

Vereinfachte lichttechnische Vermessung der ortsfesten Straßenbeleuchtung bei Dunkelheitsunfällen

Lukas Liegener, Prof. Dr. Stephan Völker

Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik, Fakultät IV, Elektrotechnik und Informatik, Einsteinufer 19, 10587 Berlin

Zusammenfassung

Bereits 1992 stellte die Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen Straßenbeleuchtung und Unfallhäufigkeit fest [1]. Auch Untersuchungen des Fachgebietes Lichttechnik an der TU Berlin weisen auf einen Zusammenhang zwischen Unfallzahlen und Straßenbeleuchtung hin [2] [3]. Zur Senkung jener Verkehrsunfälle, welche vermutlich aus einer unzureichenden Beleuchtung resultieren, müssen diese Verkehrsorte zuerst durch photometrische Messungen identifiziert werden. Daher sollte zukünftig an Unfallorten eine routinemäßige Überprüfung der Einhaltung der normativen Vorgaben zur Straßenbeleuchtung (DIN EN 13201) erfolgen.

Gängige Messgeräte/verfahren, die dies ermöglichen, sind teuer und/oder brauchen viel Zeit in der Anwendung. In dem von der Bundesanstalt für Straßenwesen finanzierten Projekt wurden deshalb folgende drei, vereinfachte Messverfahren entwickelt:

1. Ein elektrisches Fahrzeug zur Messung der Beleuchtungsstärkeverteilung, welches über eine Webapplikation gesteuert wird.
2. Ein Leuchtdichtenormal, mit dessen Hilfe eine Abschätzung der Fahrbahnleuchtdichte ermöglicht wird.
3. Die Kalibrierung einer Digitalkamera zur Messung von Leuchtdichten.

Schlagwörter: Straßenbeleuchtung, Messtechnik, Dunkelheitsunfälle, Verfahrensentwicklung

1 Einleitung

In Bezug auf eine normgerechte Straßenbeleuchtung wird in den meisten Fällen die DIN 13201 [4], [5], [6] zu Rate gezogen. Unter anderem teilt sie die Verkehrszonen nach Parametern wie der Art der Verkehrsteilnehmenden und deren Geschwindigkeit, Anzahl der Fahrbahnstreifen und weiteren Einflussfaktoren in Kategorien (M, P, C) ein.



Diese werden weiter unterteilt und mit photometrischen Mindestanforderungen versehen. Eine Auswahl der einzuhaltenden Parameter ist in den dargestellten Tabellen (1-3) zu sehen.

M-Klasse	Fahrbahnleuchtdichte (trockener Zustand)		P-Klasse	Horizontale Beleuchtungsstärke		C-Klasse	Horizontale Beleuchtungsstärke	
	\bar{L} [Min. Wartungswert] cd/m^2	U_o [Mindestwert]		\bar{E} [Min. Wartungswert] lx	E_{min} [Wartungswert] lx		\bar{E} [Min. Wartungswert] lx	U_o [Mindestwert]
M1	2,00	0,40	P1	15,0	3,00	C0	50	0,40
M2	1,50	0,40	P2	10,0	2,00	C1	30	0,40
M3	1,00	0,40	P3	7,50	1,50	C2	20,0	0,40
M4	0,75	0,40	P4	5,00	1,00	C3	15,0	0,40
M5	0,50	0,35	P5	3,00	0,60	C4	10,0	0,40
M6	0,30	0,35	P6	2,00	0,40	C5	7,50	0,40

Tabelle 1: Ausschnitt der M-Beleuchtungsklassen [5]

Tabelle 2: Ausschnitt der P-Beleuchtungsklassen [5]

Tabelle 3: Ausschnitt der C-Beleuchtungsklassen [5]

Ziel des von der Bundesanstalt für Straßenwesen finanzierten Projektes (FE 82.0791) war es, eine direkte, routinemäßige Überprüfung der Beleuchtungssituation an nächtlichen Unfallstellen zu ermöglichen. Hierfür wurden Verfahren entwickelt, mit denen die photometrischen Daten an Unfallstellen bei Dunkelheitsunfällen praktikabel und zuverlässig erhoben werden können. Im Rahmen der Unfallrekonstruktion kann so eine erste Einschätzung erfolgen, ob die normativen Vorgaben an die Beleuchtung eingehalten wurden.

2 Methodik für die Entwicklung der Messverfahren

Zu Beginn des Projektes wurde eine Anforderungsliste erstellt. Zu ihnen gehörte ein möglichst niedriger Zeitaufwand bei der Durchführung der Messung, ein Budget der jeweiligen Messverfahren von etwa 1000 €, möglichste niedrige Messunsicherheiten und eine einfache Anwendbarkeit. Die Vor- und Nachteile möglicher Verfahren wurden mit Hilfe eines morphologischen Kastens einander gegenübergestellt. Im Resultat wurden die drei, im Folgendem genauer beschriebenen, Messverfahren umgesetzt.

3 Beleuchtungsstärkemessung mittels elektrischem Mini-Fahrzeug

Für die Beleuchtungsstärkemessung mit Hilfe eines elektrischen Messfahrzeugs (Abbildung 1) spielen verschiedene Komponenten zusammen (Abbildung 2). Herzstück des Messfahrzeugs ist ein in Python programmierter Webserver auf einem leistungsfähigen Microcontroller (Raspberry pi 4B), welcher mit Hilfe eines Hotspots über ein Smartphone oder Laptop erreicht werden kann, sobald das Fahrzeug gestartet wird. Neben der Kommunikation zum Nutzer hat der Webserver zwei

Aufgaben. Zum einen kommuniziert er mit einem weiteren Microcontroller (Thunderborg), welcher für die Ansteuerung der Motoren verantwortlich ist. Über die GUI des Webservers ist es so möglich, komplexe Bewegungen, wie Vorwärts-/Rückwärts-/Kurvenfahren und Drehungen durchzuführen. Zum anderen kümmert sich der Webserver um die Kommunikation mit dem Datenerfassungssystem. Dieses ist in der Lage, Spannungen des angeschlossenen Beleuchtungsstärkemesskopfes mit einer sehr hohen Datenrate (100kS/s) auszulesen.

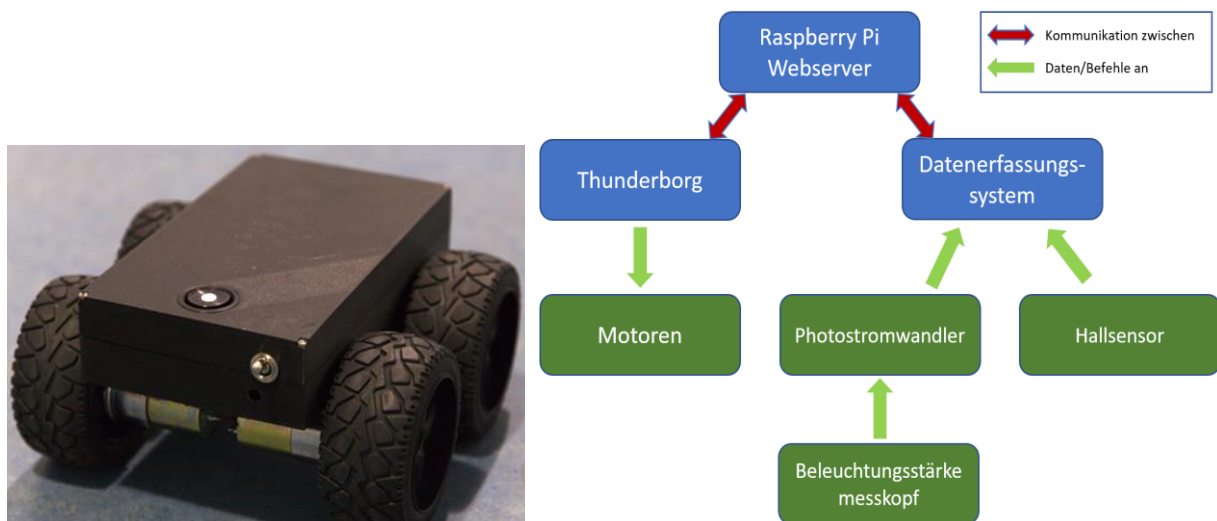


Abbildung 1: Elektrisches Beleuchtungsstärkemessfahrzeug

Abbildung 2: Zusammenspiel der Komponenten im Messfahrzeug

Auf den Sensor des Beleuchtungsstärkemesskopfes auftreffendes Licht resultiert in einem dazu proportionalen Photostrom. Dieser wird mit Hilfe des Photostromwandlers in eine Spannung umgewandelt, anschließend vom Datenerfassungssystem aufgenommen und in eine Beleuchtungsstärke umgerechnet. Zur Bestimmung der Beleuchtungsstärke werden über 40 ms mit der oben genannten Datenrate Beleuchtungsstärken ermittelt und der Durchschnitt berechnet. Die 40 ms entsprechen dabei der doppelten Periodendauer der Netzfrequenz (50 Hz). Der Messzeitpunkt wird durch einen Hallsensor am Gehäuse und einen Magneten am Rad ermittelt. In Abhängigkeit des Radumfang resultiert daraus ein Abstand zwischen den Messpunkten von ca. 33 cm. Die Messung hängt damit nicht von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs ab, und das Fahrzeug kann während der Messung gebremst und angehalten werden.

Zur Ermittlung der mittleren Beleuchtungsstärke der Fahrbahn wird das Messraster der DIN 13201-3 [6] in leicht angepasster Form verwendet. In Abbildung 3 ist ein typisches Messraster nach DIN 13201-3 (schwarze Kreuze) zu sehen. Ebenfalls abgebildet sind die Messrasterpunkte des neuen Verfahrens (kleine farbige Kreuze), welche eine deutlich höhere örtliche Auflösung liefern.

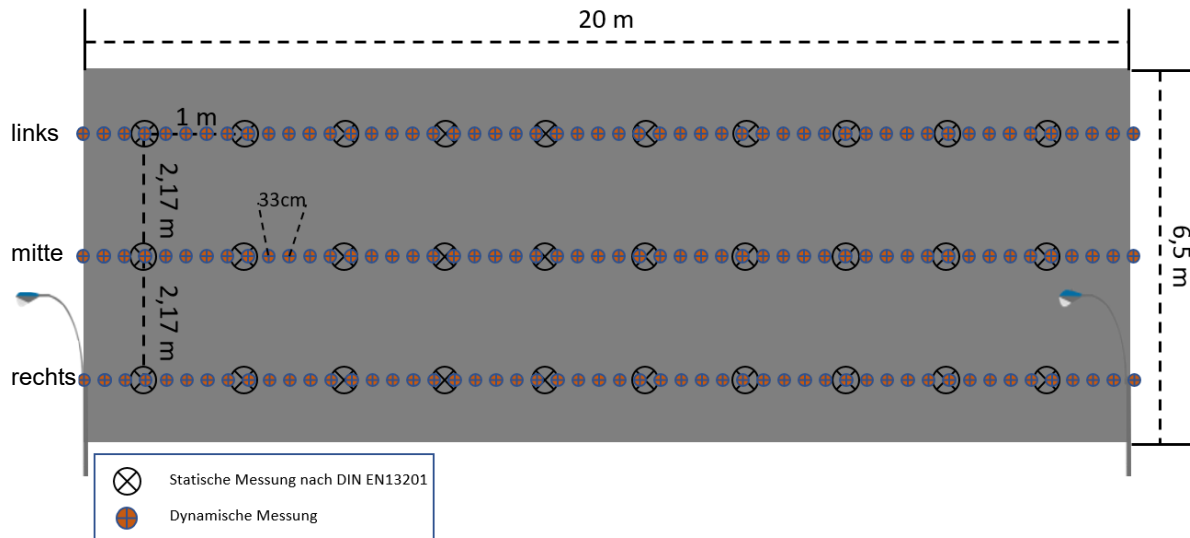


Abbildung 3: Messraster aus der DIN 13201-3 [6] und für dynamische Messung

Abbildung 4 zeigt die grafische Darstellung einer Beispielmessung am LED-Laufsteg (Berlin). Dabei werden die Beleuchtungsstärken in der mittleren Fahrbahnspur über die Entfernung zwischen zwei Masten (20 m) dargestellt. Zusammen mit den Beleuchtungsstärken der weiteren Spuren kann die mittlere sowie die minimale Beleuchtungsstärke ermittelt werden. Diese geben Aufschluss darüber, welche Mindestanforderungen der DIN 13201-2 eingehalten wurden.

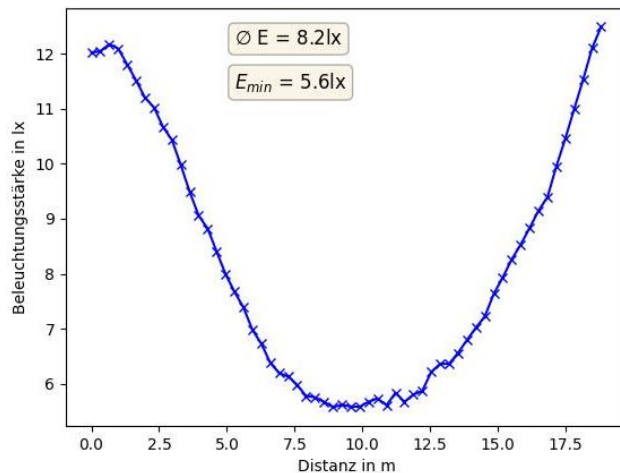


Abbildung 4: Beispielmessung am LED-Laufsteg (mittlere Fahrbahnspur)

4 Leuchtdichteabschätzung mittels Leuchtdichtenormal

Für eine näherungsweise Abschätzung der am Unfallort vorherrschenden Leuchtdichte wurde ein Leuchtdichtenormal entwickelt (Abbildung 5). Dieses zeigt an einem Diffusor eine homogene Leuchtdichte, welche mit der Leuchtdichte der umliegenden Fahrbahnoberfläche abgeglichen werden kann. Um den Einfluss fremder Lichtquellen auf die Leuchtdichte des Leuchtdichtenormal zu reduzieren, wird bei der Anwendung zusätzlich ein Trichter vor die Diffusorscheibe geschraubt.

In der oberen Abdeckung verbaut befindet sich die in Abbildung 5 (Mitte und rechts) dargestellte Platine. Diese wurde am Fachgebiet Lichttechnik der TU Berlin entwickelt und bestückt. Der auf der Platine installierte Microcontroller (ESP32) kann ebenfalls über den für das Messfahrzeug programmierten Webserver bedient werden, um so

die vier verbauten, weißen LEDs in sechs Stufen einzustellen. Diese Stufen wurden so gewählt und kalibriert, dass die resultierenden Leuchtdichten denen der M-Beleuchtungsklassen aus der DIN 13201-2 entsprechen.

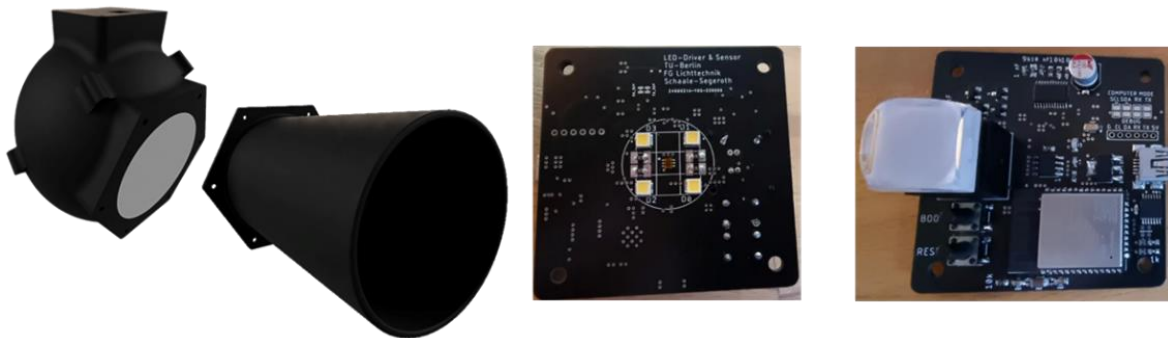


Abbildung 5: Leuchtdichtenormal mit Trichter (links), verbaute Platine (Mitte Unterseite, rechts Oberseite)

Im Anwendungsfall sollte das Leuchtdichtenormal in der Mitte der Fahrbahnspur zwischen den Masten platziert werden, sodass die Diffusorscheibe aus einer Entfernung von 40 m und einer Höhe von einem Meter gut zu erkennen ist. Zur Abschätzung der M-Beleuchtungsklasse sollten die Stufen nacheinander eingestellt werden und die Helligkeit der Diffusorscheibe jeweils mit der Helligkeit der umliegenden Fahrbahndeckschicht abgeglichen werden. Die Auswahl der Stufe mit der ähnlichsten Helligkeit kann danach auf dem Webserver gespeichert werden.

5 Messung mittels kalibrierter Digitalkamera

Um zu untersuchen, ob Leuchtdichten auch mittels einer Digitalkamera zuverlässig erhoben werden können, wurde eine Digitalkamera Canon EOS 5D Mark II (Abbildung 6) von der Firma Image Engineering kalibriert.

Teil der Kalibrierung waren die Ermittlung und der Ausgleich der Vignettierung, die Überprüfung der Linearität der RGB-Sensoren und deren spektrale Empfindlichkeit. Mit Hilfe der gemessenen spektralen Empfindlichkeiten der rot, grün und blau Sensoren wurde ermittelt, welche derer Linearkombinationen die geringste Abweichung zu der V-Lambdakurve aufweist. Dieser Zusammenhang ist in Formel 1 dargestellt.

$$L_k = x R + y G + z B$$

Formel 1 Kalibrierte Leuchtdichte



Abbildung 6: Canon EOS 5D Mark II

Für die Anwendung wird die Kamera ebenfalls in einer Entfernung von 40 m in einer Höhe von einem Meter platziert und ein Foto von der Fahrbahn geschossen. Um das Messfeld, wie in der Abbildung 7 markieren zu können, sollte dieses vorher visuell markiert werden. Die mitgelieferte Software ist in der Lage, aus dem markierten

Messfeld die minimale, maximale und mittlere Leuchtdichte zu berechnen; die für die Bestimmung der M-Beleuchtungsklassen notwendige Gesamtgleichmäßigkeit kann leider nicht durch die Software ermittelt werden.



Abbildung 7: Beispielmessung und -auswertung der Leuchtdichte mittels Digitalkamera

6 Evaluation

Die drei vorgestellten Messverfahren wurden alle unter Laborbedingungen kalibriert. Um ihre Einsetzbarkeit in der Praxis zu prüfen, wurden die Verfahren unter realen Bedingungen evaluiert. Die Ergebnisse werden im Folgendem dargelegt.

6.1 Evaluation des elektrischen Mini-Fahrzeugs

Zur Evaluation des elektrischen Mini-Fahrzeugs wurden am LED-Laufsteg drei nächtliche Beleuchtungsszenen eingestellt, welche den P-Beleuchtungsklassen P1, P3 und P6 möglichst nah kommen. Für jede der Szenen wurde die statische Messung (nach DIN 13201-3&4) und die dynamische Messung durchgeführt. Abbildung 8 zeigt den Beleuchtungsstärkeverlauf der unterschiedlichen Messspuren für die Beleuchtungsszene P1. Die höheren Beleuchtungsstärken im rechten Bereich des Messrasters weisen darauf hin, dass sich die Lichtpunkte am rechten Fahrbahnrand befinden müssen. Des Weiteren fällt auf, dass die Abweichungen zwischen dem statischen und dem dynamischen Messverfahren sehr gering sind. Tabelle 4 zeigt die Mindestanforderung nach DIN der drei P-Beleuchtungsklassen sowie die gemessenen, mittleren Beleuchtungsstärken der statischen und der dynamischen Messung. Zusätzlich wird die prozentuale Differenz zwischen den Verfahren gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die Abweichung mit sinkendem Beleuchtungsniveau aufgrund der niedrigeren Werte leicht steigt. Da die Abweichung trotzdem für alle Beleuchtungsklassen unter zwei Prozent liegt, kann man von einem geeigneten vereinfachten Messverfahren sprechen.

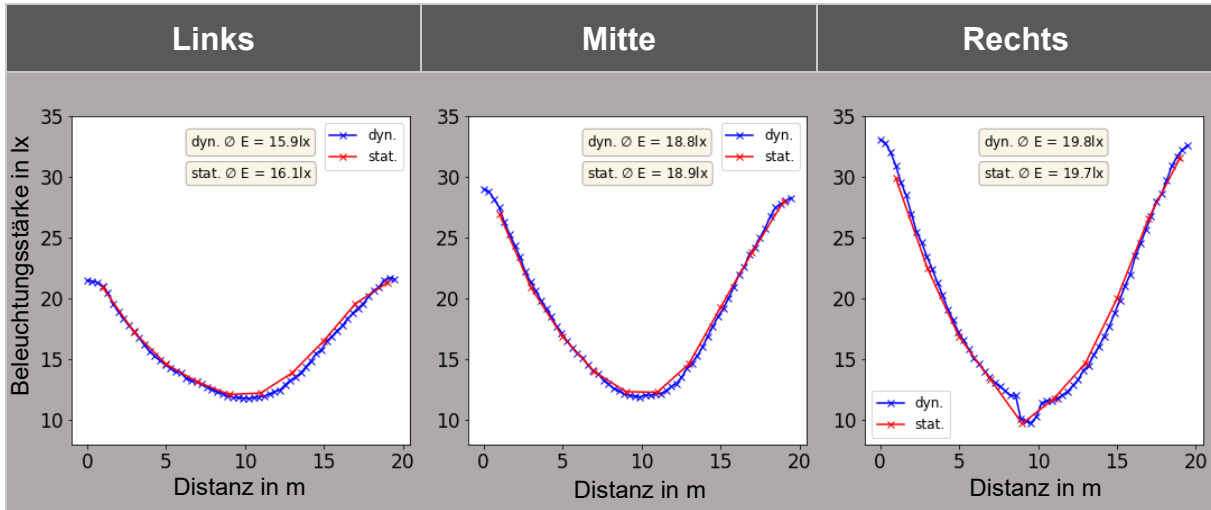


Abbildung 8: Validierung der dynamischen Beleuchtungsstärkemessung (P1-drei Spuren)

P-Klasse	Nach DIN	Statisch nach DIN	Dynamische Messung	
	\bar{E} in lx	\bar{E} in lx	\bar{E} in lx	Diff
P 1	15	18.3	18.2	-0.55%
P 3	7.5	6.77	6.65	-1.77%
P 6	2	3.21	3.15	-1.87%

Tabelle 4: Evaluationsergebnisse des Messfahrzeugs für drei Beleuchtungsklassen

6.2 Evaluation des Leuchtdichtenormals

Für das Leuchtdichtenormal wurde zunächst evaluiert, wie genau die in der Norm vorgegebenen Leuchtdichtewerte für das Normal eingestellt werden konnten. **Error! Reference source not found.** stellt die Ergebnisse der Messungen tabellarisch dar. Aus den Messwerten lässt sich eine Unsicherheit bei der Einstellung der Leuchtdichten von ca. 5-10% ablesen.

Fläche	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Messwert \bar{L} in cd/m^2	2.10	1.57	1.09	0.79	0.51	0.32
Nach DIN \bar{L} in cd/m^2	2	1.5	1	0.75	0.5	0.3

Tabelle 5: Evaluation der Einstellungen des Leuchtdichtenormals

Mittels eines Probandenversuchs wurde anschließend überprüft, wie gut eine visuelle Abschätzung der Helligkeit mit Hilfe des Leuchtdichtenormals gelingt. **Error! Reference source not found.** gibt einen Eindruck der zu erfüllenden Beurteilungsaufgabe und **Error! Reference source not found.** zeigt die Einschätzungsergebnisse für eine eingestellte Beleuchtungsklasse M6 von insgesamt 9 Probanden. Es fällt auf, dass in 6 Fällen die Leuchtdichte um eine Klasse zu hoch eingeschätzt wurde. Zwei weitere Teilnehmende schätzten die Klasse auf M4 und M3. Nur eine Person schätzte die Helligkeit richtig ein. In zwei Fällen lag die Unsicherheit

also über 100 %. Ein Grund für die hohen Unsicherheiten beim Einsatz des Leuchtdichtenormals könnte sein, dass der Farbtort der zu beurteilenden Fläche zu sehr von dem des Normals abwich. Weiterhin könnten zu große Ungleichmäßigkeiten, die unterschiedliche Größe der zu vergleichenden Flächen oder der schwarze Rahmen um das Normal eine Beurteilung erschweren.

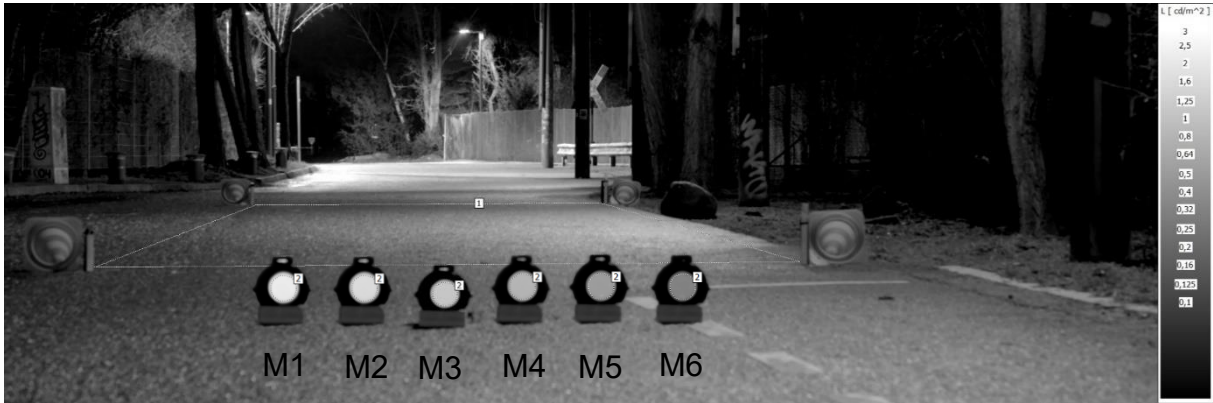


Abbildung 10: Beurteilungsaufgabe mit Hilfe des Leuchtdichtenormals

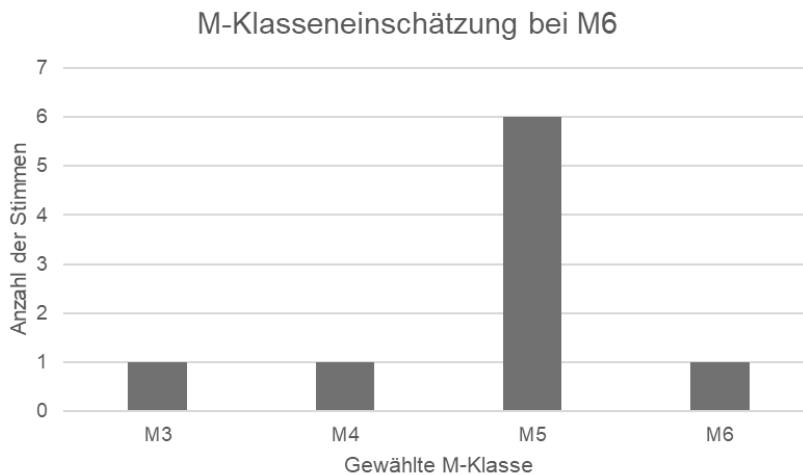


Abbildung 9: Ergebnisse der visuellen Helligkeitsbeurteilung mittels Leuchtdichtenormal

6.3 Evaluation der kalibrierten Digitalkamera

Wie bei der Evaluation des Mini-Fahrzeugs wurden am LED-Laufsteg (Berlin) drei unterschiedliche Beleuchtungsklassen eingestellt, und zwar die für Leuchtdichte ausgelegten Klassen M1, M3 und M6. Als Referenzmessgeräte wurde die LMK6 der Firma TechnoTeam verwendet. Verglichen wurden die mittlere Leuchtdichte des Messfeldes sowie die Gesamtgleichmäßigkeit. Zu beachten ist hierbei, dass die Vergleichsmessungen bei feuchter Fahrbahn durchgeführt wurden. Es ist zu erkennen, dass die Messunsicherheiten bei diesem Verfahren höher als bei dem vorherigen Verfahren sind.

Mit Messunsicherheiten von ca. 10-15% bei den Leuchtdichtewerten ist dieses Verfahren dennoch für eine erste Einschätzung der Beleuchtungsklasse geeignet. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist die hohe Unsicherheit bei der Messung der Gesamtgleichmäßigkeit. Diese resultiert aus der Berechnungsart, da das Messfeld hier nicht in Messrasterpunkte, bestehend aus mehreren Pixeln, unterteilt wird, sondern für die Berechnung der Wert jedes Pixels einzeln betrachtet wird. Da für die Gesamtgleichmäßigkeit der Quotient aus minimaler und mittlerer Leuchtdichte berechnet wird, kann es auf Grund der schlechten Aussteuerung einiger weniger Pixel zu großen Abweichungen kommen.

M-Klasse	Nach DIN		LMK6		Kalibrierte Canon			
	\bar{L} in cd/m^2	U_{ow}	\bar{L} in cd/m^2	U_{ow}	\bar{L} in cd/m^2	\bar{L} Diff	U_{ow}	U_{ow} Diff
M 1	2	0.15	2.02	0.29	1.79	-11.4%	0.17	-58.6%
M 3	1	0.15	0.97	0.31	0.82	-15.5%	0.18	-58.1%
M 6	0.3	0.15	0.32	0.36	0.27	-15.6%	0.15	-58.3%

Tabelle 6: Evaluationsergebnisse der Digitalkamera für drei Beleuchtungsklassen

7 Fazit

Ziel des Projektes war es, eine direkte, routinemäßige Überprüfung der Beleuchtungssituation an nächtlichen Unfallorten zu ermöglichen. Zu diesem Zweck wurden drei vereinfachte Messverfahren entwickelt. Die verwendeten Messgeräte wurden kalibriert und eine Evaluation der Verfahren durchgeführt.

Dabei erzielte das elektrische Mini-Fahrzeug zur Beleuchtungsstärkemessung die besten Ergebnisse und kann daher als Ersatz für herkömmliche Messverfahren empfohlen werden. Die kalibrierte Digitalkamera erreichte akzeptable Unsicherheiten und kann für eine erste Einschätzung zur Einhaltung der Beleuchtungsklasse verwendet werden. Das entwickelte Leuchtdichtenormal schnitt in Bezug auf die Messunsicherheiten am schlechtesten ab. Weitere Verbesserungen wie das dynamische Anpassen des Farbortes des Leuchtdichtenormals an den Fahrbahnfarbort, könnten hier in einer erheblichen Verbesserung resultieren.

Für die Beantwortung der Frage, ob die normativen Anforderungen bei Dunkelheitsunfällen an den Unfallorten eingehalten werden, ist es zum einen entscheidend, wie die Zuordnung der mit den Verfahren erhobenen Werte zu den Beleuchtungsklassen erfolgt. Erfolgt eine direkte Zuordnung ohne Berücksichtigung von Unsicherheiten, würde beispielsweise eine gemessene mittlere Beleuchtungsstärke von 9,5 lx einer Klasse P3 entsprechen, obwohl der Wert wesentlich näher an den Anforderungen einer P2-Klasse liegt. Zum anderen muss bekannt sein, welche Beleuchtungsklasse am jeweiligen Unfallort eigentlich gefordert ist.

Anpassungen zur Zuordnung der Beleuchtungsklassen sowie ergänzende Abfragen zur eigenen Ermittlung der Beleuchtungsklasse könnten in einem nächsten Schritt in der Webapplikation vorgenommen werden.

Zusammengefasst bietet die vereinfachte Messung mittels Mini-Fahrzeug und kalibrierter Digitalkamera Vorteile für folgende mögliche Anwendungsfälle und Nutzer:

→ **Unfallanalyse und -forschung**

- GIDAS (German In-Depth Accident Study)
- Verkehrsermittlungsdienste der Polizei
- Unfallkommissionen der Kommunen
- Unfallforscher der Versicherer
- Kriminaltechnik
- Dekra

→ **Beleuchtungsplanung und -überprüfung**

- Kommunen
- Leuchtenhersteller

8 References

[1] „Road Lighting as an Accident Countermeasure,“ CIE, Publication no. 93, ISBN: 978-3-900734-30-5, 1992.

[2] S. Maus, „Ganzheitliche Bewertung öffentlicher Straßenbeleuchtungen mittels lichttechnischer Messungen und Kosten-Nutzen-Analysen,“ TU Berlin, Masterarbeit, 2015.

[3] H. Kopp, „Fotometrische Analyse von Radfahr- und Fußgängerunfallschwerpunkten,“ TU Berlin, Bachelorarbeit, 2020.

[4] „Straßenbeleuchtung - Teil 1: Auswahl der Beleuchtungsklassen,“ DIN 13201-1, Berlin, 2021.

[5] „Straßenbeleuchtung - Teil 2: Gütemerkmale,“ DIN 13201-2, Berlin, 2016.

[6] „Straßenbeleuchtung - Teil 3: Berechnung der Gütemerkmale,“ DIN EN 13201-3,
Berlin, 2016.

Diesem Bericht liegen Teile der im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter 82.0791/2021 durchgeführten Forschungsarbeit im Rahmen des Forschungsprogramms Straßenverkehrssicherheit zugrunde. Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein beim Autor.