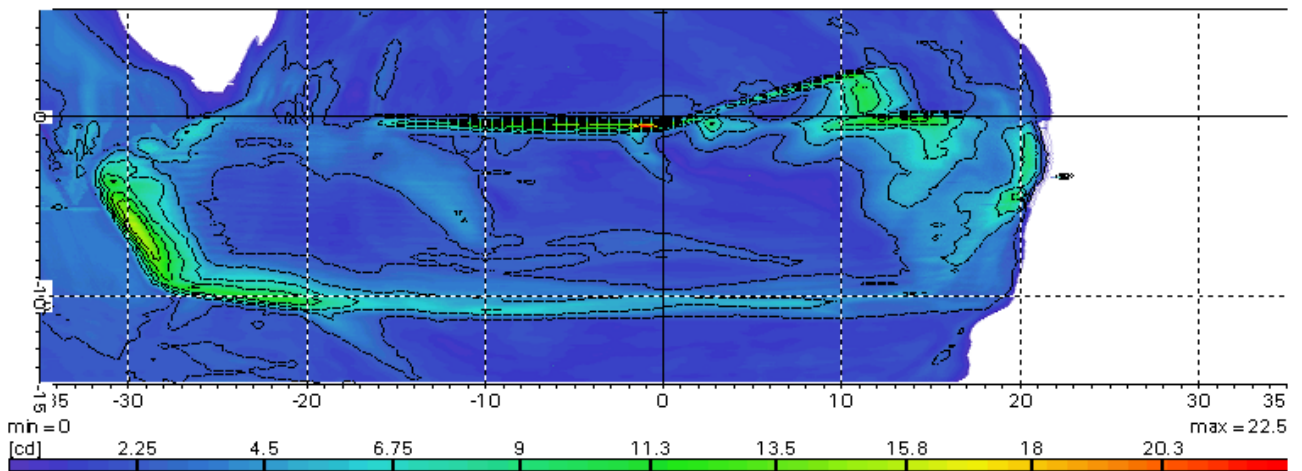


Abbildung 9: Prozentuale Standardabweichungen der Mittelwerte der zehn visuell ausgerichteten Lichtstärkeverteilungen

Wie vermutet wird deutlich, dass größere Werte der prozentualen Standardabweichungen überwiegend in den Bereichen großer Gradienten auftreten, die von Positionierungsungenauigkeiten stärker beeinflusst sind. Während die seitlichen Erscheinungen in Bereichen geringer Lichtstärken liegen, sind die Standardabweichungen an der Hell-Dunkel-Grenze in Bereichen hoher und damit relevanter Lichtstärken. Der zur Positionierung relevante Ausschnitt ist in Abbildung 10 dargestellt.

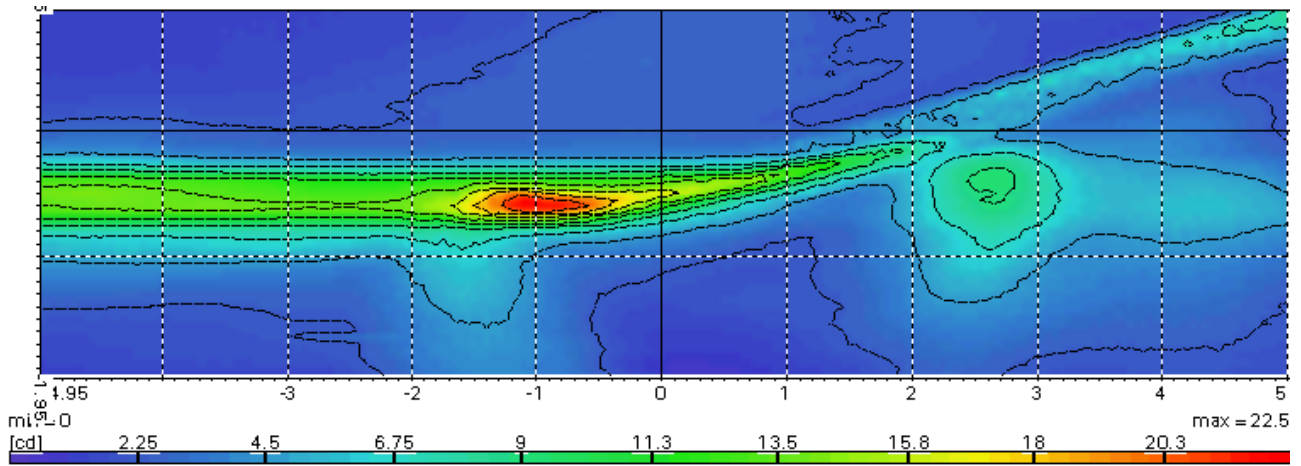


Abbildung 10: Relative Standardabweichungen der Mittelwerte der zehn visuell ausgerichteten Lichtstärkeverteilungen

Ausgehend von der oben eingeführten These zeigt diese Verteilung, dass die größten zufälligen Abweichungen der Ausrichtung an der horizontalen Hell-Dunkel-Grenze bzw. im Bereich  $V = -1^\circ L$  auftreten. Das Maximum beträgt 22,5%. Die Positionierung des Gradienten des  $15^\circ$ -Anstieges zeigt kleinere Standardabweichungen und erscheint damit sicherer. Abbildung 17(b) zeigt den Gradienten und die G-Werte der Mittelwertverteilung. Ausgehend von der Erfahrung, dass schärfere Gradienten sicherer visuell ausgerichtet werden [Man00], [Pol98], kann die Beobachtung von Abbildung 10 durch die hohen G-Werte am  $15^\circ$ -Anstieg erklärt werden.

Wird die Ausrichtung durch die messgerätebasierte Methode nach GTB korrigiert, so ergibt sich die in Abbildung 11 dargestellte Verteilung.

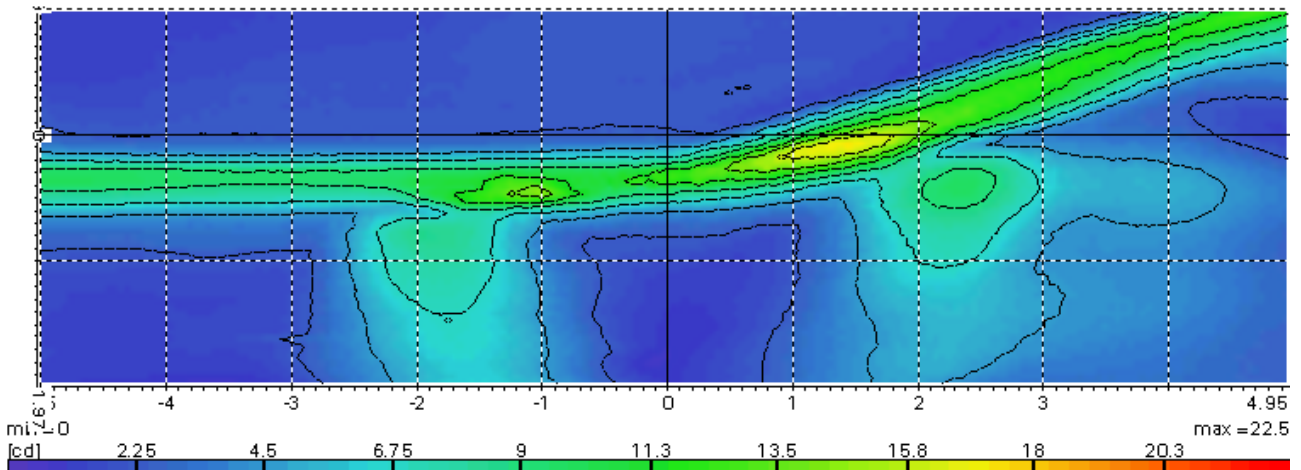


Abbildung 11: Relative Standardabweichungen der Mittelwerte der zehn messgerätebasiert ausgerichteten Lichtstärkeverteilungen

Die Optimierung der Ausrichtung durch dieses Verfahren zeigt sich durch die insgesamt mini-

mierten relativen Standardabweichungen. Das Maximum beträgt 17,7%. Am horizontalen Gradienten ist die Verbesserung deutlich, wobei die messzeit-orientierte, diskrete Bewertung bei  $V = -2,5^\circ L$  zu keiner optimalen Lösung für diese auslegungsbedingt sprunghafte Hell-Dunkel-Grenze führt. Der Gradient des  $15^\circ$ -Anstieges wird sogar schlechter ausgerichtet als durch die visuelle Methode. Das kann mit der störanfälligen Methode der linearen Interpolation einer Geraden zur Knickpunktfindung nach [WP206] erklärt werden. Die Stützstellen werden durch nur drei diskrete Abtastungen in kurzen Abständen ermittelt. Der *HDGizer* nimmt hingegen die oben beschriebene ganzheitliche Bewertung vor. Das führt zu einer Ausrichtung, welche die in Abbildung 12 dargestellte Verteilung erzeugt.

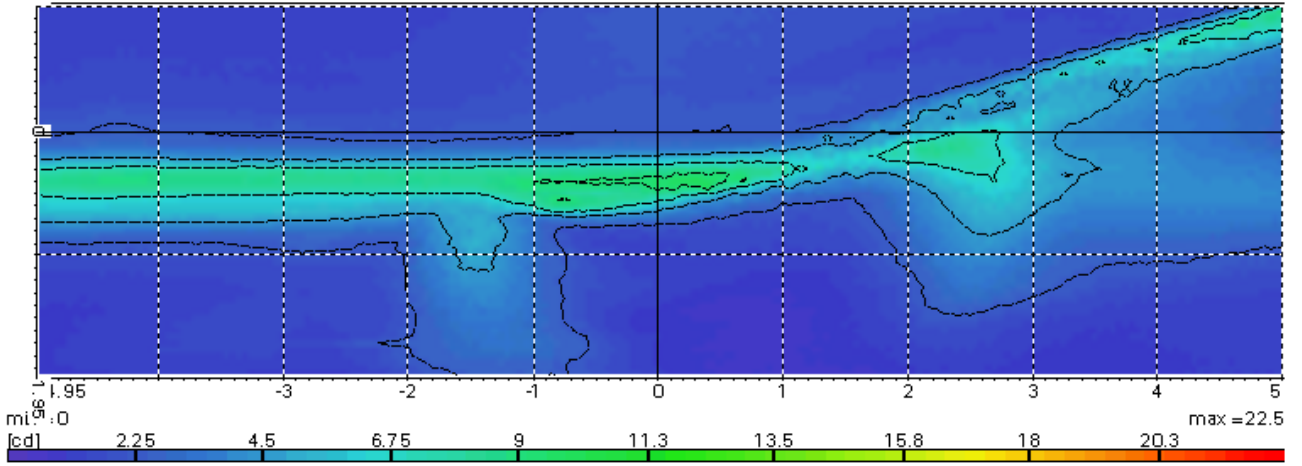


Abbildung 12: Relative Standardabweichungen der Mittelwerte der zehn *HDGizer*-basiert ausgerichteten Lichtstärkeverteilungen

Während schon die Ausrichtung des horizontalen Gradienten weiter stabilisiert werden konnte, ist besonders der Gradient des  $15^\circ$ -Anstieges und damit die Knickpunktfindung deutlich optimiert worden. Das Maximum beträgt nun 15%.

Für die Typprüfung nach ECE oder SAE sind die Lichtwerte an bestimmten Orten oder Winkeln der Lichtverteilung maßgeblich. Um die Optimierung der visuellen Ausrichtung durch die messgerätebasierte Methode und den *HDGizer* auch für stark unterschiedliche Werte darzustellen, wurde in den Abbildungen 13(a) und 13(b) eine prozentuale Darstellungsform gewählt. Dabei wird nach Gleichung 2 die prozentuale Abweichung zur visuellen Methode bewertet.

$$X = \frac{s(\text{visuelle Methode}) - s(\text{Vergleichsmethode})}{s(\text{visuelle Methode})} \quad (2)$$

Wertebereiche  $X > 0$  zeigen dabei eine Minimierung der Standardabweichung  $s$  und somit eine Optimierung der Ausrichtung an. Es wurden zwei Komponentenpaarungen untersucht: Zum einen die Paarung von Lichtquelle und Reflektor, zum anderen der vollständige Scheinwerfer.

So konnten die lichttechnischen Eigenschaften der Komponenten analysiert werden. Zudem bildet die Lichtscheibe auch eine andere Form, Schärfe und Lage der Hell-Dunkel Grenze aus, wodurch dieser Untersuchung ein zweites Objekt zur Evaluierung zugefügt werden konnte.

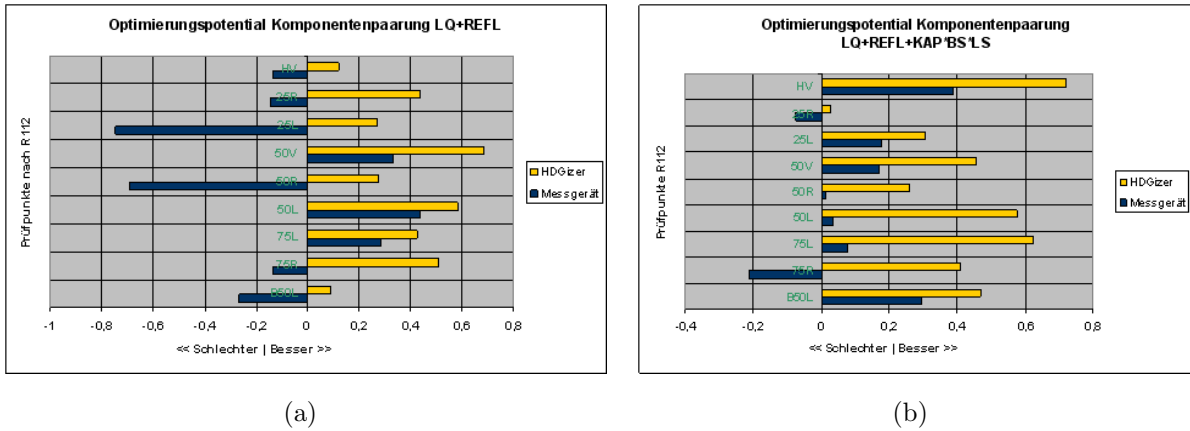


Abbildung 13: Prozentuale Deviation der Standardabweichungen

Für beide Untersuchungsgegenstände bewirkt die Ausrichtung mit dem *HDGizer* eine Optimierung aller betrachteten Prüfpunkte, die bis zu 60% beträgt. Die gerätebasierte Methode nach [WP206] bewirkt in manchen Prüfpunkten sogar größere Standardabweichungen. In zwei Fällen zeigen Werte von über 70% diese Verschlechterung.

Bezogen auf die oben angeführte Übertragbarkeit auf andere Scheinwerfersysteme kann gesagt werden, dass aufgrund der Methode des *HDGizers* für die meisten zulassungsfähigen Systeme eine Optimierung der Ausrichtung zu erwarten ist.

## Diskussion: Die Verteilung der Standardabweichungen als Beitrag der Messunsicherheit

Wie bereits eingeführt, ist ein Vergleich von photometrischen Werten als Ergebnisse von Messungen und der Simulation nur vernünftig unter Berücksichtigung der beigeordneten Messunsicherheit. Die in der Simulation ermittelten Werte enthalten systematische Abweichungen, beispielsweise durch eine nicht hinreichende Modellierung der physikalischen Realität oder durch die Methode des Schätzens photometrischer Größen. Zufällige Abweichungen werden hauptsächlich durch das Schätzen mit geringer Informationsdichte einer Monte-Carlo-Simulation verursacht. In [Här07] wird die Problematik des Schätzens vertieft dargestellt. Abbildung 1 zeigt weiterhin, dass der Maßstab des Vergleiches für die Simulation durch die Messung mehrerer Scheinwerfer und Leuchten gewonnen werden kann, da deren systematische

Abweichung von der CAD-Auslegung für die Typprüfung nicht relevant ist. Die zufälligen Abweichungen ergeben sich beispielsweise durch Schwankungen der Fertigung und Montage und sind, wie oben dargestellt, erheblich. Somit sollte die Messung eines einzelnen Scheinwerfers nicht als Maßstab dienen. Die Verteilungen der Mittelwerte aus obigem Absatz hingegen beschreiben den wahren Wert für die Simulation. Ob das Ergebnis einer Simulation signifikant von dem Ergebnis einer Messung abweicht, wird durch die Schätzwerte und die zugeordneten Unsicherheitsbeiträge bestimmt. Die Einflussgrößen auf die Unsicherheit einer Messung entstehen durch die Messmethode der Typprüfung sowie hauptsächlich durch den zufälligen Anteil des Unsicherheitsbeitrages durch den Scheinwerfer oder die Leuchte. In [Kie07] führt der Autor mittels der im GUM [iso95], [DIN], [CIE] beschriebenen Methoden eine Unsicherheitsanalyse für die Messmethode und Messmittel einer Typprüfung nach ECE R112 durch. Die Messobjekte, also die Lichtquelle und der Scheinwerfer, sowie die Ausrichtung werden dafür als Übertragungsfunktionen und mit konstantem Wert angenommen. Die Modellgleichung stellt sich dann wie folgt dar:

$$E_{\text{LAMP},l}(H, V) = K_{\text{PM}} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot A_{\text{LAMP},l} \cdot M_{\text{LAMP},l} \cdot M_{\text{LS},k} \cdot K_{\text{IS}} \cdot (m_k \cdot j - n_k) \text{ in } \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \quad (3)$$

- $E_{\text{LAMP},l}(H, V)$ : Ergebnisgröße: Beleuchtungsstärke des Scheinwerfers mit dem Index  $l$ , den Winkeln  $H$  und  $V$  zugeordnet.
- $K_{\text{PM}}$ : Der Korrektionsfaktor der Eingangsgröße des Photometers mit dem Erwartungswert 1, dem die Unsicherheit  $w(\text{PM})$  beigeordnet ist.
- $r$ : Abstand des Photometers vom in ECE definierten Bezugspunkt am Scheinwerfer, mit der Unsicherheit  $w(r)$ .
- $A_{\text{LAMP},l}$ : Leuchtende Fläche des Scheinwerfers  $l$  als Funktion von Ort und Richtung  $A_{\text{LAMP},l}(x, y, z, \vartheta, \varphi)$  in Abhängigkeit von der Ausrichtung, also der Zuordnung der Winkel des Scheinwerfers  $\vartheta, \varphi$  zu den Winkeln  $H, V$  des Goniometers. Die Unsicherheiten der Ausrichtung  $w(H)$  und  $w(V)$  wurden nicht berücksichtigt. Abhängig von der Lichtverteilung würden diese Beiträge zu einer Unsicherheit der Beleuchtungsstärken  $w(E_{\text{LAMP}}(H, V))$  führen.
- $M_{\text{LAMP},l}$ : Übertragungsfunktion  $M_{\text{LAMP},l}(x, y, z, \vartheta, \varphi)$  für die Leuchtdichten des Scheinwerfers als Funktion der Leuchtdichten der Lichtquelle, somit  $L_{\text{LAMP},l}(x, y, z, \vartheta, \varphi) = M_{\text{LAMP},l} \cdot L_{\text{LS},k}(x, y, z, \vartheta, \varphi)$ .
- $M_{\text{LS},k}$ : Übertragungsfunktion  $M_{\text{LS},k}(x, y, z, \vartheta, \varphi)$  für die Leuchtdichten der Lichtquelle als Funktion des Lichtstroms der Lampe mit  $L_{\text{LS},k}(x, y, z, \vartheta, \varphi) = M_{\text{LS},k} \cdot \Phi_{\text{LS},k}$ , wobei die Laufvariable der Lampe nun  $k$  ist, um die Austauschbarkeit zu berücksichtigen.

$K_{IS}$ :	Der Korrektionsfaktor der Eingangsgröße der Ulbricht-Kugel mit dem Erwartungswert 1, dem die Unsicherheit $w(\Phi_{LS})$ beigeordnet ist.
$j$ :	Stromstärke in Ampere mit der Unsicherheit $w(j)$ .
$m_k, n_k$ :	Koeffizienten der Geradengleichung zur Beschreibung des Lichtstroms der Lichtquelle als Funktion des elektrischen Stroms $\Phi_{LS} = m \cdot x + n$ im Arbeitspunkt.

Mittels dieses Modells können nun die Sensitivitäten ermittelt werden. Zusammen mit den quantifizierten Eingangsgrößen und ihren Wahrscheinlichkeitsverteilungen wurde ein Unsicherheitsbudget für die Messmethode aufgestellt [Kie07], [iso95].

input quantity	expanded rel. standard uncertainty half width	probability distribution	factor		sensitivity coefficient	relative uncertainty contribution	variance
$X$	$w E(X) / \%$			$w_i(X) / factor$	c	$w_i(X) / \%$	$w_i^2(X)$
current [A]	0,5	rectangular	1,73	0,29	1	0,083	0,007
Distance [m]	0,03	rectangular	1,73	0,02	-2	0,001	0,000
integrating sphere [lm]	3,67	normal	2	1,84	1	3,367	11,338
Photometer [lux]	1	rectangular	1,73	0,58	1	0,333	0,111
		rel. standard uncertainty /%				3,385	11,456
		rel. expanded standard uncertainty /%				6,769	
coverage factor k=2							
measurement result: (P=95%)						E=60*(1±4,06)lux	

Abbildung 14: Unsicherheitsbudget der Messmittel einer Typprüfung [Kie07]

Die Ulbricht-Kugel wurde in diesem Beispiel als Eingangsgröße mit dem größten Unsicherheitsbeitrag quantifiziert. Soll die Unsicherheitsanalyse auf die Eingangsgrößen Scheinwerfer, Lichtquelle und den Prozess der Ausrichtung erweitert und vervollständigt werden, so müssen die Übertragungsfunktionen modelliert sowie die Unsicherheitsbeiträge quantifiziert werden. Die Modellierung der Eingangsgrößen könnte mittels einer Lichtsimulation vorgenommen werden. Anschließend könnte die Unsicherheitsanalyse mittels eines Monte-Carlo-Experimentes erfolgen. Die fehlende Kenntnis der Abweichungen realer Bauteile, der zugeordneten Unsicherheitsbeiträge und der Wahrscheinlichkeitsverteilungen erschwert dieses Vorgehen entscheidend. Dagegen entspricht eine Messung mehrerer Scheinwerfer, wie sie in obigem Abschnitt dargestellt wird, einer Quantifizierungsmethode *Typ A* nach GUM. Die Standardabweichungen der Abbildungen 9, 10, 11 oder 12 entsprechen dann der prozentualen Standardmessunsicherheit. Die GUM-Methode lässt grundsätzlich die Verknüpfung von Unsicherheitsbeiträgen in einem Budget zu, die teilweise durch die Quantifizierungsmethode *Typ A* (statistisch) oder *Typ B* (durch



Erfahrungswerte und Wahrscheinlichkeitsverteilungen) ermittelt wurden. Ausgehend von dem Modell 3 sind aber neben den Messobjekten und der Ausrichtung alle Einflussgrößen des Messmittels in den entstehenden Unsicherheitsbeiträgen enthalten. Somit können die ermittelten Standardabweichungen nicht direkt als Unsicherheitsbeiträge der gesuchten Einflussgrößen in das Unsicherheitsbudget eingehen.

Wie stark weichen die Verteilungen der Standardabweichungen von den Unsicherheitsbeiträgen des Messobjektes und der Ausrichtung ab? Für eine Abschätzung können die bekannten Einflussgrößen in Bezug auf die Mehrfachmessung betrachtet werden. Dann reduzieren sich die Unsicherheitsbeiträge der Einflussgrößen auf die jeweiligen, deutlich geringeren Wiederholanteile für Photometer  $w_{\text{WDH}}(\text{PM})$ , Ulbrichtkugel  $w_{\text{WDH}}(\Phi_{\text{LS}})$  und Stromeinstellung  $w_{\text{WDH}}(j)$ . Die durch den Autor aktualisierte Unsicherheitsanalyse der Ulbrichtkugel nach [Ort05] quantifiziert die Unsicherheit auf  $w(\Phi_{\text{LS}}) = 1,57\%$  und zeigt, dass die größten Beiträge des Unsicherheitsbudgets durch das Lampennormal und den Kugeleinfluss verursacht werden. Die zufälligen Beiträge sind weitaus geringer, und werden in [Ort05] mit  $w(K1) = 0,1\%$  und  $w(K2) = 0,17\%$  angegeben. In das Budget der Mehrfachmessung von Scheinwerfern würde dieser Beitrag genau wie der Betrag der Korrelation winkelunabhängig eingehen. Die Korrelation muss berücksichtigt werden, da die Werte mit einem identischen Messgerät ermittelt wurden. Die zur Quantifizierung nötigen Verfahren sind aufgrund der geringen Anzahl an Wiederholmessungen an dieser Stelle nicht ausgeführt worden. Der Einflussfaktor des Abstandes des Photometers mit der Unsicherheit  $w(r)$  kann vernachlässigt werden. Die Beiträge  $w_{\text{WDH}}(j)$  und  $w_{\text{WDH}}(\text{PM})$  sowie Einflüsse beispielsweise durch die Montage des Scheinwerfers im Testgestell lassen sich in einer Wiederholmessung wie in Abbildung 15 dargestellt quantifizieren und zu der Unsicherheit  $w(\text{WDH})$  für zufällige, nicht identifizierte Abweichungen  $K_{\text{WDH}}$  zusammenfassen.

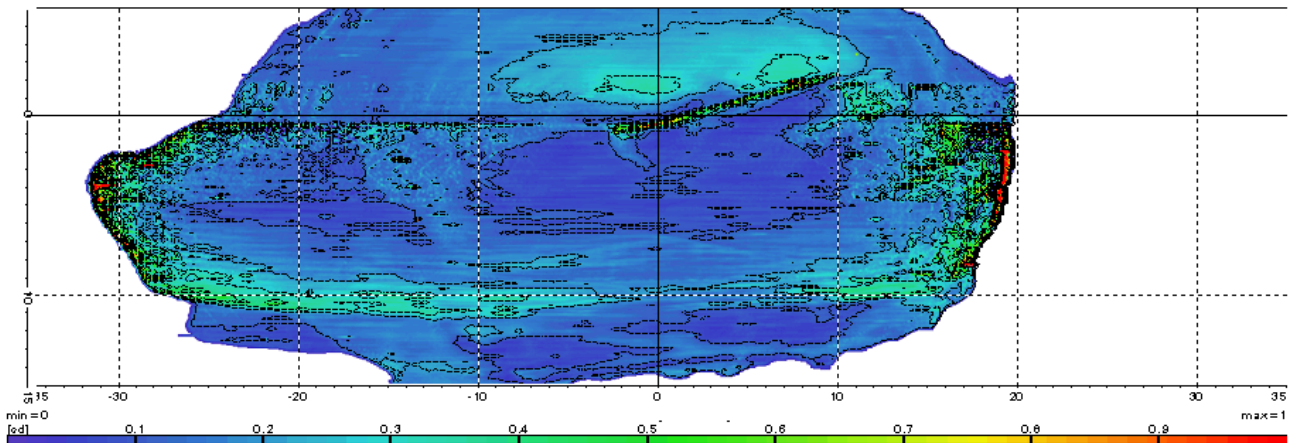


Abbildung 15: Standardabweichungen der Wiederholmessung

Die Abbildung 15 zeigt eine ähnliche Charakteristik wie die oben dargestellten Standardabweichungen, erzeugt durch die Ausrichtung. Die größten Werte treten an den Stellen der größeren

Gradienten auf, wie auch die Detaildarstellung in Abbildung 16 zeigt. Zudem werden größere Standardabweichungen im Streulichtbereich oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze, also Bereichen niedriger absoluter Werte, deutlich.

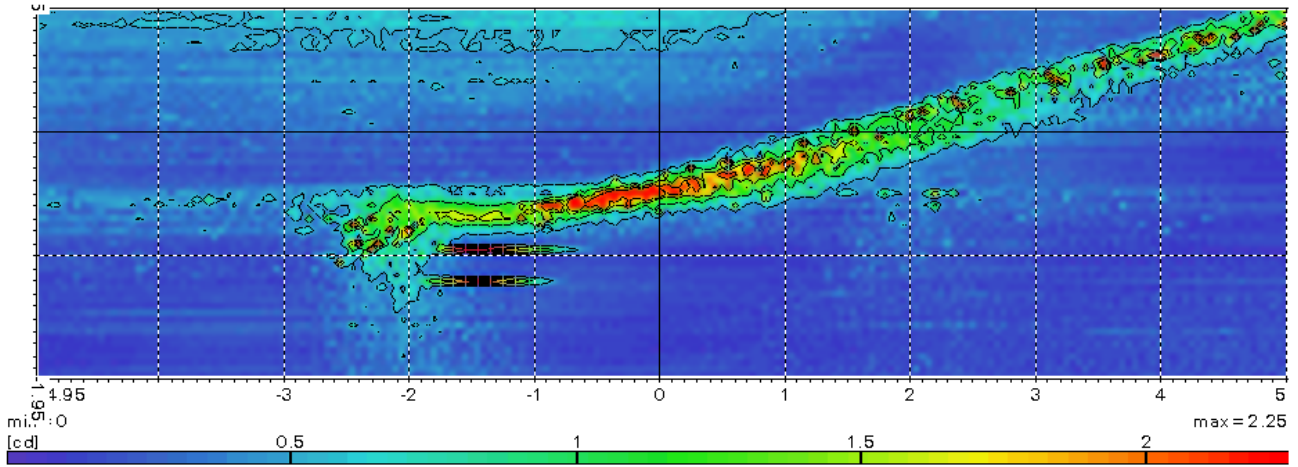


Abbildung 16: Standardabweichungen der Wiederholmessung - Ausschnitt

Das Maximum der Skalierung dieser Abbildung wurde auf 1/10 der Skalierung der Abbildungen 9, 10, 11, oder 12 festgelegt. Die Standardabweichungen der Verteilung der Wiederholmessung sind also deutlich geringer als die der Verteilungen mit den Einflussgrößen der Mehrfachmessung und Ausrichtung, respektive  $A_{\text{LAMP},l}$ ,  $M_{\text{LAMP},l}$  und  $M_{\text{LS},k}$ . Ausgehend von dem zu Grunde liegenden Modell und Budget sollen die Verteilungen der Standardabweichungen der Mehrfachmessung näherungsweise und qualitativ als Verteilungen der Messunsicherheiten betrachtet werden. Die Quantifizierung der einzelnen Beiträge führt zur Quantifizierung des gemeinsamen Beitrages der Einflussgrößen Scheinwerfer, Lichtquelle und Ausrichtung. Dann kann die vollständige Unsicherheitsanalyse den sinnvollen Vergleich von Messungen unterschiedlicher Herkunft oder der Simulation ermöglichen.

## Die Ausrichtung von Lichtverteilungen aus Messung und Simulation

Wie einführend dargestellt, erfolgt die Ausrichtung der Hell-Dunkel-Grenze in einer simulationsbasierten Auslegung nicht visuell, sondern durch die Projektion von idealisierten Wendelabbildungen durch die optischen Oberflächen. Üblicherweise werden diese Zylinderlichtquellen, die einen relativ scharfen Gradienten erzeugen, bei einer nachfolgenden, detaillierten Simulation durch umfassendere Lichtquellenmodelle ersetzt, die meist einen weicheren Gradienten erzeugen. Zudem verändern die Komponenten eines vollständigen Systems mit Lichtscheiben oder Optiken die Lage und Qualität des Gradienten. Der direkte Bezug zu einer visuellen Bewertung und Ausrichtung dieses Gradienten an einer Einstellwand ist somit nicht gegeben, weswegen



nachfolgend die simulierte Lichtverteilung einer Ausrichtung durch den *HDGizer* unterzogen werden soll.

Aufgrund der im bisherigen Text herausgearbeiteten Erkenntnisse soll als Maßstab die oben eingeführte Verteilung der Mittelwerte aus der Mehrfachmessung gelten, die mit dem *HDGizer* ausgerichtet wurde. Diese Mittelung über die Fertigungs- und Ausrichtungsschwankungen führt zu keiner signifikanten Verschmierung der Schärfe der Hell-Dunkel-Grenze, wie in den Abbildungen 17(a) und 17(b) gezeigt wird.

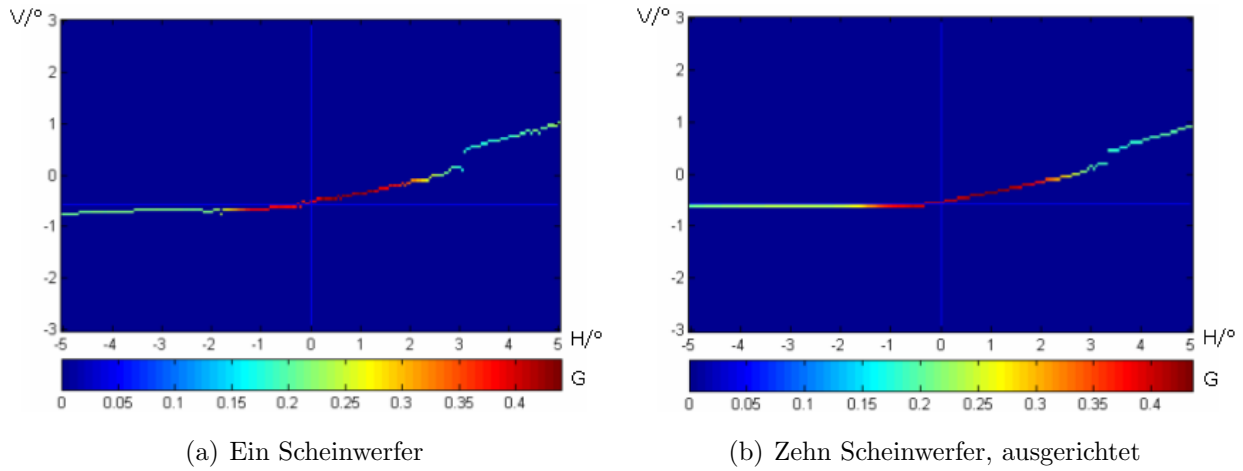


Abbildung 17: Verlauf G-Werte

Dafür wird aus den Abbildungen ersichtlich, dass durch den *HDGizer* aus einer eher un stetigen Position der Abschnitte der Hell-Dunkel-Grenze einer Einzelmessung eine mittlere Position in der Mehrfachmessung generiert wird. Die entstandene Mittelwertverteilung aus dem obigen Abschnitt sei zum direkten Vergleich hier noch einmal dargestellt.

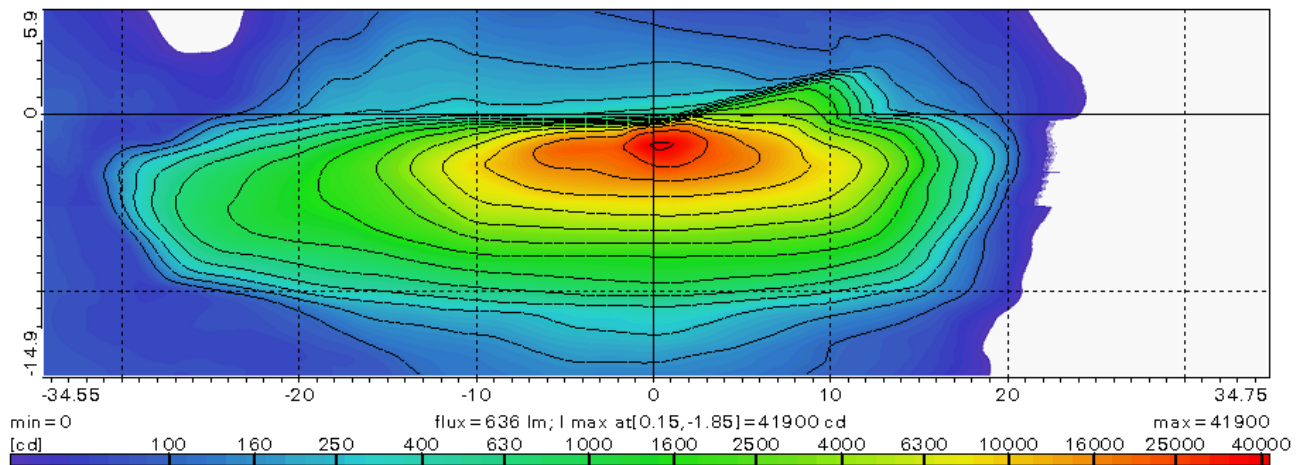


Abbildung 18: Mittelwert, zehn Verteilungen, mit *HDGizer* ausgerichtet

Die Simulation erfolgte unter Verwendung eines Lichtquellenmodells aus einer Nahfeldmessung einer ausgesuchten Lichtquelle des gleichen Herstellers und Modells wie in der Messung. Die Notwendigkeit dafür wird in [Kie07] gezeigt. Um die geforderte Auflösung von  $0,1^\circ$  bei hinreichend geringem Rauschverhalten beibehalten zu können, wurden 100 Mio. Strahlen berechnet. Für diesen Vergleich wurde noch ein einfacher Mittelwertfilter angewendet, der aber aufgrund der Strahlenanzahl den Gradienten nicht wesentlich verfälscht. Die entstandene Verteilung ist in Abbildung 19 dargestellt.

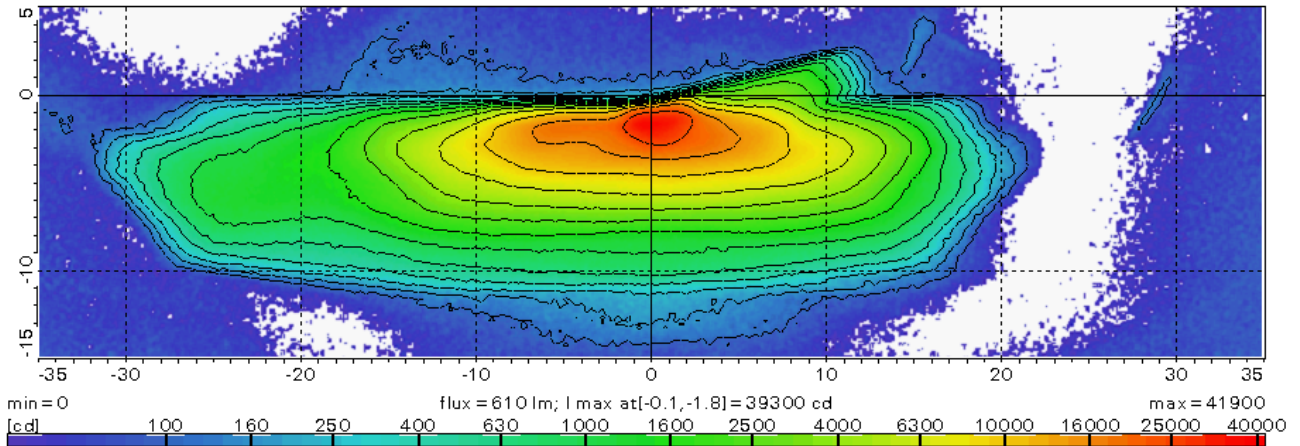
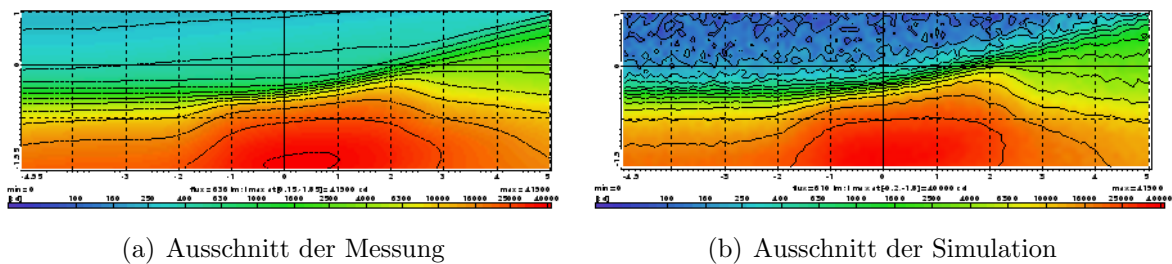


Abbildung 19: Simulierte Lichtstärkeverteilung - einmal gefiltert

Eine hinreichende Modellierung des Streulichtverhaltens durch optimierte Lichtquellenmodelle oder die Modellierung realer Kanten war nicht Gegenstand des Vergleichs und führt zu Abweichungen. In den Abbildungen 20(a) und 20(b) werden die zur Ausrichtung maßgeblichen Winkelbereiche vergrößert dargestellt.



(a) Ausschnitt der Messung

(b) Ausschnitt der Simulation

Abbildung 20: Vergleich

Neben dem abweichenden Streulichtverhalten sind ein geringerer Maximalwert der Lichtstärke in der Simulation sowie eine leicht verschobene Charakteristik der Wendelabbildung am Hot-Spot zu beobachten. Dabei stimmen die Positionen der äußeren Gradienten sowie deren Qualität sehr gut überein. Wird nun für einen Vergleich die Deviation dieser Verteilungen nach Gleichung 2 berechnet, ergibt sich die in Abbildung 21(a) dargestellte Verteilung.

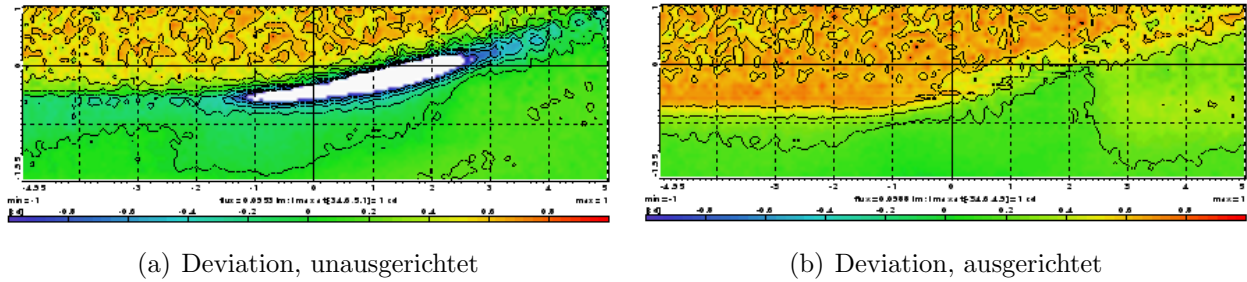


Abbildung 21: Vergleich

Neben den zu erwartenden Abweichungen im Streulichtbereich sind Abweichungen größer 1, also größer 100%, im Bereich des Hot-Spots, des HV-Punkts sowie relevanter Prüfpunkte zu beobachten. Wird nun die Lichtverteilung der Simulation ebenfalls nach den Methoden des *HDGizer* ausgerichtet, ergibt sich die in Abbildung 21(b) dargestellte Deviation. Es ist eine deutliche Verringerung der zentralen Abweichungen zu beobachten. Allerdings ist erwartungsgemäß im Bereich der schon gut positionierten äußeren Hell-Dunkel-Grenze eine Vergrößerung der Abweichungen eingetreten. Generell kann aber die Notwendigkeit der Ausrichtung simulierter Lichtverteilungen für einen Vergleich mit Lichtverteilungen aus der Messung der Typprüfung dargestellt werden. Zudem wird die Methode der Ausrichtung der simulierten Lichtverteilung durch den *HDGizer* bestätigt werden.

## Zusammenfassung

Für einen sinnvollen Vergleich von gemessenen und simulierten Lichtverteilungen von Scheinwerfern und Leuchten sollten die Werte und deren beigeordnete Unsicherheiten mit den Methoden der Unsicherheitsanalyse quantifiziert werden. Die besten Schätzwerte der Messung sollten die Mittelwerte aus Mehrfachmessung nach den Methoden der Typprüfung sein. Sie stellen den Maßstab für eine Simulation und somit eine virtuelle Typprüfung dar.

Im Falle von Abblendlichtscheinwerfern stellt die visuelle Ausrichtung der Hell-Dunkel-Grenze eine Einflussgröße dar, die zu großen systematischen und zufälligen Abweichungen der Messergebnisse führt. Die Vergleichbarkeit der Messergebnisse mit den Werten der Simulation ist nicht direkt möglich. Deswegen wurde eine Softwaremethode entwickelt, die gemessene und simulierte Lichtverteilungen vergleichbar ausrichtet. Dabei liegt die visuell-basierte Methode des „G-Wertes“ zur Bewertung des Gradienten in der Lichtverteilung zu Grunde. Der Algorithmus zur Ausrichtung nimmt eine ganzheitliche, durch die Schärfe gewichtete Bewertung vor und bestimmt das globale Optimum der Ausrichtung. Die Evaluierung an einem repräsentativen Beispiel zeigte, dass der *HDGizer* eine stabilere Ausrichtung als die visuelle oder die messgerätebasierte Methode in vertikaler wie auch in horizontaler Richtung bereitstellt. Somit

können Messungen auch unterschiedlicher Herkunft vergleichbar und stabil bewertet werden. Die Evaluierung erfolgte auf Basis von Mehrfachmessungen und deren statistischer Auswertung.

Der Zusammenhang zwischen diesen Verteilungen der Standardabweichungen und der Messunsicherheitsbeiträge von Scheinwerfer, Lichtquelle und Ausrichtung im Sinne einer Messunsicherheitsanalyse nach GUM wurde diskutiert. Die Unsicherheitsbeiträge der verwendeten Messmittel wurden identifiziert und quantifiziert. Es wird festgestellt, dass die Standardabweichungen der Mehrfachmessung näherungsweise als Unsicherheitsbeitrag der Messobjekte gelten können. Die Quantifizierung der Unsicherheitsbeiträge der Einflussgrößen Scheinwerfer, Lichtquelle und Ausrichtung soll Gegenstand zukünftiger Arbeiten sein. Dann könnte eine vollständige Messunsicherheitsanalyse zum sinnvollen Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Labore führen. Bezogen auf die Ausrichtung kann aber gesagt werden, dass die Methode durch den *HDGizer* die Unsicherheitsbeiträge der Ausrichtung der Hell-Dunkel-Grenze deutlich minimiert. Abschließend wird der prinzipielle Bedarf der methodisch gleichen Ausrichtung simulierter Abblendlichtverteilungen aufgezeigt und der Nutzen mittels des *HDGizers* auch an diesem Beispiel demonstriert.

## Literatur

- [Bra86] BRABANDER, L. DE: *Description of a determination method of the cut-off in a low beam*. In: *Private communication given during Bruessels GRE meeting*, 1986.
- [CIE] *CIE Publication No 70*.
- [DIN] *DIN 1319, Part I to IV*.
- [ECE] *Norm: ECE R112*.
- [FMV] *Norm: FMVSS 108*.
- [gtb05] *GTB Working Group Photometry: Photometry Laboratory Accuracy Guidelines*. GTB Report, 2005.
- [Här07] HÄRING, SEBASTIAN: *Simulation of light distribution and lit appearance - analysis via density estimation*. In: *Progress in Automobile Lighting*, Darmstadt, 2007. Herbert Utz Verlag.
- [iso95] *International Organization for Standardization: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, Genf, 1995. ISO.
- [Kie07] KIEL, HENNING: *Simulation and Measurement of Photometry in Headlamps and Tail Lamps: an analysis of selected aspects*. In: *Progress in Automobile Lighting*, Darmstadt, 2007. Herbert Utz Verlag.

- [Man00] MANZ, KARL: *Are Measurements for the Cut-Off Gradient of Headlamps in Different Measurement Distances Possible?* In: *SAE 2000-01-0802*, 2000.
- [Ort05] ORTLIEB, CHRISTIAN: *Messunsicherheitsanalyse am Beispiel eines Lampenprüfstandes*. Technischer Bericht, Fachhochschule Braunschweig, Wolfenbüttel, 2005.
- [Pol98] POLLACK, WOLFGANG: *Lage und Qualität der Hell-Dunkel-Grenze in der Lichtverteilung von Kraftfahrzeug-Scheinwerfern*. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift*, 1998.
- [SAE] Norm: *SAE J1383*.
- [SC95] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.: *Evaluation of the Cut-off Referring to Quality, Location and Linearity*. In: *Progress in Automobile Lighting*, Darmstadt, 1995. Herbert Utz Verlag.
- [vH99] HOFFMANN, ALEXANDER VON: *A Tool for the Development of Advanced Frontlighting Systems*. In: *Car Lighting Systems - Present and Future*, Barcelona, 1999.
- [vHKH05] HOFFMANN, ALEXANDER VON; KIEL, HENNING und HÄRING, SEBASTIAN: *Car-makers Approach to Innovative Lighting Technologie, Simulation Methods and Surface Modelling*. In: *Progress in Automobile Lighting*, Darmstadt, 2005. Herbert Utz Verlag.
- [WP206] UN ECE Report: *ECE/TRANS/WP.29/GRE/2006/9*, 2006.