

Bewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern mit Lichtsimulation

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt der
Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Ilmenau

von Herrn

Dipl.-Ing. Henning Kiel

geboren am 12.02.1978 in Weimar/Deutschland

eingereicht am: 19. November 2011

verteidigt am: 11. Mai 2012

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz
Prof. Dr.-Ing. Alexander von Hoffmann
Dr.-Ing. Karl Manz

urn:nbn:de:gbv:ilm1-2012000094

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand und im Rahmen der Aufbauarbeit der Gruppe „Technologie, Simulation und Strak“ der Abteilung „Licht und Sicht“ bei der Volkswagen AG. Meine Aufgabe bestand in der Implementierung und Evaluation der Lichtsimulation für den Entwicklungsprozess von Scheinwerfern und Leuchten. Einige der daraus entstandenen wissenschaftlichen Fragestellungen bilden den Kern dieser Dissertation.

So gilt mein Dank besonders Herrn Professor Alexander von Hoffmann, der mich als damaliger Vorgesetzter mit der Aufgabe betraute und damit die Dissertation definierte. Seine Fähigkeit für Themen zu begeistern und sein Weitblick waren ein Fundament dieser Arbeit.

Herrn Professor Gall danke ich für die Übernahme der Betreuung dieser Arbeit. Die Gespräche in Ilmenau halfen sehr die vielfältigen Themen auszurichten und die Inhalte einzugrenzen. Zudem danke ich dem gesamten Fachgebiet Lichttechnik der TU Ilmenau für die freundliche Unterstützung.

Besonders danke ich Herrn Dr. Manz von der Universität Karlsruhe, der die kritische Durchsicht meiner Arbeit in großer fachlicher Tiefe durchführte und das Korreferat übernahm.

Weiterhin danke ich Herrn Professor Schierz, der als der Leiter des Fachgebiets Lichttechnik meine Arbeit analysierte und prägte.

Ich danke meinen Vorgesetzten Dr. Neft, Dr. Koether, und Mathias Thamm, die auch in einer arbeitsreichen Zeit bei Volkswagen meine Dissertation nicht aus Ihren Augen verloren und mich bei ihrem Abschluss unterstützten.

Speziell danke ich meinen Kollegen Sebastian Häring und Daniel Mensch, Martin Kleimeyer und Sebastian Vogler sowie Christian Studeny und Christian Ziehl für die hilfreichen Diskussionen und Arbeiten, die im Umfeld der Dissertation stattfanden.

Und selbstverständlich bin ich meiner Familie und allen Freunden zu Dank verpflichtet, die mich bei dieser Aufgabe unterstützt haben.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird die Lichtsimulation als neue Methode zur Entwicklung von Scheinwerfern beim Automobilhersteller untersucht. Dazu wird zu Anfang der Entwicklungsprozess analysiert und es werden zwei Anwendungsgebiete identifiziert, die maßgebliche Anforderungen an die Lichtsimulation stellen: die virtuelle Typprüfung und die wahrnehmungsbasierte Bewertung.

Die wahrnehmungsbasierte Bewertung ist die Bewertung der Scheinwerferlichtverteilung durch Personen anhand von realen Bauteilen. Sie findet in einer späten Entwicklungsphase statt und ihre Anforderungen gehen über die gesetzlichen Vorgaben hinaus. Zur Übertragung in die Simulation werden Berechnungsmethoden bereitgestellt, die eine quantitative Bewertung ausgewählter Kriterien anhand der gemessenen oder simulierten Lichtverteilung ermöglichen. Dadurch können Scheinwerfer frühzeitig nach wahrnehmungsbezogenen Kriterien ausgelegt werden. Darüber hinaus werden Methoden zur Bewertung der Homogenität von Streulichtverteilungen sowie zur Filterung und zum Vergleich von Lichtverteilungen aus Messung und Simulation dargestellt.

Die virtuelle Typprüfung ist die Abbildung der am realen Bauteil vorgenommenen photometrischen Typprüfung in die Lichtsimulation. Die Anforderungen an die Genauigkeit der Simulation werden durch die weitgehend definierte Messung des Scheinwerfers bestimmt. Für einen Vergleich der Werte aus beiden Methoden ist die Kenntnis der Abweichungen und Unsicherheiten nötig, weswegen eine Unsicherheitsanalyse der photometrischen Typprüfung durchgeführt wird. Für die Analyse des Scheinwerfers ist eine Methode zur software- und lichtverteilungsbasierten Ausrichtung der Hell-Dunkel-Grenze nötig. Diese wird entwickelt und im Vergleich zur visuell-manuellen und zur messungsbasierten Ausrichtung evaluiert. Es wird gezeigt, dass die neue Methode geringere Abweichungen hat und eine vergleichbare Ausrichtung von gemessenen und simulierten Abblendlichtverteilungen ermöglicht.

Nachdem die Bewertung in die Lichtsimulation übertragen wurde, ist die Modellierung aller relevanten Komponenten des Scheinwerfers Gegenstand der Untersuchung. Es werden die Lichtquellenmodelle und Materialmodelle eingeführt und hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Eignung im Entwicklungsprozess bewertet. Für die Abhängigkeiten von genarbteten Oberflächen wird ein Modell entwickelt und es werden Empfehlungen für die Anwendung der Modelle ausgesprochen.

Abschließend werden die Messung und die Simulation eines Scheinwerfers verglichen. Auch zur Simulation wird eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt und die Einflussfaktoren werden dargestellt. Es wird gezeigt, dass die Abweichungen der Werte der primären Lichtfunktion des Abblendscheinwerfers kleiner als 10% sein können. Im Bereich der Streulichtverteilung sind sie wesentlich größer. Die Unsicherheiten der virtuellen und der realen Typprüfung können gleiche Werte erreichen. Die Unsicherheiten der wahrnehmungsbasierten Bewertung sind in der Lichtsimulation geringer. Insgesamt zeigt sich, dass die Lichtsimulation zur Entwicklung und Bewertung von Scheinwerfern geeignet. Sie ermöglicht höhere Flexibilität, verringert Kosten bei Änderungen und von Prototypen und führt schneller zu besseren Scheinwerfern.

Abstract

This thesis investigates light simulation as a new method in carmakers' headlamp development process. The development process is analyzed at the beginning and two fields of application are identified, which define significant requirements. These are virtual type approval and perception based rating.

The perception based rating is the rating of headlamp light distribution by people using hardware parts. This procedure takes place in the late phase of the development process and its requirements are more stringent than legal requirements. In order to transfer the perception based rating in the simulation, calculation methods are provided which allow a quantitative rating of measured or simulated light distribution regarding selected criteria. This allows very early development of headlamps in respect to perception based criteria. Moreover, methods for rating the homogeneity of stray light distribution, as well as for filtering or comparison of measured or simulated light distributions, are illustrated in this thesis.

The virtual type approval is the image of the hardware based photometric type approval in the light simulation. The requirements on accuracy of the simulation are determined by the well-defined measurement of the headlamp. In order to compare values of both methods, the information of deviations and uncertainties are necessary. Therefore, an uncertainty analysis of the photometric type approval is performed. For the analysis of headlamps, a new method for software-based and light distribution-based alignment of the cut-off line is necessary. This method is developed and evaluated in comparison to the visual based method and the measurement based method for alignment. The new method shows smaller deviations and it allows a comparable alignment within measured and simulated passing beam distributions.

After transferring the rating methods for light distribution to the simulation, the object of the investigation is the modeling of all relevant components of the headlamp. Light source models and material models are introduced and evaluated regarding their accuracy and applicability in the development process. A model of the dependencies of grained surfaces are developed and recommendations for the application of models are provided.

Upon conclusion, the measurement and the simulation of a headlamp are compared. An uncertainty analysis is performed for light simulation and the influencing factors are identified, as well. It is shown that the deviation of the values can be smaller than ten percent within the primary light function of the passing beam headlamp. Within the stray light distribution the deviations can be much bigger. The uncertainty values of the virtual and the hardware based type approval can be similar. The uncertainty values of the perception based rating in the light simulation are smaller. In general, it is shown that the light simulation is capable for the development and the rating of headlamps. The light simulation allows more flexibility, lowers the costs for changes and prototypes, and leads to better headlamps more quickly.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Ziele der Arbeit.....	2
1.2 Eingrenzungen.....	3
1.3 Aufbau der Arbeit.....	4
2 Anforderungen des Entwicklungsprozesses	6
2.1 Eingrenzung des Untersuchungsgegenstandes.....	6
2.2 Analyse des Prozesses.....	9
2.3 Einflüsse und Trends.....	14
2.4 Ableitung von Anforderungen.....	18
3 Bewertung von Lichtverteilungen	20
3.1 Bewertung durch gesetzliche Anforderungen.....	21
3.2 Bewertung durch wahrnehmungsbasierte Methoden.....	23
3.3 Diskussion der Abweichungen der Berechnungsmethoden.....	31
3.4 Entwicklung einer Methode zur Streulichtbewertung.....	34
3.5 Verarbeitung und Vergleich von Lichtverteilungen.....	37
4 Analyse der Photometrie der Typprüfung	42
4.1 Analyse der Unsicherheit der Messung am Goniophotometer.....	43
4.2 Diskussion der Messunsicherheit des Scheinwerfers.....	51
5 Softwarebasierte Methode zur Ausrichtung der Hell-Dunkel-Grenze	54
5.1 Analyse der Bewertung und Ausrichtung.....	54
5.2 Umsetzung der Softwaremethode.....	58
5.3 Diskussion der Einflussfaktoren und Abweichungen.....	61
5.4 Evaluation anhand des Untersuchungsgegenstandes.....	62

5.5 Zusammenfassung der Untersuchung.....	68
6 Lichtquellenmodellierung	69
6.1 Auswahl und Abgrenzung der Untersuchungsgegenstände.....	70
6.2 Mess- und Modellierungsmethoden der Funktion.....	73
6.3 Einflussfaktoren auf die Funktion der Lichtquelle.....	76
6.4 Lichtquellenmodelle in der Simulation.....	87
6.5 Zusammenfassung der Untersuchung.....	92
7 Materialmodellierung	93
7.1 Einteilung der Materialien und Oberflächen.....	93
7.2 Materialmodellierung in der Simulation.....	95
7.3 Analyse von geätzten und erodierten Oberflächenstrukturen.....	99
7.4 Zusammenfassung der Untersuchung.....	110
8 Analyse von Messung und Simulation am Fallbeispiel	111
8.1 Durchführung der Messung.....	111
8.2 Berechnungen in der Simulation.....	112
8.3 Aufbau der Simulation.....	117
8.4 Analyse der Abweichungen und Unsicherheiten der Simulation.....	122
8.5 Vergleich der Bewertungsmethoden.....	129
9 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick	136
Abbildungsverzeichnis	142
Tabellenverzeichnis	146
Literaturverzeichnis	147
Anhang	158
A Anhang allgemein.....	158
B Anhang zur Bewertung von Lichtverteilungen.....	158
C Anhang zur Berechnungen der Erkennbarkeitsentfernung.....	164

D	Anhang zum Verhalten des Lichtstroms der H7.....	168
E	Anhang zur Ausrichtung der Hell-Dunkel-Grenze	169
F	Anhang zur Signalform des PWM-Signals im Fahrzeug.....	171
G	Anhang zu Leuchtdichteverteilungen der Lichtquellenmodelle.....	171
H	Anhang zur Untersuchung von Narbungen.....	173
I	Anhang zur Simulation.....	178

Abkürzungen und Begriffe

Bezeichnung	Bedeutung
A	
<i>Abweichung</i>	siehe <i>Messabweichung</i>
<i>ADB</i>	<i>Adaptive Driving Beam</i> : Scheinwerfersystem zur Realisierung eines blendfreien Fernlichtes mittels Kameraerfassung des Verkehrsraumes und adaptiver Blende am Scheinwerfer sowie
<i>AFS</i>	<i>AFS</i> – wird bei VW als Dynamik Light Assist bezeichnet <i>Adaptive Front-Lighting System (auch Advanced Frontlighting System)</i> : Scheinwerfersystem zur Realisierung verschiedenen Abblendlichtfunktionen und Abblendlichtverteilungen, definiert in ECE R123
<i>Anisotropie</i>	Abhängigkeit des Reflexionsverhaltens von Einfallswinkel φ_i (Azimut der Flächennormale) – Gegenteil von <i>Isotropie</i>
<i>Apodisieren</i>	Beaufschlagen eines Emitters (Ausdehnung x, y, z) mit einer definierten Richtungsverteilung in ϑ, φ (engl. Apodizing) – ähnlich Filterung oder Faltung
B	
<i>BASt</i>	<i>Bundesanstalt für Straßenwesen</i>
<i>Benchmark</i>	Maßstab - dem zu entwickelnden Scheinwerfer wird ein Referenz- oder Benchmark-Scheinwerfer gegenübergestellt
<i>Bewertung, wahrnehmungsbasierte</i>	die Bewertung einer Scheinwerferlichtverteilung beziehungsweise einer Helligkeitsverteilung durch den Verkehrsteilnehmer auf der Straße und im Verkehrsraum
<i>BIN</i>	(dt. Behälter) - Bereich einer Betrachtung, z.B. ein Winkelbereich in einer Lichtverteilung oder eine Histogrammklasse
<i>BRDF</i>	<i>Bidirectional Reflection Distribution Function</i> – Funktion zur Beschreibung des Reflexionsverhaltens
<i>B-Spline</i>	Basisfunktion im CAD zur (stückweisen) Beschreibung von Kurven und Flächen
C	
<i>CAD</i>	Computer Aided Design – rechnergestützte Konstruktion
<i>CAL</i>	Computer Aided Lighting – rechnergestützte lichttechnische Auslegung
<i>CFD</i>	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
<i>CIE</i>	<i>Commission Internationale de l'Eclairage</i>
D	
<i>Design</i>	Gestaltung des technischen Gerätes nach ästhetischen Gesichtspunkten (engl. Styling)
<i>Dilatation</i>	Methode der Bildverarbeitung zur Anlagerung von Elementen an Bildanteile
E	
<i>ECE</i>	<i>Economic Commission for Europe</i>
<i>Empfindlichkeit</i>	Änderung des Wertes der Ausgangsgröße eines Messgerätes

<i>Entfernungsgesetz, photometrisches</i>	bezogen auf die sie verursachende Änderung des Wertes der Eingangsgröße, vgl. DIN 1319 [Nor95]
<i>Erosion</i>	$E = \frac{I}{r^2} \cdot \cos \gamma$ γ : Winkel zwischen Flächennormale und Einstrahlrichtung
<i>Evaluation</i>	Methode der Bildverarbeitung, bei der als irrelevant klassifizierte Bildanteile entfernt werden allgemeiner Begriff für Analyse oder Bewertung, z.B. einer Methode oder eines Prozesses
F	
<i>Fernfeld</i>	Abstand von einer Lichtquelle außerhalb der photometrischen Grenzentfernung, ab der eine Lichtquelle als punktförmig angenommen werden darf - siehe Nahfeld und Grenzentfernung, photometrische
<i>Fernfeld-Goniophotometer</i>	Messgerät zur Messung der Beleuchtungsstärke in den Winkeln ϑ und φ unter Verwendung eines Photometers außerhalb der photometrischen Grenzentfernung
G	
<i>Genauigkeit</i>	siehe <i>Messgenauigkeit</i>
<i>GDL</i>	<i>Gas Discharge Lamp</i>
<i>Goniophotometer</i>	Messgerät zur Messung der Beleuchtungsstärke in den Winkeln ϑ und φ unter Voraussetzung der Fernfeldbedingung
<i>Grenzentfernung, photometrische</i>	definiert Grenze zwischen Nahfeld und Fernfeld – Definition erfolgt z.B. über Vergleich der Werte ermittelt aus einer Messung im Nahfeld und aus Messung im Fernfeld (bzw. dem photometrischen Entfernungsgesetz) und dem Erreichen einer definierten Maximalabweichung
<i>GTB</i>	<i>Groupe de Travail "Bruxelles 1952"</i>
<i>GUI</i>	<i>Graphical User Interface</i> - graphische Benutzeroberfläche
<i>GUM</i>	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i> - Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen
H	
<i>HDG</i>	<i>Hell-Dunkel-Grenze</i> , Bestandteil und Grenze einer Abblendlichtverteilung, gekennzeichnet durch große Gradienten
<i>HID</i>	<i>High Intensity Discharge</i>
I	
<i>Importance Sampling</i>	Erzeugung von Stichproben anhand einer <i>Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion</i>
<i>Isotropie</i>	Unabhängigkeit des Reflexionsverhaltens von Einfallswinkel φ_i (Azimut der Flächennormale) – Gegenteil von <i>Anisotropie</i>
L	
<i>LED</i>	<i>Light Emitting Diode</i>
<i>Lichtfeld</i>	Gesamtheit aller Strahlen im 3D Raum, über 4 Koordinaten beschreibbar (s,t,u,v), deswegen auch als 4D-Lichtfeld bekannt (vgl. Levoy, Hanrahan, 1996)
<i>Lichtkanal</i>	Lichtlabor mit der Nachbildung einer Straße und deren Umgebung, überwiegend genutzt zur statischen Bewertung einer Lichtverteilung eines Scheinwerfers am Fahrzeug oder in einer äquivalenten Anbausituation.
<i>Lichtverteilung</i>	Verteilung der Werte einer lichttechnischen Größe in einem Winkelbereich oder auf einer Ebene
<i>Linearität</i>	Maß für Stetigkeit und Geradlinigkeit der Hell-Dunkel-Grenze
<i>LVK</i>	Lichtverteilungskurve(n) – auch: <i>Lichtverteilung</i>

LWR

Leuchtweitenregulierung, Bestandteil eines
Abblendscheinwerfers

M

<i>Messabweichung (Abweichung)</i>	Messwert minus einem Referenzwert, vgl. [Nor00]
<i>Messergebnis</i>	Menge von Größenwerten, die einer Messgröße zugewiesen sind, zusammen mit jeglicher verfügbarer relevanter Information, vgl. [Nor00]
<i>Messgenauigkeit (Genauigkeit)</i>	Ausmaß der Annäherung eines Messwertes an einen wahren Wert einer Messgröße, vgl. [Nor00]
<i>Messgerät</i>	Gerät, das allein oder in Verbindung mit zusätzlichen Einrichtungen für die Durchführung von Messungen verwendet wird, vgl. [Nor00]
<i>Messlampe</i>	(Gebrauchs)Lampe für Messungen, die gegen Prüf-Glühlampe kalibriert ist (ohne Kalibrierzertifikat)
<i>Messmethode</i>	Allgemeine Beschreibung des logischen Vorgehens zur Durchführung einer Messung, vgl. [Nor00]
<i>Messprinzip</i>	(physikalisches)...Phänomen, das als Grundlage einer Messung dient, vgl. [Nor00]
<i>Messunsicherheit (Unsicherheit)</i>	Nichtnegativer Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die der Messgröße auf der Grundlage der benutzten Information beigeordnet ist, vgl. [Nor00]
<i>Messverfahren</i>	Detaillierte Beschreibung einer Messung gemäß einem oder mehreren Messprinzipien und einer Messmethode auf Grundlage eines Modells der Messung und einschließlich aller Berechnungen zum Erhalt eines Messergebnisses, vgl. [Nor00]
<i>Messwert</i>	Größenwert, der ein Messergebnis repräsentiert, vgl. [Nor00]
<i>Metropolisalgorithmus</i>	Monte-Carlo-Methode, wird zur Optimierung der Berechnung genutzt
<i>Monte-Carlo-Integration</i>	Berechnen von höher-dimensionalen Integralen mittels <i>Monte-Carlo-Simulation</i>
<i>Monte-Carlo-Simulation</i>	Numerisches Berechnungsverfahren basierend auf Zufallsexperimenten
<i>MSE</i>	<i>Mean Squared Error</i> – mittlere quadratische Abweichung

N

<i>Nahfeld</i>	Abstand innerhalb der photometrischen Grenzentfernung / die Ausdehnung der Lichtquelle muss berücksichtigt werden
<i>Nahfeld-Goniophotometer</i>	Messgerät zur Messung der Beleuchtungsstärke in den Winkeln ϑ und φ im Nahfeld unter Verwendung ortsauflösender Messung (Leuchtdichtkamera)
<i>NHTSA</i>	<i>National Highway Traffic Safety Administration</i>

O

<i>OEM</i>	Original Equipment Manufacturer – Erstausrüster oder hier: Automobilhersteller
------------	--

P

<i>Path Tracing</i>	Form des <i>Monte-Carlo-Raytracing</i> , welche die Lösung der Rendergleichung beinhaltet, d.h. die Berücksichtigung des Leuchtdichtetransports und der Energieerhaltung
<i>Photometrie</i>	Messung lichttechnischer Größen
<i>Prüf- Glühlampe</i>	Engl. etalon lamp oder standard lamp – Lampe, deren Geometrie in besonders engen Toleranzen liegt und deren Lichtstrom kalibriert und einer Spannung zugeordnet ist

Q

<i>Quantisierung</i>	Überführung der stufenlosen Werte- und Winkelverteilung (Lichtverteilung) in diskrete Schritte
<i>Quantisierungsfehler</i>	Abweichung durch die begrenzte Anzahl der diskreten Schritte der <i>Quantisierung</i> , ähnlich Rundungsfehler

R

<i>Rauschen</i>	zufällige Abweichungen benachbarter Werte einer Werteverteilung oder Lichtverteilung
<i>Raytracing</i> (<i>Monte-Carlo-Raytracing</i>)	Strahlverfolgung, Algorithmus zur Berechnung der Lichtausbreitung unter Verwendung der Monte-Carlo-Simulation
<i>Ringmessung</i>	Methode zum Abgleich (zur Kalibrierung) von Messeinrichtungen durch Verwendung des selben (zwischen den Einrichtungen zirkulierenden) Normals

S

<i>SAE</i>	<i>Society of Automotive Engineers</i>
<i>Sicht</i>	allgemeiner Begriff für die Qualität der Wahrnehmung. Beinhaltet Kriterien wie Erkennbarkeit, Reichweite, etc.
<i>Shrinkage Funktion</i>	Funktionen zur Änderung von <i>Wavelet</i> -Koeffizienten mit definiertem Ziel (z.B. Filterung)
<i>SRA</i>	<i>Scheinwerferreinigungsanlage</i>
<i>Strak</i>	Erstellen einer 3D-Geometrie nach ästhetischen & gestalterischen Gesichtspunkten unter Berücksichtigung konstruktiver Vorgaben

T

<i>TC 4-45</i>	Arbeitsgruppe der CIE „Performance Assessment Method for Vehicle Headlamps“, zuvor GTB Euro-NCAP Taskforce – Zusammensetzung: Hersteller von Automobilbeleuchtung, Automobilhersteller und Forschungseinrichtungen
<i>Tesselierung</i>	Überführung einer CAD-Geometrie in eine Repräsentation durch flächige Dreiecke
<i>Tier-1</i>	Automobilzulieferer (1. Ordnung)
<i>TIS</i>	<i>Total Integrated Scatter</i> (Reflexionsgrad)

V

<i>Validierung</i>	Überprüfung einer Methode, eines Modells oder eines Prozesses anhand eines experimentellen Nachweises, z.B. im Vergleich von Simulation und Messung
<i>Vereinbarter Wert</i>	Größenwert, der durch Vereinbarung einer Größe für einen vorgegebenen Zweck zugewiesen wird, vgl. [Nor00]
<i>Verifikation</i>	Überprüfung eines Modells anhand eines theoretischen Nachweises
<i>Vergleichspräzision</i>	Messpräzision bei einer Menge von Vergleichsbedingungen, vgl. [Nor00] – z.B.: gleicher Messort, Messverfahren, Messobjekt und Wiederholungen in einem Zeitintervall
<i>VT</i>	virtuelle Typprüfung

W

<i>Wahrer Wert</i>	Größenwert, der mit der Definition einer Größe in Übereinstimmung ist, vgl. [Nor00]
<i>Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion</i>	Verteilung der Wahrscheinlichkeit P eines Wertes $P(x \in [a, b]) = \int_a^b p(x) dx$
<i>Wavelet</i>	Klasse von Funktionen, die in der <i>Wavelet-Transformation</i>

<i>Wavelet-Transformation</i>	genutzt wird Transformation von Daten oder Signalen mittels Wavelet-Funktionen zur weiteren Verarbeitung (z.B.: Reduktion, Signalverarbeitung, Filterung)
<i>WB</i> <i>Wiederholpräzision</i>	wahrnehmungsbasierte Bewertung Messpräzision bei einer Menge von Wiederholbedingungen von Messungen, vgl. [Nor00] – z.B.: dasselbe Messverfahren, Messsystem, Bediener, Objekt in einem kurzen Zeitintervall
Z	
<i>Zeilenkoinzidenzverfahren</i>	auch: Region Labeling - Methode der Bildverarbeitung zur Bildanalyse, mittels Prüfung der Pixeleigenschaften auf (vordefinierte) Zusammenhänge, mit dem Ergebnis eines Bildes der Segmentlabel je Pixelklasse

Formelzeichen

Größe	Einheit	Beschreibung
α	1	Absorptionsgrad (S. 94, S. 97 ff)
α_n	1	Absorptionskoeffizient
α	°	Winkel
α_H	°	Winkel, Goniometer und Lichtverteilung, horizontal
α_V	°	Winkel, Goniometer und Lichtverteilung, vertikal
γ	°	Winkel
γ_{SW}	°	Winkel, zu z-Achse des Scheinwerfers
ε	1	Fehlerwahrscheinlichkeit bei Lighttools [Oraom] (S.122)
ε	1	Winkel (S. 113 ff.)
ϑ	°	Winkel
λ	nm	Wellenlänge
ρ	1	Reflexionsgrad
ρ_v	1	Lichtreflexionsgrad
τ	1	Transmissionsgrad
φ	°	Winkel
ξ	1	mögliche Werte einer Größe im Messunsicherheitsbudget
τ_i	1	Reintransmission
Φ	lm	Lichtstrom
$\Phi_{e,\lambda}$	$W \cdot nm^{-1}$	spektraler Strahlungsfluss
Φ_{NENN}	lm	Nennlichtstrom
Φ_t	lm	Teillichtstrom
ω	s^{-1}	Kreisfrequenz (S. 113)
Ω	sr	Raumwinkel
a	m	Längenmaß
a_{SW}	m	Längenmaß, Abstand der Scheinwerfer
c	1	Sensitivitätskoeffizient
d	m	Durchmesser der Wendel nach ECE R37 [ECE05]
D	%	Deviation
e	m	Bezugsmaß einer Lampe nach ECE R37 [ECE05]
E	$V \cdot m^{-1}$	Elektrische Feldstärke (S. 113)

E	lx	Beleuchtungsstärke
E_h	lx	Beleuchtungsstärke, horizontal
E_W	1	Erwartungswert - $E_W(f(x)) = \int f(x) p(x) dx$, (S. 50, S.112)
f	m	Längenmaß der Wendel nach ECE R37 [ECE05]
F		Brennpunkt
F_L		Brennpunkt, Linse
F_R		Brennpunkt, Reflektor
F_D	1	Abweichung durch Diskretisierung
g	1	Wahrscheinlichkeitsdichte in Unsicherheitsbudget (S. 51)
G	1	Schärfe des Gradienten einer HDG (Gleichung 5.3)
h_{SW}	m	Längenmaß, Höhe der Scheinwerfer über der Fahrbahn
I	cd	Lichtstärke
I	1	Intensität (S. 104 ff, S. 114)
j	1	komplexe Zahl
J	A	elektrischer Strom
k	1	Extinktionskoeffizient
k_E	1	Kreiswellenzahl, Betrag Wellenvektor
k_V	1	Betrag Wellenvektor im Vakuum
K_x	1	Korrekturwert einer Eingangsgröße X
K_ρ	1	Korrekturwert Reflexionsgrad
l	m	Längenmaß, Maß einer Strecke
L	$cd \cdot m^{-2}$	Leuchtdichte
m	1	Anzahl Versuche, Durchführungen der Simulation
M	1	Dimension einer Matrix
n	1	Brechungsindex, Realteil (S. 113 ff, S. 121)
\tilde{n}	1	Brechungsindex, komplex
n''	1	Brechungsindex, Imaginärteil
n	1	Anzahl der Strahlen, eingezählt in Element
N	1	Anzahl der Strahlen
N_{aus}	1	Anzahl der Strahlen, gestartet
p	1	Wahrscheinlichkeit des Auftreffens eines Strahls in Element
P	1	Wahrscheinlichkeit (engl. Probability)
P_{el}	W	Leistung, elektrisch
q	$cd \cdot m^{-2} \cdot lx^{-1}$	Leuchtdichtekoeffizient
r	m	Längenmaß, Maß einer Strecke
\vec{r}		Vektor des Lichtstrahls mit $\vec{r} = (x, y, z, s, t, u, \lambda, \Phi_t)$, mit Ortskoordinaten x, y, z , Richtungskoordinaten s, t, u , Wellenlänge λ und Teillichtstrom Φ_t
R	Ω	Widerstand, elektrisch
R	$cd \cdot m^{-2} \cdot lx^{-1}$	Leuchtdichtekoeffizient
R^2	1	Bestimmtheitsmaß
R_a	μm	arithmetischer Mittenrauwert (DIN EN ISO 4287:1998)
R_q	μm	quadratischer Mittenrauwert (DIN EN ISO 4287:1998) auch RMS
s	E. d. G.	Standardabweichung, empirisch
t	1	Student Faktor (S. 64)
t	s	Zeit
u	E. d. G.	Unsicherheit (DIN 1319)
u	m	Ortskoordinate (S.79, S.80, S.86, S. 89, S.112)
U	E. d. G.	erweiterte (Mess)Unsicherheit
U_{el}	V	Spannung, elektrisch
v	m	Ortskoordinate
w	%	relative, prozentuale (Mess)Unsicherheit
$W(X)$	%	erweiterte, relative, prozentuale (Mess)Unsicherheit der

$W(K_{WDH})$	%	Messgröße X erw. proz. (Mess)Unsicherheit aus der Wiederholmessung (S.53, S.131)
$W(K_{SW})$	%	erw. proz. (Mess)Unsicherheit aus Messung der Scheinwerfer (S.53, S.131)
W	1	Wert in Soll-HDG (S.58 ff)
x	m	Koordinate
\bar{x}	E. d. G.	Mittelwert der Größe, arithmetisch = Schätzwert (DIN 1319)
x_i	E. d. G.	Wert der Größe, einfallend, lichttechnisch
x_M	E. d. G.	Wert der Größe, durch Messung ermittelt
x_r	E. d. G.	Wert der Größe, reflektiert, lichttechnisch
x_S	E. d. G.	Wert der Größe, durch Simulation ermittelt
x_W	E. d. G.	wahrer Wert der Größe
X	E. d. G.	Größe, physikalisch
X	E. d. G.	Einflussgröße (S. 32)
X'	E. d. G.	Größe nach Interaktion mit Medium – ausgehend
X_0	E. d. G.	Größe vor Interaktion mit Medium – einfallend
X_{corr}	1	Korrelation
y	m	Koordinate
z	m	Koordinate

E.d.G: Einheit der Größe

Indizes	Beschreibung
el	elektrisch
F	Fahrzeugkoordinaten – Bezug zur Fahrbahnoberfläche
g	Grenzentfernung
H	horizontal
i	Laufvariable
j	Laufvariable
k	Index der wechselbaren Lichtquelle
l	Index des Scheinwerfers
LS	Lampe
m	Laufvariable
M	Messung
n	Laufvariable
NENN	Nennwert
NF	Nachtfahrt
rel	Relativ
S	Simulation
t	Teil-
SW	Scheinwerfer
V	vertikal
VT	Virtuelle Typprüfung
WB	Wahrnehmungsbasierte Bewertung

1 Einleitung

Die Scheinwerfer am Kraftfahrzeug befinden sich in ständiger Weiterentwicklung. So bedeuteten beispielsweise die Einführung des asymmetrischen Abblendlichts (1957) und der Gasentladungslampe (1991) wesentliche Fortschritte in der Sicherheitsfunktion dieses lichttechnischen Gerätes. Solche Fortschritte wurden im letzten Jahrzehnt häufiger gemacht, unter anderem als das statische Abbiegelicht und schwenkende Scheinwerfersysteme 2003 am Markt erhältlich wurden und als sich das Tagfahrlicht im europäischen Raum etablierte. Diese Funktionen erhöhten die Komplexität der Scheinwerfer sowie den Entwicklungsaufwand deutlich. Entsprechend nahm die Anzahl der wissenschaftlichen Arbeiten zu lichttechnischen Themen am Kfz zu. Die Themengebiete der Lichtbewertung und des Sicherheitsaspekts der Kfz-Beleuchtung wurden verstärkt untersucht und auch in den Medien behandelt. Als die Scheinwerfer durch die Einführung der klaren Außenlichtscheiben am Ende der 90er Jahre stärker in den Fokus des Designs rückten, wurde der Aufwand in der Entwicklungsphase maßgeblich erhöht. Die oftmals konträren Bestrebungen des Designs und der Lichttechnik führten zu mehr Entwicklungsschleifen. Heutiger Stand der Technik sind unter anderem AFS-Scheinwerfer mit bis zu fünf dem Fahrzustand angepassten Lichtfunktionen, das Fernlichtsystem ADB mit kamerabasiert erfassten und selektiv ausgeblendeten Verkehrsteilnehmern sowie LED-Scheinwerfer, die sich aus aufwändigen optischen Teilsystemen zusammensetzen und die derzeit im Fokus der Designer stehen. Eine weitere Zunahme der Funktionen und der Designvarianten ist zu erwarten.

Diese Trends und Entwicklungen werden begleitet von einem steigenden Kostendruck, da die Preise für Scheinwerfer nicht im gleichen Maß wie deren Komplexität steigen sollen.

Des Weiteren ist bei den Automobilentwicklern ein Trend zur Erhöhung der Modellvielfalt zu beobachten, damit Marktnischen gezielt besetzt werden können. Für diese Fahrzeugmodelle werden vermehrt Scheinwerfer für verschiedene Ausstattungsvarianten entwickelt. Beispiele hierfür sind Basis-Halogencheinwerfer und optionale Xenonscheinwerfer, aber auch stark kostenoptimierte Derivate, beispielsweise für Schwellenländer. Somit kann von einem deutlichen Anstieg an zu entwickelnden Produkten gesprochen werden.

Um im Entwicklungsprozess auf diese Herausforderungen reagieren zu können, müssen die Entwicklungsgeschwindigkeit und die Flexibilität erhöht und dabei die Entwicklungskosten gesenkt werden. Ein wirkungsvoller Ansatz ist es, Bewertungen an den relativ teuren, unflexiblen und erst spät verfügbaren Prototypen zu vermeiden und stattdessen in frühen Phasen anhand CAD-basierter Daten zu entscheiden. Die Umsetzung dieses Vorgehens für die lichttechnischen Entwicklungsaufgaben bedeutet, die bislang messtechnisch oder visuell basierten Bewertungen und Entscheidungen anhand von CAD-Daten und simulierten lichttechnischen Werten zu treffen – und somit anhand der Lichtsimulation.

Die grundlegenden Methoden für die Lichtsimulation stehen zur Verfügung. Die physikalischen Modelle zur Ausbreitung des Lichts und zu seiner Wechselwirkung mit Materialien sind bekannt und in hoher Detaillierung in kommerzieller Software implementiert. Die Methoden zur Auslegung optischer Funktionsflächen, das Computer Aided Lighting (CAL), sind ebenfalls als Softwareprodukte auf dem Markt erhältlich. Weitere Entwicklungen der letzten Jahre, wie die Nahfeld-Goniophotometrie zur Lichtquellenmodellierung, kommerziell verfügbare Messgeräte zur Erfassung von Streulichteigenschaften für die Materialmodellierung, und nicht zuletzt die hohe Rechenkapazität aktueller Computer, ermöglichen die Anwendung der Lichtsimulation in der Entwicklung von Scheinwerfern.

1.1 Ziele der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Lichtsimulation im Umfeld der Entwicklung von Kfz-Scheinwerfern zu untersuchen. Dabei ist die Bewertung der lichttechnischen Funktion von Scheinwerfern auf Basis von simulierten Lichtverteilungen im Vergleich zu konventionellen Methoden zu evaluieren. Bisherige Bewertungen anhand von realen Bauteilen beruhen zum einen auf visueller Wahrnehmung und zum anderen auf lichttechnischer Messung. Es ergeben sich folgende untergeordnete Zielstellungen:

Die Anforderungen des bestehenden Prozesses der Scheinwerferentwicklung an die Simulationsmethode sollen analysiert werden. Damit wird die Lichtsimulation hinsichtlich ihrer Anwendung eingeordnet. Dabei sind die spezifischen Vorteile der Simulationsmethode gegenüber der konventionellen Methode herauszuarbeiten.

Die Methoden zur Bewertung von Scheinwerferlichtverteilungen sind auszuwählen und auf die Lichtsimulation zu übertragen. Dabei soll weitestgehend auf bestehende Bewertungsmethoden mit einem Bezug zu lichttechnischen Größen zurückgegriffen werden. Die Mittel zur Anwendung in der Lichtsimulation sind bereitzustellen und im Hinblick auf die Genauigkeit zu analysieren.

Eine zentrale Fragestellung betrifft die Genauigkeit der Simulation. Wenn die Lichtsimulation die konventionelle, messungsbasierte Methode ablösen soll, so muss sie diese hinreichend genau abbilden. Somit müssen in der Arbeit sowohl die konventionelle Methode wie auch die neue Simulationsmethode hinsichtlich ihrer Abweichungen und Genauigkeiten analysiert werden.

Zur Simulation eines Scheinwerfers ist die Modellierung der lichttechnischen Eigenschaften der Lichtquelle und der Materialien der relevanten Bauteile nötig. Als Beitrag zur Anwendung der Lichtsimulation sollen somit die nötigen Modellierungsmethoden für Kfz-Scheinwerfer bereitgestellt werden. Dabei ist die Abbildung der Einflussfaktoren des konventionellen Prozesses nötig.

Es soll eine Validierung der Lichtsimulation anhand einer exemplarischen Untersuchung erfolgen. Dabei ist auf die repräsentative Auswahl des Untersuchungsgegenstandes zu achten. Anhand der Ergebnisse soll die Anwendung der Lichtsimulation in der Scheinwerferentwicklung diskutiert werden.

1.2 Eingrenzungen

Die vorliegende Arbeit betrachtet die Lichtsimulation aus dem Blickwinkel des Automobilherstellers. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit der grundlegenden Integration in den Fahrzeugentwicklungsprozess und der Berücksichtigung von dessen Anforderungen. Durch die Verwendung von überwiegend kommerziell verfügbaren Mitteln, wie Simulationssoftware und Messgeräten, kann eine übergreifende Gültigkeit für ähnliche Anwendungen und Arbeitsfelder abgeleitet werden.

Angrenzende Arbeiten und Veröffentlichungen kommen überwiegend aus dem Bereich der Hersteller von Scheinwerfern, Lichtquellen oder Simulationssoftware. Diese Arbeiten behandeln somit nur Teilgebiete des hier betrachteten Umfangs und lösen nicht die gesamte Aufgabenstellung. Eine vertiefte Kenntnis über die Herstellung und interne Funktion der jeweiligen Produkte besitzen jedoch nur deren Hersteller, da es sich dabei um nicht frei verfügbares Firmenwissen handelt. Somit müssen bestimmte Teilgebiete in dieser Arbeit als „Black Box“ betrachtet und entsprechend behandelt werden. Darauf und auf angrenzende Veröffentlichungen wird an gegebener Stelle hingewiesen.

Die wissenschaftlichen Arbeiten angrenzender Disziplinen sind kaum übertragbar, was die weiterführende Einbettung in bestehende Literatur erschwert. Beispielsweise werden die lichttechnischen Simulationen in der Allgemeinbeleuchtung oder in der Architekturbeleuchtung mit anderen Berechnungsmethoden durchgeführt, die den Genauigkeitsanforderungen der Kfz-Entwicklung nicht genügen. Die im Kfz-Umfeld verwendete Methode des Raytracing wird unter anderem für die Simulation von abbildender Optik eingesetzt, wobei auch dort abweichende Anforderungen gestellt werden. Wesentliche Unterschiede bestehen beispielsweise in der zu modellierenden Lichtquelle, der Anzahl der zu berechnenden Strahlen oder den auszuwertenden Größen. Ähnliche Fragestellungen ergeben sich dort beispielsweise bei der Simulation von Streulicht innerhalb optischer Systeme. Die Lichtsimulation im Kfz-Umfeld hat aber eigene Anforderungen und somit spezielle Untersuchungsgegenstände, die in dieser Arbeit vertieft werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit entspricht dem Schema in Abbildung 1.1.

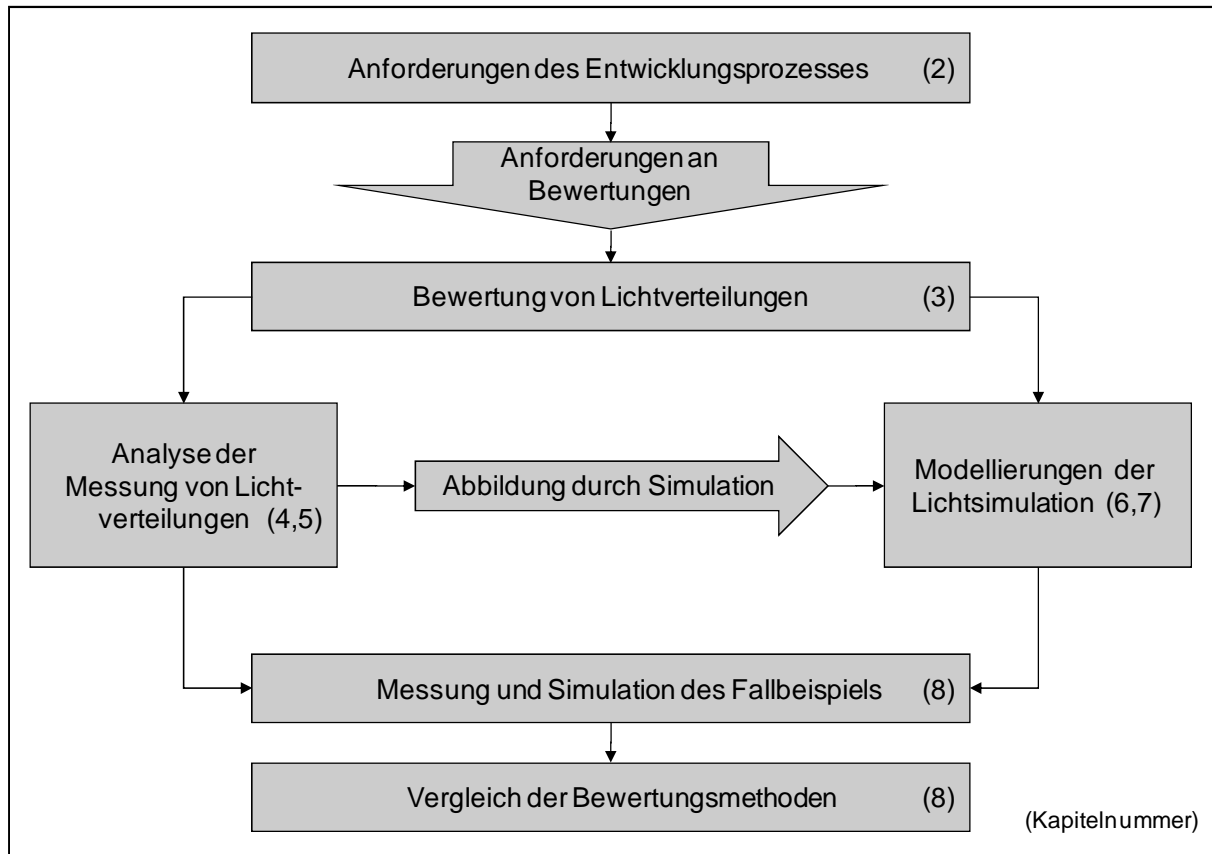


Abb. 1.1: Schema des Aufbaus der Arbeit

Die im Schema dargestellten Bestandteile haben folgende Inhalte:

- **Anforderungen des Entwicklungsprozesses (Kapitel 2)**

Durch die Analyse des Entwicklungsprozesses und dessen Umgebung sollen die Einordnung der Lichtsimulation sowie die Ableitung von Anforderungen an die simulationsbasierte Bewertung erfolgen. Um den Umfang der Arbeit einzugrenzen und das Vorgehen zu vereinfachen, wird bereits am Anfang der Untersuchungsgegenstand für das Fallbeispiel ausgewählt und beschrieben.

Zusätzlich werden die Bestandteile des Entwicklungsprozesses eingeführt und analysiert. Der Einfluss von Trends in der Scheinwerferentwicklung wird dargestellt und hinsichtlich der Lichtsimulation eingeordnet und bewertet. Damit wird auch die Bedeutung der Lichtsimulation für den Automobilhersteller verdeutlicht. Zwei Arten der Bewertung werden aus dem Entwicklungsprozess abgeleitet: die virtuelle Typprüfung und die wahrnehmungsbasierte Bewertung.

- **Bewertung von Lichtverteilungen (Kapitel 3)**

In diesem Kapitel werden die wahrnehmungsbasierten Bewertungen ausgewählt und deren Abbildung durch gemessene und simulierte Lichtverteilungen untersucht. Sind die zur Abbildung nötigen Berechnungsmethoden nicht implizit gegeben, werden bekannte Methoden eingeführt oder neue Methoden entwickelt. Diese Berechnungsmethoden werden jeweils hinsichtlich ihrer Abweichungen diskutiert. Abschließend können die durch den Entwicklungsprozess geforderten Bewertungen in der Lichtsimulation umgesetzt werden.

- **Analyse der Messung von Lichtverteilungen (Kapitel 4, 5)**

Zum Vergleich von gemessenen und simulierten lichttechnischen Größen ist eine Analyse ihrer Abweichungen und Unsicherheiten nötig. Im vierten und fünften Kapitel erfolgt somit die Untersuchung der Messmethode, die der photometrischen Typprüfung zugrunde liegt und damit die Anforderungen an eine virtuelle Typprüfung definiert. Die so ermittelten Werte und Unsicherheiten sind für die Lichtsimulation maßstabbildend. Auch in diesem Kapitel wird eine vollständige Übertragung der messtechnischen Methoden in die Lichtsimulation angestrebt. Noch fehlende Modelle werden entwickelt und evaluiert; dazu gehört auch die Ausrichtung der Hell-Dunkel-Grenze in der Simulation.

- **Modellierungen der Lichtsimulation (Kapitel 6, 7)**

Nachdem die messtechnische Grundlage analysiert ist, werden im sechsten und siebten Kapitel die Methoden zur Modellierung für die Lichtsimulation bereitgestellt. Die nötigen Lichtquellenmodelle und Materialmodelle werden im Allgemeinen für die Scheinwerfer und im Speziellen für den Untersuchungsgegenstand dargestellt und diskutiert. Für die lichttechnische Funktion, wie auch für die der Modellierung zugrunde liegende Messmethode, werden kritische Einflussfaktoren identifiziert, analysiert und gegebenenfalls modelliert. Es werden allgemeine Bewertungen der Modellierungsmethoden vorgenommen, um den Bezug zur umfassenden Einordnung der Lichtsimulation im Entwicklungsprozess zu gewährleisten.

- **Messung und Simulation des Fallbeispiels (Kapitel 8)**

Nachdem die nötigen Methoden und Modelle bereitgestellt sind, wird der zu untersuchende Scheinwerfer simuliert. Es werden entsprechend dem Vorgehen der Messung die Abweichungen und Unsicherheiten analysiert. Die bereitgestellten Bewertungsmethoden der wahrnehmungsbasierten Bewertung und der virtuellen Typprüfung werden angewendet und ein abschließender Vergleich mit den gemessenen Werten wird getroffen. Anhand der Ergebnisse wird die Umsetzbarkeit und Prozesstauglichkeit der Lichtsimulation für die Bewertung von Scheinwerfern diskutiert.

2 Anforderungen des Entwicklungsprozesses

2.1 Eingrenzung des Untersuchungsgegenstandes

Die in dieser Arbeit untersuchte Methode der Lichtsimulation kann grundsätzlich anhand aller lichttechnischer Einrichtungen am Kraftfahrzeug evaluiert werden. Eine Anwendung im Entwicklungsprozess wird aber erst durch ein hinreichendes Aufwand-Nutzen-Verhältnis praktikabel, welches durch Kriterien wie die Design-Relevanz und die Anzahl an Entwicklungsiterationen, die Komplexität der lichttechnischen Funktion, den Umfang der gesetzlichen Anforderungen oder durch den Nutzen für die Verkehrsteilnehmer bestimmt wird. Zur Auswahl des Untersuchungsgegenstandes dieser Arbeit wird anschließend die lichttechnisch anspruchsvollste Funktion ausgewählt, die zudem die höchsten Anforderungen an die Modellierung der Lichtsimulation stellt. Dadurch soll die Gültigkeit der erarbeiteten Methoden und der Evaluation auch für die anderen Funktionen sichergestellt werden.

Die Kraftfahrzeugbeleuchtung lässt sich allgemein in Interieur- und Exterieurbeleuchtung einteilen. Zur Interieurbeleuchtung gehören beispielsweise Instrumentenbeleuchtung, Innenleuchten oder ambiente Beleuchtungen. Die Interieurbeleuchtung ist keinen gesetzlichen photometrischen Anforderungen unterworfen, darf aber nach StVZO, § 49a nicht durch ihre Wirkung nach außen die lichttechnische Funktion der Exterieurbeleuchtung beeinträchtigen. Die Exterieurbeleuchtung beziehungsweise deren Bauelemente und lichttechnische Funktionen unterliegen gesetzlichen, photometrisch basierten Zulassungsvorschriften und lassen sich wie in Abbildung 2.1 einteilen.

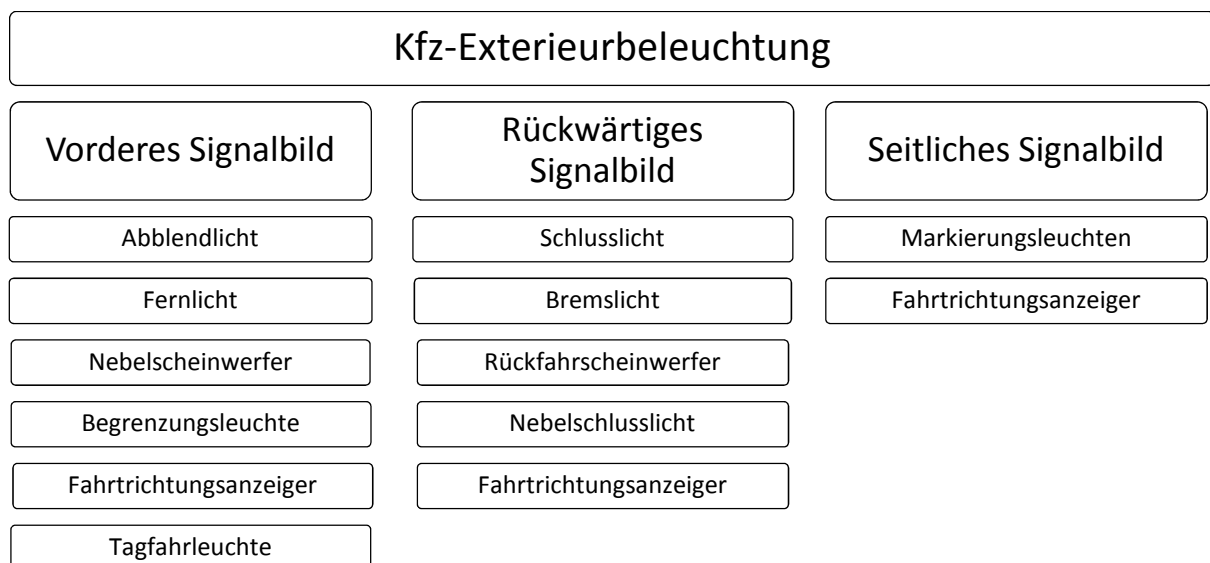


Abb. 2.1: Einteilung der Kfz-Exterieurbeleuchtung

Funktional ist eine Einteilung in Scheinwerfer und Leuchten sinnvoll. Scheinwerfer haben eine beleuchtende Funktion, die der Wahrnehmung von Objekten im Verkehrsraum dient. Die Funktion der Leuchten ist deren Wahrnehmung als solche, beziehungsweise des zugehörigen Fahrzeugs. Da am Kraftfahrzeug auch Scheinwerfer eine Leuchtenfunktion aufweisen, gehören sie zum Signalbild. Die lichttechnisch anspruchsvollste Funktion ist dabei die Abblendlichtfunktion im Scheinwerfer. Die Komplexität beruht auf den widersprüchlichen Anforderungen, die bestmögliche Sicht bei minimaler Blendung der anderen Verkehrsteilnehmer bereitzustellen. Dies führt zu einer weitgehend vordefinierten Lichtverteilung, die vielfältigen qualitativen Kriterien genügen muss und die gesetzlich quantitativ reguliert ist, wie in Kapitel 3 gezeigt wird. Ein wesentliches Merkmal der Abblendlichtverteilung ist die Hell-Dunkel-Grenze (HDG), die hohe Anforderungen an das lichttechnische System stellt und in Kapitel 5 ausführlich behandelt wird.

Die Auswahl des lichttechnischen Funktionsprinzips wird durch ästhetische und wirtschaftliche Gründe, aber auch durch die Art und Leistung der Lichtquelle, die gewünschte Ausleuchtung des Verkehrsraums sowie durch konstruktive Anforderungen bestimmt. Neben untergeordneten Sonderformen sind zwei Grundprinzipien am Kfz-Markt relevant: das Projektionssystem und das sogenannte Freiform-Reflexionssystem. Das Projektionssystem erzeugt die Hell-Dunkel-Grenze mittels der Abbildung einer Blende in einer Zwischenbildebene, wie in Abbildung 2.2 links dargestellt. Durch die Blende wird die Form der Hell-Dunkel-Grenze definiert. Die Zwischenbildebene wird durch das polyfokale Ellipsoid-System ausgeleuchtet, was zusammen mit der asphärischen Linse die Lichtverteilung auf der Straße definiert. Derartige Systeme werden typischerweise als Modul entwickelt; daher sind Projektionssysteme im nachfolgend beschriebenen, fahrzeuggebundenen Entwicklungsprozess wenig relevant.

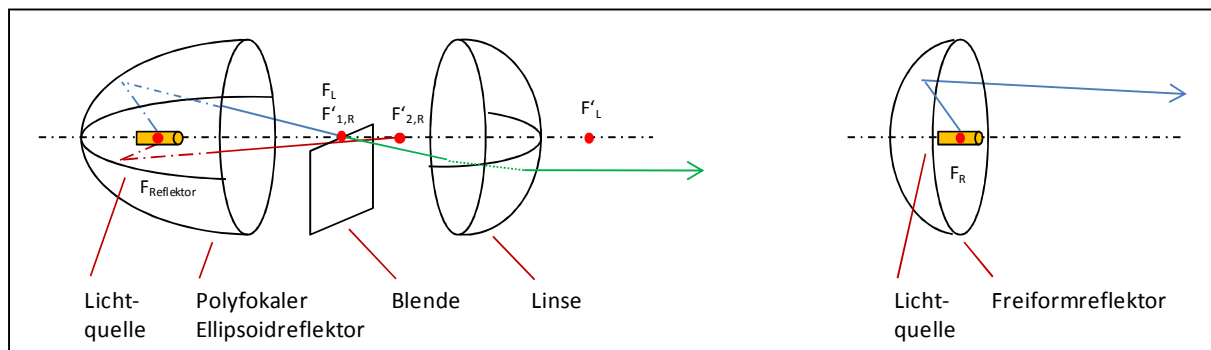


Abb. 2.2: Optisches Prinzip eines Projektionssystems (links) und eines Reflexionssystems (rechts)

Das Freiform-Reflexionssystem erzeugt die Lichtverteilung und die Hell-Dunkel-Grenze mittels einer direkten Abbildung der Lichtquelle, wie in Abbildung 2.2 rechts und detailliert in Abbildung 6.1 dargestellt. Die Größe und Gestaltung der Reflektoren unterliegt ästhetischen Anforderungen und ändert sich im Gegensatz zum Projektionsmodul typischerweise mit jedem Fahrzeugmodell beziehungsweise mit jeder Scheinwerferentwicklung. Diese Systeme haben aufgrund ihrer geringen Kosten in Verbindung mit Glühlampen die größte Marktdurchdringung.

Die für ein Abblendlicht relevanten Lichtquellen können in Glühlampen, Gasentladungslampen und LED unterschieden werden. Die LED haben aufgrund ihrer typischerweise hohen Lebensdauer, ihrer geringen Energieaufnahme und ihres schnellen Schaltverhaltens eine zukunftsweisende Bedeutung. Ihre geringe Größe und die Möglichkeit zur Vereinzelung in einer lichttechnischen Funktion erlauben eine hohe gestalterische Flexibilität. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit ist ihre Marktdurchdringung in Scheinwerferfunktionen aber noch sehr gering.

Gasentladungslampen sind leistungsstarke Lichtquellen, welche in den zurzeit besten Abblendscheinwerfer-Systemen am Markt verbaut werden (vgl. [Aut08], [Ada09]). Gasentladungslampen, auch Xenonlampen genannt, sind fast ausschließlich in den als Modul entwickelten Projektionssystemen verbaut. Glühlampen hingegen sind in beiden Grundsystemen zu finden und im Falle der Verwendung im Reflexionsystem Gegenstand der lichttechnischen Auslegung im fahrzeuggebundenen Entwicklungsprozess. Die Kfz-Glühlampen überwiegen an den Märkten und im Verkehrsraum deutlich. Sie werden vorrangig als wechselbare Lichtquellen eingesetzt und sind deswegen gesetzlich reguliert, beispielsweise durch die ECE R37 [Ece05]. Für Abblendlichtfunktionen werden am europäischen Markt hauptsächlich die bifunktionale Halogen-Glühlampe H4 sowie die monofunktionalen Typen H1 und H7 eingesetzt. Die Halogen-Glühlampe H7 ist aufgrund ihrer hohen Genauigkeit maßstababbildend. Sie hat eine hohe Relevanz durch ihre breite Marktdurchdringung und stellt die im Vergleich beste lichttechnische Funktion für Halogen-Abblendlichtscheinwerfer zu Verfügung (vgl. [Lor09]). Eine allgemeine Bewertung der Entwicklung der Kfz-Lichtquellen kann in der ATZ 11/2007 [Atz07] vertieft werden. Die Untersuchung der Lichtquellen in dieser Arbeit erfolgt in Kapitel 6.

Die Grundlage für weitere Untersuchungen bietet ein Fallbeispiel: ein Freiform-Reflexionsscheinwerfer mit H7-Lampe, der im Volkswagen Modell Polo Typ A04 eingesetzt wird (Teile-Nr.: 6Q0.941.005). Der Scheinwerfer wird in Abbildung 2.3 mit seinen Komponenten dargestellt.

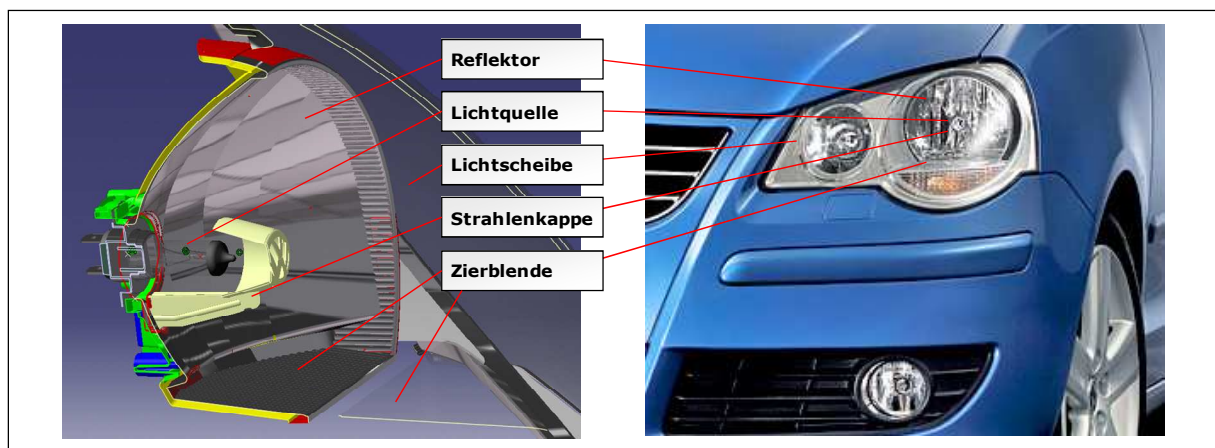


Abb. 2.3: Abblendscheinwerfer des VW Polo A04, Schnitt- und Gesamtabbildung

Er beinhaltet als lichttechnisch relevante Elemente neben der Lichtquelle eine Strahlenkappe, die Streulicht vermindert, indem sie die direkte Wendeleinsicht abschattet, sowie hochglänzende, genarbte Zierblenden, die gemeinhin das Streulicht oberhalb der Hell-Dunkel-

Grenze beeinflussen. Die Wirkung und Bewertung von Streulicht wird in Abschnitt 3.4 vertieft. Die lichttechnischen Eigenschaften der Narbungen werden in Abschnitt 7.3 untersucht. Die Qualität der Hell-Dunkel-Grenze des Untersuchungsgegenstandes, die systembedingt nicht die Schärfe und Linearität eines Projektionssystems erreicht und damit einen anspruchsvollen Fall darstellt, wird in Kapitel 5 behandelt, während die lichttechnische Funktion in ihrer Gesamtheit in Kapitel 8 betrachtet wird. Bei der Behandlung von Bauelementen, Materialien und Oberflächen in dieser Arbeit sollen nur die lichttechnisch relevanten Elemente berücksichtigt werden. Das sind solche Bestandteile, die sich im Lichtweg befinden und damit eine Wirkung auf die lichttechnische Funktion haben.

2.2 Analyse des Prozesses

Nach der obenstehenden Eingrenzung des Untersuchungsgegenstandes soll der Entwicklungsprozess von Scheinwerfern analysiert werden, um Anforderungen an die Lichtsimulation abzuleiten und deren Einordnung als Prozessschritt vorzunehmen.

Kfz-Scheinwerfer sind Geräte, die vielfältige Funktionen erfüllen müssen und zu deren Entwicklung verschiedene Ingenieurdisziplinen nötig sind. Einige der Funktionen werden in Abbildung 2.4 aufgezeigt und in den Veröffentlichungen [Bad07], [Bad07a], [Ben07], [Nef07], [Kie08], [Kie08a], [Kie08b], [Tha09], [Hof08] behandelt.

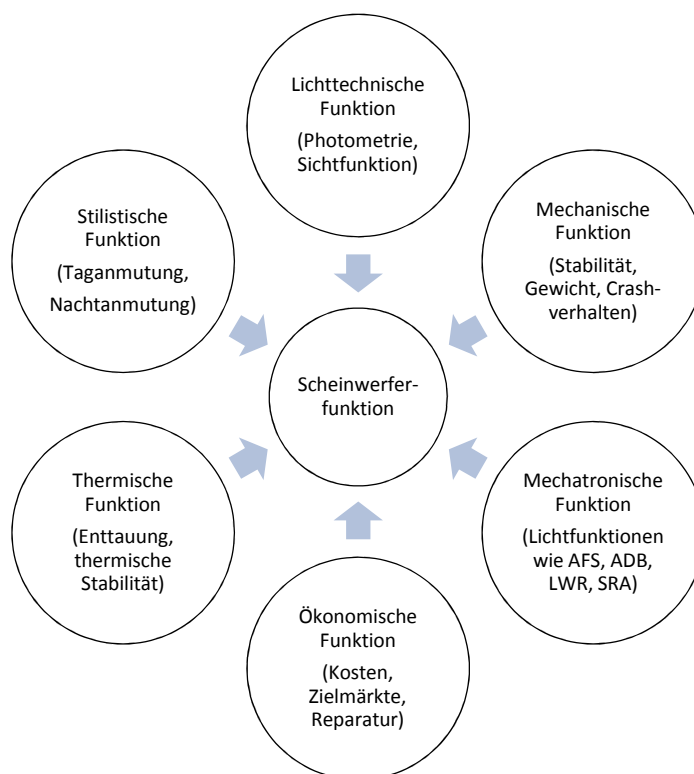


Abb. 2.4: Anforderungen und Teilfunktionen des Scheinwerfers

Eine Besonderheit im Kfz-Umfeld liegt in den hohen Anforderungen an das Design, also in der ästhetischen Funktion, was zu einer relativ großen Anzahl von Änderungs- und Entwicklungsschleifen führt. Eine weitere Besonderheit ist die Aufgabenteilung und

Verantwortungstrennung zwischen dem Automobilhersteller und dem Zulieferer des Scheinwerfers. Diese Aufteilung bedingt die Zugehörigkeit der nachfolgend dargelegten Entwicklungsschritte der Funktionen und Bauteile. Um die Entwicklung in einem zeitlich definierten Gesamtprozess der Fahrzeugentwicklung zu ermöglichen, ist ein Scheinwerferentwicklungsprozess mit Entwicklungsphasen und Reifegraden sowie Übergabeterminen und Freigaben nötig. Abbildung 2.5 zeigt die Phasen des Designentwurfs, der vollständigen CAD-Beschreibung und des Serienscheinwerfers exemplarisch.

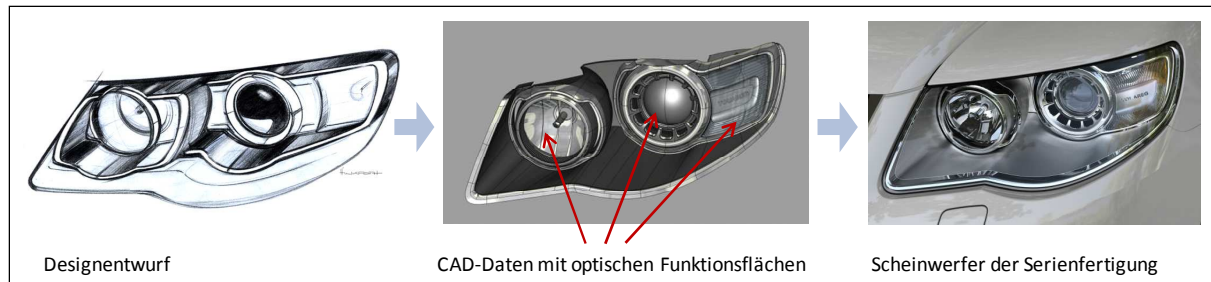


Abb. 2.5: *Entwicklungsphasen der Scheinwerferentwicklung*

Folgende Entwicklungsschritte lassen sich generell einteilen:

1. Entwurf und Aufbau der Designflächen

Im ersten Schritt wird die Geometrie des Scheinwerfers vom Designer nach ästhetischen Anforderungen vorgegeben. Dies erfolgt anhand von CAD-Flächen in grober Qualität. Das Design orientiert sich wiederum an den durch die Exterieurgestaltung gegebenen Umrisslinien des Gesamtfahrzeugs, typischerweise eines Tonmodells. Das Scheinwerferdesign beinhaltet Gestaltungselemente sowie Funktionsanordnungen. Die lichttechnischen Bauelemente sind mit der ihnen zugrunde liegenden Technik durch grobe Bauraumanforderungen berücksichtigt. Die Verantwortung für diesen Prozessschritt liegt beim Automobilhersteller.

Die Anforderung besteht anschließend darin, die Lichttechnik in den Bauraum und die Designflächen zu integrieren. Diese Vorgehensweise unterscheidet sich vom klassischen konstruktiven Vorgehen, bei dem von innen nach außen konstruiert wird (vgl. [The07]).

2. Aufbau und Integration der optischen Funktionsflächen mittels CAL

Es werden lichttechnische Funktionsflächen ausgelegt, die in den vorgegebenen Bauraum passen. Die Auslegung erfolgt mittels CAL. In dieser Arbeit wird der Begriff wie folgt verwendet:

CAL ist die computergestützte Auslegung lichttechnischer Systeme. Es beinhaltet CAD-Funktionen zur Erstellung der optischen Funktionsflächen sowie Funktionen zur Berechnung lichttechnischer Größen und Werte. Diese Berechnung der Lichtausbreitung und Lichtverteilung, sowie die Ableitung der lichttechnischen Größen in einem optischen System soll nachfolgend als Lichtsimulation bezeichnet werden. Die Berechnungsmethoden basieren überwiegend auf Raytracing, das als Methode in Abschnitt 8.2 behandelt wird. Die Zielwerte der Auslegung sind gesetzliche und betriebsinterne lichttechnische Qualitätsvorgaben, wie in Kapitel 3 beschrieben wird.

Der Ablauf einer CAL-Scheinwerferentwicklung kann in folgende Schritte unterteilt werden:

1. Auswahl eines lichttechnischen Grundsystems (z. B. Freiformreflektor) und einer Lichtquelle (z. B. H7-Lampe) sowie der lichttechnischen Zielwerte (z.B. Vorgaben der Regelung ECE R112)
2. Anpassung des Systems an den vorgegebenen Bauraum und Berechnung der lichttechnischen Werte. Vergleich mit den Zielwerten.
3. Optimierung der lichttechnischen Funktionsflächen bis
 - a. die Zielwerte erreicht werden
 - b. die Zielwerte mit dem gegebenen Bauraum nicht erreichbar sind und dieser geändert werden muss → zurück zu Schritt 2

Die Genauigkeit der CAL-Berechnung hängt dabei von der Entwicklungsreife und Detaillierung des Datenstandes, von den Berechnungsmethoden, von den lichttechnischen Modellierungen der Lichtquellen und Materialien sowie der photometrischen Empfänger ab. Diese Modellierungen sind das Wissen von Zulieferern, Dienstleistungsfirmen oder Softwareherstellern. Die Beschreibung der CAL-Methode und der Nachweis für ihren erfolgreichen Einsatz sind beispielsweise in den Quellen [Web07], [Braom], [Mon95] veröffentlicht. Die Verantwortung des CAL-Prozessschrittes liegt üblicherweise beim Zulieferer.

Ein typisches Vorgehen im Entwicklungsprozess ist die Abstufung der Modellierungsdetaillierung und damit des zugehörigen Aufwandes einerseits und der Genauigkeit andererseits. Der Ablauf harmoniert mit den Entwicklungsphasen des Scheinwerfers und der entsprechend abgestuften Reife des CAD-Datenstandes. Eine hohe Modellierungsdetaillierung empfiehlt sich dadurch erst in späten Entwicklungsphasen. Dieser Ansatz ist bei Wiersdorff [Wie00] aus der Sicht eines Scheinwerferherstellers dargestellt. Dabei wird die Detaillierung der Daten- und der Modellierungstiefe für Materialien und Lichtquellen je nach Verfügbarkeit und Zeitpunkt im Entwicklungsprozess gewählt. Die größte Detaillierung wird nach Wiersdorff Basic Mode genannt und ist beispielsweise durch die Verwendung einfacher Zylinderlichtquellen (vgl. Abschnitt 6.4) und die Approximation der Lichtscheibe durch konstante Verlustfaktoren (vgl. Abschnitt 7.2) gekennzeichnet. Der zweite, sogenannte Intermediate Mode beinhaltet die wichtigsten lichttechnischen Komponenten und Bauteile in der Simulationsumgebung. Beim finalen Extra Mode kommen nach Wiersdorff alle Komponenten sowie vollständige Lampenmodelle zum Einsatz. Wiersdorff zeigt einen qualitativen Einfluss auf die Lichtverteilung eines Abblendscheinwerfers durch die Modellierungen; eine Analyse der Abweichungen und Unsicherheiten wie in Kapitel 5 oder 8 erfolgt bei Wiersdorff nicht. Die Methoden der stufenweisen Modellierungstiefe werden hier in den Kapiteln 6 und 7 beschrieben.

3. Konstruktion

Als zur Konstruktion zugehörig sollen jene Entwicklungsschritte zusammengefasst werden, die zum Bereitstellen der für den Scheinwerfer weiterhin nötigen Funktionen und

Bauelemente erforderlich sind. Exemplarisch sind die in Abbildung 2.4 genannten Funktionen und Bauelemente wie Gehäuse mit Halterungen, Einstellelemente, Steuergeräte oder Belüftungen genannt. Deren Detaillierung erfolgt mehrheitlich nach der Phase der Abstimmung zwischen Design und Lichttechnik und ist nicht Inhalt dieser Arbeit. Dabei gilt überwiegend die Arbeitsteilung zwischen Zulieferer und Automobilhersteller. Allgemein werden die technischen Anforderungen, Randbedingungen, Ansteuerungen oder Anbindungen vom Automobilhersteller vorgegeben, während die Konstruktion innerer Bauelemente meist beim Zulieferer erfolgt. Die Verantwortung für diesen Prozessschritt wird aufgeteilt.

Den Abschluss der virtuellen Phase bildet ein CAD-Datenstand, auf dessen Basis Prototypen gebaut werden. Dabei kann es auch mehrere dieser Phasen beziehungsweise Iterationen geben. Vor der Datenfreigabe für eine Fertigung wird gegebenenfalls eine weitere Lichtsimulation durchgeführt.

4. Erprobung

Die Absicherungen der Scheinwerferfunktionen, die nicht virtuell vollzogen werden können, müssen an einem realen Bauteil vorgenommen werden. Diese Prototypen, auch Lichtmuster genannt, werden mit anderen Werkzeugen und Herstellungsverfahren gebaut als die späteren Serienprodukte. Das führt zu Abweichungen der Eigenschaften. Ein Prototyp verursacht aufgrund der nötigen Werkzeugkonstruktion und -fertigung hohe Kosten. An diesen Bauteilen werden unter anderen folgende Eigenschaften geprüft:

- die Anmutung und das Design mittels visueller Bewertung
- die Lichtverteilung beziehungsweise die Ausleuchtung der Straße und des Verkehrsraums mittels visueller Bewertung
- die lichttechnischen Werte für einen Abgleich mit den Anforderungen der Typprüfung und des Automobilherstellers mittels Photometrie
- die mechanische Qualität mittels Belastungstests und Messungen
- die thermische Qualität mittels Belastungstests und Messungen

Somit findet der überwiegende und maßgebliche Teil der Bewertung der lichttechnischen Funktion in dieser Phase statt. Der Prototyp wird zumeist vom Zulieferer gebaut und vom Automobilhersteller getestet.

5. Bemusterung und Typprüfung

Am Abschluss der Erprobungsphase mit Prototypen und Beginn der Serienfertigung mit Serienwerkzeugen steht die Baumusterabnahme, auch Bemusterung genannt, sowie die Typprüfung. Dabei ist die Baumusterabnahme eine Aufgabe des Automobilherstellers, während die Typprüfung durch den Zulieferer in Verbindung mit einer gesetzlich akkreditierten Prüfstelle erfolgt. Im Unterschied dazu ist die Typprüfung des Gesamtfahrzeugs und der angebauten lichttechnischen Einrichtungen Aufgabe des Automobilherstellers, z. B. nach ECE R48.

Die Typprüfung erfolgt an einem mit Serienwerkzeugen hergestellten Scheinwerfer. Ein Verfehlen der Zulassung bedeutet sehr hohe Änderungskosten am Serienwerkzeug sowie stark eingeschränkte Optimierungsmöglichkeiten. Deswegen wird eine hinreichend genaue Absicherung in der virtuellen Phase und in der Prototypenphase verlangt.

6. Serienfertigung

In der Serienfertigung wird das lichttechnische Gerät vom Zulieferer gebaut und vom Automobilhersteller am Fahrzeug montiert. Die Einstellung der Hell-Dunkel-Grenze des Scheinwerfers wird vom Automobilhersteller vorgenommen. Die hohe Bedeutung der Einstellung für die lichttechnische Leistungsfähigkeit wird vom Autor in [Kie07], [Kie09] sowie in Kapitel 5 behandelt.

Graphisch stellt sich der vereinfachte Entwicklungsprozess für Scheinwerfer und Leuchten wie in Abbildung 2.6 dar.

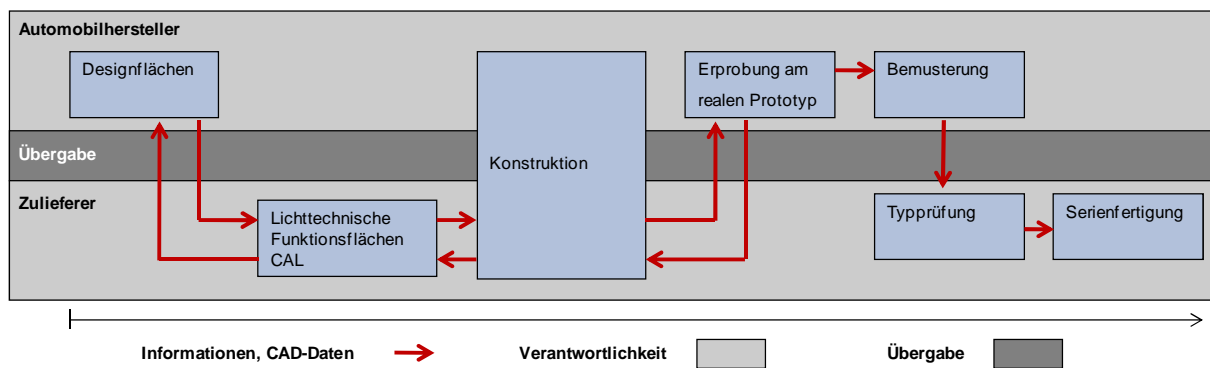


Abb. 2.6: Vereinfachter Entwicklungsprozess für Scheinwerfer und Leuchten

Sowohl innerhalb der dargestellten Phasen wie auch übergreifend laufen die Prozesse gegebenenfalls nicht sequentiell sondern iterativ ab, bis ein bestimmtes Qualitätsmaß erreicht ist.

Wie durch Abbildung 2.6 verdeutlicht, lassen sich zwei übergreifende Eigenschaften des Entwicklungsprozesses und Einflussfaktoren auf die lichttechnische Funktion ableiten:

1. Die Teilung der Bearbeitung und Verantwortung in der frühen Phase der Designfindung sowie die Übergabe von Daten und Informationen

In der frühen Phase erfolgen durch die hohe Gewichtung des Designs besonders viele Änderungen und Iterationen. Aufgrund der bestehenden Aufgabenteilung müssen Informationen zur lichttechnischen Funktion zwischen Automobilhersteller und Zulieferer ausgetauscht werden; oftmals geschieht dies nur in Form von Präsentationen oder beschreibenden Texten. Das betrifft beispielsweise die Funktion der einzelnen lichttechnischen Flächen oder den Einfluss der Designelemente sowie der Oberflächen- und Materialauswahl auf die lichttechnische Funktion. Der Einfluss von eventuellen Änderungen auf die Qualität der Lichtverteilung und die Wahrnehmung des späteren Scheinwerfers muss ebenfalls mit den genannten Mitteln kommuniziert werden.

Nachteilig ist, dass solche Informationsübergaben immer zeitaufwändig und verlustbehaftet sind. Das verursacht Kosten und mindert die Qualität des Produktes. Ein Vorteil liegt jedoch darin, dass der Zulieferer als letztendlich Typprüfverantwortlicher die lichttechnische Auslegung betreibt. Der Automobilhersteller muss daher kein Wissen zur Fertigung lichttechnischer Bauelemente aufbauen.

2. Überprüfung der lichttechnischen Anforderungen des Automobilherstellers anhand von Prototypen des Zulieferers

Änderungen des Scheinwerfers in einer späten Entwicklungsphase, beispielsweise aufgrund nicht erfüllter Anforderungen, verursachen hohe Kosten für die Optimierung und erneute Fertigung des Lichtmusters, und die Flexibilität bei Änderungen ist stärker eingeschränkt als in frühen Phasen. Änderungen werden oftmals nötig, da die Anforderungen durch den Automobilhersteller gegeben werden, aber die lichttechnischen Flächen und die Funktion bis zu dem Zeitpunkt durch den Zulieferer weitgehend allein definiert werden. Zudem weichen Prototypen in ihrer lichttechnischen Funktion unter Umständen deutlich vom endgültigen Serienbauteil ab. Früh erfolgende virtuelle Absicherungen verringern die genannten Probleme und steigern die Qualität der Scheinwerfer. Dazu ist der Transfer der lichttechnischen Anforderungen aus der Erprobungsphase in die frühe Phase der Auslegung und des CAL nötig.

Zusammengefasst bieten diese Eigenschaften und Einflussfaktoren Ansatzpunkte, um mittels CAL und Lichtsimulation beim Automobilhersteller eine Prozessoptimierung und Qualitätssteigerung zu erreichen und die Verluste bei der Informationsübergabe zu verringern. Weiterhin können durch den Einsatz von Simulationen die sonst spät erfolgenden, prototypenbasierten Entscheidungen vorgezogen und deren Kosten verringert werden. Dies wird in Abschnitt 2.4 weiter ausgeführt.

2.3. Einflüsse und Trends

Ausgehend von den Scheinwerfern und Leuchten der 90er Jahre haben Entwicklungen und neue Technologien in verschiedenen Disziplinen zu schnellen Veränderungen der Produkte und Entwicklungsprozesse geführt. Diese Einflüsse und Trends, die eine Integration des CAL und damit der Lichtsimulation in die Entwicklungsumgebung begünstigen, sollen nachfolgend dargestellt werden. Die Anforderungen an die Lichtsimulation können damit detailliert werden.

Neue Lichtquellen und optische Systeme – Designtrends

Im Scheinwerferbereich wird die Gasentladungslampe seit 1991 neben der klassischen Glühlampe verwendet (erstmalig im BMW 7er-Reihe). Meilensteine der Halogen-Glühlampen waren bis dahin die H1 (seit 1962), die H4 (seit 1972) und die H7 (seit 1988 in Anwendung, seit 1993 in der ECE-Regelung). Zudem wird zunehmend die LED in der Exterieurbeleuchtung angewendet. So wurde erstmalig 1997 die Schlusslichtfunktion in einer Heckleuchte mit LED realisiert (im Maserati 3200 GT). In Scheinwerfern wird die LED in der

Tagfahrleuchte seit 2004 (im Audi A8 W12) sowie für das Abblendlicht seit 2007 (im Lexus LS600h) eingesetzt. Dabei zeigte sich, dass neue Lichtquellen zu neuen lichttechnischen Systemen und Gestaltungen und damit zu erweiterten Entwicklungsumfängen führen. Die Einführung der klaren Lichtscheibe für Scheinwerfer und Leuchten bedeutete erhöhte Anforderungen an die Gestaltung und die Oberflächenqualität der inneren Bauelemente. Als Technologie wurde die klare Lichtscheibe bereits 1990 eingeführt (im Honda Accord und im Dodge Intrepid). Mit dem VW Golf IV wurde 1997 die Gestaltungsrichtlinie begründet, den vollständigen Scheinwerfer offen zu zeigen (vgl. Abbildung 2.7 rechts oben). Damit wirken Reflektoren ähnlich wie die „Pupillen“ eines „Scheinwerfer-Auges“. Die Anwendung von Freiformreflektoren ist für klare Außenlichtscheiben technologisch notwendig und seit 1988 bekannt (vgl. Citroen XM von 1989, [Bra96]).

In Abbildung 2.7 ist links oben ein Scheinwerfer mit Streuscheibe und H4-Lampe dargestellt. Rechts oben ist der Scheinwerfer des VW Golf IV mit klarer Lichtscheibe, facettiertem Freiform-Reflektor mit H7-Lampe für die Abblendlichtfunktion sowie separatem Fernlicht, Nebelscheinwerfer und Fahrtrichtungsanzeiger abgebildet. Links unten wird der Scheinwerfer des VW Touareg II mit bifunktionalem Projektionsmodul für Abblendlicht und Fernlicht gezeigt. Dieser Scheinwerfer verfügt erstmals über ein blendfreies Fernlicht (vgl. unten, [Atz10]). Weiterhin sind ein Tagfahrlicht als LED-Reihe, ein separates Positionslicht und der Fahrtrichtungsanzeiger zu sehen. Rechts unten ist der Voll-LED-Scheinwerfer des Audi A8 von 2010 abgebildet. Das Abblendlicht ist dabei ebenfalls aus einer Reihe von Optikelementen mit LED-Lichtquellen ausgeführt.



Abb. 2.7: Scheinwerfertechnologien und Gestaltungen

Heckleuchten werden ebenfalls sichtlich aufwändiger gestaltet und enthalten tendenziell mehr im Lichtweg befindliche Bauelemente. Die Lichtverteilung wird oftmals, ähnlich wie bei den Scheinwerfern, durch den Reflektor statt durch die Lichtscheibe bestimmt. Zudem wird von den Heckleuchten eine differenzierte Signatur der Nachterscheinung gefordert, die eine Wiedererkennung der Marke bei Nacht bewirken soll. Entsprechend werden oftmals Tagfahrleuchten zur Darstellung einer Signatur bei Tag verwendet.

In der Abbildung 2.8 links wird anhand des VW Golf IV eine Leuchte mit Glühlampen und Streulichtscheiben dargestellt. Rechts oben wird anhand des VW Golf VI eine Leuchte mit Glühlampen und klaren Lichtscheiben gezeigt. Diese Leuchte ist die Basisleuchte des Fahrzeugs. Optional kann eine Leuchte mit LED-Lichtquellen und ausgeprägter Signatur der leuchtenden Fläche verwendet werden, wie rechts unten dargestellt. Dies entspricht einem typischen Vorgehen zur Individualisierung der Fahrzeugmodelle für den Kunden durch Bereitstellung von Derivaten (vgl. [Hof08], [Dud05]).



Abb. 2.8: *Technologien der Leuchten und Gestaltungen*

Neue Materialien können zu neuen Gestaltungen führen. Beispielsweise ermöglichen temperaturfestere Kunststoffe engere Bauräume und damit kleiner bemessene Lichtfunktionen. Seit klare Kunststofflichtscheiben die nötige Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse und Alterung erreicht haben, können sie auch zur Gestaltung größerer Scheinwerfer eingesetzt werden.

Die lichttechnischen Eigenschaften der dargestellten Systeme unterscheiden sich unter anderem hinsichtlich ausgehender Leuchtdichte, Lichtverteilung, spektralem Verhalten oder Stabilität. Somit erhöht sich der Aufwand der Modellierung für eine Lichtsimulation. Die Anzahl der zu modellierenden und abzusichernden Systeme wird durch die höhere Anzahl der Modelle und Derivate zusätzlich erhöht. Um die Rentabilität zu sichern, müssen die komplexeren Systeme zudem unter starkem Kostendruck entwickelt und gefertigt werden (vgl. [Hof08], [Dud05]).

Neue lichttechnische Funktionen

Neue lichttechnische Funktionen ermöglichen eine Verbesserung der Sicherheit, des Komforts und der Leistung der Kfz-Exterieurbeleuchtung. Eine bereits seit 1977 bekannte Leuchtenfunktionen im Scheinwerfer ist die Tagfahrleuchte. Mit der Nutzung als

Gestaltungsmerkmal und der verpflichtenden Anwendung im ECE-Zulassungsbereich ab 2011 [Ece10] ist ihr Einsatz in den 2000er Jahren stark gestiegen.

Neuere Abblendlichtfunktionen stellt beispielsweise das AFS (Adaptive Front-Lighting System) gemäß ECE R123 (von 2007, [Ece09a]) zur Verfügung. Das AFS beinhaltet Funktionen wie Autobahnlicht, Stadtlicht oder Schlechtwetterlicht, die auf der situationsbedingten Anpassung oder Verschiebung der Abblendlichtverteilung basieren. Das AFS wurde in vollständiger Form erstmals 2006 am Markt platziert (im Mercedes E-Klasse). Schwenkende Scheinwerfer sind, nach verschiedenen mechanischen Vorläufern (z.B. Citroen DS, 1967), bereits seit 2003 erhältlich (im BMW 3er-Reihe und im Mercedes E-Klasse). Eine weitere Funktion, die auf der Anpassung der seit 1957 gemäß ECE definierten asymmetrischen Hell-Dunkel-Grenze basiert, ist die adaptive Hell-Dunkel-Grenze seit 2009 (im Mercedes E-Klasse). Auch hier wird der Widerspruch zwischen Sichtweite und Entblendung durch eine dynamische Anpassung der Hell-Dunkel-Grenze an die Verkehrssituation verbessert. Eine noch weiter gehende Umsetzung dieses Konzepts zeigt das blendfreie Fernlicht (seit 2010), das die Maskierung der zu entblendenden Verkehrsteilnehmer in der dauerhaft eingeschalteten Fernlichtverteilung erlaubt (im VW Touareg, vgl. [Atz10]). Eine Zwischenform ist die Funktion des Fernlichtassistenten (im BMW 7er-Reihe, 2007), die eine automatisierte An- und Abschaltung des Fernlichtes beinhaltet. Weiterhin sind seit 2003 statische Abbiegelichter bekannt (im Audi A8, Porsche Cayenne und Lexus RX 300) und seit 2005 nach ECE R119 [Ece09] reguliert. Auch diese neuen lichttechnischen Funktionen vermehren die Anzahl der mittels Lichtsimulation zu modellierenden und abzusichernden Systeme.

Lichtsimulation und neue Photometrie

Die verstärkte Entwicklung der für CAL im Automobilbau nötigen Werkzeuge, Methoden sowie der Hard- und Software begünstigt ebenfalls Veränderungen in der Struktur des Entwicklungsprozesses. Bis in die 90er Jahre waren die Methoden des CAL im Kfz-Umfeld exklusiv für Zulieferer verfügbar oder für sie entwickelt worden (vgl. [Web07]). Im letzten Jahrzehnt wurden kommerzielle, nicht sequentielle Raytracing Programme vermehrt für die Anforderungen der Kfz-Entwicklung optimiert (vgl. [Breom], [Optfr], [Braom], [Oraom]). Das Softwareprodukt SPEOS der Firma Optis wurde in die Kfz-typische CAD-Umgebung CATIA integriert (vgl. [Dasom], [Optfr]). Kfz-spezifische CAL-Programme, die Raytracing und Funktionen zur Optikauslegung umfassen, wurden in den Markt eingeführt. Dazu zählen beispielsweise das Programm LucidShape der Brandenburg GmbH oder ReflectorCAD der Firma Breault (vgl. [Braom], [Breom]). Dies ist im Kontext der kontinuierlich stark ansteigenden Rechenleistung zu betrachten, die eine wesentliche Voraussetzung für CAL im Automobilbereich ist.

Die Messmethoden und -einrichtungen, die zur Modellierung und Validierung der Lichtsimulation benötigt werden, sind maßgeblich weiterentwickelt worden. So wurden kommerzielle Messgeräte zur Nahfeld-Goniophotometrie und damit zur Messung und Modellierung von Lichtquellen verfügbar (vgl. [Rie84], [Rie91], [Ash93], [Ash95], [Rei03], [Rei03b]). Zudem wurden kommerzielle Messgeräte zur Erfassung der Streulichteigenschaften von Materialien erhältlich (vgl. [Ligfr], [Radom]).

Insgesamt ergibt sich so eine einfachere Verfügbarkeit der Mittel und Werkzeuge, um Lichtsimulation aufzubauen und durchzuführen. Dies begünstigt eine Verschiebung der Entwicklungsdienstleistungen am Markt. Der Scheinwerferhersteller ist nicht mehr der alleinige Zulieferer von Auslegungen und Absicherungen optischer Systeme. Ingenieursdienstleister verfügen über die Möglichkeiten, Scheinwerfer und Leuchten in der Vorentwicklung bis zum Prototypen zu begleiten, wie in den Quellen [Devde], [Berde], [Mar09], [Opsde], [Koh05] nachvollzogen werden kann. Ebenso bauen auch Hersteller von Lichtquellen CAL-Kompetenzen neben photometrischen Kompetenzen auf (vgl. [Sch03], [Tes05], [Law09], [Rei03], [Rei03b]).

Die genannten Trends begünstigen ebenfalls die Einführung und Prozessintegration der Lichtsimulation beim Automobilhersteller. So zeigen die Veröffentlichungen der Volkswagen AG [Hof05], [Hof04], [Kie05] die Anwendung der Technologie zur Vorentwicklung von Scheinwerfern und Leuchten bei Volkswagen. Zudem wird in den Quellen die technologisch umfassende virtuelle Absicherung dargestellt, die neben der Lichtsimulation auch die Temperatur- und Strömungsberechnung sowie die Visualisierung der Scheinwerfer und Leuchten in der Tag- und Nachtanmutung einschließt. In einer Veröffentlichung des Automobilherstellers Audi wird ebenfalls der Einsatz dieser virtuellen Absicherung dargestellt (vgl. [MoSc07]).

In den Veröffentlichungen des Autors [Kie08], [Kie09] kann die Anwendung der Lichtsimulation im Entwicklungsprozess verglichen werden.

2.4 Ableitung von Anforderungen

Aus den in den Abschnitten 2.2 und 2.3 beschriebenen Prozessen, Einflussfaktoren und Entwicklungen lassen sich zwei grundlegende Anforderungen an die Qualität der Lichtsimulation ableiten, die zur Integration der Methode in den Entwicklungsprozess des Automobilherstellers nötig sind.

1. Die quantitativ hinreichend genaue Simulation zur Durchführung einer virtuellen Typprüfung

Im Gegensatz zu einer oftmals genutzten relativen Simulation muss die Lichtsimulation im Kfz-Entwicklungsprozess absolute Werte der lichttechnischen Größen hinreichend genau berechnen. Hinreichend genau bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das Bestehen des lichttechnischen Geräts bei einer messungsbasierten Typprüfung abgeschätzt werden kann. Somit muss die Simulation der lichttechnischen Funktion von Serienbauteilen vorgenommen werden können. Es muss weiterhin die Abbildung der messungsbasierten Typprüfung mit deren Messmethoden durch die Lichtsimulation erfolgen. Die Untersuchung zu deren Messgeräten, Abweichungen und Unsicherheiten wird in Kapitel 4 durchgeführt.

2. Die wahrnehmungsbasierte Bewertung von Scheinwerfern mittels Simulation

In einem Entwicklungsprozess, bei dem der Automobilhersteller CAL und Lichtsimulation durchführt, können dessen Anforderungen an die lichttechnische Funktion direkt in die Auslegung einfließen. Dies betrifft Kriterien und Werte, die über gesetzliche Anforderungen hinausgehen und die anschließend in Kapitel 3 behandelt werden. Der Ablauf wird in Abbildung 2.9 schematisch dargestellt.

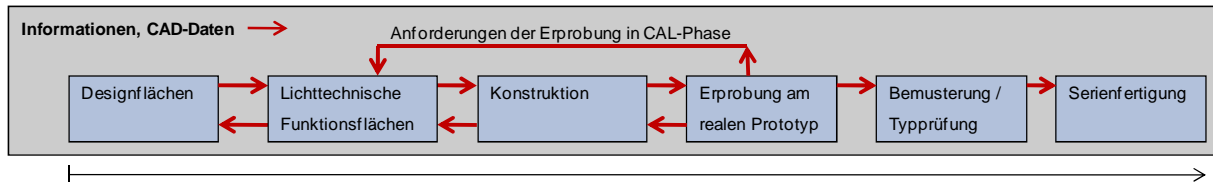


Abb. 2.9: Schema der direkten Rückkopplung von Anforderungen der Erprobung

Zur Umsetzung dieses Ablaufes werden Bewertungsmethoden und Berechnungsmodelle benötigt, die subjektive Kriterien an eine wahrgenommene Lichtverteilung auf die objektiven lichttechnischen Werte des Scheinwerfers zurückführen. Diese Werte müssen durch die Lichtsimulation hinreichend genau abgebildet werden.

Diese zwei Anforderungen sind Untersuchungsgegenstand im weiteren Verlauf dieser Arbeit.

Der daraus abgeleitete Entwicklungsprozess beim Automobilhersteller mit integriertem CAL wird bei Volkswagen umgesetzt, wie bei von Hoffmann [Hof05], [Hof04] oder beim Autor [Kie05] vertieft werden kann. Das Schema in Abbildung 2.10 verdeutlicht die Vorgehensweise. Wesentlich ist hier die zwischen Automobilhersteller und Zulieferer aufgeteilte und durch eine Übergangsphase gekennzeichnete Verantwortlichkeit für die lichttechnische Auslegung, dargestellt durch die abgeschragten Blöcke.

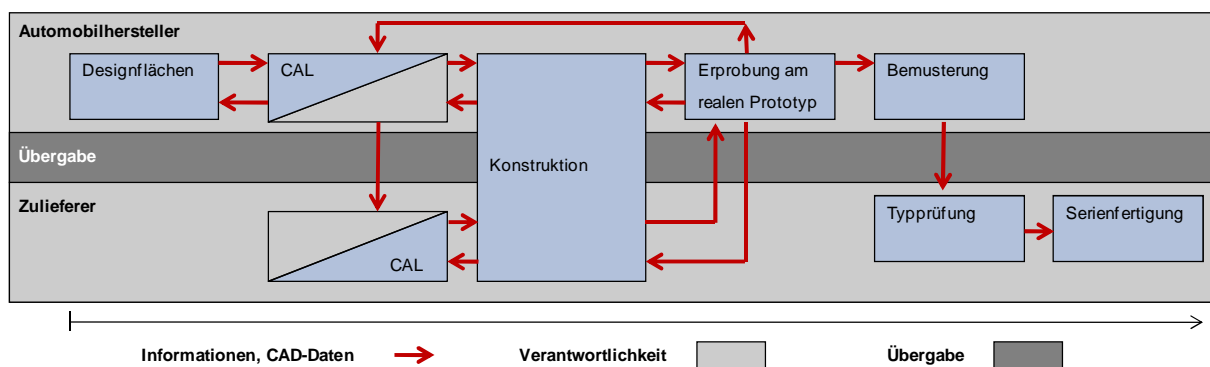


Abb. 2.10: Vereinfachter Entwicklungsprozess mit Integration des CAL beim Automobilhersteller

Damit sind die Anforderungen aus dem Entwicklungsprozess abgeleitet und die Arbeitsinhalte zur Bewertung definiert. Im folgenden Abschnitt wird zuerst die wahrnehmungsbasierte Bewertung untersucht.

3 Bewertung von Lichtverteilungen

In diesem Abschnitt wird die Bewertung von Lichtverteilungen behandelt, und zwar getrennt nach gesetzlichen und wahrnehmungsbasierten Anforderungen. Dies spiegelt deren Trennung im Entwicklungsprozess sowie die unterschiedliche Bedeutung der Bewertungen wieder. So ist die Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen für eine Typprüfung und Genehmigung des Scheinwerfers zwingend erforderlich. Alle weiteren Anforderungen bestehen auf der Grundlage einer Vereinbarung zwischen Zulieferer und Automobilhersteller. Für die Anforderungen der Gesetzgebung existiert bereits der Bezug zwischen der Wahrnehmung der Lichtverteilung und den lichttechnischen Werten des Scheinwerfers. Die Anforderungen des Automobilherstellers beschränken sich im Wesentlichen auf qualitative Anforderungen an bestimmte Kriterien, wie beispielsweise eine Ausleuchtung ohne störende Inhomogenitäten oder eine gute Ausleuchtung des Straßenrandes. Die Verbindung zu lichttechnischen Größen muss in diesem Abschnitt zunächst hergestellt werden.

Wesentliche Unterschiede ergeben sich auch durch die Motivation. Die Gesetzgebung hat lediglich das Ziel, eine Mindestfunktion sowie die Sicherheit im Verkehrsraum zu gewährleisten. Das führt nicht zwingend zu einer guten, den Anforderungen des Automobilherstellers oder des Kunden genügenden Lichtverteilung, wie in Abbildung 3.1 links dargestellt wird. Auf der rechten Seite ist eine als gut bewertete Lichtverteilung abgebildet, die auch Anforderungen an Kriterien genügt, die über das gesetzlich geforderte Maß hinausgehen.



Abb. 3.1: *Gesetzlich zulassungsfähige Abblendlichtverteilung und gute Lichtverteilung dargestellt in einem Lichtkanal (vgl. Kleines [Kle03])*

Weiterhin ist es ein Ziel der gesetzlichen Regelungen, dass einfache, vergleichbare Messmethoden zu Grunde liegen. Diese Messmethoden sind jedoch nicht für die vollständige Erfassung der vom Verkehrsteilnehmer wahrgenommenen Lichtverteilung ausgelegt. Sie basieren auf lichttechnischen Größen des Fernfeldes und erfassen Werte sequenziell und örtlich diskret, weswegen eine geschlossene Erfassung von Flächen oder Raumwinkelbereichen einen hohen zeitlichen Aufwand bedeutet. Bei dem typischerweise in

der Lichtsimulation verwendeten Prinzip des Forward Raytracing erfolgt die Erfassung des Lichtfeldes zwar örtlich diskret, aber annähernd gleichzeitig für alle Winkel. Die Berechnungszeit wirkt sich dann vorrangig auf die Genauigkeit der ermittelten lichttechnischen Größen aus. Dadurch können in der Lichtsimulation eher Kriterien angewendet werden, zu deren Beschreibung größere Felder bzw. Raumwinkel erfasst werden und die besser der Wahrnehmung des Verkehrsteilnehmers entsprechen. Dieser Sachverhalt wird in den Kapiteln 4.1 für die Messung und 8.2 für die Simulation, ausgeführt.

3.1 Bewertung durch gesetzliche Anforderungen

Ein Scheinwerfer wird nach den Regelungen der jeweiligen Länder und Zielmärkte zugelassen. Die am weitesten verbreiteten Regelungen sind die ECE-Regelungen der UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) und die FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standard) [Ecerg], [Fmvov], [Saerg]. Es werden weiterhin länderübergreifende Regelungen zur Zulassung herangezogen, wie die EU-Vorschriften, länderspezifische Zulassungsvorschriften wie die STVZO in Deutschland oder die JSAE in Japan, sowie Abwandlungen der ECE wie beispielsweise in China. Die Abbildung 3.2 zeigt die Gültigkeitsbereiche der ECE zum Jahr 2009.



Abb. 3.2: Bereich der Gültigkeit der ECE-Regelungen (2009) nach [Ecerg]

Das nordamerikanische FMVSS-Zulassungsprinzip beruht auf der Selbstzertifizierung, nicht auf einer Typprüfung. Der Unterschied liegt dabei im Zeitpunkt, im Entwicklungsprozess und in der Verantwortlichkeit, es werden aber vergleichbare photometrische Anforderungen gestellt. Die lichttechnischen Anforderungen werden durch Standards der SAE (Society of Automotive Engineers), beispielsweise durch die SAE J1383, beschrieben. Diese Standards werden durch die US-Behörde NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) in die FMVSS108 eingebracht. Weitere Informationen zu diesem Vorgehen können beispielsweise bei Laarhoven [Laa09] nachgelesen werden. Kennzeichnend ist ganz allgemein, besonders aber für die ECE, dass die Regelungen kontinuierlichen Änderungen unterworfen sind, unter anderem, um neue Technologien berücksichtigen zu können.

Für den Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit sind die Regelungen für die Scheinwerferfunktion mit Glühlampen heranzuziehen. Dies sind die ECE-Regelung R112 für Abblendlicht oder die FMVSS108. Die Abblendlichtverteilungen der beiden Zulassungsbereiche unterscheiden sich. Insbesondere ist die Form der Hell-Dunkel-Grenze unterschiedlich. Im Wirkungsbereich der FMVSS108 soll sie einen doppelten rechtwinkligen Knick aufweisen, während in den Gültigkeitsbereichen der ECE ein 15°- oder ein 45°-Anstieg definiert ist. Um den Untersuchungsgegenstand für diese Arbeit weiter einzugrenzen, wurde die ECE-Regelung – auch aufgrund ihrer zunehmenden Verbreitung – ausgewählt.

In den Regelungen werden lichttechnische Größen, deren einzuhaltende Minimal- und Maximalwerte, sowie diskrete Messorte festgelegt. Die Messgrößen und Messmittel werden nicht vollständig reguliert (vgl. Abschnitt 4.1). Hinzu kommen qualitative Anforderungen an die Lichtverteilung, wie beispielsweise eine ausreichende blendfreie Beleuchtung, vgl. Absatz 6.1.1. der ECE R112. Die Abblendlichtfunktion wird in der ECE R112 mittels diskreter Beleuchtungsstärken E an Orten einer Messwand in $r = 25\text{ m}$ Entfernung bewertet. In Abbildung 3.3 sind Messorte, deren Maße sowie Zonen dargestellt.

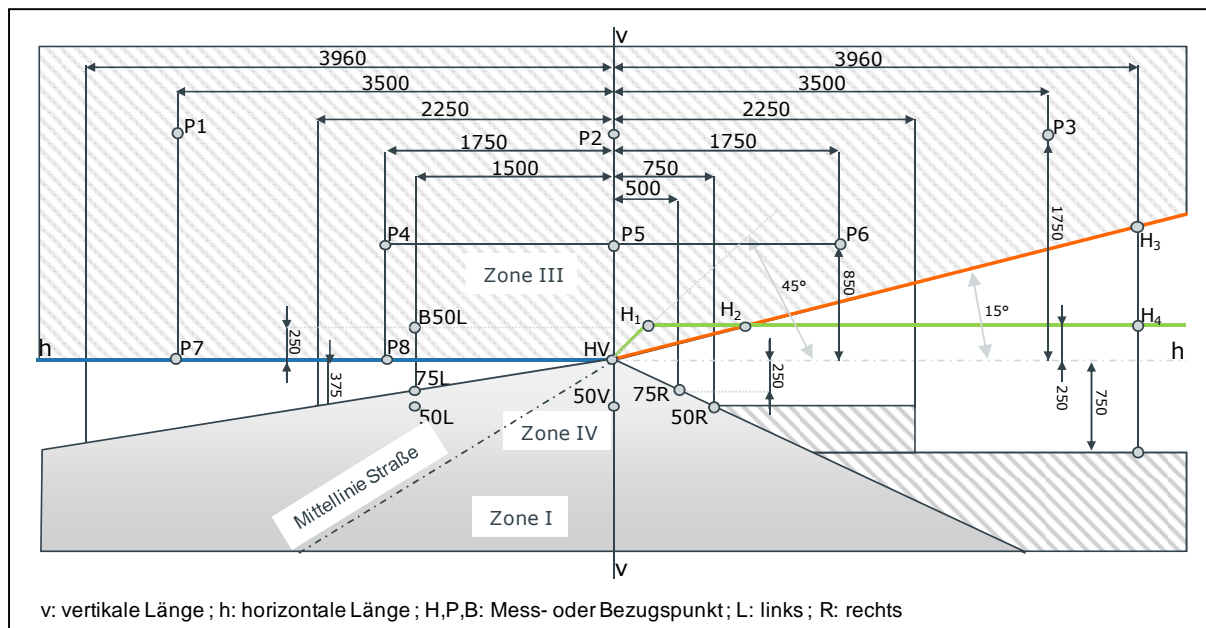


Abb. 3.3: Prüfpunkte, Maße und Zonen der ECE-Regelung R112, Anhang 3 für Abblendscheinwerfer [Ece08]

Die in Abbildung 3.3 dargestellten Zonen sind Bereiche, in denen Grenzwerte der Beleuchtungsstärke nicht über- bzw. unterschritten werden dürfen. Der photometrische Nachweis erfolgt, nach Bedarf oder bei Verdacht auf Nichterfüllung der Vorgaben, diskret oder in einem scannenden Verfahren. Die Prüfpunkte haben einen Bezug zu wahrnehmungsbasierten Kriterien. Beispielsweise können die Prüfpunkte B50L und 75R zur Bewertung der lichttechnischen Funktion des Scheinwerfers hinsichtlich der Kriterien Blendung und Sichtweite herangezogen werden. Die Einschränkungen einer Bewertung dieser Kriterien mittels jeweils nur eines Messpunktes werden in Abschnitt 3.2 gezeigt.

Die Berechnung der Beleuchtungsstärke ist in der Lichtsimulation möglich und die Anwendung im CAL ist Stand der Technik. Die Messung der Beleuchtungsstärke nach ECE R112 wird im Kapitel 4 vorgestellt und ein Vergleich mit der Berechnung der Werte in der Simulation wird in Kapitel 8 vorgenommen. Daran kann anschließend die Abbildbarkeit der Photometrie der Typprüfung durch die Lichtsimulation sowie die virtuelle Typprüfung diskutiert werden.

3.2 Bewertung durch wahrnehmungsbasierte Methoden

In der prototypenbasierten Erprobungsphase findet die Bewertung durch Experten – Entwicklungsingenieure mit lichttechnischem Fachwissen – in einem Lichtkanal und bei nächtlichen Erprobungsfahrten statt (vgl. Abbildung 2.10). Der Lichtkanal gewährleistet vergleichbare Bewertungsbedingungen (vgl. [Aut08], [Ada09]), während bei der Erprobungsfahrt auf einer Teststrecke die dynamischen Bedingungen und Einflüsse einer Verkehrssituation abgebildet werden können. Diese Einflüsse sind für eine quantitativ absolute Bewertung relevant. Beispielsweise hat die verkehrsbedingte Blickzuwendung einen Einfluss auf die Priorisierung der Sichtbereiche. Im Lichtkanal neigt der Beobachter eher zur Bewertung naher oder seitlicher Bereiche, die für die Fahraufgabe weniger relevant sind. Weiterhin führt die Relativbewegung zur Fahrbahn zu einer verminderten Wahrnehmung der Inhomogenitäten der Fahrbahnoberfläche, wodurch die Inhomogenitäten der Scheinwerfer-Lichtverteilung im Vergleich zur statischen Bewertungssituation verstärkt hervortreten.

Als Referenz werden zusätzlich maßstababbildende Scheinwerfer, also sehr gute und sehr schlechte sogenannte Benchmark-Scheinwerfer, bewertet. Dies hilft dabei, die relative Bewertung des Beobachters einzuordnen. Die bewertenden Experten wechseln im Versuch die Fahrzeuge und bewerten nach vorgegebenen Kriterien und mittels Bewertungsskalen. Die Bewertungen werden nach einer Abstimmung zu einer Entscheidung zusammengefasst. Dieses Vorgehen, mit Ausnahme der Abstimmung, ist gängige Praxis der psychophysikalischen Untersuchung bei wissenschaftlichen Arbeiten und wird unter anderem in folgenden Quellen ausführlicher dargestellt: [Völ06], [Kli05], [Kli05a], [Hof03]. Zwischen der wissenschaftlichen Vorgehensweise und der industriellen Praxis bestehen Unterschiede in den Methoden des Versuchsaufbaus und der Versuchsumgebung, in den Bewertungskriterien und Maßstäben sowie in der Unsicherheit der ermittelten Werte und Ergebnisse. Für die Erprobungsfahrt existieren keine verbindlichen Bewertungsvorschriften. Es sind gemeinhin nur Regeln zur Vermeidung größerer Abweichungen einzuhalten, wie die vorherige Einstellung der Hell-Dunkel-Grenze oder das Vermeiden einer Bewertung bei nasser Fahrbahn. Zur Bewertung werden Oberbegriffe der Kriterien, wie Sicherheit, Komfort oder Leistung herangezogen (vgl. Bericht der BASt [Jeb08]). Dies dient oftmals zur weiteren Klassifizierung und auch zur Gewichtung. Ein oft genannter Wunsch ist es, durch eine geeignete Gewichtung der Kriterien eine globale Bewertung zu erreichen.

Hier sei ein typischer Zielkonflikt bei der Bewertung durch den Automobilhersteller erwähnt. Kriterien wie die nachfolgend behandelte Reichweite oder die Blendung lassen sich als zur Sicherheit gehörend klassifizieren. Kriterien wie Homogenität und Breite der seitlichen

Ausleuchtung sind eher für den Komfort des Fahrers relevant. Ein Kunde und Fahrer nimmt vermutlich eher die komfortrelevanten Kriterien wahr und gewichtet sie damit höher als die sicherheitsrelevanten Kriterien. Der Entwickler hat die Aufgabe, hier eine Balance zu finden, da die lichttechnische Leistungsfähigkeit des Scheinwerfers begrenzt ist. Diese Balance ist herstellerspezifisch, weswegen die Ableitung einer globalen Bewertungsnote nicht Ziel dieser Arbeit ist.

Die Kriterien für eine gute Lichtfunktion und die auf lichttechnische Größen zurückgeführten Methoden zu deren Bewertung sind regelmäßig Gegenstand der Forschung. Eine Grundlage der vorliegenden Untersuchung bildet beispielweise die Arbeit des CIE Technischen Komitees TC 4-45, „Performance Assessment Method for Vehicle Headlamps“. Die aus Lichttechnik-Fachleuten von Automobilherstellern, Zulieferern und Forschungseinrichtungen bestehende Arbeitsgruppe hat ebenfalls eine umfassende Bewertung von Scheinwerferlichtverteilungen als Ziel (vgl. [Cie10]).

Nachfolgend sollen geeignete Kriterien und deren auf lichttechnischen Größen basierenden Berechnungsmethoden ausgewählt werden. Die Übertragbarkeit dieser Methoden in die Lichtsimulation wird diskutiert. Die Abbildung 3.4 zeigt eine Abblendlichtverteilung aus der Fahrerperspektive mit der schematischen Darstellung von Bewertungsbereichen der nachfolgend beschriebenen Kriterien.

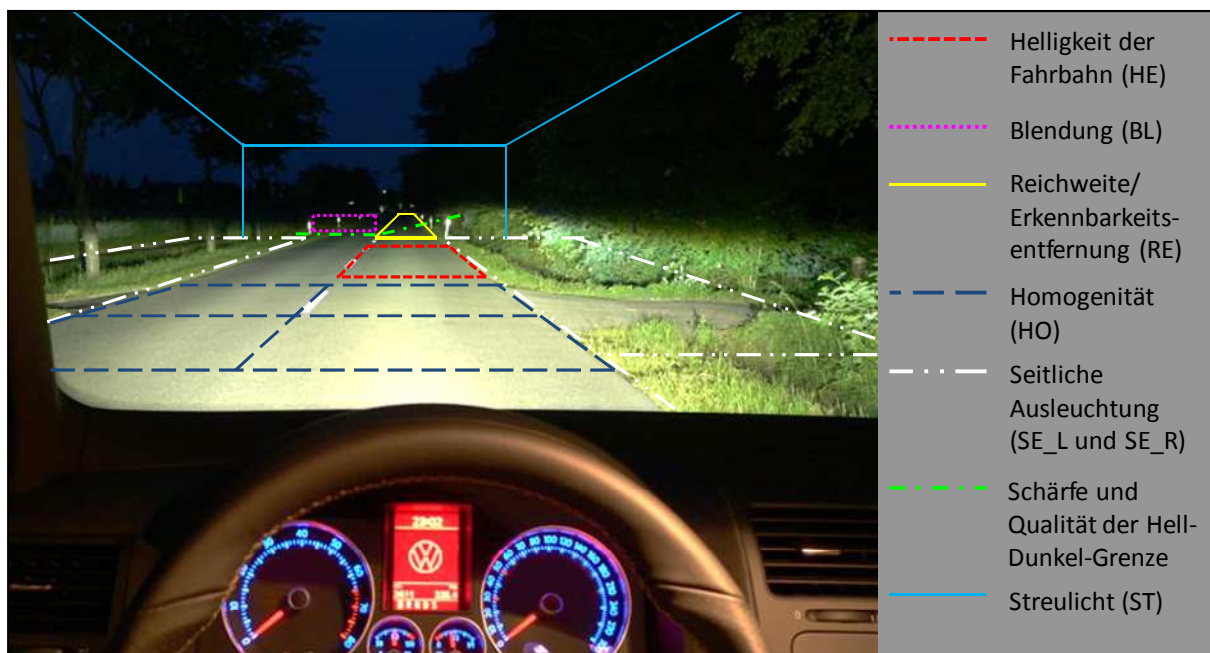


Abb. 3.4: *Abblendlichtverteilung aus Sicht des Fahrers und Schema der Bewertungskriterien*

Helligkeit der Fahrbahn (HE)

Der hinreichende Helligkeitseindruck einer Lichtverteilung ist eines der grundlegendsten Kriterien und für Sicherheit sowie Komfort bedeutend. In dem Bericht der BASt [Jeb08] wird die Bedeutung der Helligkeit der Fahrspurausleuchtung hervorgehoben und mit dem

Mittelwert der horizontalen Beleuchtungsstärke \overline{E}_h auf der Fahrbahnoberfläche bewertet. Diese sogenannte „Helligkeit – Nahfeld“ wird auf der Fahrspur mit einer Breite von $-1,75\text{ m} \leq y_F \leq 1,75\text{ m}$ und einer Länge von $20\text{ m} \leq x_F \leq 40\text{ m}$ vor dem Fahrzeug ermittelt, wie in Anhang B.3 dargestellt. Im Bericht der BASt wird zudem ein Wert von $\overline{E}_h = 2\text{ lx}$ angegeben, der als äquivalentes Maß für die maximale Helligkeit gelten soll.

Zur Berechnung dieser Bewertung sind mittels der Scheinwerferlichtverteilung des Fernfeldes $I(\alpha_H, \alpha_V)$ die horizontale Beleuchtungsstärke \overline{E}_h auf der Fahrbahnoberfläche in Abhängigkeit von den Fahrzeugkoordinaten zu berechnen. Diese Methode ist Stand der Technik (vgl. von Hoffmann [Hof03]). Durch die Mittelwertbildung aus sehr vielen Einzelwerten sind geringe Unsicherheiten zu erwarten, was in Kapitel 8 behandelt wird.

Es sei ergänzt, dass die „Helligkeit – Nahfeld“ nicht das in der Kfz-Lichttechnik übliche Maß des Teillichtstromes ersetzt. Der Teillichtstrom ist der Lichtstrom in dem Raumwinkel, der die Abblendlichtverteilung umfasst. Dieser Wert korreliert bei Reflektionssystemen sehr gut mit der scheinbar leuchtenden Fläche senkrecht zur optischen Achse und ist damit gut zur Beschreibung und Reservierung des benötigten Bauraumes zu verwenden. Diese Qualität erfüllt das Maß „Helligkeit – Nahfeld“ nicht. Der Teillichtstrom kann nach dem zonalen Lichtstromverfahren, wie in Lehrbüchern [Gal07] beschrieben, ermittelt werden. Dabei sollten Werte $I \leq 62,5\text{ cd}$ nicht integriert werden, um Streulicht und Messfehler herauszufiltern.

Blendung (BL)

Scheinwerfer stellen bei direkter Einsicht und durch ihre Reflexion auf der Straßenoberfläche potentielle Blendquellen dar (vgl: [Hof03], [Rap07], [Man01], [Völ05]). Blendung gefährdet die Sicherheit im Verkehrsraum. Man unterscheidet physiologische und psychologische Blendung, wobei nur erstere das Sehvermögen messbar beeinträchtigt (vgl: [Rap07]). Eine Bewertung der Blendung wird dabei auf Beleuchtungsstärke oder Leuchtdichte bezogen. Die Arbeiten von Manz [Man01] beziehen Beleuchtungsstärke und die scheinbar leuchtende Fläche des Scheinwerfers in die Bewertungsmethoden ein. Besonders für geringe Abstände zum Scheinwerfer wird eine leuchtdichtebasierte Bewertung empfohlen (vgl: [Rap07], [Völ05]). Der Abstand ist damit abhängig von der jeweiligen Geometrie des Scheinwerfers.

Das Maß der scheinbar leuchtenden Fläche respektive der lichttechnischen Funktionsfläche ist in messungsbasierten Bewertungsverfahren aufwändig zu ermitteln. In CAL-basierten Verfahren liegt die Information vor (vgl. [Men10]). Die Ermittlung der Leuchtdichte in der Simulation ist hingegen aufwändig und nur eingeschränkt mit der Messung vergleichbar (vgl. [Här07], [Här07a], [Kie09a]).

Als praktikable Methode verwendet das CIE TC 4-45 [Cie10] eine Bewertung mittels der Teillichtströme in definierten Zonen, gewichtet mit der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Blickzuwendung nach Damasky [Dam95]. Das Berechnungsverfahren ist in Anhang B.4 dargestellt. Die Umsetzbarkeit in der Lichtsimulation ist direkt gegeben. Die Genauigkeit der Bewertung wird maßgeblich durch die Genauigkeit der Simulation der Werte oberhalb der

Hell-Dunkel-Grenze sowie durch die Mittelung der Einzelwerte beeinflusst. Dies wird in Abschnitt 8.5 untersucht.

Reichweite/Erkennbarkeitsentfernung (RE)

Neben der Sichtweite als allgemeines Kriterium wird in der Literatur zwischen Reichweite und Erkennbarkeitsentfernung unterschieden, die dem Fahrer durch die Scheinwerferfunktion bereitgestellt wird. Dabei wird die Reichweite als die Entfernung bezeichnet, in der ein Objekt wahrgenommen wird. Die Erkennbarkeitsentfernung ist hingegen die Entfernung, in der ein Objekt in seiner Form identifiziert wird. Es wird angenommen, dass eine Reaktion des Fahrers erst durch die Erkennung ausgelöst wird. Das Kriterium ist damit vorrangig sicherheitsrelevant. Die von Kliebisch und Völker [Völ06], [Kli05], [Kli05a] untersuchte Contrast Threshold-Bewertungsmethode beruht auf dem Kontrast zwischen einem definierten Sehzeichen, das senkrecht zur Fahrbahnoberfläche steht, und dessen Hintergrund. Die Kontraste werden einer gemessenen Leuchtdichteverteilung entnommen, wie in Abbildung 3.5 links dargestellt. Sie erhöhen sich mit verringerter Entfernung des Sehzeichens. Der Schwellwert der Erkennung kann durch die Berechnung der Unterschiedsempfindlichkeit des Sehvermögens ermittelt werden. Durch den Vergleich des Kontrastes mit der Unterschiedsempfindlichkeit wird die Erkennbarkeitsentfernung berechnet (vgl. Anhang C.1).

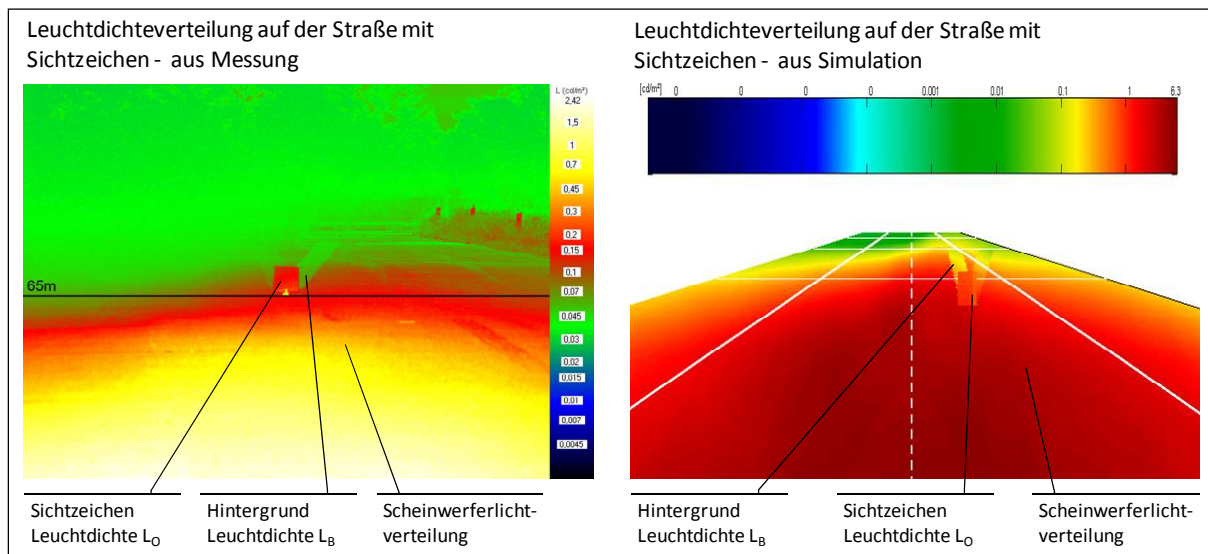


Abb. 3.5: Leuchtdichteverteilung und Sehzeichen in Messung und Berechnung

Zur Umsetzung in der Lichtsimulation sind die Berechnungen der Leuchtdichteverteilung auf der Fahrbahnoberfläche und dem Sehzeichen sowie in deren Umgebung nötig. Diese setzen sich zusammen aus der Berechnung der Beleuchtungsstärke auf der Fahrbahn $E(x_F, y_F, z_F)$ in Abhängigkeit von der Höhe der Scheinwerfer mit $z_F = -h_{SW}$ und den Reflexionseigenschaften der Oberfläche. Die Modellierung der Reflexionseigenschaften ist mittels der in Abschnitt 7.3 behandelten Bidirectional Reflection Distribution Function (BRDF) möglich. Für spezielle Fahrbahnoberflächen und Anwendungsfälle sind vereinfachte Modellierungen bekannt. Diese Modellierungen beruhen auf den Leuchtdichtekoeffizienten q oder R , wobei sich q auf die radiale Beleuchtungsstärke E bezieht und R für die horizontale

Beleuchtungsstärke E_h gilt. Die Gültigkeit der Modelle ist durch die zur Modellerstellung untersuchten Einfallswinkel- und Ausfallswinkel begrenzt.

Die Umsetzbarkeit für die Lichtsimulation wurde im Rahmen dieser Arbeit vom Autor und von Ziehl [Zie07] untersucht. Es wurden die psycho-physikalischen Untersuchungen des CIE TC 4-45 zur Erkennbarkeitsentfernung von Abblendlichtscheinwerfern herangezogen und mit einer Berechnung der Leuchtdichten, Kontraste und Erkennbarkeitsentfernungen nach Kliebisch [Kli05], [Kli05a] verglichen. Die verwendeten Leuchtdichteverteilungen $L(x_z, y_z)$ und Lichtstärkeverteilungen $I(\alpha_H, \alpha_V)$ von sieben Scheinwerfern wurden im Rahmen der Arbeit des CIE TC 4-45 gemessen. Das Vorgehen zur Berechnung der Verteilung $L(x_z, y_z)$ mittels der Lichtstärkeverteilung und der Reflexionseigenschaften der Straßenoberfläche ist in Anhang C.2 dargestellt. Es konnte nur eine unbefriedigende Korrelation zwischen den berechneten Erkennbarkeitsentfernungen und den Werten der Untersuchung des CIE TC 4-45 erreicht werden. Unbekannte Abweichungen und nicht quantifizierbare Einflussgrößen haben die Validierung zudem erschwert, was in Anhang C.3 aufgeführt wird. Deshalb wird die Bewertungsmethode in dieser Arbeit nicht weiter verwendet. Die prinzipielle Umsetzbarkeit als Methode für die Lichtsimulation konnte aber gezeigt werden.

An eine simulierte Lichtverteilung wird durch diese Berechnungsmethode die Anforderung gestellt, die Werte oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze hinreichend genau zu simulieren. Diese Werte bestimmen den Kontrast am Sehzeichen maßgeblich. Die modellierungsbedingten Einschränkungen zu dieser speziellen Anforderung sind in den Abschnitten 6.3 und 8.5 dargestellt.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die einfach gestaltete und umsetzbare Methode der Berechnung der Reichweite gemäß dem CIE TC 4-45 angewendet. Diese beruht auf der Berechnung der radialen Beleuchtungsstärke E auf der Fahrbahnoberfläche, wobei die Schnittpunkte der 1 lx , 3 lx , 5 lx -Isolinie mit drei Geraden längs der Fahrzeugachse in $y_F = -1,75\text{ m}$, 0 m , $1,75\text{ m}$ berechnet werden. Der Mittelwert der Abstände dieser neun Schnittpunkte zum Fahrzeug wird zur Bewertung herangezogen (vgl. Abb. B.5). Im finalen Report des CIE TC 4-45 [Cie10] sind Änderungen der Bewertungsorte eingegangen. Es wurden drei Zonen A, B und C definiert, wobei die Zone A der hier verwendeten Methode mit einer Verschiebung zur rechten Fahrbahn entspricht. Die anderen Zonen bewerten Rechtskurven durch eine Rotation der Koordinaten zur Berechnung um 5° und die Erkennung von Fußgängern durch eine Bewertung am linken Fahrbahnrand. Für diese Erkennung wurde in [Cie10] eine Berechnung oberhalb der Fahrbahnebene mit $z_F = 250\text{ mm}$ eingeführt. Dies war in den Arbeitsdokumenten zum Zeitpunkt der Untersuchung noch nicht enthalten (vgl. [Zie07]) und wird nicht berücksichtigt. Die Berechnungsmethode wird in Anhang B.5 dargestellt.

Homogenität (HO)

Die Homogenität beschreibt die Gleichmäßigkeit der Helligkeitserscheinung einer leuchtenden oder beleuchteten Fläche und kann als vorwiegend komfortrelevant eingestuft

werden. Das Kriterium der Homogenität bezieht sich in diesem Zusammenhang auf den Bereich der Lichtverteilung, der direkt durch das optische System beleuchtet wird. Diese primäre Lichtfunktion ist damit der Bereich von der Fahrzeugfront bis zur Hell-Dunkel-Grenze, wie auch in Abbildung 3.4 zu sehen. Dadurch erfolgt eine Abgrenzung zur peripheren Lichtfunktion und somit zur Bewertung der Homogenität des Streulichts, die in Abschnitt 3.4 untersucht wird.

Die Wahrnehmung der Homogenität lässt sich auf Gradienten in der Lichtverteilung zurückführen. Deren Berechnung und Gewichtung erfolgt in diskreten Feldern in der Beleuchtungsstärkeverteilung E_h längs und quer zur Fahrtrichtung und ist die Basis der ausgewählten Berechnungsmethoden von Kleinkes [Kle03]. Kleinkes definierte Bereiche, in denen die Bewertung der Homogenität sinnvoll ist, mit Hilfe von psycho-physikalischen Untersuchungen. Die Bereiche sind unterteilt nach der Vorzugsrichtung der Berechnung der Gradienten, wie in Abbildung 3.6 schematisch dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung befindet sich in Anhang B.6.

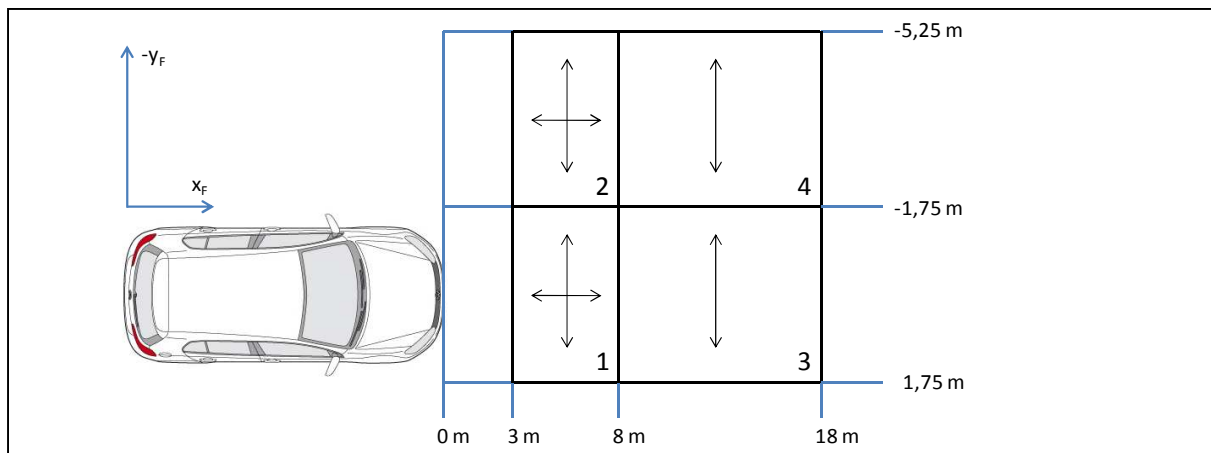


Abb. 3.6: *Felder und Gradientenrichtung zur Bewertung der Homogenität [Kle03]*

Die Berechnung dieser Gradienten aus simulierten Lichtverteilungen ist möglich und wird in Kapitel 5 und Abschnitt 6.3 untersucht. Die Genauigkeit der Bewertungsmethode wird in Abschnitt 8.5 behandelt.

Seitliche Ausleuchtung links und rechts (SE_L und SE_R)

Die Breite der Ausleuchtung ist überwiegend relevant für die Komfortempfindung, da Objekte in diesen Bereichen nicht in der Fahrtrichtung liegen und damit weniger sicherheitsrelevant sind. Die Sicherheitsrelevanz ist beim Abbiegevorgang oder in urbanen Gebieten höher. Dort werden Abblendscheinwerfer verstärkt durch das Abbieglicht oder die Stadtlichtverteilung der AFS-Funktion unterstützt (vgl. ECE R123 [Ece09a]).

Für die Bewertung der Seitenausleuchtung wird die Methode des CIE TC 4-45 [Cie10] herangezogen, die auf der Berechnung der radialen Beleuchtungsstärke E basiert. Im finalen Report des CIE TC 4-45 wird in linke und rechte Seitenausleuchtung sowie in einen nahen Bereich für Abbiegungen (Zone E) und einen fernen Bereich für Kurven (Zone D)

unterschieden. Die Unterscheidung der Zonen ist in dieser Arbeit nicht umgesetzt worden, da diese Einteilung im Entwicklungsprozess bei Volkswagen nicht genutzt wird. Somit wird ein Mittelwert je Seite abgeleitet (vgl. [Zie07]). Auch bei der Bewertung der Reichweite wird nicht in $z_F = 250 \text{ mm}$ sondern auf Fahrbahnhöhe bewertet, da dies, wie beim Kriterium Reichweite, zum Zeitpunkt der Arbeit nicht im Report vorgesehen war. Die Orte der Bewertung sind damit die jeweils fünf linken und rechten Schnittpunkte der 3 lx -Isolinie mit den Geraden quer vor dem Fahrzeug in den äquidistanten Entfernungen $x_F = 10 \text{ m}, 20 \text{ m}, \dots, 50 \text{ m}$. Jeweils der Mittelwert der Abstände der Schnittpunkte von der Fahrbahnmitte mit $y_0 = y_F - 1,75 \text{ m}$ wird zur Bewertung herangezogen, wie in Anhang B.7 dargestellt wird. Die methodische Umsetzbarkeit in der Lichtsimulation ist damit gegeben.

Schärfe und Qualität der Hell-Dunkel-Grenze

Die Hell-Dunkel-Grenze (HDG) ist der die Abblendlichtfunktion kennzeichnende scharfe, horizontale Gradient, kombiniert mit einer seitlichen Anhebung, genannt Schulter. Die Qualität und Lage der HDG ist für die maßgebliche Funktion des Abblendscheinwerfers verantwortlich: eine hinreichende Sichtweite bei geringer Blendwirkung. Die HDG ist damit vorrangig sicherheitsrelevant.

Zur Bewertung der HDG können die Anforderungen der Gesetzgebung herangezogen werden. In der ECE R112 werden allgemeine qualitative Anforderungen sowie quantitative Regulierungen zur Schärfe und Linearität sowie zu den Formen der HDG definiert. Qualitative Anforderungen sind die hinreichend scharfe HDG zur korrekten Einstellung der Scheinwerfer sowie das Vermeiden einer doppelt erscheinenden HDG. Die quantitativen Anforderungen werden in Kapitel 5 in der Untersuchung einer softwarebasierten Ausrichtemethode behandelt. Eine gesonderte Bewertung als Bestandteil der wahrnehmungsbasierten Bewertung ist deswegen nicht umgesetzt worden.

Streulicht (ST)

Eine weitere Bewertung im Entwicklungsprozess gilt dem Streulicht des Scheinwerfers. Als Streulicht sollen die Anteile der Lichtverteilung eines Scheinwerfers gelten, die nicht zur direkten respektive primären Lichtfunktion zählen. Das sind überwiegend solche Anteile, die direkt von der Lichtquelle oder durch Mehrfachreflexionen vom lichttechnischen System ausgehen. Dieses Streulicht wird genutzt, um außerhalb der primären Lichtverteilung die Sichtbarkeit von Objekten zu gewährleisten, beispielsweise von Verkehrsschildern. Deswegen sind in den Regelungen vereinzelt Minimal- oder Maximalwerte definiert. Zudem ist es störend, wenn die Streulichtverteilung Inhomogenitäten aufweist. Das kann nach Huhn [Huh96] ungewollte Blickzuwendungen sowie störende Reflexe bei Nebel oder Schneefall verursachen.

Störende Inhomogenitäten werden anhand von Prototypen beispielsweise in einem präparierten Bereich des Lichttunnels identifiziert und bewertet, wie in Abbildung 3.7

dargestellt. Die Tunneloberfläche weist einen hohen Reflexionsgrad und eine lambertförmige Charakteristik der Lichtreflexion auf. Die Bewertung findet typischerweise durch nicht ortsfeste Beobachter statt, also nicht ausschließlich aus der Fahrerposition.

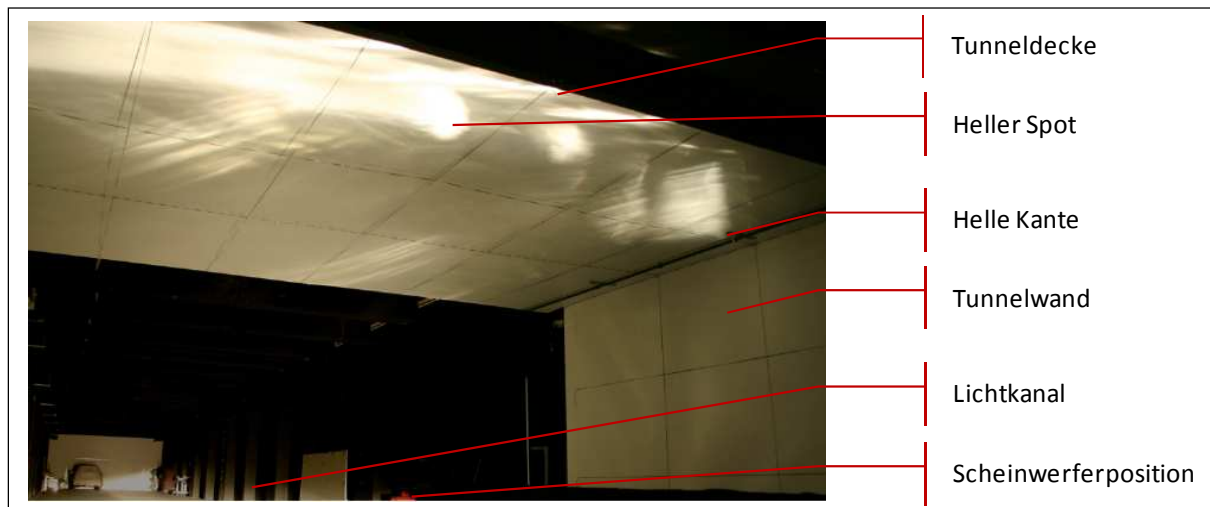


Abb. 3.7: Bewertung von Streulicht im präparierten Lichttunnel

Die auftretenden Inhomogenitäten unterscheiden sich von den Inhomogenitäten der primären Lichtverteilung in Intensität, Kontrast, Größe und Ortsfrequenz. Die Bewertung nach den Berechnungsmethoden von Kleinkes [Kle03] ist nicht praktikabel, da die Aufteilung der Bewertungsflächen, deren Gewichtung und die Richtung der Gradientenanalyse nicht vergleichbar sind.

Eine besondere Problematik der Streulichtoptimierung im Entwicklungsprozess ist, dass die Streulichtanteile unkontrolliert erzeugt werden. Sie entstehen vorrangig durch Flächen mit ästhetischer Funktion, nicht durch optische Funktionsflächen, und müssen im Gesamtsystem nachträglich identifiziert werden. Der Reflex ergibt sich oftmals aus der Wechselwirkung mit der Lichtscheibe (vgl. von Blankenhagen [Bla05]), wodurch die verursachende Blende nicht direkt identifiziert und manipuliert werden kann. Die betreffenden Blenden werden häufig durch das Aufbringen von lichtstreuenden Narbungen optimiert, deren besondere materialtechnische und lichttechnische Abhängigkeiten in Kapitel 7 untersucht werden. Der besondere Vorteil einer Berechnung durch Raytracing ist, dass die Identifikation sowie die Optimierung der verursachenden Flächen eindeutig möglich sind. Der Weg des Lichtstrahls ist vollständig bekannt und der Streulichtcharakteristik zuzuordnen. Das ist anhand eines realen Scheinwerfers nicht möglich.

Methoden zur Streulichtbewertung sind nicht bekannt. Deswegen erfolgte im Rahmen dieser Arbeit eine Untersuchung, die eine anwendbare Bewertungsmethode zum Ziel hatte. Dies ist in Abschnitt 3.4 dargestellt (vgl. [Zie07a]).

3.3 Diskussion der Abweichungen der Berechnungsmethoden

Es wurde gezeigt, dass die Berechnungsmethoden für wesentliche Kriterien der wahrnehmungsbasierten Bewertung auf Größen und Werte zurückführbar sind, die in der Lichtsimulation ermittelt werden können. Für eine Anwendung der simulationsbasierten Bewertung im Prozess muss der Vergleich mit den konventionellen, auf realen Bauteilen basierenden Bewertungen erfolgen, um die Anwendbarkeit zu belegen. Dazu ist eine Diskussion der zu erwartenden Abweichungen und Unsicherheiten notwendig. Die im Rahmen dieser Arbeit erfolgte Prozessintegration der wahrnehmungsbasierten Bewertung bei Volkswagen zeigte, dass ein hinreichendes Vertrauen in die Berechnungsmethoden der Schlüssel zur verbreiteten Anwendung ist (vgl. [Kie08], [Kie09]). Wie es auch für die virtuelle Typprüfung in Kapitel 5 dargestellt wird, ermöglicht die Kenntnis der Unsicherheiten eine sachliche Bewertung von Abweichungen der Messergebnisse, stellt eine Entscheidungsbasis dar und verringert letztlich Kosten und Zeitaufwand. Dieser Sachverhalt kann aus der Sicht des Automobilbaus bei Mäge [Mäg03], [Mäg04] und für die Photometrie in der Typprüfung bei Diem [Die07] und in der Richtlinie der GTB [GTB05] vertieft werden.

In Abbildung 3.8 werden schematisch einige Werte x_i , deren Differenzen Δx_{ij} sowie die erweiterten Messunsicherheiten $U(x_i)$ dargestellt. Anhand der Überlappung bzw. Trennung der grau gekennzeichneten Messunsicherheitsbereiche wird deutlich, dass für eine signifikante Unterscheidung der Werte eine Skalierung gelten soll, deren Schrittweiten mindestens in der Größenordnung der erweiterten Messunsicherheit liegen. Dafür muss $U(x_i)$ bekannt sein. Diese Betrachtung wird zudem auch in den Abschnitten 4.2, 6.3, 7.3, 8.4 und 8.5 vorgenommen.

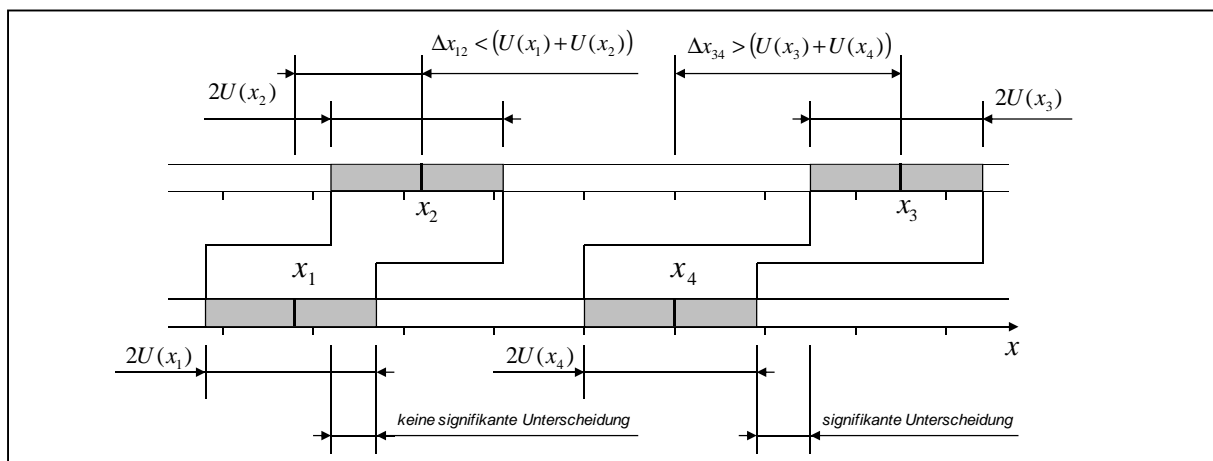


Abb. 3.8: Unterscheidung von Messwerten mit Hilfe der erweiterten Unsicherheiten

Zur Evaluation der Berechnungsmethoden wird von den jeweiligen Autoren eine Korrelation der Bewertung aus der psycho-physikalischen Untersuchung mit den berechneten Werten des Modells ermittelt. Unter Voraussetzung eines kausalen Zusammenhangs wird eine lineare Regression durchgeführt und das Bestimmtheitsmaß R^2 berechnet. Ein hohes Bestimmtheitsmaß bedeutet eine entsprechend lineare Bewertung für berechnete Werte, die zwischen den Stützstellen-Messwerten der Untersuchung liegen. Die in der psycho-

physikalischen Untersuchung auftretenden Abweichungen werden untersucht, um die Ergebnisse zu validieren. Der Unsicherheitsbeitrag des durch das Modell berechneten Wertes wird aber typischerweise nicht angegeben. Es sei angemerkt, dass das Bestimmtheitsmaß R^2 keine Aussage über die Unsicherheit des mit dieser Methode berechneten Wertes ermöglicht. Es kann eine ideale Korrelation $R^2 = 1$ auch auf Basis von Werten mit hohem Unsicherheitsbeitrag berechnet werden.

Das Aufstellen einer Messunsicherheitsbilanz war im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der Verwendung der Berechnungsmethoden anderer Autoren nicht durchführbar. Deswegen wurde die nachfolgende qualitative Betrachtung erstellt:

In die Messunsicherheit eines Wertes \bar{x}_{NF} , der in einer psycho-physikalischen Untersuchung oder Nachtfahrt bestimmt wurde, müssen die Abweichungen der Werte der Einflussgrößen dieser Untersuchung eingehen. Dafür kann in Einflussgrößen auf das Einstellen der Größe x_{Ein} und auf die Bewertung der Größe x_{Bew} unterteilt werden, wie sie in Tabelle 3.1 für die Nachtfahrt aufgeführt sind. Ein Modell einer Unsicherheitsanalyse nach GUM [Nor08] würde diese Einflussfaktoren enthalten, wie in Gleichung 3.1 dargestellt.

$$\bar{x}_{NF} = \bar{x}_{NF}(x_{Ein}, x_{Bew}) \quad (3.1)$$

Wird auf Basis der Untersuchung ein Berechnungsmodell zur wahrnehmungsbasierten Bewertung gebildet, das sich auf lichttechnische Größen und Werte einer Messung bezieht, so gehen in einen Wert \bar{x}_{WB} die Einflüsse der Messung der Größe x_{Mess} und der Berechnung des Wertes x_{Ber} zusätzlich ein, wie in Gleichung 3.2 verdeutlicht.

$$\bar{x}_{WB} = \bar{x}_{WB}(x_{Ein}, x_{Bew}, x_{Mess}, x_{Ber}) \quad (3.2)$$

Da die Einflussgrößen jeweils mit einem Unsicherheitsbeitrag $u(x_i)$ eingehen, ist davon auszugehen, dass die Unsicherheit des mittels der wahrnehmungsbasierten Bewertungsmethode berechneten Wertes \bar{x}_{WB} größer ist, als die Unsicherheit der zugrunde liegenden Untersuchung beziehungsweise der im Entwicklungsprozess stattfindenden Nachtfahrt (vgl. Gleichung 3.3).

$$u(\bar{x}_{NF}) < u(\bar{x}_{WB}) \quad (3.3)$$

Wesentliche Einflussfaktoren einer wahrnehmungsbasierten Bewertung mit gemessenen und simulierten Werten sind ebenfalls in Tabelle 3.1 gelistet. Es wird dabei vom Fall einer Wiederholung mit denselben Probanden zur Ermittlung eines Berechnungsmodells ausgegangen. Das Modell wird einmalig gebildet und zur Berechnung in der WB genutzt.

Die maßgebliche Qualität im Entwicklungsprozess ist hingegen eine geringe Unsicherheit bei dem relativen Vergleich von berechneten Werten der WB mit der Bewertung aus der Nachtfahrt. Für den Einsatz im Entwicklungsprozess ist es wichtig, die Entwicklungsschritte folgerichtig und mit stetig besseren Resultaten zu vollziehen. Werden zwei Entwicklungsstände verglichen, so zählen die relativen Abweichungen, entstanden durch Nachtfahrt $\bar{x}_{NF,1}$ zu Nachtfahrt $\bar{x}_{NF,2}$ im Vergleich zu Berechnung $\bar{x}_{WB,1}$ und Berechnung $\bar{x}_{WB,2}$. Die Berechnungsmethode definiert dabei den *vereinbarten Wert* oder auch *richtigen*

Wert im Sinne der Metrologie (vgl. VIM [Nor08a], DIN 1319 Teil 1 [Nor95]). Dadurch entfallen in der Tabelle 3.1 alle Einflussgrößen mit systematischen Abweichungen und es zählen nur noch die zufälligen Abweichungen. Zudem entfallen die durch die Bildung des Modells bedingten Abweichungen, was in Tabelle 3.1 bereits grau gekennzeichnet ist. Werden die Werte \bar{x}_{WB} mittels Lichtsimulation ermittelt, so werden in Tabelle 3.1 die Abweichungen und Unsicherheiten der Messung durch die Abweichungen und Unsicherheiten der Simulation ersetzt.

Tabelle.3.1: Einflussfaktoren auf die wahrnehmungsbasierte Bewertung

	Nachtfahrt (NF) (psycho-physikalische Untersuchung)		Wahrnehmungsbasierte Bewertung (WB) (Berechnung)	
	Zufällige Abweichungen	Systematische Abweichungen	Zufällige Abweichungen	Systematische Abweichungen
Einstellen der Größe	- Einstellung der HDG am Fahrzeug - Versorgungsspannung am SW - Sitzposition - Gewicht / Beladung des Fahrzeugs - Witterung (Umgebung) - Witterung (Straßenoberfläche) - Verschmutzung der Straße	- Anbauposition - Einstellung der HDG - Umgebungs-Helligkeit		
Bewerten der Größe	- Wahl der Fahrspur - Kondition des Probanden - Expertenmeinung / Abstimmung - Blickzuwendung	- Definition des Kriteriums - Fehlsichtigkeit - Körpergröße - Fahrstrecke		
Messen der Größe			- Messabweichungen	- Messabweichungen
Simulieren der Größe			- Rauschen	- Modellierung der Lichtsimulation - Einstellung der HDG
Berechnen des Wertes				- Berechnungsmethode der WB - Datenaufbereitung (Interpolation, ...)

Durch die wesentlich größeren zufälligen Abweichungen der Nachtfahrt wird deutlich, dass die Unsicherheit der wahrnehmungsbasierten Bewertung einer Berechnung beim relativen Vergleich geringer sind (vgl. Gleichung 3.4). Dies bedeutet eine bessere Eignung der WB für den Entwicklungsprozess als die Methode der Nachtfahrt, unter der Voraussetzung der hinreichenden Linearität beziehungsweise eines hohen Bestimmtheitsmaßes des verwendeten Modells der WB.

$$u_{relativ}(\bar{x}_{NF}) > u_{relativ}(\bar{x}_{WB}) \quad (3.4)$$

Eine weitere Verringerung der Abweichungen wird erreicht, wenn ausschließlich lichttechnische Systeme mit ähnlicher Lichtverteilung verglichen werden, da die WB die

Verteilung in diskreten Bereichen bewertet. Eine ähnliche Lichtverteilung weisen typischerweise Scheinwerfer mit gleichen lichttechnischen Systemen auf.

Für den Einsatz der WB im Entwicklungsprozess ist neben der hinreichenden relativen Genauigkeit auch ein absolutes Maß als Entwicklungsziel sinnvoll. Ein solcher Benchmark-Scheinwerfer kann einen oberen oder unteren Grenzwert definieren, wie er auch in der gesetzlichen Bewertung angewendet wird. Solche Grenzwerte können in der WB mittels eines maßstababbildenden lichttechnischen Systems definiert werden. Diese Scheinwerfer können in der WB entweder für jeweils ein Kriterium oder als gesamtes System die Werte definieren. Diese Methode ist bei Volkswagen umgesetzt worden und unter der Bezeichnung „Volkswagen Benchmarksystem“ veröffentlicht (vgl. [Kie08], [Kie09]).

3.4 Entwicklung einer Methode zur Streulichtbewertung

Ausgehend von der Anforderung, eine Berechnungsmethode zur Bewertung der Homogenität des Streulichtes zu entwickeln, wurde im Rahmen dieser Arbeit der Bewertungsvorgang im Lichttunnel untersucht. Es wurden die Inhomogenitäten des Streulichtes klassifiziert und mittels einer psycho-physikalischen Untersuchung die Bewertungsgrundlagen bereitgestellt. Dies kann bei Ziehl [Zie07a] und Mensch [Men09] vertieft werden. Es wurden grundlegende Formen der Inhomogenitäten sowohl zur visuellen Klassifizierung als auch zur Trennung in einer Bildverarbeitung bereitgestellt. Solche Grundformen wurden als jeweils helle und dunkle Kanten, Flächen (Spots) oder Wolken bezeichnet, wie in Anhang C.4 abgebildet. In den Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass die Größe der Inhomogenität und deren Lage zum Beobachter einen signifikanten Einfluss auf das Bewertungsergebnis haben. Es wurde gezeigt, dass Kanten eine schlechtere Bewertung erhalten als Flecken, horizontale und vertikale Strukturen sind schlechter als schräg ausgerichtete, und Charakteristiken, die heller als ihre Umgebung sind, werden schlechter bewertet als dunklere. Eine Bewertungsmethode muss also den Ort und die Ausdehnung der isolierten Artefakte berücksichtigen können. Weiterhin muss die Bewertungsmethode richtungsunabhängig beziehungsweise unabhängig von einer Vorzugsrichtung auf der Fläche wirken. Die Methode nach Kleinkes [Kle03] ist damit nicht anwendbar, wie bereits in Abschnitt 3.2 erwähnt. Nach den genannten Anforderungen wurde eine Software erarbeitet, die eine Bewertung mit den Methoden der Bildverarbeitung durchführt. Die Benutzeroberfläche ist in Teilen in Abbildung 3.9 links dargestellt. Grundlegende Funktionen der Software sind die Verarbeitung von Lichtverteilungen verschiedener Datenformate, eine Methode zur virtuellen Positionierung der Scheinwerfer, die gesetzliche Bewertung nach ECE R112 sowie ein Editor zur Änderung der Tunnelformen und -dimensionen, wie in Abbildung 3.9 gezeigt.

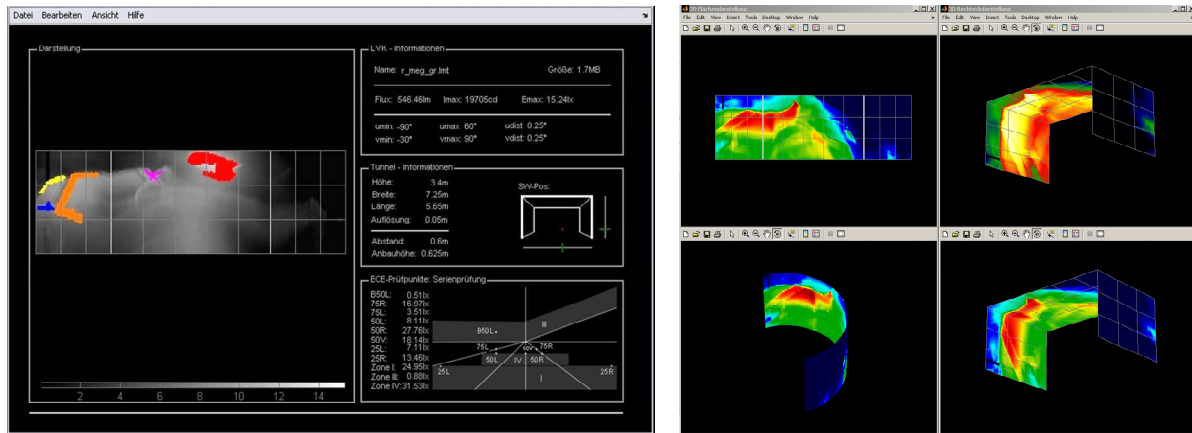


Abb. 3.9: Software zur Darstellung und Bewertung von Inhomogenitäten des Streulichts

Aus der gemäß ECE R112 in $r = 25 \text{ m}$ Abstand gemessenen und mittels des quadratischen Entfernungsgesetzes berechneten Lichtverteilung $I(\alpha_H, \alpha_V)$ wird die Verteilung der horizontalen Beleuchtungsstärken $E_h(x, y, z)$ im virtuellen Tunnel berechnet, wie in Abbildung 3.9 rechts dargestellt. Da die Flächen des realen Tunnels im Abstand $r \leq 10 \text{ m}$ nah an den beiden Scheinwerfern liegen, wurden die zu erwartenden Abweichungen durch das Unterschreiten der photometrischen Grenzentfernung untersucht (vgl. [Zie07a]). Es wurde gezeigt, dass die ortsabhängigen Charakteristiken durch den Nahfeldeinfluss nur geringfügig und in Form einer örtlichen Verschiebung bei großen Gradienten verändert werden. Somit konnte die Abweichung der Bewertung durch die im Fernfeld ermittelten Größen und der Berechnung von $E_h(x, y, z)$ im Nahfeld als vernachlässigbar eingestuft werden.

Die Beleuchtungsstärken $E_h(u, v)$ einer Fläche des Tunnels wurden aufgrund der Geometrie des Tunnels nicht auf Basis der Winkelauflösung der Lichtverteilung berechnet und aufgeteilt, sondern ausgehend von einer äquidistanten Rasteraufteilung der Tunnelflächen. Wie in Abbildung 3.10 rechts verdeutlicht, wird der Wert eines Tunnelrasterelementes aus vier Vektoren bilinear interpoliert, die den Vektor umgeben, der sich aus dem Mittelpunkt des Rasterelementes und dem Mittelpunkt des Scheinwerfers ergibt. Die vier umgebenden Vektoren und deren Werte werden der Lichtverteilung $I(\alpha_H, \alpha_V)$ direkt entnommen. Das Verfahren ermöglicht eine Berechnung der Beleuchtungsstärken ohne die störenden Abbildungsartefakte, die sich aus der Projektion an die schräge Tunnelgeometrie bilden. Besonders kritisch sind beispielweise die Bereiche der Tunneldecke über dem Scheinwerfer durch die Projektion der Pole der Verteilung $I(\alpha_H, \alpha_V)$ sowie entfernte Bereiche des Tunnels aufgrund der begrenzten Auflösung der Lichtstärkeverteilung. Die ohne Artefakte berechnete Verteilung $E_h(u, v)$ vermindert Abweichungen in der Bewertung des Streulichts. In Abbildung 3.10 sind weiterhin die Prinzipien der Vorwärts- und der Rückwärts-Berechnungsmethode dargestellt. Die Methoden werden bei von Hoffmann [Hof03], Mensch [Men09] sowie bei Press [Pre97] ausführlicher behandelt.

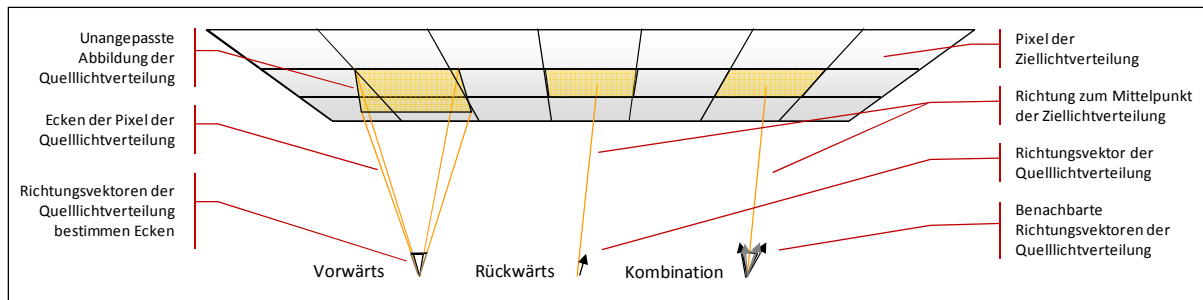


Abb. 3.10: Unterschiedliche Möglichkeiten zur Projektion der Lichtstärkewerte an die Tunnelwände, vgl. [Men09]

Das Verfahren zur Klassifizierung und Bewertung von Streulichtinhomogenitäten hat den in Abbildung 3.11 gezeigten Ablauf.

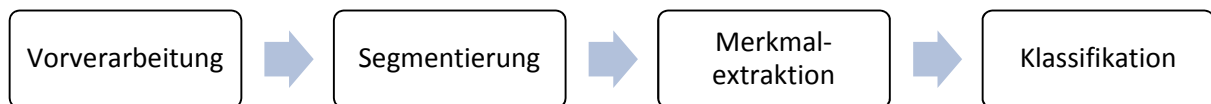


Abb. 3.11: Schema der Bildverarbeitung zur Streulichtbewertung

Die zur Vorverarbeitung nötige Detektion der Kanten in der Verteilung $E_h(u, v)$ erfolgt mit Hilfe eines Sobel-Operators nach Gleichung 3.5. Mittels der Faltung von $E_h(u, v)$ mit dem Operator kann die erste Ableitung der Bildpunkt-Helligkeitswerte und damit ein Gradientenbild erzeugt werden. Aus den Teilergebnissen G_x und G_y wird das richtungsunabhängige Gradientenbild $G(u, v)$ ermittelt.

$$G_x = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad G_y = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}, \quad G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (3.5)$$

Mittels eines Schwellwertverfahrens, unter Verwendung des Median und des Maximums jeder Zeile, wird anschließend ein Binärbild erzeugt. Zum Bereinigen des Binärbildes werden die morphologischen Operationen der Erosion und der Dilatation angewendet. So können irrelevante Streulichtcharakteristiken entfernt und die Originalgröße der verbleibenden Charakteristiken wieder hergestellt werden. Das Segmentieren und Listen zusammenhängender Bildanteile beziehungsweise Streulichtcharakteristiken erfolgt mittels des Zeilenkoinzidenzverfahrens. Nachfolgend sind zugeordnete Informationen zu Ausdehnung, Orientierung, Verlauf, mittlerer und maximaler Beleuchtungsstärke \bar{E} und E_{max} , sowie die mittleren und maximalen Werte \bar{E}' und E'_{max} aus dem Gradientenbild verfügbar. Die Abbildung 3.12 zeigt eine Visualisierung der Streulichtcharakteristiken.

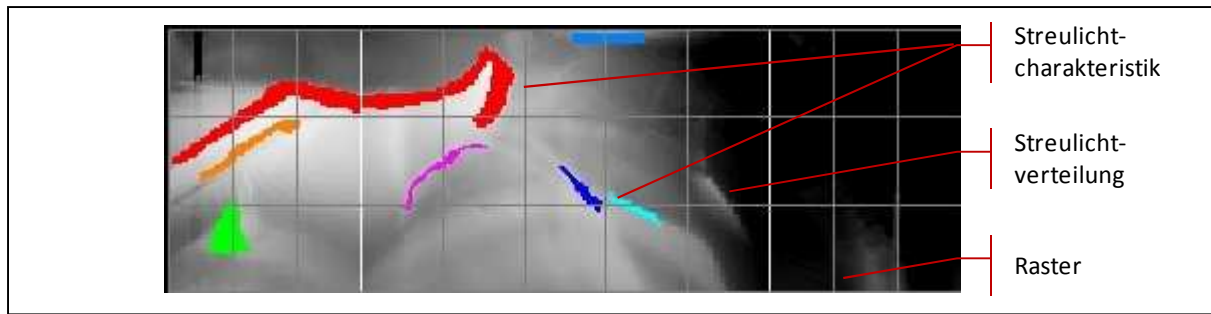


Abb. 3.12: Segmentierte Streulichtcharakteristiken in Beleuchtungsstärkeverteilung

In Tabelle 3.2 sind einige der zugehörigen Informationen dargestellt. Eine Klassifikation, auch nach abgeleiteten Kriterien wie der Form, ist mit den so erhaltenen Informationen möglich. Damit ist die Grundlage für eine Bewertung geschaffen, welche neben der Intensität auch die Form und Lage der Streulichtcharakteristik berücksichtigt.

Tabelle 3.2: Informationen einer Streulichtbewertung

Nr.	Fläche /m ²	Form	E_{max} / lx	\bar{E} / lx	E'_{max}	\bar{E}'
1 (rot)	1.75	Kante	11.40	4.26	4.73	0.89
2 (orange)	0.20	Kante	7.82	5.75	0.88	0.52
3 (grün)	0.25	Fleck	4.53	1.84	0.75	0.31

Durch die hohe Anzahl der Freiheitsgrade der Berechnungsmethode beziehungsweise der Kriterien und Einflussfaktoren, die zu einer Bewertung des Streulichts führen, ist die Ableitung und Evaluation einheitlicher und allgemeingültiger Modelle in dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Die erarbeiteten Grundlagen sind zudem für die Bewertung im Tunnel gültig und damit eingeschränkt auf die Nachtfahrtsituationen und die Nebelsituation, in denen Streulicht nachteilig wirkt, übertragbar. Damit ist die nachfolgende Verwendung nach der beschriebenen Methode, die auf die Zusammenfassung der wahrnehmungsbasierten Bewertung auf einen einzelnen Wert pro Kriterium abzielt, nicht durchführbar.

Ein Nutzen im Entwicklungsprozess ist bereits durch die Klassifizierung und Visualisierung der Streulichtcharakteristiken sowie durch die mögliche Rückverfolgung zur ursächlichen Geometrie des Scheinwerfers mittels Raytracing gegeben.

3.5 Verarbeitung und Vergleich von Lichtverteilungen

Den vorgestellten Berechnungsmethoden liegen je eine Lichtstärkeverteilung $I(\alpha_H, \alpha_V)$ der beiden Scheinwerfer oder die jeweilige Verteilung der Beleuchtungsstärke $E(\alpha_H, \alpha_V)$ auf der in ECE R112 definierten Messwand zu Grunde. Die Verteilungen werden mittels der in Kapitel 4 behandelten Messung durch ein Fernfeld-Goniophotometer und unter der Annahme der Einhaltung der photometrischen Grenzentfernung ermittelt. Die Umrechnung eines Wertes der Verteilung erfolgt somit unter Verwendung des photometrischen Entfernungsgesetzes mittels $I(\alpha_H, \alpha_V) = 25^2 \cdot E(\alpha_H, \alpha_V)$. Die Einschränkungen der

Gültigkeit der Annahme werden unter anderem durch Koos [Koo93], von Hoffmann [Hof03] und im Rahmen dieser Arbeit in [Kie07a] und Mensch [Men09] diskutiert.

In dieser Arbeit ist ein Vergleich von Lichtverteilungen respektive der Werte der durch die Winkel definierten Raumwinkelzonen wesentlich. Dazu müssen weitere Festlegungen für jede Verteilung $X(\alpha_H, \alpha_V)$ aus der Messung oder Simulation getroffen werden:

1. Die Winkelauflösung $\Delta\alpha$ muss konstant sein. Durch die Anforderungen an die Bewertung der HDG ist eine Messauflösung $\Delta\alpha_H = \Delta\alpha_V = 0,05^\circ$ einzuhalten (vgl. Abschnitt 5.1). Die Berechnung der Schärfe der HDG erfolgt mit $\Delta\alpha_V = 0,1^\circ$.
2. Das Polarkoordinatensystem des Goniometers (vgl. [GTB05], und [Cie87]) muss für zu vergleichende Verteilungen identisch sein oder gegebenenfalls in das gleiche System konvertiert werden. Typisch ist das System des Goniometers Typ A mit einer Messung des Azimuts über den Zenit.
3. Die Verteilung muss eine diskrete Messung bei $\alpha_H = \alpha_V = 0$ beinhalten. Die Grenze einer jeden Raumwinkelzone ist dann bei einem Vielfachen von $\Delta\alpha/2$.

Wenn die Voraussetzungen erfüllt sind, kann ein raumwinkelgenauer Vergleich der Werte und Verteilungen durchgeführt werden. Die Einflüsse und Abweichungen durch die unterschiedliche Art der Wertermittlung in Messung und Simulation sind in den Kapiteln 5 und 8 behandelt. Für die Analyse eines Vergleiches soll eine Methode der graphischen Darstellung der prozentualen Abweichungen der Werte $x_A(\alpha_H, \alpha_V)$ zu $x_B(\alpha_H, \alpha_V)$ der Größe X mittels der Verteilung der Werte der Deviation $D_X(\alpha_H, \alpha_V)$ nach Gleichung 3.6 eingeführt werden.

$$D_X(\alpha_H, \alpha_V) = \frac{(x_A(\alpha_H, \alpha_V) - x_B(\alpha_H, \alpha_V))}{x_B(\alpha_H, \alpha_V)} \cdot 100 \% \quad (3.6)$$

Die Methode schafft den graphischen Bezug zur originalen Werteverteilung und ist damit übersichtlich und einfach zu erfassen (vgl. Abbildung 5.6 oder 8.14). Es können Bewertungen eines Entwicklungsfortschritts, der Einfluss von geänderten Parametern oder die Abweichung von Messung und Simulation qualitativ-visuell und quantitativ vorgenommen werden. Mittels der graphischen Bewertung sind weiterhin statistische Analysen möglich, wie jene zur erweiterten Messunsicherheit. So kann die in Kapitel 4 und 7 vertiefte Verteilung der Messunsicherheiten nach GUM erzeugt werden (vgl. Abbildung 4.6).

Der weiterführende, quantitative Vergleich von Lichtverteilungen mittels Berechnungsmethoden wurde von Ashdown [Ash99] durchgeführt. Die von Ashdown verwendete Hausdorff distance metric verliert dabei die Orts- oder Richtungsinformation und ist damit für die Aufgabenstellung weniger geeignet.

Filterung

Die Anwendung einer Filterung ist ein typischer Vorgang in der Weiterverarbeitung gemessener wie auch simulierter Lichtverteilungen $X(\alpha_H, \alpha_V)$. Die Filter werden vorrangig

zur Glättung des Rauschens, hier überwiegend zufälliger und näherungsweise normalverteilter Abweichungen der Einzelwerte, eingesetzt. Es wird in Kapitel 8 gezeigt, dass überwiegend simulierte Lichtverteilungen den Bedarf zur Glättung ausweisen, wobei Manz [Man00] auch die Notwendigkeit des Einsatzes für gemessene Lichtverteilungen zeigt. Zugleich stellt Manz die Nachteile des gleitenden Mittelwertfilters dar. Mittelwertfilter erzeugen systematische Abweichungen bei Charakteristiken der Lichtverteilungen mit hohen Ortsfrequenzen, wie das Lichtstärkemaximum der Abblendlichtverteilung oder den Gradienten der Hell-Dunkel-Grenze.

Ein typischer Mittelwertfilter ist der Box-Operator, bei dem sukzessive der Wert $x_i(\alpha_H, \alpha_V)$ der Lichtverteilung durch den Mittelwert der umgebenden Werte innerhalb der Box, einer $m \times m$ – Matrix, ersetzt wird (vgl. Engehausen [Eng01]). Dieser Filter wird in den in Kapitel 8 beschriebenen Programmen zur Lichtsimulation angewendet. Der ebenfalls auf Basis einer Matrix arbeitende Medianfilter verwendet den mittleren Wert.

Manz [Man00] verwendet als Filtermethode den Savitzky-Golay-Operator, der ein Polynom auf eine zweidimensionale Lichtverteilung anwendet. Das Polynom wirkt dann wiederum stückweise ähnlich einem gleitenden Mittelwertfilter und ist in Abhängigkeit von der Charakteristik der Verteilung lokal begrenzt geeignet. Die Anwendung bei der Analyse der Gradienten der HDG, wie von Manz durchgeführt, wird in Abschnitt 5.2 behandelt.

Um eine umfassende Filtermethode für gemessene und simulierte Abblendlichtverteilungen bereitzustellen, wurde im Rahmen dieser Arbeit die Waveletfilterung untersucht und evaluiert (vgl. [Zie07], [Kie07a]). Die Grundlage hierfür bildet die zeilen- und spaltenweise, in dieser Anwendung die azimut- und zenitwinkelweise, Wavelet-Transformation der Lichtverteilung mittels Haar-Wavelet. Dabei können die Ortsfrequenzen und damit die Stör- und Bildanteile getrennt und ein Tiefpassfilter zur Rauschreduktion angewendet werden. Dieser Vorgang umfasst vier grundlegende Schritte:

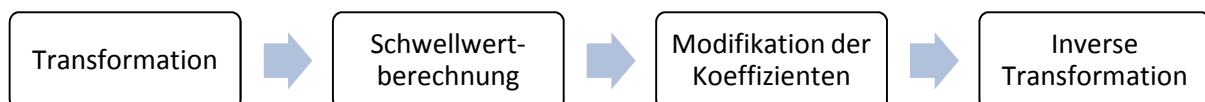


Abb. 3.13: Schema der Waveletfilterung

Die Modifikation der Waveletkoeffizienten wird dabei mittels der Shrinkage-Funktion und einer festgelegten Schwelle erreicht. Zur Berechnung der Schwelle wird die Varianz der Lichtverteilung zugrunde gelegt und das Verfahren nach Donoho und Johnstone (vgl. [Eic04]) angewendet. Als mögliche Shrinkage-Funktionen sind die Methoden Hard, Soft und Garrote evaluiert worden. Diese Methoden können in [Bän02] oder [Wed07] vertieft werden.

Für die Evaluation der Waveletfilterung wurden simulierte Lichtstärkeverteilungen verwendet. Dabei wurde der in dieser Arbeit untersuchte Scheinwerfer simuliert (vgl. Kapitel 8). Die Soll-Lichtverteilung ist mit $N_{aus} = 1 \cdot 10^8$ gestarteten Strahlen berechnet worden, was in Verbindung mit einer festen Winkelschrittweite $\Delta\alpha_H = \Delta\alpha_V = 0,1^\circ$ zu einer weitgehend rauscharmen Verteilung $I(\alpha_H, \alpha_V)$ führte. Die Unsicherheit der Simulation in Abhängigkeit von der Strahlenanzahl wird in Kapitel 8 untersucht. Eine anschließende

Simulation mit $N_{aus} = 5 \cdot 10^6$ ergab die zu filternde Lichtstärkeverteilung. In Tabelle 3.3 sind die maximalen Lichtstärken $I_{max}(\alpha_H, \alpha_V)$, die Teillichtströme Φ_t und die mittleren quadratischen Fehler MSE der einzelnen Filtermethoden aufgelistet.

Tabelle 3.3: Vergleich der Glättungsmethoden (vgl. [Zie07])

Filtermethode	I_{max} / cd	Teillichtstrom Φ / lm	MSE
Soll – Lichtverteilung $N_{aus} = 1 \cdot 10^8$	18055	773,79	
Mittelwert	16878	773,79	11833,74
Median (3x3)	16816	771,88	12458,64
Hybrid-Median	16846	771,82	7771,78
Savitzky-Golay	17650	774,10	5751,49
Wavelet – Level 1			
Soft	17875	773,79	3390,89
Hard (THR = 100)	18055	773,79	1321,44
Garrote	18020	779,79	2311,72
Wavelet – Level 2			
Soft	17775	773,78	4468,24
Hard (THR = 100)	18046	773,78	1626,57
Garrote	17989	773,78	2977,44

Der Vergleich der Tabelle 3.3 zeigt, dass die Waveletfilterung mit Level-1-Schwelle und Hard-Shrinkage die beste Methode zum Erhalt der Charakteristiken des Untersuchungsbeispiels ist. Die Qualität der Glättung ist zudem in Abbildung 3.14 dargestellt. Dabei ist die obere Verteilung nicht geglättet, während die untere rechte Verteilung mittels Waveletfilterung optimiert wurde. Auch hier sind die wesentlichen Gradienten und Maxima erhalten und die Zonen niedriger Werte sind rauscharm. Die untere linke Verteilung ist im Gegensatz dazu mittels Mittelwertfilterung geglättet, was neben einer Glättung des Rauschens auch zu einer Beeinflussung der hohen Werte und Maxima führt.

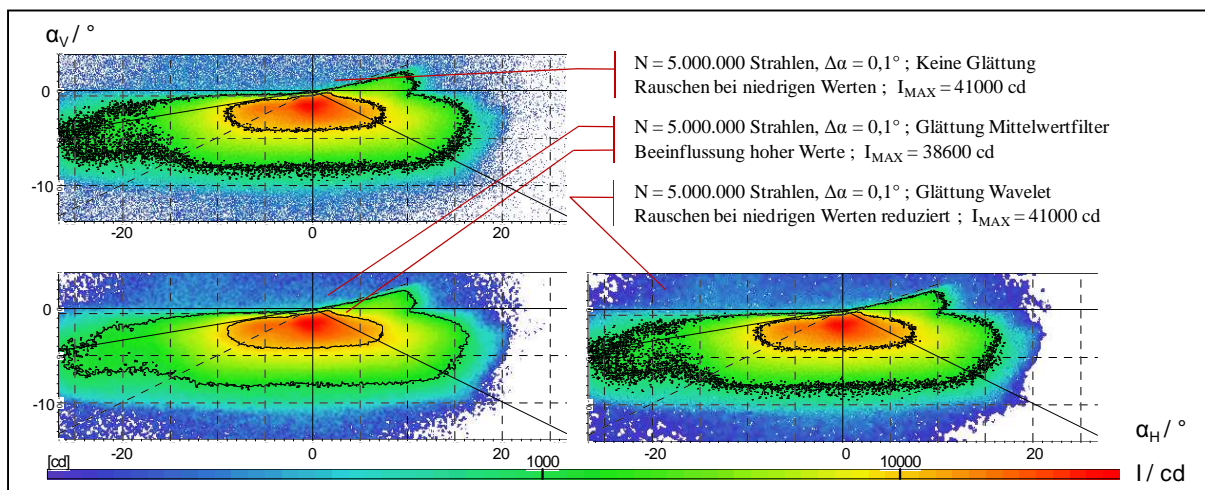


Abb. 3.14: Nicht geglättete und mittels Wavelet und Mittelwertfilter geglättete Lichtstärkeverteilung

Wird der maximale Gradient G_{max} der Lichtverteilungen im Bereich von $-5^\circ \leq \alpha_H \leq 5^\circ$ berechnet, so stellt sich die Verteilung wie in Abbildung 3.15 links dar. Dabei ist G ein Maß für den Gradienten und damit für die Schärfe, gemäß der Gleichung 5.3 in Abschnitt 5.1. Die maximalen Gradienten sind durch das Rauschen teilweise örtlich verschoben. Eine Ausrichtung der HDG, wie in Kapitel 5 gezeigt, ist anhand dieses Verlaufes ungünstig. Wird die Berechnung des G -Wertes basierend auf der Wavelet-gefilterten Lichtstärkeverteilung vorgenommen, so zeigt sich der in Abbildung 3.15 rechts dargestellte, optimierte Verlauf der HDG.

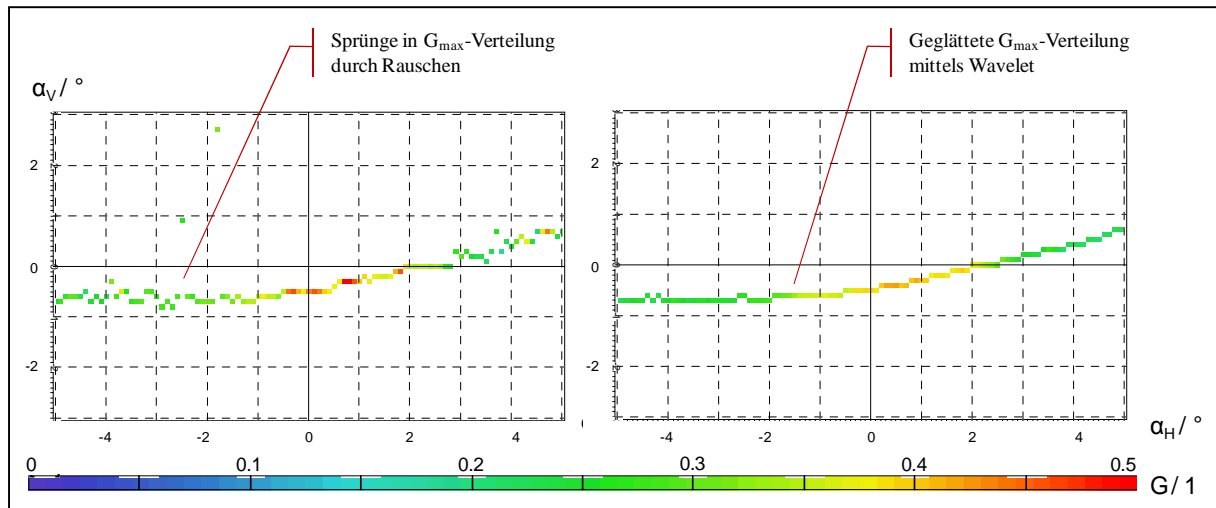


Abb. 3.15: Verlauf der G -Werte einer nicht geglätteten und einer mittels Wavelet geglätteten LVK

Die Methode der Glättung mittels Wavelet-Filterung wurde eingeführt und im Rahmen der Arbeit bei Ziehl [Zie07] evaluiert. Die wesentlichen Vorteile beim Erhalt charakteristischer Merkmale der Abblendlichtverteilung wurden aufgezeigt. Die hohe Anzahl der Freiheitsgrade lässt eine Vereinheitlichung der Koeffizienten der Glättungsmethode nicht zu. Die Abweichungen der Werte $x(\alpha_H, \alpha_V)$ konnten nicht quantifiziert werden. Deswegen soll die Wavelet-Filterung im weiteren Verlauf der Arbeit nicht angewendet werden. Mit Ausnahme der Validierung der Ausrichtemethode in Kapitel 5 wird auch keine andere Filterung angewendet.

Nach der Beschreibung der Lichtverteilungen als Grundlage für die Bewertung sollen anschließend ihre Quellen untersucht werden: die Messung und die Simulation. Da die Messung durch die Simulation abgebildet werden muss, wird im folgenden Kapitel zuerst die Photometrie untersucht. Die Analyse der Unsicherheit der Messung gibt Auskunft über die Abweichungen der wahrnehmungsbasierten Bewertung, wie abschließend in Kapitel 8 beschrieben.

4 Analyse der Photometrie der Typprüfung

Im vorherigen Kapitel wurden Berechnungsmethoden für Bewertungen eingeführt, die auf Verteilungen der lichttechnischen Größen Lichtstärke $I(\alpha_H, \alpha_V)$ und Beleuchtungsstärke $E(\alpha_H, \alpha_V)$ basieren. Die Größen sind für Abstände außerhalb der photometrischen Grenzentfernung $r > r_g$ gültig und werden auf polare Koordinaten bezogen. Weiterhin ist in Abschnitt 2.4 eine Zielstellung der Arbeit abgeleitet worden: Es soll die Abbildung dieser Bewertungen durch die Lichtsimulation untersucht werden. Dazu ist ein Vergleich der durch die Messung erhaltenen Werte $x_M(\alpha_H, \alpha_V)$ mit den durch die Simulation ermittelten Werten $x_S(\alpha_H, \alpha_V)$ nötig. Für einen Vergleich ist weiterhin die Kenntnis der Genauigkeiten und damit der Unsicherheiten $u(x(\alpha_H, \alpha_V))$ der Mess- und Simulationsverfahren wichtig, um die Signifikanz von Abweichungen bewerten zu können (vgl. Abschnitt 3.3). Die Abbildung 4.1 zeigt schematisch diesen Vergleich. Dabei wird deutlich, dass die Abweichungen des Messwertes x_M von dem durch die CAD-Geometrie definierten Wert x_{Soll} sowohl vom Messobjekt selbst als auch vom Messgerät verursacht werden. In entsprechender Weise weicht der simulierte Wert x_S sowohl durch die lichttechnische Modellierung der CAD-Flächen als auch durch die Berechnung der lichttechnischen Werte ab. Da die Anforderungen der Typprüfung die Mindestanforderung an die lichttechnische Funktion und deren Werte definieren, muss die Simulation die Typprüfung direkt abbilden. Daher werden die Werte x_M als richtige Werte im Sinne der DIN 1319 Teil 1 [Nor95] beziehungsweise vereinbarte Werte nach VIM [Nor08a] definiert.

Durch eine Unsicherheitsanalyse der messungsbasierten Typprüfung sind die Einflussgrößen, deren Empfindlichkeiten und Unsicherheitsbeiträge zu ermitteln. Maßgebliche Einflussgrößen sollen dann in der Lichtsimulation abgebildet werden. Zudem sind Potentiale zur Optimierung des Messverfahrens abzuleiten. Das genannte Vorgehen wird vom Autor auch in [Kie07a] dargestellt.

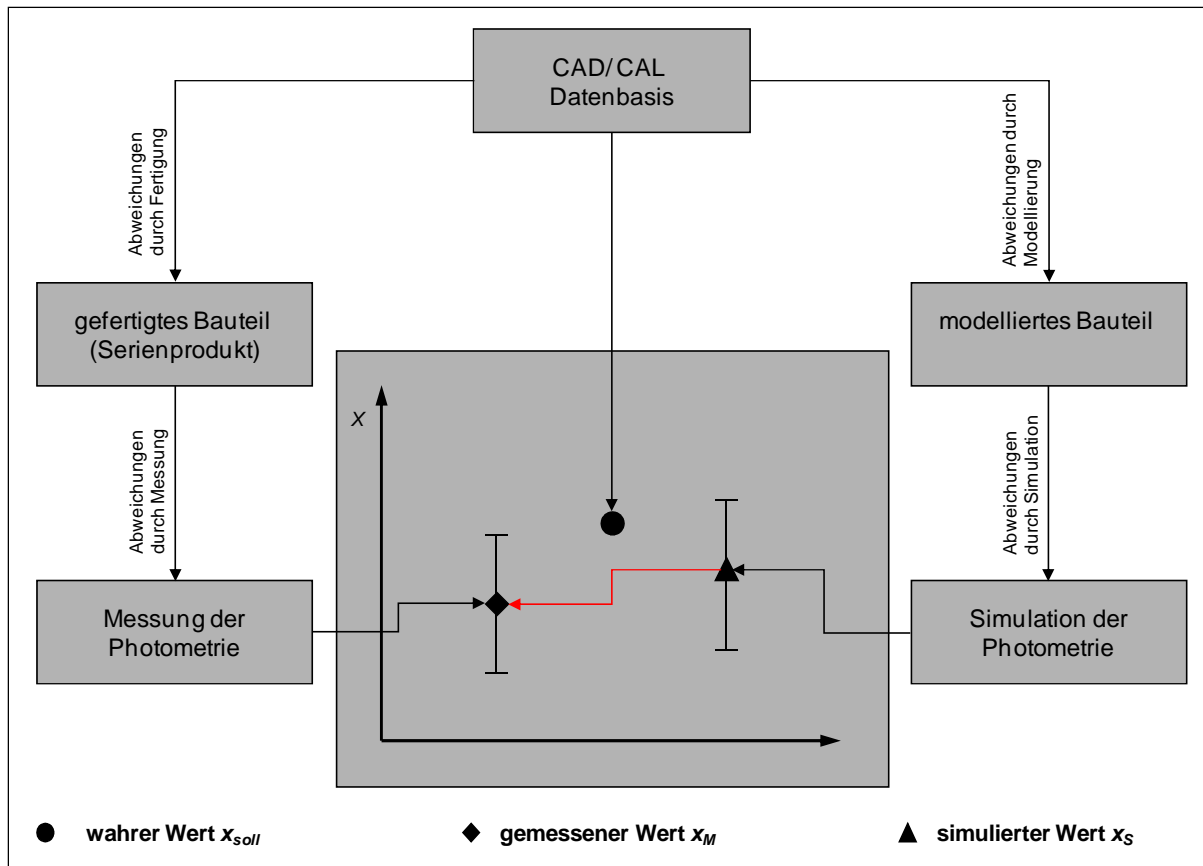


Abb. 4.1: Schema des Vergleichs gemessener und simulierter Werte

4.1 Analyse der Unsicherheit der Messung am Goniophotometer

In den gesetzlichen Regelungen zur photometrischen Typprüfung, maßgeblich also der ECE [Ece08], [Ecerg] und der FMVSS [Fmvov], sind lichttechnische Größen und Messabstände sowie Messpositionen festgelegt. Weiterhin sind eingrenzende Parameter zur Messung angegeben, beispielsweise zur Art der Lichtquelle, zu deren elektrischer Kontaktierung oder zur Ausrichtung der Scheinwerfer. Dagegen werden keine Messvorgänge oder Messmittel vorgeschrieben. Dadurch ist die Analyse in diesem Abschnitt exemplarisch und nur eingeschränkt gültig. Die Vergleichbarkeit der photometrischen Typprüfung nach ECE R112 zur Prüfung nach ECE R98 und zur SAE J1318 ist insofern gegeben, dass die nachfolgend behandelten Messverfahren identisch sein können. Darauf basierend sind im Leitfaden der „GTB Working Group Photometry“ [Gtb05] Hinweise zur Durchführung der Messung sowie Toleranzangaben der Messmittel und Bestandteile angegeben, die hier Beachtung finden.

Die Messung der Größe $E_M(\alpha_H, \alpha_V)$ des Scheinwerfers erfolgt überwiegend mittels eines Fernfeld-Goniophotometers, das in Abbildung 4.2 dargestellt ist. Das Messgerät enthält als wesentliche Bestandteile das Goniometer zur Winkeleinstellung und zur Aufnahme des Messobjektes sowie das im Abstand $r = 25\text{ m}$ aufgestellte Photometer. Es wird überwiegend ein Goniometer Typ A nach [Gtb05], [Cie87] verwendet. Die alternativen Goniometer des

Typs B oder die manuelle Messung an der Messwand spielen eine untergeordnete Rolle. Die Werte der Größe $I_M(\alpha_H, \alpha_V)$ werden gemäß dem quadratischen Entfernungsgesetz aus dem Messergebnis ermittelt.

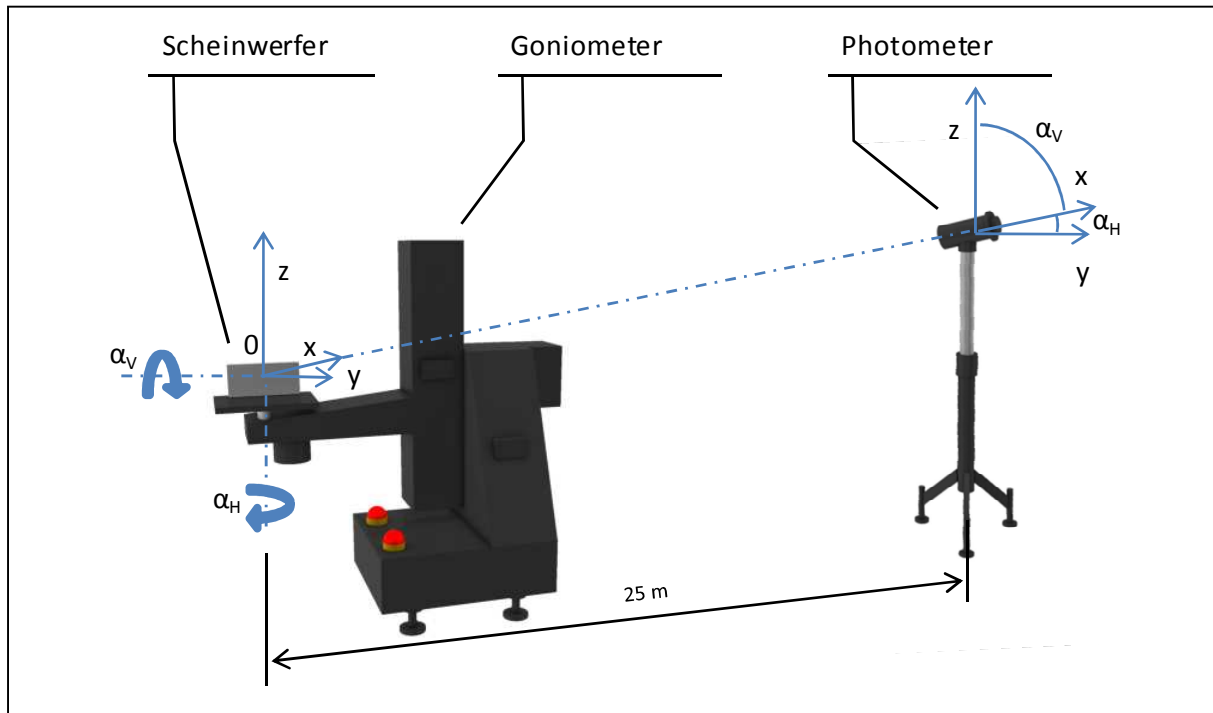


Abb. 4.2: Bestandteile eines Goniophotometers zur Scheinwerfermessung

Die Bestandteile der Messung sind mit der Reihenfolge des Messablaufes in Abbildung 4.3 dargestellt und werden vom Autor in [Kie07a] auch für die Prüfung von Leuchten nach ECE R7 diskutiert. Wesentliche Einflüsse sind zur Verdeutlichung bereits aufgeführt. Eine maßgebliche Eigenschaft ist die Trennung des Scheinwerfers und der austauschbaren Lichtquelle.

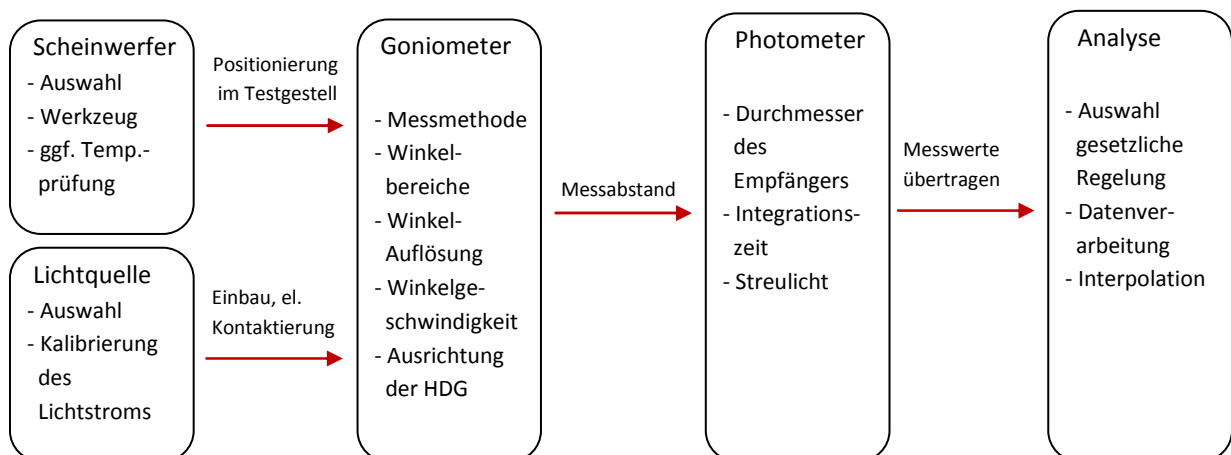


Abb. 4.3: Bestandteile der Messung zur photometrischen Typprüfung

Die Analyse der Unsicherheiten des Messverfahrens kann auf Basis des GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) [Gum95], [Nor08] erfolgen. Die Methode nach GUM erlaubt die gemischte Verwendung von Unsicherheitsbeiträgen, erhalten aus einer

Analyse nach Typ A (statistisch) und Typ B (mittels Wahrscheinlichkeitsverteilungen aus Erfahrungswerten oder Herstellerangaben). Der Ablauf der Messunsicherheitsanalyse beinhaltet:

- die Identifizierung der Eingangsgrößen
- die Abschätzung bzw. Quantifizierung der Unsicherheitsbeiträge der Einflussgrößen sowie deren Wahrscheinlichkeitsverteilung
- das Aufstellen der Modellgleichung und damit die Bestimmung des funktionalen Zusammenhangs zwischen den Eingangsgrößen und der Ergebnis- bzw. Messgröße
- die Bildung der partiellen Ableitungen zur Ermittlung der Empfindlichkeiten; diese geben die Stärke der Änderung der Ausgangsgröße in Bezug auf die Änderung der jeweiligen Eingangsgröße an
- die Erstellung des Unsicherheitsbudgets

Die Komponenten und Einflussgrößen der Scheinwerferfunktion und damit der Messung sind in Abbildung 4.4 vereinfacht dargestellt.

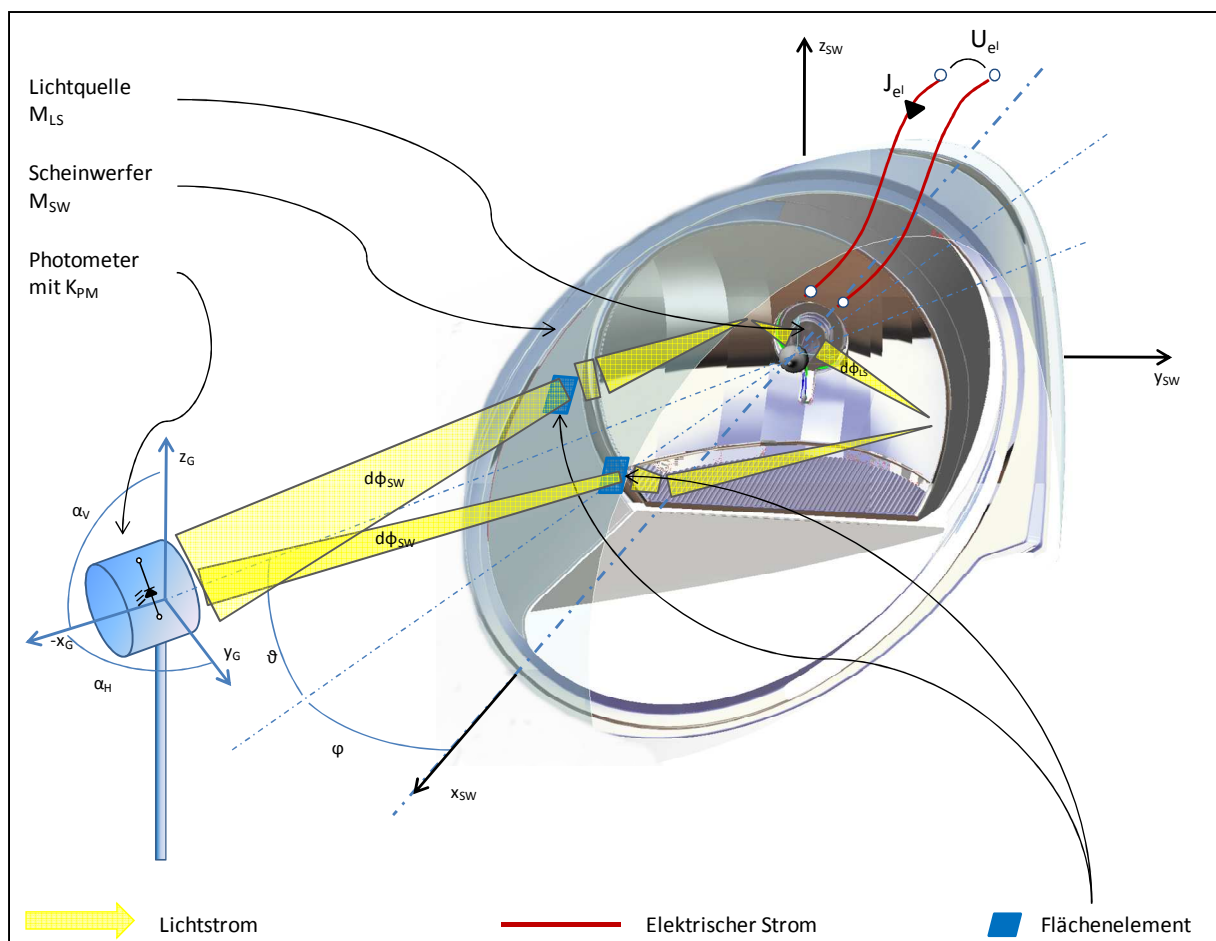


Abb. 4.4: Schema der Scheinwerferfunktion und Messung

Die Bestimmung der wesentlichen Einflussgrößen erfolgte in dieser Arbeit durch die Analyse der Funktion, durch Voruntersuchungen sowie durch Befragungen von Experten. Die Auswahl wurde mit den Auflistungen in GTB [Gtb05] und bei Diem [Die07] abgeglichen. Die Analyse und Modellierung der Einflussgrößen, separiert nach den lichttechnischen Funktionselementen, wird nachfolgend beschrieben.

Die Lichtquelle

Nach ECE R37 [Ece05] müssen für die Messung ausgewählte Lichtquellen mit besonders engen geometrischen und photometrischen Toleranzen verwendet werden. Diese werden als Prüf-Glühlampen bezeichnet. Für die Prüf-Glühlampe ist ein Nennlichtstrom Φ_{NENN} definiert, im Unterschied zur SAE J1318, bei der eine Prüfspannung $U_{\text{el,NENN}}$ festgelegt ist. Anstelle der direkten und kostenintensiven Verwendung der zertifizierten Prüf-Glühlampe ist es gängige Praxis, die Lichtquellen eines Lampentyps, Herstellers und Derivates nur geometrisch auszuwählen, gegen die Prüf-Glühlampe zu kalibrieren und anschließend zur Messung einzusetzen. Diese Messlampen werden überwiegend bei Messungen zur Qualitätssicherung angewendet. Die für diese Arbeit nötige statistische Untersuchung an Lampen und Scheinwerfern wurde mit Messlampen durchgeführt, da eine hinreichende Menge an Prüf-Glühlampen nicht verfügbar war und die Messlampen den ungenaueren Fall der Praxis abbilden.

Die Kalibrierung der Messlampe, vielmehr die Zuweisung des einzuprägenden Stroms J_{NENN} für einen Nennlichtstrom $\Phi_{\text{NENN}}(J)$, erfolgt typischerweise in einer Ulbricht-Kugel, die zuvor selbst mit der entsprechenden Prüf-Glühlampe kalibriert wurde (vgl. [Gtb05], [Rat95]). Die Unsicherheitsanalyse der verwendeten Kugel wurde durch Ortlieb [Ort05] gemäß GUM durchgeführt. Der von Ortlieb ermittelte relative Unsicherheitsbeitrag der Ulbricht-Kugel von $w(\Phi_{\text{LS}}) = 1,06\%$ geht von einer erweiterten Unsicherheit der Prüf-Glühlampe $W(\Phi_{\text{LS,ET}}) = 1,5\%$ und von Bediener-, Kugelfaktor- und nicht identifizierbaren Abweichungen aus. Entsprechend Ortlieb soll hier $W(\Phi_{\text{LS}}) = 2,12\%$ angewendet werden. Der geringe Wert ist vermutlich durch den spezifischen Untersuchungsgegenstand von Ortlieb begründet und wird gemeinhin größer geschätzt. Aufgrund der Anzahl und Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Eingangsgrößen soll eine Normalverteilung angenommen werden.

Für die nötige Modellierung des Zusammenhangs $\Phi = \Phi(J)$ wurden Reihenmessungen mit zwölf Exemplaren der Lampe H7, Typ 64210L+ in der Ulbricht-Kugel durchgeführt, die von OSRAM unter der Bezeichnung Superlonglife geführt werden. Die Messwerte sind in Abbildung 4.5 anhand von drei Graphen dargestellt. Als Ergebnis ist eine lineare Abhängigkeit nach $\Phi_{\text{LS}} = m \cdot J + n$ mit einem durchschnittlichen $R^2 > 0,99$ am Arbeitspunkt ermittelt worden. Dies wird vom Autor in [Kie07a] beschrieben. Das Verhalten der Temperaturstrahler im gesamten Arbeitsbereich im Kfz ist nicht linear, wie in Diagramm D.1, im Anhang D dargestellt.

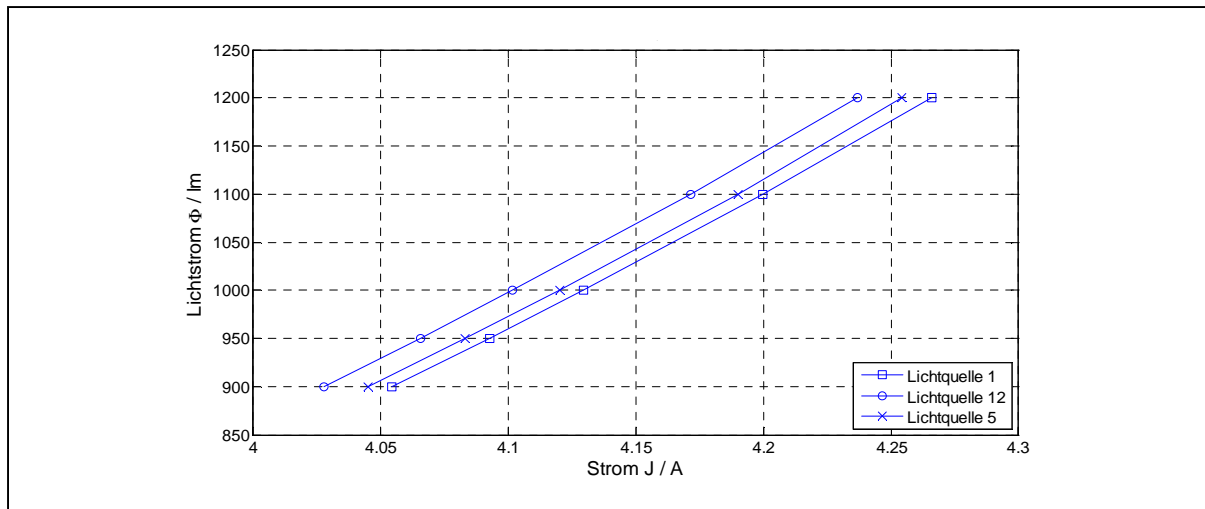


Abb. 4.5: Verhalten des Lichtstroms abhängig vom elektrischen Strom der H7, SLL-A

Die Unsicherheit der Koeffizienten $u(m)$ und $u(n)$ der Regressionsgeraden können nach Matus [Mat05] zu einer Unsicherheit des aus der Geraden ermittelten Lichtstroms $u(\Phi_{LS})$ errechnet werden. In diesem Fall würde der Unsicherheitsbeitrag nur von der Wiederholpräzision abhängen und somit die unbekannt, aber typischerweise sehr geringen Abweichungen der Linearität des Photometers und der Stromversorgung am Arbeitspunkt beinhalten. Deswegen soll dieser Beitrag in diesem Modell vernachlässigt werden. Soll die Analyse nicht nur für eine Lampe und deren physikalische Eigenschaften, sondern für abweichende Bauformen oder Derivate gelten (vgl. Kapitel 6), so ist die Standardabweichung der Koeffizienten $u(m)$ und $u(n)$ zu ermitteln und nach Matus einzubringen. Weitere nicht durch eine Wiederholmessung zu eliminierende Unsicherheitsbeiträge der Ulbricht-Kugel sind nach Ortlieb [Ort05] mit $w(K1) = 0,1\%$ durch den Bedienerinfluss und $w(K3) = 0,17\%$ für zufällige nicht identifizierbare Fehler aufgeführt.

Der für den Lichtstrom der Lichtquelle ursächliche Strom J mit der beigeordneten relativen erweiterten Messunsicherheit $W(J)$ ist der Stromquelle des Goniometers bzw. des Strommessgerätes zu entnehmen. In dieser Untersuchung sei $W(J) = 1,2\%$, entnommen aus dem Datenblatt $\pm 0,023 A$ bei $J \approx 4 A$ des Messgerätes Fluke 189 (vgl. Datenblatt Fluke 189 bei [Fluom]).

Die Leuchtdichte der Lichtquelle ist abhängig von Ort, Richtung und dem Lichtstrom. Es gilt $L_{LS,k}(\Phi_{LS,k}, x, y, z, \vartheta, \varphi)$ mit k als Index der wechselbaren Lichtquelle. Die Leuchtdichteverteilung der Lichtquelle ist inhomogen und wird in Abbildung 6.9 dargestellt. Da während einer Goniophotometermessung die Lichtquelle in ihren Eigenschaften als hinreichend konstant angenommen werden kann (vgl. Abschnitt 6.3), wird die Übertragungsfunktion als konstante Größe $M_{LS,k}(x, y, z, \vartheta, \varphi)$ modelliert. So kann mittels $L_{LS,k}(x, y, z, \vartheta, \varphi) = M_{LS,k} \cdot \Phi_{LS,k}$ der Zusammenhang von Lichtstrom und der ausgehenden Leuchtdichte beschrieben werden.

Der Scheinwerfer

Eine zeitliche Konstanz der lichttechnischen Funktion des Scheinwerfers $L_{SW,l}(t) = konst.$ ist Voraussetzung für die Modellierung der Scheinwerferfunktion als zeitlich konstante Funktion $M_{SW,l}(x, y, z, \vartheta, \varphi)$, mit l als Index des Scheinwerfers. Die Funktion beinhaltet den Transfer der Leuchtdichten der Komponenten (vgl. Abbildung 4.4). Somit gilt $L_{SW,l}(x, y, z, \vartheta, \varphi) = M_{SW,l} \cdot L_{LS,k}(x, y, z, \vartheta, \varphi)$. In Verbindung mit dem in die Betrachtungsrichtung projizierten Anteil der scheinbar leuchtenden Fläche $A_{SW,l}(x, y, z, \vartheta, \varphi)$ kann die Lichtstärke $I_{SW,l}(\vartheta, \varphi)$ abgeleitet werden.

Die Unsicherheit der Leuchtdichte des Scheinwerfers $u(L_{SW})$ wird in dieser Analyse nicht betrachtet, da hier ausschließlich das Messgerät und nicht das Messobjekt analysiert werden soll. Die Analyse des Scheinwerfers wird in Abschnitt 4.2 weitergeführt.

Das Goniometer und die Ausrichtung der HDG

Das Goniometer ordnet die Winkel ϑ, φ des Scheinwerfers den Winkeln α_H, α_V der Typprüfung zu und damit $\varphi \rightarrow \alpha_H, \vartheta \rightarrow \alpha_V$ sowie $L_{SW}(x, y, z, \vartheta, \varphi) \rightarrow L_{SW}(x, y, z, \alpha_H, \alpha_V)$. Vor der Messung, bei der Einrichtung des Scheinwerfers auf dem Goniometer, erfolgt die Ausrichtung der HDG als weitere Einflussgröße der Zuordnung, was in Abschnitt 5.4 betrachtet wird.

Weiterhin wird die Position des Scheinwerfers x_{SW}, y_{SW}, z_{SW} dem Koordinatensystem des Goniometers x_G, y_G, z_G zugeordnet. Dies erfolgt manuell, mittels des jeweils zum Scheinwerfer gehörenden Testgestells, der Verstelleneinheiten des Goniometers und einer Laser-Markierung. Als Referenz der Zuordnung gelten die Typprüfmarkierungen auf der Lichtscheibe oder der Durchstoßpunkt der Lampenlängsachse mit der Außenlichtscheibe, die nach Auswahl eindeutig die $x_{SW}, y_{SW}, z_{SW} = 0,0,0$ definieren und damit mit dem Drehpunkt des Goniometers in $x_G, y_G, z_G = 0,0,0$ übereingebracht werden können. Die Rotationsachse y_{SW} wird durch das Goniometer und Testgestell invariant definiert. Damit ist die Zuordnung des Koordinatensystems des Scheinwerfers zum globalen Koordinatensystem vollständig.

Die Abweichungen der Zuordnung durch den Einrichtevorgang bedingen eine Unsicherheit der Position x_G, y_G, z_G . Die Abweichungen der Ausrichtung und der Winkelgenauigkeit des Goniometers führen zu einer Unsicherheit der Winkelposition α_H, α_V . Die Positioniergenauigkeit des Referenzpunktes mittels Laserpunkt wird mit $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \pm 3 \text{ mm}$ abgeschätzt und geht in die Abweichungen des Abstandes des Photometers ein. Die Unsicherheitsbeiträge $u(\alpha_H)$ und $u(\alpha_V)$ bedingen eine Unsicherheit der Messgröße $u(E_{LAMP}(\alpha_H, \alpha_V))$ in Abhängigkeit von der jeweiligen Lichtverteilung. Wie in Kapitel 5 gezeigt wird, sind die Unsicherheitsbeiträge $u(\alpha_H)$ und $u(\alpha_V)$ selbst von der spezifischen Lichtfunktion abhängig. Die Ausrichtung der HDG wird als Bestandteil der Abweichungen des Scheinwerfers betrachtet und damit in Kapitel 5 untersucht. Die verbleibenden Abweichungen der Winkelpositionierung des Goniometers können als vernachlässigbar angenommen werden, wenn die Gerätegenauigkeit für die geforderte Winkelauflösung

hinreichend ist. Als Messauflösung wird in Abschnitt 3.5 $\Delta\alpha = 0,05^\circ$ gefordert. Die Winkelpositioniergenauigkeit des verwendeten Goniometers wird vom Hersteller mit $\Delta\alpha = 0,01^\circ$ angegeben. Die relative Wiederholpräzision wird als höher angenommen, da der Untersuchungsgegenstand immer gleiche Massen einprägt, die deutlich unter den zulässigen 40 kg liegen. Die Unsicherheitsbeiträge der Winkelpositionierung werden aufgrund der Abhängigkeit vom Fallbeispiel in Abschnitt 5.4 gemeinsam mit den Unsicherheiten des Fallbeispiels ermittelt und in der Analyse der Messgeräte nicht eingebracht.

Das Photometer

Das Photometer misst die Ergebnisgröße E_{SW} in einem Abstand r vom ausgerichteten Scheinwerfer beziehungsweise von $x_G = y_G = z_G = 0$ des Goniometers. Der Messwert wird mittels der Auswertesoftware den jeweiligen Winkeln α_H, α_V des Goniometers zugeordnet und $E_{SW}(\alpha_H, \alpha_V)$ gebildet. Durch die vorausgesetzte Einhaltung der photometrischen Grenzentfernung reduziert sich das Modell auf Gleichung 4.1.

$$E_{SW}(\alpha_H, \alpha_V) = L_{SW,I}(\alpha_H, \alpha_V) \cdot A_{SW,I}(\alpha_H, \alpha_V) \cdot r^{-2} \quad (4.1)$$

Die Abweichungen und Unsicherheitsbeiträge sind damit reduziert auf die Beiträge des Photometers $u(E_{MESS})$ und des Abstandes $u(r)$. Der Unsicherheitsbeitrag des Photometers wird durch den Hersteller LMT mit $W(E) = 1\%$ angegeben. Es wird eine Rechteckverteilung angenommen.

Die Unsicherheit des Abstandes r setzt sich aus den Abweichungen der Positionierung des Scheinwerferursprungs am Goniometer $\Delta r_{SW} = \Delta z_{SW}$ sowie der Unsicherheit der Positionierung des Photometers r_P zusammen. Der Abstand des Photometers wurde mit einem Wegmessgerät Leica Disto A5 [Leiom] gemessen, bei dem auf der Weglänge 25 m eine Abweichung von $\Delta r_P = \pm 0,003$ m angenommen wird. Der untersuchte Scheinwerfer konnte in einem Vorversuch ebenfalls innerhalb vom $\Delta r_{SW} = \pm 0,003$ m positioniert werden. Unter Annahme einer Rechteckverteilung mit $u_x = \Delta r_x / \sqrt{3}$ und quadratischer Addition ergibt sich $u(r) = 0,00245$ und $W(r) = 0,02\%$.

Weiterhin treten bei Scheinwerfern signifikante Abweichungen der lichttechnischen Funktion über den Zeitraum der Serienfertigung sowie über die Lebensdauer des Produktes auf. Diese Abweichungen sind für die Typprüfung der ECE nicht relevant und sollen nicht betrachtet werden. Um die Funktion zu gewährleisten, werden Sicherheitsfaktoren auf die geforderte Mindestfunktion angewendet.

Modellgleichung

Das Modell für die Messgröße kann aufgrund der dargestellten Zusammenhänge auf eine Analyse der Messunsicherheit des Wertes ohne Berücksichtigung der Unsicherheit der

Richtung reduziert werden. Mit Hilfe des vereinfachten, linearen Modells für den Lichtstrom und der Betrachtung der Leuchte als Konstante ergibt sich das in Gleichung 4.2 dargestellte Modell. Dabei werden die getrennt ermittelten Einflussgrößen des Photometers und der Ulbricht-Kugel als Korrektionsfaktor mit dem Erwartungswerten $E(K_{PM}) = 1$ und $E(K_{IS}) = 1$ eingebracht.

$$E_{SW,l}(\alpha_H, \alpha_V) = r^{-2} \cdot A_{SW,l} \cdot M_{SW,l} \cdot M_{LS,k} \cdot (m_k \cdot J - n_k) \cdot K_{IS} \cdot K_{PM} \quad \text{in lx} \quad (4.2)$$

$E_{SW,l}(\alpha_H, \alpha_V)$: Beleuchtungsstärke des Scheinwerfers am Winkel α_H, α_V – Index l

$A_{SW,l}$: scheinbar leuchtende Fläche des Scheinwerfers, in Richtung α_H, α_V

$M_{SW,l}$: Konstante der Übertragung des Scheinwerfers, Index l

$M_{LS,k}$: Konstante der Übertragung der Lichtquelle, Index k

K_{IS} : Korrektionsfaktor für die Ulbricht-Kugel mit $E_W(K_{IS}) = 1$

K_{PM} : Korrektionsfaktor für das Photometer mit $E_W(K_{PM}) = 1$

Der Term $m_k \cdot J - n_k$ ist das lineare Modell der Lichtquellenfunktion im Arbeitspunkt. Für die untersuchte H7 von OSRAM, Typ 64210L+, gelten die Mittelwerte der Koeffizienten $\bar{m} = 1435 \text{ lm} \cdot \text{A}^{-1}$ und $\bar{n} = -4908,5$. Den Eingangsgrößen K_{PM} und K_{IS} werden die oben und im Unsicherheitsbudget beschriebenen Unsicherheitsbeiträge zugeordnet. Zur Umsetzung eines Budgets müssen weitere Werte angenommen werden. Exemplarisch sollen $J = 4,187 \text{ A}$ zum Einprägen von $\Phi_{LS} = 1100 \text{ lm}$ sowie $A_{SW,l} \cdot M_{SW,l} \cdot M_{LS,k} = 34,1$ gelten, wobei der Term $M_{SW,l} \cdot M_{LS,k}$ die Einheit m^{-2} trägt. Damit wird ein Wert $E = 60 \text{ lx}$ erreicht.

Die Ermittlung der Empfindlichkeits-Koeffizienten erfolgt gemäß gaußscher Fehlerfortpflanzung durch die partielle Ableitung aus Gleichung 4.2.

$$u(E) = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial J}\right)^2 \cdot u(J)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial r}\right)^2 \cdot u(r)^2} \quad (4.3)$$

Für den Empfindlichkeits-Koeffizienten der Stromeinprägung gilt

$$\frac{\partial E}{\partial J} = \frac{A_{SW,l} \cdot M_{SW,l} \cdot M_{LS,k} \cdot m \cdot K_{IS} \cdot K_{PM}}{r^2} = 79 \frac{\text{lx}}{\text{A}} \quad (4.4)$$

Damit wird eine hohe Empfindlichkeit der Stromeinstellung gezeigt. Für den Sensitivitätskoeffizienten des Messabstandes gilt

$$\frac{\partial E}{\partial r} = \frac{-2 \cdot A_{SW,1} \cdot M_{SW,1} \cdot M_{LS,k} \cdot (m_k \cdot J - n_k) \cdot K_{IS} \cdot K_{PM}}{r^3} = -4,9 \frac{lx}{m} \quad (4.5)$$

Nach Gleichung 4.3 ergibt sich eine Messunsicherheit $u(E) = 1,81 \text{ lx}$ und $w(E) = 3,21 \%$. Mit den beschriebenen Unsicherheitsbeiträgen und Wahrscheinlichkeitsverteilungen ergibt sich das in Tabelle 4.1 dargestellte Unsicherheitsbudget.

Tabelle 4.1: Unsicherheitsbudget einer Scheinwerfermessung am Goniophotometer

Nr.	Größe	Bester Schätzwert	erweiterte rel. Messunsicherheit	Wahrscheinlichkeitsverteilung	Teiler	relative Messunsicherheit	Empfindlichkeitskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Varianz	
	X_i	x_i	$W(x_i) / \%$	$g_{x_i}(\xi_i)$		$w(x_i) / \%$	c_i^*	$w_i(y) / \%$	$w_i^2(y)$	
1	E	60 lux	3,21	normal	2	1,61	1	1,61	$2,58 \cdot 10^{-4}$	
2	K_{IS}	1	2,12	normal	2	1,06	1	1,06	$1,12 \cdot 10^{-4}$	
3	K_{PM}	1	1	Rechteck	1,73	0,58	1	0,58	$0,33 \cdot 10^{-4}$	
	E	60 lux	Relative Standard-Messunsicherheit w bzw. Varianz w^2						2,01	$4,03 \cdot 10^{-4}$
	E	60 lux	Relative erweiterte Messunsicherheit W ($k = 2$)						4,02	
Angabe des vollständigen Messergebnisses							$E = 60 \cdot (1 \pm 0,04) \text{ lux}$			

Auswertung und Optimierungspotentiale

Die Vereinfachung des Modells auf die Messung der photometrischen Größe, ohne die Betrachtung der Winkelabweichungen oder konstanter Größen sowie mit der Beschränkung auf das Messgerät, erlaubt eine praktikable Vereinfachung der Analyse. Das Unsicherheitsbudget der Tabelle 4.1 stellt die kritischsten Eingangsgrößen übersichtlich dar.

Die Gleichung 4.2 wird zur Ermittlung der Empfindlichkeiten partiell differenziert. Dadurch kann die aus Abbildung 4.5 qualitativ ersichtliche hohe Empfindlichkeit des Lichtstromes über dem Strom berücksichtigt werden. Zur Optimierung der Genauigkeit der Messung ist demnach eine Stromeinprägung mit einer hohen Auflösung und hoher Linearität sinnvoll.

Die Einflussgrößen des Photometers K_{PM} und der Ulbricht-Kugel K_{IS} werden in Teil-Messunsicherheitsbudgets behandelt. Durch die Möglichkeit nach GUM, diese Anteile im Budget einzubringen, kann der große Unsicherheitsbeitrag der Ulbricht-Kugel berücksichtigt werden. Zur Optimierung der Genauigkeit der Messung sollten nach der Analyse von Ortlieb [Ort05] die Unsicherheiten der Prüf-Glühlampe enger gefasst werden.

Als Hinweis zur Modellierung kann die exakte Nachbildung des Messabstandes in der Simulationsumgebung gelten. Die eingeschränkte Gültigkeit des Abstandes von $r = 3,16 \text{ m}$ oder $r = 5 \text{ m}$ bei der Messung von Leuchten wurde vom Autor in [Kie07a] dargestellt. Auch die Größe des Empfängers und deren Begrenzung der Messauflösung sollte in der Simulation beachtet werden.

4.2 Diskussion der Messunsicherheit des Scheinwerfers

Wie in den Abschnitten 2.2 und 4.1 eingeführt, werden die Abweichungen der Messobjektes respektive der Funktion des Scheinwerfers hauptsächlich durch Fertigungsabweichungen verursacht. Diese Abweichungen führen im Gegensatz zu den Abweichungen des Messgerätes

zu richtungsabhängigen Unsicherheiten der Werte $u(X(\alpha_H, \alpha_V))$. Die funktionalen Abhängigkeiten, Unsicherheitsbeiträge und Wahrscheinlichkeitsverteilungen sind dabei unbekannt. Die Ermittlung des Messunsicherheitsbeitrages des Scheinwerfers mittels Modellierung der Funktionsgleichung ist somit nicht praktikabel. Bei bekannten Unsicherheitsbeiträgen und Wahrscheinlichkeitsverteilungen könnte mittels Lichtsimulation eine Monte-Carlo-Analyse nach GUM Supplement 1 [Nor08b] durchgeführt werden. Praktikabel ist hingegen die Analyse der Unsicherheiten des Scheinwerfers $u(K_{SW})$ mittels statistischer Analyse nach GUM Typ A beziehungsweise der Messung mehrerer Exemplare. Es entspricht K_{SW} dem Term $M_{SW,l} \cdot M_{LS,k}$ der Gleichung 4.2. Die Unsicherheitsbeiträge können nach GUM in ein Budget mit Unsicherheitsbeiträgen, die durch Typ B ermittelt wurden, eingebracht werden.

Die Quantifizierung mittels Mehrfachmessung hat wesentliche Einschränkungen. Die Abweichungen des Messgerätes gehen in den ermittelten Unsicherheitsbeitrag ein. Durch die Verwendung der gleichen Messgeräte ist zudem von Korrelation auszugehen. Die zu deren Quantifizierung nötigen statistischen Verfahren sind aufgrund der geringen Anzahl an Wiederholmessungen an dieser Stelle nicht ausgeführt worden. Somit kann in das Budget nur eine Abschätzung von $u(K_{SW})$ eingebracht werden.

Die Anwendung dieser Abschätzung $u(K_{SW})$ im Budget erscheint hingegen durch die wesentlich höhere Wiederholpräzision der Goniophotometermessung begünstigt. Die Einflussgrößen und Unsicherheitsbeiträge reduzieren sich dann auf den Wiederholanteil des Photometers $u_{WDH}(E_{MESS})$, der Ulbricht-Kugel $u_{WDH}(\Phi_{LQ})$ und der Stromeinstellung $u_{WDH}(J)$, bestimmt durch deren Ables- und Einstellgenauigkeit. Da diese Beiträge in der vorliegenden Arbeit nicht quantifiziert wurden, ist an dieser Stelle keine Berechnung im Budget erlaubt. Somit wurde eine statistische Abschätzung mittels einer Mehrfachmessung mit einer Scheinwerfer-Lichtquelle-Paarung des Untersuchungsgegenstandes durchgeführt. Dabei wurden die zum Messverfahren nötige Montage des Scheinwerfers und der Lichtquelle sowie die elektrische Kontaktierung jeweils ausgeführt. Die Einstellung der HDG ist dabei nicht nötig und die Wiederholanteile der Ulbricht-Kugel entfallen. Die Korrelation bleibt unberücksichtigt. Die Verteilung der ermittelten relativen erweiterten Messunsicherheit $W(K_{WDH}(\alpha_H, \alpha_V))$ ist in Abbildung 4.6 dargestellt.

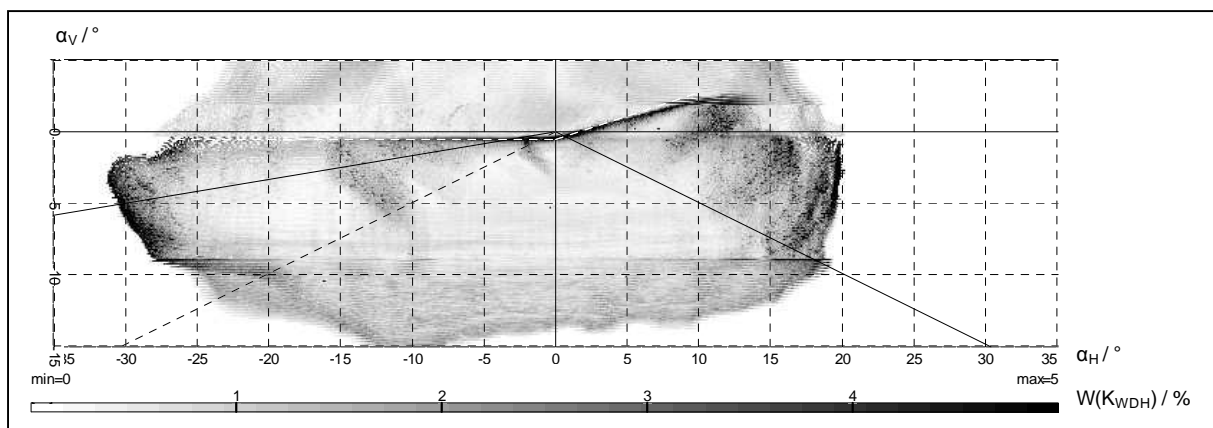


Abb. 4.6: Verteilung der Unsicherheiten der Wiederholmessung $W(K_{WDH})$

Die Verteilung weist erhöhte Werte in dem Bereich der HDG, in dem große vertikale Gradienten vorliegen, auf (vgl. Abschnitte 5.4 und 8.4). Hier werden dynamische Effekte durch die Verformung des Scheinwerfers bei der Horizontalbewegung sowie Einflüsse der Montage vermutet. Weiterhin sind höhere Werte in Bereichen niedriger Beleuchtungsstärken sowie ein Einfluss der Messbereichsumschaltung der Integrationszeit des Photometers oben und unten in der Verteilung erkennbar. Insgesamt sind die Unsicherheitsbeiträge der Wiederholmessung gering. In [Kie07a] zeigt der Autor, dass diese Unsicherheitsbeiträge überschlüssig kleiner 1/10 der zu erfassenden Unsicherheitsbeiträge des Scheinwerfers sind, wie in Gleichung 4.6 festgehalten.

$$u(K_{\text{WDH}}(\alpha_H, \alpha_V)) \ll u(K_{\text{SW}}(\alpha_H, \alpha_V)) \quad (4.6)$$

Dies wird in Abschnitt 5.4 vertieft. Für die mögliche Verwendung der Unsicherheitsbeiträge $u(K_{\text{SW}})$ in einem Budget ist damit auch die Verwendung der Anteile $u(K_{\text{WDH}})$ für zufällige, nicht identifizierte Abweichungen, ermittelt aus der Wiederholmessung des jeweiligen Scheinwerfers, sinnvoll. Dabei soll aufgrund der Vielzahl der Einflussgrößen jeweils eine Normalverteilung angenommen werden.

Die mittels Messung mehrerer Scheinwerfer generierte Verteilung der Mittelwerte $\bar{E}_M(\alpha_H, \alpha_V)$ soll als richtiger Wert im Sinne der Norm [Nor95] und somit als Verteilung der Soll-Werte für die Simulation gelten. Die Verteilung der Unsicherheiten $W(E_M(\alpha_H, \alpha_V))$ der Typ-A-Analyse ist ein Maß für die mögliche Genauigkeit der Simulation, denn innerhalb dieser Unsicherheitsbereiche kann keine signifikante Trennung der Werte vorgenommen werden. Die systematischen Abweichungen des Scheinwerfers können nach dieser Argumentation ebenfalls vernachlässigt werden, denn auch sie müssen abgebildet werden (vgl. Abbildung 4.1). Zur Ermittlung der Verteilungen $\bar{E}_M(\alpha_H, \alpha_V)$ und $W(E_M(\alpha_H, \alpha_V))$, die aus der Messung unterschiedlicher Scheinwerfer stammen und damit dessen Abweichungen beinhalten, ist die Ausrichtung der HDG erforderlich. Die dadurch nötige Entwicklung einer Methode und die Diskussion der Abweichungen der Ausrichtung sind Inhalt des folgenden Kapitels.

5 Softwarebasierte Methode zur Ausrichtung der Hell-Dunkel-Grenze

In der Analyse der Messunsicherheit der photometrischen Typprüfung ist die Ausrichtung der Hell-Dunkel-Grenze als Einflussfaktor identifiziert worden. Die Abweichungen und Unsicherheiten der Winkelpositionierung $u(\alpha_H)$ und $u(\alpha_V)$ führen zu einer Unsicherheit der Werte der Lichtverteilung $u(E_{SW}(\alpha_H, \alpha_V))$. Dabei sind die Abweichungen der Ausrichtung wiederum selbst von der spezifischen Lichtverteilung bzw. von der Qualität der Hell-Dunkel-Grenze abhängig, wie nachfolgend gezeigt wird.

Zur Umsetzung der Ausrichtung in der virtuellen Typprüfung ist die Entwicklung einer softwarebasierten Methode nötig, die eine Ausrichtung anhand der Lichtverteilung vornimmt. Minimales Ziel ist dabei die Modellierung der visuell-manuellen Abläufe und Methoden aus den Regelungen gemäß deren Anforderungen. Aus der Kenntnis der im Folgenden dargestellten Einschränkungen der bekannten Ausrichtemethoden ergibt sich der Wunsch, eine optimierte Methode zu entwickeln. Zusätzlich motiviert wird dies durch das Wissen um den großen Einfluss der Ausrichtung der HDG auf die Scheinwerferfunktion und die Sicherheit im Verkehrsraum (vgl. Bericht der BASt [Jeb08], Pollack [Pol98] oder [Kie09]).

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen zur Entwicklung der Methode zusammengefasst. Es folgt eine Beschreibung der Software und die Diskussion der Abweichungen zwischen den Ausrichtemethoden. Den Abschluss bildet eine Evaluation anhand des ausgewählten Untersuchungsgegenstandes.

5.1 Analyse der Bewertung und Ausrichtung

Die Elemente und die Position der Hell-Dunkel-Grenze nach ECE R112 sind in der Abbildung 5.1 dargestellt. Dabei wird der horizontale Teil der Hell-Dunkel-Grenze auf eine Neigung von -1% beziehungsweise $\alpha_V = -0,573^\circ$ ausgerichtet. Der sogenannte Ellbogen, der Beginn des Anstiegs der Schulter, wird auf Linie V-V und damit auf die Winkel $\alpha_H = 0^\circ$, $\alpha_V = -0,573^\circ$ ausgerichtet.

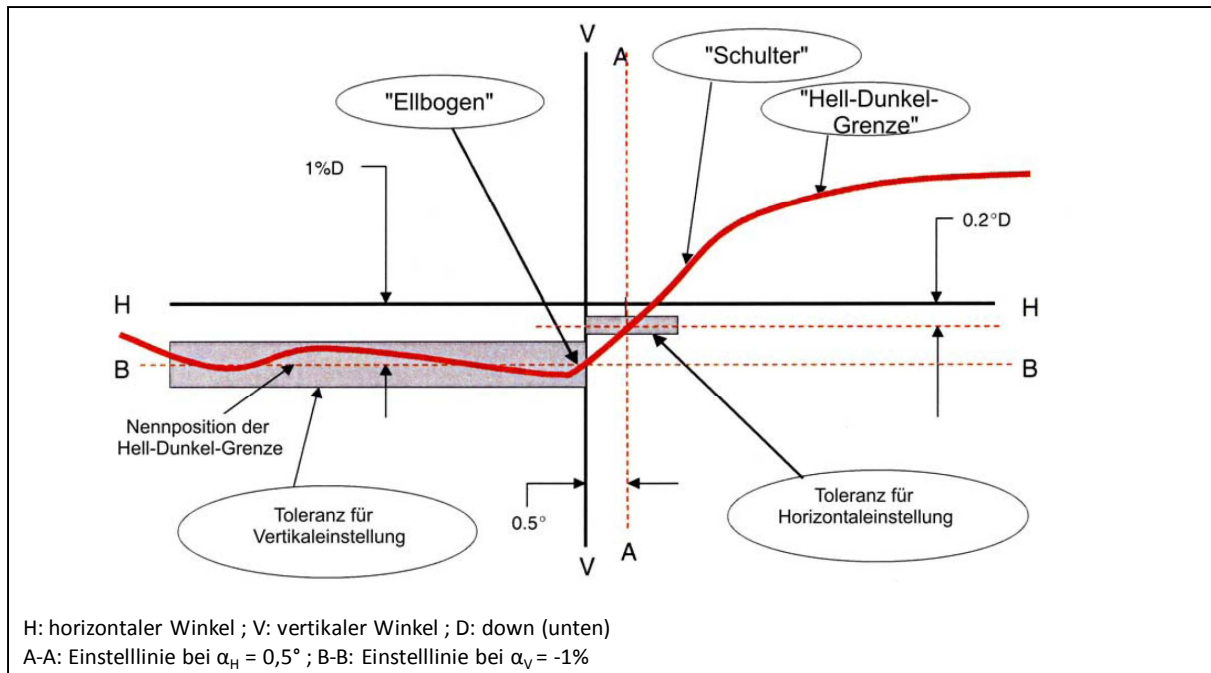


Abb. 5.1: Beschreibung der Hell-Dunkel-Grenze nach ECE R112 [Ece08]

Die Ausrichtung soll gemäß der Regelung ECE R112 „optisch“ vorgenommen werden. In der Praxis werden bei dieser visuell-manuellen Methode die wahrgenommen schärfsten Anteile der Lichtverteilung, die Hell-Dunkel-Grenze mit der Schulter, von dem durchführenden Bearbeiter anhand einer Einstellwand in der Messstrecke geschätzt und mit Markierungen der Soll-Position an dieser Wand überein gebracht. Üblich ist die Verwendung einer Einstellwand im Abstand von $r = 10\text{ m}$ oder in $r = 25\text{ m}$ vom Scheinwerfer. Erfüllt das Bauteil bei der anschließenden photometrischen Messung die Anforderungen nicht, so kann entsprechend der ECE-Regelung 112 Abschnitt 6.2.2.3 innerhalb eines Toleranzwinkelbereiches von $-0,5^\circ \leq \alpha_H \leq 0,75^\circ$ und $-0,25^\circ \leq \alpha_V \leq 0,25^\circ$ eine weitere Positionierung und eine erneute Messung stattfinden. Erst bei wiederholtem Versagen des Scheinwerfers wird die unten stehend beschriebene messungsbasierte Ausrichtung vorgenommen.

Die Ausrichtung der HDG ist auch im Zulassungsbereich der FMVSS 108 nötig und vergleichbar, wobei abweichende Formen der Schulter andere Strategien zur horizontalen Ausrichtung erfordern. Es werden visuelle und mechanische, aber auch messungsbasierte Methoden angeführt. Die messungsbasierten Verfahren beruhen, wie in der ECE-Regelung, auf der scannenden Messung definierter Linien. Für eine Variante der HDG mit einer schrägen Schulter, die der ECE-Verteilung ähnlich ist, kann die „3-Linien-Methode“ der ECE direkt übertragen werden. Die vertikale Ausrichtung wird auf $0,4^\circ D$, beziehungsweise $\alpha_V = -0,4^\circ$ vorgenommen (vgl. SAE 1319, SAE J1383 [Saerg]).

Die veröffentlichten Untersuchungen zur Ausrichtung der Hell-Dunkel-Grenze sind eng verknüpft mit den in Abschnitt 3.2 vorgestellten Bewertungsmethoden. So vergleicht Schmidt-Clausen [Sch95] Methoden zur Bestimmung des Ortes der größten Schärfewahrnehmung, die auf den Werten eines Vertikalschnittes in der Lichtverteilung basieren. Als genaueste Methode ermittelt Schmidt-Clausen die Ableitung der logarithmierten

Werte und die Bestimmung des größten Gradienten. Eine diskrete Methode nach De Brabander [Deb86], Gleichung 5.1 wird als gleichwertig beschrieben.

$$X_{\text{LAGE_HDG}} = \lg \frac{I_1}{I_2 / \max} \quad (5.1, [\text{Deb86}])$$

Weiterhin gibt Schmidt-Clausen eine Messentfernung von $r = 10 \text{ m}$ und einen Messwerteabstand von $\Delta z = 1$ bis 2 cm vor, was einer Winkelauflösung von $\Delta\alpha_H = 0,057^\circ$ bis $0,11^\circ$ entspricht. Im Vergleich von Bewertungsmethoden nach Pollack [Pol98] wird die ATN-Methode (Acceptable Theshold Number) favorisiert, bei der die Adaptionszustände des Auges berücksichtigt werden (Gleichung 5.2). Die Bewertungsmethode ist für eine Messwand in $r = 10 \text{ m}$ Messentfernung definiert, was einen Vergleich mit Messwerten, die bei $r = 25 \text{ m}$ ermittelt wurden, einschränkt.

$$\text{ATN} = 4,91 \frac{E_2 - E_1}{E_1 + E_2^{0,63}} \quad (5.2, [\text{Pol98}])$$

Die G-Wert-Methode, eingebracht in den ECE-Regelungen und ähnlich der Methode nach De Brabander (Gleichung 5.1), bewertet die Schärfe unabhängig von der Helligkeit der Lichtverteilung (Gleichung 5.3).

$$G = \log_{10} E(\alpha_V(n)) - \log_{10} E(\alpha_V(n + 0,1)) \quad (5.3)$$

Die G-Wert-Methode enthält dabei die Vorgabe von diskreten Winkelschritten mit $\Delta\alpha_V = 0,1^\circ$. Die Methode ist in den ECE-Regelungen R98 und R112 [Ece08] beschrieben und wird seit 2007 angewendet.

Die Fragestellung, inwieweit Gradienten einer HDG, die auf 10 m bewertet und positioniert werden, mit den Gradienten korrelieren, die in der Messentfernung von 25 m aufgenommen werden, hat Manz [Man00] untersucht. Auch hier ist die G-Wert-Methode die Grundlage, erweitert um die Vorschrift, die Messwerte mit einer Auflösung von $\Delta\alpha_V = 0,05^\circ$ aufzunehmen. Der Bedarf der Glättung der Messwerte bei Erhalt der Gradienten wurde gezeigt und die Methode nach Savitzky-Golay favorisiert (vgl. Abschnitt 3.5). Beim Vergleich der Werte der Gradienten in beiden Messentfernungen konnte kein analytischer Zusammenhang ermittelt werden. Der Einfluss des Nahfeldes in der Messentfernung von $r = 10 \text{ m}$ wurde von Manz als ursächlich für die Abweichungen herausgestellt. Beide Messentfernungen sind nach der ECE-Regulierung zulässig.

Untersuchungen zu den Toleranzen der Einstellung der Hell-Dunkel-Grenze wurden von Manz [Man01a] dargestellt. Verschiedene Scheinwerfersysteme mit unterschiedlichen Lichtquellen wurden in Wiederholmessungen durch Prüfer ausgerichtet und folgende erweiterte Unsicherheiten ermittelt:

- H4-Scheinwerfer: $\pm 0,073^\circ$ (1,27 mrad)
- R2-Scheinwerfer: $\pm 0,145^\circ$ (2,53 mrad)

- Nebelscheinwerfer: $\pm 0,158^\circ$ (2,76 mrad)

Dies zeigt die Abhängigkeit der Einstellgenauigkeit vom betrachteten Scheinwerfersystem. Die hohe Empfindlichkeit der Messwerte an den Prüfpunkten der Typprüfung sowie der Werte der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Bewertungsmethoden auf eine Verschiebung der HDG wurden anhand von Fallbeispielen vom Autor in [Kie09a] gezeigt. Dort werden die Einstellgenauigkeiten der Typprüfung im Bezug zur Lichtfunktion im Straßenverkehr diskutiert.

Weitere Methoden zur Bewertung und Ausrichtung der HDG werden im Umfeld der Fahrzeug-Endmontage sowie der Scheinwerferentwicklung bei kamerabasierten Gerätetypen eingesetzt (vgl. Schwanengel [Schw06]). Trotz prinzipbedingt und zweckbedingt anderer Ausführung verwenden diese Geräte ähnliche Methoden zur Bewertung der Gradienten. Maßgebliche Unterschiede liegen in den betrachteten horizontalen Winkelbereichen und den Methoden der Approximation der Hell-Dunkel-Grenze. Solche Geräte erreichen nicht die Genauigkeit eines Fernfeld-Goniophotometers und die Messergebnisse sind nicht direkt miteinander vergleichbar. Die Genauigkeiten der maßgeblich beeinflussenden Leuchtdichtekamera können bei Krüger [Krü04], [Krü05] vertieft werden.

Dieser Überblick legt die Umsetzung der messungsbasierten Bewertungs- und Ausrichtemethode nach der ECE-Regelung R112 nahe. In der Regelung wird für die vertikale Ausrichtung am Goniometer eine vertikale Schnittmessung bei $\alpha_H = -2,5^\circ$ durchgeführt und aus den Werten $E(\alpha_V)$ der maximale G-Wert sowie der zugeordnete Winkel $\alpha_{V,Gmax}$ ermittelt. Durch die Kenntnis der Soll-Position bei $\alpha_V = -0,573^\circ$ ist die Ermittlung und Einstellung eines Korrekturwertes $\alpha_{V,Korr} = -0,573^\circ - \alpha_{V,Gmax}$ am Goniometer möglich.

Für die horizontale Ausrichtung werden in der ECE R112 zwei Methoden bereitgestellt. Die „Linie 0,2D-Methode“ wird hier speziell im Hinblick auf die Simulation verworfen, da sie auf nur einem Messwert basiert. Die „3-Linien-Methode“ verfährt wie die Vertikalausrichtung mit drei Schnittmessungen bei $\alpha_H = 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ$, der Ermittlung des jeweiligen $\alpha_{V,Gmax}$ und der nicht näher definierten „Ableitung“ einer Geraden. In dieser Arbeit wird von einer linearen Regression ausgegangen. Der Schnittpunkt der Geraden mit der vertikalen Mittellinie V-V respektive $\alpha_H = 0^\circ$ bestimmt die horizontale Verschiebung bis zum Erreichen des Schnittpunktes bei $\alpha_H = 0^\circ, \alpha_V = -0,573^\circ$. Für die „Schulter“ ist eine Mindestschärfe mit $G_{min} = 0,08$ definiert. Die horizontale Positionierung erfolgt einmalig nach der vertikalen Einstellung. Eine Optimierung durch Wiederholddurchläufe ist nicht vorgesehen.

Es kann zusammengefasst werden, dass die in der Gesetzgebung beschriebenen Methoden nicht unmittelbar für eine lichtverteilungsbasierte virtuelle Typprüfung einsetzbar sind. Übertragbare Methoden und Abläufe sind aber vorhanden. Die als Maßstab geltende visuell-manuelle Methode kann nicht als virtuelle Methode umgesetzt werden. Die messungsbasierende Methode ist hingegen übertragbar. Schwächen liegen in der Abtastung an nur wenigen Winkeln und der sequentiellen Durchführung ohne Wiederholung.

5.2 Umsetzung der Softwaremethode

Die Umsetzung einer softwarebasierten Ausrichtemethode ist in drei Teilaufgaben unterteilt worden:

1. Extraktion der Hell-Dunkel-Grenze als Verteilung der Schärfewerte $G(\alpha_H, \alpha_V)$ und Winkel aus der Lichtverteilung $E(\alpha_H, \alpha_V)$
2. Generierung einer Soll-Hell-Dunkel-Grenze als Verteilung definierter Werte an der Soll-Position $W(\alpha_H, \alpha_V)$
3. Umsetzung einer Ausrichtemethode der Verteilungen, die eine ganzheitliche Bewertung und eine eindeutige, reproduzierbare Positionierung ermöglicht

Im ersten Schritt wird der Verlauf der Hell-Dunkel-Grenze auf Basis der G-Wert-Methode vollständig im Wertebereich $-(5+n)^\circ \leq \alpha_H \leq (5+n)^\circ$ ermittelt. Es werden nur die maximalen Werte $G(\alpha_V) = \max$ in die Verteilung $G(\alpha_H, \alpha_V)$ eingetragen. Die Variable n ist ein Korrekturwert des Winkelbereiches, der beispielsweise bei Sonderformen der HDG eingesetzt werden kann. Diese vollständige Bewertung der Hell-Dunkel-Grenze ist im Gegensatz zur messungsbasierten Methode ohne nennenswerten Zeitverlust möglich.

Im zweiten Schritt wird eine Soll-HDG als Verteilung der Werte $W(\alpha_H, \alpha_V)$ generiert. Die horizontale HDG wird durch $W(\alpha_H, -0,573^\circ) = 1$ im Bereich von $-(5+n)^\circ \leq \alpha_H \leq 0^\circ$ definiert, die übrigen Werte der Verteilung werden zunächst $W = 0$ gesetzt. Für die Schulter können beliebige Ausprägungen festgelegt werden. Als Beispiel für die hier angewendete Form „15°-Schulter“ gilt $W(\alpha_H, \alpha_V) = 1$ mit $0^\circ \leq \alpha_H \leq (5+n)^\circ$ und $\alpha_V = \alpha_H \cdot \tan(15^\circ) - 0,573^\circ$, gerundet auf den nächsten verfügbaren Nachbarn der diskreten Verteilung.

Basierend auf der Analyse der visuell-manuellen Ausrichtung und bestätigt durch Voruntersuchungen ist die Notwendigkeit zur Berücksichtigung von weiteren an $W(\alpha_H, \alpha_V) = 1$ angrenzenden Werten in Richtung α_V festgestellt worden. Es muss der Soll-HDG eine Quasi-Unschärfe angegliedert werden. Bei der Messung realer Scheinwerfer können nie alle Anteile einer HDG auf die Soll-Position ausgerichtet werden. Aus Erfahrungen und Expertenbefragung wird deutlich, dass der Messende den Abstand der realen, nicht linearen HDG von der Einstelllinie zur Bewertung und Ausrichtung berücksichtigt. Eine Methode, die nur den steilsten Gradienten berücksichtigt, ist damit unzureichend. Es werden aber die schärfsten Anteile der HDG bevorzugt zur Einstellung genutzt. Konträr dazu ist durch die Begrenzung der Sehschärfe immer von einer Mittelung der Ausrichtung der angrenzenden HDG-Anteile auf der nur begrenzt scharf erkennbaren Einstelllinie auszugehen. Ohne Quantifizierung dieser Einflussfaktoren wurde in Anlehnung an eine Normalverteilung mit $\sigma = 2$ die folgende Näherung der Werte der unscharfen Soll-HDG vorgenommen: $W(\alpha_V \pm (0,1^\circ; 0,2^\circ; 0,3^\circ; 0,4^\circ)) = 0,88; 0,6; 0,32; 0,14$, wenn $W(\alpha_H, \alpha_V) = 1$ und $-(5+n)^\circ \leq \alpha_H \leq (5+n)^\circ$.

Die beiden Verteilungen sind exemplarisch in Abbildung 5.2 dargestellt. Die Soll-Hell-Dunkel-Grenze ist grau dargestellt, während die aus der Lichtverteilung berechnete Hell-Dunkel-Grenze schwarz gekennzeichnet ist.

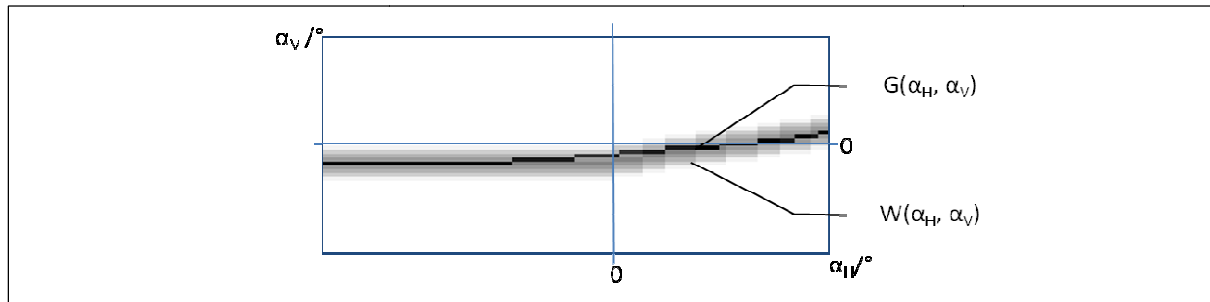


Abb. 5.2: Exemplarischer Verlauf der Soll-HDG W und der maximalen G -Werte aus der Lichtverteilung

Im dritten Schritt erfolgt die Ausrichtung der HDG und damit der Lichtverteilung $E(\alpha_H, \alpha_V)$ durch stückweises Verschieben der Verteilungen $G(\alpha_H, \alpha_V)$ über $W(\alpha_H, \alpha_V)$ sowie die Berechnung der Korrelation X_{corr} nach Gleichung 5.4 und 5.5 für jede Position. Ist $X_{\text{corr}} = \text{max}$, so bestimmt dies die Korrekturwerte $\Delta\alpha_H$ und $\Delta\alpha_V$ für die Verteilung $E(\alpha_H, \alpha_V)$ und somit eine global optimale Ausrichtung.

$$X_{\text{corr}} = \sum_{k=1}^{\text{max}} R(W_i, G_j) \quad \text{mit } \text{max} = \frac{\alpha_V(\text{max}) - \alpha_V(\text{min})}{\Delta\alpha} \quad (5.4)$$

$$R(W_i, G_j) = \frac{\text{Cov}(W_i, G_j)}{\sqrt{\text{Var}(W_{ji})} \cdot \sqrt{\text{Var}(G_{ij})}} \quad (5.5)$$

wobei die Korrelation $R(W_i, G_j)$ der Zeilen α_H über die Spalten α_V summiert wird.

Filterung

Wie in Abschnitt 3.5 eingeführt, ist eine Filterung des Rauschens der Lichtverteilungen sinnvoll, selbst wenn die Werte $E(\alpha_H, \alpha_V)$ durch die Messung gewonnen wurden. Für die Analyse der Gradienten hat Manz [Man00] die Methode nach Savitzky-Golay empfohlen, die hier angewendet werden soll. Die 1-dimensionale Faltung der Messdaten nach dieser Methode ermöglicht nach Manz ein gutes Schätzen von unterabgetasteten Maxima bei gleichzeitiger Unterdrückung des Rauschens. Die Methode nach Savitzky-Golay [Pre97] nimmt eine segmentweise Regression durch Polynome vor. Der Wert x^* der Größe X an der Stelle i wird ermittelt, wie in Gleichung 5.6 gezeigt. Es wird dabei die diskrete Winkelaufteilung $\alpha_{V,i+1} = \alpha_{V,i} + \Delta\alpha_V$ genutzt. Der Koeffizient c_{α_V} ist ein Koeffizient der benachbarten Stelle $\alpha_{V,i-1}$ von x_{α_V} . Der Koeffizient bestimmt sich nach Savitzky-Golay durch den Grad des Polynoms und der symmetrischen Anzahl der betrachteten Nachbarn $\alpha_{V,U}$ bzw. $\alpha_{V,O}$, was zu einer Breite der betrachten Werte von $2 \cdot \alpha_{V,O} + 1$ führt. Es wurden überwiegend der Grad des Polynoms = 4 sowie die Anzahl der betrachten Nachbarn $\alpha_{V,i}$ mit $i = 4$ verwendet. Die Anwendung der Filterung erfolgt über alle Winkel α_H im Bereich $-(5 + n)^\circ \leq \alpha_H \leq (5 + n)^\circ$.

$$x^* = \sum_{\alpha_V = \alpha_{V,U}}^{\alpha_{V,O}} c_{\alpha_V} \cdot x_{\alpha_V+i} \quad (5.6)$$

Die Abbildung 5.3 stellt exemplarisch die mittels G-Wert-Methode berechnete Verteilung der maximalen Werte $G(\alpha_H, \alpha_V)$ und damit die Schärfe der Hell-Dunkel-Grenze für eine Messung des untersuchten Scheinwerfers mit und ohne Glättung dar.

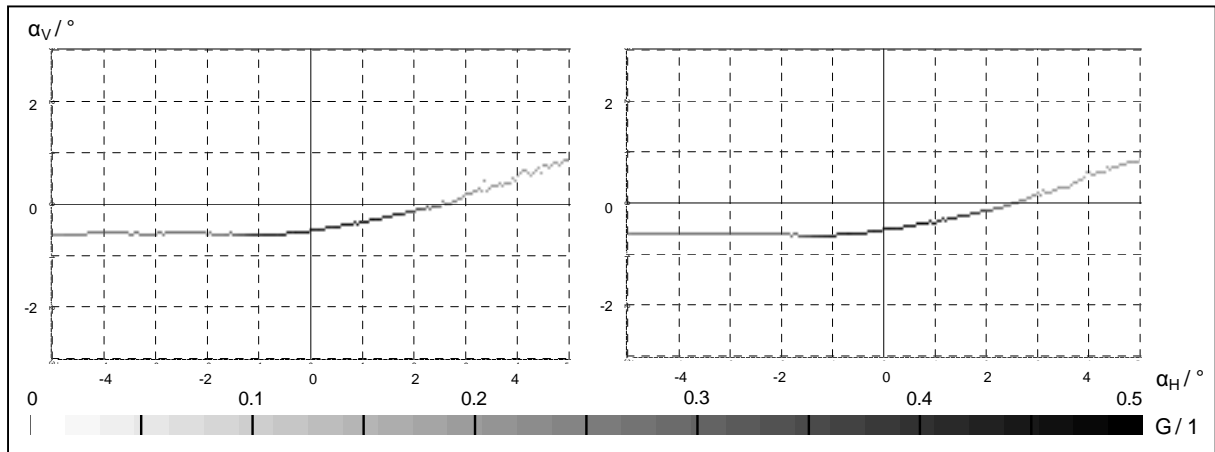


Abb. 5.3: Verlauf der maximalen G-Werte ohne und mit geglätteten Werten der LVK

Die durch die Filterung der Werte $E(\alpha_H, \alpha_V)$ bewirkte Linearisierung des berechneten Verlaufes $G(\alpha_H, \alpha_V)$ der Hell-Dunkel-Grenze wird deutlich. Sie ermöglicht eine Stabilisierung der Ausrichtung. Im Vergleich zur Filterung simulierter Daten in Abschnitt 3.5 (Abbildung 3.15) sind die geringeren Abweichungen an der HDG bei einer Messung erkennbar. In der Softwaremethode wird dieser Prozessschritt nach dem Konfektionieren der Verteilung und vor dem Ausrichten durchgeführt. Der positive Einfluss auf die Ausrichtung wird in der nachfolgenden Evaluation gezeigt. Der Arbeitsablauf der in dieser Arbeit entstandenen Softwaremethode ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Eine weiterführende Beschreibung der GUI, der Umsetzung in MATLAB® und weiterer Funktionalitäten ist in [Kie07] und [Kie09] zu finden.

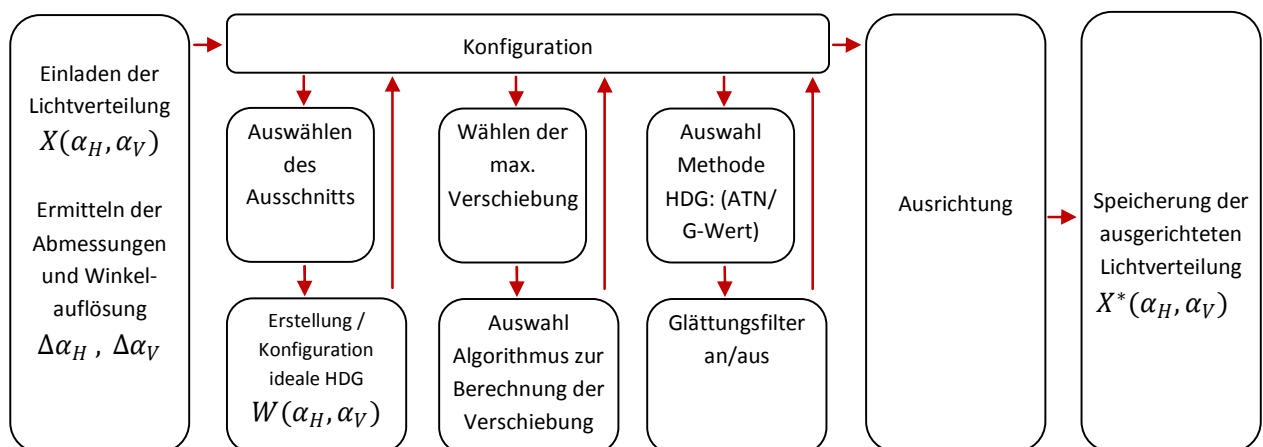


Abb. 5.4: Arbeitsablauf der Software

5.3 Diskussion der Einflussfaktoren und Abweichungen

Zur Diskussion der Genauigkeiten sollen die visuell-manuelle Methode und die messungsbasierte Methode als Maßstab für die softwarebasierte Methode herangezogen werden.

Die visuell-manuelle Methode ist abhängig von Erfahrung und Können, der temporären Kondition sowie von den intra-individuellen Einstellpräferenzen der durchführenden Bearbeiter. Beim Vergleich solcher Fachleute, ähnlich wie bei einer Ringmessung über mehrere Labore, ist mit deutlichen systematischen Abweichungen zu rechnen. Weitere Abweichungen ergeben sich durch die Bedingungen des Labors wie den Abstand und die Reflexionseigenschaften der Wand, die Eigenschaften der Markierung oder die Helligkeit der Umgebung. Auch dies führt zu abweichenden Sehleistungen und Einstellgenauigkeiten. Zudem ist bei einer Einstellung auf der 10 m - Wand durch den Nahfeldeinfluss eine systematische Abweichung im Vergleich zur Einstellung auf der 25 m - Wand zu erwarten. Die Abweichung durch den Nahfeldeinfluss besteht in der Messentfernung von 25 m nicht. Nach Koos [Koo93] sind nach $r > 14 m$ keine großen Abweichungen zu erwarten. Außerdem ist eine eventuelle Wiederholung der Ausrichtung bei Nichterfüllung der Typprüfung nicht reproduzierbar und die Messwerte sind dadurch nicht nachvollziehbar. Derartige Einflussfaktoren und Abweichungen sind in der softwarebasierten Ausrichtung wie auch in der messungsbasierten Ausrichtung nicht vorhanden.

Bei der messungsbasierten Methode sind Abweichungen durch die diskrete, vertikale Abtastung der Hell-Dunkel-Grenze mit nur einer Schnittmessung sowie durch die horizontale Abtastung der Schulter mit nur ein bis drei Schnittmessungen zu erwarten. Diese Abtastung kann die Qualität der HDG nicht vollständig erfassen. Der Ausrichtevorgang hat eine zufällige Startposition und wird nicht wiederholt, was zu einem lokalen Optimum der Ausrichtung führt. Der Einfluss der in Kapitel 4 behandelten Abweichungen der Werte $E(\alpha_V)$ durch die Unsicherheiten der Messgeräte, führt zu untergeordneten Abweichungen, da der Einfluss auf den Gradient und Ort der Hell-Dunkel-Grenze relativ gering ist. Dies konnte bereits in den Untersuchungen zur Streulichtbewertung festgestellt werden (vgl. Abschnitt 3.4).

Die softwarebasierte Methode erfasst die HDG im definierten Bereich vollständig. Die Ausrichtemethode führt zu einem globalen Optimum. Es sind keine zufälligen Abweichungen bei der Ausrichtung einer Verteilung $E(\alpha_H, \alpha_V)$ zu erwarten.

Bei der softwarebasierten Methode und auch bei der messungsbasierten Methode ergeben sich Abweichungen durch die eingeschränkte Modellierung der Wahrnehmung in der G-Wert-Methode. Weiterhin kann die monochromatische Bewertung durch das Photometer den Einfluss von Farbsäumen auf die Bewertung des Gradienten nicht erfassen. Durch Verwendung eines Kolorimeters und durch spektral aufgelöstes Raytracing könnten zukünftig Farbsäume in der Messung und in der Simulation erfasst und bewertet werden.

Weitere Abweichungen der softwarebasierten Methode ergeben sich durch die Diskretisierung der Lichtverteilung $E(\alpha_H, \alpha_V)$ und $W(\alpha_H, \alpha_V)$. Die Abweichung durch die Diskretisierung ist schon in der Bewertungsmethode mittels G-Wert enthalten, welche die Auflösung festlegt. Sie kann in der Softwaremethode maximal $\Delta\alpha_V/2$ in Richtung des niederwertigen Pixels oder Winkелеlements annehmen und ist abhängig von dem Verlauf $G(\alpha_V)$. Die Abweichung durch die Diskretisierung der idealen HDG $W(\alpha_H, \alpha_V)$ hingegen ist systematisch und durch die gewählte Auflösung bedingt. Die Diskretisierungsabweichung F_D bei einer Messauflösung von $\Delta\alpha_V = 0,05^\circ$ beträgt $F_{D,\alpha_V} = 0,02^\circ$. Die Diskretisierungsabweichung für die HDG bei einer Auflösung von $\Delta\alpha_V = 0,1^\circ$ beträgt $F_{D,\alpha_V} = -0,03^\circ$. Ein Vergleich von ausgerichteten Lichtverteilungen sollte demnach bei gleichen Auflösungen erfolgen.

Aufgrund der genannten Einflussfaktoren und Abweichungen sowie der Neuartigkeit der Methode ist eine Evaluation der softwarebasierten Ausrichtung nötig. Es sind dabei nur noch die zufälligen Abweichungen für die Bewertung der Methoden maßgeblich. Somit soll die Methode anhand einer hinreichenden Anzahl von Scheinwerfern des Untersuchungsgegenstandes statistisch untersucht werden.

5.4 Evaluation anhand des Untersuchungsgegenstandes

Die zufälligen Abweichungen lassen sich mittels der statistischen Analyse nach GUM Typ A erfassen. Eine Wiederholung der Ausrichtung und Messung von mehreren Scheinwerfern mit anschließender statistischer Auswertung der Verteilungen $E(\alpha_H, \alpha_V)$ ist dafür nötig. Je kleiner die Standardabweichungen s im bewerteten Bereich der HDG werden, desto wiederholgenauer ist die Einstellmethode. Der theoretische Grenzwert für die Standardabweichung wäre durch die inhärenten Abweichungen der Verteilungen $G(\alpha_H, \alpha_V)$ und damit der Verteilungen $E(\alpha_H, \alpha_V)$ der jeweiligen Scheinwerfer definiert.

Als Untersuchungsgegenstand sind zehn der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Scheinwerfer verwendet worden, die der Serienproduktion entnommen wurden. Da die Gültigkeit der Evaluation der Ausrichtemethode durch die Qualität der jeweiligen HDG beschränkt wird, ist mit dem Untersuchungsgegenstand ein tendenziell kritisches Scheinwerfersystem ausgewählt worden. Die Qualität der HDG kann mit einer schwankenden, leicht ansteigenden Schärfe von $0,13 < G < 0,4$ als typisch für Abblendscheinwerfer mit Freiformreflektoren bezeichnet werden. Die Abweichungen von der Linearität sind ebenfalls typisch. Projektionssysteme sind durch ihre schärfere und geradlinigere Abbildung generell genauer einstellbar. In Abbildung 5.5 ist der Verlauf der ermittelten maximalen G-Werte eines qualitativ schlechten Exemplars dargestellt.

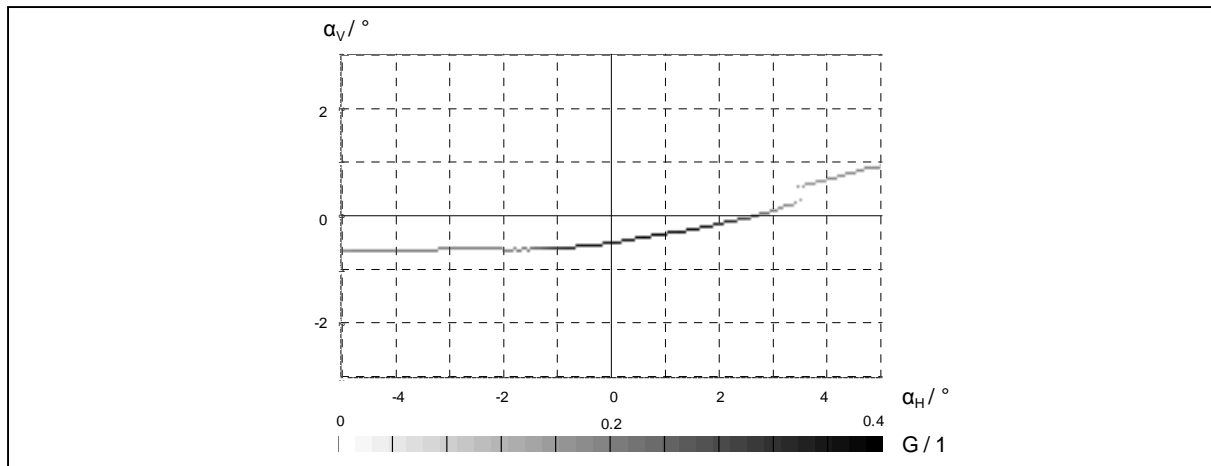


Abb. 5.5: Verlauf und Schärfe der HDG eines untersuchten Scheinwerfers

Durch die komponentenweise Untersuchung der Paarungen Lichtquelle/Reflektor sowie des vollständigen Scheinwerfers konnten $2 \cdot 10$ Untersuchungsgegenstände erzeugt werden. Die Scheinwerfer bzw. Komponentenpaarungen wurden gemäß dem in Kapitel 4 beschriebenen Messverfahren am Goniophotometer vermessen und die Lichtverteilungen ermittelt. Es wurde je eine Messlampe verwendet, um den Fall der Ringmessung über mehrere Labore abzubilden. Die Umgebungsbedingungen waren identisch, weswegen die in Abschnitt 4.2 beschriebene geringe Unsicherheit der Wiederholmessung beziehungsweise eine hohe Wiederholpräzision angenommen werden kann. Die komponentenweise Untersuchung der Verteilungen erlaubt die Analyse des Einflusses der Baugruppen. So zeigt die Verteilung der prozentualen Abweichungen $D(\alpha_H, \alpha_V)$ der beschriebenen Komponentenpaarungen den Einfluss der Lichtscheibe, wie in Abbildung 5.6 dargestellt. Dabei zeigt sich eine winkelabhängige Abweichung in der gesamten Verteilung und besonders in der Lage und Schärfe der HDG. Deswegen können nachfolgend zwei unterschiedliche Qualitäten einer HDG untersucht werden.

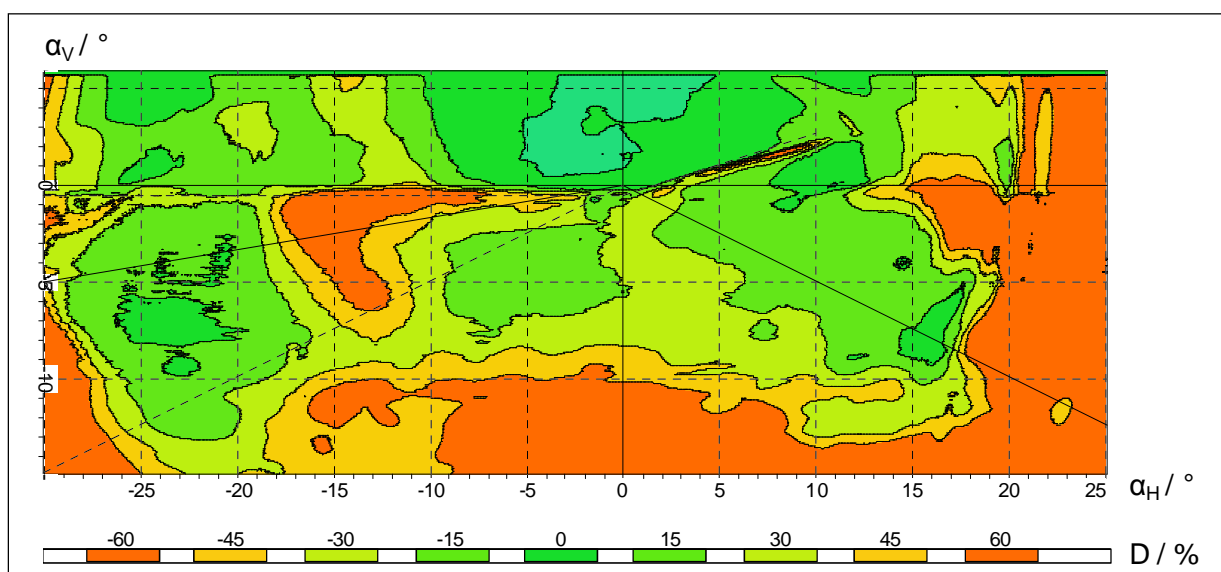


Abb. 5.6: Abweichungen der Lichtverteilung durch die Lichtscheibe

Der Ausrichtevorgang erfolgte gemäß dem Standard zuerst visuell-manuell anhand der 10 m - Wand. Ausführender war primär ein Fachmann mit mehrjähriger Erfahrung, aber unregelmäßigem Einsatz, am verwendeten Messgerät. Die Ausrichtung wurde durch zwei weitere Fachleute überprüft und nach Bedarf korrigiert, weswegen auf eine Wiederholung der Ausrichtung und Mittelwertbildung verzichtet werden konnte.

Die messungsbasierte Methode ist in der Software LIMES 2000 des Goniometers Typ GOH 1300 von LMT implementiert und dort ausgeführt worden. Nach der visuellen Ausrichtung wurden so Korrekturwerte $\Delta\alpha_H$ und $\Delta\alpha_V$ aufgenommen. Anhand einer Verschiebung der Verteilung $E(\alpha_H, \alpha_V)$ konnten sie nachfolgend wieder in die Lichtverteilung übersetzt werden.

Aus den erhaltenen Lichtverteilungen wurden jeweils die Verteilungen der Mittelwerte der Lichtstärke $\bar{I}(\alpha_H, \alpha_V)$ und der erweiterten relativen Messunsicherheiten $W(I(\alpha_H, \alpha_V))$ gebildet. Dazu wurden die Standardabweichungen $s(\alpha_H, \alpha_V)$ mittels t-Faktor für einen Vertrauensintervall von 95% verwendet. In Abbildung 5.7 sind die erweiterten relativen Messunsicherheiten der Lichtstärken aus der visuellen Ausrichtung der Paarung Lichtquelle und Reflektor dargestellt.

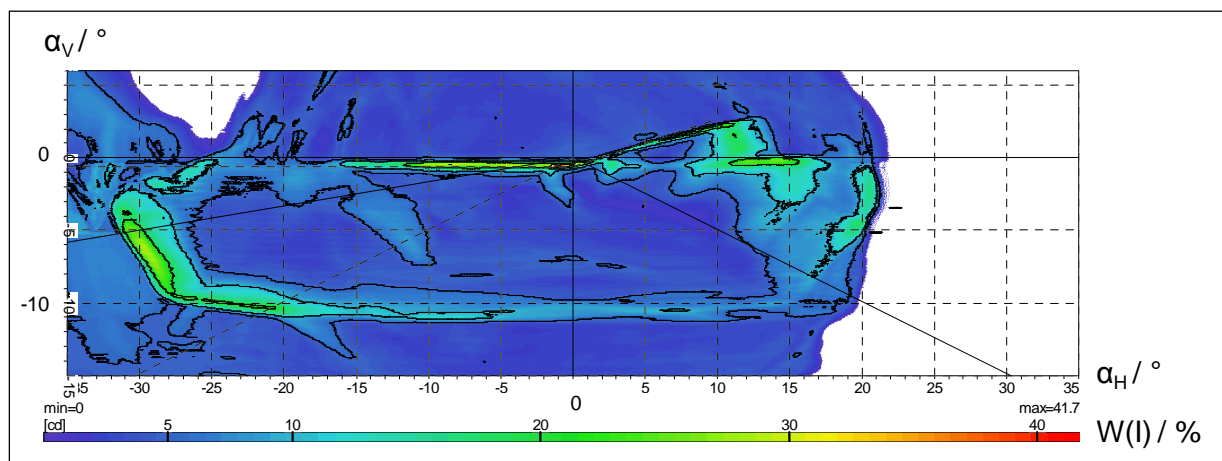


Abb. 5.7: Verteilung der Messunsicherheiten aus der visuellen Ausrichtung

Die größten Werte dieser beigeordneten Unsicherheit bei visueller Ausrichtung liegen im Bereich der Hell-Dunkel-Grenze und nehmen dort bis zu $W(I(\alpha_H, \alpha_V)) = 41,7\%$ an. Weitere Bereiche höherer Unsicherheitswerte sind an der Schulter und an den Rändern der Seitenausleuchtung zu erkennen. Die Randgebiete haben aber niedrige, für die Funktion weniger relevante Lichtstärken.

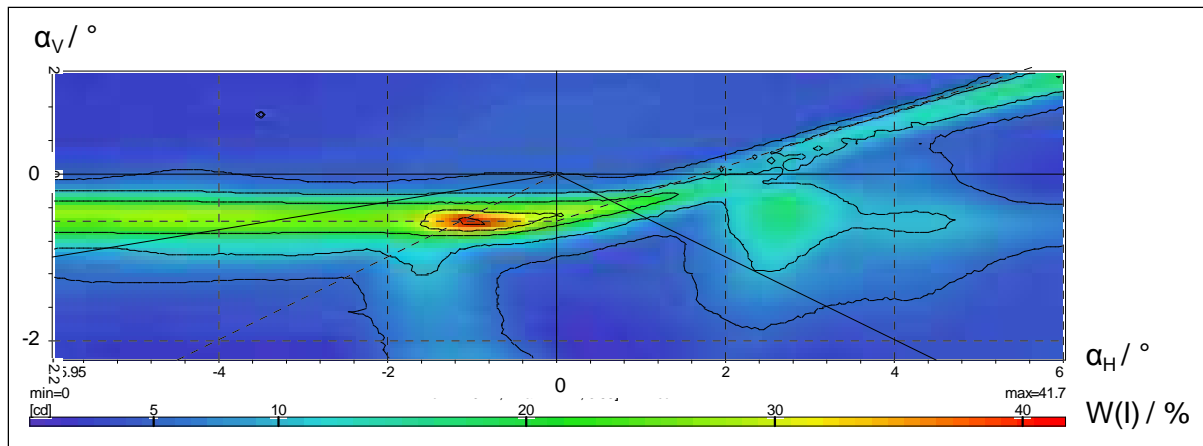


Abb. 5.8: Ausschnitt der Verteilung der Messunsicherheiten aus der visuellen Ausrichtung

Eine Vergrößerung des Ausschnittes der Hell-Dunkel-Grenze ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Es sind große Unsicherheitswerte im Bereich der HDG zu erkennen, was die geringe Qualität der Ausrichtung zeigt. Die Unsicherheitswerte im Bereich des 15°-Anstiegs sind vergleichsweise gering. Das bedeutet, dass die visuelle Ausrichtung dort relativ sicher erfolgt. Die Arbeiten von Manz [Man01a] und Pollack [Pol98] sowie die Praxis der Einstellung zeigen, dass bei einer höheren Schärfe beziehungsweise einem höheren G-Wert der Hell-Dunkel-Grenze eine präzisere visuelle Einstellung erfolgt. Die Abbildung 5.5 zeigt eine Zunahme der Schärfe im entsprechenden Bereich $\alpha_H = \alpha_V = 0^\circ$ und im Bereich der Schulter. Dagegen liegen im Bereich $\alpha_H = -2,5^\circ$, in dem die messungsbasierte Bewertung und Ausrichtung durchgeführt wird, deutlich niedrigere G-Werte vor. Abbildung 5.9 stellt die Verteilung $W(I(\alpha_H, \alpha_V))$ aus der messungsbasierten Ausrichtung dar.

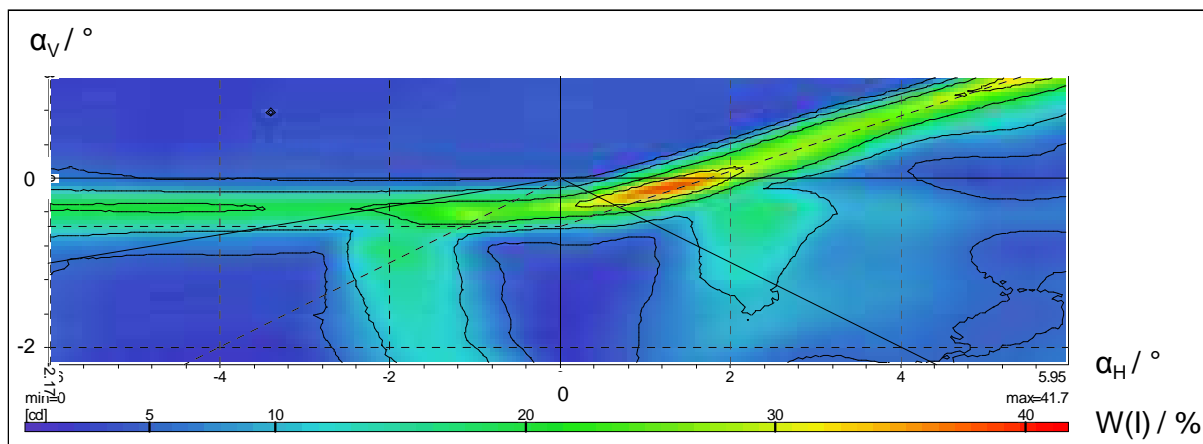


Abb. 5.9: Verteilung der Messunsicherheiten aus der messungsbasierten Ausrichtung

Wie erwartet verringert die messungsbasierte Ausrichtung die Abweichungen und damit die Unsicherheiten im Bereich von $\alpha_H = -2,5^\circ$. Die Gradienten der Schulter hingegen werden mittels der „3-Linien-Methode“ schlechter ausgerichtet als durch die visuelle Methode.

Im Fall des vollständigen Scheinwerfers zeigt sich der Nachteil der einfachen Abtastung bei $\alpha_H = -2,5^\circ$ noch deutlicher (vgl. Abbildung E.1, Anhang E.1). Diese Stelle weist zufällig,

bedingt durch die Strategie der optischen Auslegung und der Platzierung der Wendelbilder, eine große Abweichung der Linearität auf. Die Optimierung dieser Stelle führt dann zu erheblichen Unsicherheiten in anderen Bereichen der HDG. Dies verdeutlicht den Bedarf einer ganzheitlichen Bewertung der Hell-Dunkel-Grenze für die Ausrichtung.

Werden die zehn Lichtverteilungen mittels der softwarebasierten Methode ausgerichtet, ergibt sich die in Abbildung 5.10 dargestellte Verteilung.

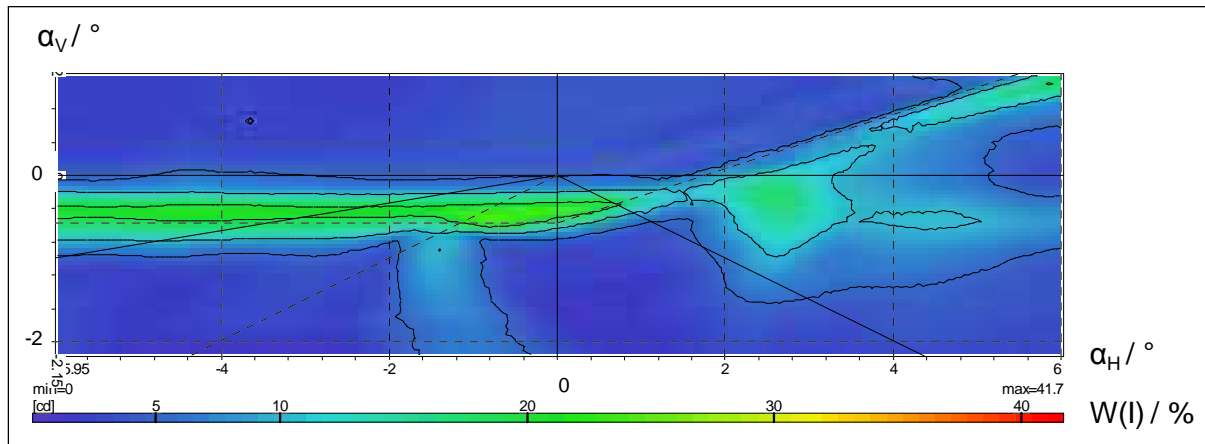


Abb. 5.10: Verteilung der Messunsicherheiten aus der softwarebasierten Ausrichtung

Es sind verringerte Abweichungen und Unsicherheiten im Bereich der Schulter zu erkennen. Zudem ist die vertikale Ausrichtung der Hell-Dunkel-Grenze sichtbar besser als die der visuellen Ausrichtung in Abbildung 5.8. Betrachtet man die Abweichung unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze, was dem Bereich der primären Lichtverteilung entspricht, so ist die Verbesserung gegenüber der messungsbasierten Ausrichtung in Abbildung 5.9 ebenfalls deutlich. Diese Validierung mittels der Verteilungen $W(I(\alpha_H, \alpha_V))$ kann in [Kie07] verglichen werden. In Abbildung 5.11 ist die aus der softwarebasierten Methode resultierende Verteilung der Mittelwerte $\bar{I}(\alpha_H, \alpha_V)$ der Paarung Lichtquelle/Reflektor dargestellt. Die Verteilungen $W(I(\alpha_H, \alpha_V))$ der mittels softwarebasierter Methode ausgerichteten Verteilungen der zwei Komponentenpaarungen, sind in Anhang E, Abbildung E.2 und E.3 dargestellt.

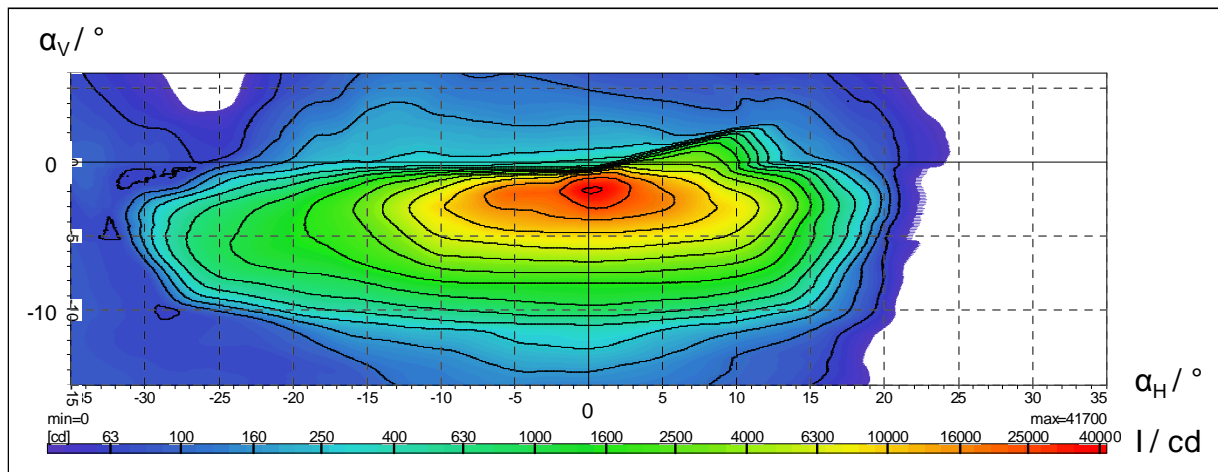


Abb. 5.11: Verteilung der Mittelwerte der Lichtstärken von 10 Scheinwerfern

Neben der Evaluation durch den Vergleich der Verteilungen ist auch eine Betrachtung der Abweichungen der Prüfpunkte der ECE R112 sinnvoll (vgl. Abbildung 3.3). Dieser Vergleich kann durch die Darstellung der prozentualen Abweichung $D_X(\alpha_H, \alpha_V)$ nach der Gleichung 3.6 in der Form der Gleichung 5.7 veranschaulicht werden. Ein Wert $D_X(\alpha_H, \alpha_V) > 0$ zeigt eine Verkleinerung der Unsicherheiten und damit eine Verbesserung an.

$$D_X(\alpha_H, \alpha_V) = \frac{\left(W_{VISUELL} \left(I(\alpha_H, \alpha_V) \right) - W_X \left(I(\alpha_H, \alpha_V) \right) \right)}{W_{VISUELL} \left(I(\alpha_H, \alpha_V) \right)} \cdot 100 \% \quad (5.7)$$

Durch einen groben Messgerätefehler fehlt der Vergleich zur messungsbasierten Ausrichtung bezogen auf zehn Testscheinwerfer. Bezogen auf acht Scheinwerfer können die Diagramme der Abbildung 5.12 das Optimierungspotential für beide Komponentenpaarungen vergleichbar darstellen. Dabei ist gemäß Gleichung 5.7 die visuelle Ausrichtung der Bezug für die beiden anderen Methoden.

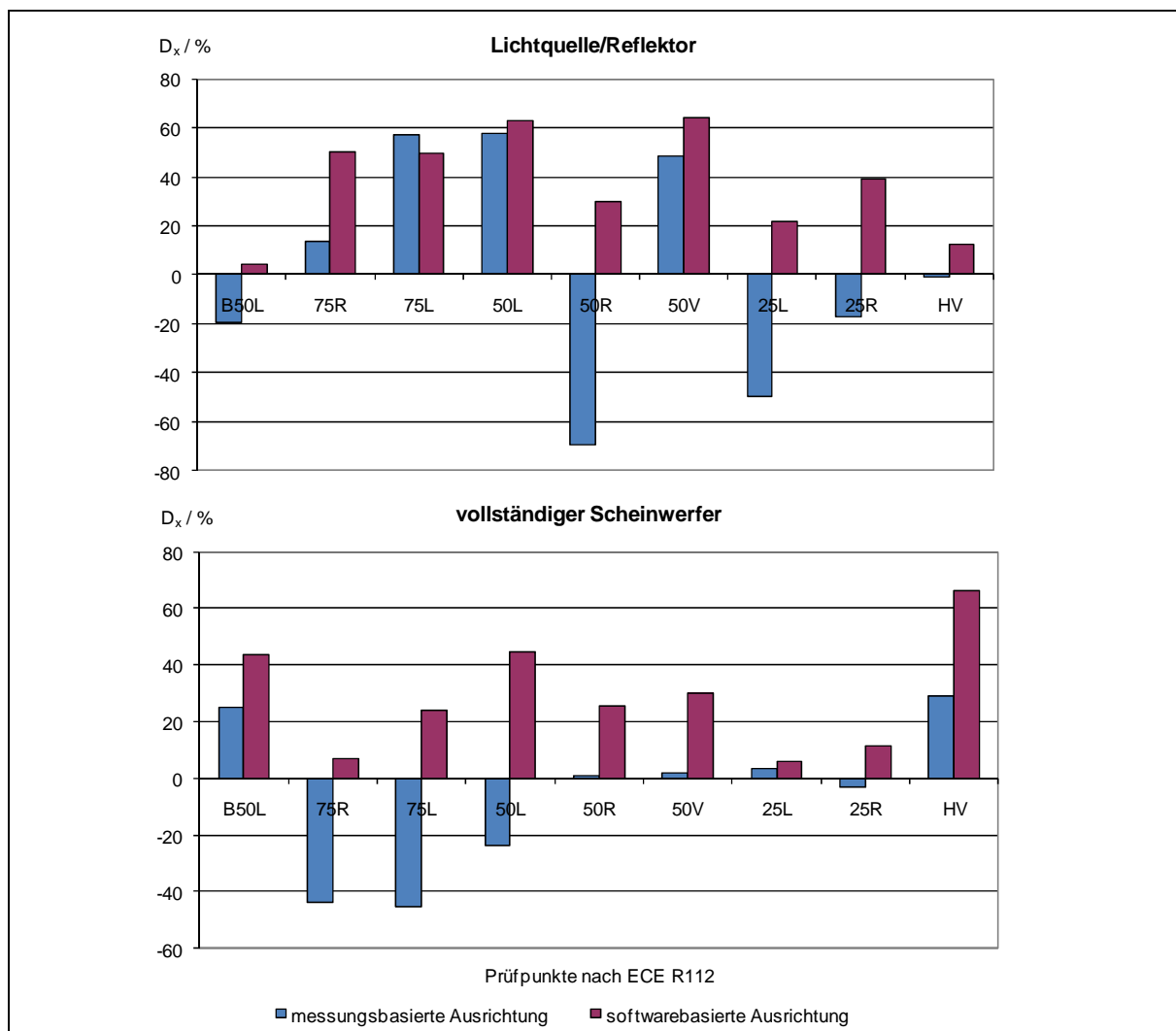


Abb. 5.12: Deviation der Unsicherheiten der Prüfpunkte nach Komponentenpaarung

Bei der Paarung Lichtquelle/Reflektor ist ersichtlich, dass die softwarebasierte Ausrichtung in jedem Prüfpunkt geringere Unsicherheiten erzeugt als die visuelle Ausrichtung. Bei dem Punkt 50V beträgt die Optimierung 64%. Die messungsbasierte Ausrichtung ist in fünf Punkten unsicherer als die visuelle Ausrichtung und in einem Punkt besser als die softwarebasierte Methode. Deutlich fällt auch der Vergleich bei der Hell-Dunkel-Grenze des vollständigen Scheinwerfers aus. Die prozentuale Verbesserung durch die softwarebasierte Ausrichtung ist etwas geringer, dafür ist die messungsbasierte Ausrichtung wesentlich schlechter als die visuelle Ausrichtung.

5.5 Zusammenfassung der Untersuchung

In diesem Abschnitt ist die Entwicklung einer neuen, softwarebasierten Methode zur Ausrichtung der Hell-Dunkel-Grenze dargestellt worden. Mit Hilfe dieser Methode kann nun die Bewertung von Scheinwerfern durch die photometrische Typprüfung anhand von gemessenen oder simulierten Lichtverteilungen erfolgen und somit in die Lichtsimulation übertragen werden.

Die Methode weist prinzipielle Vorteile gegenüber der visuell-manuellen und der messungsbasierten Ausrichtemethode auf. Die Ausrichtungen mit der Softwaremethode haben nur geringere Abweichungen untereinander. Die durch Messung und Simulation bestimmten Lichtverteilungen können eindeutig und miteinander vergleichbar ausgerichtet werden. Somit ist die Methode im Entwicklungsprozess einsetzbar und für eine virtuelle Typprüfung sowie für eine wahrnehmungsbasierte Bewertung verwendbar.

Die Validierung der Methode am Untersuchungsgegenstand bestätigt ihre prinzipiellen Vorteile. Die Analyse der Unsicherheiten der Verteilung sowie die der Prüfpunkte der ECE R112 belegt eine stabilere Ausrichtung durch die softwarebasierte Methode im Vergleich zu den anderen Verfahren.

Dieses Ergebnis sichert die Vorgehensweise ab, im weiteren Verlauf der Untersuchungen die softwarebasierte Ausrichtemethode für die Bestimmung der Verteilung der Mittelwerte $\bar{I}(\alpha_H, \alpha_V)$ und der beigeordneten Verteilung der erweiterten relativen Messunsicherheiten $W(I(\alpha_H, \alpha_V))$ einzusetzen.

6 Lichtquellenmodellierung

Nach den Untersuchungen zur Bewertung und zur Messung von Scheinwerferlichtverteilungen in den Kapiteln 3 und 4 steht in den Kapiteln 6 und 7 die lichttechnische Funktion des Gerätes im Vordergrund. Bei einem Scheinwerfer mit Freiformreflektor erfolgt die Abbildung der leuchtenden Fläche der Lichtquelle wie in Abbildung 6.1 schematisch dargestellt. Das Integral der auf ein Flächenelement projizierten Leuchtdichte bestimmt die Beleuchtungsstärke (vgl. Raumwinkelprojektionsgesetz [Gal07]). Somit ist die Verteilung der Leuchtdichte der Lichtquelle $L_{LS}(x, y, z, \vartheta, \varphi)$ neben der lichttechnischen Funktion M_{SW} des Scheinwerfers maßgeblich für die Modellierung.

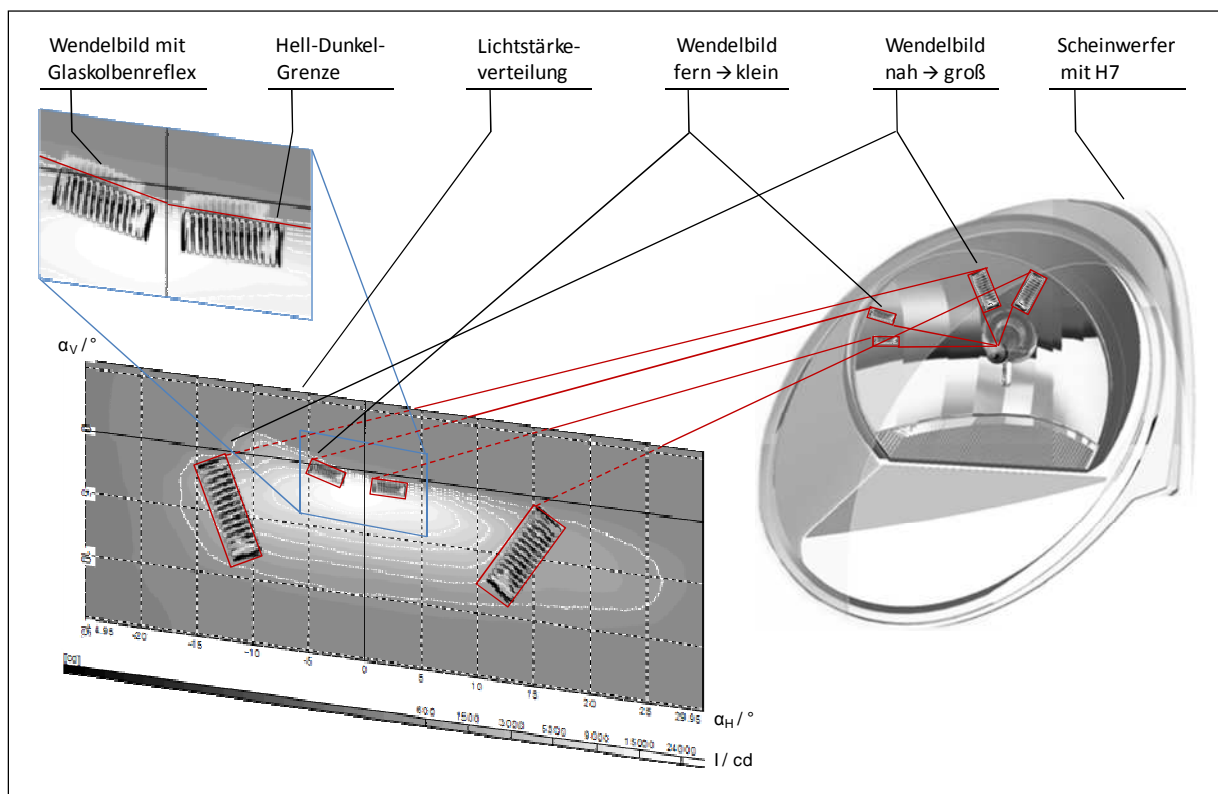


Abb. 6.1: Wendebilder der Lichtquelle und Lichtverteilung

Die Leuchtdichteverteilung der Lichtquellen weist aufgrund verschiedener Einflüsse Abweichungen von der Idealverteilung auf. In Abschnitt 4.1 wurden bereits die empfindlichen elektrischen Abhängigkeiten des Lichtstroms der H7 vom elektrischen Strom $\Phi_{LS}(I)$ gezeigt. Lichttechnische Geräte können im Fahrzeug großen statischen und dynamischen Abweichungen der Spannung unterliegen, was beispielsweise von Parlikar [PaSh09] aufgezeigt wird. Die Glühlampe selbst darf nach ECE R37 eine begrenzte Abweichung des Lichtstroms aufweisen. Bei einer H7 gelten beispielsweise $\Phi = 1500 \text{ lm} \pm 10 \%$ (vgl. [Ece05]). Geometrische Abweichungen können ebenfalls einen großen Einfluss auf die Funktion haben. Für Abweichungen der Position der Lichtquelle relativ zum Scheinwerfer, beispielsweise hervorgerufen durch geometrische Toleranzen des Lampenhalters oder des Wendehalters, ist dies in [Kie05] exemplarisch gezeigt worden. Bei dem vom Autor

untersuchten Scheinwerfer war lediglich eine maximale Toleranz von $z = 0 \pm 0,25 \text{ mm}$ für den Abstand Lichtquelle-Reflektor zulässig, um die photometrischen Anforderungen der Typprüfung noch einhalten zu können. Diese Toleranz wird schon durch die zugelassene Abweichung der Lichtquelle selbst ausgeschöpft (vgl. [Ece05]). Der Beitrag zeigt dabei die Möglichkeit der Lichtsimulation zur Toleranzanalyse im CAL. Die Anforderungen an die Toleranzen der Lichtquellen und die negativen Folgen im Verkehrsraum bei deren Überschreitung waren wiederholt im öffentlichen Fokus (vgl. Lorek [Lor09]). Das beispielsweise nach ECE R37 zulässige photometrische und geometrische Toleranzfeld für austauschbare Lichtquellen wird von Lampenherstellern genutzt, um Derivate anzubieten (vgl. Abbildung 6.6). Die dabei vorgenommenen Variationen der Wendeldurchmesser und Materialstärken der Temperaturstrahler beeinflussen sowohl direkt proportional die Lebensdauer als auch umgekehrt proportional die Leuchtdichte.

In diesem Kapitel zur Lichtquellenmodellierung soll auf den Einfluss der Abweichungen und Toleranzen der Lichtquellen und ihrer Derivate auf die lichttechnische Funktion eingegangen werden. Es sollen gemäß der generellen Ausrichtung dieser Arbeit signifikante Einflussfaktoren auf die lichttechnische Funktion identifiziert und evaluiert werden. Durch die abschließende Modellierung soll die hinreichende Genauigkeit der Simulation der Scheinwerferfunktion sichergestellt werden.

6.1 Auswahl und Abgrenzung der Untersuchungsgegenstände

Die maßgeblichen Lichtquellen der Kfz-Exterieurbeleuchtung sind Glühlampen mit oder ohne Halogentechnologie und die Gasentladungslampen, kurz GDL (Gas Discharge Lamp), HID (High Intensity Discharge) oder Xenonlampen. Die LED (Light Emitting Diode) nimmt an Bedeutung zu (vgl. Abschnitt 2.1). Lichtquellentechnologien wie Leuchtstofflampen, Infrarot-Lichtquellen oder organische Leuchtdioden, kurz OLED (vgl. [HaBr07]) spielen zum Zeitpunkt der Arbeit eine untergeordnete Rolle. Für die wesentlichen Lichtquellen und die LED, exemplarisch dargestellt in Abbildung 6.2, soll eine Abgrenzung und Übertragbarkeit der Modellierung diskutiert werden.

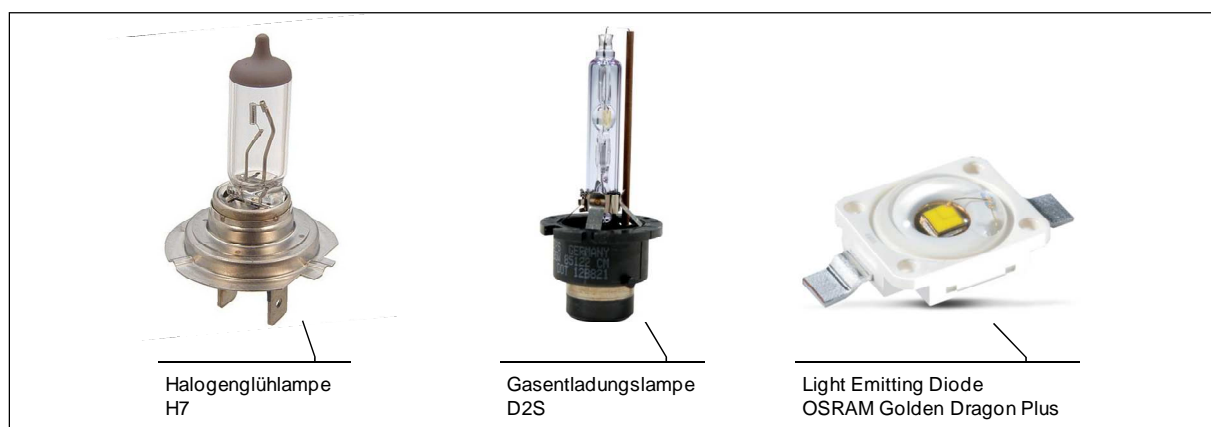


Abb. 6.2: Typen der Kfz-Lichtquellen

Gasentladungslampen weisen im Vergleich zur Glühlampe Unterschiede hinsichtlich der Technologie der Lichterzeugung, der Verteilung der Leuchtdichten sowie der

Zulassungsbestimmungen auf. Xenonlichtquellen sind keine gesetzlich regulierten wechselbaren Lichtquellen und dürfen nur in der Fachwerkstatt ausgetauscht werden. Es ist weiterhin von einem von der Glühlampe abweichenden zeitlichen und elektrischen Verhalten auszugehen. Die in Kapitel 4 beschriebene Unsicherheitsanalyse ist nicht übertragbar, unter anderem weil Gasentladungslampen eine eigene elektrische Versorgung und Stabilisierung mitführen. In dem in Abschnitt 2.2 beschriebenen Entwicklungsprozess spielen die Gasentladungslampen eine untergeordnete Rolle, da sie fast ausschließlich in modularen Projektionssystemen eingesetzt werden, die nur einer einmaligen CAL-Auslegung beim Zulieferer unterliegen. Die nachfolgend beschriebenen Modellierungsmethoden sind grundsätzlich auch für Gasentladungslampen anwendbar. Insbesondere muss die Lageabhängigkeit des Lichtbogens beachtet werden, weswegen die Lampe in Arbeitslage vermessen wird. Die Modellierung in der Lichtemission erfolgt über den nachfolgend aufgeführten, aber nicht näher behandelten Volumenemitter. Eine Vertiefung kann beispielsweise mit den Veröffentlichungen des Softwareherstellers Breault [KaGa02], [Breom] erfolgen.

Auch die LED können mit den nachfolgend dargestellten Methoden vermessen und modelliert werden. Maßgebliche lichttechnische Unterschiede ergeben sich durch die typischerweise ~10-fach geringeren Abmessungen der leuchtenden Fläche im Vergleich zu einer Wendel und der Vielzahl an zu modellierenden signifikanten Einflussfaktoren auf die Photometrie. Dazu gehören geometrische Details der leuchtenden Fläche und der Umgebung (vgl. Abbildung 6.2). Die Temperatur in funktionaler Verbindung mit der elektrischen Kontaktierung beeinflusst den Lichtstrom in der Fahrzeugumgebung erheblich (vgl. [Kie08b]). Die Technologie und die Alterung beeinflussen die Leuchtdichte und deren spektrale Eigenschaften winkelabhängig. In der Konzeptphase der lichttechnischen Auslegung ist oftmals die Modellierung als lambertscher oder mit der Fernfeldverteilung gefalteter (apodisierter) Flächenemitter in der entsprechenden Größe hinreichend (vgl. Abschnitt 6.4). Für die virtuelle Typprüfung müssen das nachfolgend eingeführte vollständige Geometriemodell oder Strahldaten aus Nahfeldmessungen, gegebenenfalls inklusive der genannten richtungsabhängigen spektralen Eigenschaften, berücksichtigt werden. Die gesetzliche Definition der LED als austauschbare Lichtquelle ist zum Zeitpunkt der Arbeit in Vorbereitung (vgl. [Rei07]).

Der bereits eingeführte Untersuchungsgegenstand, die H7 nach ECE R37, soll in diesem Absatz die Glühlampe repräsentieren. Die Auswahl soll als hinreichend gelten, da die H7 eine große Verbreitung im Markt mit einem weitgehend definierten Aufbau und hohen Anforderungen an die Genauigkeit verbindet (vgl. Abschnitt 2.1). Die H7 kann in vielen anspruchsvollen lichttechnischen Funktionen, wie beispielsweise dem Abblend-, Fern- und Abbiegelicht sowie dem Nebelscheinwerfer eingesetzt werden. Die relativ geringen Kosten in Bezug auf die lichttechnische Leistung führen zu einer weiten Verbreitung im ECE- und SAE-Zulassungsgebiet. Eine H7 ist mit ihren Bestandteilen in Abbildung 6.3 dargestellt.

Die ebenfalls weit verbreitete Halogenglühlampe Typ H4 integriert zwei Glühwendeln, um kostengünstig zwei Lichtfunktionen in einem Scheinwerfer bereitzustellen. Dies bedingt Verluste in der lichttechnischen Leistung der einzelnen Funktionen.

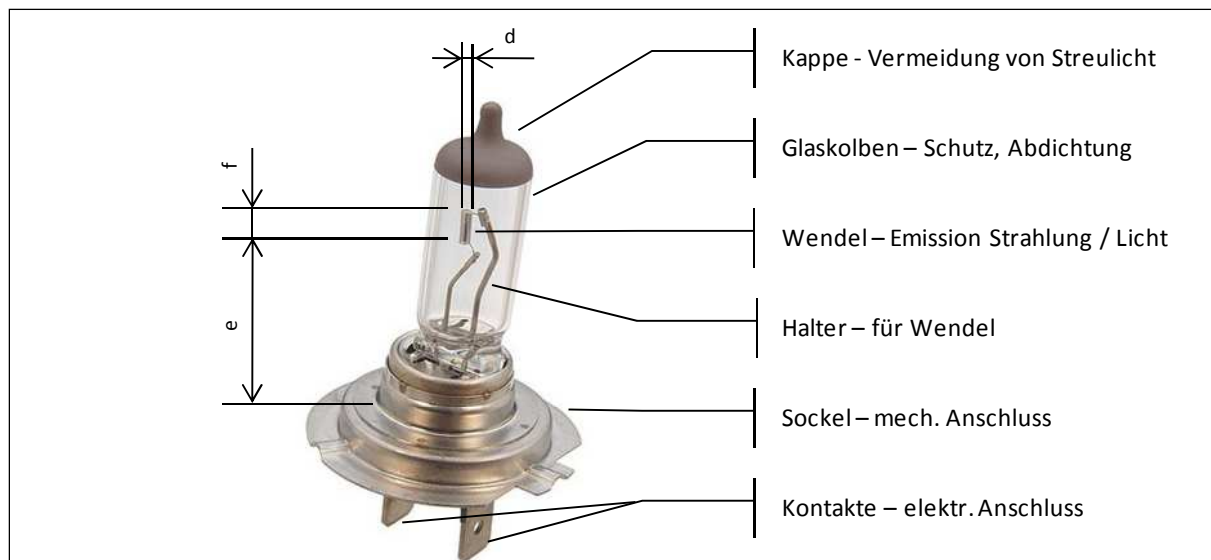


Abb. 6.3: Glühlampe H7 mit Bestandteilen und Bezugsmaßen der ECE R37

Die H7 wird von einer Vielzahl von Herstellern angeboten. Deren Derivate mit funktionsbeschreibenden Bezeichnungen wie Standard, Longlife, aber auch Marketing-geprägten Bezeichnungen wie Premium, Vision Plus oder Nightbreaker, unterscheiden sich unter anderem durch modifizierte elektrische und geometrische Eigenschaften der Wendel. Dabei ist physikalisch das Spannungsfeld zwischen niedriger Bestromung und damit höherer Lebensdauer bei weniger Lichtstrom und vice versa vorgegeben. Einige Derivate wie die Philips NightGuide oder Lampen mit blauer Anmutung unterscheiden sich zudem durch spektral wirksame Beschichtungen auf dem Glaskolben. Diese Derivate sind nicht Gegenstand der Untersuchung. Sie könnten aber durch richtungsabhängige Modellierung mit den nachfolgenden Methoden ebenfalls in die Simulation eingebracht werden. Die zur Untersuchung ausgewählten Lichtquellen sind frei erhältliche Derivate von zwei marktführenden Herstellern, die sich in der Wendelgröße unterscheiden. In dieser Arbeit soll die Kennzeichnung der Derivate wie in Tabelle 6.1 dargestellt erfolgen. Dabei werden selbst sprechende Bezeichnungen und die Kurzform SF für Sonderformat verwendet.

Tabelle 6.1: Untersuchte Derivate der H7

Bezeichnung Produkt	Hrst. A Standard	Hrst. A Longlife	Hrst. A Super-Longlife	Hrst. A SF1	Hrst. B Standard	Hrst. B Longlife	Hrst. B Super-Longlife	Hrst. B SF2
Bezeichnung Untersuchung	ST-A	LL-A	SLL-A	SF1-A	ST-B	LL-B	SLL-B	SF2-B

Die zu untersuchenden Einflussfaktoren auf die Lichtquellenfunktion sind im Einzelnen:

- elektrische Einflussfaktoren
- zeitabhängige Einflussfaktoren und Alterung
- geometrische Einflussfaktoren und Abweichungen der Wendel und davon abhängige Abweichungen der Leuchtdichte

6.2 Mess- und Modellierungsmethoden der Funktion

Zur lichttechnischen Modellierung der Lichtquellen ist die messtechnische Erfassung nötig. Deren Genauigkeit bestimmt die Genauigkeit der Modelle, weswegen die Messmittel nachfolgend thematisiert werden sollen. Die Kalibrierung des Lichtstroms von Lichtquellen bezogen auf deren elektrische Leistung mittels Ulbricht-Kugel wurde bereits in Abschnitt 4.1 eingeführt. Die Unsicherheitsanalyse mit dem ausschlaggebenden Unsicherheitsbeitrag durch die Prüf-Glühlampe wird dort gezeigt. Für Prüf-Glühlampen gelten engere geometrische Toleranzen als für Serien-Glühlampen, weswegen sie anhand ihrer Wendelgeometrie selektiert werden (vgl. [Ece05]). Dazu dienen überwiegend optische Messsysteme, die eine Abbildung der Wendel und deren Messung ermöglichen, wie beispielsweise Messmikroskope oder telezentrische Abbildungssysteme mit Durchlicht-Beleuchtung. Die Lichtstromkalibrierung der Prüf-Glühlampen erfolgt in einem im Vergleich zur Ulbricht-Kugel deutlich langsamer aber absolut messenden Goniophotometer (vgl. [BrSh06], [Rie84], [Rat95]).

Im Gegensatz zum Fernfeld-Goniophotometer kann ein bildauflösendes sogenanntes Nahfeld-Goniophotometer nicht nur Fernfeldgrößen innerhalb der photometrischen Grenzentfernung ermitteln, sondern auch die Ortsinformation der Leuchtdichte einer Lichtquelle nutzen, um eine vollständige Beschreibung des Lichtfeldes zu erreichen. Für die Lichtquellenmodellierung der Lichtsimulation ist diese Beschreibung eine Grundvoraussetzung. In Abbildung 6.4 ist das Schema einer Lichtquellenmessung und Modellierung mittels Nahfeld-Goniophotometer dargestellt. In Abbildung 6.4 (1) ist das vollständige Messgerät mit Goniometer und Drehachsen, Leuchtdichtekamera und einer H7-Lampe, siehe Abbildung 6.4 (2), als Messobjekt dargestellt. Aus der Messung der Leuchtdichteverteilung der Lichtquelle aus einer Richtung, siehe Abbildung 6.4 (3), können Strahlen zur Repräsentation generiert werden, wie in Abbildung 6.4 (4) gezeigt. Erfolgt dies über die gesamte Sphäre, siehe Abbildung 6.4 (5), wird die Lichtquelle vollständig beschrieben. Die Strahlen befinden sich dann auf einer Ersatzlichtquelle, in Abbildung 6.4 (6) ist dies eine Kugel. Eine Vertiefung der Messmethode kann mit [Ash93], [Ash95], [Rie84], [Rie91], [BrSh06], [Rie84] erfolgen.

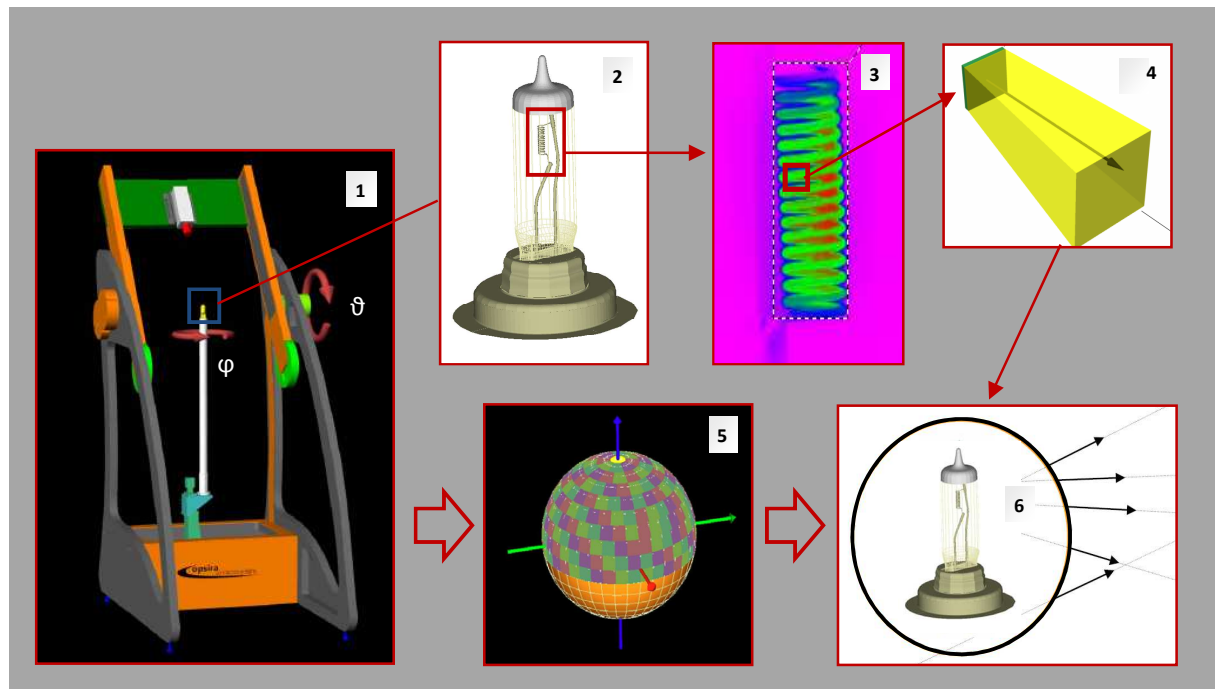


Abb. 6.4: Schema der Nahfeld-Goniophotometrie und Lichtquellenmodellierung (vgl. [Opsde])

Die Anwendung dieser Methode zur Messung und Modellierung von Kfz-Lichtquellen ist aktueller Stand der Technik. Sie wird beispielsweise von Messdienstleistern wie ILEXA, Opsira oder Technoteam [Ilede], [Opsde], [BrSh05] und Lichtquellenherstellern wie Osram [Rei03], [Rei03b] angeboten. Auf Nahfeldmessungen basierende Lichtquellenmodelle sind im Internet frei erhältlich [Osrde], [Phiom]. Als Veröffentlichung zur Methode, die thematisch an diese Arbeit angrenzt, sei der Beitrag von Reiners [Rei03] genannt. Reiners nennt für die H7-Lampe Anforderungen an eine hinreichende Winkelauflösung zur Erfassung der winkelabhängigen Schwankungen der mittleren Leuchtdichte respektive der Lichtstärke (vgl. Abbildung 6.5). Diese Schwankungen erzeugen bei bestimmten optischen Auslegungen erkennbare Inhomogenitäten in der Abblendlichtverteilung.

Verglichen mit einem Fernfeld-Goniophotometer ist der Messablauf umfangreicher und es wirken mehr Einflussfaktoren auf die Messgröße. Zur Modellierung von Lichtquellen muss zudem der Schritt der Strahldatengenerierung, der weitere Einflussfaktoren enthält, erfolgen. Maßgebliche Einflussfaktoren auf das Messergebnis sind nach den Erfahrungen des Autors (ohne Nachweis):

- die Positionierung der Lichtquelle ist aufgrund des Aufbaus der Messgeräte und der zahlreichen abzustimmenden Freiheitsgrade anspruchsvoll und sollte zudem im Toleranzbereich $< 1/10 \text{ mm}$ ausgeführt werden
- die statische und dynamische Stabilität des Goniometers beschränkt die Positioniergenauigkeit auch während der Messung
- die elektrische Kontaktierung der Lichtquelle ist aufgrund der in Abschnitt 4.1 gezeigten Abweichungen und Empfindlichkeiten kritisch

- der Dynamikumfang, die Ortsauflösung sowie die Schärfentiefe der Leuchtdichtekamera begrenzen die Erfassung der Lichtquelleneigenschaften, wie in Abschnitt 6.3 beschrieben
- weiterhin beschränkend sind die Datenverarbeitung mit den jeweiligen Methoden zur Koordinatentransformation und Winkelinterpolation der Leuchtdichtebilder, die Strahlgenerierung inklusive Interpolation und Leuchtdichteschwellwerten und die Methode der Energierepräsentation mittels Monte-Carlo-Sampling oder Energierepräsentation pro Strahl

Die vollständige Messunsicherheit dieser Messmethode wird in dieser Arbeit nicht analysiert. Es soll anhand eines exemplarischen Vergleichs der Bezug zu den Genauigkeitsanforderungen der anschließenden Messaufgabe hergestellt und eine Abschätzung der Messgenauigkeit vorgenommen werden. Dabei wird mit Hilfe des für die vorliegenden Untersuchungen verwendeten Nahfeld-Goniometers der Firma OPSIRA, Typ luca'gonio, eine Lampe vom in Abschnitt 4.1 eingeführten Typ H7, 64210L+, mittels des optionalen Photometers vermessen. Die resultierende Lichtstärkeverteilung $I_M(\alpha_H, \alpha_V)$ in Abbildung 6.5 (1) bildet einen Maßstab für die Genauigkeit. Des Weiteren wurden eine Nahfeldmessung, eine Strahlgenerierung und eine Einbindung in die Simulationssoftware ASAP der Firma Breault Research vorgenommen (vgl. Abschnitt 8.3, [Broom]). Die virtuellen Sensoren zur Berechnung der Beleuchtungsstärke und Ableitung der Lichtstärke $I_S(\alpha_H, \alpha_V)$ wurden in ihren Abständen $r = 0,6 \text{ m}$ und Auflösungen $\Delta\alpha_H = \Delta\alpha_V = 1^\circ$ dem Nahfeld-Goniophotometer angepasst. Die resultierende Verteilung ist in Abbildung 6.5 (2) gezeigt. In beiden Bildern wird bei $\alpha_H \approx 100^\circ$ die Abschattung durch den in Abbildung 6.2 gezeigten Haltedraht der Wendel dargestellt. Die raumwinkelgenaue Deviation nach Gleichung 3.6 ist in Abbildung 6.5 (4) dargestellt und zeigt die geringe Abweichung $D < 10 \%$ der beiden Verteilungen im für die lichttechnische Funktion relevanten Winkelbereich.

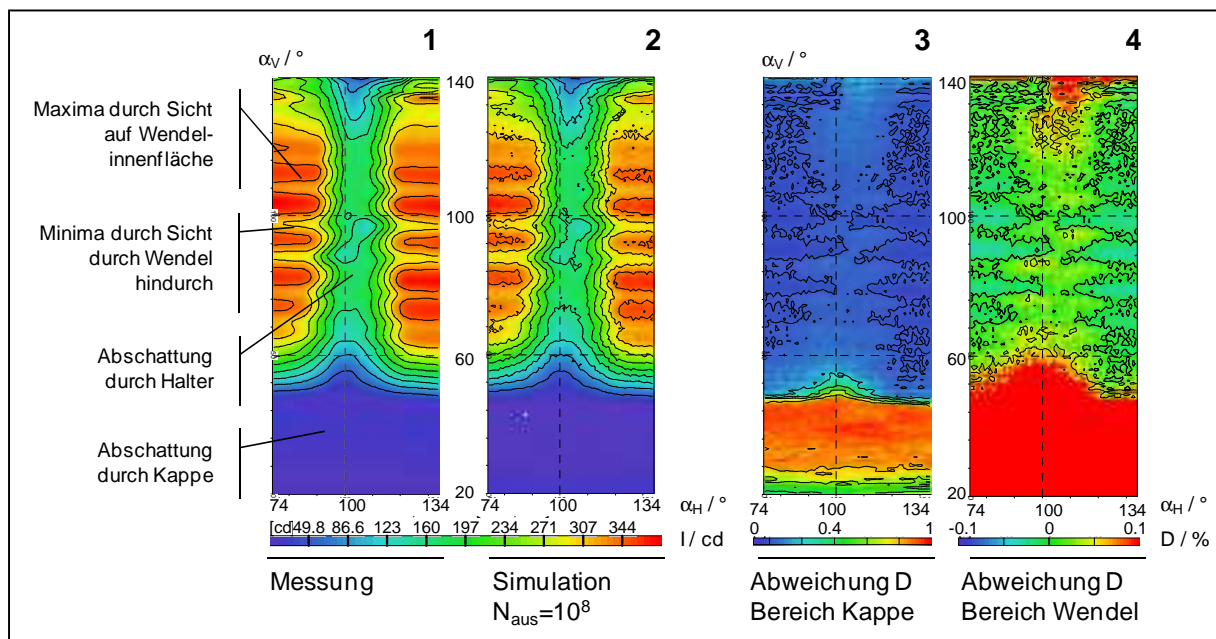


Abb. 6.5: Evaluation der Modellierung mittels Vergleich der Lichtstärkeverteilungen

In Abbildung 6.5 (3) ist der Wertebereich beschnitten, um die Abweichungen im Winkelbereich der Strahlenkappe darzustellen. Die hohe Abweichung $D \approx 100\%$ ist auf die Erfassung des Streulichtes des Lampensockels und der Halter durch das Photometer zurückzuführen. Bei der Nahfeldmessung wurde dies durch den mangelnden Dynamikumfang der Kamera nicht erfasst (vgl. Abschnitt 6.3). Die dargestellte Analyse beinhaltet alle Arbeitsschritte der Messung, Modellierung und Einbindung von Lichtquellenmodellen in die Simulationssoftware im Entwicklungsprozess und im CAL und soll somit als repräsentativ gelten. Die erreichbare Genauigkeit der Nahfeld-Goniophotometrie zur Modellierung der H7 ist somit hinreichend.

6.3 Einflussfaktoren auf die Funktion der Lichtquelle

Elektrische Abhängigkeiten der Fahrzeugumgebung

Die annähernd lineare Abhängigkeit der Leuchtdichte und des Nenn-Lichtstroms einer H7 vom elektrischen Strom $L_{LS} \sim \Phi_{LS}(J)$ im Arbeitspunkt wurde in Abschnitt 4.1 eingeführt. Weitere Kennlinien der Lichtstrom-Spannung-Abhängigkeit sind im Anhang D zu finden. Die Kenntnis dieser Abhängigkeiten ist im CAL des Entwicklungsprozesses nötig, da die lichttechnische Funktion des Scheinwerfers unter den elektrischen Randparametern, im Speziellen der Spannungseinprägung des jeweiligen Fahrzeugs, abgesichert werden muss. Dazu gehören die Ober- und Untergrenzen $U_{el,max}$, $U_{el,min}$ und die Signalform (vgl. [PaSh09]).

Im zunehmenden Maße findet die Leistungsregelung und damit die Spannungseinprägung mittels eines pulsweitenmodulierten Signals Anwendung. Das erlaubt die verlustarme Versorgung der elektrischen Verbraucher. Dabei wird die eingeprägte Versorgungsspannung von Pausen definierter Länge unterbrochen. Der emittierte Lichtstrom der Glühlampe ist von der effektiven elektrischen Leistung abhängig, die sich aus dem Produkt der effektiven Spannung und des effektiven Stroms ergibt, wie Gleichung 6.1 zeigt.

$$\Phi_{LS} \sim P_{eff} = U_{el,eff} \cdot J_{eff} \quad (6.1)$$

Die das Integral der Spannung bestimmende Signalform wird vom temperaturabhängigen und damit zeitabhängigen Widerstand $R_{LS}(T, t)$ der Wendel bestimmt. Die Trägheit des Widerstands verschleift theoretisch die Rechteckform des Signals. Zur Absicherung wurde die Signalform am Fahrzeug untersucht. Es zeigte sich, dass durch die ausreichend hohen Grundfrequenzen von $f \approx 100\text{ Hz}$ und durch die gute Dynamik der Stromversorgung der Batterie ein hinreichend rechteckförmiges Signal der Spannung und des Stroms an einer Glühlampe anliegt. Zudem ist die Einschwingdauer der Wendel, die zu der Verschleifung des Rechtecksignals führen kann, ~ 100 mal länger als die festgestellte Signaldauer und ~ 10 mal länger als die Periodendauer. Eine Auflistung der Trägheiten von Lichtquellen ist bei Köth [Köt09] zu finden. Die Abbildungen der Analyse sind in Anhang F aufgeführt. Damit kann die Effektivspannung aus der Eingangsspannung und dem prozentualen Puls-Pause-Verhältnis errechnet werden, wie in Gleichung 6.2 dargestellt. Der Wert $U_{el,eff}$ ist dann mit den in

Anhang D dargestellten Abhängigkeiten $L_{LS} \sim \Phi_{LS} = f(U_{el})$ vergleichbar. In der Regelung ECE R7 wird für Leuchten die Messung unter Fahrzeugsignalbedingungen in der photometrischen Typprüfung gefordert, was auch die Einprägung der pulsweitenmodulierten Spannung bedeuten kann.

$$U_{el,eff} = \sqrt{\frac{U_{el,ein}^2 \cdot dc}{100}} \quad (6.2)$$

mit $U_{el,eff}$: Effektivspannung ; $U_{el,ein}$: Eingangsspannung ; dc : Puls-Pause Verhältnis in %

Ungewünschte Effekte wie der sogenannte Perlschnureffekt bei pulsweitenmodulationsgesteuerten LED-Leuchten führten vereinzelt zu einer Frequenzerhöhung. Beim Perlschnureffekt werden die Lichtquellen als störend flackernd und örtlich getrennt wahrgenommen (vgl. Strauss [Str05]).

Langfristige, zeitabhängige elektrische Eigenschaften der Alterung

Im Rahmen der Messunsicherheitsanalyse wurde die Langzeitstabilität $L_{LS} \sim \Phi_{LS} = f(t)$ der Lampe H7, 64210L+, mittels Ulbricht-Kugel untersucht (vgl. Abschnitt 4.1). Innerhalb einer Messzeit $t = 200 h$ und Spannungseinprägung ergab sich eine annähernd lineare Lichtstromabnahme von $\Phi(t) = -0,5 lm/h$. Aus der Auswertung der parallel durchgeführten Strommessung ergab sich eine Lichtstromzunahme von $\Phi(t) = 0,24 lm/h$ bei Stromeinprägung. Eine mögliche Begründung in dieser Tendenz liegt in dem Materialverlust der Wendel beim Betrieb. Dies führt zu einer Zunahme des Widerstands R_{LS} der Wendel und damit zu einer Leistungsabnahme respektive einer Lichtstromabnahme bei Einprägung der Spannung. Wird der Strom eingepreßt, so führt der erhöhte Widerstand zu einer Temperaturzunahme und zu einer Lichtstromzunahme. Zudem wird bei Alterung und Erosion einer Wendel die emittierende Oberfläche vergrößert. Für die vorliegenden Messzeiten und die verwendete Stromeinprägung ist die Abweichung des Lichtstroms vernachlässigbar. Üblicherweise werden Messlampen spätestens nach $t \approx 100 h$ ausgetauscht.

In einer weiteren Untersuchung wurde die Winkelabhängigkeit der zeitabhängigen Abweichungen überprüft. Zu Erwarten waren lage- und damit winkelabhängige Lampenschwärzungen. Während die Halogenprozess-unterstützte H7 innerhalb der Gebrauchszeit keine erkennbare Lampenschwärzung aufwies, konnte an einer Glühlampe Typ P21/4W der Effekt dargestellt werden. Dabei wurde die Lampe in Gebrauchslage in einer Schlussleuchte gealtert, die im Fernfeld-Goniophotometer montiert war. So konnten die Lichtverteilungen $I_M(\alpha_H, \alpha_V, t)$ aufgenommen und verglichen werden. Der Teillichtstrom änderte sich in 70 h um 4 %, während einzelne Prüfpunkte der ECE R7 eine Änderung von $> 6 \%$ aufwiesen. Die Schwärzung war deutlich sichtbar. Die Untersuchung wurde vom Autor in [Kie07a] vorgestellt. Der Alterungseffekt begrenzt nicht nur die Nutzungsdauer der Lampe als Messlampe, sondern verbietet auch die typische Methode der Rekalibrierung des Lichtstroms. Die Lampenschwärzung ist aber nicht relevant für die Lichtquellenmodellierung, da sie einen groben Fehler darstellt, der in der Messung zu vermeiden ist.

Eigenschaften und Abweichungen der Wendelgeometrie

Zur Detaillierung der zu betrachtenden Geometrien ist in Abbildung 6.6 links die schematische Darstellung der H7 mit ihren Bezugsmaßen aus der ECE R37 abgebildet. Die für die lichttechnische Funktion relevanten Maße e und f bestimmen dabei den Abstand der Wendel von der Bezugsebene sowie ihre Länge. In Abbildung 6.6 rechts ist der Toleranzrahmen der Wendel für die Serienfertigung der Lampe abgebildet. Die Linien mit den Bezeichnungen Z1 bis Z4 kennzeichnen die jeweiligen Grenzen für die Wendelenden. Die Maße sind in der Tabelle in Abbildung 6.6 für die 12-V-Variante dargestellt. Ein weiteres in der ECE reguliertes Maß ist d , der Durchmesser der Wendel. Alle weiteren Abweichungen der Positionen und Rotationen sind durch die Toleranzbox beschrieben. Deren Einhaltung ist Voraussetzung für die Zulassung der Lampe.

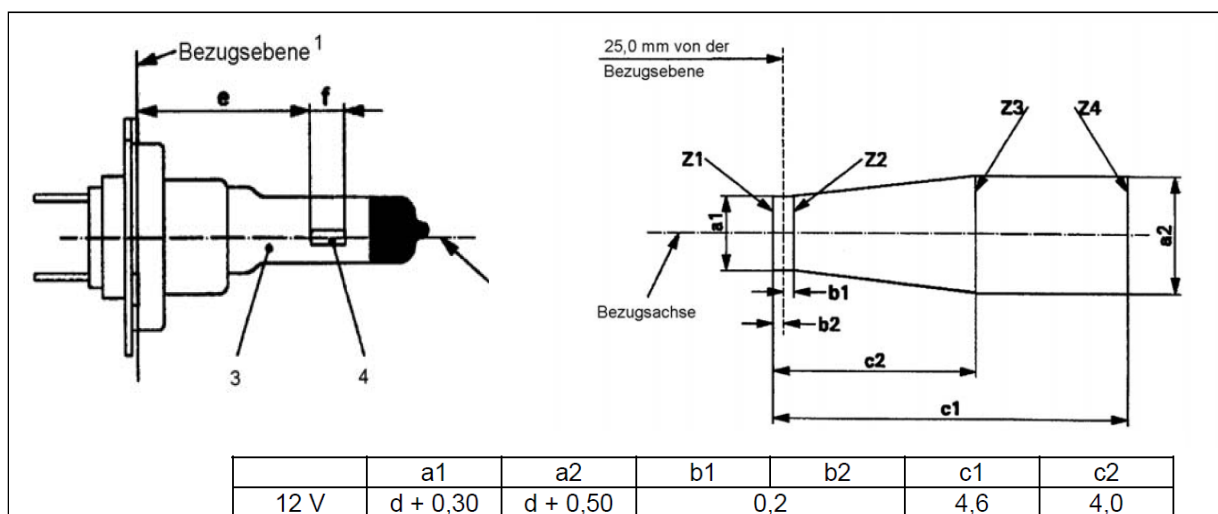


Abb. 6.6: Maße der H7(links) und der Toleranzbox der Wendel (rechts) in mm aus der ECE R37 [Ece05]

Für eine Modellierung sind nur solche Maße zu beachten, die nicht nachträglich durch eine Justage des Lichtquellenmodells in der Simulationsumgebung korrigiert werden können. Dadurch sind nur noch f und d relevant, die nachfolgend betrachtet werden. Der Einfluss der Abweichungen dieser Maße auf die lichttechnische Funktion des Scheinwerfers ist nicht unmittelbar gegeben, da die vorgeschriebene Einstellung der HDG nach jedem Lampenwechsel einen Teil der Abweichungen kompensiert. Somit ist eine Anwendung der Ergebnisse der Lichtquellenanalyse in der Unsicherheitsanalyse der Scheinwerferfunktion nicht sinnvoll.

Zur Ermittlung der Maße f und d sowie der projizierten Fläche $A = f \cdot d$ müssen Exemplare jedes Derivates aus unterschiedlichen Winkeln φ senkrecht zur Wendellängsachse $\vartheta = 0^\circ$ vermessen und die Mittelwerte \bar{d} und \bar{f} sowie die Unsicherheit $u(A)$ der Fläche A ermittelt werden. In den Unsicherheiten wurden die zufälligen Abweichungen berücksichtigt, da diese für den Vergleich maßgeblich sind. Die Wendelfläche wurde getrennt von der leuchtenden Fläche, aber mit dem gleichen Messaufbau, ermittelt, um die Genauigkeit zu erhöhen. Die Messung erfolgte mittels der Leuchtdichtkamera des oben eingeführten Nahfeld-

Goniophotometers. Eine andere Methode ist die taktile Messung der aus einer zerstörten Lichtquelle entnommenen Wendel, wie bei Stevenson [Ste02] beschrieben. Bei diesem Verfahren ist mit Abweichungen zu rechnen, da die scheinbare Wendelgröße, bedingt durch die winkelabhängige Abbildung durch den gewölbten Glaskolben, von der realen Wendelgröße abweicht. Zur Veranschaulichung des gewählten Messverfahrens sei in Abbildung 6.7 die Wendel des Derivates ST-B und der Messrahmen in der Bildebene dargestellt.

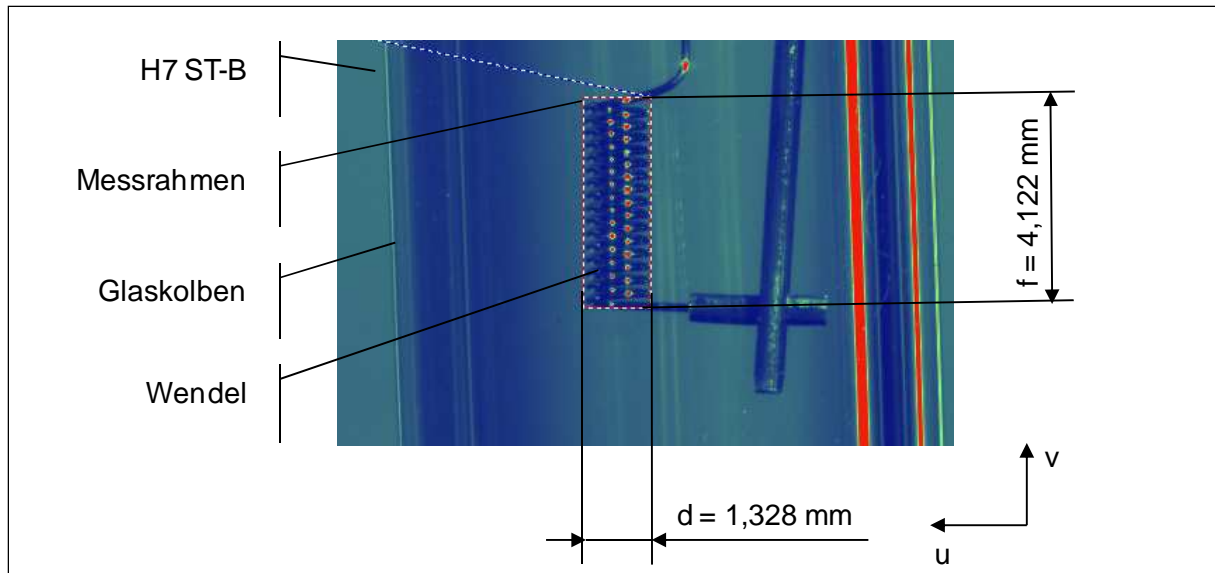


Abb. 6.7: Kamerabasierte Messung der Geometrie der H7

Die ermittelten Werte der Flächen sind in Abbildung 6.8 dargestellt. Die Standard-Messunsicherheit der Flächenmessung wurde aus einer Messung von zehn Lampen des gleichen Herstellers und Derivats sowie aus zwei Betrachtungswinkeln $\varphi_1 = 0^\circ$ und $\varphi_2 = 90^\circ$ bei $\vartheta_0 = 90^\circ$ mit $w(A) = 3,67\%$ ermittelt und übertragen. Die schwierige Bestimmung des Messrahmens anhand des Bildes und starke Formabweichungen der Wendeln wirkten sich ungünstig auf den Unsicherheitsbeitrag aus.

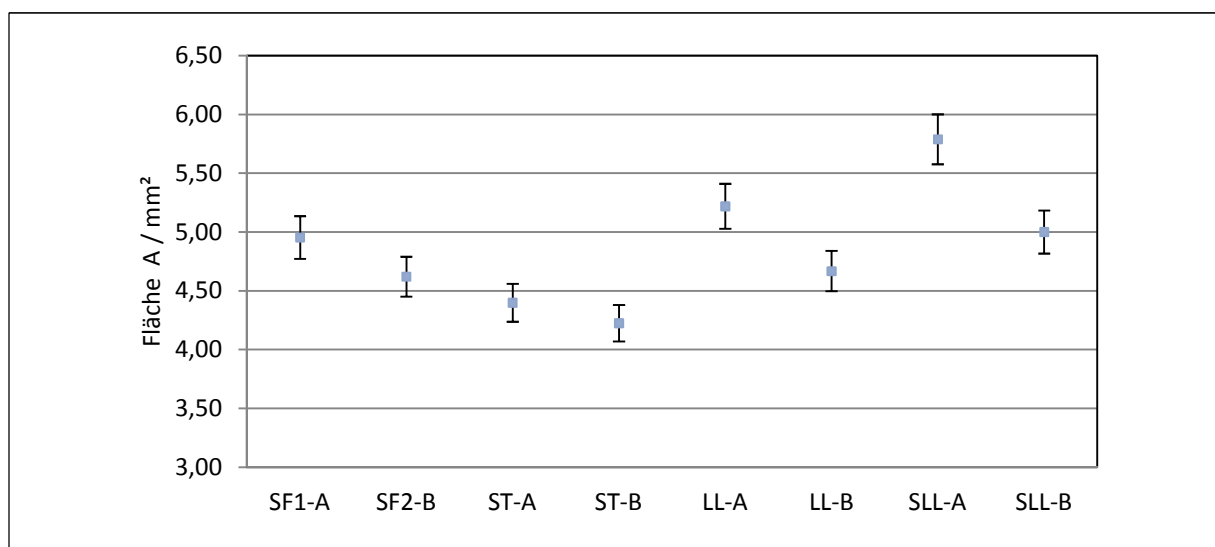


Abb. 6.8: Fläche der H7-Derivate der Hersteller A und B, $w(A) = 3,67\%$

Die Flächenunterschiede der Derivate Longlife (LL) und Superlonglife (SLL) unterschiedlicher Hersteller können im Rahmen der Standard-Messunsicherheit getrennt werden. Im Fall des Vergleichs der Derivate Standard (ST) ist die Trennung nicht deutlich. Werden die Derivate jeweils eines Herstellers miteinander verglichen, ist die Trennung im Rahmen von $w(A)$ deutlich, mit Ausnahme der Derivate Longlife (LL) und Superlonglife (SLL) des Herstellers B. Qualitativ zeigt sich aber der Trend zu größeren projizierten Flächen bei auf Langlebigkeit optimierten Derivaten. Dabei zeigt Hersteller A eine insgesamt größere Fläche sowie größere Unterschiede zwischen den Flächenmaßen der Lichtquellen als Hersteller B.

Zur Ermittlung der mittleren Leuchtdichte der Wendel \bar{L}_{LS} wurde ein typisches Verfahren angewendet und überprüft. Dabei wird der Mittelwert innerhalb eines Rahmen gebildet, der 80 % der Fläche der Wendel umfasst. Die Mittelwertbildung wird angewendet, da Wendeln sehr inhomogene Leuchtdichteverteilungen $L_{LS}(x, y, z, \vartheta, \varphi)$ aufweisen, bedingt durch ihre Geometrie und den heißeren und damit helleren Innenteil. Zusätzlich besteht eine Abhängigkeit vom Betrachtungswinkel, von der Bildauflösung und von der Wendel deformation. Eine Mittelwertbildung ist alternativ aus einem 100%-Rahmen möglich, der im Gegensatz zum 80%-Rahmen auch die inhomogenen Randbereiche und deren Positionierabweichungen einschließt. Dies kann wiederum zu größeren Abweichungen der Werte und erhöhten Unsicherheiten führen. In Abbildung 6.9 werden die Leuchtdichteverteilung der Wendel $L_{LS}(u, v)$ sowie die untersuchten Messrahmen und Werte dargestellt. Anhand von Messungen mit zwölf Exemplaren eines Derivates und zwei Betrachtungswinkeln φ_1 und φ_2 wurde eine geringere Standardabweichung bei Verwendung der 100%-Rahmen-Methode festgestellt, welche somit nachfolgend genutzt werden soll. Die Ursache für diese unerwartete Stabilität des 100%-Rahmens sollte in der spezifischen Leuchtdichteverteilung des Messobjektes liegen und könnte durch eine sukzessive Verkleinerung und Verschiebung des Rahmens analysiert werden. Die Ermittlung der mittleren Leuchtdichte erfolgte in der horizontalen Lage der Scheinwerferfunktion, um den Einfluss des Temperaturgradienten durch Selbstaufheizung zu minimieren.

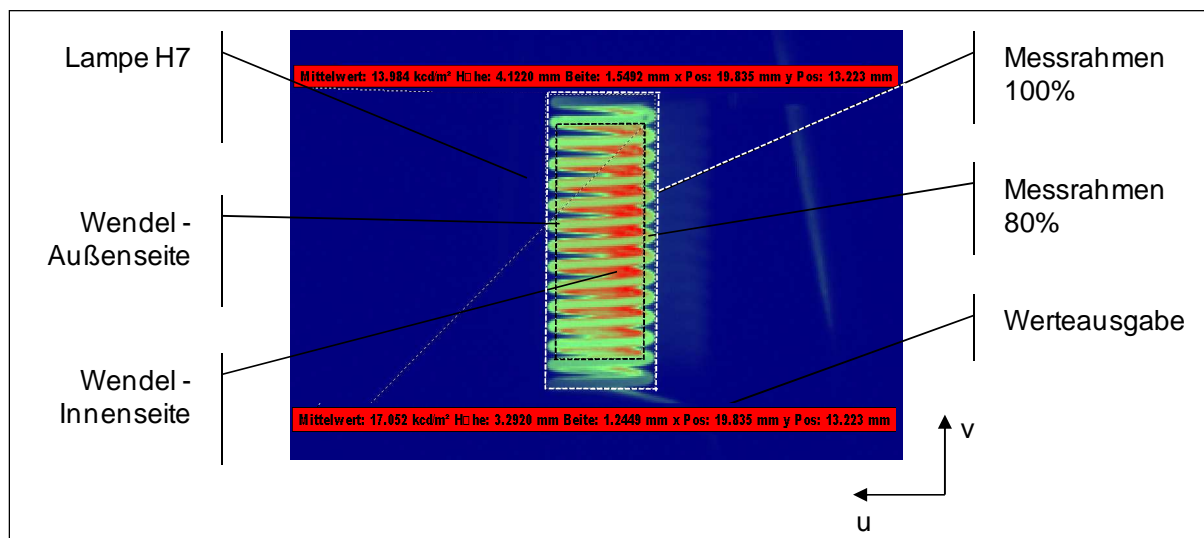


Abb. 6.9: Leuchtdichteverteilung der Wendel

Der Unsicherheitsbeitrag $w(L_{LS}) = 1,62\%$ für die mittlere Leuchtdichte der Derivate wurde anhand von zwei Exemplaren und Mehrfachmessungen aus fünf Winkeln ermittelt. Es zeigte sich, dass die Abweichungen der Werte aus verschiedenen Winkeln φ an einem Exemplar größer sind als die Abweichungen der Werte verschiedener Exemplare aus einem Winkel.

Anschließend wurden in einer Messreihe unter Beachtung der gleichen Aufspannung und Arbeitslage die mittleren Leuchtdichten \bar{L}_{LS} zu den mittleren projizierten Flächen \bar{A}_{LS} für alle Lichtquellenderivate ermittelt. Die Messung erfolgte anhand einer nach geometrischer Maßhaltigkeit ausgewählten Lichtquelle jedes Derivates und Herstellers. Es wurde eine Mittelung über fünf Winkel φ_i durchgeführt. Die gemessenen mittleren Leuchtdichten sind in Abbildung 6.10 dargestellt. Die Auswertung erfolgt mit der Erläuterung der Zusammenhänge zur Fläche \bar{A}_{LS} im anschließenden Absatz.

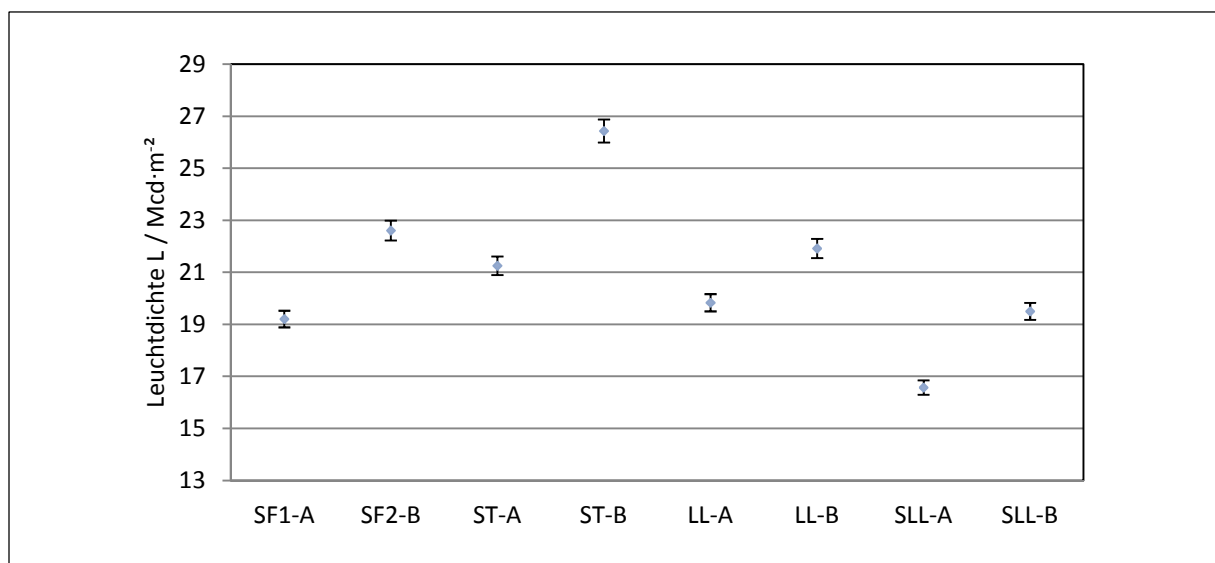


Abb. 6.10: Leuchtdichte der H7-Derivate der Hersteller A und B, $w(L) = 1,67\%$

Abhängigkeiten der Leuchtdichte und der Fläche

Es ist ein funktionaler Zusammenhang zwischen Leuchtdichte \bar{L}_{LS} und Fläche \bar{A}_{LS} der Wendel gegeben. Im Falle eines einfachen Zylinderemitters gilt Gleichung 6.3.

$$\Phi_{\text{CYL}} = \pi^2 \cdot L_{\text{CYL}} \cdot f_{\text{CYL}} \cdot d_{\text{CYL}} \cdot \Omega_0 \quad (6.3, [\text{Gal07}])$$

Da die Kalibrierung der Messlampen auf den Nennlichtstrom $\Phi_{\text{NENN}} = \text{konst}$ in einer Ulbricht-Kugel ohne Beachtung der Flächen oder Leuchtdichten erfolgt, ist ein indirekt proportionaler Zusammenhang der gemessenen Größen zu erwarten. Dies ist für die Abweichungen einer Typprüfung relevant.

Die qualitative Betrachtung in den Abbildungen 6.8 und 6.10 bestätigt den indirekt proportionalen Trend. Wird zur Prüfung der Annahme $L_{LS} \cdot A_{LS} = \text{konst}$ das Produkt gebildet und mittels $(L_{LS} \cdot A_{LS})_{\text{NORM}} = (L_{LS} \cdot A_{LS}) / (L_{\text{LL-A}} \cdot A_{\text{LL-A}})$ auf die Standard-

Lichtquelle dieser Untersuchungen, Lichtquelle LL-A, normiert, ergeben sich die in Tabelle 6.2 dargestellten Werte.

Tabelle 6.2: Abhängigkeiten der Leuchtdichten und Flächen der Wendeln der Derivate

Lichtquelle - Derivat	SF1-A	SF2-B	ST-A	ST-B	LL-A	LL-B	SLL-A	SLL-B
$(L_{LS} \cdot A_{LS})_{NORM}$	0,92	1,01	0,90	1,08	1,00	0,99	0,93	0,94

Die Annahme $L_{LS} \cdot A_{LS} = konst$ kann gut wiedergegeben werden. Die prozentualen Abweichungen betragen $D \leq 10 \%$. Die abschließenden Werte \bar{L}_{LS} und \bar{A}_{LS} sind in Tabelle 6.3 aufgelistet.

Tabelle 6.3: Leuchtdichten und Flächen der Wendeln der Derivate

Lichtquelle	SF1-A	SF2-B	ST-A	ST-B	LL-A	LL-B	SLL-A	SLL-B
\bar{A}_{LS} / mm^2	4,95	4,62	4,40	4,23	5,22	4,67	5,79	5,00
$\bar{L}_{LS} / Mcd \cdot m^{-2}$	19,21	22,61	21,26	26,44	19,84	21,92	16,58	19,51

Die Abweichungen der Leuchtdichten L_{LS} und Flächen A_{LS} der Wendeln der Derivate einer H7 sind deutlich. Es sind zwischen den beiden untersuchten Herstellern Abweichungen der Fläche A_{LS} von $A_{min} = 4,23 mm^2$ zu $A_{max} = 5,79 mm^2$ mit einer prozentualen Abweichung von $D = 27 \%$ ermittelt worden. Die mittleren Leuchtdichten weichen von $L_{min} = 16,58 Mcd/m^2$ zu $L_{max} = 26,44 Mcd/m^2$ ab, mit einer prozentualen Abweichung von $D = 37 \%$. Deswegen sollen die Derivate in der Typprüfung und in der nachfolgenden Untersuchung getrennt betrachtet werden.

Einfluss der Derivate auf eine Scheinwerferlichtverteilung

Gemäß der einleitend dargestellten lichttechnischen Funktion eines Scheinwerfers und unter Berücksichtigung der oben genannten Einschränkungen auf die Übertragbarkeit in die Typprüfung und Fahrzeugbedingungen ist ein deutlicher Einfluss der ermittelten Abweichungen in den Lichtquellenderivaten auf die Qualität und Quantität der Lichtverteilungen zu erwarten. In [Kie07a] wurde dieser Einfluss vom Autor anhand von zwei Derivaten und zwei Herstellern dargestellt. Es wurde der in dieser Arbeit beschriebene Scheinwerfer genutzt. Der Vergleich umfasste den Nachweis über die Unterscheidbarkeit der Derivate auf Basis von gemessenen wie auch simulierten lichttechnischen Größen. Es wurden die Werte einer Größe unterschiedlicher Derivate verglichen, also $Y_{LS,1}/Y_{LS,2}$, während in der oben stehenden Untersuchung unterschiedliche Größen eines Derivates nach $Y_{LS,1} \cdot X_{LS,1}$ verrechnet und anschließend verglichen werden. Die aus beiden Untersuchungen abgeleiteten und nachfolgend vertieften Aussagen zu den Derivaten sind vergleichbar. Zudem wurde gezeigt, wie eine abnehmende Leuchtdichte L_{LS} zu einer abnehmenden maximalen Beleuchtungsstärke E_{max} in der Lichtverteilung des Scheinwerfers führt. Als Ursache wird angenommen, dass die mit der abnehmenden Leuchtdichte L_{LS} ansteigende Fläche A_{LS} vom konstanten optischen System nicht zur Konzentration in E_{max} genutzt werden kann. Weiterhin

wurde der Einfluss einer zunehmenden Fläche A_{LS} der Wendelbilder auf die Abnahme der Schärfe $G_{\max}(-2,5^\circ, \alpha_V)$ der HDG gezeigt. Es wurde abschließend vermutet, dass bei der Lichtquellenmodellierung für die Absicherung der Funktion von Abblendscheinwerfern die Hersteller und Derivate zu berücksichtigen sind.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Untersuchung auf die beschriebenen Derivate der Lichtquellen ausgeweitet, wobei in der Messung nur fünf Derivate, jeweils die Typen ST-A, ST-B, LL-A, SLL-A und SLL-B, verwendet wurden. In der Simulation wurden alle acht Derivate herangezogen. Es wurden die Werte der Größen $E_{SW}(\alpha_H, \alpha_V)$ und $I_{SW}(\alpha_H, \alpha_V)$ anhand des beschriebenen Scheinwerfers nach dem in Kapitel 4.1 beschriebenen Messvorgang sowie anhand des in Kapitel 8.3 beschriebenen Simulationsaufbaus ermittelt. Es wurde dabei die Komponentenpaarung Lichtquelle/Reflektor verwendet, um die Abweichungen durch die Lichtscheibe nicht einzubeziehen. Für den Vergleich wurden die Werte I_{\max} und $G_{\max}(-2,5^\circ, \alpha_V)$ herangezogen, da sie weitgehend unabhängig von der Ausrichtung der HDG sind, im Gegensatz zu den ebenfalls beeinflussten Werten der Prüfpunkte 75R oder B50L.

Werden die gemessenen Werte $I_{M,\max}$ über \bar{L}_{LS} aufgetragen, wie in Abbildung 6.11 dargestellt, so wird die mit $R^2 = 0,56$ mäßige Korrelation deutlich. Für die simulierten Werte $I_{S,\max}$ ist die Korrelation mit $R^2 = 0,85$ gut. Weiterhin sind in der Simulation Werte der maximalen Lichtstärke von $I_{S,\min} = 40900 \text{ cd}$ bis $I_{S,\max} = 46200 \text{ cd}$ zu beobachten, was einer prozentualen Abweichung von $D = 11 \%$ entspricht.

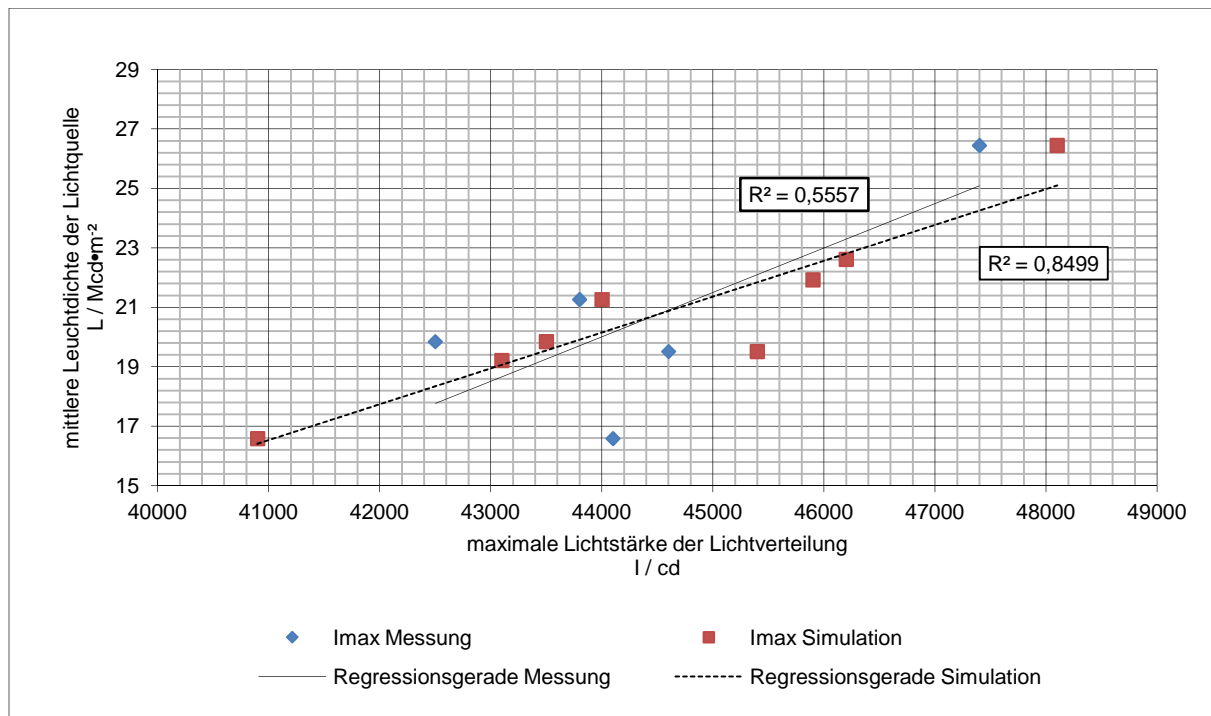


Abb. 6.11: Maximale Lichtstärke der Lichtverteilung und Leuchtdichte der Wendel jeweils aus Messung und Simulation, Komponentenpaarung Lichtquelle/Reflektor, 5 bzw. 8 Lichtquellenderivate

Aus der Untersuchung der Korrelation des maximalen Gradienten $G_{\max}(-2,5^\circ, \alpha_V)$ der HDG mit der leuchtenden Fläche A_{LS} der Lichtquelle geht hervor, dass die Abhängigkeit bei den gemessenen Verteilungen mit $R^2 = 0,45$ noch mäßig, bei den simulierten Verteilungen mit $R^2 = 0,03$ nicht erkennbar ist. Die Werte und die Regressionsgeraden sind in der Abbildung 6.12 dargestellt.

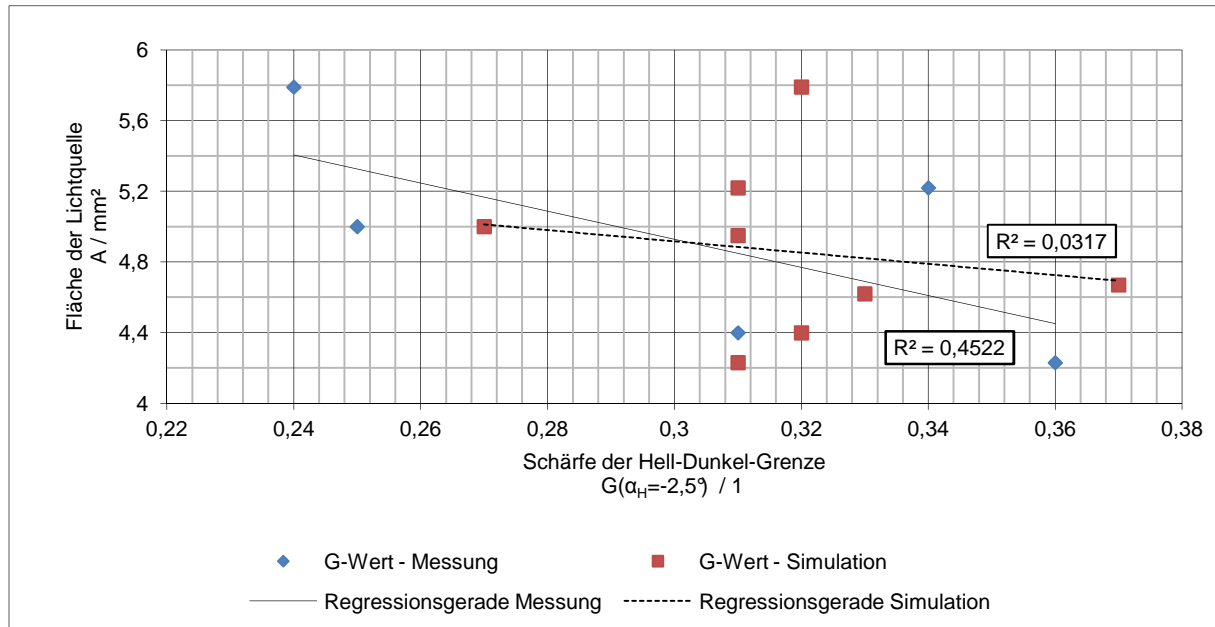


Abb. 6.12: Schärfe der HDG der Lichtverteilung und Fläche der Wendel jeweils aus Messung und Simulation, Komponentenpaarung Lichtquelle/Reflektor, 5 bzw. 8 Lichtquellenderivate

Der Grund für die geringe Übereinstimmung in der Simulation wird in einer Dejustage der Lichtquellen während der Nahfeldmessung vermutet, die zu einer nicht korrigierbaren Verschiebung der Wendelbilder führen. Diese Abweichungen führen zu einer Unschärfe der HDG. Die Verschiebungen der Wendelbilder sind in Anhang G dargestellt.

Somit kann die Übertragbarkeit der Einflussfaktoren der Lichtquellen hinsichtlich maximaler Lichtstärke und Qualität der Hell-Dunkel-Grenze für den Fall gemessener Lichtverteilungen gezeigt werden. Die Abbildung in der Simulation konnte nur für den Einfluss auf die maximale Lichtstärke dargestellt werden. Man kann aber weiterhin davon ausgehen, dass die systematischen Einflüsse der Lichtquellenderivate auf die Scheinwerferlichtverteilung auch in der Simulation richtig wiedergegeben werden, wenn die Lichtquellenmodelle hinreichend genau sind.

Einfluss des Dynamikumfangs auf die Modellierung

Zur hinreichend genauen Messung der Leuchtdichteverteilung $L_{LS}(x, y, z, \vartheta, \varphi)$ der H7-Lampe, wie in Abbildung 6.13 rechts dargestellt, sollte ein Wertebereich $\Delta L > 10^4 \text{ cd/m}^2$ erfasst werden. Eine Datenbreite der digitalen Bildaufnahme und -verarbeitung von nur 12 bit bei der verwendeten Leuchtdichtekamera ist nicht hinreichend, wie in Abbildung 6.13

links gezeigt wird. Das Bild der Wendel am Glaskörper, welches durch Fresnel-Reflexion und Streuung entsteht, ist nur verrauscht erkennbar. Die anderen indirekt leuchtenden Lampenbestandteile wie der Glaskolben oder der Sockel sind unvollständig erfasst. Ein hinreichender Signal-Rausch-Abstand scheint nicht gegeben. Damit ist die Datengrundlage für eine hinreichend genaue Modellierung dieser Komponenten ungenügend.

Die zum Zeitpunkt dieser Arbeit üblichen Nahfeld-Goniophotometer verwenden aus Gründen der Messgeschwindigkeit Kameras in der Funktion einer Einzelbildmessung, die somit auf 12 *bit* oder 13 *bit* Dynamikumfang begrenzt sind.

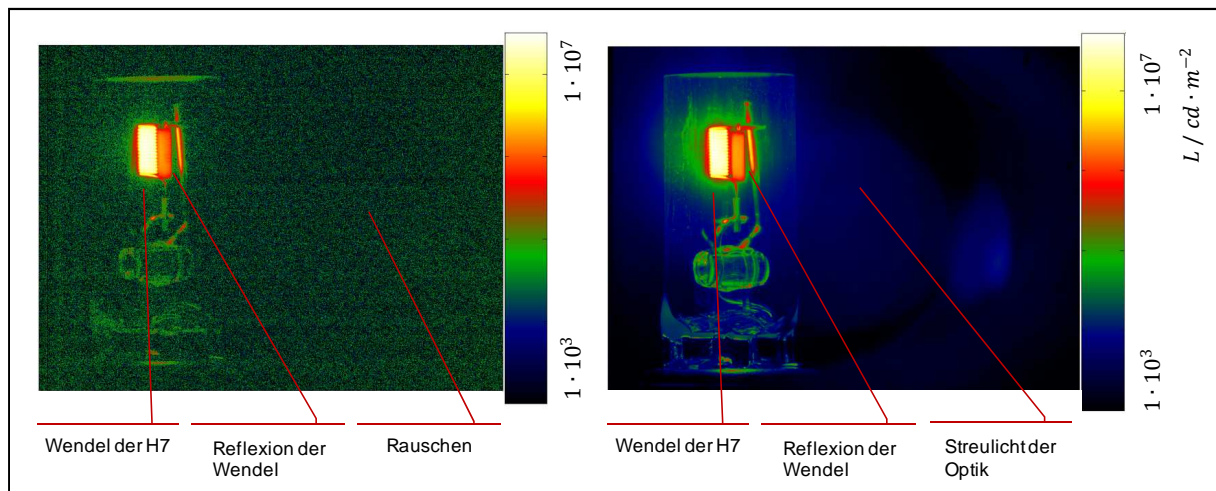


Abb. 6.13: Leuchtdichteverteilung einer H7 mit 12-bit und 20-bit Datentiefe

Die Abbildung 6.13 rechts zeigt eine Messung auf Basis einer 20 *bit*-Datenverarbeitung, entstanden aus einer zeitintensiven Mehrfachmessung mit Stufen von Belichtungszeiten und Bildverarbeitung, einer sogenannten High-Dyn-Messung. Es sind die Spiegelungen der Wendel im Glaskolben vollständig zu erkennen. Der nötige Signal-Rausch-Abstand ist bei dieser Datenbreite gegeben.

Bei der Generierung von Strahlen aus Leuchtdichteverteilungen ist ihre Anzahl N oder ihr Teillichtstrom Φ_t proportional zur Leuchtdichte $L_{u,v}$ des Pixels. Soll beispielsweise die Leuchtdichte eines Pixels, dessen Wert $L_{u,v} = 1/100 \cdot L_{\max}$ beträgt, durch Strahlen repräsentiert werden, so würde im Fall einer Strahlgenerierung mit $\Phi_t = \text{konst}$ das Flächenelement des Pixels durch $N = 1$ Strahlen beschrieben werden, während das Flächenelement des Pixels $L_{u,v} = \text{max}$ durch $N = 100$ Strahlen repräsentiert werden würde. Somit bedeutet ein großer Dynamikumfang bei der in der Praxis üblichen Begrenzung der Gesamtanzahl an Strahlen, dass sehr viele Strahlen zur Repräsentation des Wertes hoher Leuchtdichten benötigt werden und Pixel mit niedrigen Leuchtdichten nur wenige Strahlen erhalten. Dies führt zu Rauschen. Im Fall $\Phi_t = \Phi_t(L_{u,v})$ würden $N = 100$ Strahlen mit $\Phi_t = 1/100 \cdot \Phi_{\max}$ im Pixel erzeugt. Bei dieser Methode verlagert sich das Problem der Repräsentation der Werte auf den Sensor, der die niedrigen Teillichtströme bewerten muss, was bei Häring [Här07], [Här07a] vertieft wird. Die Methode bringt zudem zusätzlichen Aufwand beim Raytracing sowie bei der Datenverarbeitung mit sich, weswegen sie im CAL vermieden wird.

Das Problem des begrenzten Signal-Rausch-Abstandes bei der Erfassung der Leuchtdichten sowie die Problematik der Repräsentation niedriger Leuchtdichten durch Strahlen führen zu Begrenzungen in den Modellierungen der Glaskörper und ähnlicher Lichtquellenkomponenten. Es ist aus der Simulation mit den nachfolgend eingeführten Zylinderlichtquellenmodellen, die keinen Glaskörper enthalten, ersichtlich, dass das Streulicht oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze bei einem Freiformreflexionsscheinwerfer maßgeblich durch die Leuchtdichten am Glaskörper erzeugt wird (vgl. Wiersdorff [Wie00] und Abbildung 6.1). Die maximalen Beleuchtungsstärken am Prüfpunkt B50L betragen mit $E_{SW,max}(-3,4^\circ, 0,6^\circ) = 0,4 \text{ lx}$ überschlägig 1/100 der maximalen Beleuchtungsstärken einer Abblendlichtverteilung. Die Leuchtdichten am Glaskörper sind damit maßgeblich für Blendung und Erkennbarkeitsentfernung und müssen hinreichend genau gemessen und modelliert werden. Die Effekte auf die Lichtverteilung werden in Abschnitt 8.5 vertieft dargestellt.

Bewertung und Positionierung durch simulierte Leuchtdichtebilder

Aus den mittels Nahfeldmessung und Strahlgenerierung gewonnenen Strahldatensätzen der Lichtquellen können in der Simulationssoftware die in Abbildung 6.14 links dargestellten Leuchtdichteverteilungen $L_S(u, v)$ erzeugt werden. Bei hinreichend großer Strahlenanzahl N und dem Abgleich der Parameter des virtuellen Leuchtdichtesensors mit den Parametern (z.B. Raumwinkeln) der Leuchtdichtekamera ist ein qualitativer Vergleich der simulierten und der gemessenen Leuchtdichteverteilungen $L_M(u, v)$ möglich, wie in Abbildung 6.14 rechts dargestellt.

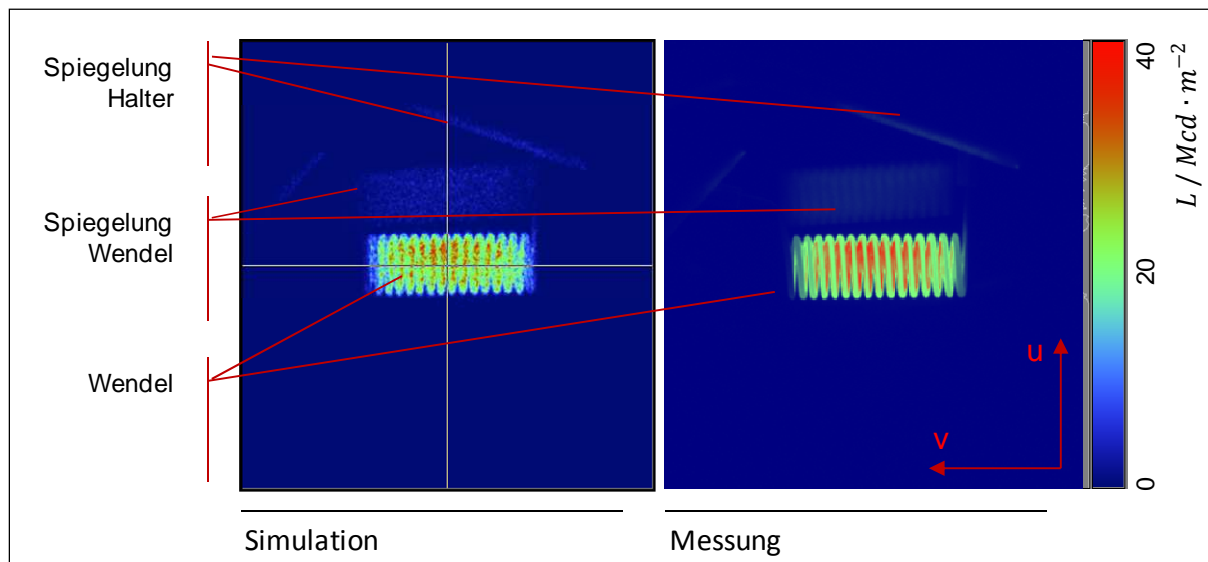


Abb. 6.14: Leuchtdichteverteilung der H7 aus Simulation und Messung

Wie einleitend beschrieben, sollten anhand dieser Bilder die Lichtquellenmodelle im Koordinatensystem sowie relativ zu den CAD-Daten der lichttechnischen Funktionsflächen positioniert werden, um die Genauigkeit der Simulation zu erhöhen. Es können Rotationen $\Delta\varphi$ und $\Delta\vartheta$ sowie das Maß e korrigiert werden. Die Maße d und f sowie Abweichungen des

Goniometers wie eine Umkehrspanne können geprüft, aber nicht korrigiert werden (vgl. Anhang G).

6.4 Lichtquellenmodelle in der Simulation

Nach der Einführung der Einflussfaktoren auf die Lichtquellenfunktion sowie deren Messmethoden und Abweichungen sollen die Methoden zur Umsetzung der Modelle in der Lichtsimulation beschrieben werden. Es wird zudem eine Diskussion hinsichtlich der Anwendbarkeit im Entwicklungsprozess vorgenommen. Dabei wird die von Wiersdorff [Wie00] dargestellte Praxis der an Entwicklungsphasen angepassten Detaillierung der Modellierung weitergeführt (vgl. Abschnitt 2.2).

Die Methoden zur Lichtquellenmodellierung unterscheiden sich zum einen in der Detaillierung der Beschreibung der Geometrie und zum anderen im Ursprung der Strahlen. Beim Ursprung wird unterschieden in Strahldaten, die der Nahfeldmessung entstammen, und Strahldaten, die direkt aus einer CAD-Geometrie emittiert werden. Im letzteren Fall werden Ort und Richtung der Strahlen auf eine CAD-Fläche referenziert und mathematisch beschrieben.

Anhand der H7-Lampe seien drei wesentliche Detaillierungsstufen in der Abbildung 6.15 dargestellt. In Abbildung 6.15 links ist die Hüllgeometrie der H7-Wendel nach ECE R37 dargestellt, aus der lambertförmig Strahlen emittiert werden. In der Mitte der Abbildung 6.15 wird ein vollständiges Geometriemodell gezeigt, bei dem die Strahlen lambertförmig aus der Wendelgeometrie emittiert werden. In Abbildung 6.15 rechts wird die vollständige CAD-Geometrie mit den jeweiligen Strahldaten kombiniert dargestellt. Dabei werden die Strahlen aus der Nahfeldmessung (in Schwarz dargestellt) auf einer willkürlich dimensionierten Ersatzlichtquelle gezeigt. Diese Strahlen werden oftmals in einem Folgeschritt in der Simulationsumgebung auf der Hüllgeometrie der Lampe positioniert (in Rot dargestellt). Dies entspricht räumlich gesehen dem Fall des CAD-Emitters mit der vollständigen Geometrie, nachdem die Strahlen von der Wendel durch die Geometrie verfolgt wurden. Weiterhin sind die Strahlen des Hüllflächenemitters in Blau dargestellt.

Das Verschieben der Startpunkte erhöht die Anwendbarkeit und Genauigkeit des Strahldatensatz-Modells durch die Anpassung an die realen geometrischen Grenzen. Dies ist bei einer Ersatzlichtquelle nicht zwangsläufig gegeben. Zudem werden dadurch fehlerzeugte Strahlen, die beispielsweise aus dem Rauschen der Leuchtdichteverteilung einer Nahfeldmessung generiert wurden, gelöscht. Eine anschließende Rekalibrierung des Lichtstroms Φ_{NENN} ist sinnvoll, da die Teillichtströme der Strahlen Φ_t den Gesamtlichtstrom mittels Φ_{NENN}/N repräsentieren. Weiterführende Beschreibungen der vorgestellten Methoden sind in [Ste02], [Haa98], [KaGa02] zu finden.

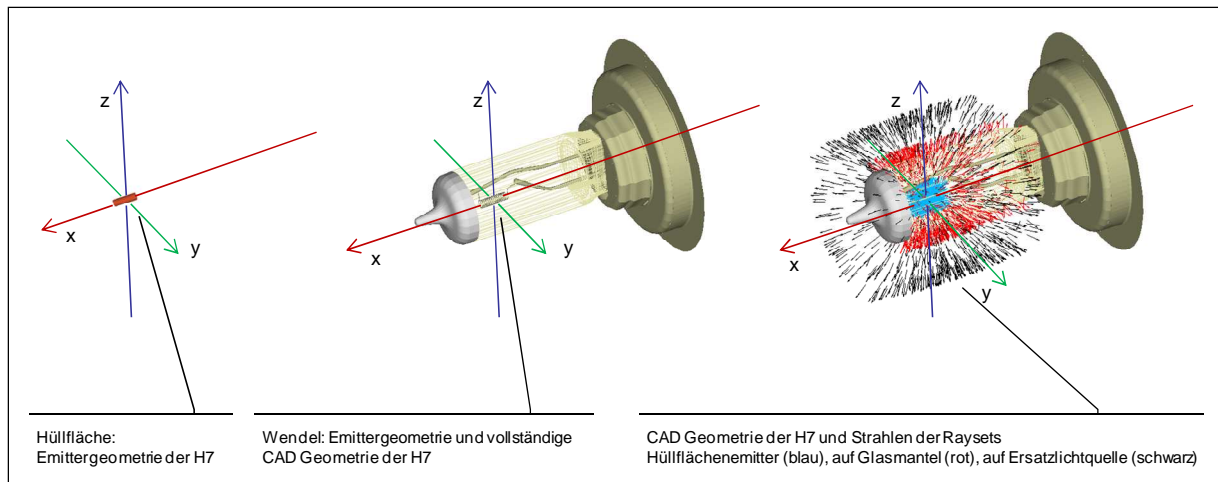


Abb. 6.15: Drei typische Formen der Lichtquellenmodellierung anhand der H7

Aus den beschriebenen Modellierungsmethoden wurde die Methode des Strahlensatzes, der anhand der Nahfeldmessung generiert wird, bereits eingeführt. Dieser beschreibt das Lichtfeld einer Lichtquelle vollständig. In der Kombination mit der vollständigen CAD-Geometrie, wie in Abbildung 6.15 rechts gezeigt, und deren Modellierung wird sichergestellt, dass Strahlen, die den Ort der Lichtquelle passieren, nicht fehlerhaft berechnet werden. Eine Klassifizierung und Detaillierung der Modellierungsmethoden für Lichtquellen soll graphisch durch Abbildung 6.16 erfolgen.

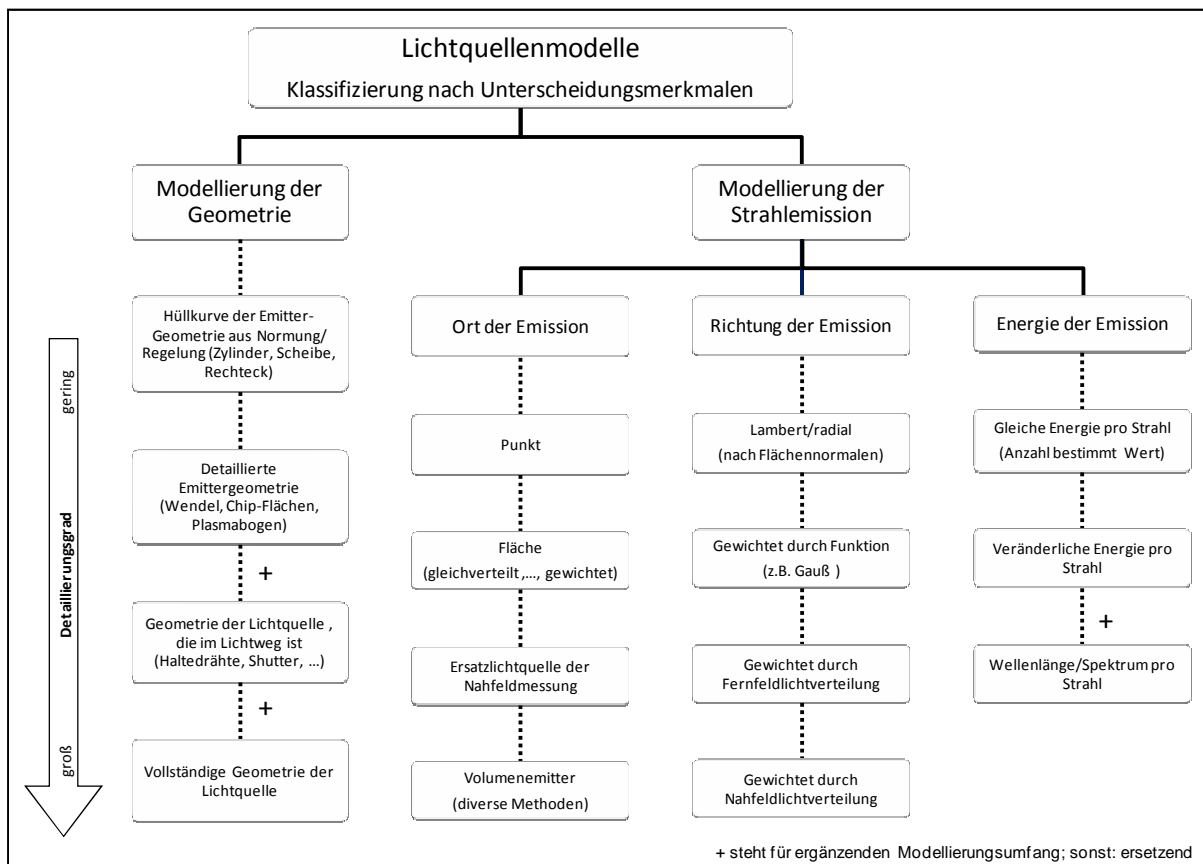


Abb. 6.16: Klassifizierung und Detaillierung der Modellierungsmethoden

Anmerkung: Lichtquellenmodelle, die gemäß der realen Lampenfunktion mittels einer Strahlgenerierung auf der Emitterfläche modelliert werden und deren Strahlen anschließend durch die Lampengeometrie berechnet worden sind, können auch mittels ihres resultierenden Strahldatensatzes in eine Lichtsimulation eingebunden werden. Der Startpunkt der Strahlen liegt dann auf der letzten Durchstoßfläche, wie bei der Methode in Abbildung 6.15 mittig. Dieses Vorgehen spart Berechnungszeit.

Im Anschluss sollen maßgebliche Einflussfaktoren auf die Genauigkeit der Modelle beschrieben werden, auf deren Basis die Einordnung im Entwicklungsprozess vorgenommen werden kann. Theoretisch können bei vollständiger photometrischer und geometrischer Erfassung und Modellierung die auf einer Nahfeldmessung basierten Lichtquellenmodelle sowie die auf einem CAD-Emitter basierten Lichtquellenmodelle eine vollständige Beschreibung des Lichtfeldes der realen Lampe ermöglichen. Praktisch ergeben sich charakteristische Abweichungen und Grenzen der Genauigkeit aus dem Beschaffungsaufwand und der typischen Verwendung.

Die Genauigkeit der Strahldaten-Modelle aus der Nahfeldmessung wird, wie oben beschrieben, maßgeblich durch die mechanische Genauigkeit des Goniometers (geometrisch) und die Abbildungsgenauigkeit und Dynamik der Leuchtdichtekamera (photometrisch) sowie durch den Algorithmus der Strahldatenerzeugung begrenzt.

Die Genauigkeit der CAD-Emitter-Modelle begrenzt typischerweise der Aufwand der Beschaffung der CAD-Daten. Oftmals sind genaue Modelle weder von Lichtquellenherstellern (Betriebsgeheimnis), noch von Softwareherstellern (aus Kostengründen) verfügbar. Photometrische Abweichungen ergeben sich beispielsweise durch die Genauigkeit der Modellierung der Emitter. Eigenschaften wie beispielsweise die besonders heißen und damit helleren Innenseiten einer Wendel (vgl. Abbildung 6.14) oder die Streuung am Glaskörper durch reale, raue Oberflächen (vgl. Abbildung 6.13 rechts) erfordern einen besonderen Aufwand bei der Modellierung.

Die Modellierung der spektralen Eigenschaften der Lichtquellen ist für spezielle Fälle der virtuellen Absicherung nötig. Beispielsweise müssen besondere Modelle für die Simulation von Transmissionsverlusten an Optikelementen mit stark schwankender Materialstärke und Lichtwegen, für die Absicherung von Farbeffekten durch Dispersion an Projektionsmodulen, oder für die Berechnung der Weißpunktverschiebung bei Optikelementen und weißen LED-Lichtquellen verwendet werden. Die Modellierung erfolgt zum einen winkelunabhängig mittels einer Faltung der Teillichtströme Φ_t mit dem Lichtquellenspektrum $X_{e,\lambda}$ und ggf. V_λ . Dabei wird entweder jedem Strahl \vec{r} ein dem spektralen Anteil entsprechender Teillichtstrom Φ_t und eine Wellenlänge λ in der Form $\vec{r} = (x, y, z, s, t, u, \lambda, \Phi_t)$ zugewiesen (z.B. mittels Importance Sampling), oder es wird jedem Strahl das vollständige Spektrum zugeteilt, entsprechend $\vec{r}(X_{e,\lambda}, \Phi_t)$. Mit der Zuweisung des vollständigen Spektrums ist es einem Raytracing-Algorithmus möglich, so lange spektral unabhängig und damit schnell zu rechnen, bis der Strahl ein spektral abhängiges Objekt trifft, an dem eine Faltung erfolgen muss. Das ist bei Kfz-Leuchten mit farblosen Reflektoren, aber farbigen Lichtscheiben, typisch.

Zum Anderen kann das winkelaufgelöste Zuweisen der spektralen Eigenschaften nötig werden, zum Beispiel bei weißen LED oder Gasentladungslampen, die in Abhängigkeit vom Winkel unterschiedliche Spektren aufweisen. Abweichungen entstehen bei der spektralen Modellierung zumeist durch die zu geringe Abtastung des Spektrums durch die Strahlinformation, denn die Menge der Strahlen N muss nicht nur das Lichtfeld, sondern auch die spektrale Information repräsentieren (vgl. Kapitel 8.4).

In der abschließenden Tabelle 6.4 wird eine Bewertung der drei Lichtquellenmodelle anhand weiterer Kriterien vorgenommen. Die Kriterien sind aus den Anforderungen des Entwicklungsprozesses und hinsichtlich der vorliegenden Aufgabenstellung abgeleitet. Die einzelnen Kriterien und deren Begründung sind:

- die Abweichung und Unsicherheit: für eine hinreichende Genauigkeit der Simulation
- der Beschaffungsaufwand: ursächlich für Zeitverlust und Kosten
- die Variabilität hinsichtlich Änderungen: ursächlich für Zeitverlust und Kosten, wenn z.B. abweichende Typen/Derivate abgebildet werden müssen oder Toleranzuntersuchungen nötig werden
- die Datenmenge: ursächlich für Aufwendungen durch Speicherung und Datentransport
- die Geschwindigkeit im Raytracing: die Berechnungszeit ist Kostenfaktor und bedeutet im ungünstigsten Fall den Leerlauf eines Bearbeiters am ausgelasteten Computer

Tabelle 6.4: Bewertung der Modellierungsmethoden

Modell/Typ	Einsatz	Bewertung/Begründung	
Hüllflächen-Emitter	frühe Auslegungs- und Entwicklungsphase	Beschaffungsaufwand	sehr gering + Ermittlung aus ECE/ SAE Regelungen, Vorschriften, Datenblättern
		Geschwindigkeit	mittel + keine Berechnung aufwändiger Geometrie - Emission (Ort, Richtung, Wert) muss immer neu berechnet werden
	geringe Genauigkeitsanforderungen	Datenmenge	gering + einfache CAD Beschreibung + geringes Speichervolumen
		Variabilität	hoch + einfache Änderung der Geometrie möglich
		Abweichungen	groß - fehlende Geometrieumgebung und –einflüsse - keine Beschreibung von inhomogenen Emittercharakteristiken
		Unsicherheit	gering + unbegrenzte mögliche Strahlanzahl

Modell/Typ	Einsatz	Bewertung/Begründung	
CAD-Emitter mit vollständiger Geometrie	mittlere und späte Entwicklungsphase hohe Genauigkeitsanforderungen Nachtvisualisierung (da unbegrenzte Strahlenanzahl)	Beschaffungsaufwand	sehr hoch, wenn neue Modelle nötig sind - Geometriedaten und Materialbeschreibungen im Allgemeinen nicht oder nur unvollständig verfügbar sehr gering, wenn Modelle in Softwarepaket enthalten (begrenzte Anzahl, keine Derivate/ Typen)
		Geschwindigkeit	sehr gering - es wird direkt aus dem Emitter, durch alle Lichtquellenelemente berechnet (wenn resultierendes Rayset als Quelle eingesetzt wird: siehe unten)
		Datenmenge	gering + geringes Speichervolumen
		Variabilität	mittel + Geometrieänderung möglich, erhöhter Aufwand beim Datenabgleich ist zu beachten
		Abweichungen	mittel bis gering + vollständige und hinreichend genaue Modellierung möglich - vollständige und hinreichend genaue Modellierung aufwändig
		Unsicherheit	gering + unbegrenzte mögliche Strahlenanzahl
Rayset-Emitter mit vollständiger Geometrie	mittlere und späte Entwicklungsphase hohe Genauigkeitsanforderungen	Beschaffungsaufwand	gering, wenn + Rayset von Hersteller oder Zulieferer verfügbar hoch, wenn - Lichtquellenbeschaffung, Nahfeldmessung, Strahlgenerierung und Backtrace nötig sind
		Geschwindigkeit	sehr hoch + Emission ist auf Dateilesevorgang reduziert - ggf. müssen sehr große Datenmengen transportiert werden
		Datenmenge	hoch - typische Datenformate erreichen große Volumen [Men09a]
		Variabilität	sehr gering - ein Bezug zu einer abweichenden Lichtquelle kann ggf. durch anschließende Simulation erreicht werden
		Abweichungen	mittel bis gering + sehr gute Erfassung des Messobjektes - Dynamikumfang Kamera begrenzt Dynamikumfang Leuchtdichte
		Unsicherheit	mittel - Rayset ist in maximaler Strahlenzahl begrenzt, typischerweise zur Begrenzung des Datenvolumens

6.5 Zusammenfassung der Untersuchung

Die wesentlichen Methoden für die Lichtquellenmodellierung, welche für das CAL in der Scheinwerferentwicklung verwendet werden, wurden in diesem Kapitel eingeführt und eine qualitative Einordnung hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Genauigkeit wurde durchgeführt. Die H7-Lampe wurde in diesem Abschnitt vertieft untersucht und es wurde eine Abgrenzung zu den anderen Lichtquellentypen und deren Modellierung durchgeführt. Die zur Datengewinnung für die Modellierung notwendigen Messgeräte wurden beschrieben. Die Einflussfaktoren auf die lichttechnische Funktion der Lichtquelle und deren Genauigkeit wurden aufgezeigt und die Grundlagen der Modellierung der elektrischen Abhängigkeiten gelegt.

Anhand von Derivaten der H7-Lampe wurden in Abschnitt 6.3 der Einfluss der Wendelgeometrie und der Wendelleuchtdichte auf die lichttechnische Funktion weiter detailliert. Es wurde gezeigt, dass sich die scheinbar leuchtende Fläche der Wendel und ihre Leuchtdichte umgekehrt proportional zueinander verhalten und dass die Derivate der H7 deutliche Unterschiede aufweisen. Diese Unterschiede führen zu Abweichungen der Scheinwerferfunktion, die anhand der maximalen Lichtstärke und bedingt auch anhand des Gradienten der Lichtverteilung messbar sind. Es wird empfohlen, solche Derivate der jeweiligen Hersteller in der Lichtsimulation detailliert nachzubilden, um eine hinreichend genaue virtuelle Absicherung zu erreichen.

Die aufgrund der messgerätbedingt dejustierten Lichtquellen begrenzte Untersuchung der Derivate anhand der Scheinwerferfunktion wurde nicht mit den nachfolgend eingeführten CAD-Emittern wiederholt. Die CAD-Emitter haben eine höhere Genauigkeit der Wendelposition, aber die CAD-Daten der H7-Derivate sind nicht verfügbar.

In Abschnitt 6.4 wurden Einflussfaktoren beschrieben, die zu Abweichungen der Übertragungsfunktion der Lichtquelle $M_{LS,k}(x, y, z, \vartheta, \varphi)$ führen. Für eine vollständige Unsicherheitsanalyse der eingeführten Lichtquellenmodelle sind weitere Untersuchungen nötig, die über den Umfang dieser Arbeit hinausgehen.

7 Materialmodellierung

Nach der Beschreibung der Lichtquellenmodellierung in Kapitel 6 wird in diesem Kapitel die Beschreibung der Modellierung einiger Materialien eines Scheinwerfers erfolgen. Die lichttechnisch relevanten Materialien und Oberflächen werden ausgewählt und hinsichtlich ihrer optischen Eigenschaften klassifiziert. Ausgewählte Einflussfaktoren werden dabei untersucht und modelliert. Die Methoden zur anschließenden Simulation des Untersuchungsgegenstandes sind damit vollständig eingeführt. Eine Validierung der Modellierung hinsichtlich der virtuellen Typprüfung findet in Kapitel 8 statt.

7.1 Einteilung der Materialien und Oberflächen

Der überwiegende Anteil der Materialien in Scheinwerfern sind Kunststoffe. Metalle und Gläser spielen eine untergeordnete und tendenziell abnehmende Rolle. Die Auswahl der Kunststoffsorte je Bauteil richtet sich nach dem Preis im Spannungsfeld mit Anforderungen an die mechanische Stabilität und Temperaturbeständigkeit, aber auch nach der lichttechnischen Qualität. In Abbildung 7.1 ist der untersuchte Scheinwerfer nach Funktion und Materialien der lichttechnisch relevanten Bauteile aufgegliedert dargestellt.

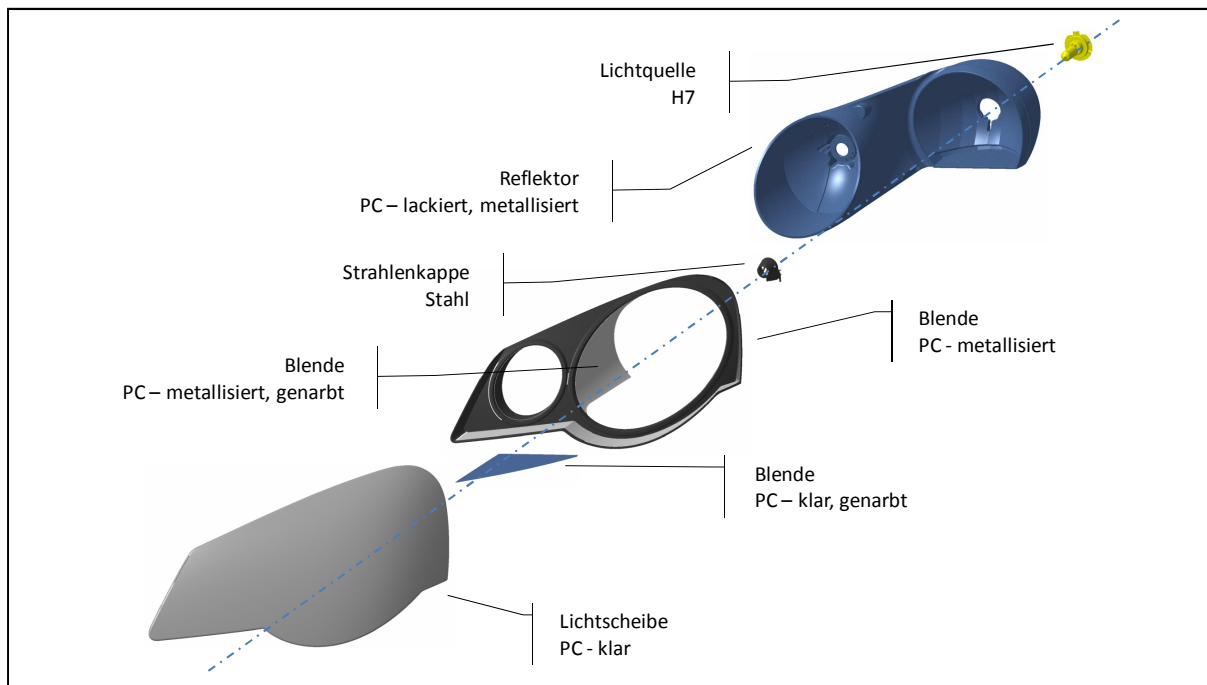


Abb. 7.1: Scheinwerferbauteile mit Funktion, Material und Oberfläche

Die Auswahl und Einteilung der lichttechnisch relevanten Materialien und Oberflächen kann im Hinblick auf ihre primäre lichttechnische Funktion und ihre optischen Eigenschaften erfolgen. Das sind in diesem Zusammenhang vorrangig die Reflexion, Transmission oder

Absorption sowie deren energetische und richtungsabhängige Eigenschaften. In Abbildung 7.2 sind vier ideale optische Eigenschaften schematisch dargestellt.

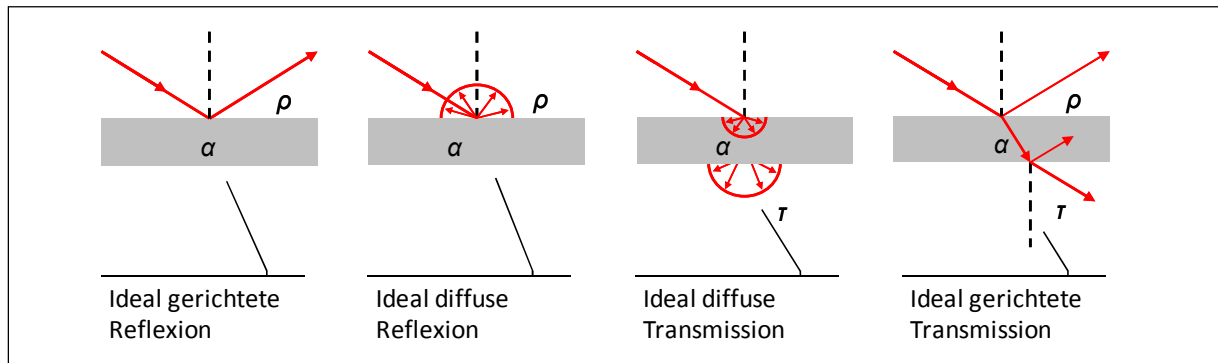


Abb. 7.2: Ideale optische Eigenschaften von Oberflächen und Materialien

Die lichttechnische Funktion ist abhängig von den optischen Eigenschaften des Materials sowie von der Form und Struktur des Bauteils. Die Einflussfaktoren auf die lichttechnische Funktion des Bauelements sowie Beispiele sind unten aufgelistet. Dabei wird von einer weiteren Trennung der Eigenschaften durch die ästhetische Funktion des Bauteils ausgegangen, da Zierelemente abweichende lichttechnische Eigenschaften aufweisen.

- Funktion des Bauteils: lichttechnische Funktion, ästhetische Funktion
- Grundmaterial: PMMA, PC, PC HT, ABS, PP, PA, Aluminium, Glas, Stahl, ...
- Oberflächenstruktur: glatt – poliert, glatt – unbearbeitet, rau – zufällige Struktur, rau – regelmäßige Struktur
- Oberflächenbeschichtung: unbeschichtet, lackiert, metallisiert, lackiert und metallisiert, Sonderformen (z.B. metallisiert und gelasert), ...
- Spektrale Eigenschaften: farblos, farbige lichttechnische Funktion, farbige ästhetische Funktion
- Optische Funktion eines Flächen- bzw. Volumenelements: annähernd gerichtet reflektierend, annähernd diffus reflektierend, annähernd gerichtet transmittierend, annähernd diffus transmittierend, definierte Zwischenformen

Das Grundmaterial beziehungsweise das Material der Oberflächenbeschichtung bestimmt über seinen reellen und komplexen Brechungsindex den Reflexionsgrad ρ und den Absorptionsgrad α (vgl. Abschnitt 8.2). Durch den Bearbeitungsprozess der Fertigung werden vorrangig die Oberflächenstruktur und damit die in Abschnitt 7.3 beschriebenen Streulichteigenschaften definiert. Es sei angemerkt, dass das Grundmaterial einen Einfluss auf Oberflächenrauheit und Formabweichungen hat, der auch nach der Bearbeitung und nach einer anschließenden Metallisierung relevant ist. Hinreichend große, die Oberflächenform bestimmende Regelstrukturen, wie beispielsweise Zierwalzen, werden üblicherweise in den CAD-Daten repräsentiert. Die zufälligen und typischerweise kleineren Strukturen, wie beispielsweise Narbungen, sind nicht in CAD-Daten enthalten. Die optischen Eigenschaften

solcher Strukturen müssen dann durch Streulichtmodelle repräsentiert werden, wie in Abschnitt 7.3 vertieft wird. Weiterhin können die Grundmaterialien und kostenoptimierte Beschichtungsprozesse für Abweichungen der Reflexionseigenschaften des Beschichtungsmaterials verantwortlich sein. Dies wird typischerweise durch Verlustfaktoren im angewendeten Reflexionsgrad berücksichtigt.

Die exakte Auswahl der Materialien erfolgt erst nach der Konzeptphase und in der Vorbereitung der Erprobung oder der Fertigung. Davor wird typischerweise nur die Materialklasse bestimmt. Die Auswahl kann später durch die lichttechnischen und funktionalen Anforderungen präzisiert werden. Falls nötig, werden dann auch exaktere Modellierungen angewendet.

7.2 Materialmodellierung in der Simulation

Die nachfolgend dargestellten Modellierungsmethoden sind Stand der Technik und werden in der Konzeptauslegung verwendet (vgl. [Wie00]). Das Vorgehen zur Modellierung ist abhängig von den Funktionsumfängen und der Systematik der Simulationsprogramme. Typischerweise werden Vereinfachungen der physikalischen Modelle für Materialeigenschaften wie Reflexionsgrad, Reflexionsart (z.B.: Fresnel-Reflexion), Streulichteigenschaften, Transmissionsgrad oder spektrale Eigenschaften getrennt und ohne Wechselwirkung modelliert (vgl. [Bre04], [Braom], [Optfr]). Das bietet Vorteile in der Handhabung, kann aber zu falschen energetischen Bilanzen führen. Die Modelle werden den jeweiligen CAD-Flächen, die Grenzflächen, Medienübergänge sowie wechselwirkende Volumen darstellen, zugewiesen. Nachfolgend sollen die Modellierungen entsprechend getrennt aufgeführt werden.

Modellierung des Reflexionsgrades ρ

Der Reflexionsgrad ρ der Materialien wird unabhängig von den richtungsabhängigen Streulichteigenschaften bzw. von der in Abschnitt 7.3 vertieften Bidirectional Reflection Distribution Function (BRDF) auf einer Fläche modelliert. Ein Zusammenhang ergibt sich mittels des Total Integrated Scatter (TIS), das dem Integral der BRDF über den Raumwinkel der Halbsphäre und damit dem Reflexionsgrad entspricht (vgl. Gleichung 7.4). Das separierte Vorgehen der Modellierung wird auch bei der Messung der Streulichteigenschaften angewendet, wie in Abschnitt 7.3 vertieft wird. Für metallisierte glatte Oberflächen der Kfz-Scheinwerfer sind Lichtreflexionswerte $\rho_v = 0,65 \dots 0,85$ üblich. Dabei werden die spektralen Abhängigkeiten nicht berücksichtigt und der Wert gilt nur für diese farblosen Oberflächen und die eingeführten Lichtquellen. Eine Vernachlässigung der Richtungsabhängigkeit des Reflexionsgrades nach Fresnel (vgl. Gleichung 8.8, Abschnitt 8.2, Abbildung J.1) ist üblich. Nicht metallisierte glatte Oberflächen werden entsprechend ihres Grundmaterials mit einem niedrigeren Wert ρ_v modelliert. Die Messung des Reflexionsgrades ρ_v kann beispielsweise über ein Spektralphotometer erfolgen.

Modellierung der Reflexionseigenschaften für glatte Oberflächen mit gerichteter Reflexion

Reflektoren und glatte Zierblenden mit oder ohne Metallisierung werden mittels idealer Reflexion nach Gleichung 8.5 (Abschnitt 8.2) modelliert. Für Scheinwerfer mit Lackierung auf dem Grundmaterial und Metallisierung wird diese Vereinfachung als hinreichend genau angenommen. Die Messung und Modellierung der BRDF glatter metallisierter Oberflächen und deren Simulation erweist sich zudem als aufwändig und ist mit zusätzlichen Abweichungen verbunden. Die Evaluation solcher Reflektoren und dieser Modellierung wird in Kapitel 8.4 vorgenommen. Für qualitativ schlechtere Leuchten, deren Metallisierung direkt auf die rauen Kunststoffoberflächen aufgetragen ist, sollte die Verwendung eines angepassten Streulichtmodells in Betracht gezogen werden (vgl. [JeLu02]).

Modellierung der Reflexionseigenschaften für raue Oberflächen mit diffuser Reflexion

Raue Oberflächen werden in der Konzeptabsicherung nur in Spezialfällen bewertet, da das Erfüllen der lichttechnischen Funktion und Vorgaben durch gerichtete Reflexion und Refraktion die primäre Zielstellung ist. Das in Abschnitt 3.4 beschriebene Streulicht, erzeugt durch Mehrfachreflexion an glatten Oberflächen oder durch Reflexion an rauen Oberflächen, ist Bestandteil der peripheren Lichtfunktion. Dies betrifft beispielsweise die lichttechnischen Werte oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze oder die Erkennbarkeit eines Scheinwerfers oder einer Leuchte aus großen Sichtwinkeln (vgl. [Bla05], [Mas93], [Zie07a], [Men09]). Auch für diese Winkelbereiche sind in den Regelungen lichttechnische Maximal- und Minimalwerte festgelegt. Die Modellierung und die Simulation sind demnach für eine virtuelle Typprüfung notwendig. Hinreichend genaue Modelle für diffus reflektierende Oberflächen bei der Kfz-Beleuchtung sind nicht veröffentlicht. Deswegen ist die Untersuchung und Modellierung der Streueigenschaften rauer Oberflächen für die virtuelle Typprüfung relevant und wird in Abschnitt 7.3 weitergeführt. Das in der Simulation angewendete BRDF-Modell der Streulichtverteilung wird mit dem oben beschriebenen Reflexionsgrad ρ_v gewichtet.

Modellierung von Transmissionseigenschaften und gerichteter Refraktion

Die Richtungs- respektive Winkeländerung des Strahls durch Refraktion wird in der Lichtsimulation nach den Brechungsgesetzen in Verbindung mit dem Brechungsindex n modelliert (vgl. Gleichung 8.4, Abschnitt 8.2). Der Energietransport beziehungsweise die Absorption α im Medium wird durch unterschiedlich detaillierte Modelle berücksichtigt. Die Anwendung der jeweiligen Modelle ist abhängig vom Zeitpunkt im Entwicklungsprozess und vom Stand der verfügbaren Daten. Üblich sind folgende Modellierungen:

1. Die Verwendung von konstanten (skalaren) Verlustfaktoren $\tau = \Phi'/\Phi_0$ wird beispielsweise zur Abschätzung der Transmissionsverluste durch eine Lichtscheibe angewendet, wenn diese nicht in CAD-Daten verfügbar ist (vgl. [Wie00]). Der Verlustfaktor wird dann zur Skalierung der Strahlen oder der resultierenden Lichtverteilung verwendet. Die real durch eine Lichtscheibe verursachten

winkelabhängigen Abweichungen der Lichtverteilung werden nicht berücksichtigt (vgl. Abschnitt 5.4, Abbildung 5.6). Daraus folgt, dass diese Modellierung nur für eine Abschätzung verwendbar ist.

2. Die Verwendung von Verlustfaktoren nach $\tau = \sqrt[2]{\Phi'/\Phi_0}$ angewendet an beiden Grenzflächen der Lichtscheibe ist ein typischer Fall im Entwicklungsprozess, wenn die exakte Materialart und -dicke noch nicht bekannt sind. Es ist beim Aufbau der CAD-Daten üblich, dass über lange Phasen mit einem einfachen Offset der durch das Design vorgegebenen Außenflächen gearbeitet wird. Bei der Modellierung werden die Fresnel-Reflexion (Gleichung 8.9, Abschnitt 8.2) sowie die Refraktion (Gleichung 8.4, Abschnitt 8.2) berücksichtigt.
3. Sind die vollständigen CAD-Daten und Materialbeschreibungen vorhanden, so findet zusätzlich die Absorption nach dem Bouguer-Lambert-Gesetz (Gleichung 8.12) mit $\alpha_n \neq \alpha_n(\lambda)$, $\alpha = konst.$ Anwendung. Der Nutzen dieser Vereinfachung begründet sich in der praktikablen messtechnischen Ermittlung und Berechnung des spektral unabhängigen Koeffizienten. Zudem ist zur Anwendung keine rechenintensive spektral aufgelöste Simulation nötig.
4. Die umfassende Modellierung berücksichtigt den spektral abhängigen Koeffizienten $\alpha_n = \alpha_n(\lambda)$. Wahlweise kann auch der Extinktionskoeffizient k nach Gleichung 8.11 verwendet werden.

Mittels der nachfolgenden Untersuchung sollen die grundsätzlichen Eigenschaften und die Genauigkeit der genannten Modellierungen dargestellt werden. Anhand von planaren Proben des Materials PMMA, typischerweise für transparente Bauteile mit hohen optischen aber geringen Temperatur-Anforderungen eingesetzt, wurden Messungen der Transmission durchgeführt. Als Lichtquelle wurde die H7-Lampe verwendet, die bei Nennspannung ein Schwarzkörperspektrum von ca. 3100 K aufweist. Die ausgewählten Materialien finden Anwendung in Leuchtenfunktionen gemäß der ECE R7, um die dort vorgeschriebenen Farborte zu erreichen. Für die Farbe Rot wurde Typ 33701 der Firma Röhm/Degussa verwendet. Für den Vergleich mit einer Transmission mit Absorptionsverlusten ohne Farbänderung wurde eine graue Scheibe Typ 7V275 desselben Herstellers vermessen. Die Scheiben besaßen die Materialstärken $s = 1, 2, 3, 4 \text{ mm}$. Zur Validierung der Modelle Nr. 1 und Nr. 3 wurden die Koeffizienten τ_v und $\alpha_n \neq \alpha_n(\lambda)$ für die Materialstärke $s = 1 \text{ mm}$ im Abgleich mit der Messung bestimmt. Die ausgehenden simulierten Lichtströme wurden zur Ermittlung der Lichttransmission nach $\tau_{s,v} = \Phi'/\Phi_0$ verwendet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.3 dargestellt.

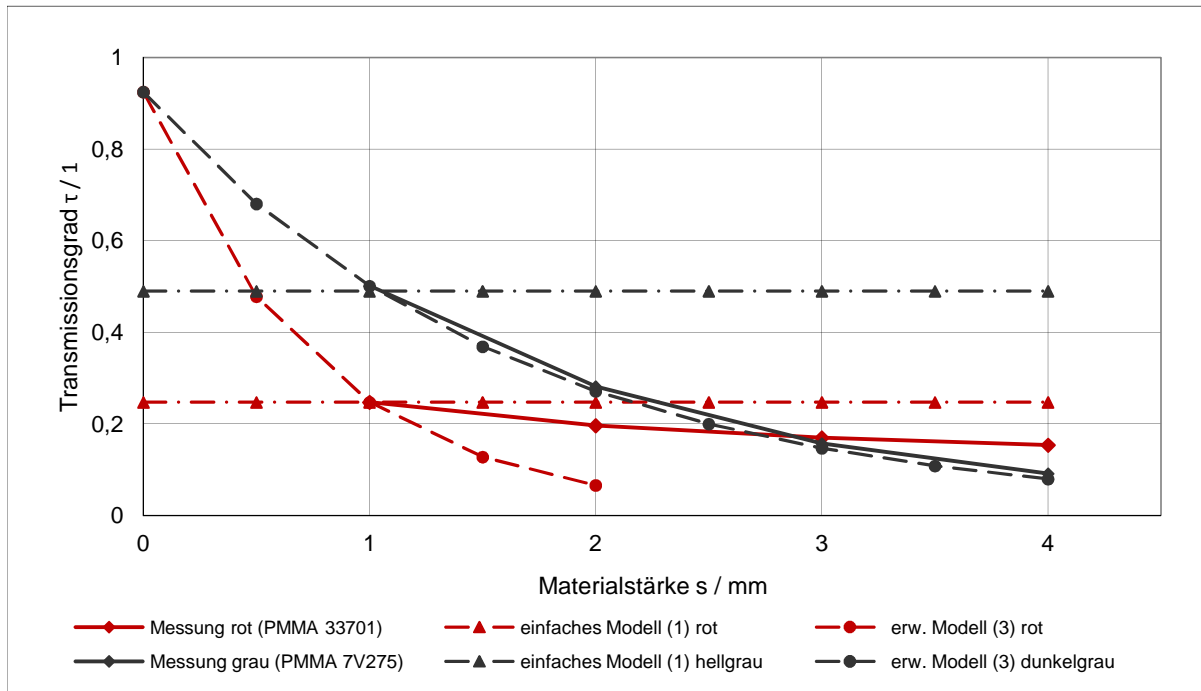


Abb. 7.3: Validierung der Modelle für Transmission am Beispiel PMMA

Wird bei $s = 2 \text{ mm}$ die Abweichung von Messung und Simulation ermittelt, so erweist sich die Modellierung Nr. 3 mit $\alpha_n \neq \alpha_n(\lambda)$ nach Bouguer-Lambert-Gesetz als hinreichend genau für farblose Lichtscheiben. Die Modellierung Nr. 1, bei konstanter Transmission mit $\tau_v = \text{konst}$, erzeugt hingegen eine Abweichung von $D = 44 \%$. Das Modell $\alpha_n \neq \alpha_n(\lambda)$ erzeugt allerdings für die rote Lichtscheibe mit $s = 2 \text{ mm}$ eine Abweichung von $D = 60 \%$. Somit ist für farbige Lichtscheiben, die eine Dickenänderung im Lichtweg aufweisen, eine spektral aufgelöste Modellierung und Simulation notwendig. Für farblose Lichtscheiben ist die Modellierung mit $\alpha_n \neq \alpha_n(\lambda)$ nach Bouguer-Lambert-Gesetz nötig, wenn große Dickenänderungen vorliegen.

Die Werte und damit die Koeffizienten $\alpha(\lambda)$ sind auf das Beispiel beschränkt und hängen von Hersteller und Materialtyp ab. Weiterhin ist das Lichtquellspektrum maßgeblich. Beispielsweise erzeugen spektral schmalbandige LED deutliche Abweichungen zu Temperaturstrahlern, trotz ähnlichem Farbort, weswegen die Koeffizienten der Modelle 1 bis 3 angepasst werden müssen. Der Vergleich der Modellierungen der Transmission ist vom Autor bei [Nef07] dargestellt worden.

Modellierung von diffuser Transmission

Der Einsatz streuender transmittierender Materialien für Lichtfunktionen, ob als klare Materialien mit aufgebrachtener Narbung oder als sogenannter Volumenstreuer, ist ein Sonderfall in der Exterieurbeleuchtung. Er setzt vergleichsweise komplexe Streulichtmodelle und damit die genaue Kenntnis der spezifischen Materialeigenschaften voraus. Dieser Fall wird nicht in dieser Arbeit betrachtet.

7.3 Analyse von geätzten und erodierten Oberflächenstrukturen

Zur Analyse der Streulichteigenschaften von rauen Materialoberflächen mit geätzten und erodierten Oberflächenstrukturen wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Untersuchung durchgeführt (vgl. [Stu09]). Dabei wurden die betreffenden Oberflächenstrukturen klassifiziert, messtechnisch hinsichtlich geometrischer und lichttechnischer Eigenschaften untersucht und die Zusammenhänge modelliert.

Raue Oberflächenstrukturen, auch Narbungen genannt, befinden sich vorrangig auf Bauelementen mit ästhetischer Funktion. Im Falle von Blenden, wie in Abbildung 7.4 dargestellt, befinden sich diese unregelmäßigen Strukturen im Lichtweg. Abhängig vom Reflexionsgrad des Materials und vom Lichtweg haben diese Narbungen einen Einfluss auf die Lichtverteilung $X(\alpha_H, \alpha_V)$. So können Narbungen auch gezielt zur Streuung von störenden gerichteten Reflexionen oder zur Einhaltung der gesetzlichen Vorschriften für minimale und maximale Beleuchtungsstärken oberhalb der HDG verwendet werden (vgl. Abschnitt 3.2 und Abbildung 3.7).



Abb. 7.4: Oberflächen zur diffusen Reflexion und Transmission in einem Scheinwerfer

Klassifizierung der Narbungen und Einflussfaktoren

Die Kunststoffbauteile der Scheinwerfer werden im Spritzgussverfahren hergestellt. Die Struktur der Narbung wird als Negativform ins Werkzeug eingebracht und bildet sich im Kunststoff ab. Die Narbungen treten in unterschiedlichen Formen und Größen auf und werden von verschiedenen Werkzeugherstellern wie Eschmann Textures [Escde] oder Hohenloher Formstruktur [Hohde] angeboten. Bei der Strukturerstellung im Werkzeug werden die Technologien Ätzen und Erodieren angewendet. Die Strukturen können beschichtet beziehungsweise metallisiert werden, was ihre Form nicht verändert. Der Reflexionsgrad ρ_V einer metallisierten Oberfläche liegt allerdings ~ 10 -mal höher als der einer schwarzen Kunststoffoberfläche. Im Volkswagen Konzern werden überwiegend Narbungen eingesetzt,

deren Klassifizierung auf der VDI 3400 [Vdi75] basiert. Diese Richtlinie beschreibt Rauheitsklassen in Verbindung mit dem Rauheitskennwert R_a aus der taktilen Oberflächentopographie-Messtechnik. Im Volkswagen Konzern werden sie nach interner Nomenklatur als K-Klassen bezeichnet. Ein Auszug aus der VDI 3400 ist in Tabelle 7.2 dargestellt.

Tabelle 7.2: Auszug aus der VDI 3400, Einteilung der Klassen nach Rauheitskennwert R_a

Klasse:	0	1 ...	20	21	22	23	... 40
R_a in μm	0,100	0,112 ...	1,00	1,12	1,25	1,40	... 10,0

Die VDI 3400 ist für erodierte Werkzeuge und Stahl erstellt worden. Bei der Abformung geätzter Strukturen und der Abformung in Kunststoff entstehen Abweichungen. Deswegen werden die Werkzeuge und deren Strukturen so lange visuell angepasst, bis eine vergleichbare Anmutung der Oberflächenstruktur erreicht ist. Dadurch ist der direkte quantitative Bezug der Rauheit zur VDI Richtlinie nicht mehr gegeben. In Abbildung 7.5 sind geätzte und erodierte Strukturen der Narbungsklassen K36 und K48 bei Volkswagen gegenübergestellt.

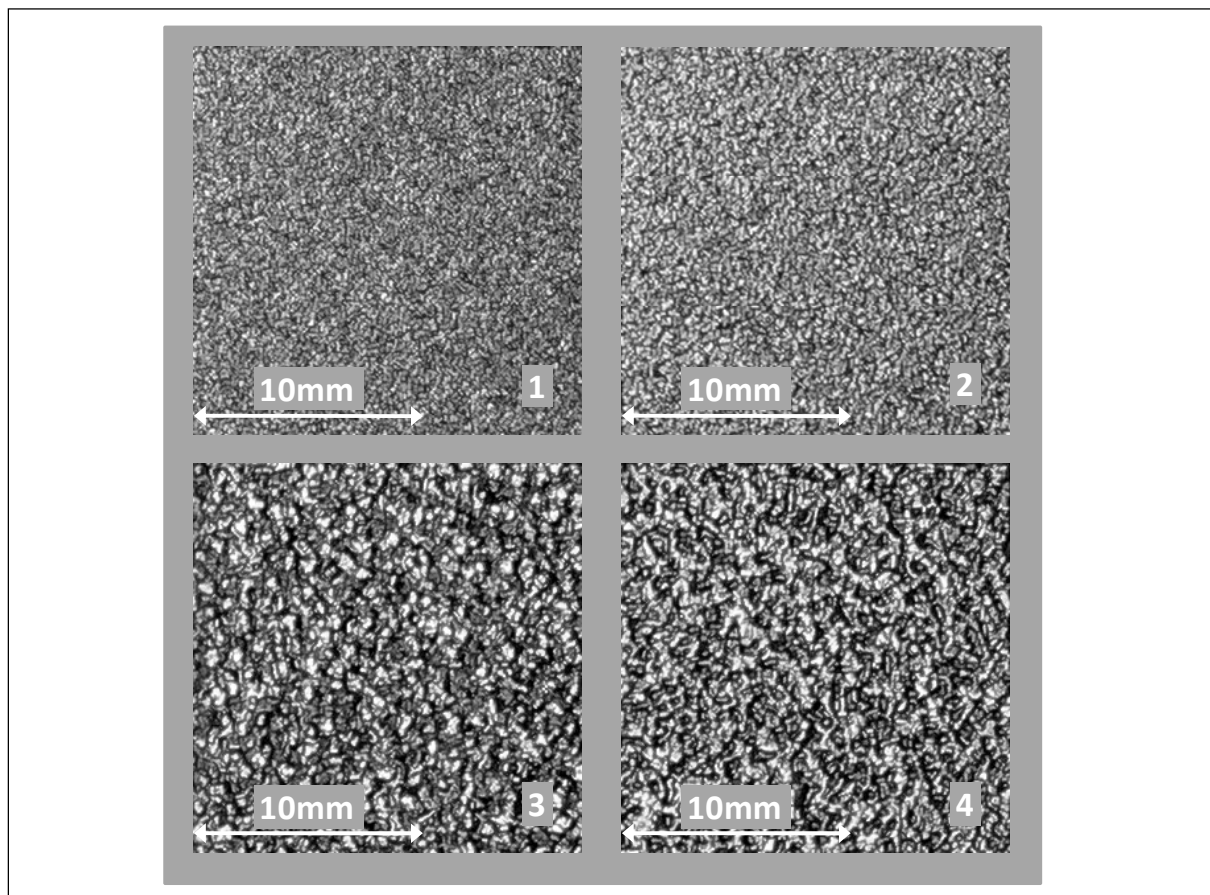


Abb. 7.5: Photos der Narbungen: 1: K36, erodiertes Werkzeug; 2: K36, geätztes Werkzeug ; 3: K48, erodiertes Werkzeug ; 4: K48, geätztes Werkzeug

Die Anpassung der Anmutung erfolgt vorrangig durch die Bewertung der Draufsicht und der Gesamtanmutung. Die lichttechnischen Eigenschaften sind aber auch für flache

Beleuchtungswinkel relevant. Bei der Abformung der Oberflächen mit dem angepassten Werkzeug ergeben sich weitere Abweichungen der Struktur, der Rauheit und damit der winkelabhängigen Reflexionseigenschaften. Dafür sind unterschiedliche Herstellungsverfahren der Werkzeuge, unterschiedliche Kunststoffsorten sowie weitere, in Anhang H.1 gelistete Einflussfaktoren ursächlich.

Zur repräsentativen und vergleichbaren Untersuchung der Einflussfaktoren wurden zwei Werkzeuge bei demselben Hersteller, der Firma Eschmann Textures [Escde], mittels Ätzen und Erodieren angefertigt. Dabei wurden die Narbungsklassen K27 bis K48 feldweise auf je einer Platte aufgebracht. Die Musterplatten wurden bei diesem Hersteller unter gleichen Spritzgussbedingungen und in Chargen von mehr als 20 Stück abgeformt. Es wurden typische Kunststoffe zur Scheinwerferherstellung ausgewählt: die Polycarbonat-Sorten und Produkte Makrolon und zwei Varianten von APEC der Firma Bayer [Bayom]. Die Kunststoffe unterscheiden sich in ihrer Temperaturbeständigkeit sowie in ihrer Viskosität beim Abformen. Die Vicat-Erweichungstemperaturen sind 143°C (Makrolon), 158°C (APEC 1695) und 183°C (APEC 1895). Anschließend wurde die Metallisierung mit Aluminium bei einem Hersteller für Scheinwerfer und Leuchten, der Firma Automotive Lighting in Brotterode [Autde], vorgenommen. Durch die Anwendung des Beschichtungsprozesses der Serienfertigung wurden repräsentative Qualitäten abgebildet. So konnten die Einflussfaktoren der Technologie der Narbungsherstellung, der Narbungsklasse sowie des Kunststoffes auf die lichttechnische Funktion direkt untersucht werden.

Topographie

Die Unterschiede und Abweichungen der Strukturen sind durch die Herstellungsverfahren und deren Wirkmechanismen bedingt, die in [Stu09] vertieft werden können. Allgemein ergeben sich für erodierte Narbungen scharfkantigere Strukturen als für geätzte, wie in Abbildung 7.6 verdeutlicht. Die Vermutung liegt nahe, dass geätzte Strukturen glänzender erscheinen, da mehr Flächenanteile mit der Normalen in der Richtung der Basisflächennormalen vorliegen.

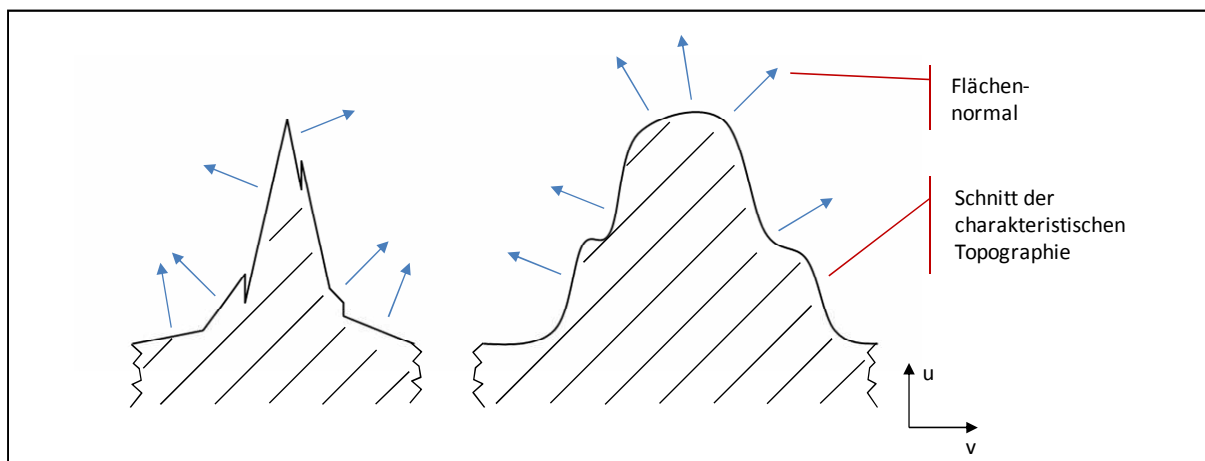


Abb. 7.6: Narbungselement (schematisch) abgeformt durch ein Werkzeug mit erodierter (links) und geätzter (rechts) Struktur

Nach dieser Annahme würden auch höher viskose Materialien, die keine genaue Abformung der Spitzen zulassen, einen glänzenderen Eindruck erzeugen. Je höher die Temperaturfestigkeit der untersuchten Kunststoffe ist, umso höher ist die Viskosität. Keines der Verfahren erzeugt eine Vorzugsrichtung in der Struktur. Hinsichtlich der Reflexionseigenschaften ist somit Isotropie, eine Invarianz gegenüber der Rotation der Beleuchtungsrichtung um die Flächennormale, zu erwarten.

Die Kenngrößen der Topographiemessung beziehen sich auf das Tastschnittmessverfahren nach DIN EN ISO 428 [Nor98]. Wird die Größe R_a der untersuchten K-Klassen ermittelt, so ergeben sich die Graphen der Abbildung 7.7. Es zeigen sich quantitative und qualitative Unterschiede durch die Herstellungsverfahren sowie quantitative Unterschiede durch die Materialien. Die Referenz der VDI 3400 ist ebenfalls aufgetragen.

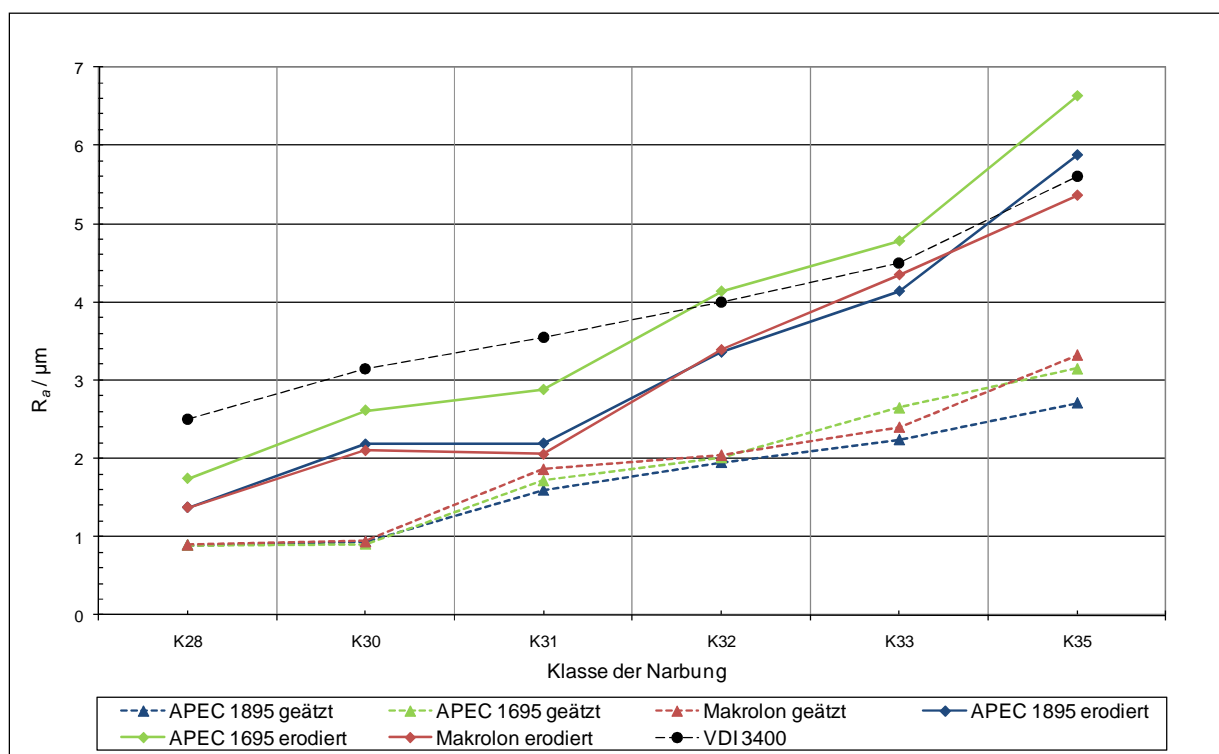


Abb. 7.7: *Rauheit R_a erodierter und geätzter Narbungen der Klassen K28 bis K35 in drei Materialien sowie der VDI 3400*

Eine weitere Kenngröße der Topographiemessung ist R_q nach Gleichung 7.1, das im Englischen als RMS (Root Mean Square) verwendet wird und die Standardabweichung s der Amplitudendichteverteilung bedeutet.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_m} \int_{v=0}^{v=l_m} u^2 dv} \quad (7.1)$$

Bei Oberflächen, deren Rauheitsprofil Amplituden unterhalb der Wellenlänge des Lichts aufweist, kann ein analytischer Zusammenhang zwischen der Größe R_q und dem

Streulichtverhalten angewendet werden (vgl. [Bau00], [HoTo05]). In Abbildung 7.8 ist graphisch der Bezug der Größen R_q und R_a sowie R_z als maximale Amplitude dargestellt.

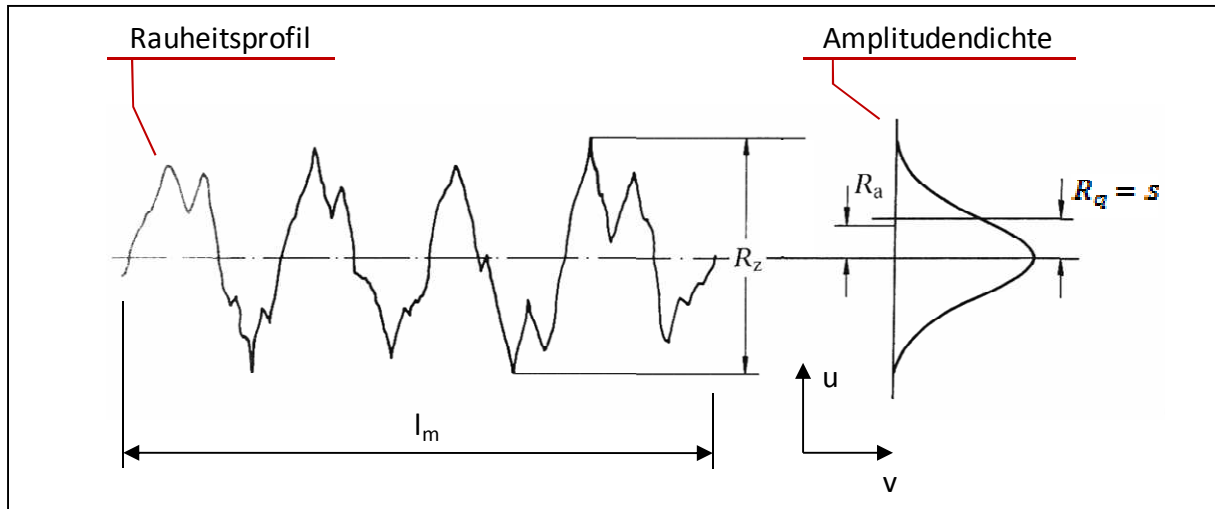


Abb. 7.8: Rauheitsprofil und Amplitudendichte [BoHi92]

Ist die Amplitudendichtekurve des Rauheitsprofils normalverteilt, so gilt der Zusammenhang nach Gleichung 7.2.

$$\frac{R_a}{R_q} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \approx 0,8 \quad (7.2)$$

Da dies für die untersuchten Strukturen gilt, wird auch eine Normalverteilung der Streueigenschaften vermutet (vgl. Anhang H.2).

Messung der Streulichteigenschaften

Die Streulichteigenschaften der Oberflächen können auf Basis der reflektierten Leuchtdichten L_r und der einfallenden Beleuchtungsstärken E_i gemessen und modelliert werden. Die BRDF-Funktion nach Gleichung 7.3 [Nor77] ist eine Beschreibung, die in ihren Dimensionen bezüglich der Einfalls- und Ausfallswinkel variabel ist und Anisotropie sowie spektrale Abhängigkeiten einbeziehen kann.

$$BRDF = f_r(\vartheta_i, \varphi_i; \vartheta_r, \varphi_r; E_i) = \frac{dL_r(\vartheta_i, \varphi_i; \vartheta_r, \varphi_r; E_i)}{dE_i(\vartheta_i, \varphi_i)} = \frac{dL_r(\vartheta_i, \varphi_i; \vartheta_r, \varphi_r; E_i)}{L_i(\vartheta_i, \varphi_i) \cdot \cos\vartheta_i \cdot d\Omega_i} \text{ in } \frac{1}{sr} \quad (7.3)$$

TIS nach Gleichung 7.4 entspricht dem Integral der BRDF über den Halbraum in Abstrahlrichtung und damit dem Reflexionsgrad ρ . Damit ist die einleitend beschriebene globale Wichtung der Streulichteigenschaften in der Simulationssoftware möglich. Eine Vertiefung kann mit [Bre04] erfolgen.

$$TIS = \iint_{00}^{2\pi \frac{\pi}{2}} BRDF(\vartheta_i, \varphi_i; \vartheta_r, \varphi_r) \cos(\vartheta) \sin(\vartheta) d\vartheta d\varphi \quad (7.4)$$

Zur Erfassung der Streulichteigenschaften sind unterschiedliche Messverfahren möglich (vgl. [WeLi04], [API95]). Die gemessenen Werte unterliegen aufgrund der unterschiedlichen Verfahren und fehlenden Standards oftmals beträchtlichen Abweichungen. In dieser Arbeit wurde ein Messgerät verwendet, das einem klassischen Prinzip nach Murray-Coleman und Smith entspricht. Dieses Gonioreflektometer des Typs REFLET 180° der Firma Light Tec/STIL SA [Ligfr] ist in der Konstruktionsdarstellung in Abbildung 7.9 dargestellt.

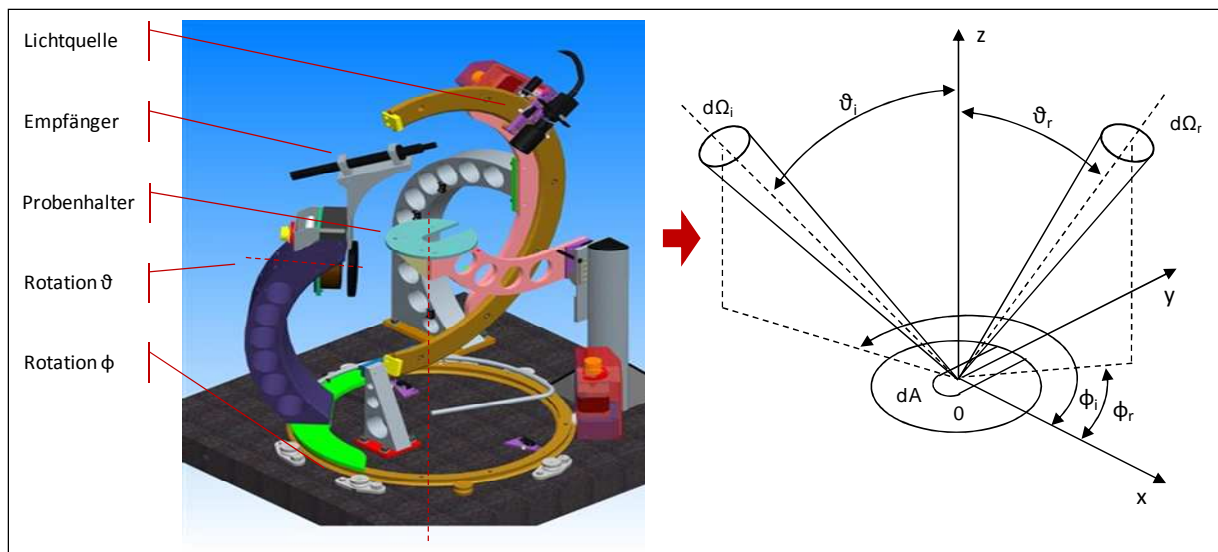


Abb. 7.9: Gonioreflektometer und Koordinaten der BRDF

Das Messgerät muss hinsichtlich der Winkelauflösung und des Wertebereiches der messbaren Intensitäten die zu untersuchende Oberfläche erfassen können. Besonders bei spiegelnden Oberflächen werden hohe Winkelauflösungen verlangt und die zu erfassenden Wertebereiche können bis zu 13 Dekaden annehmen. Der verwendete Messgerätetyp kann die einfallenden Beleuchtungsstärken nicht direkt messen. Die reflektierten und erfassten Intensitäten müssen mittels einer Kalibrierung in die lichttechnischen Größen überführt werden. Die Kalibrierung erfolgte mittels des annähernd lambertförmig reflektierenden Leuchtdichtenormals Spectralon® mit bekanntem Reflexionsgrad der Firma Labsphere. Dabei wird die nachfolgend beschriebene Überführung der Werte und Ermittlung einer Gerätekorrektur genutzt.

Der Wert der BRDF ergibt sich in Vereinfachung der Gleichung 7.3 aus den einfallenden und reflektierten Intensitäten I nach Gleichung 7.5.

$$BRDF = \frac{I_r}{I_i \cdot \cos\vartheta_i \cdot d\Omega_i} \quad (7.5)$$

Der Wert der BRDF bei einem Reflexionsgrad von $\rho_v = 1$ ergibt sich nach Gleichung 7.6.

$$BRDF = \frac{1}{\pi} \quad (7.6)$$

Durch den bekannten Reflexionsgrad $\rho_v \approx 1$ des Normals kann der Korrekturwert K_ρ für die gemessene reflektierte Intensität nach Gleichung 7.7 gebildet werden.

$$I_{m,r} \cdot K_\rho = \frac{1}{\pi} \quad (7.7)$$

Daraus folgt Gleichung 7.8.

$$I_i \cdot \cos\vartheta_i \cdot d\Omega_i = I_{m,r} \cdot K_\rho \cdot \pi = K_i(\vartheta_i, \vartheta_r, \varphi_r) \quad (7.8)$$

Damit ist der Bezug zu den einfallenden Beleuchtungsstärken hergestellt. Der Korrekturwert K_i ist winkelabhängig. Die Korrekturwerte K_ρ und $K_i(\vartheta_i, \vartheta_r, \varphi_r)$ bilden die Korrekturwerteverteilung $M(\vartheta_i, \vartheta_r, \varphi_r)$ nach Gleichung 7.9, mit der die Messwerte $I_{m,r}(\vartheta_i, \vartheta_r, \varphi_r)$ jeder nachfolgenden Messung gefaltet werden.

$$BRDF(\vartheta_i, \vartheta_r, \varphi_r) = \frac{K_\rho \cdot I_{m,r}(\vartheta_i, \vartheta_r, \varphi_r)}{K_i(\vartheta_i, \vartheta_r, \varphi_r)} = M(\vartheta_i, \vartheta_r, \varphi_r) \cdot I_{m,r}(\vartheta_i, \vartheta_r, \varphi_r) \quad (7.9)$$

Das Messgerät wird weiterhin durch die Abweichungen des Kalibriernormals von den Eigenschaften der Probe in seiner Genauigkeit begrenzt. Zudem sind die Reflexionseigenschaften des Spectralon® nur innerhalb eines Winkels $\vartheta_{r,Grenz} \approx 60^\circ$ definiert. Bei flacheren Anleuchtungswinkeln ergeben sich zudem Abweichungen durch die kleinen projizierten Raumwinkel, die zu verzerrten scheinbar leuchtenden Flächen und zu geringen erfassten Intensitäten $I_{m,r}(\vartheta_i, \vartheta_r, \varphi_r)$ führen. Die Werte reagieren dabei sehr empfindlich auf geometrische Toleranzen. Deswegen schienen Anleuchtungswinkel $\vartheta_i > 70^\circ$ als nicht sinnvoll. Aufgrund der Vorbetrachtungen wurde das Gerät einer Evaluation unterzogen. Die Einflussfaktoren auf das Messergebnis sind in Anhang H.4 gelistet. Die Abweichungen durch ausgewählte kritische Einflussfaktoren wurden durch die gezielte Konstanz dieser Umweltbedingungen im Messverfahren und durch die Kalibrierung verringert.

Weiterhin wurden zur Evaluation des Messgerätes Referenzmessungen einiger Proben an einem Messgerät mit einer höheren Genauigkeitsklasse durchgeführt. Das BRDF-Messgerät des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik, Jena [Iofde], ist im Anhang H.3 dargestellt. Das Messgerät ist auf Schnittmessungen in der Einfallsebene begrenzt. Die Messungen wurden für eine Analyse der systematischen Abweichungen verwendet, wie in Abbildung 7.10 gezeigt. Dort werden exemplarisch für die Narbung K35, geätzt aus APEC 1695, die Werte der Referenzmessung $BDRF(\vartheta_i = 30^\circ, \vartheta_r)$ (oben links), die Werte der Messung am eigenen, kalibrierten Messgerät (oben mittig) sowie die Werte der

aus den zufälligen (oben rechts) und den systematischen Abweichung (unten links) ermittelten erweiterten Messunsicherheit $U(BDRF)$ dargestellt (unten mittig). Die Werte und Unsicherheitsbeiträge der BRDF-Messung werden in Kombination unten rechts gezeigt. Dabei begrenzen die Unsicherheiten die signifikante Trennung der Werte, die durch die jeweiligen Einflussfaktoren entstehen. Es wird angenommen, dass die Unsicherheiten bei größeren Narbungen ansteigen, womit die Unsicherheitswerte und Signifikanzen für niedrigere Klassen mindestens gelten sollen. Die Unsicherheiten sind bei Beobachtungswinkeln ϑ_r nahe dem Einfallswinkel ϑ_i relativ groß. In Bereichen niedriger BRDF-Werte wurden Filterungen vorgenommen, weswegen dort die Abweichungen gering erscheinen. Dies ist kritisch zu sehen. Relativ geringe Abweichungen sind in Winkelbereichen der Flanken der BRDF-Graphen zu erwarten.

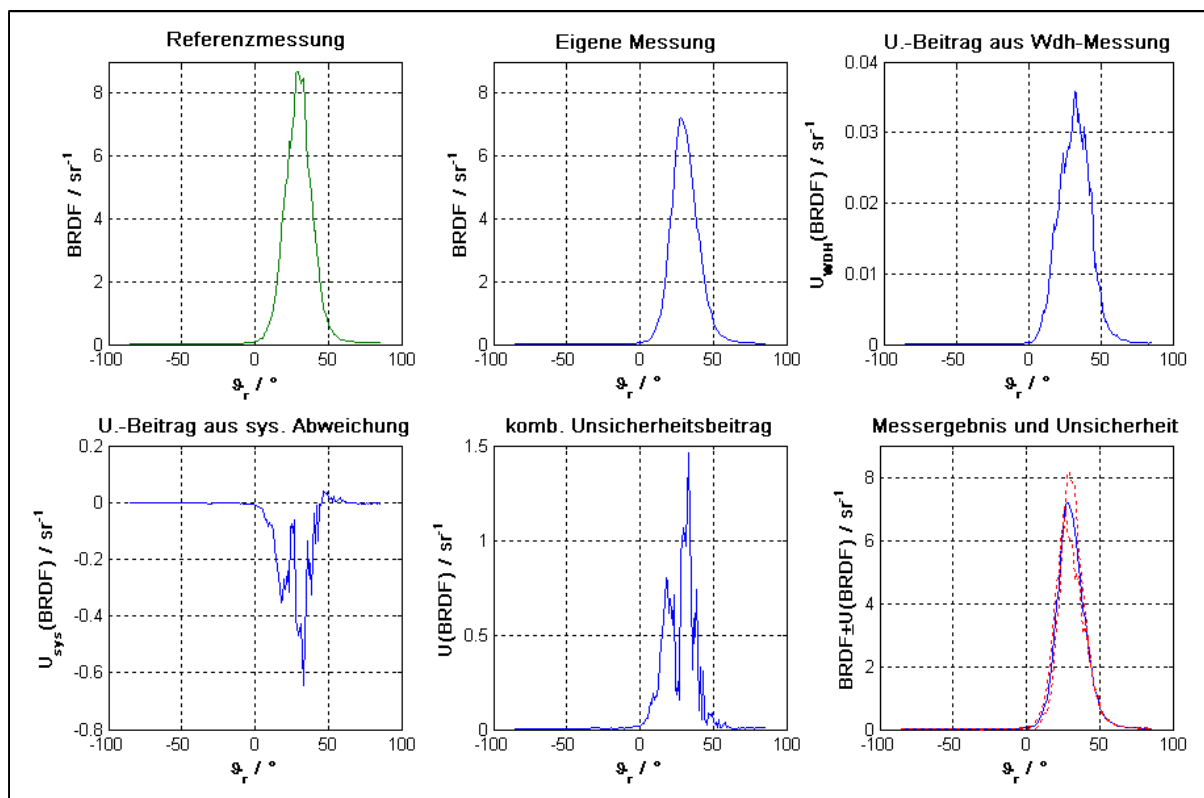


Abb. 7.10: Werte und Unsicherheitsbeiträge der BRDF Messung; Probe K35; geätzt, APEC 1695; $\vartheta_i = 30^\circ$

Auf Basis dieser Vorbereitung zur Messung erreichte das Messgerät eine hinreichende Genauigkeit zur signifikanten Trennung der Einflussfaktoren. Es wurden anschließend die Proben der K-Klassen der unterschiedlichen Fertigungsmethoden und Materialien mittels einer Messung von $BRDF(\vartheta_i, \vartheta_r)$ in der Einfallsebene untersucht. Es wurde der Nachweis der Isotropie sowie der Unabhängigkeit vom Ort der Messung auf der Probe durch eine hinreichende Größe des Beleuchtungsflecks erbracht. Dies kann in Anhang H.5 nachvollzogen werden.

Modellierung der Streulichteigenschaften

Werden die Messergebnisse der erodierten und geätzten Strukturen verglichen, so ist ein signifikanter Unterschied der Charakteristik erkennbar. In Abbildung 7.11 ist exemplarisch die Probe K33 im Material APEC 1685 für $\vartheta_i = 30^\circ$ dargestellt. Die erodierten Strukturen weisen erwartungsgemäß einen flacheren Werteverlauf auf. Der Nachweis einer signifikanten Abweichung ist für die Materialien APEC 1695 und APEC 1895 möglich. Beim untersuchten Makrolon ist die Trennung erst ab K33 und nur für sehr steile und sehr flache Beobachtungswinkel deutlich. In kleineren Klassen zeigen sich nur Unterschiede in niedrigen Wertebereichen, wie in Anhang H.6, Abbildung H.4. gezeigt. Der Grund wird in den abweichenden Eigenschaften des Makrolons bei der Abformung vermutet. Der Einfluss des Grundmaterials auf die Streulichteigenschaften ist für eingeschränkte Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel deutlich, erscheint aber zufällig in quantitativen und qualitativen Abweichungen der BRDF-Werte, wie in Anhang H.6, Abbildung H.5 dargestellt.

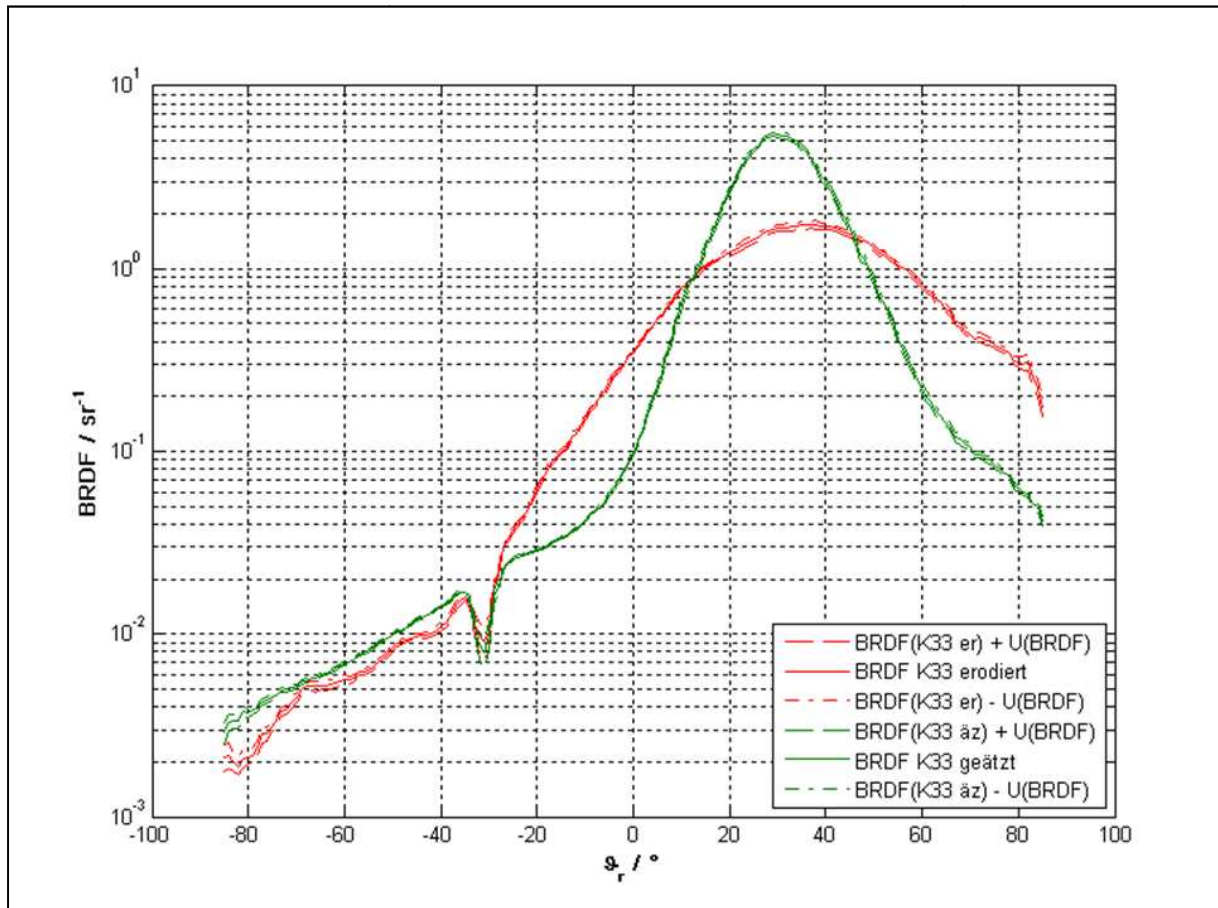


Abb. 7.11: Einfluss der Fertigungsmethode auf die Streulichtcharakteristik; Vergleich geätzter und erodierter Narbung; K33; APEC 1695; $\vartheta_i = 30^\circ$

Zur Modellierung der Werte der Schnittmessung wurde eine einfache Gauß-Funktion nach Gleichung 7.10 genutzt. Die Topographie der Narbungen und die Charakteristik der Werteverteilung legen diesen Ansatz nahe. Die Modellierung ist aufgrund dieser Charakteristik, wie auch aufgrund der Abweichungen des Messgerätes, für $\vartheta_i < 60^\circ$ sinnvoll.

$$f(x) = a_i \cdot \exp \left[- \left(\frac{x - b_i}{c_i} \right)^2 \right] \quad (7.10)$$

Der Wert c_i bestimmt die Breite der Gauß-Verteilung an den Wendepunkten und steht damit im Bezug zur Breite der Streuung. Die Abweichungen der Messung sind in diesem Bereich von ϑ_r sowie bei $\vartheta_i = 30^\circ$ gering. In Abbildung 7.12 sind die Werte der Messung, der Modellierung sowie die Abweichungen exemplarisch für eine Materialprobe mit der Narbung K35, hergestellt mit dem geätzten Werkzeug, dargestellt. Die gute Übereinstimmung im Bereich kleiner und mittlerer Beobachtungswinkel wird dabei gezeigt. Die Werte für c_i sowie die sich ergebenden Werte a_i und b_i der K-Klassen sind in Anhang H.7 dargestellt.

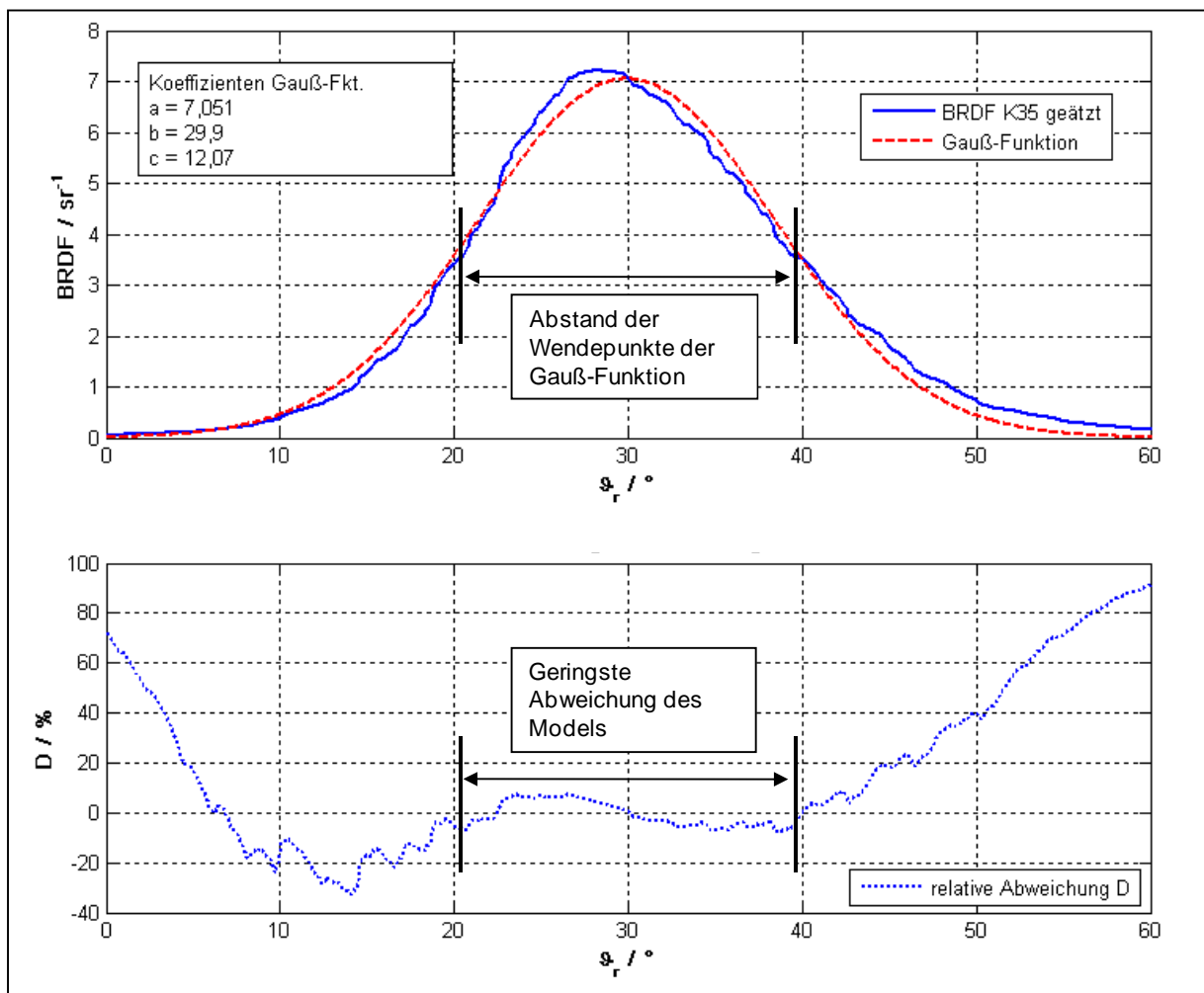


Abb. 7.12: Oben: Messung und Modellierung mittels Gauß-Verteilung; Narbung K35; geätzt; APEC 1695; $\vartheta_i = 30^\circ$ - unten: relative Abweichung und Bezug zu den Wendepunkten der Gauß-Verteilung

Die Korrelation der Modellierungswerte c_i und der Werte R_q der untersuchten Narbungen ist erwartungsgemäß hoch. In Abbildung 7.13 ist exemplarisch für die geätzten Narbungen der Probe aus APEC 1695 eine lineare Regression der Wertepaare dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,978$ zeigt die hohe Güte der linearen Abhängigkeit $y = px + q$.

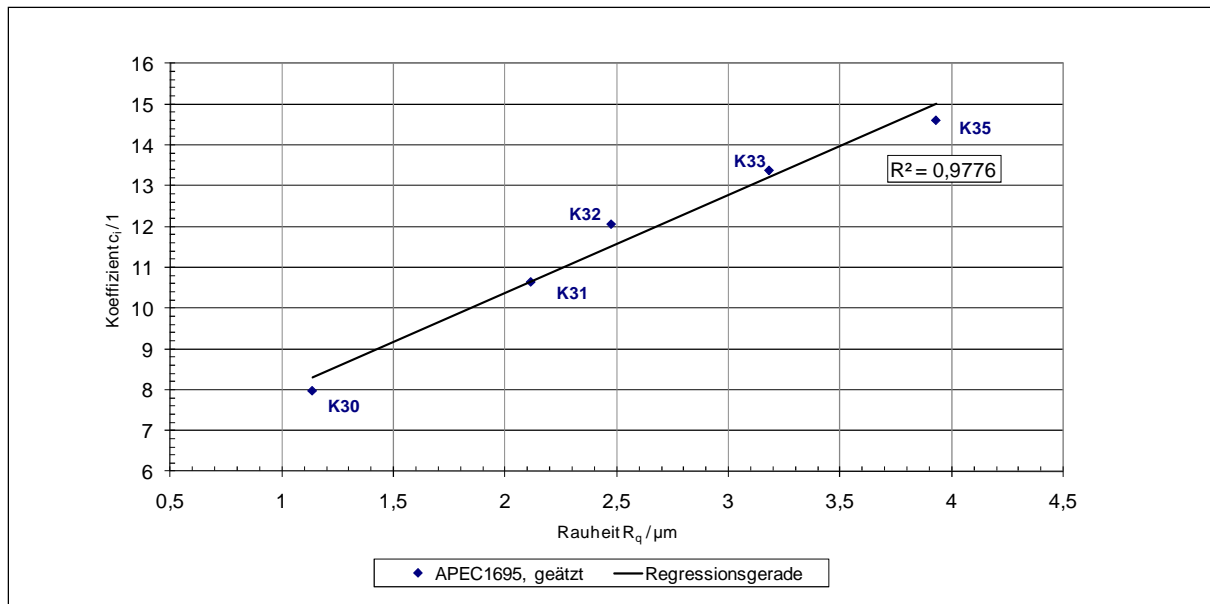


Abb. 7.13: Lineare Regression der Koeffizienten c_i und der Rauheit R_q der Narbungen; geätzt; APEC 1695

Der hohe Aufwand der Messung sowie der Modellierung der $BRDF$ über ϑ_i und ϑ_r sowie über φ_r schränken die Praxistauglichkeit der vollständigen Beschreibung stark ein. Die Integration weiterer Materialien oder Zwischenstufen der Klassen ist dadurch aufwändig. Mittels der hier eingeführten Modellierung ist eine Abschätzung der $BRDF(\vartheta_i, \vartheta_r)$ einfach möglich. Die Koeffizienten p und q für die Narbungen sowie die Güte sind in Tabelle 7.3 gelistet.

Tabelle 7.3: Koeffizienten und Bestimmtheitsmaß der linearen Regression der untersuchten Narbungen

Narbungen	R^2	p	q
Ätzstufen APEC 1695	0,978	2,23	5,92
Erodierstufen APEC 1695	0,991	3,99	4,23
Ätzstufen APEC 1895	0,929	2,14	4,79
Erodierstufen APEC 1895	0,952	3,18	3,59
Ätzstufen Makrolon	0,948	2,57	5,55
Erodierstufen Makrolon	0,944	3,52	1,22

Die Anwendung der $BRDF$ in der Lichtsimulation ist abhängig von der jeweiligen Software. Die Eingabe der Schnittmessung $BRDF(\vartheta_i, \vartheta_r)$ oder deren Modellierung ist typisch für die untersuchten Programme (vgl. Abschnitt 8.3, [Optfr], [Braom]). Die Eingabe der Verteilung $BRDF(\vartheta_i, \vartheta_r, \varphi_r)$ ist weniger üblich. Die Software führt eine interne Abschätzung der Eigenschaften der $BRDF$ in der Hemisphäre durch. So ist auch die Eingabe der Schnittmessungen für wenige ϑ_i und die softwareinterne Abschätzung des Verhaltens für andere Anleuchtungswinkel üblich. Das steigert die Anwendbarkeit der eingeführten Modellierung. Die Berechnung des ausgehenden Teillichtstroms eines reflektierten Strahls erfolgt nach Gleichung 7.5 mittels der Gleichung 7.11.

$$BRDF = \frac{\Phi_{t,r}}{\Phi_{t,i} \cdot \cos\vartheta_i} \quad (7.11)$$

7.4 Zusammenfassung der Untersuchung

In diesem Kapitel sind die Materialien, die für die Entwicklung eines Scheinwerfers verwendet werden, hinsichtlich ihrer lichttechnischen Eigenschaften und der einzusetzenden Modellierungen klassifiziert worden.

Die Modellierung der Transmission durch Lichtscheiben wurde in vier Detaillierungsstufen eingeführt. Die Genauigkeit ist hinsichtlich der Reife der CAD-Daten im Prozess und die Farbe der Lichtscheiben untersucht worden. Für farblose Lichtscheiben mit unterschiedlichen Materialstärken ist die Modellierung mit einem konstanten Absorptionskoeffizienten $\alpha_n \neq \alpha_n(\lambda)$ nötig. Für farbige Lichtscheiben mit Unterschieden in der optischen Weglänge wird die Modellierung der Absorption mit einem wellenlängenabhängigen Absorptionskoeffizienten $\alpha_n = \alpha_n(\lambda)$ und damit eine spektral aufgelöste Simulation empfohlen.

Die Reflexionseigenschaften von Narbungen sind anhand von Streulichtmessungen untersucht worden. Zwei Einflussfaktoren auf deren lichttechnische Funktion wurden analysiert: die verwendete Kunststoffsorte und der Herstellungsprozess des Werkzeuges mittels Ätzen oder Erodieren. Zur Modellierung der Abhängigkeit der Streulichteigenschaften einer Narbungs Klasse K , repräsentiert durch die Breite einer Gauß-Verteilung und deren Parameter c_i , von der Rauheit und deren Topographiekennwert R_q , ist ein einfaches lineares Modell bereitgestellt worden. Die Koeffizienten dieses Modells wurden exemplarisch für die zwei Herstellungsprozesse und drei Materialien ermittelt. Damit ist die Einsparung von Messungen und Modellierungen weiterer Klassen und der zugehörigen Bidirectional Reflection Distribution Functions möglich.

Somit sind nun die zur Lichtsimulation im Entwicklungsprozess nötigen Materialien und Modellierungen eingeführt. In Kapitel 8 wird die Lichtsimulation für ein ausgewähltes Fallbeispiel durchgeführt.

8 Messung und Simulation des Fallbeispiels

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Grundlagen zur Bewertung, Messung und Modellierung eines Scheinwerfers bereitgestellt und ein geeigneter Untersuchungsgegenstand definiert. In diesem Kapitel erfolgen die Umsetzung der erarbeiteten Methoden an einem Fallbeispiel sowie ein Vergleich zwischen den Werten der Messung und der Simulation. Dazu werden einleitend die Durchführung der Messung und der Lichtsimulation beschrieben, wobei die Berechnung in der Simulation und die Umsetzung der Modellierung des Fallbeispiels vertieft untersucht werden. Dadurch kann anschließend eine Analyse der Unsicherheiten der Lichtsimulation vorgenommen werden, wodurch die Signifikanz der Trennung der Werte aus der Messung und aus der Simulation überprüft werden kann. Bei dem Vergleich der Werte werden die Anforderungen des Entwicklungsprozesses beachtet und sowohl die Bewertung der Typprüfung wie auch die wahrnehmungsbasierte Bewertung durchgeführt.

8.1 Durchführung der Messung

Die Messung des untersuchten Scheinwerfers erfolgte nach der in Kapitel 4 beschriebenen Messmethode mittels Fernfeld-Goniophotometer. Es wurden zehn Exemplare in den Komponentenpaarungen Lichtquelle/Reflektor sowie als vollständige Scheinwerfer vermessen. Die Verteilungen wurden ausgerichtet und die Mittelwerte $\bar{I}_M(\alpha_H, \alpha_V)$ und Unsicherheiten $W(I)$ ermittelt (vgl. Abschnitte 2.1 und 5.4 sowie Abbildungen 5.11, E.2 und E.3). Die Verteilung der Mittelwerte bildet den Maßstab für die Simulation. Die Verteilung der Unsicherheitsbeiträge wird ohne die in Abschnitt 4.1 ausgeführten Unsicherheitsbeiträge des Messgerätes verwendet, um den durchgängigen Vergleich mit den Abweichungen und Unsicherheiten der simulierten Werte sicherzustellen (vgl. Abschnitt 8.5).

Die gemessenen und simulierten Lichtverteilungen enthalten die meisten Winkel α_H, α_V der Prüfpunkte der ECE R112 nicht direkt. Die Messpunkte und -winkel der Lichtverteilung werden durch den Wertebereich und die Auflösung definiert, während die Prüfpunkte der ECE R112 auf die Messwand im Abstand $r = 25 \text{ m}$ bezogen werden (vgl. Abschnitt 3.5 und Abschnitt 3.1). Zur Ermittlung des Wertes eines Prüfpunktes aus der Lichtverteilung muss eine bilineare Interpolation angewendet werden. Die mittels Interpolation berechneten Werte und deren Unsicherheiten unterscheiden sich somit von den jeweils benachbarten, direkt bestimmten Werten in der Lichtverteilung und müssen somit getrennt bearbeitet werden. Der zusätzliche Berechnungsschritt kann zu Abweichungen führen, die bei der Analyse der Unsicherheiten berücksichtigt werden müssen.

8.2 Berechnungen in der Simulation

Die Berechnungsgrundlage der Lichtsimulation in der Kfz-Umgebung ist das sogenannte Raytracing, das Bestandteil einer Monte-Carlo-Simulation ist. Als Monte-Carlo-Simulation werden numerische Berechnungsverfahren bezeichnet, die mittels statistischer Verfahren respektive Zufallszahlen eine unbekannte Zielfunktion approximieren. Dabei werden die Zufallszahlen mit einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $p(x)$, wie in Gleichung 8.1 gezeigt, gewichtet.

$$P(x \in [a, b]) = \int_a^b p(x) dx \quad (8.1)$$

Der Erwartungswert E_W einer Funktion $f(x)$ ergibt sich mittels Gleichung 8.2.

$$E_W(f(x)) = \int f(x) p(x) dx \quad (8.2)$$

Die Berechnung des Integrals der Funktion wird als Monte-Carlo-Integration bezeichnet. Die Repräsentation des Lichtes im Einzelexperiment erfolgt dabei mittels des Strahls (engl. Ray), dessen Auftreffwahrscheinlichkeit, z.B. auf ein Raumwinkelement der zu berechnenden Lichtverteilung, p ist. In der Strahlverfolgung (engl. Raytracing) ist der einzelne Strahl ein Vektor $\vec{r} = (x, y, z, s, t, u, \lambda, \Phi_t)$ mit den Ortskoordinaten x, y, z , den Richtungskoordinaten s, t, u , der Wellenlänge λ und dem Teillichtstrom Φ_t . Diese Strahlen werden in großer Anzahl durch das lichttechnische System berechnet oder „verfolgt“ (engl. tracing). In der Computergraphik wird dafür auch der Begriff Path Tracing verwendet. Diese Verfahren können in [Kos02] und [Lee05] im Umfeld der Automobilentwicklung vertieft werden.

Im Gegensatz zu dem in der Computergraphik beziehungsweise der Berechnung einer Bildinformation oftmals verwendeten Backward-Raytracing wird das Forward-Raytracing angewendet, bei dem der Weg der Lichtstrahlen von der Quelle durch das optische System bis zur letzten möglichen Fläche berechnet wird. Das Forward-Raytracing bietet einen Geschwindigkeitsvorteil bei der Simulation von Scheinwerfern, da diese eine relativ kleine Lichtquelle aufweisen, die im Backward-Raytracing selten getroffen wird. Zudem stellt das Forward-Raytracing bei Scheinwerfern schneller Ergebnisse für die typische Auswertung der Lichtverteilung mit großen Winkelbereichen bereit. Das Forward-Raytracing ist schematisch in Abbildung 8.1 dargestellt.

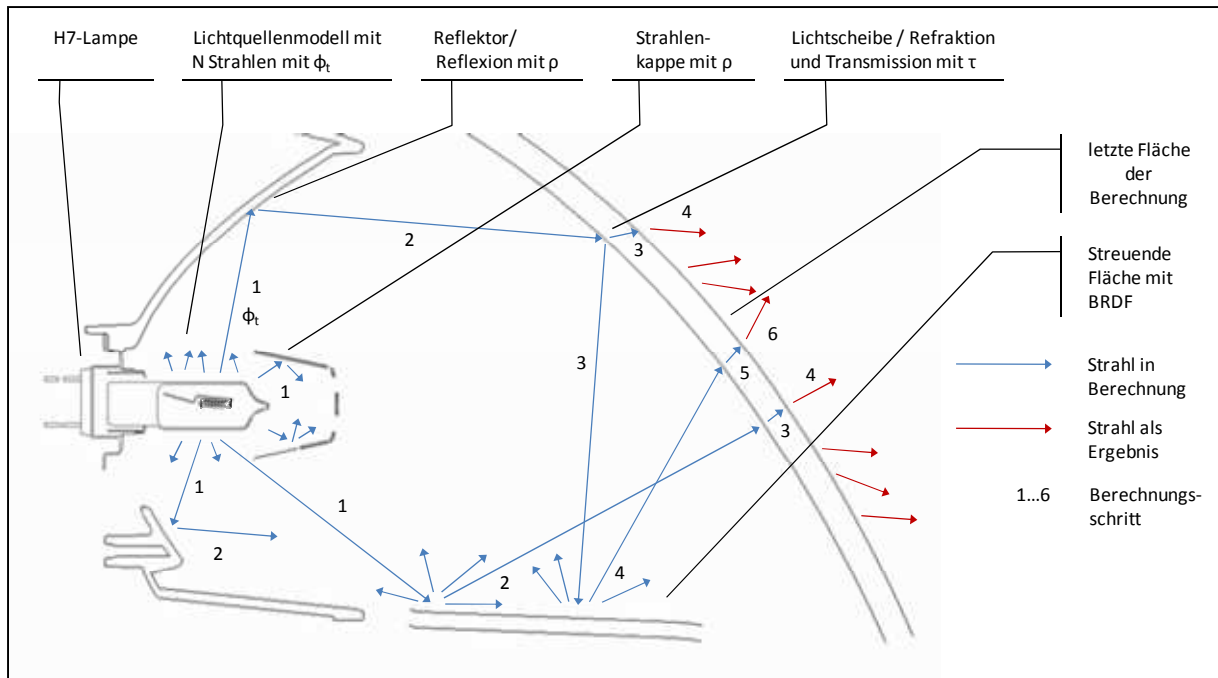


Abb. 8.1: Berechnung des Forward-Raytracing im Scheinwerfer

Das Monte-Carlo-Raytracing ist im Ansatz einfach, wird aber erst durch Beschleunigungsmethoden praktikabel. Die alternativ für die Simulation von Beleuchtungssystemen genutzte Methode des Radiosity ist für die Anwendung bei der Kfz-Lichttechnik nicht sinnvoll. Radiosity basiert auf der Berechnung des Energieaustausches zwischen Flächen. Diese werden als diffuse Emitter modelliert und zuvor tesseliert, also in planare Dreiecke zerlegt (vgl. Abschnitt 8.3). Diese Methode ist beispielsweise für Beleuchtungssituationen der Innenarchitektur sinnvoll einsetzbar.

Die Interaktion des Strahls mit den Flächen des lichttechnischen Systems beziehungsweise der Lichtstromtransport wird beim Raytracing gemäß den optischen Gesetzen für Reflexion und Brechung sowie für Absorption hinsichtlich Richtung und Energie berechnet. Dabei sind auf Basis der Maxwell-Gleichungen sowie von Vereinfachungen, beispielsweise für homogene Medien, die Gleichungen der ebenen, harmonischen, monochromatischen elektromagnetischen Welle abgeleitet. Eine Lösung ist in Gleichung 8.3 dargestellt.

$$E = E_0 \cdot e^{-j(\omega t - k_E r)} \quad (8.3)$$

Der Betrag des Wellenvektors \vec{k} ist die Kreiswellenzahl $k_E = |\vec{k}| = \frac{2\pi f}{c} = 2\pi f n/c_0$. Aus Wellengleichung und Stetigkeitsbedingungen ergeben sich die Reflexionswinkel für den Wellenvektor \vec{k} mit $k_0 \sin \varepsilon_0 = k' \sin \varepsilon'$ sowie $k_0/k' = n_0/n'$ zu Gleichung 8.4, dem Brechungsgesetz nach Snellius.

$$\frac{\sin \varepsilon_0}{\sin \varepsilon'} = \frac{n'}{n_0} \quad (8.4)$$

Das Reflexionsgesetz folgt dann in Gleichung 8.5. Damit sind die Richtungskordinaten s, t, u des Strahls bestimmt.

$$\varepsilon' = -\varepsilon_0 \quad (8.5)$$

Im Fall einer Streulichtverteilung wird anstatt des Reflexions- oder Brechungsgesetzes die jeweilige BRDF-Verteilung mittels der beschriebenen Monte-Carlo-Methoden approximiert, wie in Abschnitt 7.3 und Gleichung 7.11 dargestellt. Der Teillichtstrom Φ_t eines reflektierten Strahls wird mittels der Fresnel-Gleichungen beschrieben, die ebenfalls aus der Wellengleichung abgeleitet werden. Dabei gelten für den Reflexionsgrad $\rho = \Phi'_t/\Phi_{t,0}$, aufgelöst für die Polarisationszustände s und p , die Gleichungen 8.6 und 8.7.

$$\rho_s = \left(\frac{\sin(\varepsilon_0 - \varepsilon')}{\sin(\varepsilon_0 + \varepsilon')} \right)^2 ; \rho_p = \left(\frac{\tan(\varepsilon_0 - \varepsilon')}{\tan(\varepsilon_0 + \varepsilon')} \right)^2 \quad (8.6); (8.7)$$

Da der Polarisationszustand in der Simulation nicht berücksichtigt wird, kann die Berechnung des reflektierten Teillichtstroms mit Gleichung 8.8 zusammengefasst werden.

$$\rho = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(\varepsilon_0 - \varepsilon')}{\sin^2(\varepsilon_0 + \varepsilon')} + \frac{\tan^2(\varepsilon_0 - \varepsilon')}{\tan^2(\varepsilon_0 + \varepsilon')} \right) \quad (8.8)$$

In den Softwareprodukten wird oftmals die Vereinfachung nach Gleichung 8.9 angewendet. Diese Vereinfachung führt zu Abweichungen für flache Beleuchtungswinkel.

$$\rho \approx \left(\frac{n' - n_0}{n' + n_0} \right)^2 \quad (8.9)$$

Wird die Brechzahl n mit $\tilde{n} = n + jn''$ komplex verwendet und in die Lösung der Wellengleichung eingesetzt, so ergibt sich die Aufteilung nach Gleichung 8.10.

$$E = E_0 \cdot e^{-j\omega t} \cdot e^{-jnk_v r} \cdot e^{-n''k_v r} \quad (8.10)$$

Dabei gilt $k_E = k_v \cdot n$ mit k_v für die Kreiswellenzahl im Vakuum. Mittels des Terms, der den komplexen Anteil n'' beinhaltet, kann die Dämpfung beschrieben werden. Um den Bezug zur Absorption nach dem Bouguer-Lambert-Gesetz herzustellen, muss die Notation zu dem Extinktionskoeffizient k respektive zum Absorptionskoeffizient α_n gewandelt werden, die mittels Gleichung 8.11 verbunden sind. Zudem ist die energetische Abhängigkeit der Intensität $\langle E \rangle_t^2 \sim I = \Phi_t$ Voraussetzung.

$$\alpha_n = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (8.11)$$

Das Gesetz nach Bouguer-Lambert, bezogen auf den Teillichtstrom, ist in Gleichung 8.12 dargestellt.

$$\frac{\Phi'_t}{\Phi_{t,0}} = e^{-\alpha_n \cdot r} \quad (8.12)$$

Bei den transparenten Kunststoffen PC ($n = 1,586$) und PMMA ($n = 1,49$) wird der sehr kleine Imaginärteil des komplexen Brechungsindex typischerweise vernachlässigt. Für Aluminium werden $n = 0,99$ und $n'' = 6,58$ bei $\lambda = 546 \text{ nm}$ angegeben. Das winkelabhängige Reflexionsverhalten ist in Abbildung I.1 im Anhang dargestellt. Es ergeben sich Grenzen der Gültigkeit, da die Fresnel-Gleichungen für elektrische Leiter nicht definiert sind.

Somit sind die wesentlichen Modellierungen der optischen Funktion für das Raytracing eingeführt. Dabei wird gezeigt, dass Reflexionsgrad und Absorptionsgrad winkelabhängig sind. Für die beschriebene Konzeptauslegung wird das typischerweise nicht umgesetzt, was zu Abweichungen gerade bei flachen Winkeln führen kann. Die Zusammenhänge können in Hecht [Hec02] vertieft nachgelesen werden.

Berechnen der lichttechnischen Werte

Die lichttechnischen Größen und Werte werden aus den berechneten Strahlen ermittelt. Dazu wird für die Fernfeldgrößen Beleuchtungsstärke und Lichtstärke typischerweise eine äquidistante Aufteilung der Sensorflächen respektive des Raumwinkels angewendet. In diese Felder werden die Strahlen eingezählt, was dem Fall eines Histogrammdichteschätzers entspricht. Die Methode der Dichteschätzung kann bei Häring [Här07], [Här07a] verglichen werden. In Abbildung 8.2 wird schematisch die Ermittlung des Wertes im Messverfahren und im Simulationsverfahren dargestellt.

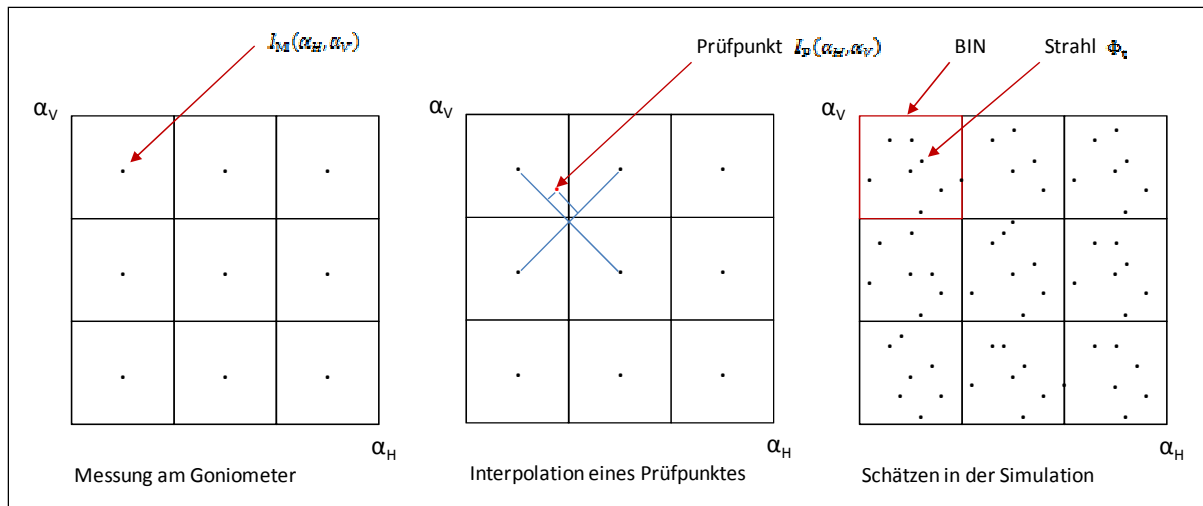


Abb. 8.2: Wertermittlung in Messung und Simulation

Der Histogrammdichteschätzer ist hinsichtlich der Beschreibung einfach, schränkt aber durch seine feste Klassen- und Feldeinteilung den Informationsgehalt der Strahlen ein. Die Strahlen enthalten die Informationen zu einer stetigen Dichtefunktion, die hier unstetig und abgestuft geschätzt wird. Diese feste sogenannte BIN-Weite führt zu einer systematischen Abweichung, dem Quantisierungsfehler. Die Berechnung der Lichtstärke eines Raumwinkelelements erfolgt in dieser Arbeit gemäß der Gleichung 8.13 [Men09a]. Dabei wird die Lichtverteilung der Messanordnung des Goniometer Type A nachvollzogen, bei dem $\Delta\alpha_H = konst.$ und mit α_V das Bogenmaß α_H beziehungsweise der Raumwinkel Ω abnimmt.

$$I_{\alpha_H, \alpha_V} = \frac{\sum_{i=1}^n J \cdot \Phi_{t,i}}{\Delta\alpha_H \cdot \left(\cos\left(\alpha_V - \frac{\Delta\alpha_H}{2}\right) - \cos\left(\alpha_V + \frac{\Delta\alpha_H}{2}\right) \right)} \quad (8.13)$$

mit:

$$J = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \alpha_H - \frac{\Delta\alpha_H}{2} < \vartheta_i < \alpha_H + \frac{\Delta\alpha_H}{2} \wedge \alpha_V - \frac{\Delta\alpha_V}{2} < \varphi_i < \alpha_V + \frac{\Delta\alpha_V}{2} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Dies kann bei Mensch [Men09a] und [Men09] verglichen werden. Die Anzahl der Strahlen n führt zu zufälligen Abweichungen, was in Abschnitt 8.3 weitergeführt wird. Die für die Wertberechnung einiger Prüfpunkte der ECE-Regelung nötige bilineare Interpolation erfolgt in dieser Untersuchung in der nachfolgend dargestellten Software Lucidshape der Firma Brandenburg GmbH. Dessen Funktion wurde zuvor mit der bilinearen Interpolation von Matlab der Firma MathWorks Inc. verglichen.

8.3 Aufbau der Simulation

Für den Vergleich mit der Messung der Typprüfung müssen die Abweichungen und Unsicherheiten der Lichtsimulation untersucht werden, ähnlich dem Vorgehen in Kapitel 4. Die Unsicherheitsanalyse der Messung hat den Vergleich der Messergebnisse aus unterschiedlichen Laboren zum Ziel. Entsprechend werden nachfolgend die Abweichungen unterschiedlicher Softwareprodukte bewertet, in denen die Labormessung jeweils virtuell nachgebildet wird. Dazu musste der Aufbau der Simulation auf eine vergleichbare Modellierungstiefe begrenzt werden, weswegen nur die Modellierungstiefe der Konzeptabsicherung untersucht und keine weitere Optimierung der Genauigkeit mittels der Analyse der Abweichungen vorgenommen wurde.

Die funktionale Umsetzung des Raytracing in den Softwareprodukten ist typischerweise nicht dokumentiert und muss in dieser Arbeit als unbekannte Übertragungsfunktion behandelt werden. Diese Annahme entspricht der Übertragungsfunktion $A_{SW} \cdot M_{SW}$ aus der Modellierung in Abschnitt 4.1, Gleichung 4.2. Die dann verbleibende Modellierung der Lichtquelle M_{LS} für $L_{LS}(x, y, z, \vartheta, \varphi) = M_{LS} \cdot \Phi_{LS}$ ist mit der in Kapitel 6 behandelten Lichtquellenmodellierung vergleichbar. Die weiterhin nötige Berechnung der lichttechnischen Größe $I_{S,SW}(\alpha_H, \alpha_V)$ ist oben genannt worden.

Der Ablauf einer Simulation kann in Anlehnung an den Arbeitsablauf der Messung beschrieben werden. Die nötigen Schritte sind in Abbildung 8.3 zusammengefasst und werden nachfolgend beschrieben. Dabei werden die Einflussfaktoren auf die Genauigkeit diskutiert und abgeschätzt.

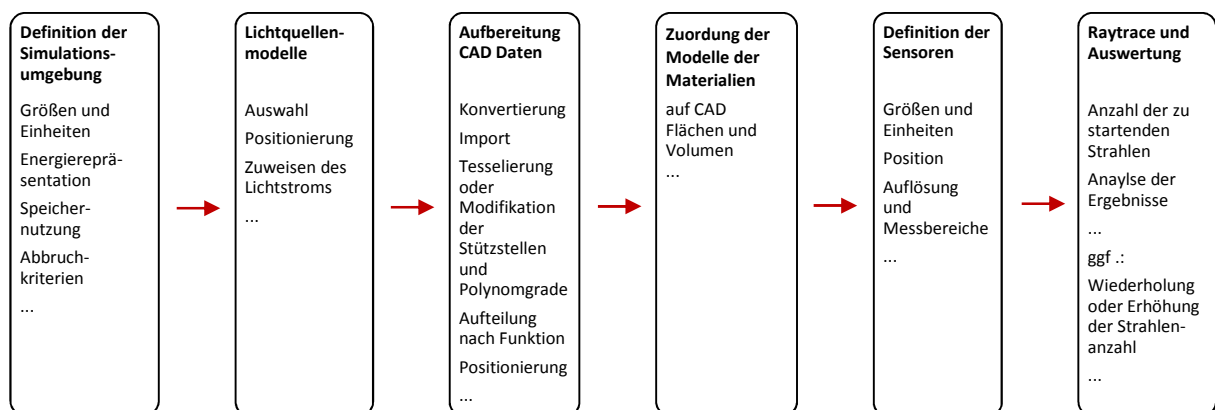


Abb. 8.3: Arbeitsschritte der Lichtsimulation

In dieser Untersuchung wurden drei marktübliche und repräsentative Softwarepakete ausgewählt.

1. Die Software ASAP des Breault Research Center ist eine langjährig in Wissenschaft und Industrie etablierte Software. Der große Umfang an Funktionen zur Modellierung und Analyse ist geeignet für die Anforderungen im Automobilbau sowie zur Entwicklung der Methoden für Materialmodelle und Lichtquellenmodelle. Aufgrund der umfassenden

Analysemöglichkeiten des Raytracing-Prozesses ist das Tool als Referenz in dieser Arbeit definiert worden. Die Steuerung per Scriptsprache bedeutet eine vergleichsweise zeitintensive Anwendung, die zudem einer gründlichen Vorbereitung bedarf. Die Wahrscheinlichkeit von Scriptfehlern ist hoch, was die Tauglichkeit im Entwicklungsprozess zusätzlich einschränkt. Es wurde die Version ASAP 2008 V1 R1 inklusive des CAD-Paketes verwendet (vgl. [Breom]).

2. Die Software SPEOS der Firma OPTIS ist in der Version CAA eine Simulationsumgebung, die in die CAD-Software CATIA der Firma Dassault Systèmes integriert ist. Dadurch ist die Software sehr gut in den Entwicklungsprozess eingepasst und eignet sich besonders für die Analyse von CAD-basierten lichttechnischen Entwicklungen. Die angewendete Tessellierung der CAD-Flächen ermöglicht sehr kurze Berechnungszeiten. Die Bedienung ist sehr einfach. Die Funktionen zur Modellierung und Analyse sind vergleichsweise eingeschränkt. Es wurde die Software Speos V7.0 verwendet (vgl. [Optfr]).
3. Die Software Lucidshape der Firma Brandenburg GmbH wurde im Gegensatz zu den vorher genannten Programmen primär als CAL-Software für die Auslegung von optischen Funktionsflächen entwickelt. In Lucidshape werden nicht die CAD-Flächen direkt sondern deren lichttechnische Funktion manipuliert. Es liegen vorkonfigurierte Systeme für lichttechnische Grundfunktionen vor, was die Anwendung besonders in der Konzeptphase des Entwicklungsprozesses begünstigt. Die lichttechnische Funktion wird mittels Raytracing berechnet. Die Analyse- und Modellierungsmöglichkeiten sowie die Benutzeroberfläche sind auf die Automobilindustrie ausgerichtet. Die lichttechnischen Anforderungen der maßgeblichen Regelungen der Typprüfung sind in der Software enthalten. Deswegen wurde das Tool zur Auswertung der in ASAP oder SPEOS erstellten Lichtverteilungen genutzt. Es wurde die Version Lucidshape 1.7.3 a verwendet (vgl. [Braom]).

Simulationsumgebung

Die Festlegungen der Simulationsumgebung erfolgten mit Standardeinstellungen, soweit diese die Anwendbarkeit, Genauigkeit oder Vergleichbarkeit nicht beeinträchtigten. Die Einstellung der Energierepräsentation wurde mittels der statistischen, auch „Split Monte Carlo“ genannten Methode untersucht. Dabei ist der Teillichtstrom der Strahlen gleichbleibend ($\Phi_t = konst.$) und die energetischen Änderungen an den Flächen werden durch die Änderung der Anzahl der Strahlen mit $N \neq konst.$ repräsentiert. Diese Methode ist vorteilhaft, da sich die Anzahl der ausgewerteten Strahlen über alle Programme wenig ändert beziehungsweise ähnlich abnimmt. Diese Einstellung führte aber durch unbekannte Fehler zu unterschiedlichen Ergebnissen der Softwareprodukte. Somit wurde die Methode der Strahlteilung, „Split Generation“, evaluiert, die die energetische Wechselwirkung an der Grenzfläche im jeweiligen Strahl repräsentiert und, falls nötig, neue Generationen aus dem einfallenden Strahl abspalte ($\Phi_t \neq konst.$). Dabei werden je nach Software wesentlich mehr Strahlen erzeugt. Da die Anzahl n der eingezählten Strahlen einen Einfluss auf die Genauigkeit hat, sind

Abweichungen der Messunsicherheiten beim Vergleich beider Methoden zu erwarten. Nach Analyse der Werteverteilung $I_S(\alpha_H, \alpha_V)$ der beiden Verfahren, berechnet in ASAP, konnten allerdings keine Unterschiede identifiziert werden. In Abbildung 8.4 sind jeweils die nach GUM Typ A ermittelten Verteilungen der Standardabweichungen links und rechts und die prozentuale Abweichung D unten dargestellt (vgl. Abschnitt 8.4). Es wurde weder ein signifikanter Unterschied, noch ein Trend für den untersuchten Scheinwerfer festgestellt. Beide Verfahren führen zu gleichen Unsicherheitswerten. Der Untersuchungsgegenstand verhält sich vermutlich durch seine einfache Geometrie in beiden Verfahren ähnlich. Nachfolgend wird die Methode „Split Generation“ angewendet.

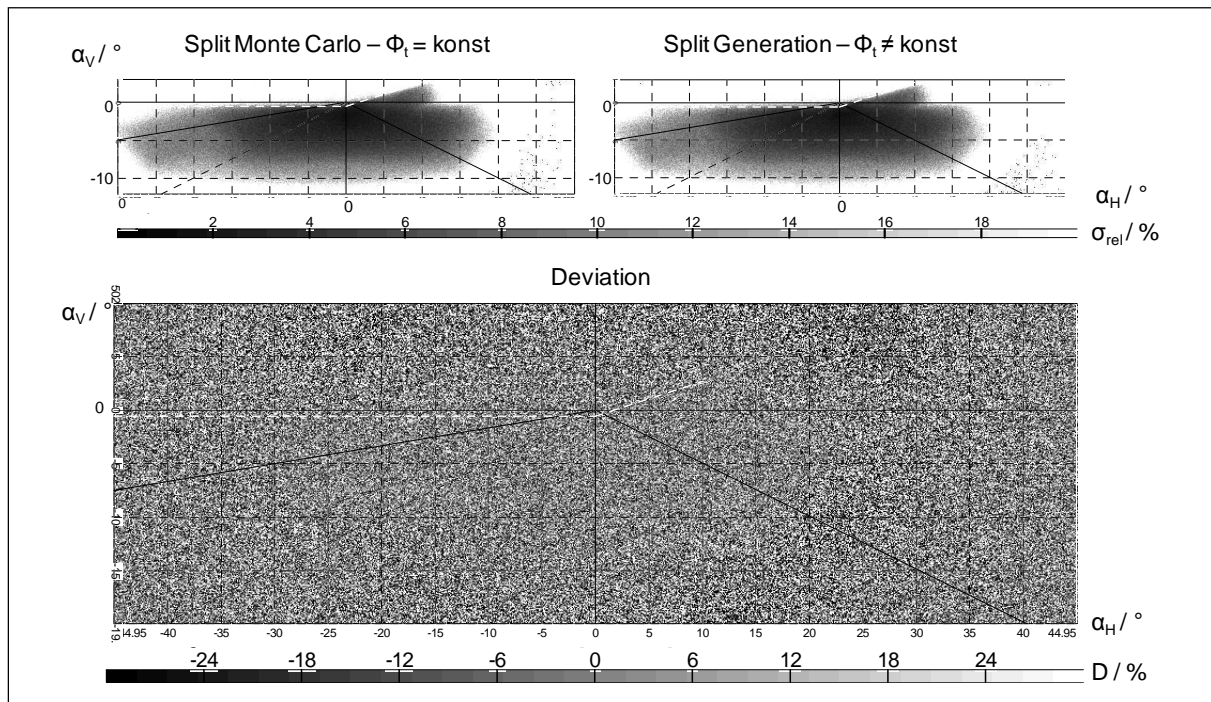


Abb. 8.4: Verteilungen der Standardabweichung aus Lichtverteilungen mit zwei unterschiedlichen Energierepräsentationen und ihre Deviation

Lichtquellenmodellierung

Das der Analyse zugrunde liegende Lichtquellenmodell basiert auf dem in Kapitel 6 eingeführten Strahldatensatz-Emitter aus einer Nahfeldmessung. Wie in Abschnitt 6.4 beschrieben werden Strahldatensätze überwiegend bei Simulationen mit höheren Genauigkeitsanforderungen eingesetzt. Weiterhin ist für diese Untersuchung wichtig, dass bei Strahldatensätzen kein Einfluss durch die softwareabhängige Generierung von Strahlen aus CAD-Flächen entsteht. Dadurch können ausschließlich die Abweichungen der Strahlberechnung und der Geometrierepräsentation der Produkte bewertet werden. Die systematischen Abweichungen durch die Genauigkeit der Modellierung des Lichtquellenmodells sind damit konstant.

Der verwendete Strahldatensatz zu der H7 Typ SLL-A beinhaltet $N = 10^8$ Strahlen. Die Messung und Konvertierung erfolgte durch die Herstellerfirma A mittels eines Nahfeld-

Goniophotometers der Firma Technoteam (vgl. Abschnitt 6.2). Die Strahlen wurden mittels eines Algorithmus des Konverters in der Reihenfolge zufällig verteilt beziehungsweise durchmischt. Die Teillichtströme sind nicht wellenlängenabhängig repräsentiert. Damit gilt Gleichung 8.14.

$$\Phi_t = \frac{\Phi_{NENN}}{N} = \frac{1100 \text{ lm}}{1 \cdot 10^8} \quad (8.14)$$

Die Ersatzlichtquelle ist zylinderförmig mit den Abmessungen $d = 22 \text{ mm}$ und $f = 24 \text{ mm}$. Ein geometrisches Modell der Lichtquelle, wie in Kapitel 6 beschrieben, ist nicht integriert, um auch hier den Einflussfaktor der CAD-Repräsentation auszuschalten. Damit ist beim Vergleich der simulierten Verteilungen nur der Einfluss der Lichtfeld-Repräsentation mit einer begrenzten Menge Strahlen N bedeutsam, was im Abschnitt 8.4 weitergeführt wird

Aufbereitung der CAD-Daten

Der CAD-Datensatz des Untersuchungsgegenstandes liegt im nativen Format des CAD-Programms CATIA V5 (vgl. [Dasom]) vor. Für die Software ASAP sowie Lucidshape wurde die Konvertierung und der Transfer im CAD-Format IGES (vgl. [Bre04a]) vorgenommen. Das Format basiert auf B-Spline-Flächen und gewährleistet durch seine weite Verbreitung die nötige Kompatibilität. Die Simulationssoftware wandelt die CAD-Daten anschließend in eine jeweils eigene Geometrierepräsentation um, die nicht dokumentiert ist. Um die Strahlverfolgung zu beschleunigen, reduzieren einige Programme die mathematische Beschreibung der Geometrie. Werden beispielsweise die Anzahl der Stützstellen der B-Splines reduziert, so beschleunigt sich die Näherungsberechnung des Schnittpunktes von Strahl und Geometrie. In SPEOS hingegen wird zur Beschleunigung des Raytracing die native CATIA-Geometrie in planare Dreiecke zerlegt. Der Vorgang ist auch als Tesselierung bekannt.

Die Kontrolle der Geometriekonvertierung kann durch Import und Export in das jeweilige CAD-Format erfolgen, wobei der resultierende Datensatz mit dem originalen Datensatz verglichen wird. Im Fall von SPEOS ist kein Export vorgesehen. Eine Kontrolle kann aber durch die Analyse der Strahlen nach dem Raytracing erfolgen, die auf der letzten Geometriefläche positioniert sind. Aus den Startpunkten der Strahlen kann in CATIA eine Geometrie zurückentwickelt und mit der ursprünglichen CAD-Geometrie verglichen werden. Somit können Abweichungen der Geometrie ermittelt werden, hingegen ist die Abweichung der optischen Funktion daraus nicht ableitbar. Diese für die Software typische systematische Abweichung wird in Abschnitt 8.4 im Hinblick auf die drei Programme bewertet.

Materialmodellierung

Die Modellierung der optischen Eigenschaften der Materialoberflächen wurde, wie einleitend definiert, hinsichtlich Einfachheit und Vergleichbarkeit der Modelle nicht mit größtmöglicher Genauigkeit vorgenommen. Die Tabelle 8.1 enthält eine Übersicht zur Modellierung, geordnet nach dem jeweiligen Bauteil und dessen Oberflächenart. Sie enthält Angaben zu der zugrunde liegenden Messung der Materialeigenschaften, zur Umsetzung des Modells und zur Genauigkeit.

Tabelle 8.1: Materialmodellierung am Fallbeispiel

Bauteil/ Komponente	Modell nach Messung	Modell in Simulation	Bemerkung
Reflektor (Kunststoff, lackiert und metallisiert)	Messung und Modellierung der BRDF erfolgte durch IOF Jena, wie in Kapitel 6 beschrieben Messung des Reflexionsgrades erfolgte mittels Spektralphotometer $\rho = 0,861$	Reflexionsmodell ausschließlich gerichtet, kein BRDF Modell angewendet, Reflexionsgrad $\rho = 0,861$	Voruntersuchung ergaben zu große Abweichungen bei Anwendung der BRDF, speziell bei den Maximalwerten und Gradienten
Strahlenkappe (Aluminium, innen dunkel beschichtet)	keine Messung möglich aufgrund ungünstiger Geometrie; visuelle, vergleichende Abschätzung von $\rho = 0,3$	Streuung ideal lambertförmig $\rho = 0,3$	Einfache Modellierung ausreichend, da die Kappe nur absorbierende Funktion ohne relevanten Beitrag zur Reflexion hat
Blende, glänzend, glatt (Kunststoff, metallisiert)	Messung des Reflexionsgrades ergab $\rho = 0,861$	Reflexionsmodell ausschließlich gerichtet, kein BRDF Modell angewendet, Reflexionsgrad $\rho = 0,861$	Aufgrund des unlackierten Kunststoffes ist eine geringfügig größere Streuung zu erwarten als beim Reflektor, wegen der geringen relevanten Flächenanteile wird jedoch das gleiche Modell angenommen
Blende, glänzend, genarbt (Kunststoff, metallisiert)	Messung und Modellierung der BRDF erfolgte wie in Kapitel 6 beschrieben, Narbung K31, geätzt	Streuung ideal lambertförmig $\rho = 0,861$	Messung des Reflexionsgrades aufgrund der Rauheit nicht sinnvoll, durch Anwendung der gleichen Metallisierung ist vom gleichen $\rho = 0,861$ auszugehen, die BRDF-Modelle wurden nicht angewendet, um die Vergleichbarkeit der Programme zu erhalten
Lichtscheibe (Kunststoff PC, klar, beschichtet für Beständigkeit)	Messung der Transmission $\tau_v = 0,884$, unter Verwendung der Materialdicke s wurde daraus $k = 0,0055$ abgeleitet	Brechungsindex $n = 1,586 \neq f(\lambda)$ Reflexionsverluste nach Fresnel	Keine Beobachtung von signifikanter Streuung nach Test mit Laser, keine Beobachtung von Dispersion, Brechungsindex aus Materialdatenblatt, die Anwendung der Absorption nach Bouguer-Lambert ist in den Programmen unterschiedlich repräsentiert und führte zu Berechnungsfehlern

Sensorkonfiguration

Die Simulationsprogramme enthalten Berechnungsmethoden, die aus den Strahlendaten die lichttechnischen Größen und Werte der Lichtverteilung $X_s(\alpha_H, \alpha_V)$ berechnen, wie in Abschnitt 8.2 dargestellt. Um die in Abschnitt 3.5 definierten Anforderungen an die Lichtverteilung in der Simulation umzusetzen und den raumwinkelgenauen Vergleich zu ermöglichen, werden das Winkelsystem des Goniometers Typ A (vgl. [Cie87]) und die

vorgegebenen Winkelbereiche und -auflösungen $\Delta\alpha$ nachgebildet. Dadurch sind keine zufälligen oder systematischen Abweichungen durch den Sensor zu erwarten. Die Berechnung der Lichtstärke $I_s(\alpha_H, \alpha_V)$ aus Strahldaten wird in Abschnitt 8.2 erläutert. Im Unterschied zur Messung wird dabei die Lichtstärke nicht aus $E_M(\alpha_H, \alpha_V)$ und r^2 berechnet und unterliegt damit keinem Einfluss des Nahfeldes. Dieser Einflussfaktor konnte in den Softwareprodukten nicht durchgängig nachvollzogen werden. Da dies in $r = 25\text{ m}$ nach Koos [Koo93] und von Hoffmann [Hof03] vernachlässigbar ist und die Vergleichbarkeit der Programme gewährleistet werden soll, werden die direkt ermittelte Lichtstärkeverteilung $I_s(\alpha_H, \alpha_V)$ sowie die nach dem photometrischen Entfernungsgesetz abgeleitete Beleuchtungsstärke $E_s(\alpha_H, \alpha_V)$ gemäß ECE R112 verwendet.

8.4 Analyse der Abweichungen und Unsicherheiten der Simulation

Die nachfolgende Analyse der Messunsicherheiten und die Gegenüberstellung der drei Softwareprodukte ist einer Ringmessung des Untersuchungsgegenstandes in drei Laboren mit jeweils eigenem Fernfeld-Goniophotometer nachempfunden. Im Unterschied zur messungsbasierten Typprüfung wird in dieser Analyse nur eine Lichtquelle respektive ein Lichtquellenmodell eingesetzt, in diesem Fall das Modell der in der Messung verwendeten H7-Lampe, Typ 64210L+ von OSRAM. Dies entspricht dem typischen Vorgehen in der virtuellen Absicherung. Im Gegensatz zur Messung ist damit die Übertragungsfunktion $M_{LS}(x, y, z, \vartheta, \varphi)$ des Lichtquellenmodells zeitlich invariant und unabhängig von der ausgewählten Lichtquelle k im Labor. Die Vergleichbarkeit zur Messung wird durch die konstante systematische Abweichung des Lichtquellenmodells $u(M_{LS}(x, y, z, \vartheta, \varphi))$ beeinflusst (vgl. Abschnitt 4.1). Das Vorgehen ist ein prinzipieller Vorteil einer virtuellen Typprüfung. Die vergleichsweise einfache Verbreitung des Lichtquellenmodells als vervielfältigbare Datei erlaubt eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Simulation.

Die bekannten Angaben zur Unsicherheit der Simulation mittels Raytracing sind hinsichtlich anderer Problemstellungen erstellt oder beinhalten nur Teile der hier vorliegenden Aufgabenstellung. So bezieht sich das von Peterson [Pet05] im Umfeld der Lichtsimulation angewendete Rose-Model auf die Anforderungen der Bildverarbeitung. Die Software LightTools von Optical Research Associates [Oraom] enthält die Angabe einer Fehlerwahrscheinlichkeit ε pro Pixel, der mittels der Anzahl N und der Energien ϕ_t der resultierenden Strahldaten durch Gleichung 8.15 berechnet wird.

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{(\sum_N \phi_t^2)}}{\sum_N \phi_t} \quad (8.15)$$

Damit beschränkt sich diese Berechnung auf die statistische Analyse des Simulationsergebnisses, ohne Bewertung der weiteren Einflussfaktoren der Simulation (vgl.

Abbildung 8.3). Die Gleichung 8.15 ist in den genannten Simulationsprogrammen nicht umsetzbar. Bei Häring [Här07], [Här07a] sind weiterhin qualitative Angaben und Untersuchungen im Bezug auf Leuchtdichte erfolgt.

Eine Abschätzung des Signal-Rausch-Verhältnisses wird bei Breault [Bre04b] auf Grundlage der Bernoulli-Wahrscheinlichkeit und der Auftreffwahrscheinlichkeit p eines Strahls im Raumwinkelement nach Gleichung 8.16 angegeben.

$$\frac{\text{Rausch}}{\text{Signal}} = \frac{\sqrt{1-p}}{\sqrt{n}} \quad (8.16)$$

Dabei ist n die Anzahl der Strahlen aus der Menge N , die in das Raumwinkelement eingezählt wird. Für kleine Wahrscheinlichkeiten beziehungsweise wenig Strahlen wird bei Breault [Bre04b] die Wahrscheinlichkeitsverteilung nach Poisson herangezogen, wie in Gleichung 8.17 gezeigt.

$$\frac{\text{Rausch}}{\text{Signal}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (8.17)$$

Typischerweise, unter Annahme hinreichend vieler eingezählter Strahlen, wird aber von einer Normalverteilung der Auftreffwahrscheinlichkeit und damit des Rauschens ausgegangen. Das angegebene Signal-Rausch-Verhältnis ist vergleichbar mit der oben genannten Fehlerwahrscheinlichkeit ε . Die Teillichtströme ϕ_t sowie die genannten Einflüsse des Raytracings werden nicht berücksichtigt. Somit ist eine Unsicherheitsanalyse, die mit der Methode nach GUM [GUM95], [Nor08] vergleichbar ist, nicht bekannt.

Deswegen soll nachfolgend der Ansatz der Analyse nach Typ A angewendet werden. Dabei wird die beschriebene Simulation mehrfach durchgeführt und die Simulationsergebnisse werden statistisch ausgewertet. Um eine hinreichend große Strahlenanzahl für die angestrebte Normalverteilung zu gewährleisten, wird von $N = 1 \cdot 10^8$ ausgegangen. Die Normalverteilung ergibt sich in der Simulation nicht aus den konstanten Teillichtströmen $\phi_t = \text{konst.}$ der Lichtquelle, sondern aus den räumlich inhomogenen, diskretisierten Leuchtdichteverteilungen des Lichtquellenmodells. Diese Leuchtdichteverteilungen werden bei der Berechnung durch das optische System weiter durchmisch, überlagert und abgebildet, um dann in den diskreten Raumwinkeln des Sensors zufällig eingezählt zu werden.

Die Funktionsstruktur ist wie in Abbildung 8.3 gegeben und bildet die Funktion der messungsbasierten Typprüfung nach Abschnitt 4.1, Abbildung 4.3 nach. Die Einflussfaktoren auf die Lichtsimulation sind eingeführt. Die zufälligen und systematischen Abweichungen der Simulation der Programme sind darin Untersuchungsgegenstand. Die zu erwartenden Abweichungen entstehen maßgeblich durch die abweichenden Repräsentationen der CAD-Geometrie und der Berechnung des Schnittpunktes des Strahls mit der CAD-Fläche sowie durch die Repräsentation der optischen Modelle, beispielsweise einer Streulichtverteilung, durch eine begrenzte Anzahl der Strahlen.

Durchführung

Die willkürlich festgelegte Anzahl der gestarteten Strahlen $N_{\text{aus}} = N_{\text{LS}} = 1 \cdot 10^8$ liegt 10- bis 100-fach über den zum Zeitpunkt der Arbeit praxisüblichen Werten einer lichttechnischen Entwicklung. Die Unterteilung in $m = 30$ Einzelsimulationen ist ein Kompromiss aus hinreichender Schätzung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion beziehungsweise eines hinreichend kleinen Wertes t bei Annahme der Normalverteilung, und einer hinreichenden Auftreffwahrscheinlichkeit p des Strahls im Raumwinkelement. Aufgrund dieser willkürlichen Annahme von N_{aus} soll die Abhängigkeit des Wertes $E_S(\alpha_H, \alpha_V)$ von der Anzahl der eingezählten Strahlen n sowie von N_{aus} untersucht werden. Die Abhängigkeit dieses Konvergenzverhaltens von N_{aus} ist in der Praxis von Bedeutung, da dort die gestarteten Strahlen der Lichtquelle N_{LS} und nicht die einzuzählenden Strahlen festgelegt werden. Die Analyse der resultierenden Werte $E_S(\alpha_H, \alpha_V)$ und $W(E_S(\alpha_H, \alpha_V))$ erfolgt jeweils für Raumwinkelemente, die mindestens einen Strahl beziehungsweise ein Einzählereignis enthalten. Andernfalls wird m reduziert und t erhöht. Die Anzahl der Strahlen werden mittels der Software Matlab® der Firma MathWorks [Matde] anhand des Strahldatensatzes ermittelt. Die Werte der Prüfpunkte nach ECE R112 werden wie in Abschnitt 3.5 und 8.1 beschrieben durch bilineare Interpolation berechnet. In diesem Fall werden die Strahlen n der jeweils zugrunde liegenden Raumwinkelemente gezählt.

In Abbildung 8.5 oben sind das Konvergenzverhalten und die zugehörigen Unsicherheiten $E_S(\alpha_H, \alpha_V) \pm U(E_S)$ in Abhängigkeit von n für einen Prüfpunkt HV dargestellt, welcher den Wert genau eines Raumwinkelements annimmt und damit nicht interpoliert wird. Es ist nach [Pet05] für eine Normalverteilung des Rauschens ein Konvergenzverhalten proportional zu $1/\sqrt{n}$ zu erwarten. Deswegen ist eine Regression mit einer Wurzelfunktion vorgenommen worden. Sie beträgt $E_S \sim \frac{1}{1,812\sqrt{n}}$. In Abbildung 8.5 unten ist das Konvergenzverhalten in Abhängigkeit von N_{aus} dargestellt. Ein näherungsweise stabiles Verhalten der Konvergenz ist ab $N_{\text{aus}} = N_{\text{LS}} \approx 2 \cdot 10^7$ oder $n \approx 40$ zu beobachten.

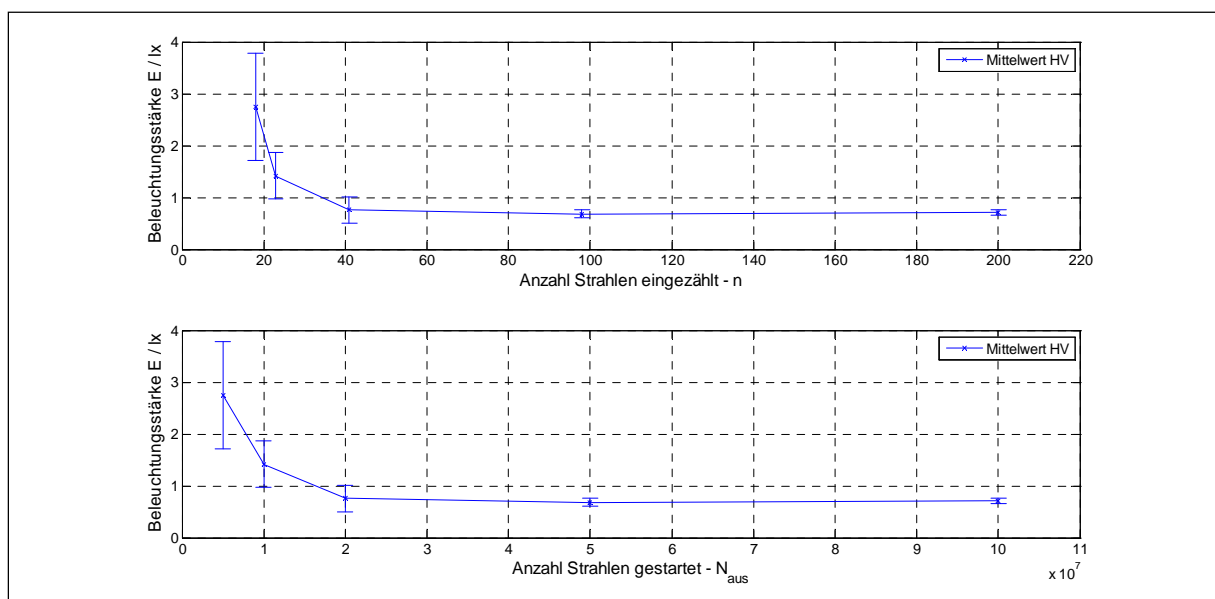


Abb. 8.5: Konvergenzverhalten und Unsicherheit für Prüfpunkt HV

Aufgrund der nicht bekannten Abweichungen durch den Einfluss der bilinearen Interpolation wurde das Verhalten solcher Prüfpunkte gesondert untersucht. Bei der untersuchten ECE R112 bilden diese Werte die Mehrheit. In Abbildung 8.6 ist das Verhalten der Prüfpunkte B50L und 50R jeweils für eingezählte und für gestartete Strahlen dargestellt. Die Wertebereiche und damit die Anzahl der eingezählten Strahlen n unterscheiden sich stark. Die Werte werden jeweils aus vier Pixeln bzw. Raumwinkelementen interpoliert. Es ist ein anfangs instabiles Verhalten der Prüfpunkte mit einer Stabilisierung bei unterschiedlichen Werten n zu beobachten. Der Verlauf über die gestarteten Strahlen hingegen zeigt eine Stabilisierung der unterschiedlichen Verläufe bei $N_{\text{aus}} \approx 2 \cdot 10^7$. Dieses Verhalten sollte für weitere Programme, Interpolationen und Lichtquellenmodelle untersucht werden. Eine Abhängigkeit von dem Lichtquellenmodell ist deswegen zu vermuten, da dessen Leuchtdichteverteilung $L_{\text{LS}}(x, y, z, \vartheta, \varphi)$ den Teillichtstrom Φ_t und die Anzahl der Strahlen N in der jeweiligen Richtung, und somit im Prüfpunkt, bestimmt.

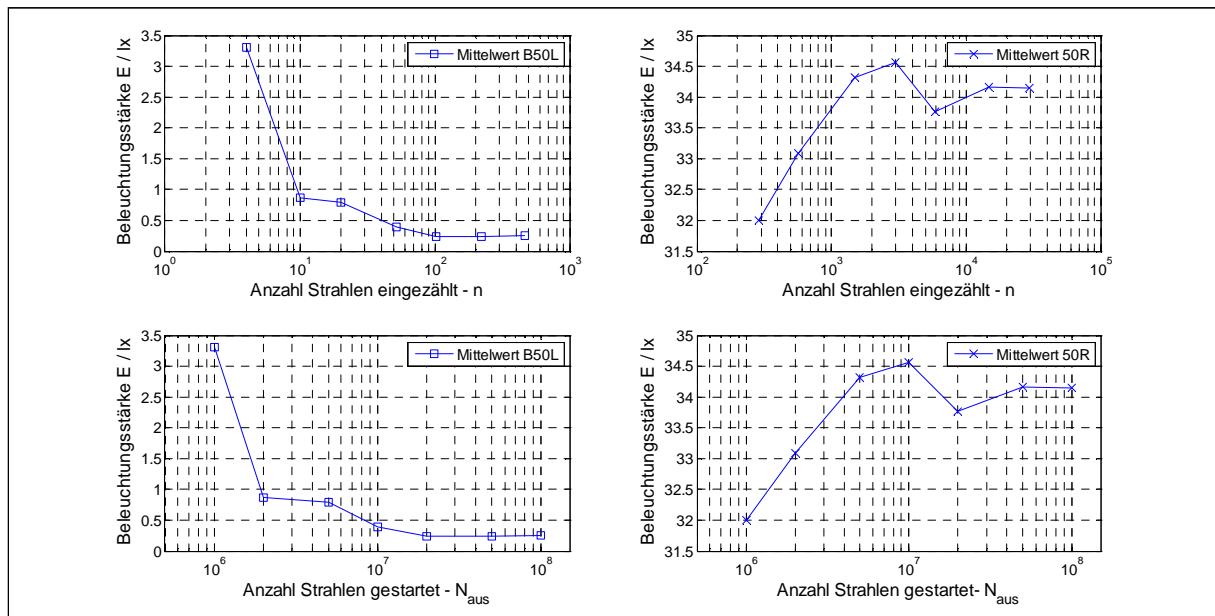


Abb. 8.6: Konvergenzverhalten für die interpolierten Prüfpunkte B50L und 50R

Zur Identifizierung solcher systematischen Anhängigkeiten wurde die prozentuale Abweichung der zwei Verteilungen $I_S(\alpha_H, \alpha_V)$ für $N_{\text{aus}} \approx 1 \cdot 10^6$ und $N_{\text{aus}} \approx 5 \cdot 10^6$ bestimmt, die in Abbildung 8.7 gezeigt wird. Das scheinbar zufällig verteilte Rauschen der Werte D mit einer Zunahme hin zu abnehmenden Werten $I_S(\alpha_H, \alpha_V)$ zeigt kein erkennbares Muster und damit keine Abhängigkeiten von den in Abbildung 8.6 dargestellten Konvergenzen.

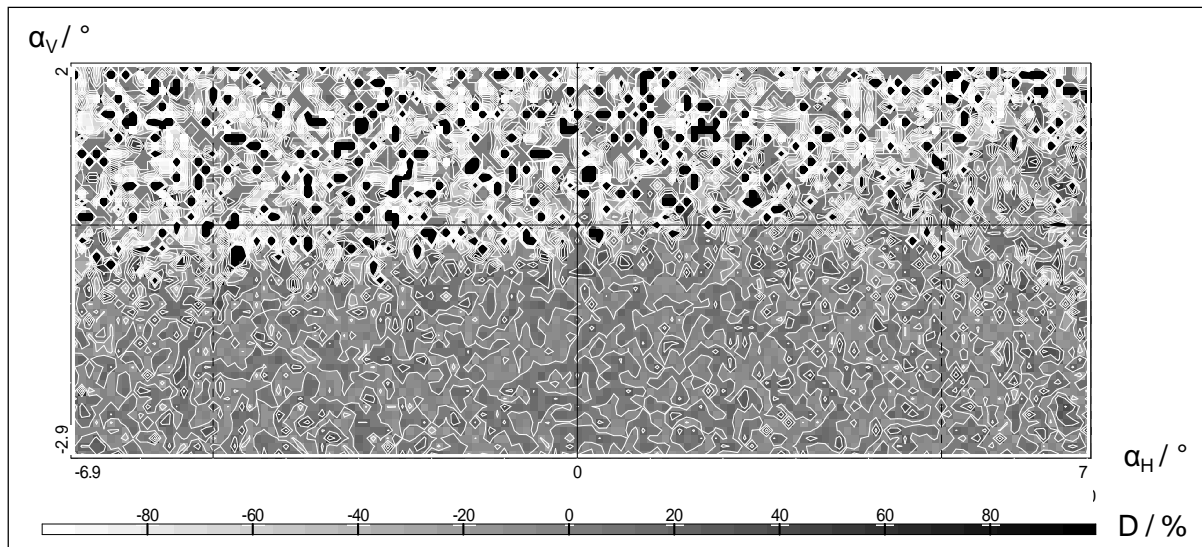


Abb. 8.7: Verteilung der Deviation D aus zwei Verteilungen der Lichtstärken I , berechnet mit unterschiedlichen Anzahlen gestarteter Strahlen N

Es kann festgestellt werden, dass die Abweichungen und die statistisch ermittelten Unsicherheiten mit abnehmenden Strahlzahlen zunehmen. Das entspricht dem Verhalten einer mittels Monte-Carlo-Integration geschätzten Werteverteilung. In Abbildung 8.8 sind die Werte $W(I_S)$ der Prüfpunkte 75L, HV, B50L und 50R über n doppelt logarithmisch abgetragen. Diese Prüfpunkte unterscheiden sich durch die Anwendung der Interpolation und durch ihre Werte.

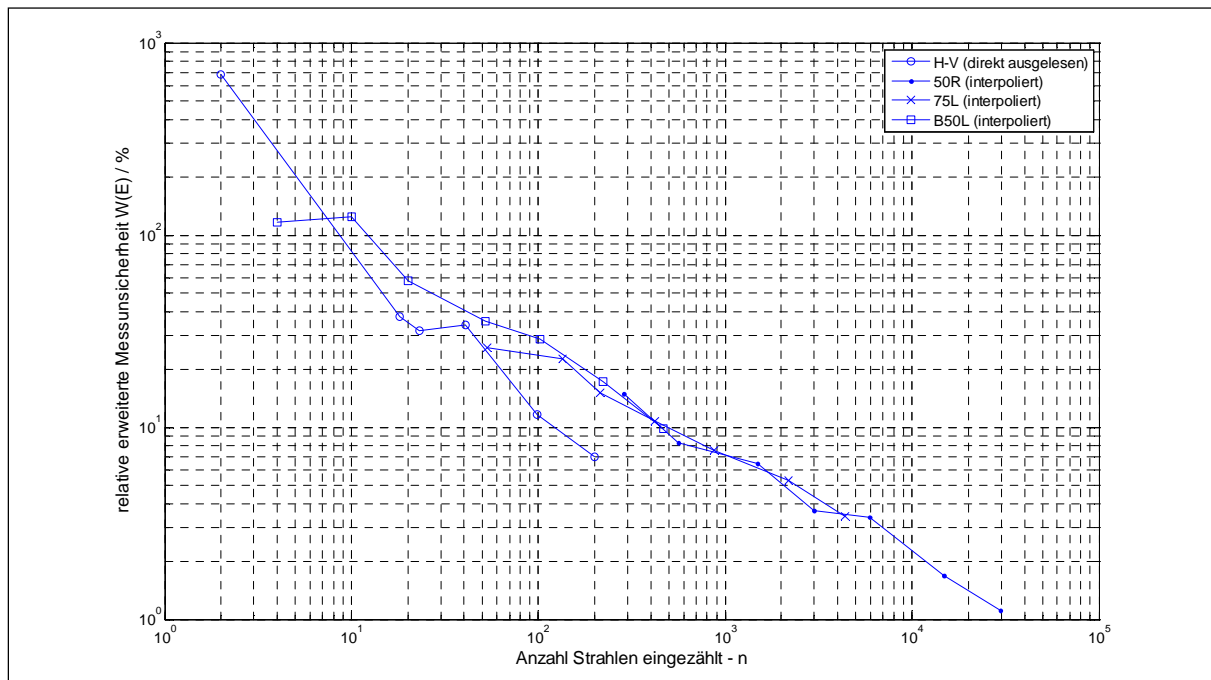


Abb. 8.8: Messunsicherheit der Prüfpunkte $W(E_S)$ über Strahlzahl n

Es kann beobachtet werden, dass alle bilinear interpolierten Werte einen höheren Unsicherheitsbeitrag aufweisen, als die direkt ermittelten Werte. Letztere erreichen eine

relative erweiterte Messunsicherheit von $W(I_S) \approx 10\%$ bei $n = 100$, während die interpolierten Werte diesen Unsicherheitsbeitrag erst bei $n \approx 500$ erreichen.

Abweichungen durch Softwareprodukte

Die verwendeten $N_{aus} = 1 \cdot 10^8$ Strahlen sind somit hinreichend, um die Genauigkeiten für den eingangs definierten Vergleich der drei Simulationsprogramme zu erreichen. Die im Gegensatz zu den Programmen ASAP und Lucidshape nötige Tessellierung der CAD-Geometrie bei SPEOS ist unter den in Anhang I.2 aufgeführten Einstellungen erfolgt. Die Abweichung durch diesen Einfluss, die bei einer zu groben Diskretisierung erheblich ist, kann eliminiert werden. Dazu wird die Verfeinerung der Tessellierung so lange betrieben, bis sich die resultierende Lichtverteilung nicht mehr ändert. Die Verteilungen der prozentualen Abweichungen D der jeweiligen Lichtverteilungen relativ zum Programm ASAP, sind in den Abbildungen 8.9 oben (Lucidshape zu ASAP) und unten (SPEOS zu ASAP) dargestellt.

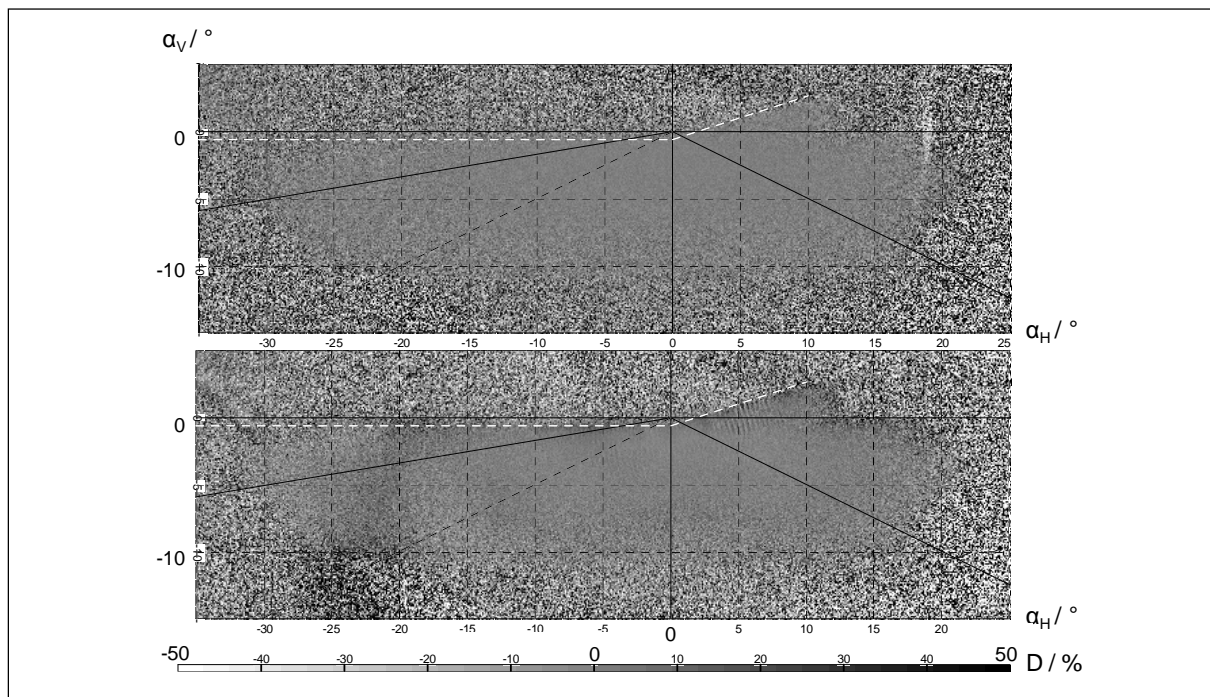


Abb. 8.9: Abweichungen durch die Programme: Lucidshape verglichen mit ASAP (oben) und Speos verglichen mit ASAP (unten) für die Komponentenpaarung Lichtquelle/Reflektor

Es zeigt sich, dass die Programme in den hohen Wertebereichen der primären Lichtfunktion keine systematischen Abweichungen haben. Dies ist anhand der Winkelbereiche mit geringem Rauschen sowie im Vergleich mit Abbildung 8.11 erkennbar. In den niedrigen Wertebereichen treten im Vergleich der Programme zufällige Abweichungen sowie vereinzelte, in ihrer Herkunft unbekannt, Artefakte auf. In [Kie09a] werden vom Autor mögliche Einflussfaktoren für grobe Fehler und Abweichungen durch die CAD-Konvertierung diskutiert. Die Werte wichtiger Prüfpunkte der ECE R112 sowie deren gemäß

der oben beschriebenen Analyse ermittelten Unsicherheitsbeiträge sind in Abbildung 8.10 dargestellt.

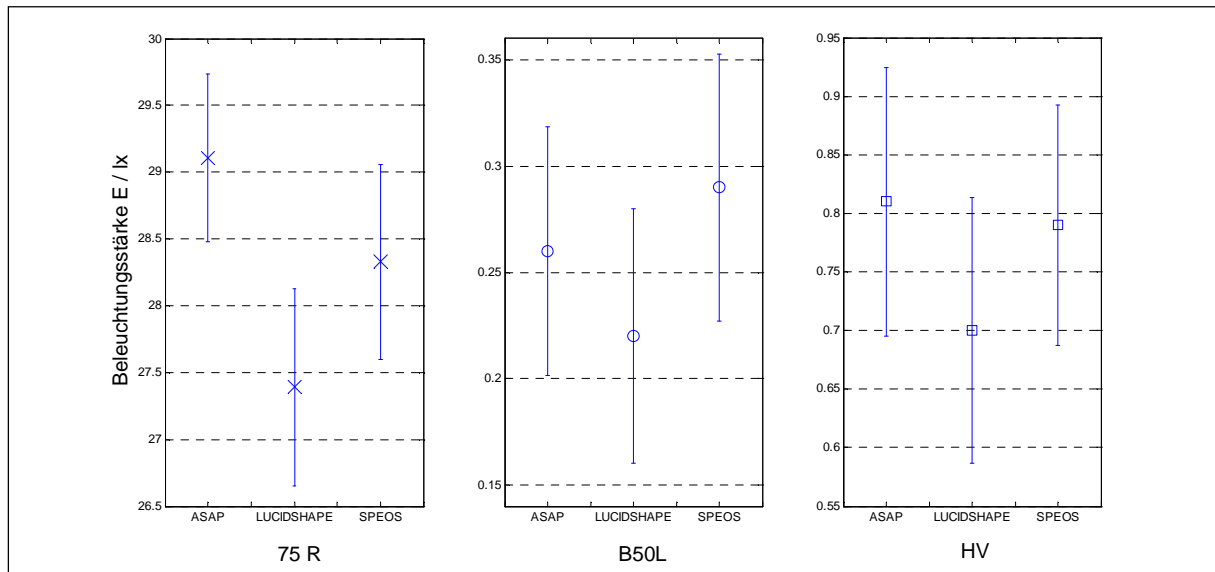


Abb. 8.10: Werte und Unsicherheitsbeiträge von drei Prüfpunkten aus drei Programmen

Die Abweichungen der Prüfpunkte sind gemäß der vorangegangenen Analyse gering und in Abhängigkeit von der Anzahl der egezählten Strahlen n signifikant. Mit der verwendeten Anzahl ausgehender Strahlen $N_{aus} = 1 \cdot 10^8$ ist somit keine deutliche Abweichung der Programme erkennbar. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Abweichungen durch die verwendete Software in dieser Untersuchung vernachlässigt werden kann.

Fazit der Unsicherheitsanalyse

Hinsichtlich der Analyse der Messunsicherheiten kann zusammengefasst werden, dass deutliche systematische Abweichungen in der Simulation durch das verwendete Lichtquellenmodell sowie durch die Repräsentation und Konvertierung der CAD-Geometrie auftraten. Die Abweichungen der CAD-Geometrie sind durch sorgfältige Datenkonvertierung hinreichend verkleinert worden. Die Abweichungen des Lichtquellenmodells konnten durch die Anwendung desselben Modells in allen Simulationen verringert werden. Durch diese Standardisierung wurde die Vergleichbarkeit der Simulationen untereinander wesentlich erhöht. Diese Möglichkeit ist in der messungsbasierten Methode prinzipiell nicht gegeben.

Weiterhin wurde gezeigt, dass sich die zufälligen Abweichungen hauptsächlich durch die Anzahl der egezählten Strahlen n ergeben, die wiederum von der Anzahl der gesendeten Strahlen N_{aus} und von der inhomogenen Lichtverteilung $I_S(\alpha_H, \alpha_V)$ abhängig ist. Das Konvergenzverhalten ist der Wurzelfunktion $\sim 1/\sqrt{n}$ ähnlich. Die Werte $I_S(\alpha_H, \alpha_V)$, die aus bilinearer Interpolation gewonnen wurden, zeigen bei gleicher Strahlenszahl n höhere Unsicherheitsbeiträge $W(I_S(\alpha_H, \alpha_V))$ als die Werte aus direkter Ermittlung. Weitere Untersuchungen hierzu erscheinen sinnvoll. Durch die Abhängigkeit der Unsicherheit von n ist eine Vorgabe von N_{aus} in der Simulation ungünstig. Eine Orientierung an maßgeblichen

Raumwinkelementen beziehungsweise Prüfpunkten sowie eine Strahlgenerierung und Strahlberechnung bis zum Erreichen einer definierten Höchstunsicherheit $W_{\max}(I_S(\alpha_H, \alpha_V))$ ist besser geeignet.

Abschließend sind in der Abbildung 8.11 oben die Verteilung der Werte $I_S(\alpha_H, \alpha_V)$ sowie unten die der zugehörigen Unsicherheiten $W(I_S(\alpha_H, \alpha_V))$ dargestellt. Im Vergleich mit der Verteilung der Werte der Messung $I_M(\alpha_H, \alpha_V)$ (vgl. Abbildung 5.11) ergeben sich Unterschiede in den Bereichen niedriger Werte. Die Verteilungen der Unsicherheitswerte $W(I_S(\alpha_H, \alpha_V))$ weisen hingegen eine sehr unterschiedliche Charakteristik auf. Die Verteilung der Unsicherheitsbeiträge der Simulation wird durch die Werte $I_S(\alpha_H, \alpha_V)$ bestimmt, womit sich eine umgekehrt proportionale Verteilung ergibt. Die Unsicherheitsbeiträge der Messung $W(I_M(\alpha_H, \alpha_V))$ sind überwiegend in den Bereichen großer Gradienten der Verteilung $I_M(\alpha_H, \alpha_V)$ hoch (vgl. Abbildung 5.7).

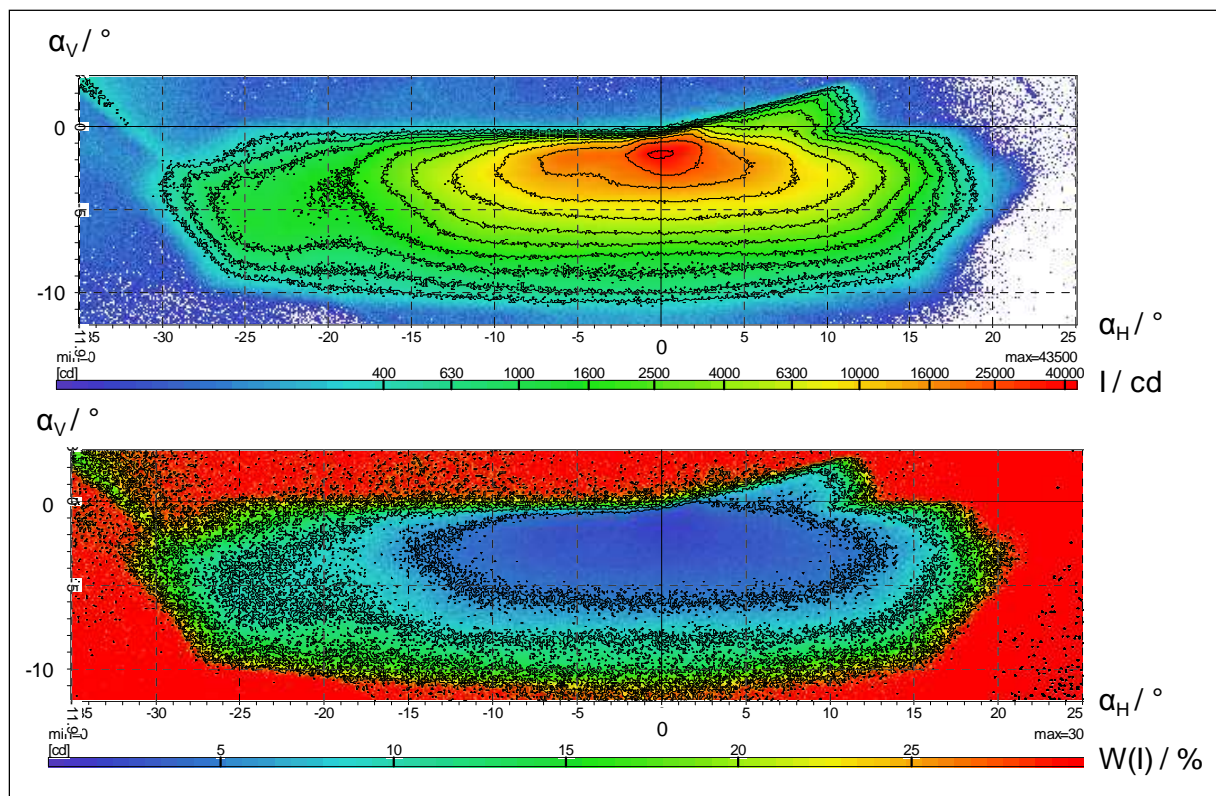


Abb. 8.11: Werte und Unsicherheitsbeiträge der Simulation des Fallbeispiels

8.5 Vergleich nach Bewertungsmethoden

Nach der Analyse der Messung, der Beschreibung des Aufbaus der Simulation und der Betrachtung der Unsicherheiten kann der Vergleich der Werte und Unsicherheiten des Untersuchungsgegenstandes erfolgen. Dabei wird die Auswertung hinsichtlich der virtuellen Typprüfung sowie der wahrnehmungsbasierten Bewertung vorgenommen. Die in Abschnitt 3.2 und Anhang B beschriebenen Kriterien und Berechnungsmethoden der wahrnehmungsbasierten Bewertung werden auf die gemessenen und simulierten Lichtverteilungen des Untersuchungsgegenstandes angewandt, wie für die virtuelle

Typprüfung oben beschrieben. Die Berechnung wurde in dem kommerziellen Programm LucidLite 1.8.1 der Firma Brandenburg durchgeführt, das 2009 die Funktionsumfänge des vom Autor in [Kie08] vorgestellten Matlab-basierenden Programms übernommen hat. Die Vergleichbarkeit der Methoden und der Ergebnisse ist zudem durch das Technische Komitee TC4-45 der CIE [Cie10] sichergestellt worden. Es wurden weiterhin das Konvergenzverhalten und die Unsicherheitsbeiträge mittels der oben beschriebenen statistischen Auswertung ermittelt. Die prozesstypische Anwendung der wahrnehmungsbasierten Bewertung, basierend auf dem Vergleich des zu entwickelnden Scheinwerfers mit einem Referenzscheinwerfer, wird in [Kie08] und [Kie09] vorgestellt.

Die Ergebnisse der Untersuchung des Konvergenzverhaltens der Mittelwerte $\bar{X}_{WB,S}$ zeigen überwiegend eine Ähnlichkeit zu den Ergebnissen der mittels Raytracing ermittelten Werte $E_S(\alpha_H, \alpha_V)$ der virtuellen Typprüfung. In Abbildung 8.12 sind die Werte normiert über die Strahlzahl N_{aus} dargestellt. Ein stabiles Verhalten scheint sich zwischen $1 \cdot 10^7 \leq N_{aus} \leq 2 \cdot 10^7$ einzustellen. Eine Ausnahme bilden die Werte des Kriteriums Blendung, deren Konvergenz aufgrund der reziproken Ergebnisberechnung gegenläufig ist. Es zeigt sich zudem, dass sich die Abweichungen vom Grenzwert bei gleichen N_{aus} stark unterscheiden. Die größten Abweichungen zeigen die Werte des Kriteriums Homogenität, das auf Berechnung von Gradienten basiert.

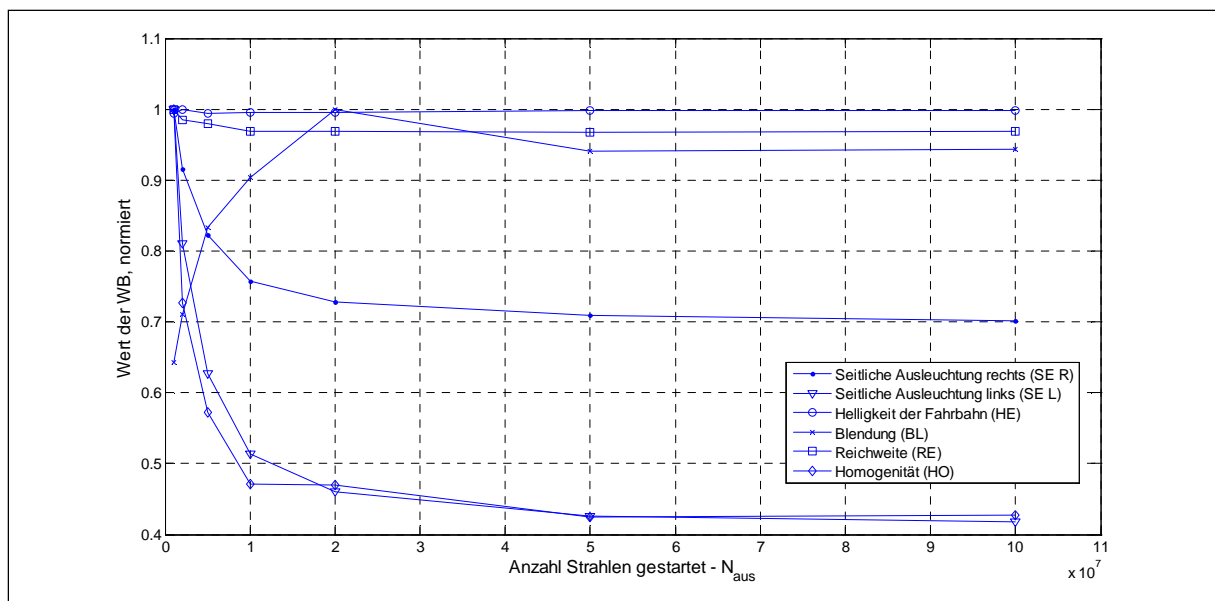


Abb. 8.12: Konvergenz der normierten Werte der wahrnehmungsbasierten Bewertung über Strahlzahl N_{aus}

Die Auswertung der Werte $\bar{X}_{WB,S}$ und deren Unsicherheitsbeiträge $U(\bar{X}_{WB,S})$ sich extrem verhaltender Kriterien sind in den Abbildungen 8.13 oben und unten über N_{aus} dargestellt. Es zeigt sich ein Verhalten, das dem der direkt ermittelten Werte der virtuellen Typprüfung ähnlich ist. Die Wertebereiche der Unsicherheitsbeiträge sind vergleichsweise gering. Die verwendeten Strahlen $N_{aus} = N_{LS} = 1 \cdot 10^8$ sind hinreichend.

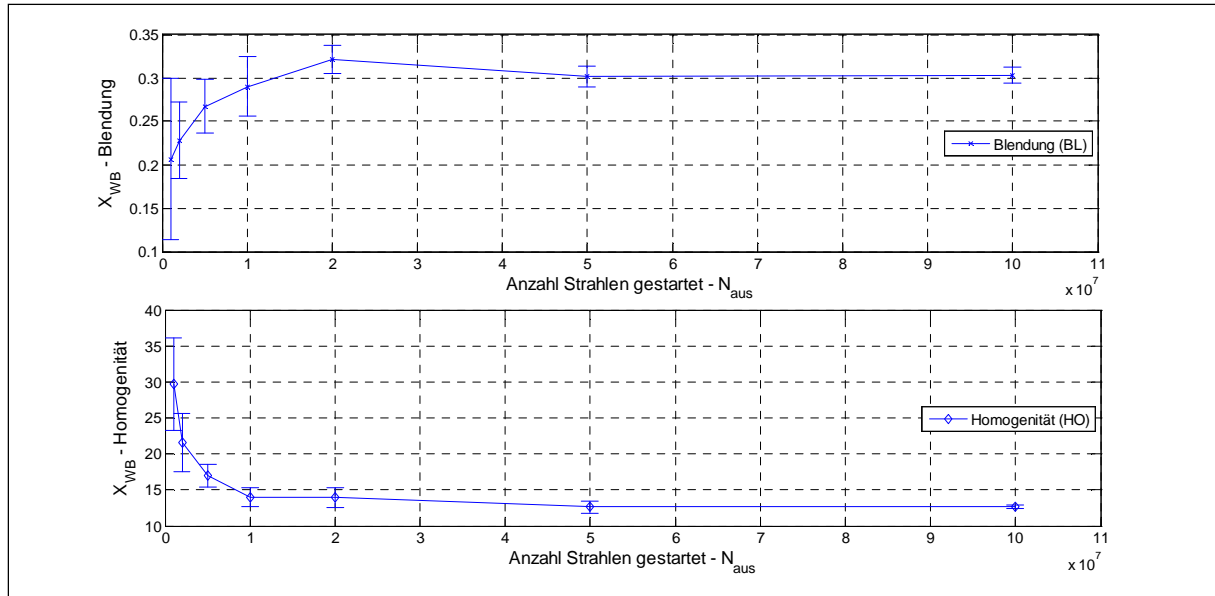


Abb. 8.13: Werte und Unsicherheitsbeiträge der Kriterien Homogenität und Blending über Strahlenzahl N_{aus}

Somit können abschließend die Abweichungen der Simulation und Messung des Untersuchungsgegenstandes einschließlich der Unsicherheiten dargestellt werden. Für die messungsbasierten Unsicherheitsbeiträge werden dabei die Abweichungen des Scheinwerfers aus der Wiederholmessung $W(K_{SW})$ ohne die Beiträge des Messgerätes und ohne den messgeräteabhängigen Beitrag der Wiederholmessung $W(K_{WDH})$ verwendet (vgl. Abschnitt 4.2). Damit ist die Vergleichbarkeit zu den Unsicherheitsbeiträgen der wahrnehmungsbasierten Bewertung eingehalten, da für die Abweichungen der Bewertungsmethoden keine vollständige Messunsicherheitsanalyse vorliegt (vgl. Abschnitt 3.3). Für einen nur auf die virtuelle Typprüfung bezogenen Vergleich der messungsbasierten Verteilungen müssen die beiden Unsicherheitsbeiträge in das Unsicherheitsbudget einbezogen werden. Bei der simulierten Verteilung ist der Beitrag der Software ausgeschlossen worden. Es werden die Komponentenpaarungen Lichtquelle/Reflektor und der vollständige Scheinwerfer untersucht, wobei nur der vollständige Scheinwerfer im Entwicklungsprozess beziehungsweise in der Typprüfung relevant ist.

Wie vom Autor in [Kie07a] beschrieben, ist neben der Ausrichtung der Hell-Dunkel-Grenze von gemessenen Lichtverteilungen auch die Ausrichtung simulierter Lichtverteilungen sinnvoll. Das Vorgehen der lichttechnischen Auslegung im CAL mittels der Positionierung der projizierten Zylinderlichtquellen unterhalb der HDG unterscheidet sich prinzipiell von der Bestimmung des Gradienten mittels visueller Bewertung. Anhand der in Anhang I.3 dargestellten HDG-Schnitte der nicht ausgerichteten und ausgerichteten simulierten Lichtverteilungen kann die Notwendigkeit der Ausrichtung im Falle dieses Untersuchungsbeispiels nachvollzogen werden. Die Ausrichtung der simulierten Verteilungen wurde somit wie in Kapitel 5 beschrieben vorgenommen. Bei ausgerichteter gemessener Lichtverteilung $I_M(\alpha_H, \alpha_V)$ und simulierter Lichtverteilung $I_S(\alpha_H, \alpha_V)$ ergibt sich für die Komponentenpaarung Lichtquelle/Reflektor die in Abbildung 8.14 vollständig und in Abbildung 8.15 ausschnittsweise dargestellte prozentuale Abweichung D .

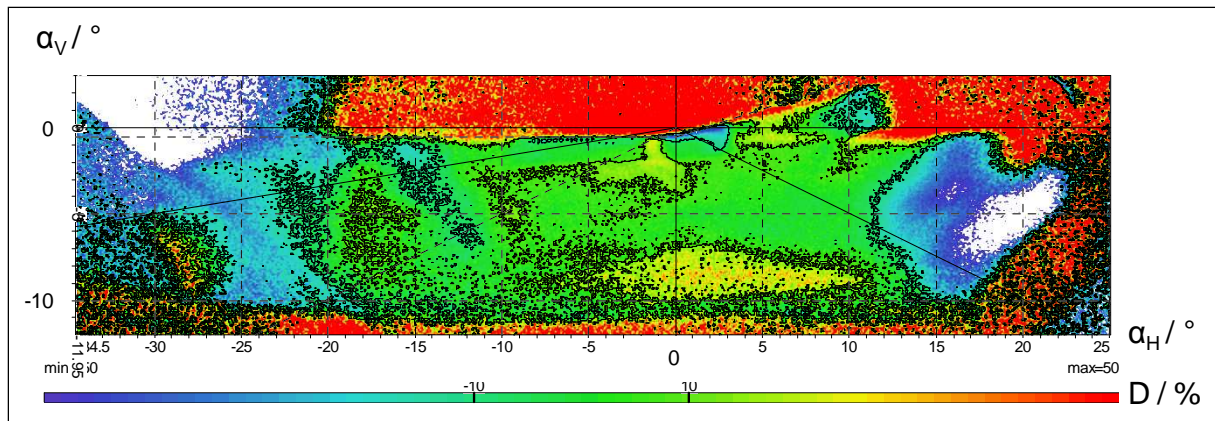


Abb. 8.14: Prozentuale Abweichung der gemessenen und der simulierten Lichtverteilung von der Komponentenpaarung Lichtquelle/Reflektor

Die Abbildung 8.14 zeigt große Abweichungen in der peripheren Lichtfunktion seitlich und oberhalb der HDG. Diese Abweichungen liegen vorrangig in Bereichen niedriger Werte. Im Bereich der primären Lichtfunktion, markiert durch die Darstellung der Straßenbegrenzung, zeigt sich eine gute Übereinstimmung.

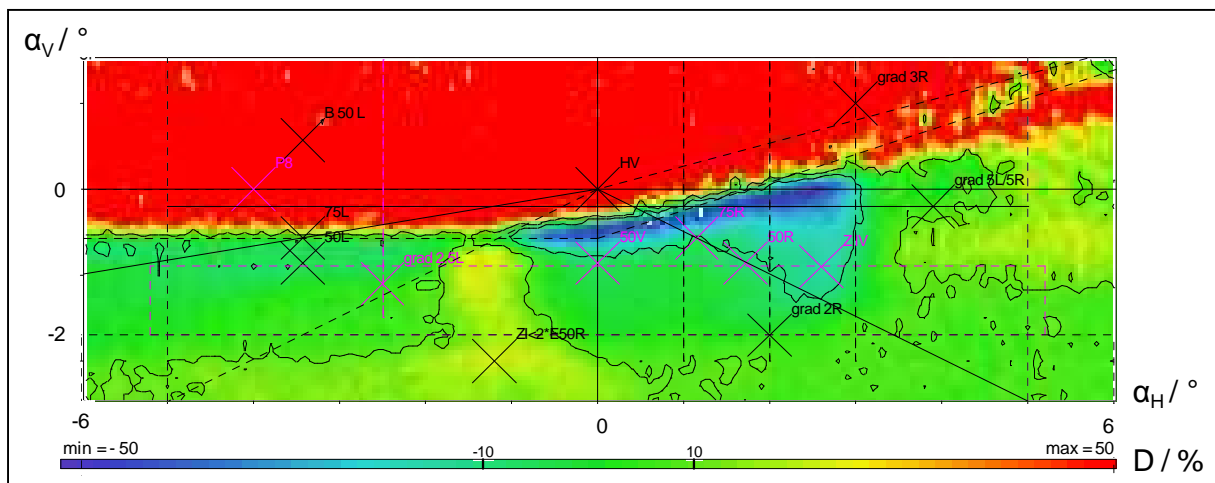


Abb. 8.15: Prozentuale Abweichung der gemessenen und der simulierten Lichtverteilung von der Komponentenpaarung Lichtquelle/Reflektor – Ausschnitt VT-Bereich

In Abbildung 8.15 wird der für die Prüfpunkte der ECE R112 relevante Ausschnitt dargestellt. Es zeigt die größeren Abweichungen am Bereich der Schulter detailliert. Werden für diese Komponentenpaarung die Prüfpunkte der virtuelle Typprüfung (VT) nach ECE R112 sowie die Berechnungen der wahrnehmungsbasierten Bewertung (WB) inklusive der Unsicherheitsbeiträge ausgeführt, so ergeben sich die in Tabelle 8.2 dargestellten Werte.

Tabelle 8.2: Vergleich der Werte von VT und WB für die Komponentenpaarung Lichtquelle/Reflektor

	Messung		Simulation			* signifikant
	E / lx	W(E) / %	E / lx	W(E) / %	D / %	
Werte der Prüfpunkte der ECE R112						
B50L	0,42	3,124	0,21	18,386	100,746	*
HV	0,76	5,583	0,39	16,903	95,224	*
75L	3,20	16,369	3,18	4,499	0,721	
50L	10,73	5,873	11,32	1,766	-5,188	
25R	11,49	6,239	10,96	3,721	4,791	*
25L	12,41	4,914	13,41	2,967	-7,456	
75R	18,19	4,936	19,87	1,234	-8,435	*
50V	28,24	3,406	30,45	1,871	-7,252	*
50R	33,44	5,620	35,75	1,370	-6,469	
Werte der wahrnehmungsbasierten Bewertung						
Blendung BL	0,55	2,979	0,27	3,759	103,241	*
Helligkeit der Fahrbahn HE	1,67	1,754	1,60	0,072	4,940	*
Seitl. Ausleuchtung SE_L	5,31	2,273	5,60	1,298	-5,223	*
Seitl. Ausleuchtung SE_R	8,40	1,524	8,40	0,371	-0,060	
Homogenität HO	18,88	1,114	17,97	5,873	5,023	
Reichweite RE	68,77	1,521	72,04	0,282	-4,538	*

Die Werte der Tabelle 8.2 zeigen im Besonderen, dass die Deviationen der VT für die Prüfpunkte oberhalb der HDG, den B50L und HV im Streulichtbereich, vergleichsweise groß sind. Typische Abweichungen der übrigen Prüfpunkte liegen in Bereichen $D < 10\%$. Die Abweichungen von vier Prüfpunkten sind nicht signifikant. Die Unsicherheitsbeiträge der simulierten Lichtverteilung sind im Winkelbereich der primären Lichtfunktion geringer als die der gemessenen Lichtverteilung. Dagegen sind die Unsicherheitsbeiträge der Prüfpunkte B50L und HV groß.

Die Deviationen der wahrnehmungsbasierten Bewertung WB fallen im Vergleich zur VT geringer aus. Auch die Unsicherheitsbeiträge sind für die gemessenen und besonders für die simulierten Verteilungen geringer. Vergleicht man die Prüfpunkte 75R und HV mit der Reichweite RE, so fallen die geringeren Abweichungen und Unsicherheiten der WB besonders ins Gewicht. Die Abweichung des Prüfpunktes B50L im Vergleich mit Blendung BL bleibt groß, bei deutlich geringerem Unsicherheitsbeitrag der WB in der Simulation.

Anhand dieser Komponentenpaarung wird die grundsätzlich hinreichend geringe Abweichung zwischen Messung und Simulation bei hinreichender Datenqualität demonstriert.

Im Fall des vollständigen Scheinwerfers wird die Notwendigkeit zur Ausrichtung der simulierten Lichtverteilung ebenfalls deutlich und anhand der Schnittdarstellungen der Lichtstärkeverteilung in Anhang I.3 gezeigt. Bei ausgerichteter gemessener und simulierter Lichtstärkeverteilung ergeben sich die in Abbildung 8.16 vollständig und in Abbildung 8.17 ausschnittsweise dargestellten Deviationen.

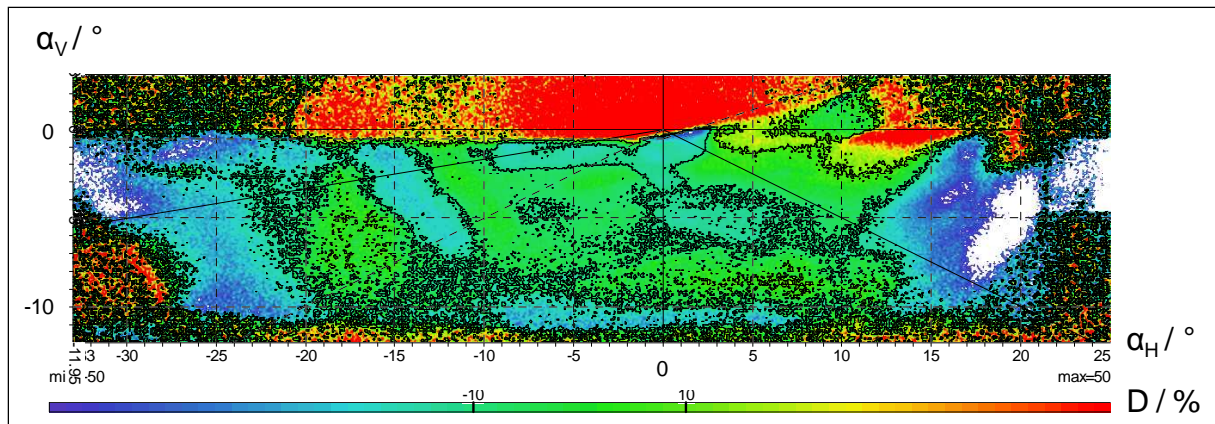


Abb. 8.16: Prozentuale Abweichung der gemessenen und simulierten Lichtverteilung des vollständigen Scheinwerfers

Im Vergleich zur Abweichung der Komponentenpaarung Lichtquelle/Reflektor in Abbildung 8.14 zeigen sich die gleichen Charakteristiken bei größeren Werten der Abweichung D . In Abbildung 8.17 wird die entsprechend schlechte Übereinstimmung im Bereich der Hell-Dunkel-Grenze dargestellt.

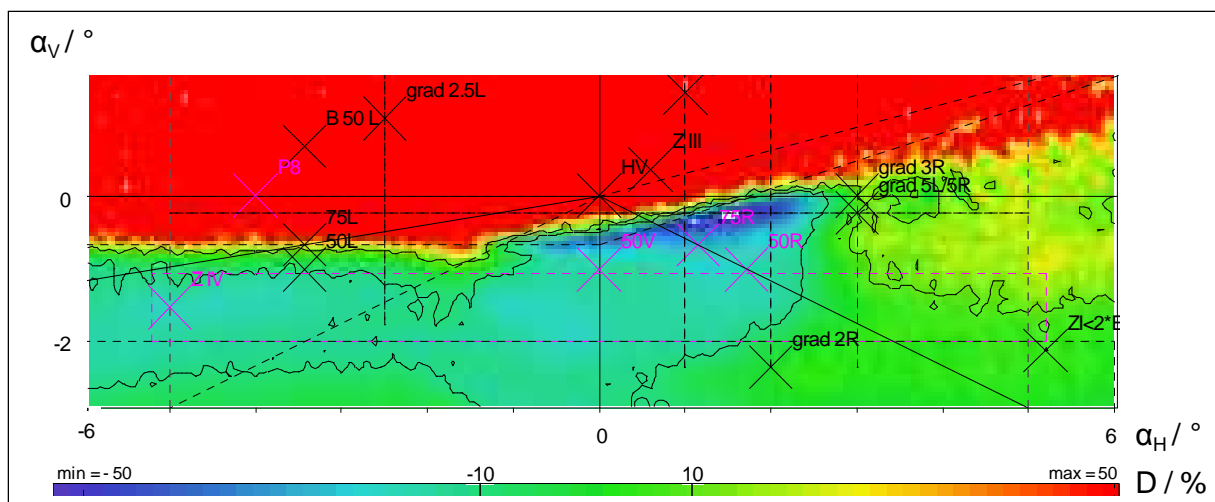


Abb. 8.17: Prozentuale Abweichung der gemessenen und simulierten Lichtverteilung des vollständigen Scheinwerfers – Ausschnitt VT-Bereich

Somit haben die weiter unten in Tabelle 8.3 aufgeführten Werte eine größere Abweichung zwischen Messung und Simulation.

Wesentliche Ursachen werden in zwei Einflussfaktoren vermutet. Die Außenlichtscheiben von Scheinwerfern enthalten inhomogene Materialstärken $s(z) = s(z, x, y)$ zur Optimierung der Homogenität der Lichtverteilung. Die Auslegung dieser optischen Funktion erfolgt spät im Entwicklungsprozess durch den Zulieferer. Teilweise wird die Optimierung anhand von Prototypen vorgenommen und im Werkzeug optimiert. Diese Änderungen werden dann nicht in den dieser Untersuchung zugrunde liegenden CAD-Datenstand des Fahrzeugherstellers zurückgeführt. Weiterhin wurde in diesem Fallbeispiel von einer Modellierung der Transmissionsverluste der Außenlichtscheibe abgesehen, um in der vorangegangenen Untersuchung die Vergleichbarkeit der Programme sicherzustellen. Dies kann zu

Abweichungen von Brechungswinkel ε und Absorption α und damit des Wertes $I(\alpha_H, \alpha_V)$ führen (vgl. Abschnitt 7.2).

Im Vergleich zu den Werten der VT der vorherigen Komponentenpaarung zeigt sich, dass die Unsicherheitsbeiträge der gemessenen Lichtverteilung aufgrund der zusätzlich einwirkenden Komponenten steigen, während die Beiwerte der simulierten Lichtverteilung ähnlich bleiben, mit den Ausnahmen der Prüfpunkte 75R der Messung und B50L der Simulation. Diese beiden Prüfpunkte verhalten sich in Messung und Simulation typischerweise gegenläufig abweichend. Außerdem sind die typischen großen Unsicherheitsbeiträge des Prüfpunktes HV und B50L in der Simulation zu erwähnen. Das Überschreiten der Maximalwerte dieser beiden Prüfpunkte in der Messung liegt jeweils in der Toleranz, die Scheinwerfern aus laufender Produktion eingeräumt wird (vgl. ECE R112, Abschnitt 1.2 [Ece08]).

Tabelle 8.3: Vergleich der Werte von VT und WB des vollständigen Scheinwerfers

	Messung		Simulation		D / %	* signifikant
	E / lx	W(E) / %	E / lx	W(E) / %		
<i>Werte der Prüfpunkte der ECE R112</i>						
B50L	0,42	3,272	0,19	9,816	121,878	*
HV	0,72	3,995	0,39	18,043	84,615	*
75L	2,11	18,933	1,67	3,435	26,347	
50L	7,48	7,972	8,05	2,171	-7,081	
25R	9,70	7,934	9,04	3,924	7,301	
25L	8,64	5,298	10,35	2,383	-16,522	*
75R	12,99	10,547	17,92	1,388	-27,511	*
50V	21,81	7,877	26,04	1,645	-16,244	*
50R	23,66	9,390	28,39	1,115	-16,661	*
<i>Werte der wahrnehmungsbasierten Bewertung</i>						
Blendung BL	0,54	2,757	0,28	3,073	92,857	*
Helligkeit der Fahrbahn HE	1,27	6,746	1,42	0,083	-10,970	*
Seitl. Ausleuchtung SE_L	3,92	4,256	4,44	0,554	-11,712	*
Seitl. Ausleuchtung SE_R	8,00	1,714	7,88	0,238	1,523	
Homogenität HE	19,36	1,562	18,24	1,698	6,123	*
Reichweite RE	65,59	2,250	68,53	0,192	-4,296	*

Weiterhin bestätigen sich die Ergebnisse hinsichtlich der wahrnehmungsbasierten Bewertung WB, weswegen folgende Erkenntnisse als systematisch angenommen werden können:

Es sind große Abweichungen beim Kriterium Blendung zu erwarten, die neben der Strahlenarmut auf die in Kapitel 6 beschriebenen Abweichungen der Lichtquellenmodellierung zurückzuführen sind. Die Unsicherheitsbeiträge der WB durch das Kriterium Blendung sind dabei deutlich geringer als die Beiträge des Prüfpunktes B50L der VT. Die Abweichungen des Kriteriums Homogenität sind gering, obwohl Einflüsse durch Rauschen der Simulation und die Außenlichtscheibe zu erwarten sind. Die WB durch das Kriterium Reichweite weist ebenfalls geringere Abweichungen auf als der zugeordnete Prüfpunkt 75R der VT.

Generell sind also die Abweichungen und Unsicherheitsbeiträge der wahrnehmungsbasierten Bewertung geringer als die der virtuellen Typprüfung. Das zeigt eine gute Eignung für den Einsatz im Entwicklungsprozess.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Anwendung der Lichtsimulation zur Bewertung von Scheinwerfern im Entwicklungsprozess des Automobilherstellers untersucht.

Zunächst wurde der Untersuchungsgegenstand auf den Kfz-Scheinwerfer und dessen Abblendlichtfunktion eingegrenzt und näher beschrieben. Dabei wurde die Lichtverteilung nach den Anforderungen der ECE sowie eine typische Lichttechnik mit H7-Lichtquelle und Reflexionssystem ausgewählt.

Die Analyse des Entwicklungsprozesses ergab für die Lichtsimulation und das Computer Aided Lighting eine Einordnung in die frühe Phase zwischen der Erstellung des Designs und der CAD-Konstruktion. Daraus wurden zwei potentielle Einsatzgebiete abgeleitet, in denen die Simulation vorhandene Prozesse ersetzen bzw. optimieren kann: die virtuelle Typprüfung und die wahrnehmungsbasierte Bewertung.

Die zur Freigabe eines Scheinwerfers nötige Typprüfung stellt definierte, quantitative Anforderungen an das lichttechnische Gerät. Damit bestimmt die zugrunde liegende lichttechnische Messung die mindestens notwendige Genauigkeit einer simulationsbasierten Abbildung. Diese Abbildung der Messung durch die Simulation wurde in der Arbeit als virtuelle Typprüfung bezeichnet. Eine Bewertung des Scheinwerfers durch die simulationsbasierte Methode ermöglicht eine frühzeitige Absicherung in einer Konstruktionsphase, in der noch eine hohe Flexibilität gegeben ist, und vermeidet den Bau teurer Prototypen.

Als zweites Einsatzgebiet für die Lichtsimulation wurde die wahrnehmungsbasierte Bewertung identifiziert, die spät im Entwicklungsprozess anhand von Prototypen und Serienbauteilen erfolgt und bei der erweiterte Anforderungen an die Qualität der Abblendlichtverteilungen gestellt werden. Dies ist nötig, da die Bewertung durch die Typprüfung allein zu keiner optimalen Lichtverteilung führt. Zur Abbildung der wahrnehmungsbasierten Bewertung wurden geeignete Kriterien eingeführt und erläutert sowie die zu den Kriterien bekannten Berechnungsmethoden ausgewählt und hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit in die Lichtsimulation bewertet. Die Abweichungen wurden diskutiert und die Prozesseignung der wahrnehmungsbasierten Bewertung sowie der Softwaremethode dargestellt. Die Prozessintegration erfolgte im Rahmen der Arbeit unter der Bezeichnung „Volkswagen Benchmarksystem“ und ermöglicht die frühzeitige Auslegung von Scheinwerfern nach wahrnehmungsbezogenen Kriterien.

Zur Bewertung der Homogenität von Streulichtverteilungen wurde eine Methode entwickelt, die einzelne Streulichtcharakteristiken automatisch und richtungsunabhängig erkennen, klassifizieren und nach ihren lichttechnischen Eigenschaften auswerten kann. Die hohe Anzahl der Freiheitsgrade der Bewertungsmethode ließ aber nicht die im Benchmarksystem nötige Zusammenfassung auf einen einzelnen Wert zu.

Anschließend wurden die Methoden zum Vergleich von gemessenen mit simulierten Lichtverteilungen eingeführt und Filtermethoden evaluiert.

Für den Vergleich ist die Betrachtung der Abweichungen und Unsicherheiten nötig. Dazu wurde exemplarisch eine Analyse der Messunsicherheiten eines Messverfahrens der Typprüfung durchgeführt, wobei die Einflussfaktoren identifiziert und quantifiziert sowie einfache Modelle für die Messgeräte und Messobjekte gebildet wurden. Das Unsicherheitsbudget wurde erstellt und die größten Unsicherheitsbeiträge und Empfindlichkeiten aufgezeigt: die Kalibrierung der Lampe und die Einprägung des elektrischen Stroms. Anhand der Messunsicherheitsanalyse kann die Genauigkeit der Messung verbessert werden.

Für die visuelle und damit bislang nicht in die Simulation übertragbare Ausrichtung der Hell-Dunkel-Grenze wurde eine Methode entwickelt, die sowohl auf gemessene als auch auf simulierte Lichtverteilungen anwendbar ist. Die neue Methode wird mit der visuellen Ausrichtung und der messungsbasierten Methode verglichen. Im Gegensatz zu diesen beiden Vorgehensweisen ermöglicht die neu entwickelte Methode eine eindeutige und reproduzierbare Ausrichtung, die nicht den individuellen Abweichungen der Messlabore der Zulieferer, Hersteller oder Testhäuser unterworfen ist. Beim untersuchten Scheinwerfer zeigte die Methode geringere Abweichungen als die messungsbasierte und die visuelle Ausrichtung und erwies sich somit als stabiler sowie prozesstauglich.

Mittels der statistischen Analyse der Lichtverteilungen mehrerer Exemplare eines Scheinwerfers und deren Ausrichtung mit der bereitgestellten Methode wurde die Bildung von Mittelwert und Unsicherheit als Maßstab für die Qualität der Simulation möglich.

Die Methoden zur Modellierung der Lichtquelle und der Materialien wurden anschließend eingeführt und näher untersucht. Dafür wurde eine Übersicht und Bewertung der Lichtquellenarten und der Methoden der Lichtquellenmodellierung gegeben. Die zur Modellierung nötigen Messmethoden wurden aufgezeigt und die Grenzen der Genauigkeit dargestellt. Für die Modellierung von Streulicht zeigten sich deutliche Einschränkungen. Anhand des Lichtquellentyps H7 wurden die Abweichungen der Lichtquellenderivate eines Produktes der gleichen Zulassungsklasse diskutiert. Im Besonderen wurden die Abhängigkeiten der Leuchtdichte und der leuchtenden Fläche sowie deren Einfluss auf die lichttechnische Funktion im Scheinwerfer gezeigt und in Messung und Simulation nachgewiesen. Abschließend wurde eine Übersicht der allgemeinen, prozessgeeigneten Modellierungsmethoden gegeben.

Diese Vorgehensweise wurde auch für die Materialien der Scheinwerfer verwendet. Zunächst wurde eine Einteilung der Materialien nach ihren lichttechnischen Eigenschaften und deren Modellierung vorgenommen und die Genauigkeiten der Modellierungsmethoden bewertet. Anschließend wurden die Streulichteigenschaften von Narbungen erodierter und geätzter Oberflächen analysiert, wobei die Einflussfaktoren der Narbungsherstellung auf die Streulichteigenschaften untersucht wurden. Eine Mess- und Modellierungsmethode zur Streulichtmessung wurde dargestellt und evaluiert. Dabei konnte gezeigt werden, dass bei gleicher Narbungsklasse die mittels erodierter Werkzeuge hergestellte Struktur eine höhere

Streuung aufweist als die mittels geätzter Werkzeuge erstellte Struktur. Zudem zeigten die verwendeten Kunststoffe unterschiedliche Abformgenauigkeiten und damit voneinander abweichende Lichtstreuung auf.

Um den Aufwand der messtechnischen Erfassung der jeweiligen Narbungen zu minimieren, wurde ein einfaches Modell der zweidimensionalen Streulichteigenschaften aufgestellt. Ein Modell auf Basis einer Gauß-Verteilung beschreibt dabei die Streulichteigenschaften, während ein lineares Modell die Koeffizienten der Gauß-Verteilung auf Basis der vergleichsweise einfach zu messenden Rauheit der Narbungen bestimmt.

Nach der Bereitstellung der Modellierungs- und Simulationsgrundlagen wurde ein Vergleich zwischen der Messung und der Simulation des Scheinwerfers durchgeführt. Dabei wurde die Analyse der Abweichungen der Simulation in Anlehnung an die Methoden des Messverfahrens dargestellt. Es wurden drei Simulationsprogramme miteinander verglichen und dabei gezeigt, dass deren systematische Abweichungen weitgehend eliminiert werden können. Anschließend wurde das Konvergenzverhalten des berechneten Wertes in Abhängigkeit von der Strahlenanzahl bestimmt, welche zudem die Unsicherheit des Wertes bestimmt. Der Unsicherheitswert interpolierter Werte erwies sich dabei als erhöht. Generell ähnelte die Genauigkeit der virtuellen Typprüfung mittels Lichtsimulation der Genauigkeit der messungsbasierten Typprüfung. Hingegen zeigte die Verteilung der Unsicherheiten der Simulation durch ihre Abhängigkeit von der Strahlenanzahl bzw. von den lichttechnischen Werten charakteristische Unterschiede zur gradientenabhängigen Unsicherheit der Messung.

Die Analyse der Berechnungsmethoden der wahrnehmungsbasierten Bewertung, angewendet auf die simulierten Verteilungen, ergab ein ähnliches Konvergenzverhalten bei niedrigeren Unsicherheiten im Vergleich zu den Werten der virtuellen Typprüfung.

Beim abschließenden Vergleich der Werte der gemessenen und der simulierten ausgerichteten Abblendlichtverteilungen zeigte sich, dass eine gute Übereinstimmung im Bereich der primären Lichtfunktion mit $D \leq 10\%$ erreicht werden kann. Im Bereich des Streulichtes sind hingegen große Abweichungen zu erwarten, wovon das Kriterium Blendung bzw. der entsprechende Prüfpunkt B50L betroffen sind. Die Ursache wurde in einer unzureichenden Lichtquellenmodellierung vermutet.

Die Abweichungen und Unsicherheiten der wahrnehmungsbasierten Bewertung erwiesen sich als geringer als die der virtuellen Typprüfung. Damit wurde die wahrnehmungsbasierte Bewertung als besonders stabil und geeignet für den Entwicklungsprozess evaluiert.

Die Methode der Lichtsimulation ist somit zur Entwicklung und Bewertung von Scheinwerfern geeignet. Sie ermöglicht eine frühzeitige Absicherung der lichttechnischen Funktion hinsichtlich der Anforderungen einer photometrischen Typprüfung und der wahrnehmungsbasierten Bewertung durch einen Fahrer. Die Grenzen der Anwendbarkeit werden im folgenden Kapitel diskutiert.

Diskussion und Ausblick

Die Ergebnisse in dieser Arbeit sind jeweils im Zusammenhang mit dem konkreten Untersuchungsgegenstand entstanden. Dies soll abschließend im Hinblick auf nachfolgende Untersuchungen und Entwicklungen diskutiert werden.

Zu Beginn der Arbeit erfolgte die Einordnung der Lichtsimulation in den Entwicklungsprozess eines Automobilherstellers anhand des Volkswagen Konzerns. Die einzelnen Marken des Volkswagen Konzerns zeigen ähnliche Entwicklungsprozesse und Umgebungen und unterliegen den gleichen gesetzlichen Anforderungen wie die anderer Automobilhersteller. Damit ist die eingeführte Anwendung der virtuellen Typprüfung grundsätzlich übertragbar. Dies gilt auch für die wahrnehmungsbasierte Bewertung, wobei diese Methode eine Anpassung an den jeweiligen Entwicklungsprozess des Anwenders durch die Verwendung eines individuellen Benchmarks zulässt. Die grundlegenden Kriterien und Bewertungsmethoden bleiben dabei gleich. Hierin liegt das große Potential der wahrnehmungsbasierten Bewertung, denn Begrifflichkeiten, berechnete Werte und das Verständnis der Kriterien sind vergleichbar. Deswegen liegt es nahe, dieser Methode den Vorzug zu geben und eine möglichst breite Anwendung anzustreben.

Derzeit werden weitere Bewertungsmethoden und neue Kriterien in dem aus Herstellern und Zulieferern bestehenden Technischen Komitee TC 4-45 der CIE entwickelt, beispielsweise für das Fernlicht, für Signalfunktionen oder für dynamische Lichtfunktionen, wie sie das AFS oder das ADB benötigen. Die in der Arbeit ebenfalls beschriebene Streulichtbewertung und die Waveletfilterung müssen für eine Prozesstauglichkeit noch evaluiert, in ihren Freiheitsgraden beschränkt und auf eine universelle Anwendbarkeit abgestimmt werden. Weiterhin ist die Entwicklung von Bewertungsmethoden, die auf Leuchtdichteverteilungen basieren, aufgrund ihres Bezugs zur Helligkeits- und Kontrastwahrnehmung erstrebenswert und Gegenstand derzeitiger Arbeiten.

Die in dieser Arbeit vorgenommene Unsicherheitsanalyse der Photometrie der Typprüfung ist übertragbar auf Labore, die diese Messmethode anwenden, wobei die jeweiligen Umgebungen und Einflussgrößen untersucht und in das Unsicherheitsbudget eingebracht werden müssen.

Die neu entwickelte Methode der softwarebasierten Ausrichtung der Hell-Dunkel-Grenze erwies sich als universell einsetzbar. Wie bei der wahrnehmungsbasierten Bewertung ist auch hier eine weite Verbreitung erstrebenswert. Erst dann können Werte einer virtuellen Typprüfung und einer wahrnehmungsbasierten Bewertung anhand von Lichtverteilungen tatsächlich verglichen werden. Derzeitige Einschränkungen und somit Potentiale für weitere Entwicklungen ergeben sich aus der nicht vorgesehenen Verarbeitung doppelter Hell-Dunkel-Grenzen oder Farbsäume. Beide Effekte sind trotz gesetzlicher Einschränkungen vorhanden und erschweren die Ausrichtung in der Praxis.

Die in der Arbeit anschließend eingeführte Lichtquellenmodellierung sollte für eine breite Anwendung der Lichtsimulation um weitere Lichtquellentypen und Derivate erweitert werden. Eine Entwicklungsrichtung könnte die Optimierung CAD-basierter Modelle sein. Damit können beliebige Strahlmengen erzeugt, die Abweichungen messungsbasierter Modelle vermieden und eine ideale Wendelposition für die Auslegung des lichttechnischen Systems verwendet werden. Eine Verbesserung der Modellierung des Streulichtverhaltens würde dabei die Genauigkeit der Lichtsimulation erhöhen und die virtuelle Typprüfung auch für die periphere Lichtfunktion anwendbar machen. Weiterhin könnten die Fertigungstoleranzen der Positionen und Formen der Wendel in parametrische Lichtquellenmodelle eingebracht werden, um im CAL die Auslegung der Systeme robuster zu machen. Um die zu Beginn der Arbeit eingeführte Absicherung der Temperaturanforderungen mittels CFD-Simulation sinnvoll mit der Lichtsimulation zu verbinden, sollten Lichtquellenmodelle auch die Temperaturen bei kritischen Fahrzeugspannungen enthalten. Dann könnten die Ergebnisse der CFD-Berechnung und der CAL-Berechnung im Scheinwerfer auf die zugrunde liegenden Lichtquellen-Derivate zurückgeführt werden.

Die Weiterentwicklung der Modelle für Materialien und Oberflächen sollte im Sinne ihrer Nutzbarkeit sowohl für die Lichtsimulation als auch für die CFD-Simulation erfolgen. Die Modelle für Reflexion oder Transmission könnten auf den Infrarotbereich erweitert und somit für die Berechnung von Bauteil-Temperaturen, z.B. der Gehäuse oder der Lichtscheiben, angewendet werden, was im Entwicklungsprozess genauso wichtig ist wie die lichttechnische Berechnung. Die Berechnung der Strahlungswärme erfolgt im CFD oftmals mittels Raytracing und kann daher direkt mit der Lichtsimulation verbunden werden. Im Verlauf der Untersuchungen der Materialeigenschaften wurde zudem festgestellt, dass für die Messung, die Modellierung und die softwareseitige Interpretation der BRDF Standards nötig sind.

Im abschließenden Teil der Arbeit wurde gezeigt, dass die Abweichungen zwischen einer Lichtsimulation und der entsprechenden Messung bei der anspruchsvollen Abblendlichtfunktion weniger als 10 % betragen können. Dies betrifft Bereiche der primären Lichtfunktion. In Bereichen der peripheren Lichtfunktion, in der das fehlerhaft simulierte Streulicht maßgeblich ist, betragen die Abweichungen dagegen teilweise mehr als 100 %. Die Unsicherheiten der Messung des Serienscheinwerfers sind vergleichbar mit denen der Lichtsimulation, wenn bei dieser hinreichend viele Strahlen simuliert werden.

Im Hinblick auf eine virtuelle Typprüfung bedeutet dies, dass die Lichtsimulation in der primären Lichtfunktion hinreichend genau die Werte einer Messung des Serienscheinwerfers abbilden kann. Es ist jedoch Gegenstand der realen Typprüfung die Qualität eines neuen Scheinwerfers zu prüfen, bei dem sich die Abweichungen eines neuen lichttechnischen Gerätes und einer neuen Fertigung bemerkbar machen können, wie beispielsweise große Montagetoleranzen, thermisch instabile Materialien oder fehlerhaft beschichtete Oberflächen. Diese Einflüsse kann eine Lichtsimulation nicht abbilden, da sie in den CAD-Daten nicht repräsentiert werden, was die Gültigkeit einer virtuellen Typprüfung begrenzt. Es kann angenommen werden, dass die Aussagefähigkeit einer wahrnehmungsbasierten Bewertung höher ist, da man von stabilen Serienfertigungsprozessen ausgehen kann – auch weil diese durch die reale Typprüfung sichergestellt werden.

In späteren Arbeiten sollten die Abweichungen eines Scheinwerfers, die durch seine Fertigung entstehen, weiter untersucht und in der Simulation berücksichtigt werden. Damit könnten kritische Bauteile optimiert und ihre Funktion in der realen Typprüfung und im Feld zuverlässiger vorhergesagt werden. Ein weiterer Untersuchungsgegenstand besteht in der Abweichung der Funktion über die Lebensdauer. Alterung, Verschmutzung oder schädigende Witterungseinflüsse könnten in die Simulation Eingang finden und eine erweiterte Absicherung in der Entwicklung ermöglichen.

Um die genannten Einflüsse in der Lichtsimulation berücksichtigen zu können und deren Unsicherheit zu verringern, sollte eine anwendungsorientierte Optimierung der Raytracing-Methode stattfinden. Es sollte eine orts- und richtungsadaptive Simulation entwickelt werden, die pro Raumwinkel- oder Flächenelement ein Raytracing bis zum Erreichen einer vorgegebenen Unsicherheit durchführt. Ansätze für diese Vorgehensweise sind bereits vorhanden.

Neben dem Scheinwerfer sind auch die Leuchten am Kraftfahrzeug ein Gegenstand der lichttechnischen Entwicklung. Deren Funktion wird bewertet, indem anstelle der Lichtstärke eher die wahrnehmungsbezogen sinnvolle Leuchtdichte betrachtet wird. Diese lichttechnische Größe ist sowohl anspruchsvoll zu messen als auch zu simulieren. Weitere Beschleunigungen des Raytracing sowie Vereinheitlichungen der Sensoren in Messung und Simulation sind nötig, um auch bei den Leuchten die Vorgehensweise der wahrnehmungsbasierten Bewertung einsetzen zu können. Dazu müssten zusätzliche Kriterien wie Homogenität, Sichtbarkeit oder Erkennbarkeit der Signatur entwickelt werden. Eine gesetzliche Bewertung der Signalfunktionen mittels Leuchtdichte ist erstrebenswert.

Die gezeigten Potentiale für Weiterentwicklungen der Lichtsimulation können bei ihrer Umsetzung zu einer stärkeren Integration der Simulation im Kfz-Entwicklungsprozess führen. Ihr Einsatz bringt die in der Arbeit bereits genannten Vorteile und führt, einfach gesagt, schneller zu besseren Scheinwerfern.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schema des Aufbaus der Arbeit.....	4
2.1	Einteilung der Kfz-Exterieurbeleuchtung.....	6
2.2	Optisches Prinzip eines Projektionssystems und eines Reflexionssystems.....	7
2.3	Abblendscheinwerfer des VW Polo A04, Schnitt- und Gesamtabbildung.....	8
2.4	Anforderungen und Teilfunktionen des Scheinwerfers.....	9
2.5	Entwicklungsphasen der Scheinwerferentwicklung.....	10
2.6	Vereinfachter Entwicklungsprozess für Scheinwerfer und Leuchten	13
2.7	Scheinwerfertechnologien und Gestaltungen.....	15
2.8	Technologien der Leuchten und Gestaltungen.....	16
2.9	Schema der direkten Rückkopplung von Anforderungen der Erprobung.....	19
2.10	Vereinfachter Entwicklungsprozess mit Integration des CAL beim Automobilhersteller.....	19
3.1	Gesetzlich zulassungsfähige Abblendlichtverteilung und gute Lichtverteilung.....	20
3.2	Bereich der Gültigkeit der ECE-Regelungen.....	21
3.3	Prüfpunkte, Maße und Zonen der ECE- Regelung R112.....	22
3.4	Abblendlichtverteilung aus Sicht des Fahrers und Schema der Bewertungskriterien.....	24
3.5	Leuchtdichteverteilung und Sehzeichen in Messung und Berechnung.....	26
3.6	Felder und Gradientenrichtung zur Bewertung der Homogenität.....	28
3.7	Bewertung von Streulicht im präparierten Lichttunnel.....	30
3.8	Unterscheidung von Messwerten mit Hilfe der erweiterten Unsicherheiten	31
3.9	Software zur Darstellung und Bewertung von Inhomogenitäten des Streulichts.....	35
3.10	Unterschiedliche Möglichkeiten zur Projektion der Lichtstärkewerte an die Tunnelwände.....	36

3.11	Schema der Bildverarbeitung zur Streulichtbewertung.....	36
3.12	Segmentierte Streulichtcharakteristiken in Beleuchtungsstärkeverteilung.....	37
3.13	Schema der Waveletfilterung.....	39
3.14	Nicht geglättete und mittels Wavelet und Mittelwertfilter geglättete Lichtstärkeverteilung.....	40
3.15	Verlauf der G-Werte einer nicht geglätteten und einer mittels Wavelet geglätteten LVK.....	41
4.1	Schema des Vergleichs gemessener und simulierte Werte.....	43
4.2	Bestandteile eines Goniophotometers zur Scheinwerfermessung.....	44
4.3	Bestanteile der Messung zur photometrischen Typprüfung.....	44
4.4	Schema der Scheinwerferfunktion und Messung.....	45
4.5	Verhalten des Lichtstroms abhängig vom elektrischen Strom der H7, SLL-A	47
4.6	Verteilung der Unsicherheiten der Wiederholmessung.....	52
5.1	Beschreibung der Hell-Dunkel-Grenze nach ECE R112.....	55
5.2	Exemplarischer Verlauf der Soll-HDG W und der maximalen G-Werte	59
5.3	Verlauf der maximalen G-Werte ohne und mit geglätteten Werten der LVK	60
5.4	Arbeitsablauf der Software.....	60
5.5	Verlauf und Schärfe der HDG eines untersuchten Scheinwerfers.....	63
5.6	Abweichungen der Lichtverteilung durch die Lichtscheibe.....	63
5.7	Verteilung der Messunsicherheiten aus der visuellen Ausrichtung	64
5.8	Ausschnitt der Verteilung der Messunsicherheiten aus der visuellen Ausrichtung.	65
5.9	Verteilung der Messunsicherheiten aus der messungsbasierten Ausrichtung	65
5.10	Verteilung der Messunsicherheiten aus der softwarebasierten Ausrichtung	66
5.11	Verteilung der Mittelwerte der Lichtstärken von 10 Scheinwerfern.....	66
5.12	Deviation der Unsicherheiten der Prüfpunkte nach Komponentenpaarung.....	67
6.1	Wendelbilder der Lichtquelle und Lichtverteilung.....	69
6.2	Typen der Kfz-Lichtquellen.....	70

6.3	Glühlampe H7 mit Bestandteilen und Bezugsmaßen der ECE R37.....	72
6.4	Schema der Nahfeld-Goniophotometrie und Lichtquellenmodellierung.....	74
6.5	Evaluation der Modellierung mittels Vergleich der Lichtstärkeverteilungen.....	75
6.6	Maße der H7 und der Toleranzbox der Wendel in mm aus der ECE R37.....	78
6.7	Kamerabasierte Messung der Geometrie der H7.....	79
6.8	Fläche der H7-Derivate der Hersteller A und B.....	79
6.9	Leuchtdichteverteilung der Wendel.....	80
6.10	Leuchtdichte der H7-Derivate der Hersteller A und B.....	81
6.11	Maximale Lichtstärke der Lichtverteilung und Leuchtdichte der Wendel jeweils aus Messung und Simulation, Komponentenpaarung Lichtquelle/Reflektor.....	83
6.12	Schärfe der HDG der Lichtverteilung und Fläche der Wendel jeweils aus Messung und Simulation, Komponentenpaarung Lichtquelle/Reflektor.....	84
6.13	Leuchtdichteverteilung einer H7 mit 12-bit und 20-bit Datentiefe.....	85
6.14	Leuchtdichteverteilung der H7 aus Simulation und Messung.....	86
6.15	Drei typische Formen der Lichtquellenmodellierung anhand der H7.....	88
6.16	Klassifizierung und Detaillierung der Modellierungsmethoden.....	88
7.1	Scheinwerferbauteile mit Funktion, Material und Oberfläche.....	93
7.2	Ideale optische Eigenschaften von Oberflächen und Materialien.....	94
7.3	Validierung der Modelle für Transmission am Beispiel PMMA.....	98
7.4	Oberflächen zur diffusen Reflexion und Transmission in einem Scheinwerfer.....	99
7.5	Photos der Narbungen: 1: K36, erodiertes Werkzeug; 2: K36, geätztes Werkzeug ; 3: K48, erodiertes Werkzeug ; 4: K48, geätztes Werkzeug.....	100
7.6	Narbungselement (schematisch) abgeformt durch ein Werkzeug mit erodierter (links) und geätzter (rechts) Struktur.....	101
7.7	Rauheit R_a erodierter und geätzter Narbungen der Klassen K28 bis K35 in drei Materialien sowie der VDI 3400.....	102
7.8	Rauheitsprofil und Amplitudendichte.....	103
7.9	Gonioreflektometer und Koordinaten der BRDF.....	104

7.10	Werte und Unsicherheitsbeiträge der BRDF Messung; Probe K35; geätzt.....	106
7.11	Einfluss der Fertigungsmethode auf die Streulichtcharakteristik.....	107
7.12	Oben: Messung und Modellierung mittels Gauß-Verteilung; Narbung K35; geätzt; APEC 1695; - unten: relative Abweichung.....	108
7.13	Lineare Regression der Koeffizienten c_i und der Rauheit R_q der Narbungen.....	109
8.1	Berechnung des Forward-Raytracing im Scheinwerfer.....	113
8.2	Wertermittlung in Messung und Simulation.....	116
8.3	Arbeitsschritte der Lichtsimulation.....	117
8.4	Verteilungen der Standardabweichung aus Lichtverteilungen mit zwei unterschiedlichen Energierepräsentationen und ihre Deviation	119
8.5	Konvergenzverhalten und Unsicherheit für Prüfpunkt HV.....	124
8.6	Konvergenzverhalten für die interpolierten Prüfpunkte B50L und 50R.....	125
8.7	Verteilung der Deviation D aus zwei Verteilungen der Lichtstärken I , berechnet mit unterschiedlichen Anzahlen gestarteter Strahlen N	126
8.8	Messunsicherheit der Prüfpunkte $W(E_S)$ über Strahlenzahl n	126
8.9	Abweichungen durch die Programme.....	127
8.10	Werte und Unsicherheitsbeiträge von drei Prüfpunkten aus drei Programmen.....	128
8.11	Werte und Unsicherheitsbeiträge der Simulation des Fallbeispiels.....	129
8.12	Konvergenz der normierten Werte der wahrnehmungsbasierten Bewertung über Strahlenzahl N_{aus}	130
8.13	Werte und Unsicherheitsbeiträge der Kriterien Homogenität und Blendung über Strahlenzahl N_{aus}	131
8.14	Prozentuale Abweichung der gemessenen und der simulierten Lichtverteilung von der Komponentenpaarung Lichtquelle/Reflektor.....	132
8.15	Prozentuale Abweichung der gemessenen und der simulierten Lichtverteilung von der Komponentenpaarung Lichtquelle/Reflektor – Ausschnitt	132
8.16	Prozentuale Abweichung der gemessenen und simulierten Lichtverteilung des vollständigen Scheinwerfers.....	134
8.17	Prozentuale Abweichung der gemessenen und simulierten Lichtverteilung des vollständigen Scheinwerfers – Ausschnitt VT-Bereich.....	134

Tabellenverzeichnis

3.1	Einflussfaktoren auf die wahrnehmungsbasierte Bewertung.....	33
3.2	Informationen einer Streulichtbewertung.....	37
3.3	Vergleich der Glättungsmethoden.....	40
4.1	Unsicherheitsbudget einer Scheinwerfermessung am Goniophotometer.....	51
6.1	Untersuchte Derivate der H7.....	72
6.2	Abhängigkeiten der Leuchtdichten und Flächen der Wendeln der Derivate.....	82
6.3	Leuchtdichten und Flächen der Wendeln der Derivate.....	82
6.4	Bewertung der Modellierungsmethoden.....	90
7.2	Auszug aus der VDI 3400, Einteilung der Klassen nach Rauheitskennwert R_a	100
7.3	Koeffizienten und Bestimmtheitsmaß der linearen Regression der untersuchten Narbungen.....	109
8.1	Materialmodellierung am Fallbeispiel.....	121
8.2	Vergleich der Werte von VT und WB für die Komponentenpaarung Lichtquelle/Reflektor.....	133
8.3	Vergleich der Werte von VT und WB des vollständigen Scheinwerfers.....	135

Literaturverzeichnis

- [Ada09] ADAC: *Scheinwerfer-Test: Xenon ist besser*. In: ADAC Zeitschrift, Ausgabe 12, 2009, S-70-71.
- [API95] APIAN-BENNEWITZ, P.: *Messung und Modellierung von lichtstreuenden Materialien zur Computer-Simulation von Tageslichtbeleuchtung*. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg im Breisgau, 1995.
- [Ash93] ASHDOWN, I.: *Near-Field Photometry: A New Approach*. J.IES 22:1 (Winter), S. 163 -180, 1993.
- [Ash95] ASHDOWN, I.: *Near Field Photometry – measuring and Modeling Complex 3-D Light Sources*. In SIGGRAPH 95 Course Notes – Realistic Input for Realistic Images, S. 1-15, 1995.
- [Ash99] ASHDOWN, I.: *Comparing photometric distributions*. Technischer Bericht, Department of Computer Science, University of British Columbia, 1999.
- [Atz07] ATZ: *Hat die Glühlampe ausgedient*. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, Ausgabe 11/2007, S. 1026 – 1027, 2007.
- [Atz10] ATZ: *Der VW Touareg*. In: ATZ Extra - Automobiltechnische Zeitschrift, Ausgabe 03/2010, S. 51-52, 2010.
- [Aut08] AUTOSTRASSENVERKEHR: *Heller wird's – Xenon mit variabler Lichtverteilung*. In: AutoStraßenVerkehr, Ausgabe 26, 2008, S-36-40.
- [Autde] <http://www.al-lighting.de/index.php?id=999&lang=de#>, 26.06.2011.
- [Bad07] BADER, V.; FELDHAUS, U.: *CFD-Simulation sorgt für klare Sicht*. In: Sonderausgabe ATZ und MTZ Nr. 1, Seiten 82-86, 2007.
- [Bad07a] BADER, V.; KLEIMEYER, M.: *Usability of CFD for the development of tail and head lamps at Volkswagen*, EACC Symposium, 2007.
- [Bän02] BÄNI, W.: *Wavelets – Eine Einführung für Ingenieure*. ISBN 3-486-25427-8, Oldenbourg Verlag München Wien, 2002.
- [Bau00] BAUMGART, J.: *Die Messung der Mikrogeometrie von rauhen technischen Oberflächen mit Streulicht*. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2000.
- [Bayom] <http://plastics.bayer.com/plastics/emea/de/produkt/Produktinformationen.html>, 26.06.2011.
- [Ben07] BENSLER; LEEFKEN; BADER, V.; KLEIMEYER, M.: *Suppression of Condensate Formation in a Rear Lamp by Optimising Internal Flow using CFD*. VTMSC 8 Symposium, 2007.

- [Berde] <http://www.bertrandt.com/Licht/Sicht.html>, 26.06.2011.
- [Bla05] BLANKENHAGEN, B.: *Accurate Stray Light Simulations with the Bi-Directional Reflection Distribution Function*. In: ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2005.
- [BoHi92] BODSCHWINNA, H.; HILLMANN, W.: *Oberflächenmesstechnik mit Tastschnittgeräten in der industriellen Praxis*. 1.Aufl., Köln. Beuth 1992.
- [Bra96] BRANDENBURG, W.: *The replacement of parabolic reflectors by 'Free Form' reflectors*. SAE Symposium, 1996.
- [Braom] Brandenburg GmbH: *Lucidshape Simulationssoftware*, <http://www.lucidshape.com/pdf/docs/Tutorial.pdf>, 26.06.2011.
- [Bre00] BREault: *ASAP (Advanced Systems Analysis Program)*, Procedural Note - BRO-PN-1153(07/00), 2000.
- [Bre04] BREault: *Scattering*. Technical Guide, Breault Research Organization, Inc., Tucson, 2004.
- [Bre04a] BREault: *IGES Import*. Technical Guide, Breault Research Organization, Inc., Tucson, 2004.
- [Bre04b] BREault: *Radiometric Analysis*. Technical Guide, Breault Research Organization, Inc., Tucson, 2004.
- [Bre05] BREault: *ASAP (Advanced Systems Analysis Program)*, Procedural Note - BRO-PN-1409, 2005.
- [Breom] BREault: *ASAP (Advanced Systems Analysis Program)*, <http://www.breault.com/k-base.php>, 26.06.2011.
- [BrSh05] BREDEMEIER, K.; SCHMIDT, F.; JORDANOV, W.: *Ray Data of LEDs and Arc Lamps*. In: ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2005.
- [BrSh06] BREDEMEIER, K.; POSCHMANN, R.; SCHMIDT, F.: *Nahfeldgoniophotometer – Systeme zur Messung der Lichtverteilung an Leuchten, Lampen und LED*. In: Licht 2006 -Symposium, Bern, 2006.
- [Cie10] CIE, Technical Report 188:2010: *Performance Assessment Method for Vehicle Headlighting Systems*. ISBN 978 3 901906 84 8, 2010.
- [Cie87] CIE, Technical Report Nr. 70: *The Measurement of Absolute Luminance Intensity Distributions*, ISBN 978 3 900734 04 6, 1987.
- [Dam95] DAMASKY, J.: *Lichttechnische Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrzeug-Scheinwerfer*. Dissertation, TH Darmstadt, 1995.
- [Dasom] <http://www.3ds.com/de/products/catia/portfolio/catia-v5/>, 26.06.2011.

- [Deb86] DE BRABANDER, L.: *Description of a determination method of the cut-off in a low beam*. Private communication given during Brussels GRE meeting, 1986.
- [Devde] <http://www.delvis.de/Unternehmen.html>, 26.06.2011.
- [Die07] DIEM, C.: *LED Performance – Measure or Estimate?* . In: ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2007.
- [Dud05] DUDENHÖFFER, F.: *Product Trends and Customer Expectations in Tomorrow's Automotive Markets*. In: ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2005.
- [Ece05] ECE REGELUNG-R37: *UNIFORM PROVISIONS CONCERNING THE APPROVAL OF FILAMENT LAMPS FOR USE IN APPROVED LAMP UNITS ON POWER-DRIVEN VEHICLES AND OF THEIR TRAILERS*. United Nations Economic Commission for Europe, Rev.4, 2005.
- [Ece08] ECE REGELUNG-R112: *UNIFORM PROVISIONS CONCERNING THE APPROVAL OF MOTOR VEHICLE HEADLAMPS EMITTING AN ASYMMETRICAL PASSING BEAM OR A DRIVING BEAM OR BOTH AND EQUIPPED WITH FILAMENT LAMPS*. United Nations Economic Commission for Europe, Rev.2, 2008.
- [Ece09] ECE REGELUNG-R119: *UNIFORM PROVISIONS CONCERNING THE APPROVAL OF CORNERING LAMPS FOR POWER-DRIVEN VEHICLES*. United Nations Economic Commission for Europe, Rev.2, 2009.
- [Ece10] ECE REGELUNG-R87: *UNIFORM PROVISIONS CONCERNING THE APPROVAL OF DAYTIME RUNNING LAMPS FOR POWER-DRIVEN VEHICLES* . United Nations Economic Commission for Europe, Rev.2, 2010.
- [Ece09a] ECE REGELUNG-R123: *UNIFORM PROVISIONS CONCERNING THE APPROVAL OF ADAPTIVE FRONT-LIGHTING SYSTEMS (AFS) FOR MOTOR VEHICLES* . United Nations Economic Commission for Europe, Rev.2, 2009.
- [Ecerg] <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs.html>, 26.06.2011.
- [Eic04] EICHNER, S.; SCHELLER, G.; WESSELY, U.: *Wavelet-temporal basierte Rauschreduktion von Filmsequenzen*. In: 21. Jahrestagung der FK TG, Koblenz, 2004.
- [Eng01] ENGEHAUSEN, J.; KAO, O.; SCHULZ, D.: *Rauschunterdrückung in digitalen Bildern und Filmsequenzen*. Technischer Bericht, Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, 2001.
- [Escde] <http://www.eschmanntextures.de/index.php?id=165&L=6&L=6>, 26.06.2011.
- [Fluom] <http://www.fluke.com/fluke/dede/digitale-handmultimeter/fluke-187-189.htm?PID=56041>, 26.06.2011.
- [Fmvov] <http://www.gpoaccess.gov/>, Federal Register, Volume 72 (2007).
- [Gal07] GALL, D.: *Grundlagen der Lichttechnik – Kompendium*. Richard Pflaum Verlag

- [Gtb05] GmbH und Co. KG, München, 2. Auflage, 2007.
GTB Working Group Photometry: *Photometry Laboratory Accuracy Guidelines*, Technischer Bericht, GTB Working Group Photometry, 2005.
- [Gum95] International Organization for Standardization: *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. ISBN 92-67-10188-9, ISO, Genf, 1995.
- [Haa98] HAACK, U.: *Advanced lightsource model for simulation of optical devices*. Society of Automotive Engineers: SAE Technical Papers Series 980004, Warrendale, 1998, S. 19 – 22.
- [HaBr07] HAGEMANN, M.; BRINKMANN, M.; BONRAD, K.; VOGES, F.; RUTHS, T.; BLUHM, M.; MICHAELIS, D.; WÄCHTER, C.; KUDAEV, S.; SINZINGER, S.: *OLEDs for Automotive Lighting*. In: ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2007.
- [Här07] HÄRING, S.: *Simulation of light distribution and lit appearance – analysis via density estimation*. In: ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2007.
- [Här07a] HÄRING, S.: *Lichtsimulation: Stochastik und Dichteschätzung der 4D-Lichtfeldfunktion*, In: Lux-Junior-Symposium, Dörnfeld, 2007.
- [Hec02] HECHT, E.: *Optics (Fourth Edition)*. ISBN 0-8053-8566-5, Pearson Education, Inc. 2002.
- [Hof03] HOFFMANN, A.v.: *Lichttechnische Anforderungen an adaptive Kraftfahrzeugscheinwerfer für trockene und nasse Fahrbahnoberflächen*. Dissertation, TU Ilmenau, Der andere Verlag, 2003.
- [Hof04] HOFFMANN, A.v.: *Physikalische Modelle in der Lichtsimulation*, Licht2004-Symposium, Dortmund, 2004.
- [Hof05] HOFFMANN, A.v.; KIEL, H.; HÄRING, S.: *Carmakers Approach to Innovative Lighting Technologie, Simulation Methods & Surface Modelling*. In: ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2005.
- [Hof08] HOFFMANN, A.v.: *Technical strategies for the development of automotive rear lights*. In: IQPC-Symposium: Intelligent Transport Lighting, Frankfurt, 2008.
- [Hohde] http://www.hohenloher-formstruktur.de/pdf/HFS_techn_Beschr.pdf, 26.06.2011.
- [HoTo05] HONGSONG, L.; TORRANCE, K.E.: *An experimental study of the correlation between surface roughness and light scattering for rough metallic surfaces*. In: Proceedings of SPIE - Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Vol. 5878, Bellingham, Warrendale, 2005.
- [Huh96] HUHN, W.: *Bewertung von Scheinwerferlichtverteilungen in der Automobilindustrie*. In: 40 Jahre Lichttechnik Darmstadt, Seiten 183-186, 1996.

- [Ilede] <http://www.ilexa.de/page4d.htm>, 26.06.2011.
- [Iofde] http://www.iof.fraunhofer.de/departments/optical-systems/surface-characterisation/index_d.html, 26.06.2011.
- [Jeb08] JEBAS, C.; SCHELLINGER, S.; KLINGER, K.; MANZ, K.; KOOS, D.: *Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und Nutzfahrzeugen*, BASt-Bericht F 66, 2008.
- [JeLu02] JEFFREY, T.D.; LUNDBERG, J.L.: *Scattered Light Predictions for Aluminum Painted Reflectors in Automotive Tail Lamps*. Society of Automotive Engineers: SAE Technical Papers Series, Warrendale, 2002.
- [KaGa02] KAMINSKI, M.S.; GARCIA, K.J.; STEVENSON, M.A.; FRATE, M.; KOHEL, R.J.: *Advanced Topics in Source Modeling*. In: 2002 SPIE - Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers - Annual Conference, Warrendale, 2002.
- [Kie05] KIEL, H.: *Anwendungen der Lichtsimulation in der Scheinwerfer- und Leuchtenentwicklung*. In: LuxJunior - Symposium, Dörnfeld, 2005.
- [Kie07] KIEL, H.; MENSCH, D.: *Software Based Adjustment and Assessment of Light Distribution*. In: LuxJunior - Symposium, Dörnfeld, 2007.
- [Kie07a] Kiel H.: *Simulation and Measurement of Photometry in Headlamps and Tail Lamps: an analysis of selected aspects*. In: ISAL Symposium, Herbert Utz Verlag, Darmstadt, 2007.
- [Kie08] KIEL, H.; MENSCH, D.; VOGLER, S.; ZIEHL, C.: *Lichtsimulation bei Volkswagen: Methoden und Anwendungen*. Licht 2008-Symposium, Ilmenau, 2008.
- [Kie08a] KIEL, H.; STUDENY, C.: *Modellierung von Kunststoffeigenschaften in der virtuellen Absicherung von Scheinwerfer und Leuchtenentwicklungen*. SKZ Symposium, Würzburg, 2008.
- [Kie08b] KIEL, H.: *Innovative Lichttechnik bei Volkswagen*. Haus der Technik, Essen, 2008.
- [Kie09] KIEL, H.; MENSCH, D.; VOGLER, S.; KLEIMEYER, M.: *New Methods of Development Process of Automotive Lighting Systems*. In: ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2009.
- [Kie09a] KIEL, H.; MENSCH, D.; VOGLER, S.: *Anforderungen an Simulationssoftware zur Lichtsimulation im Kfz Entwicklungsprozess*. In: LuxJunior - Symposium, Dörnfeld, 2009.
- [Kle03] KLEINKES, M.: *Objektivierte Bewertung des Gütemerkmals Homogenität für Scheinwerfer-Lichtverteilungen*, Dissertation, Uni Bielefeld, Shaker Verlag Aachen, 2003.
- [Kli05] KLIEBISCH, D.; VÖLKER, S.: *Examinations of the recognition distance of headlamps*. In: Proceedings of the 6th International Symposium on Automotive Lighting (PAL) 2005, TU Darmstadt, 27.-28. September, Herbert Utz Verlag Wissenschaft, 2005.

- [Kli05a] KLIEBISCH, D.; VÖLKER, S.; SEYRING, C.: *Untersuchungen zur Erkennbarkeitsentfernung von Kfz-Scheinwerfern*. In: Tagungsband Lux Europa 2005, TU Berlin, 19.-21. September 2005.
- [Koh05] KOHNLE, T.; WEISSHAAR, J.: *Optical Systems Design Based on High-Quality Measuring Techniques – from the Characterization of Components to the Product Verification*. In: ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2005.
- [Kok88] KOKOSCHKA, S.: *Zur Berechnung von Schwellenkontrasten für die Detektion einfacher Sehobjekte*. Licht 4, S. 305-308, 1988.
- [Koo93] KOOSS, D.: *Simulation der Streuleuchtdichte von Autoscheinwerfern im Nebel aus der Sicht des Autofahrers*. Dissertation, Technische Universität Karlsruhe, 1993.
- [Kos02] KOSHEL, R.J.: *Lit Appearance Modeling of Illumination Systems*. SPIE - Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Vol 4768, S. 65-73, Warrendale, 2002.
- [Köt09] KÖTH, K.: *Auslegung der Kraftfahrzeugbeleuchtung hinsichtlich Sicht und Signalisation*. Dissertation, Technische Universität Karlsruhe, 2009.
- [Krü04] KRÜGER, U.: *Ausgewählte Aspekte der orts aufgelösten Erfassung stationärer Licht- und Farbverteilungen*. Dissertation, Publikationsreihe des Fachgebietes Lichttechnik der TU Ilmenau Nr. 6, ISBN 3-89959-167-4, Der Andere Verlag, Osnabrück, 2004.
- [Krü05] KRÜGER, U.: *Messunsicherheit bei der Angabe des $f1'$ -Kennwertes*. In: LuxJunior - Symposium, Dörnfeld, 2005.
- [Laa09] LAARHOVEN, W.: *Regulatory changes on automotive lighting A global overview*. In: ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2009.
- [Law09] LAWRENCE, M.: *Development of a Halogen Light Source for Low Cost Adaptive Forward Lighting*. In: ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2009.
- [Lee05] LEE, M.Y.; HA, Y.H.; SHIN, J.H.; PARK, J.H.; LEE, C.H.: *Lamp-Lit Image Rendering of Automotive Rear Lamp Using Spectral-Based Ray Tracing Method*. SAE Technical Papers Series SAE 2005-01-1925, Warrendale, 2005.
- [Leiom] http://www.leica-geosystems.com/downloads123/cp/general/a5/manuals/LeicaDISTO_A5_en.pdf, 26.06.2011.
- [Ligfr] http://www.lighttec.fr/applicnotes/Brochure_REFLET_Feb10.pdf, 26.06.2011.
- [Lmtde] <http://www.lmt-berlin.de/en/goh1300.html>, 26.06.2011.
- [Lor09] LOREK, F.: *Minderwertige Autolampen gefährden die Sicherheit*. In

- <http://www.lorek.org/de/system/files/studie-schlechte-autolampen.pdf>, 2009.
- [Mäg03] MÄGE, B.: *Vorgehensweise bei der Messunsicherheitsbewertung*. VDI-Berichte Nr. 1805, VDI/ VDE Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik, 2003.
- [Mäg04] MÄGE, B.: *Messunsicherheit „light“*. VDI-Berichte Nr. 1867, VDI/ VDE Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik, 2004.
- [Man00] MANZ, K.: *Are Measurements for the Cut-Off Gradient of Head Lamps in Different Measurement Distances Possible?* . SAE Technical Papers Series SAE 2000-01-0802, Warrendale, 2000.
- [Man01] MANZ, K.: *The Influence by Size of Head-lamp on Discomfort Glare*. Proceedings of Progress in Automotive Lighting PAL, S. 618-630, Darmstadt 2001.
- [Man01a] MANZ, K.: *Tolerances of Cut-Off-measurements*. Proceedings of Progress in Automotive Lighting PAL, S. 635-645, Darmstadt 2001.
- [Mar09] MARUTZKY, M.; LANSMANN, S.; REHBERG, T.; SCHINTAG, P.: *Feasibility Study on Spatial Luminance Camera Based Testing of Head Lamps in a Large Hall*. In: ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2009.
- [Mas93] MASUELLI, S.: *Importance of Optical Surfaces Roughness Characterisation to Increase Predictive Value for Headlamps Optical Simulations*. In: PAL – Progress in Automobile Lighting, Darmstadt, 1993.
- [Mat05] MATUS, M.: *Koeffizienten und Ausgleichsrechnung: Die Messunsicherheit nach GUM*. In: Technisches Messen, Ausgabe 72, Oldenbourg Verlag, 2005.
- [Matde] <http://www.mathworks.de/products/matlab/>, 26.06.2011.
- [Men09] MENSCH, D.; KIEL, H., ZIEHL, C.: *Softwarebasierte Bewertung von Streulichtcharakteristiken der peripheren Scheinwerferlichtverteilung*. LuxEuropa Symposium, Istanbul, 2009.
- [Men09a] MENSCH, D.: *Effiziente Verarbeitung von Strahldatensätzen aus Simulation und Messung*. LuxEuropa Symposium, Istanbul, 2009.
- [Men10] MENSCH, D.: *Automatische Bewertung von Kfz-Signalleuchten*. Licht 2010-Symposium, Wien, 2010.
- [MoSc07] MÖCKEL, C.; SCHEUCHENPFLUG, J.: *Lichtsimation im Automobilbau – Integration von Design und Technik*. In Photonik Nr. 5 S. 58-62, 2007.
- [Mon95] MONK, F.: *New Optical Simulation System Revolutionise Headlamp Development*. Society of Automotive Engineers: SAE Technical Papers Series 950594 Warrendale, 1995.
- [Nak92] NAKATA, Y.; USHIDA, T.; TAKEDA, T.: *Computerized graphics light distribution fuzzy equation system for automobile headlighting using vehicle simulation*.

- Society of Automotive Engineers: SAE Technical Papers Series 1992-08-16, Warrendale, 1992.
- [Nef07] NEFT, J.; BADER, V.; KIEL, H.; HÄRING, S.: *Wechselbeziehung Design – Technik – Werkstoff am Beispiel aktuelle Leuchtenentwicklungen im Automobilbau*. SKZ - Symposium, Würzburg, 2007.
- [Nor00] ISO/IEC-Leitfaden 99:2007: *Internationales Wörterbuch der Metrologie (VIM)*. ISBN-978-3-410-20070-3, Deutsches Institut für Normung, 3. Auflage 2010, Beuth Verlag, Berlin, 2010.
- [Nor08] JCGM 100:2008: *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*. 1st Edition, 2008.
- [Nor08a] JCGM 200:2008: *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*. <http://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html>, 2008.
- [Nor08b] JCGM 101:2008: *Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method*. 1st Edition, 2008.
- [Nor77] National Institute of Standards and Technology: *Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance*. 1977.
- [Nor95] Norm DIN 1319 1 – 4 – *Grundlagen der Messtechnik*. Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, 1995.
- [Nor98] Norm DIN EN ISO 4287 – *Oberflächenbeschaffenheit Tastschnittverfahren: Benennung, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*. 1998.
- [Opsde] <http://www.opsira.de/de/pdf/opsiraProfilV00072310d.pdf>, 26.06.2011.
- [Optfr] OPTIS: *Speos CAA Simulationssoftware*, <http://www.optis-world.com/Products/software/SPEOS-CAA-V5Based-light-simulation-software.htm> , 26.06.2011.
- [Oraom] ORA: LightTools Simulationssoftware von ORA Optical research Associate, http://www.opticalres.com/lt/ltprodds_f.html, 26.06.2011.
- [Ort05] ORTLIEB, C.: *Messunsicherheitsanalyse am Beispiel eines Lampenprüfstandes*. Studienarbeit an der Fachhochschule Braunschweig, Wolfenbüttel, 2005.
- [Osrde] <http://catalog.osram-os.com/applications/applications.do?folderId=2&act=showBookmark&favOid=0000000200034c80025d0023>, 26.06.2011.
- [PaSh09] PARLIKAR, P.V.; SHAMSUNDARA, B.V.; MANNIKAR, A.V.: *Data collection of vehicle operating voltages for the passing beam and its effect on the road safety during night driving*. In: ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2009.

- [Pet05] PETERSON, G.L.: How Many Rays Do I Need to trace? Applying the Rose Model to Computer Analysis of Illumination Systems. In: White Papers, Breault Research Organisation, 2005.
- [Phiom] <http://www.philipslumileds.com/resources/design/listing.cfm?cat=optical>, 26.06.2011.
- [Pol98] POLLACK, W.: *Lage und Qualität der Hell-Dunkel-Grenze in der Lichtverteilung von Kraftfahrzeug-Scheinwerfern*. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, 1998.
- [Pre97] PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY: *Numerical Recipes in C: the art of scientific computing*. Cambridge University Press, second ed., 1997.
- [Radom] http://www.radiantimaging.com/?q=products/is_sa, 26.06.2011.
- [Rap07] RAPHAEL, S.; SEYRING, C.; WERNICKE, A.; VÖLKER, S.: Luminance as a criterion for the evaluation of discomfort and disability glare of headlamps. In: ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2007.
- [Rat95] RATTUNDE, R.: Über die Messung des Lichtstroms. In: Licht 7-8,p .613,1994.
- [Rei03] REINERS, T.; HERING, O.; VOLLMER, R.: *High Resolution Light Source Characterization*. In: PAL – Progress in Automobile Lighting, Darmstadt, 2003.
- [Rei03b] REINERS, T.; HERING, O.; VOLLMER, R.: *Optical near field measurements and ray tracing simulations of coated and uncoated halogen bulbs*. Society of Automotive Engineers: SAE Technical Papers Series 2003-01-0929, Warrendale, 2003.
- [Rei07] REINERS,T.; BIEBL, A.; VOLLMER, R.: *Plug&play semiconductor light sources for visible and IR illumination applications*. In: ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2007.
- [Rie84] RIEMANN, M.; SCHMIDT, F.; POSCHMANN, R.: *Zur Bestimmung der Lichtstärkeverteilung von Leuchten innerhalb der photometrischen Grenzentfernung mittels eines bildauflösenden Goniometers*. Journal of the Illuminating Society, 13(No.2), Seiten 129-136, 1984.
- [Rie91] RIEMANN, M.; SCHMIDT, F.; POSCHMANN, R.: *Verfahren und Anordnung zur Messung der Lichtstärkeverteilung von Leuchten und Lampen*. Deutsches Patentamt DE 41 10 574 C2, v. 31.03.1991, 1991.
- [Saerg] <http://www.sae.org>, 26.06.2011.
- [Sch03] SCHLAGER, W.; GEUSAU, J.A.v.; KRIJNE, H.: *New Signaling Lamp Technology –A Breakthrough in Reliability and Performance*. In: PAL – Progress in Automobile Lighting, Darmstadt, 2003.
- [Sch95] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.: *Bewertung der Hell-Dunkel-Grenze bezüglich Ihrer Qualität, Lage und Linearität*. Proceedings of Progress in Automotive Lighting PAL, Darmstadt, 1995.

- [Schw06] SCHWANENGEL, C.: *Erfassung von Lichtstärkeverteilungen von Leuchten über die Beleuchtungsstärkeverteilung auf Messwänden mittels bildauflösender Leuchtdichtemesstechnik*. Licht 2006-Symposium, Bern, 2006.
- [Ste02] STEVENSON, M.A.: *Modeling filament-based sources for system tolerancing*. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers: SPIE Annual Conference, Warrendale, 2002.
- [Str05] STRAUSS, S.; WERNICKE, A.: *LED – Advantages and Disadvantages of the New Fast Light Source*. In: ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2005.
- [Stu09] STUDENY, C.: *Zweidimensionale Messung und Modellierung der Streulichteigenschaften von Oberflächen mit geätzten und erodierten Oberflächenstrukturen*. Diplomarbeit der TU Ilmenau in Zusammenarbeit mit der Volkswagen AG, Wolfsburg, 2009.
- [Tes05] TESSNOW, T.; TUCKER, M.; REINERS, T.: *Standardized LED Sources with Optical Concepts for Signal Lighting Applications in Automotive*. In: ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2005.
- [Tha09] THAMM, M.; KÖTHER, G.; FALZ, F.; HÄRING, S.; KIEL, H.: *Das Lichtsystem*. In ATZ Extra „Der VW Polo V“, Mai 2009, S. 50-53, 2009.
- [The07] THEUMERT, H.; FLEISCHER, B.: *Entwickeln Konstruieren Berechnen - Komplexe praxisnahe Beispiele mit Lösungsvarianten*. Verlag Vieweg, 2007.
- [Vdi75] Verband Deutscher Ingenieure: *Elektroerosive Bearbeitung: Begriffe, Verfahren, Anwendung*. Richtlinie VDI 3400, 1975.
- [Völ05] VÖLKER, S.: *New Headlamps – More Safety or Only More Glare?* In: ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2005.
- [Völ06] VÖLKER, S.: *Hell- und Kontrastempfindung - ein Beitrag zur Entwicklung von Zielfunktionen für die Auslegung von Kraftfahrzeug-Scheinwerfern*, Habilitationsschrift, Universität Paderborn, 2006.
- [Wam95] WAMBSGANSS, H.: *Bestimmung und messtechnische Erfassung des Reflexionsverhaltens von Fahrbahnoberflächen bei kfz-eigener Beleuchtung*. Bundesministerium für Verkehr: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 699, 1995.
- [Web07] WEBER, T.; DECKER, D.: *Advanced Performance created by Computer Aided Lighting Systems*. In: ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2007.
- [Wed07] WEDEL, FH: *Wavelet-Transformation, 2007*. [Onlinedokument] URL: <http://www.fh-wedel.de/cis/archiv/seminare/ws0304/sz/grundlagen/wavelet5.htm>, 29.11.2007
- [WeLi04] WESTIN, S.; Li, H., TORRANCE, K.: *A Field Guide to BRDF Models*. In: SIGGRAPH 04. 2004.

- [Wie00] WIERSDORFF, S.; WEISSLEDER, P.: *Simulation of complex illumination systems in the field of automotive lighting*. Society of Automotive Engineers: SAE Technical Papers Series 2000-01-0433, Warrendale, 2003. - S. 39 – 45.
- [Zie07] ZIEHL, C.: Algorithmen und Programmierung zur visuellen Bewertung von gemessenen und simulierten Lichtverteilungen der Kfz-Außenbeleuchtung. Diplomarbeit der TU Ilmenau in Zusammenarbeit mit der Volkswagen AG, Wolfsburg, 2007.
- [Zie07a] ZIEHL, C.; MENSCH, D.: Untersuchungen zur Erkennung und Bewertung von Inhomogenitäten der peripheren Scheinwerferfunktionen. Technischer Bericht, Technische Universität Ilmenau für Volkswagen, 2007.

A Anhang allgemein

A.1 verwendete Hilfsmittel

Hilfsmittel	Beschreibung, Hersteller
ASAP	Software für Lichtsimulation – BREAUULT Research
Lucidshape	Software für Lichtsimulation – Brandenburg GmbH
SPEOS	Software für Lichtsimulation – Optis
CATIA	Software für CAD – Dassault Systems
Konverter 801	Softwaretool zur Strahldatengenerierung aus Nahfeldmessungen eines Goniometers - TechnoTeam
Matlab	Software für Berechnungen und Funktionen – MathWorks Inc.
MS Office 2007	Software für die Erstellung von Dokumenten

B Anhang zur Bewertung von Lichtverteilungen

B.1 Koordinaten des Fahrzeugs und der Fahrbahn

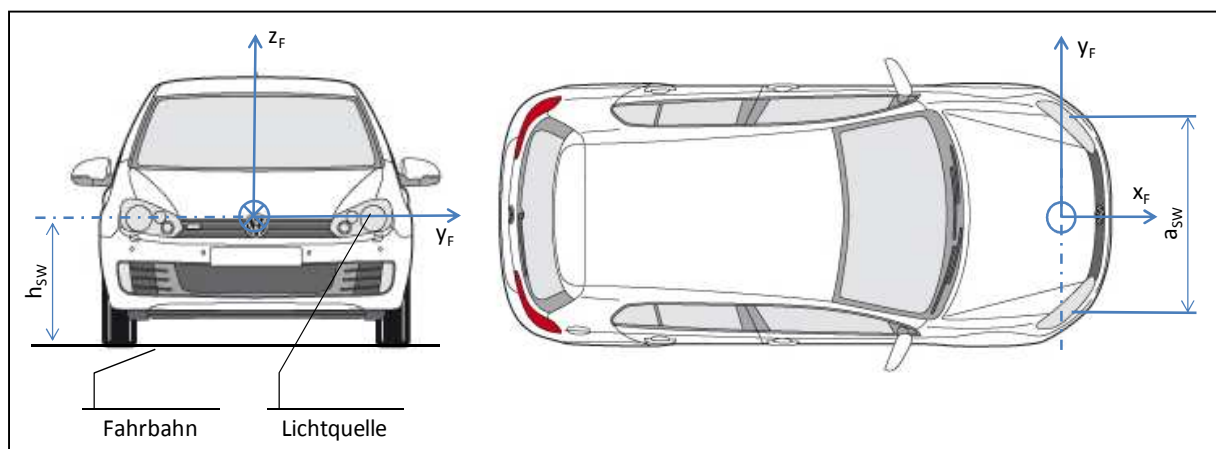


Abb. B.1: Koordinaten des Fahrzeugs und der Fahrbahn

B.2 Raumwinkel des Goniometers

$$\Omega = \iint_{\vartheta\varphi} \sin \varphi \cdot d\varphi \cdot d\vartheta \quad (\text{B.1})$$

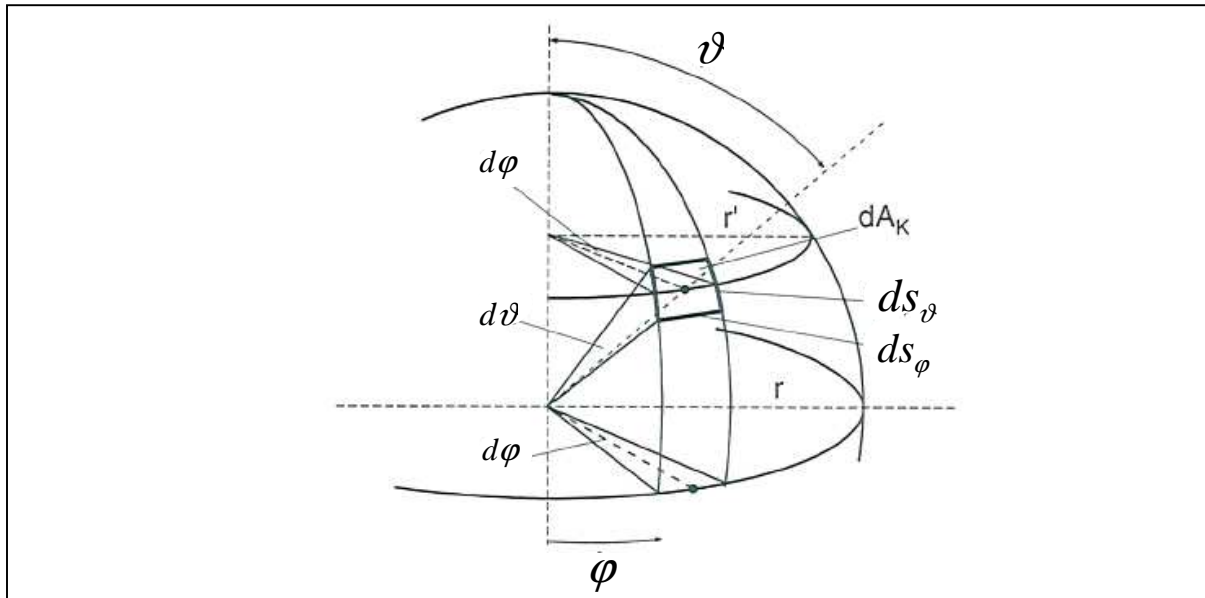


Abb. B.2: Raumwinkel in Polarkoordinaten, vgl. [Gal07]

B.3 Berechnung zum Kriterium Helligkeit der Fahrbahn - HE

Zur Berechnung der Werte für das Kriterium Helligkeit der Fahrbahn sind folgende Schritte nötig:

1. Berechnung der horizontalen Beleuchtungsstärke $E_h(x, y)$ auf der Fahrbahn aus der Lichtstärkeverteilung $I(\alpha_H, \alpha_V)$ mittels $E = I/r^2$. Die Berechnungsmethoden können beispielsweise bei von Hoffmann [Hof03] vertieft werden
2. Selektion des Bewertungsbereiches auf der Fahrbahn x_F, y_F , wie in Abbildung B.3 dargestellt
3. Berechnung des Wertes der mittleren Beleuchtungsstärke nach Gleichung B.2

$$\text{WB}_{\text{HE}} = \bar{E} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n E_i \quad (\text{B.2})$$

Die Auflösung der virtuellen Fahrbahnoberfläche beträgt $\Delta x_F = \Delta y_F = 0,1 \text{ m}$.

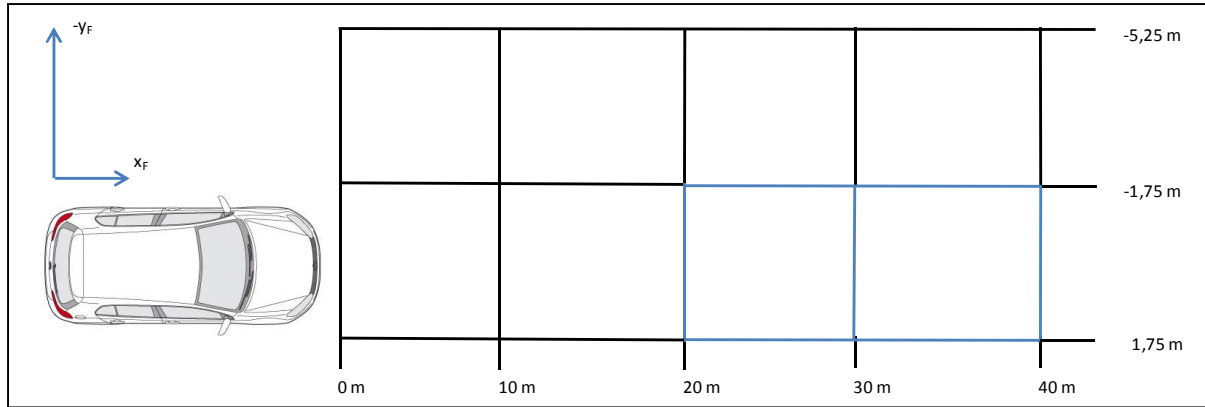


Abb. B.3: Bewertungsbereiche für die Helligkeit der Fahrbahn

B.4 Berechnung zum Kriterium Blendung – BL

Zur Berechnung der Werte für das Kriterium Blendung sind folgende Schritte nötig:

1. Berechnung der Teillichtströme $\Phi(\alpha_H, \alpha_V)$ aus der Lichtstärkeverteilung $I(\alpha_H, \alpha_V)$ in den Bewertungsfeldern bzw. Raumwinkelzonen der Abbildung B.4

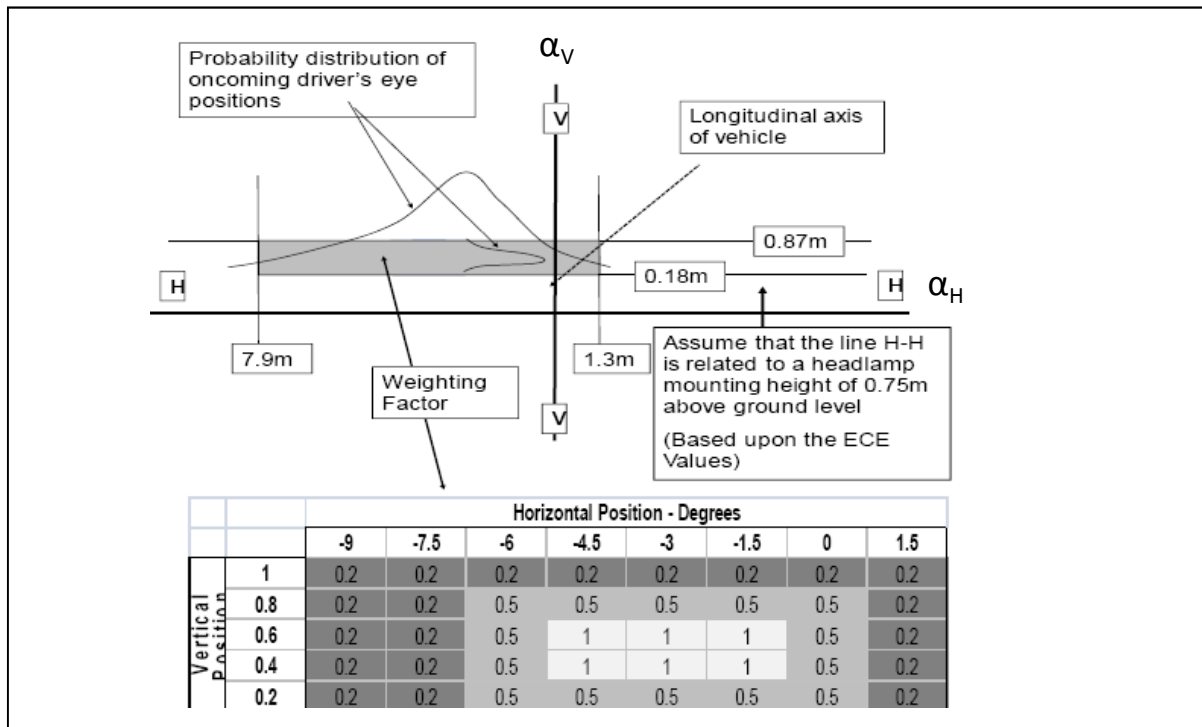


Abb. B.4: Bewertungsbereiche für die Blendung, nach CIE [Cie10]

Die Lichtströme werden gemäß $\Phi = I \cdot \Omega$ ermittelt, was in Gleichung 8.13 für den umgekehrten Fall beschrieben ist.

2. Wichtung der Teillichtströme mittels der Verteilung der Wichtungsfaktoren K der Abbildung B.4 unten mit $\Phi_{BL,i} = K_i \cdot \Phi_i$ mit $i = 1 \dots 40$

3. Berechnung des Wertes zur Blendung nach Gleichung B.3

$$WB_{BL} = \frac{20000}{\sum \Phi_{BL}} \quad (\text{B.3})$$

Die Berechnung ist aus der CIE TC4-45 entnommen und kann dort vertieft werden (vgl. [Cie10]).

B.5 Berechnung zum Kriterium Reichweite - RE

Zur Berechnung der Werte für das Kriterium Reichweite sind folgende Schritte nötig:

1. Berechnung der radialen Beleuchtungsstärke $E(x,y)$ auf der Fahrbahn aus der Lichtstärkeverteilung $I(\alpha_H, \alpha_V)$
2. Berechnung der drei Schnittpunkte $E(x,y) = 1; 3; 5 \text{ lx}$ mit jeweils drei Geraden in Fahrzeugrichtung bei $y_F = -1,75 \text{ m}, 0 \text{ m}, 1,75 \text{ m}$, wie in Abbildung B.5 dargestellt. In einer diskreten Lichtverteilung wird dabei der nächste kleinere Wert $E(x,y) < 1; 3; 5 \text{ lx}$ verwendet.

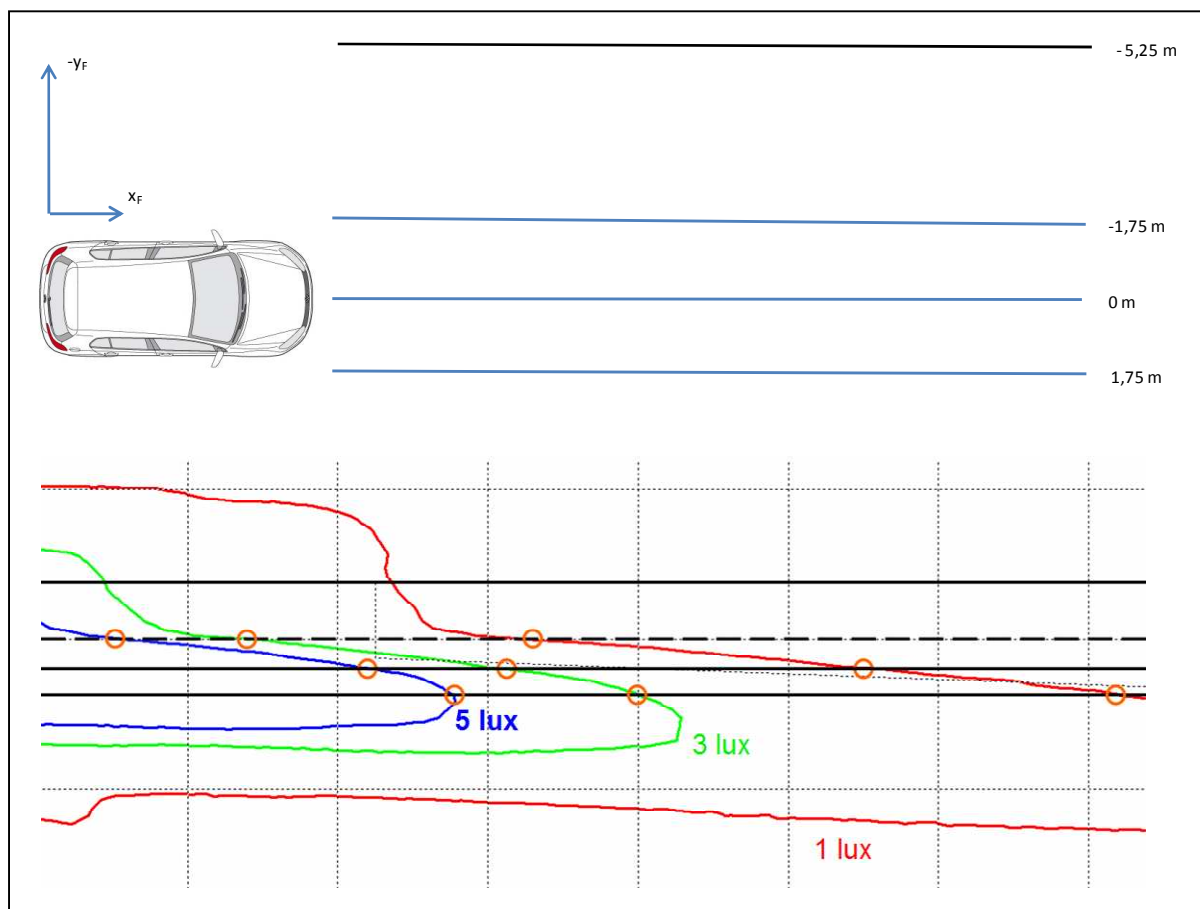


Abb. B.5: Bewertungsbereiche und Beispiel für die Reichweite [Cie10]

3. Berechnung des Wertes zur Reichweite nach Gleichung B.4

$$WB_{RE} = \frac{1}{9} \sum x_F \quad (B.4)$$

Die Auflösung der virtuellen Fahrbahnoberfläche beträgt $\Delta x_F = \Delta y_F = 0,1 \text{ m}$. Die Berechnung ist aus der CIE TC4-45 entnommen und kann dort vertieft werden (vgl. [Cie10]).

B.6 Berechnung zum Kriterium Homogenität - HO

Zur Berechnung der Werte für das Kriterium Homogenität sind folgende Schritte nötig:

1. Berechnung der horizontalen Beleuchtungsstärke $E_h(x, y)$ auf der Fahrbahn aus der Lichtstärkeverteilung $I(\alpha_H, \alpha_V)$
2. Normierung der Beleuchtungsstärkeverteilung auf $E_{\max} = 1$
3. Berechnung der Gradienten in den in Abbildung 3.6 dargestellten Bereichen $z = 1, 2, 3, 4$ der Verteilung $E_h(x_F, y_F)$ gemäß Kleinkes [Kle03]

$$\text{grad } E_z(x_j, y_i) = [E_z(x_{j+1}, y_i) - E_z(x_{j-1}, y_i), E_z(x_j, y_{i+1}) - E_z(x_j, y_{i-1})]$$

$$k_x(z = 1, 2, 3, 4) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n |\text{grad } E_z x(j, i)|$$

$$k_y(z = 1, 2) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n |\text{grad } E_z y(j, i)|$$

$$K_H(z = 1, 2)(\text{Vorfeld}) = k_x(z = 1, 2) + k_y(z = 1, 2)$$

$$K_H(z = 3, 4)(\text{Nahzone}) = k_x(z = 3, 4)$$

$$G_{\text{Zone},j} = \frac{1000}{0,25 \cdot (K_H(z = 1) + K_H(z = 2) + K_H(z = 3) + K_H(z = 4))}$$

j = Spaltenindex der Beleuchtungsstärkematrix $E_h(x_j, y_i)$

i = Zeilenindex der Beleuchtungsstärkematrix $E_h(x_j, y_i)$

die Richtung der Gradientenberechnung ist in Abbildung 3.6 dargestellt

4. Berechnung des Wertes zur Homogenität nach Gleichung B.5

$$WB_{HO} = G_{\text{Zone},j} \quad (B.5)$$

Die Auflösung der virtuellen Fahrbahnoberfläche beträgt $\Delta x_F = \Delta y_F = 0,1 \text{ m}$.

B.7 Berechnung zum Kriterium seitliche Ausleuchtung links und rechts - SE_L und SE_R

Zur Berechnung der Werte für das Kriterium seitliche Ausleuchtung sind folgende Schritte nötig:

1. Berechnung der radialen Beleuchtungsstärke $E(x,y)$ auf der Fahrbahn aus der Lichtstärkeverteilung $I(\alpha_H, \alpha_V)$
2. Berechnung der zehn Schnittpunkte bei $E(x,y) = 3 \text{ lx}$ mit jeweils fünf Geraden quer zur Fahrzeugrichtung bei $x_F = 10; 20; 30; 40; 50 \text{ m}$ wie in Abbildung B.6 dargestellt. Ermittlung der jeweils fünf Werte y_{LI} und y_{RE} durch Berechnung jeweils ausgehend von y_{\min} und y_{\max} der Verteilung. In einer diskreten Lichtverteilung wird dabei der nächste kleinere Wert $E(x,y) < 3 \text{ lx}$ verwendet

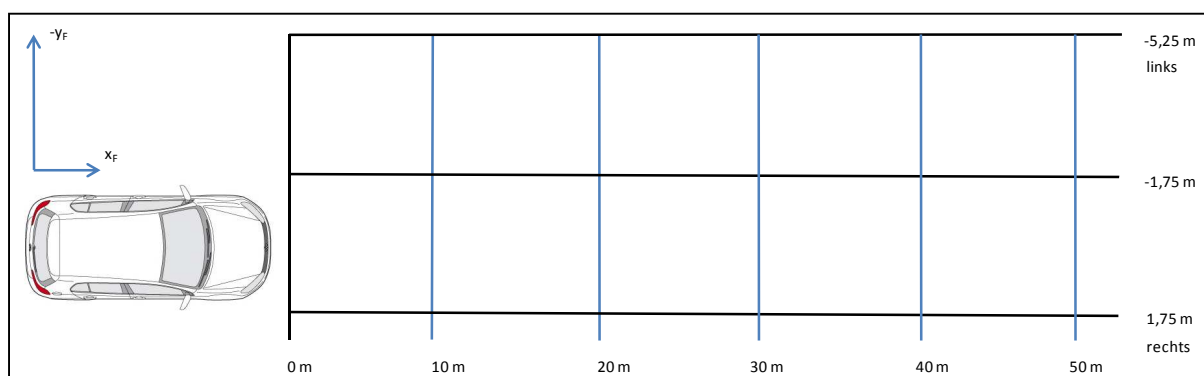


Abb. B.6: Bewertungsgerade für die seitliche Ausleuchtung auf der Fahrbahn

3. Berechnung der Werte zur seitlichen Ausleuchtung links und rechts nach den Gleichungen B.6a und B.6b

$$WB_{SE_L} = \frac{1}{5} \sum y_{LI} \quad (\text{B. 6a})$$

$$WB_{SE_R} = \frac{1}{5} \sum y_{RE} \quad (\text{B. 6b})$$

C Anhang zur Berechnungen der Erkennbarkeitsentfernung

C.1 Berechnung der Kontraste

Die Berechnung nach Kliebisch und Völker [Völ06], [Kli05], [Kli05a] basiert auf Kontrasten. Der vorhandene Kontrast muss größer sein als der Schwellenkontrast, damit ein Objekt erkannt wird, gemäß Gleichung C.1.

$$C_{\text{vorhanden}} > C_{\text{Schwelle}} \quad (\text{C.1})$$

Der vorhandene Kontrast $C_{\text{vorhanden}}$ ermittelt sich durch einen Quotienten der Leuchtdichten des Objektes und der Umgebung. In dieser Untersuchung wird die Gleichung C.2 verwendet.

$$C_{\text{vorhanden}} = \frac{(L_{\text{Objekt}} - L_{\text{Umgebung}})}{L_{\text{Umgebung}}} \quad (\text{C.2})$$

Der Schwellenkontrast C_{Schwelle} wird nach Kokoschka [Kok88] bestimmt und ist von Umfeldleuchtdichte, Objektgröße, Inhomogenität des Umfeldes und Alter des Fahrers abhängig. C_{Schwelle} ermittelt sich durch die folgenden Gleichungen, die bei Völker [Völ06] vertieft werden können.

$$C_{\text{Schwelle}} = C_0 \cdot (S_0 \cdot f_1 \cdot \alpha - 1)^{\frac{1}{c_3}}$$

$S_0 = 1$, $c_3 = -1,57$, α ist die Objektgröße in Bogenminuten. Die Sehschärfe ist $S_{th} = S_0 \cdot f_1 \cdot f_2$

$$f_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{L_{\text{Umgebung}}}{c_1}\right)^{c_2}} \text{ mit } c_1 = 2,5, c_2 = -0,36$$

$$f_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{C_{\text{vorhanden}}}{c_0}\right)^{c_3}} \text{ mit}$$

$$c_0 = c_4 \cdot \left(1 + \left(\frac{L_{\text{Umgebung}}}{c_5}\right)^{c_6}\right)$$

$$c_4 = 0,1, c_5 = 0,52, c_6 = -0,26$$

Die Erkennbarkeitsentfernung ermittelt sich dabei wie in Abbildung C.1 schematisch dargestellt.

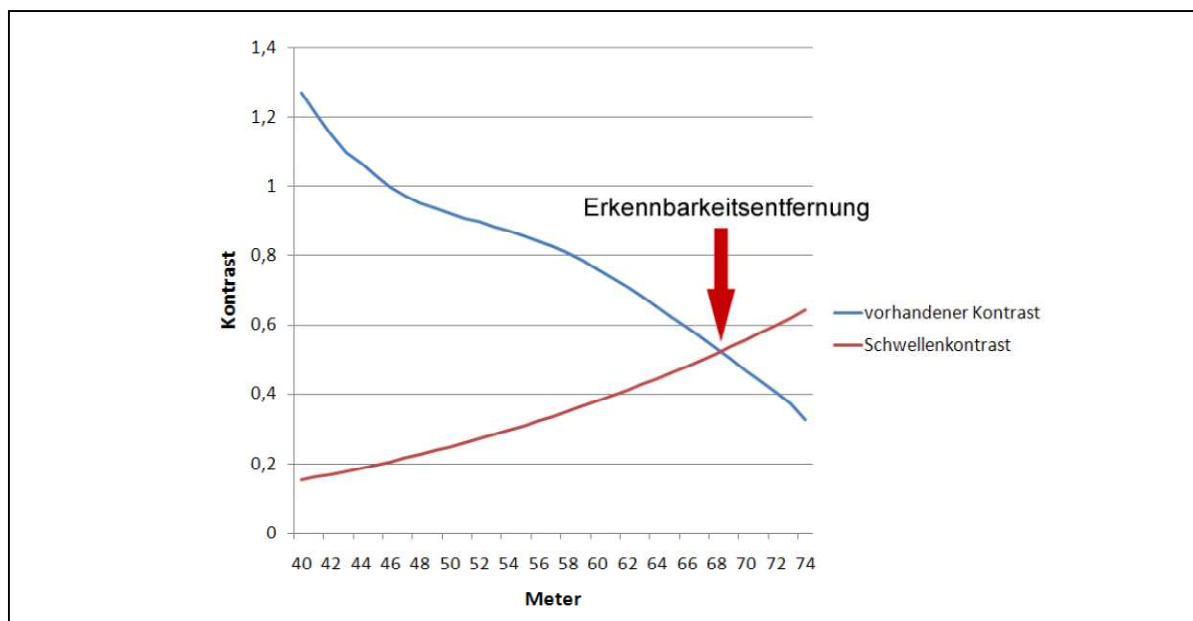


Abb. C.1: Verlauf der Kontraste zur Erkennbarkeitsentfernung [Zie07]

C.2 Berechnung der Leuchtdichteverteilung

Zur Berechnung der Leuchtdichteverteilung $L(x,y)$ auf der Fahrbahnoberfläche ist die Berechnung der Beleuchtungsstärkeverteilung $E(x,y)$ und die Anwendung des Reflexionsmodells nach Gleichung C.3 nötig.

$$L(\alpha, \delta) = R_R(\alpha, \beta, \delta) \cdot E_{\perp}(\beta) \quad (\text{C. 3})$$

α : vertikaler Beobachtungswinkel, β : Anleuchtungswinkel, δ : horizontaler Beobachtungswinkel

Da die unmittelbare Anwendung bekannter Streulichtmodelle für Rückwärtsstreuung nach Wambsgans [Wam95], von Hoffmann [Hof03] und Nakata [Nak92] zu stark abweichenden Verteilungen der Leuchtdichte $L(x,y)$ führte, wurde ein alternativer Ansatz zur rückwärtigen Anpassung des Streulichtmodells angewendet. Dabei wurden die Verteilungen $L(x,y)$ aus Messung und Berechnung direkt verglichen und die Koeffizienten des Modells so lange angepasst, bis die Leuchtdichten der berechneten Verteilung im Bereich der Hell-Dunkel-Grenze übereinstimmten. Dabei wurden die Koeffizienten des von Völker [Völ06] verwendeten Modells nach Nakata [Nak92] verwendet, wie in Gleichung C.4 dargestellt.

$$R_R = 0,0380 + 7,578 \cdot 10^{-6} \cdot x \quad (\text{C. 4})$$

Eine berechnete Leuchtdichteverteilung auf der Fahrbahnoberfläche und dem Sichtzeichen ist exemplarisch in Abbildung C.2 dargestellt.

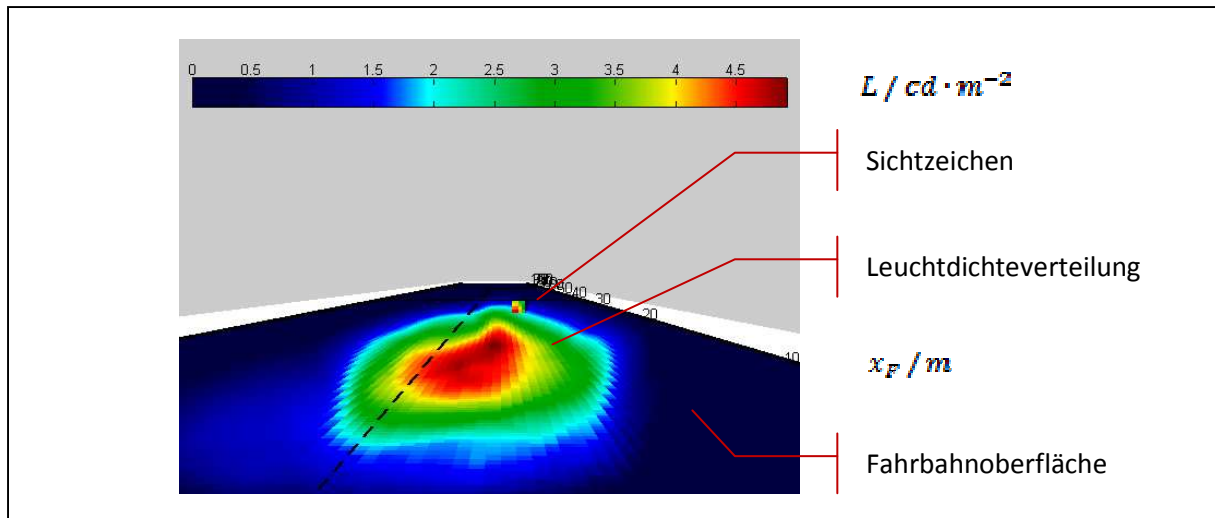


Abb. C.2: berechnete Leuchtdichteverteilung auf Fahrbahn und Sichtzeichen

C.3 Diskussion der Abweichungen

Einflussfaktoren, die eine Abweichung der Leuchtdichteverteilungen aus der Berechnung und aus dem psycho-physikalischen Versuch der TC- 4-45 verursachen, sind in Abbildung C.3 dargestellt (vgl. [Zie07]).

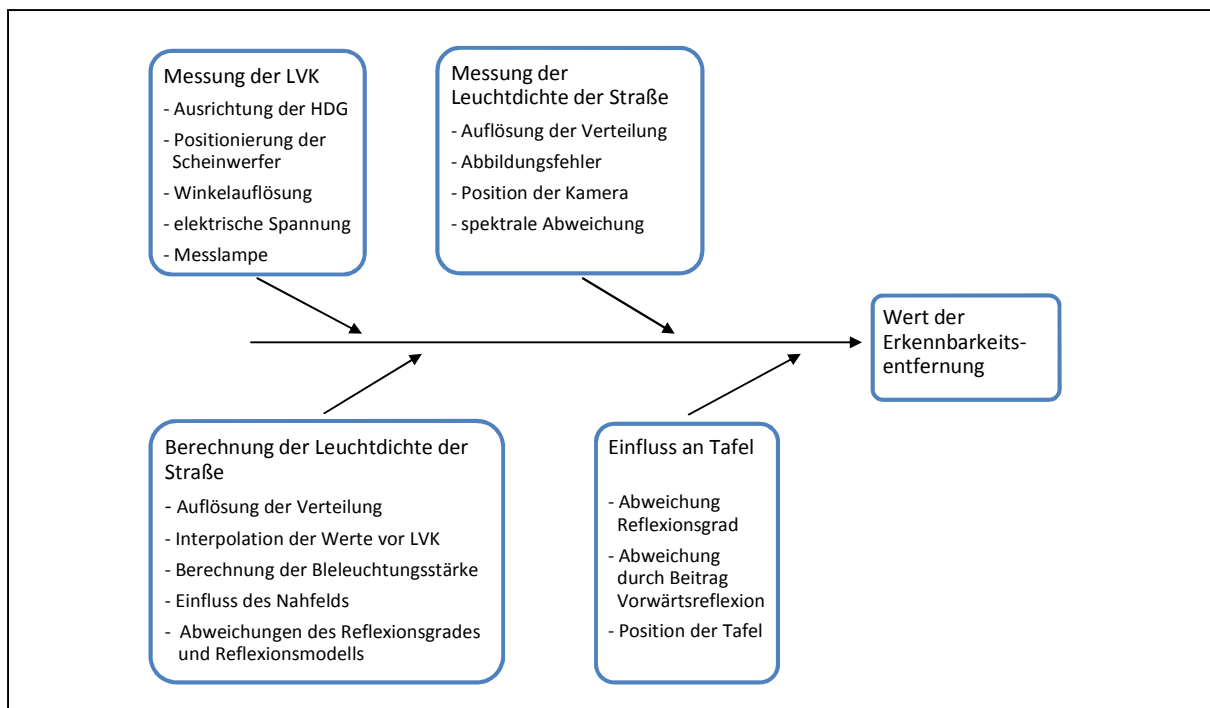


Abb. C.3: Darstellung der Einflussfaktoren auf die Berechnung der Erkennbarkeitsentfernung

Aus der praktischen Erfahrung ist bekannt, dass die Ausrichtung der Hell-Dunkel-Grenze für die Erkennbarkeitsentfernung maßgeblich ist. Weiterhin erwies sich die geringe Auflösung der berechneten Lichtverteilung an dem Sichtzeichen als kritisch, wie in Abbildung C.4 dargestellt. Zudem fehlte ein Modell für die Vorwärtsstreuung von der Fahrbahnoberfläche zum Sichtzeichen, weswegen von abweichenden Beleuchtungsstärken ausgegangen werden muss. Die bei [Zie07] erreichte Korrelation betrug $R^2 = 0,541$.

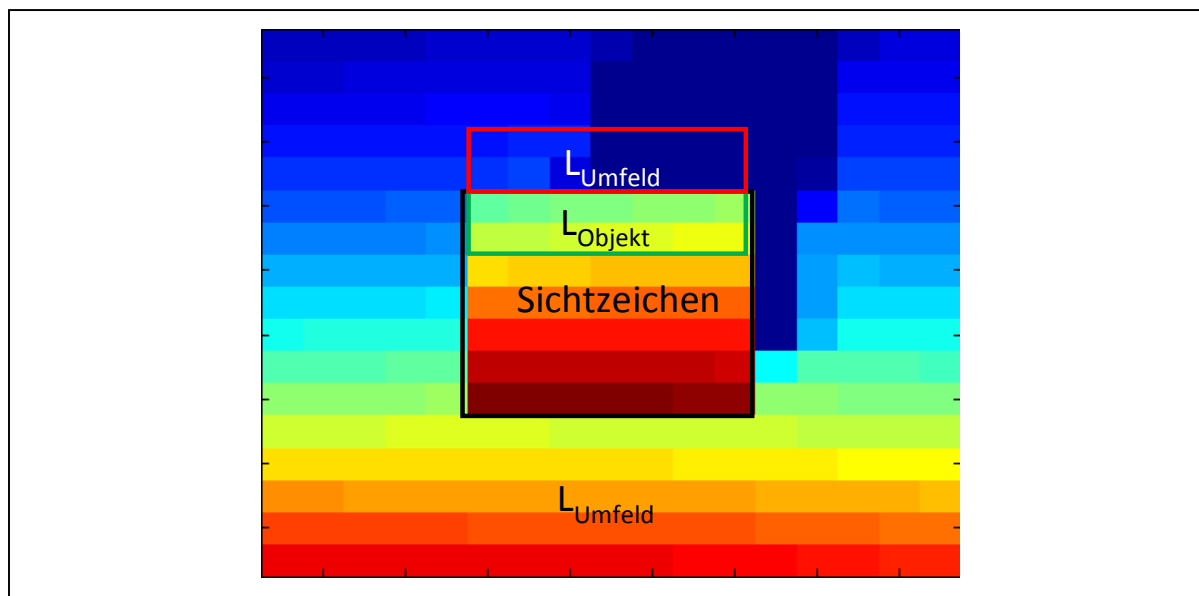


Abb. C.4: Leuchtdichteverteilung geringer Auflösung am Sichtzeichen

C.4 Bewertungsbogen der Streulichtbewertung

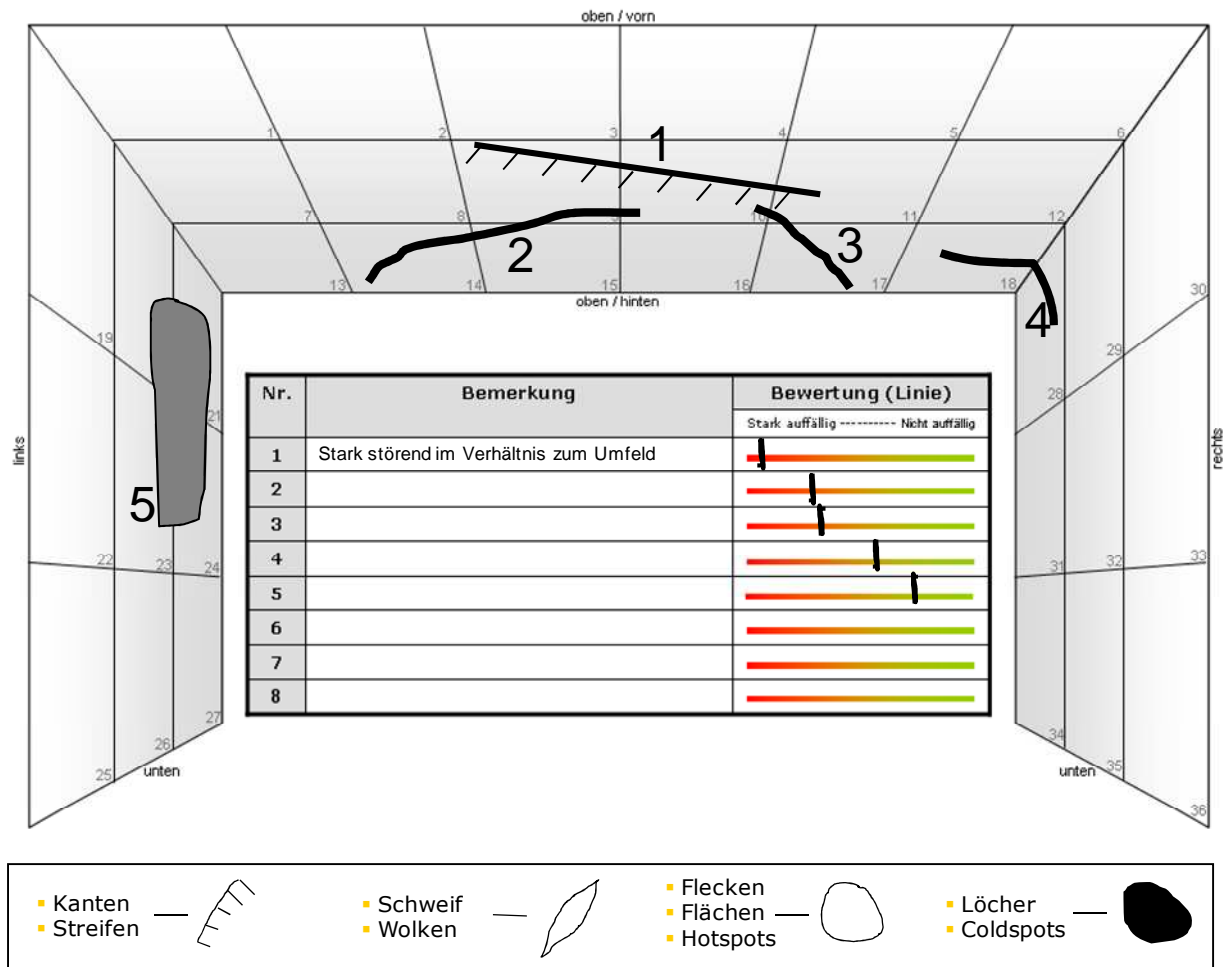


Abb. C.5: Musterfragebogen und Klassen der Streulichtartefakte zur Streulichtuntersuchung bei [Zie07a]

D Anhang zum Verhalten des Lichtstroms der H7

In Abbildung D.1 ist das Verhalten des Lichtstroms der H7 über einen Bereich der Spannung dargestellt, der in einem Fahrzeug auftreten kann. Dabei wird das nicht-lineare Verhalten des Lichtstroms gezeigt. Die in Kapitel 4.1 verwendete Linearität kann somit nur für einen begrenzten Bereich um den Nennlichtstrom angenommen werden.

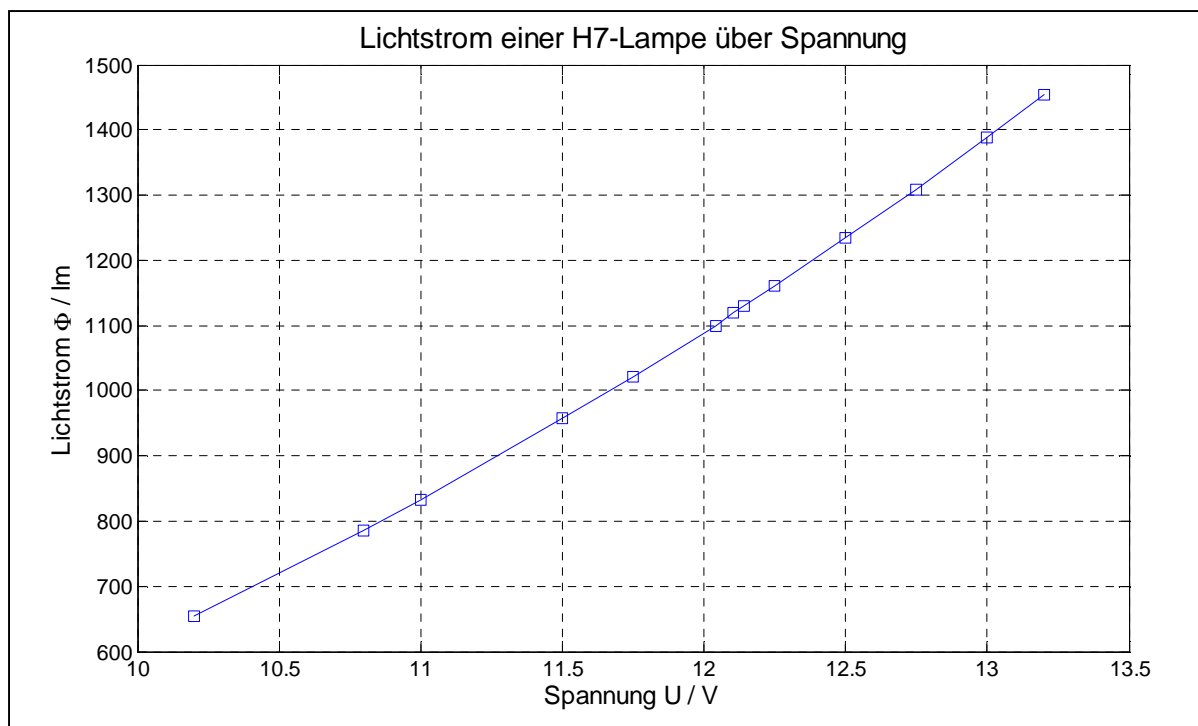


Abb. D.1: Lichtstrom einer H7 in Abhängigkeit von der Spannung

E Anhang zur Ausrichtung der Hell-Dunkel-Grenze

E.1 Lichtverteilungen des vollständigen Scheinwerfers

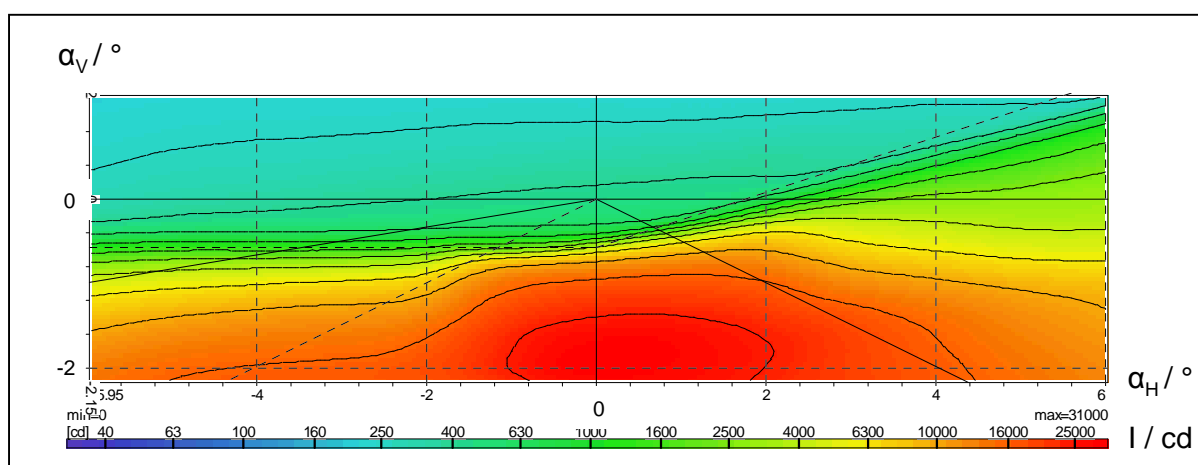


Abb. E.1: Verteilung der Mittelwerte der Lichtstärken von 10 vollständigen Scheinwerfern

E.2 Verteilung der Messunsicherheiten der Lichtverteilung in Komponentenpaarung Reflektor/Lichtquelle – ausgerichtet mit softwarebasierter Methode

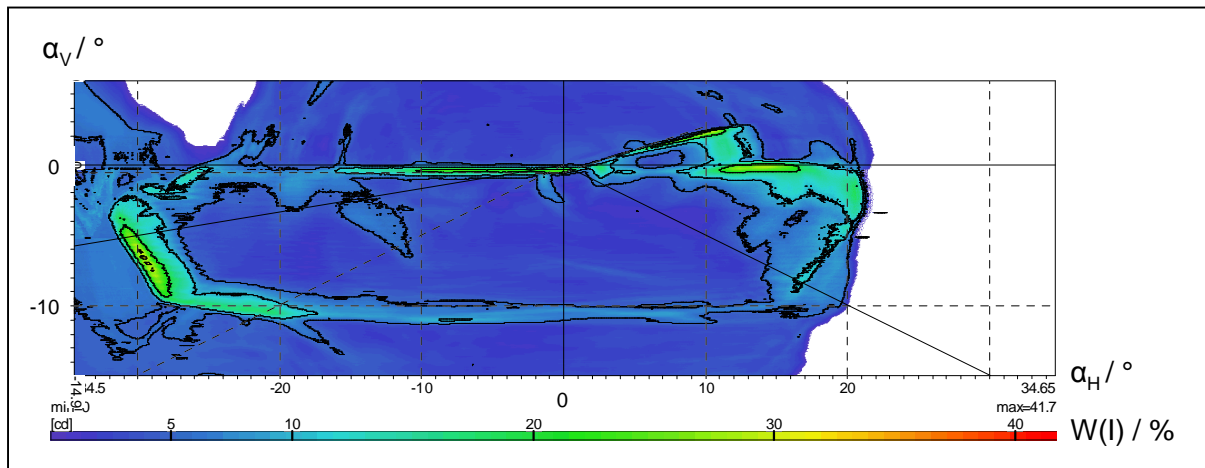


Abb. E.2: Verteilung der erweiterten Messunsicherheiten der Komponentenpaarung Lichtquelle/Reflektor – ausgerichtet mit der softwarebasierten Methode

E.3 Verteilung der Messunsicherheiten der Lichtverteilung des vollständigen Scheinwerfers – ausgerichtet mit softwarebasierter Methode

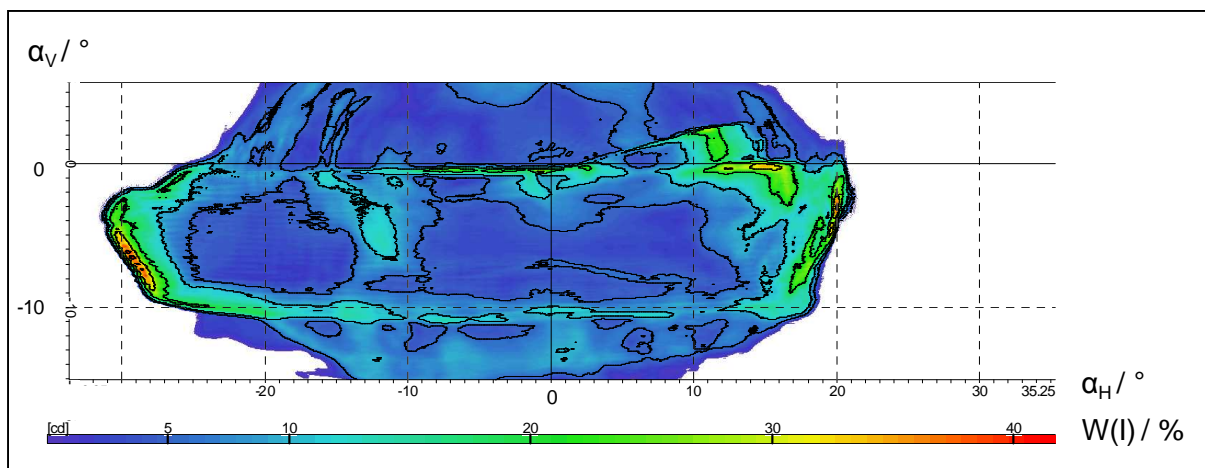


Abb. E.3: Verteilung der erweiterten Messunsicherheiten des vollständigen Scheinwerfers – ausgerichtet mit der softwarebasierten Methode

F Anhang zur Signalform des PWM-Signals im Fahrzeug

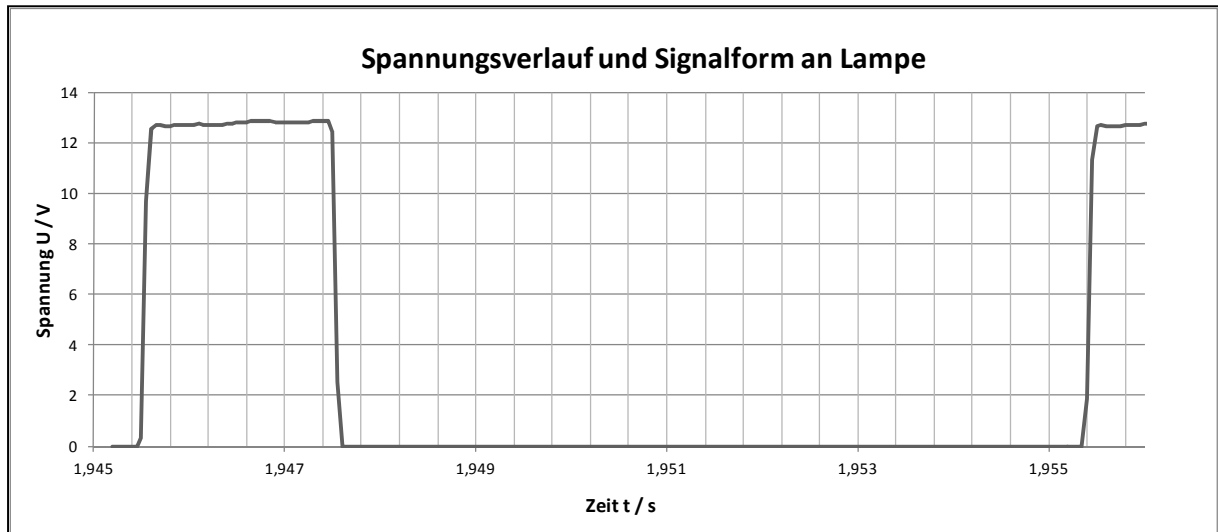


Abb. F.1: Verlauf der PWM-gesteuerten Spannung an der Lampe im Fahrzeug (laufender Motor)

G Anhang zu Leuchtdichteverteilungen der Lichtquellenmodelle

Wie in Kapitel 6.3 beschrieben, ist es nicht möglich die durch eine Umkehrspanne des Messgerätes bedingte Verschiebung des Lichtquellenmodells in der Simulationssoftware zu korrigieren. Die Verschiebung kann exemplarisch für vier Lichtquellen anhand Abbildung G.1 abgeschätzt werden. Dabei ist die Wendel aus jeweils gegenüber liegenden Blickrichtungen dargestellt.

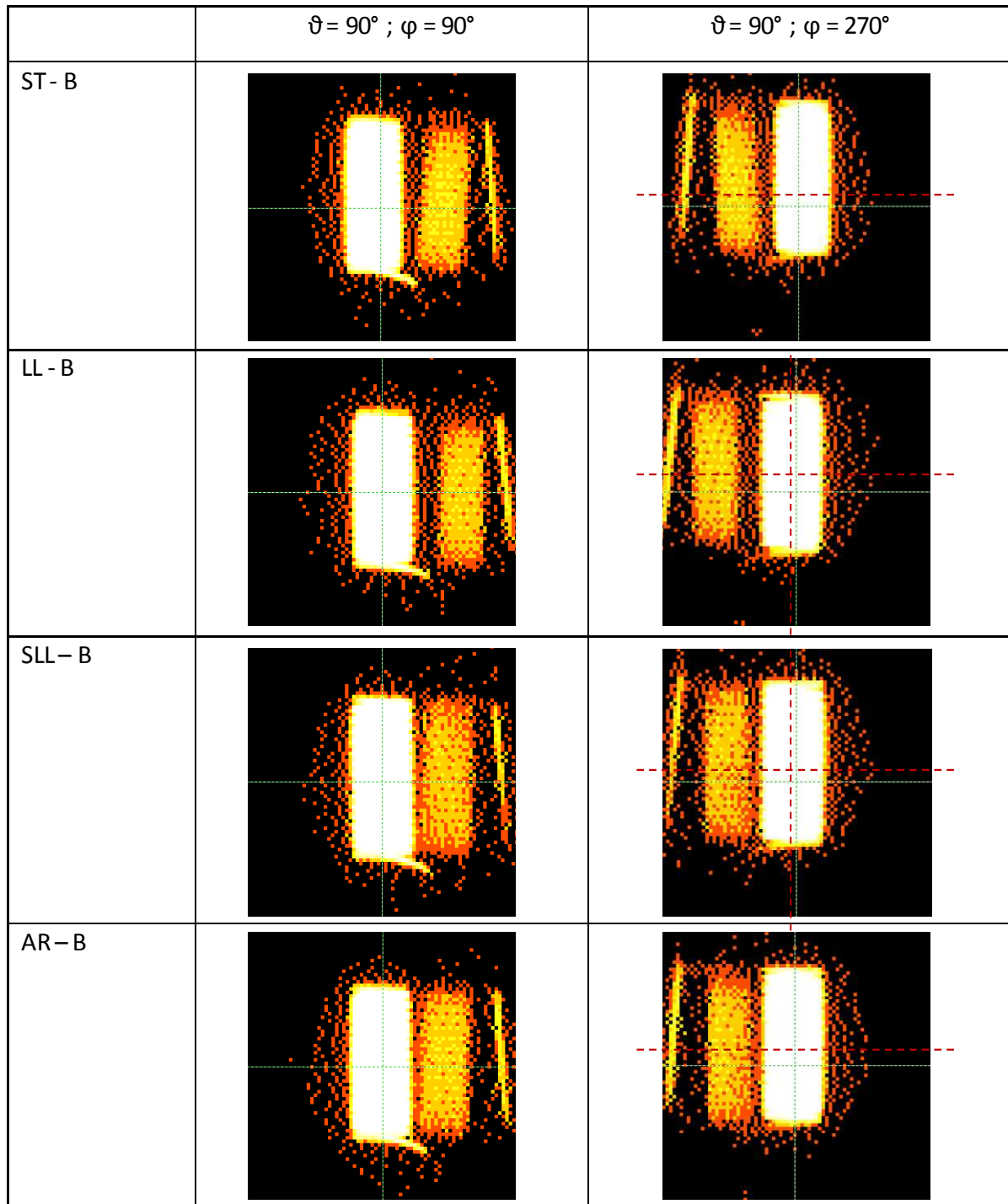


Abb. G.1: Wendelbilder der H7-Lampe aus gegenüberliegenden Blickrichtungen mit Verschiebung

Wäre keine Umkehrspanne vorhanden, so müsste der Abstand des Koordinatenursprungs, gekennzeichnet durch das grüne Fadenkreuz, mit dem Mittelpunkt der Wendel für beide Ansichten gleich sein. Dies ist nicht der Fall. Die ungefähre Soll-Position der Wendel ist mit dem roten Fadenkreuz auf der rechten Seite gekennzeichnet.

H Anhang zur Untersuchung von Narbungen

H.1 Einflussfaktoren und Abweichungen von Narbungen

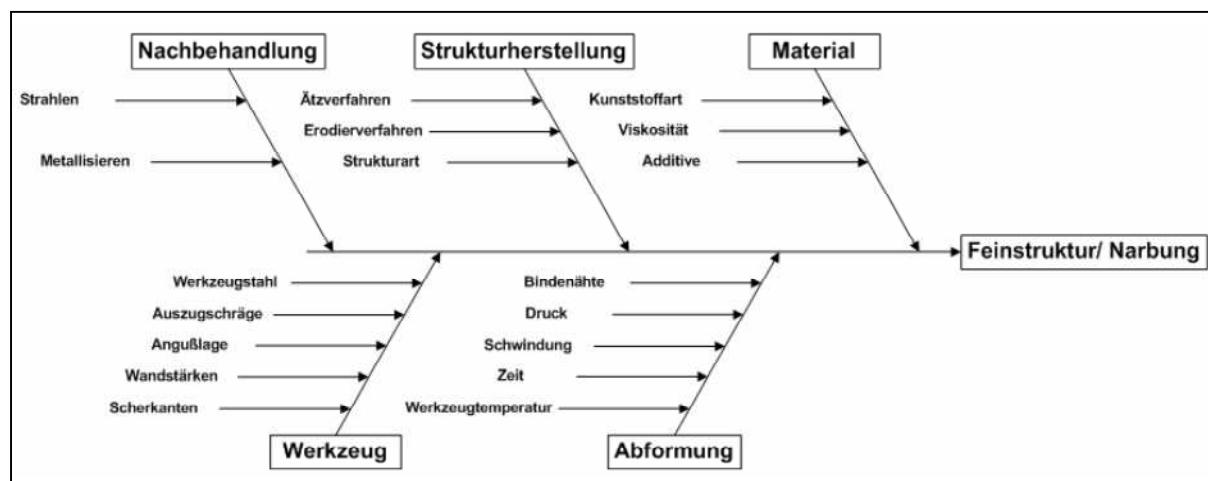


Abb. H.1: Einflussfaktoren auf die Struktur der Narbung

H.2 Verteilung der Amplitudendichten der Narbungen

Tab. H.1: zum Test auf Normalverteilung der Rauheiten – Auszug aus (vgl. [Stu09])

Narbung	Herstellungsverfahren	Material	Ra	Rq	Ra/Rq
K28 Serie 5	Erodierstufen	APEC 1895	1,373	1,769	0,776
		APEC 1695	1,738	2,218	0,783
		Makrolon	1,374	1,752	0,784
	Ätzstufen	APEC 1895	0,891	1,113	0,8
		APEC 1695	0,892	1,136	0,785
		Makrolon	0,899	1,17	0,768
...					
K33 Serie 7	Erodierstufen	APEC 1895	3,928	4,954	0,793
		APEC 1695	4,88	6,023	0,81
		Makrolon	4,478	5,607	0,799
	Ätzstufen	APEC 1895	2,222	2,648	0,839
		APEC 1695	2,354	2,838	0,829
		Makrolon	2,692	3,245	0,829
Mittelwert					0,802

H.3 BDRF-Messgerät des IOF Jena – Referenzmessgerät

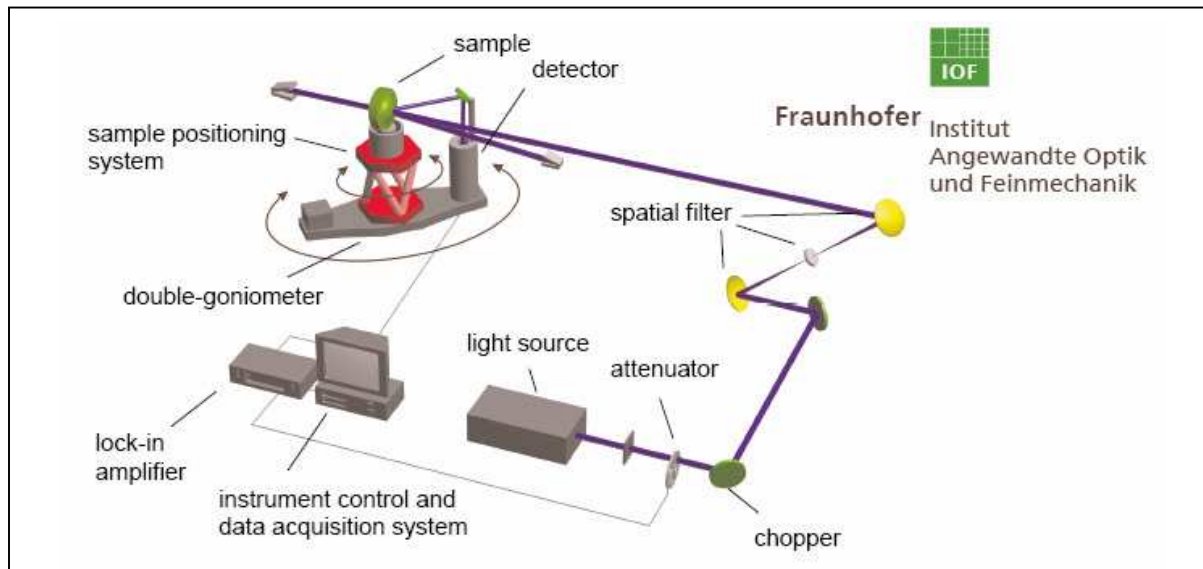


Abb. H.2: Aufbau des Messgerätes zur Referenzmessung

H.4 Abweichungen des BRDF-Messgerätes

Tab. H.2: Einflussgrößen und Abweichungen auf das Messergebnis (vgl. [Stu09])

Hauptgruppe	Einflussgröße	Einfluss auf die Messung	geschätzte Abweichung	
Umwelt	Temperatur	Unbekannt / gering	Geringer Einfluss, klimatisierter Raum	
	Mech. Instabilität	unbekannt	Keine Beobachtungen	
	Fremdlicht	ausgeschlossen	Alle Messungen in geschlossener Dunkelkammer	
	Streulicht (innerhalb der Dunkelkammer)	Bekannt / gering	Kammer geschwärzt, diffus	
Beleuchtung	Beleuchtungspot	bekannt	Einfluss auf alle Messungen konst.	
	LWL	Bekannt	Transmissionsänderung bei statischer Messung unter einem Beleuchtungswinkel vernachlässigbar	
	Stabilität der LQ	Bekannt	Geringer Einfluss nach Einbrennzeit stabil	
	Alterung der LQ	Unbekannt / gering	Vernachlässigbar, keine absolut Messung	
	Winkelabweichung	Unbekannt / gering	Bei statische Messung vernachlässigbar	
Empfänger	Abschattung der LQ	bekannt	Für alle Messungen gleich, keine Retroreflexion messbar	
	Öffnungswinkel	bekannt	Für alle Messungen konst.	

	Photodiode	Bekannt / gering	Einschwingzeit, durch Offseteinstellung einstellbar	
	LWL	unbekannt	Für alle Messungen konst.	
	Winkelabweichung	bekannt	Abschätzung durch Wiederholmessung	
Probenhalterung	Höheneinstellung	Bekannt	Für alle Messungen konst.	
	Neigungseinstellung	Bekannt / gering	Für plane Proben vernachlässigbar	
Berechnung	Kalibrierdaten	bekannt	Kein Einfluss bzw. konst. Da gleiches Reflexionsnormal	



Nicht konstant
Abschätzung der Abweichung



konstante Abweichung auf alle
Messungen bei festgelegter
Einstellung

H.5 Untersuchung zur Isotropie und Ortsunabhängigkeit der Narbung

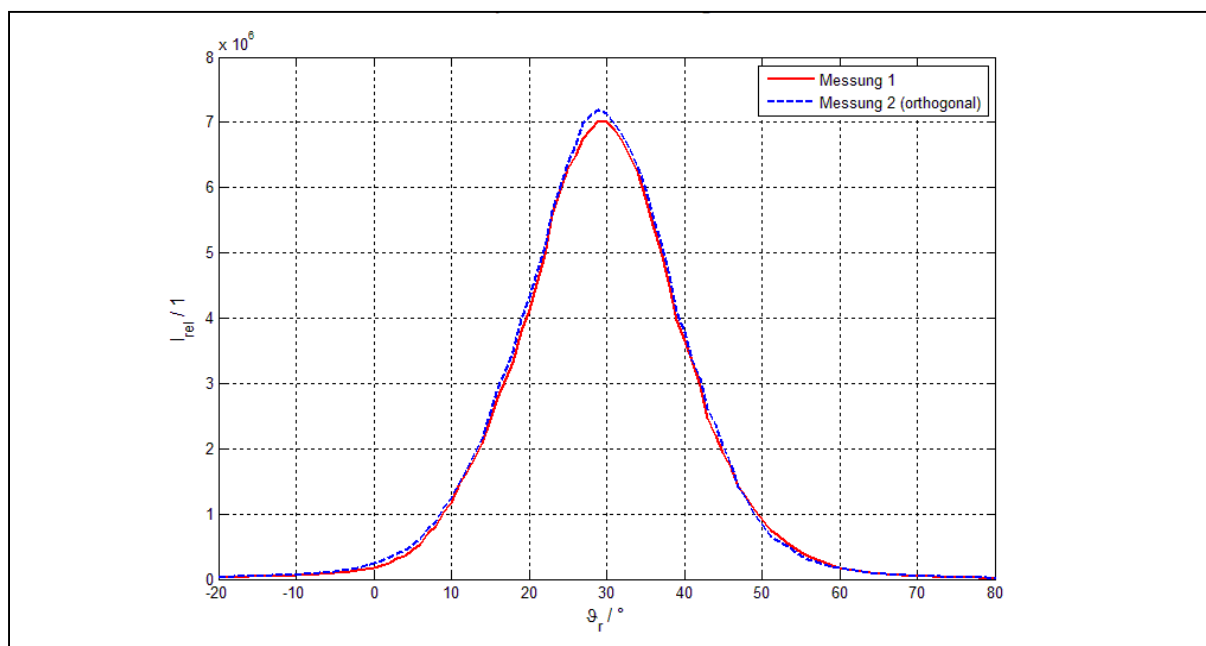


Abb. H.3: Messung zur Isotropie (vgl. [Stu09])

Tab. H.3: Abweichungen des Tests auf Anisotropie (links) und Ortsunabhängigkeit (rechts) der Proben (vgl. [Stu09])

Probe		Betrag der rel. Abweichung in % Anisotropie	Betrag der rel. Abweichung in % Ortsunabhängigkeit
K28	erodiert	3,65	2,49
	geätzt	3,37	0,89
K33	erodiert	1,9	0,18
	geätzt	0,98	1,16
K35	erodiert	2,94	1,37
	geätzt	2,97	1,25

H.6 Weitere BRDF-Messungen zur Trennung der Eigenschaften der Narbungen

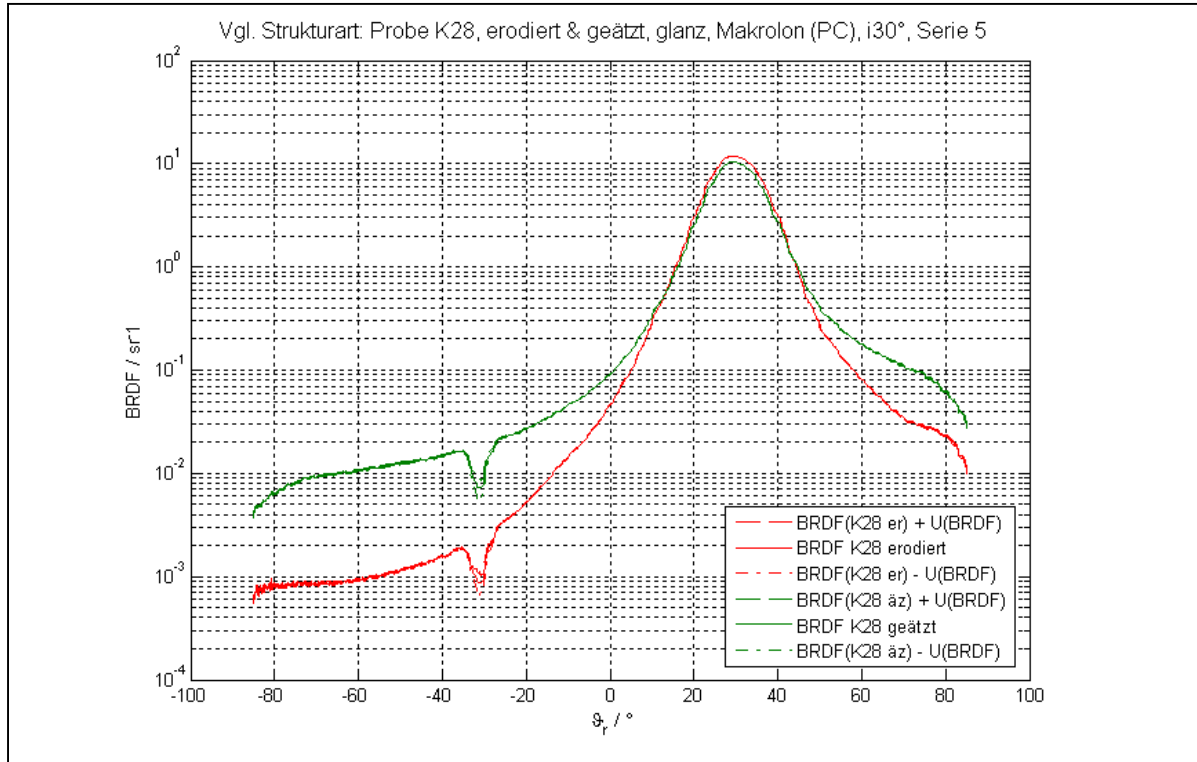


Abb. H.4: zur Trennung der erodierten und geätzten Strukturen bei Makrolon (vgl. [Stu09])

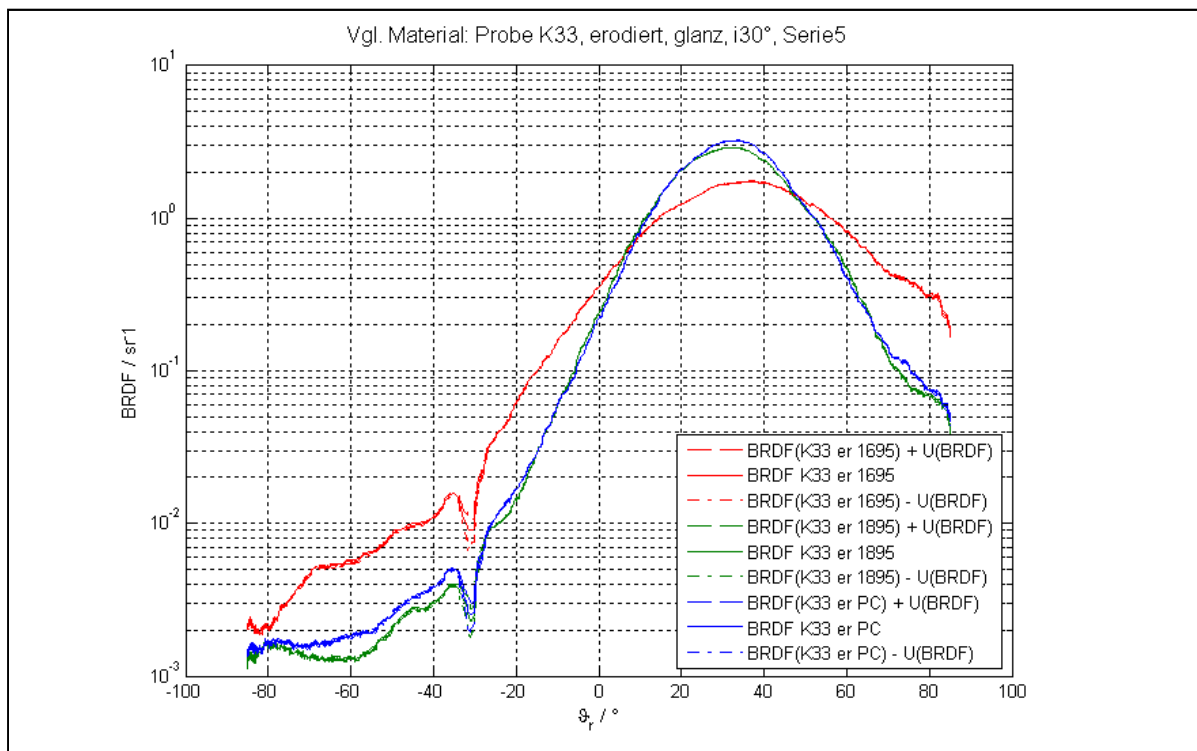


Abb. H.5: zum Einfluss des Materials auf das Streulichtverhalten (vgl. [Stu09])

H.7 Koeffizienten der Modelle für Narbungsklassen und Streulichtverhalten

Tab. H.4: Koeffizienten der Modelle für Narbungsklassen und Streulichtverhalten

Makrolon	K-Klasse	a	b	c
Erodiertsufen	K28	11,8	29,98	8,663
	K30	7,36	30,51	10,95
	K31	8,608	29,81	10,58
	K32	4,836	30,62	13,97
	K33	3,156	32,06	18,84
	K35	1,748	33,3	27,38
Ätzstufen	K28	10,18	30,01	8,637
	K30	11,47	29,79	8,008
	K31	7,24	30,02	11,15
	K32	5,667	30,54	12,67
	K33	4,695	31,07	14,09
	K35	4,354	30,85	15,17

APEC 1695	K-Klasse	a	b	c
Erodiertsufen	K28	5,222	29,222	14,06
	K30	3,668	31,1	17,04
	K31	3,451	30,95	18,14
	K32	2,111	33,53	24,45
	K33	1,693	35,99	29,36
	K35	1,14	36,46	37,97
Ätzstufen	K28	10,01	29,42	8,869
	K30	12,29	29,44	7,966
	K31	8,145	29,69	10,64
	K32	6,334	29,75	12,06
	K33	5,277	30,51	13,38
	K35	4,726	30,43	14,61

APEC 1895	K-Klasse	a	b	c
Erodiertsufen	K28	7,37	29,16	11,59
	K30	7,509	29,99	10,92
	K31	7,336	29,83	11,86
	K32	4,064	31,57	15,9
	K33	2,85	31,59	20,04
	K35	1,723	33,55	28,19
Ätzstufen	K28	12,93	29,98	7,768
	K30	16,24	29,3	6,924
	K31	12,69	28,66	8,255
	K32	9,195	29,12	9,789
	K33	7,122	28,83	11,11
	K35	6,636	29,43	12,12

Der Koeffizient b entspricht näherungsweise dem Einfallswinkel der Messung $\vartheta_i = 30^\circ$

I Anhang zur Simulation

I.1 Reflexionsgrad und Brechungsindex

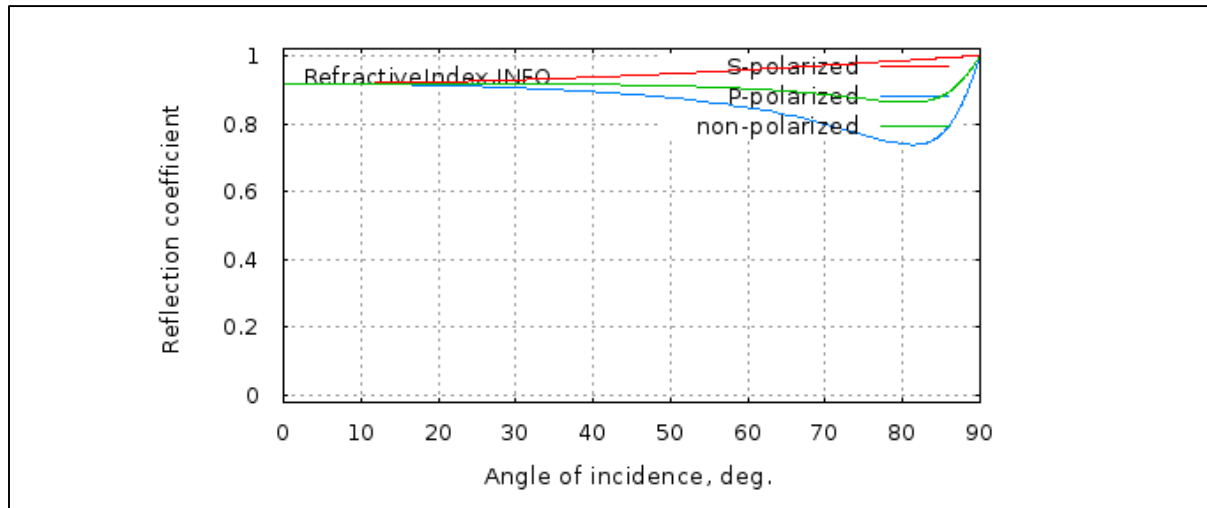


Abb. I.1: Fresnelreflexion von Aluminium mit $n = 0,99$, $n'' = 6,58$

I.2 Verwendete Einstellungen zur Tessellierung in Speos

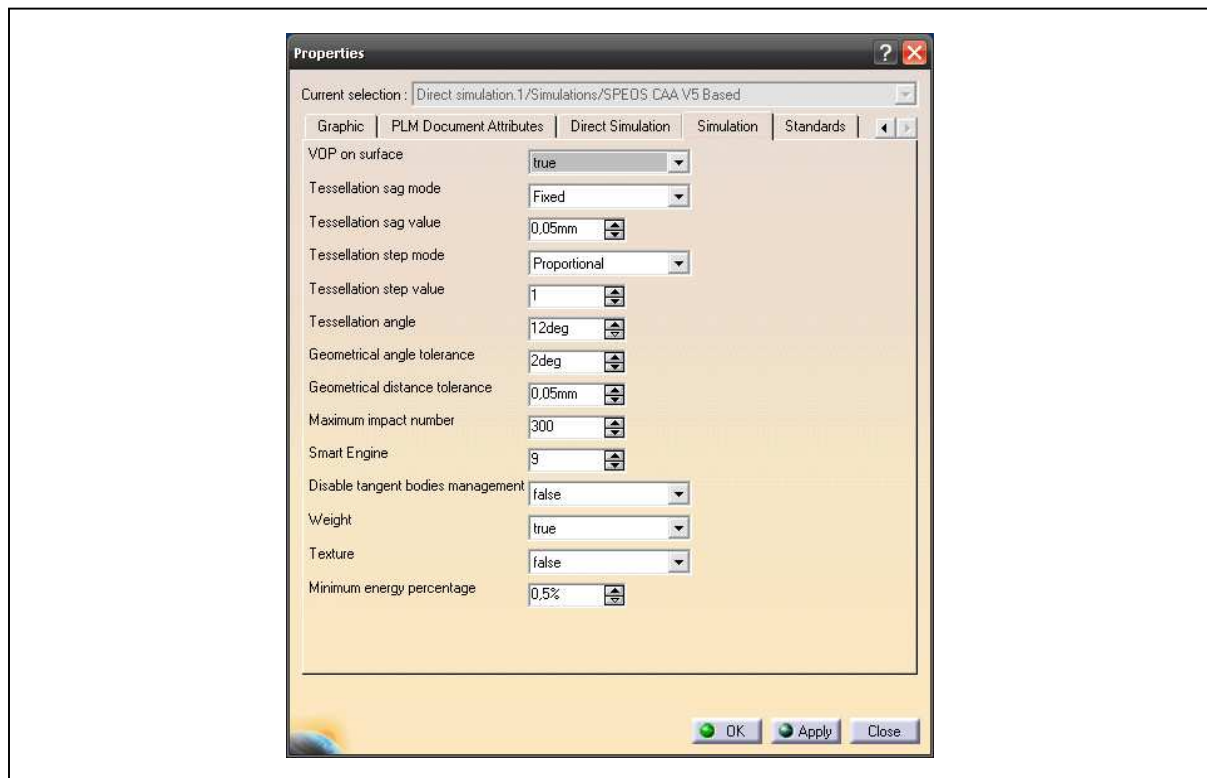


Abb. I.2: verwendete Einstellungen zur Tessellierung in Speos

I.3 Zur Ausrichtung simulierter Lichtverteilungen

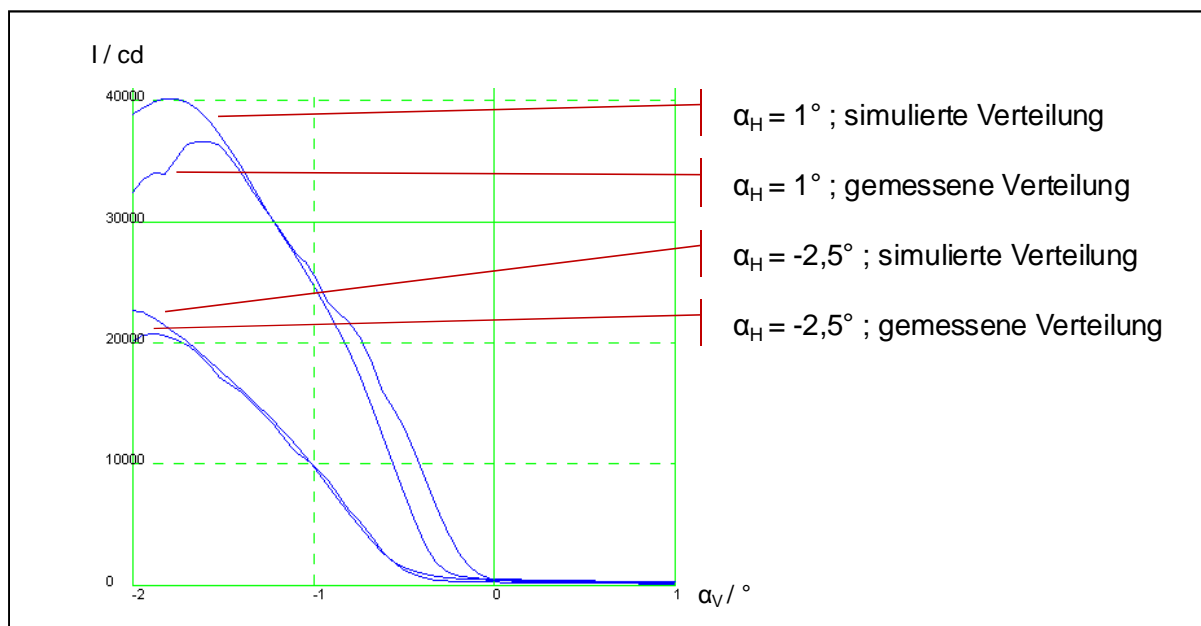


Abb. I.3: *Schnitte der gemessenen und simulierten Lichtverteilung –
Komponentenpaarung Lichtquelle und Reflektor*

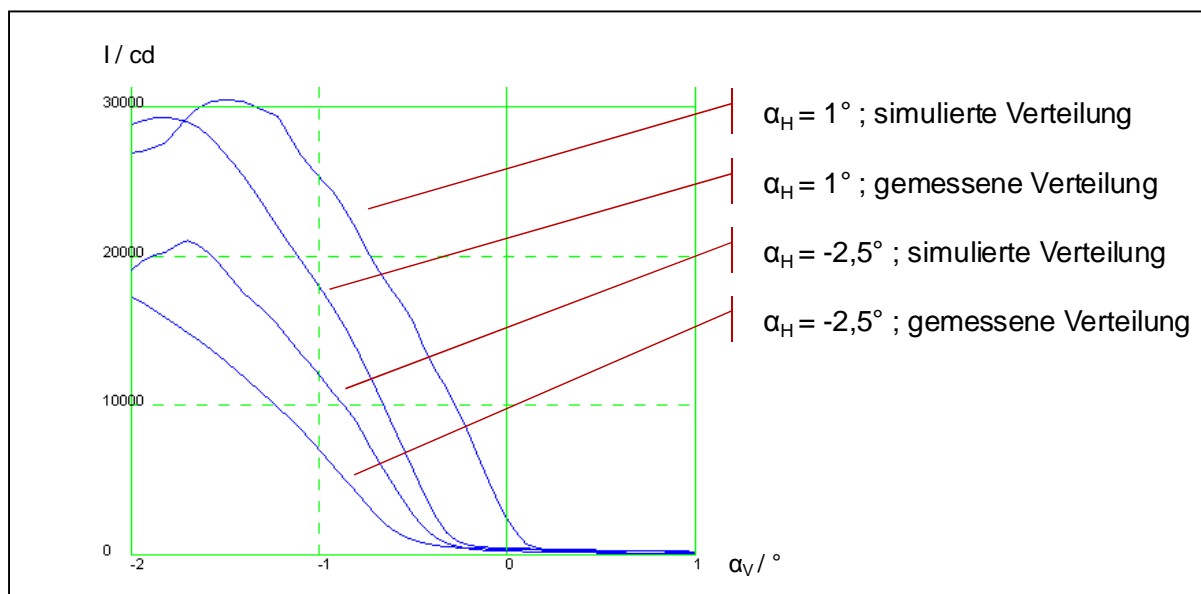


Abb. I.4: *Schnitte der gemessenen und simulierten Lichtverteilung – vollständiger
Scheinwerfer*

Thesen:

1. Die Bewertung von Kfz-Scheinwerfern auf Basis von Lichtverteilungen, die durch eine Messung erzeugt werden, kann auch mit Verteilungen durchgeführt werden, die aus der Lichtsimulation stammen. Dazu müssen die Funktion des Scheinwerfers und der Messmethode exakt in der Simulation nachgebildet werden.
2. Die wahrnehmungsbasierte Bewertung der Scheinwerferlichtverteilung durch den Fahrer kann weitgehend in Kriterien aufgegliedert werden. Zu diesen Kriterien existieren Berechnungsmethoden, die eine entsprechende Bewertung anhand von Lichtstärkeverteilungen beziehungsweise in 25 m Entfernung gemessenen Beleuchtungsstärkeverteilungen zulassen. Dabei können Lichtverteilungen aus der Messung und aus der Simulation gleichermaßen herangezogen werden.
3. Für die Bewertung der Streulichtverteilungen von Scheinwerfern sind keine geeigneten Berechnungsmethoden verfügbar. Methoden der Bildverarbeitung lassen eine Trennung, Klassifizierung und Bewertung von Streulichtartefakten zu, die richtungsunabhängig wirkt und die Kriterien der Wahrnehmung berücksichtigt.
4. Die Filterung von Abblendlichtverteilungen aus Messung und Simulation muss adaptiv arbeiten. Sie muss einerseits Maximalwerte und hohe Ortsfrequenzen wiedergeben können und andererseits das Rauschen in großen Winkelbereichen und niedrigen Ortsfrequenzen glätten. Die Glättung mittels Wavelets ist dafür geeignet.
5. Für die photometrische Typprüfung des Scheinwerfers mittels Fernfeld-Goniophotometer ist eine Analyse der Messunsicherheit möglich. Dafür ist eine Eingrenzung von Einflussgrößen hilfreich. Unter anderem können das Messobjekt als konstant betrachtet werden und das Goniometer ohne Abweichungen des Winkels innerhalb der Auflösung angenommen werden, um den Unsicherheitsbeitrag des Messgerätes in der Beleuchtungsstärke zu erhalten. Der Unsicherheitsbeitrag des Scheinwerfers kann mittels Messung mehrerer Exemplare und deren statistischer Analyse ermittelt werden. Die Genauigkeit der photometrischen Typprüfung gilt als Maßstab für die Genauigkeit der Lichtsimulation.
6. Die in der photometrischen Typprüfung nötige Ausrichtung der Hell-Dunkel-Grenze erfolgt visuell-manuell und kann deswegen nicht direkt in eine softwarebasierte Methode übertragen werden, die in der Lichtsimulation nutzbar ist. Die verfügbaren Grundlagen zur Bewertung der Qualität und Schärfe der Hell-Dunkel-Grenze sind aber ausreichend um eine softwarebasierte Methode zu entwickeln. Diese neue Methode kann eine höhere

Stabilität der Ausrichtung und eine bessere Vergleichbarkeit als bisherige Verfahren erreichen, wenn sie die Hell-Dunkel-Grenze in der Abblendlichtverteilung ganzheitlich bewertet und daraus ein globales Optimum der Position ermittelt.

7. Die Ausrichtung der Hell-Dunkel-Grenze muss für Abblendlichtverteilungen aus der Messung und der Simulation gleichermaßen erfolgen, wenn deren Werte verglichen werden sollen.
8. Die Lichtquelle im Scheinwerfer ist austauschbar und in ihrer lichttechnischen Funktion empfindlich hinsichtlich elektrischer und mechanischer Einflüsse. Marktübliche Produkte weisen unterschiedliche Geometrien auf, deren Abweichungen einen deutlichen Einfluss auf die Scheinwerferlichtverteilung haben. Derart abweichende Lichtquellen müssen einzeln modelliert werden, wenn der Scheinwerfer damit ausgestattet und bewertet werden soll.
9. Bei der Modellierung von Glühlampen muss das Streulicht enthalten sein, das bei der Reflexion der Wendel am Glaskörper und anderen Lampenbestandteilen entsteht, sonst sind große Abweichungen der Simulation der Abblendlichtverteilung, besonders oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze, zu erwarten.
10. Genarbte Oberflächen in Scheinwerfern beeinflussen das Streulicht eines Scheinwerfers in Abhängigkeit von ihrer Anordnung im Lichtweg, ihrem Reflexionsgrad und der Art der Narbung. Bei der Modellierung der Streulichteigenschaften der Narbung muss die Narbungsklasse, die sich auf einen Wert der Rauheit bezieht, genau so berücksichtigt werden, wie der Herstellungsprozess der Narbung im Werkzeug. Narbungen aus einem erodierten Werkzeug weisen aufgrund ihrer Form eine höhere Lichtstreuung auf als Narbungen aus einem geätzten Werkzeug.
11. Die Abhängigkeit der Breite einer mittels Gauß-Verteilung modellierten zweidimensionalen Lichtstreuung einer Narbung und der Rauheit R_a kann mit einem einfachen linearen Modell beschrieben werden.
12. Die Abweichungen der zur Lichtsimulation genutzten Programme untereinander können vernachlässigt werden, wenn kritische Einflussgrößen minimiert werden. Dazu gehören die Reduktion der Unterschiede durch die Repräsentation der Flächen im CAD, die Verwendung des gleichen Lichtquellenmodells und gleicher virtueller Sensoren sowie die Nutzung einfacher Modelle für die Materialien. Dann ist die Unsicherheit der Simulation hauptsächlich von der Anzahl der berechneten Strahlen abhängig.
13. Der Unsicherheitsbeitrag von Werten, die mittels bilinearer Interpolation benachbarter Pixel gewonnen werden, ist bei gleicher Strahlenanzahl höher, als Werte die ohne Interpolation aus nur einem Pixel ermittelt werden.

14. Die Verteilung der Unsicherheitswerte einer Abblendlichtverteilung aus einer Messung ist prinzipiell anders als die aus einer Simulation, da sie von anderen Einflussgrößen abhängt. Die Werte der Unsicherheitsbeiträge einer Simulation können für den überwiegenden Teil der Prüfpunkte einer Typprüfung ähnlich klein wie die einer Messung werden.
15. Die Übereinstimmung der Simulation mit der Messung einer Abblendlichtverteilung ist in dem Bereich der primären Lichtfunktion höher als im Bereich des Streulichtes, da sowohl mehr Strahlen in die Berechnung eingehen, als auch die Modellbildung einfacher ist.
16. Die virtuelle Typprüfung ist als Methode durchführbar, wenn alle Eigenschaften des Produktes nachgebildet werden. Das ist für Produkte aus einem stabilen Serienfertigungsprozess denkbar. Die Abweichungen eines neuen Produktes aus einem noch nicht stabilen Prozess mit unbekanntem Abweichungen können hingegen nicht in einer virtuellen Typprüfung abgesichert werden.
17. Die Integration der Lichtsimulation in den Entwicklungsprozess von Kfz-Scheinwerfern ist möglich. Sie erlaubt eine frühzeitige lichttechnische Absicherung des Produktes.

Erklärung gemäß Anlage 1 der Promotionsordnung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Bei der Auswahl und Auswertung folgenden Materials haben mir die nachstehend aufgeführten Personen in der jeweils beschriebenen Weise geholfen:

1. Herr Daniel Mensch (unentgeltlich), Softwareprogrammierung und Validierung zur Streulichtbewertung und zur Ausrichtung der Hell-Dunkel-Grenze
2. Herr Christian Ziehl (unentgeltlich), Softwareprogrammierung und Validierung zur Bewertung von Abblendlichtverteilung und Streulichtverteilung
3. Herr Christian Studeny (unentgeltlich), Messung und Modellierung der Streulichteigenschaften von genarbteten Oberflächen

Eine Bezahlung oben genannter Personen erfolgte nur im Rahmen der Anstellung durch die Volkswagen AG. Auf die Art der Hilfe wird in der Arbeit jeweils verwiesen. Die Personen waren im Zeitraum ihrer Unterstützung Studenten an der TU Ilmenau und sind derzeit weder an der TU Ilmenau noch in anderen Lehreinrichtungen tätig.

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen.

Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalte der vorgelegten Dissertation stehen. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich bin darauf hingewiesen worden, dass die Unrichtigkeit der vorstehenden Erklärung als Täuschungsversuch angesehen wird und den erfolglosen Abbruch des Promotionsverfahrens zu Folge hat.

Wolfsburg, den 29. November 2011

Henning Kiel