

Messsystemanalyse eines Leuchtdichtekamera-basierten Scheinwerferprüfstands

Schwanz, B., Marutzky, M., Kleinert, B., Elsner, S., Bogdanow, S., IAV GmbH, Rockwellstraße 16, 38518 Gifhorn

1. Einleitung

Seit mehreren Jahren nutzt IAV in der Abteilung Licht & Sicht die Methodik der kamerabasierten Leuchtdichte-Messtechnik um Lichtverteilungen von Scheinwerfern zu bewerten. Der Vorteil dieses indirekten Messverfahrens nach [1] liegt mitunter in der hohen Messgeschwindigkeit gegenüber einem Fernfeldgoniophotometer. Letzteres ist in der Lichtmesstechnik ein fest etabliertes Verfahren um Lichtstärkeverteilungskörper einzelner Komponenten aufzunehmen und deren Zulassungsfähigkeit nach gesetzlichen Anforderungen wie der ECE 112 zu prüfen. Dabei bestimmen die Genauigkeit und die Winkelauflösung die Messdauer. Richtet man den Blick auf die Lichtsysteme von heute und morgen, wird klar, dass immer komplexere Lichtverteilungen zu bewerten sind. Moderne Beleuchtungssysteme sind in der Lage sich dynamisch an die Umgebungsbedingungen anzupassen. Dazu werden ihre Lichtverteilungen aus einer Vielzahl an Einzelmodulen zusammengesetzt, die sich adaptiv ansteuern lassen. Mit steigender Komplexität steigt auch der Anspruch an die Messtechnik. Mithilfe innovativer Messverfahren auf Basis von Leuchtdichtekameras können auch dynamische Szenarien, wie für die Lichtfunktionen Kurvenlicht oder maskiertes Dauerfernlicht, kostenoptimiert und zeitsparend bewertet werden. Für diesen Fall wird bei IAV eine Messentfernung von 10 m bevorzugt.

In einer Messsystemanalyse wird die Messgenauigkeit des kamerabasierten Messverfahrens an einem Messschirm überprüft und mit dem konventionellen Verfahren, dem Fernfeldgoniophotometer verglichen. Anschließend wird die Stabilität, Nachvollziehbarkeit und Wiederholbarkeit an einer Messschirmmessung in 25 m Arbeitsabstand untersucht. Im letzten Kapitel dieses Papers ist der Vergleich der Messentfernungen 10 m und 25 m Untersuchungsschwerpunkt und soll zeigen, ob eine Reduzierung der von uns zur Erfassung eines größeren Winkelbereiches bevorzugten Messentfernung von 10 m die Schärfe der Hell-Dunkel-Grenze qualitativ beeinflusst.

2. Messumgebung und –verfahren zur Scheinwerferbewertung

2.1. IAV- Licht und Fahrerassistenzhalle

Mit der Licht- und Fahrerassistenzhalle der IAV ist eine optimale Messumgebung geschaffen worden um die photometrischen Kenngrößen von Fahrzeugscheinwerfern und auch komplexeren Systemen am Fahrzeug messtechnisch zu erfassen. Bedingt durch die Größe der Halle und der Präparation der Wände liegt das Streulichtniveau im vollständig abgedunkelten Zustand unterhalb der Nachweisgrenze der eingesetzten Messtechnik (Kapitel 3.1.). Mithilfe von Strahlenblenden und den Lichtfallen durch die Wandverkleidung, wird Störlicht absorbiert und zerstreut und somit ungewünschtes Fehllicht auf dem Messschirm auf ein Minimum reduziert. Der Hallenboden darf mit dem Fahrzeug befahren werden, somit können auch Gesamtsysteme vermessen werden. Für Einzelkomponenten steht ein eigenentwickelter Prüfstand zur Verfügung mit dem ein Scheinwerfer bzw. ein Scheinwerferpaar in den definierten Freiheitsgraden ausgerichtet werden kann (Abbildung 1). Durch eine Universalhalterung besteht die Möglichkeit verschiedene Scheinwerfermodelle zu fixieren.



Abbildung 1: IAV Scheinwerferprüfstand mit Universalhalterung [2]

2.2. Indirekte Messung am Messschirm

Die Erfassung der Lichtverteilung von Scheinwerfersystemen erfolgt nach dem Prinzip der indirekten Messung der Lichtverteilung auf einem Messschirm mithilfe der LMK 98-4 color der Firma TechnoTeam. Dabei wird das vom Scheinwerferlicht projizierte Leuchtdichtebild auf dem Messschirm von der Kamera erfasst und ausgewertet. Über das photometrische Entfernungsgesetz kann nun für jeden Bildpunkt die Leuchtdichte in die Lichtstärke umgerechnet werden:

$$I(L, k, z, \vartheta, \varphi) = \frac{L}{k} z^2 (\tan^2 \vartheta + \tan^2 \varphi + 1)^2 \cos \vartheta \cos \varphi \quad (1)$$

I	Lichtstärke
L	Leuchtdichte
E	Beleuchtungsstärke
k	Leuchtdichtekoeffizient ($k = L/E$)
z	Abstand Referenzpunkt des Scheinwerfers – Messschirm mit $z \parallel$ Referenzachse
ϑ	Horizontalwinkel
ϕ	Vertikalwinkel

2.3. Bewertungsverfahren

In den gängigen Entwicklungsprozessen werden die von einem Fernfeldgoniophotometer gemessene Lichtstärkewerte in die Simulationssoftware importiert und so eine Lichtstärkeverteilung auf einem virtuellen Messschirm in 25 m vor der Lichtquelle dargestellt. Zur Bewertung einer Abblendlichtverteilung werden die von der ECE-R 112 vorgegeben Prüfpunkte und Zonen mit den gemessenen Lichtstärkewerten abgeglichen. Für diese definierte Punkte und Zonen, gelten bestimmte Minimal- und Maximalwerte für die Lichtstärke. Die Zulassungsfähigkeit des Scheinwerfers hängt davon ab, ob die entsprechenden Toleranzbereiche eingehalten werden. In der unten aufgeführten Analyse wird insbesondere der B50L-Punkt betrachtet. Das Licht in diesem Punkt stellt den Blendungsanteil eines vorbeifahrenden Fahrzeuges in einem Begegnungsabstand von 50 m dar. Eine andere Darstellung bietet die Möglichkeit die Lichtverteilung eines Abblendlichts auf einer Fahrbahn zu bewerten. Hierbei strahlt der Scheinwerfer bei gegebener Anbauhöhe im Fahrzeug über eine virtuelle Straße. Da es hier noch keine einheitliche Bewertungsmethoden gibt, wird für diese Studie die 3 lux Isolinie als Bewertungskriterium nach der CIE 188:2010 genutzt. Der Schnittpunkt der 3 lux Isolinie mit dem rechten Fahrbahnrand liegt ungefähr bei 60 m vor dem Fahrzeug, nahe dem Schnittpunkt der Hell-Dunkel-Grenze mit der Fahrbahn-Ebene. In diesem Fall nehmen wir eine durchschnittliche Scheinwerfer-Anbauhöhe von 0,65 m an.

3. Fehlerbudget - Vergleich 25m-Messung mit CIE

Die Positioniergenauigkeit des Prüfstandes fließt in der Betrachtung der goniometrischen Winkel mit ein und werden nicht gesondert diskutiert.

Im Folgenden werden die wichtigsten Fehlerquellen hervorgehoben.

3.1. Streulichtniveau

Durch die besondere Innenausstattung der Licht- und Fahrerassistenzhalle ist es möglich das Streulicht auf ein geringes Niveau zu halten. Im verdunkelten Zustand liegen die am Messschirm gemessenen Werte unterhalb der Nachweisgrenzen der verwendeten Messgeräte, d.h. für das verwendete Photometer der Klasse L unter

0,0001 lux. Bei eingeschaltetem Scheinwerfer werden die Reflexionen durch Boden und Decke auf den Messschirm durch Strahlenblenden reduziert. Das restliche Streulicht am Messschirm beträgt dann nur noch ca. 0,01 lux, und liegt damit weit unter der maximalen Beleuchtungsstärke über der Hell-Dunkel-Grenze von 0,1 lux.

3.2. Temperaturstabilität

Aufgrund der Dimension der Messhalle verläuft eine Temperaturänderung hier sehr träge. Ursachen für solch eine Temperaturänderung innerhalb einer Messeinheit können durch die Messtechnik und der Fahrzeugtechnik ausgelöst werden. Sind für beide Variablen die Betriebstemperaturen eingepegelt, konnte für einen Temperaturbereich von 18°C bis 23°C kein signifikanter Einfluss auf die Messergebnisse festgestellt werden. Durch eine Temperaturveränderung von 5 K wird der Fehler auf die photometrischen Messgrößen auf < 1% geschätzt.

3.3. Stabilität der Betriebsstromversorgung des Scheinwerfers:

Die Stromquelle muss für einen Halogenscheinwerfern mit maximaler Stromänderung von 0,005 A konstant sein. Eventuelle Abweichungen müssen durch geeignete Messtechnik nachgewiesen werden. Daraus ergibt sich eine Abweichung von < 0,1 % bei den photometrischen Größen.

3.4. Abschätzung photometrischer Fehler

Zur Abschätzung des photometrischen Fehlers wird die Gleichung (1) bis ins lineare Glied entwickelt und die Fehlerquadratsumme gebildet:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{1}{I} \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial I(x_0)}{\partial x_0} \Delta x_i \right)^2} \quad (2)$$

Die einzelnen Fehlergrößen werden wie folgt abgeschätzt:

Messschirm 10 m bzw. 25 m:

$$dL/L = 0,03$$

$$dk/k = 0,04$$

$$dz = 0,02 \text{ m}$$

$$d\phi = 0,05^\circ \text{ bei } \phi = 10^\circ \text{ bzw. } 3,5^\circ$$

$$d\vartheta = 0,05^\circ \text{ bei } \vartheta = 30^\circ \text{ bzw. } 10^\circ$$

Der zu erwartende photometrische Fehler beträgt für den 10 m und für den 25 m entfernten Schirm $\Delta I/I = 0,05$ (5 %).

Im Vergleich dazu wird die photometrische Genauigkeit eines Fernfeldgoniometers auf 0,03 geschätzt, da der Einfluss „Leuchtdichtekoeffizient Messschirm“ entfällt.

3.5. Effekt des photometrischen Fehlers auf die Lichtbewertung

Die photometrische Messunsicherheit von 5 % am Messschirm im Vergleich zu 3 % auf dem Fernfeldgoniometer gefährdet die Überprüfbarkeit der Gesetzeskonformität der Scheinwerferlichtverteilung nicht, zumal auch die ECE Regularien Diskrepanzen zu den Sollwerten – je nach Messpunkt – von 10 % bis 30 % tolerieren (ECE 112). Vielmehr ist es relevant, dass die Empfindlichkeit des Messverfahrens ausreichend ist, Beleuchtungsstärkewerte in der Größenordnung von 0,1 lux oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze nachzuweisen. Dieses ist am Messschirm gegeben, wie die Untersuchung unter Kapitel 4 zeigt.

Wie in Kapitel 2.3. beschrieben, sind die virtuellen Isoluxlinien bei dieser Methode ein geeignetes Bewertungskriterium. In Tabelle 1 ist geometrisch über $l = Er^2$ mit $E = 3$ lux, $l = \text{konst}$, $r^2 = h^2 + d^2$ abgeschätzt, wie sich bei einer Einbauhöhe $h = 0,65$ m bei photometrischen Fehlern von 3 % und 5 % die Unsicherheit der Lage der 3 lux-Linie bei 60 m ergibt.

Tabelle 1: Auswirkung der photometrischen Unsicherheit $\Delta d/d$ auf die Lage der 3 lux- Isolinie bei einer Scheinwerfer-Anbauhöhe von 0,65 m.

Verfahren	Photometrische Unsicherheit	d (Lage der 3 lux-Linie)	Unsicherheit $\pm \Delta d$	$\Delta d/d$ (%)
Fernfeldgoniometer	3 %	60 m	1,2 m	2,0 %
Messschirm	5 %	60 m	1,6 m	2,7 %

3.6. Auswirkung von Winkelfehlern und der Winkelauflösung

Während bei einem Fernfeldgoniometer die gewünschte Winkelauflösung bis maximal $0,01^\circ$ variabel vorgegeben werden kann, wird sie beim kamerabasiertem Messen durch die Auflösung des Sensors, das Objektiv und die Messgeometrie beim Transformieren aus dem Kamerakoordinatensystem in das Scheinwerferkoordinatensystem bestimmt. In den von uns verwendeten Messgeräten erhalten wir für den 25m entfernten Messschirm eine Winkelauflösung (25 mm-Objektiv) von $0,015^\circ$ und für den Schirm in 10 m Messentfernung (8 mm-Objektiv) $0,05^\circ$.

Die oben angegebenen Fehler $d\phi = 0,05^\circ$ bzw. $d\theta = 0,05^\circ$ beziehen sich auf den Fehler bei der Justierung des Scheinwerfers bzw. Prüfstandes mittels Ausrichtung der Hell-Dunkel-Grenze. Es entsteht jedoch auch ein Fehler bei der Platzierung der Kamera. Zwar ist die Leuchtdichte entfernungsunabhängig und aufgrund des lambertartigen Verhaltens der Messschirme im betrachteten Winkelbereich auch winkelunabhängig, doch können Fehler bei der Transformation vom Kamerakoordinatensystem ins Scheinwerferkoordinatensystem durch Deplatzierung der Kamera auftreten. Durch eine Kalibrationsmessung zur Zuordnung Pixel \rightarrow goniometrisches Winkelpaar wird der Fehler minimiert und beträgt am 25m Schirm maximal $0,002^\circ$, beim 10 m-Schirm maximal $0,004^\circ$. Die insbesondere bei Verwendung des 8 mm Objektivs auftretenden Abbildungsfehler werden ebenso

durch die Kalibration erfasst. Eine Abweichung vom Lambertverhalten des Messschirms konnte im betrachteten Winkelbereich von $\pm 30^\circ$ nicht nachgewiesen werden.

Tabelle 2: Räumliche Auflösung Δs der Isoliniendarstellung auf der virtuellen Straße bei 60 m.

Verfahren	Winkelauflösung	d (Lage der 3 lux-Linie)	Räumliche Auflösung Δs bei $d = 60$ m
Fernfeldgoniometer	0,01°	60 m	1,0 m
Fernfeldgoniometer 25m-Messschirm	0,015°	60 m	1,5 m
Fernfeldgoniometer 10m-Messschirm	0,05°	60 m	5,3 m

3.7. Einfluss der Messentfernung unter Verwendung des photometrischen Entfernungsgesetzes

Bei dem indirekten Messverfahren, wie auch am Fernfeldgoniometer, wird die Lichtaustrittsfläche des Scheinwerfers als Punktlichtquelle angenommen um das photometrische Entfernungsgesetz $I = E r^2$ einzuhalten. Bei ausreichend großem Arbeitsabstand, z.B. Messschirm – Lichtquelle, wird der dadurch entstandene Fehler kleiner. Fernfeldgoniometer sind generell auf einer Messentfernung von 25 m eingestellt, ebenso wird unsere Messung am Messschirm bei 25 m durchgeführt. Wenn Lichtverteilungen eines größeren Winkelbereiches erfasst werden sollen, kam die reduzierte Messentfernung von 10 m zum Einsatz. Aus theoretischer Sicht würde dabei die Genauigkeit der Messwerte im Vergleich zu 25 m abnehmen. In Kapitel 5 wird dazu die Vergleichsmessung im Detail diskutiert.

4. Messsystemanalyse

In diesem Kapitel wird eine Messsystemanalyse des Scheinwerferprüfstandes in der IAV Licht- und Fahrerassistenzhalle betrachtet. Exemplarisch wird hier auf die Messschirmgeometrie mit 25 m Messentfernung eingegangen.

4.1. Anforderungen

Für die Diskussion der Messgenauigkeit werden als statistische Kennwerte Mittelwerte und Standardabweichungen betrachtet. Weiterhin wird kontrolliert, ob sich die Änderungen dieser innerhalb der oben herausgearbeiteten Fehler bewegen und plausibel sind. Dazu betrachten wir die Beleuchtungsstärkeverteilung am Messschirm und die 3 lux-Isolinie aus der Projektion auf der virtuellen Straße.

4.2. Genauigkeit und Stabilität

Das Messobjekt (Halogen-Abblendlichtscheinwerfer) wird einmal aufgebaut und einjustiert. Nach ca. 30 minütigen „Einbrennens“ wird alle 30 s eine Messung gemacht, insgesamt 40 Messungen. Aus den 40 Messungen werden Mittelwert und Standardabweichung gebildet. Zum Nachweis der Stabilität werden jeweils zusätzlich die ersten 10 und die letzten 10 Messungen gemittelt und kontrolliert, ob ihr Mittelwert vom Gesamtmittelwert abweicht. Betriebsstrom- und spannung werden sekundlich aufgezeichnet, um die Konstanz der Stromversorgung nachzuweisen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 1 illustriert. Die sich ergebene Streuung ist marginal und es ist kein Drift erkennbar, der Messaufbau ist stabil.

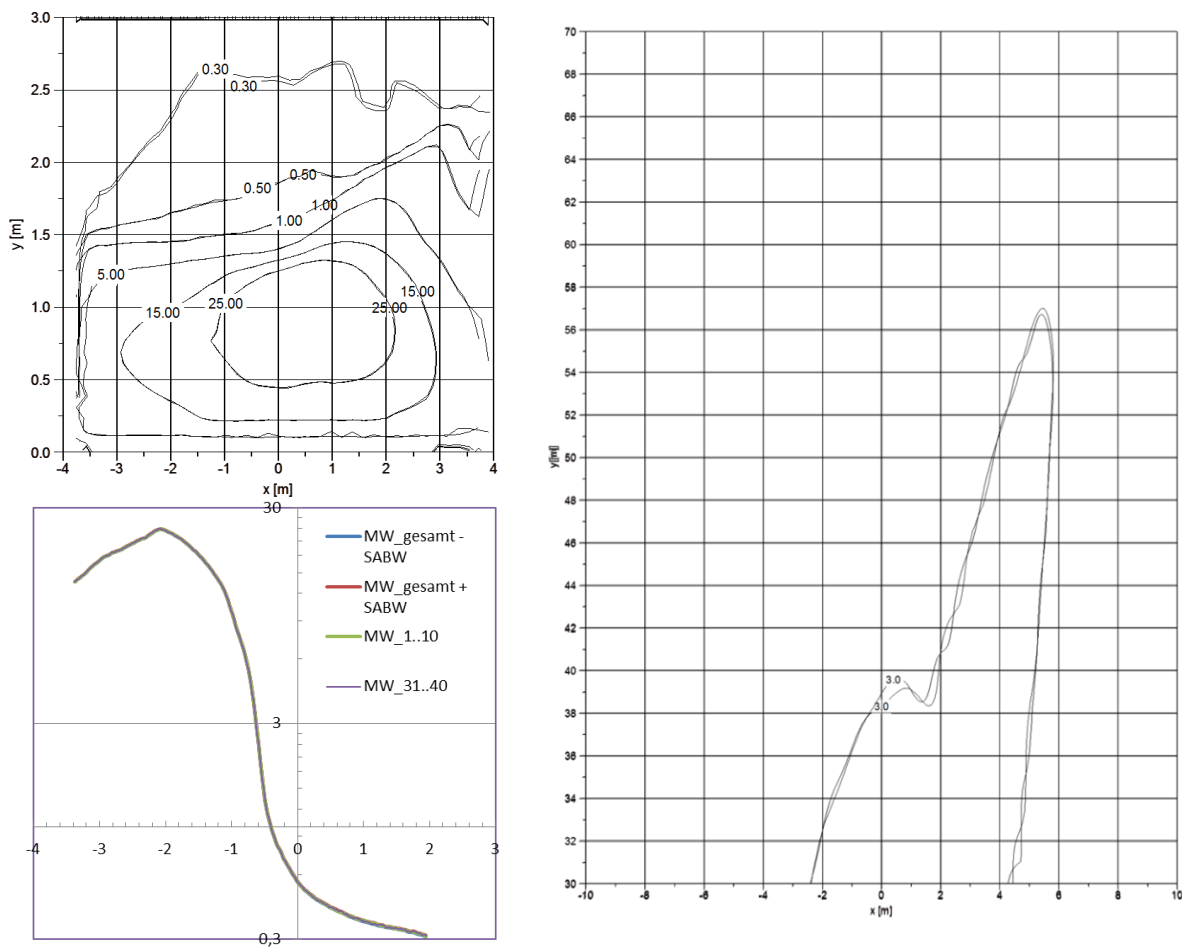


Abbildung 2: Stabilität – oben links: Isolinien am Messschirm, rechts: 3 lux-Isolinie auf der virtuellen Straße Mittelwert+Standardabweichung und Mittelwert-Standardabweichung, links unten: Schnitt durch die Vertikallinie bei -3,5° am ECE-Messschirm [3].

4.3. Wiederholbarkeit

In dieser Messreihe führt eine Person die Messung dreimal durch. Ziel ist, die sich ergebenden Unsicherheiten durch die Toleranzen des Messaufbaus zu ermitteln (siehe Abbildung 2). Im B50L-Punkt ergibt sich ein Mittelwert von 0,424 lux (13,2 V) und eine Standardabweichung von 0,008 lux (2%-Abweichung), die Reichweite der 3 lux-Linie weicht um ± 2 m vom Mittelwert ab. Dieses entspricht den zuvor abgeschätzten Unsicherheiten.

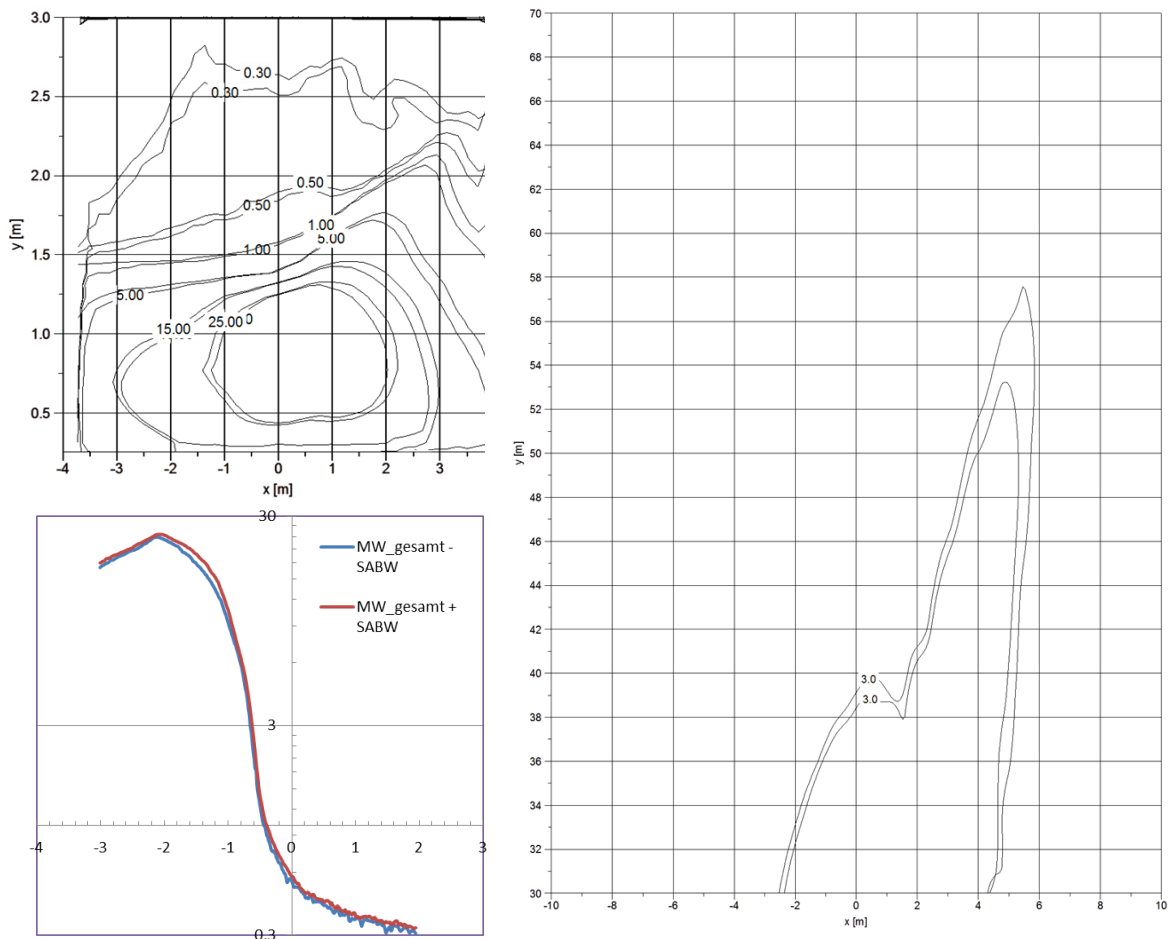


Abbildung 3: Wiederholbarkeit – oben links: Isolinien am Messschirm, rechts: 3 lux-Isolinie auf der virtuellen Straße Mittelwert+Standardabweichung und Mittelwert-Standardabweichung, links unten: Schnitt durch die Vertikallinie bei -3,5° am ECE-Messschirm [3].

4.4. Nachvollziehbarkeit

Hier wird die Messung jeweils einmal von drei verschiedenen Personen durchgeführt, um eine Abschätzung zu bekommen, welche Unsicherheit der Versuchingenieur einbringt. Für den B50L-Punkt ergibt sich ein Mittelwert von 0,421 lux mit einer Standardabweichung von 0,003 lux ($< 1\%$), die Reichweite der 3 lux-Linie in der Straßendarstellung beträgt in allen Versuchen 55 m. Im Vergleich zur Messreihe unter Kapitel 4.2. zeigt dies, dass der Durchführende keinen signifikanten Einfluss hat.

5. Vergleich verschiedener Messdistanzen 10m vs. 25m

Aufgrund des geringeren Arbeitsabstandes von 10 m kann angenommen werden, dass sich die Qualität der Lichtverteilung auf dem Messschirm nachweisbar reduziert. Im Folgenden soll die Hypothese an drei verschiedenen Scheinwerfersystemen (Halogen-Reflexionssystem, Xenon-Projektionssystem, LED-Modul-System) überprüft werden. Der Vergleich der zwei Arbeitsabstände erfolgt hauptsächlich anhand der Hell-Dunkel-Grenze, da hier eher ein direkter Einfluss aufgrund der Strahlenverteilung durch die Systeme vermutet wird. Außerdem werden die Lichtstärkewerte nach ECE-R 112 verglichen.

Bei jedem Durchlauf werden pro Scheinwerfersystem 3 Leuchtdichteaufnahmen erfasst und anschließend gemittelt. Über den bekannten Leuchtdichtekoeffizienten des Messschirms werden diese in Beleuchtungsstärkeverteilungen umgewandelt und mithilfe der IAV Transformationssoftware wiederum in eine Lichtstärkeverteilung transformiert um die Messungen anhand der vorgeschriebenen Grenzwerte zu vergleichen. Der Vergleich des B50L-Punkt zeigt, dass die Werte bei 10 m im Mittel weniger als 0,02 lux unter denen bei 25 m liegen. Auch beim Vergleich anderer relevanter Messpunkte/Zonen sind die Abweichungen im zulässigen Toleranzbereich und erheben damit keine Benachteiligung der Qualität der Messschirmmessungen mit reduziertem Arbeitsabstand.

Wie oben erwähnt untersuchen wir nun speziell den Bereich der Hell-Dunkel-Grenze. Hierzu betrachten wir den Steigungsverlauf an der v-v-Linie. Für alle drei Scheinwerfersysteme ist in Abbildung 4 die Steigung in $\text{cd}/^\circ$ entlang der v-v-Linie in Diagrammen visualisiert, vorab wurde der Betrag der Steigung gebildet. Der interessante Winkelbereich um die Hell-Dunkel-Grenze zeigt bei dem Xenon-System kaum Abweichungen um die $\pm 0,4^\circ$ zwischen den Messdistanzen. Im Vergleich am Halogen-System zeigt der Bereich unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze bei 25 m Distanz einen schärferen Übergang Richtung Maximum. Oberhalb der HDG sind die Abweichungen visuell kaum wahrnehmbar und haben somit keine unmittelbare Beeinflussung auf die Beurteilung der HDG. Bei Betrachtung des LED-Systems, wird sehr deutlich, dass auftretende Abweichungen zwischen den Messentfernungen systemabhängig sind. Bei 10 m zeichnet sich die HDG etwas weicher ab als bei 25 m. Die Ursache findet sich im System selbst. Während bei einem einfachen Projektionssystem wie bei einem Xenon-Scheinwerfer, die Aufweitung des Lichtstrahlenbündels schon durch die Linse vollständig abgeschlossen ist, werden bei Reflexionssystemen und insbesondere bei Systemen aus Einzelmodulen erst ab einer bestimmten Entfernung zum Scheinwerfer die Strahlen vollends aufgeweitet und bilden die für das Abblendlicht typische Lichtverteilung. Damit kann die Beurteilung der HDG für bestimmte Scheinwerfersysteme durch eine reduzierte Messdistanz verfälscht werden.

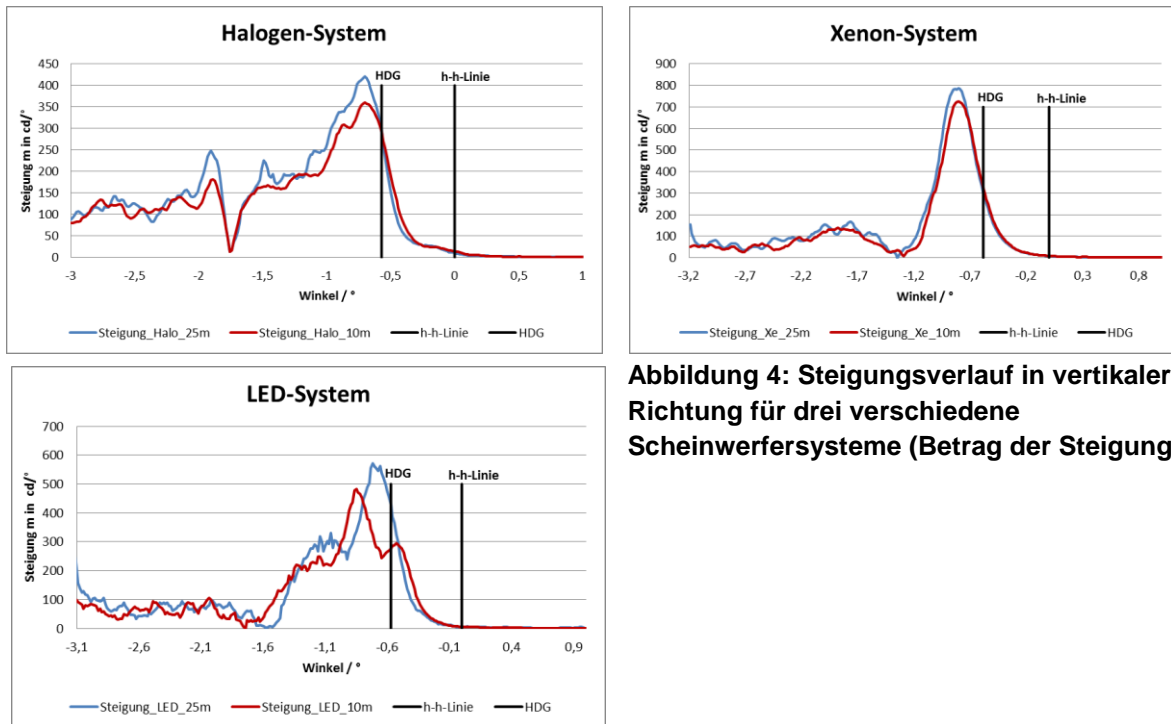


Abbildung 4: Steigungsverlauf in vertikaler Richtung für drei verschiedene Scheinwerfersysteme (Betrag der Steigung)

6. Fazit/Ausblick

In der Diskussion über die Messgenauigkeit einer Leuchtdichtebasierten Messmethode, konnte mit einer Messsystemanalyse gezeigt werden, dass mit dem kamerabasierte Messverfahren an einem Messschirm in 25 m qualitative Bewertungen nach den gesetzlichen Regularien durchgeführt werden können. Die Messgenauigkeit und deren Reproduzierbarkeit konnten messtechnisch nachgewiesen werden. Bezüglich der Zeit- und Kostenersparnis wird dieses Verfahren immer mehr in den Fokus rücken. Um die Performance von dynamischen Lichtszenarien zu bewerten, kann durchaus auch eine reduzierte Messentfernung von 10 m Anwendung finden.

[1] Schwanengel, C. et al., Spatially resolved luminance measuring compared with illuminance measurements of automotive headlamps, Proceedings 6th ISAL, Darmstadt, 2005

[2] Heinrichs, A., Prototypischer Aufbau eines modularen Scheinwerferprüfstandes, Masterthesis, Ostfalia, 2014

[3] Marutzky, M. et al., accuracy, reproducibility and repeatability of fast methods for head lamp evaluation, CIE Division 2 Tutorial, Vienna, 2014