

In Situ-Messungen von Reflexionseigenschaften von Fahrbahnoberflächen

FA 4.292

Forschungsstelle: Technische Universität Dresden, Fakultät für Verkehrswissenschaften "Friedrich List", Professur für Verkehrspsychologie (Prof. Dr. rer. Nat. habil. T. Petzold)

Bearbeiter: Schulze, C.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: November 2019

1 Aufgabenstellung

Gegenstand des Forschungsprojekts ist es, geeignete und erschöpfende lichttechnische Kennwerte zur angemessenen Charakterisierung des Reflexionsverhaltens von Fahrbahnoberflächen zu begründen.

Reflexionsbeschreibungen für Straßen erfolgen bislang vor allem unter dem Aspekt von Straßen- und Tunnelbeleuchtungsanlagen. In zunehmendem Maße werden Beschreibungen für weitere Bewertungsaspekte bedeutsam. Es wurden daher neben den Belangen der ortsfesten Verkehrsbeleuchtung die Reflexion unter kraftfahrzeugeigener Beleuchtung, in Hinblick auf visuelle Ansprüche barrierefreier Gestaltungen und bei Tageslicht sowie bezüglich der Bewertung indirekter Himmelaufhellung und des Energieeintrags in die Bausubstanz berücksichtigt.

In der derzeitigen Praxis erfolgen Reflexionsbeschreibungen für Straßenoberflächen zudem in aller Regel in lichttechnisch qualifizierten Laboren anhand von Bohrkernen, die aus Straßen entnommen wurden oder Probekörpern, die in Straßenbaulaboratorien hergestellt werden.

Daher bestand ein weiterer Gegenstand des Projekts darin, die Möglichkeiten und Grenzen mobiler Reflexionsmessungen direkt auf der Straße zu untersuchen. Mit In-situ-Messungen verbinden sich viele Vorteile. Dazu gehören etwa die flächenaufgelöste Messung, die Messung ohne Zerstörung der Oberfläche sowie die Möglichkeit, Messungen mit zeitlichem Abstand an ein und derselben Oberfläche bei fortlaufender Nutzung vornehmen zu können.

Die Feldmessungen verfolgten darüber hinaus eine weitere Zielsetzung. Bislang bestehen in der Literatur nur sehr begrenzte Erkenntnisse über die Verteilung der Reflexionsmerkmale innerhalb einer Straßenfläche. Dies limitiert einerseits die heute praktizierten Labormessungen, weil zu wenige Anhaltspunkte über die Wahl aussagekräftiger Stichproben sowie die Übertragbarkeit deren Ergebnisse auf größere Straßenflächen bestehen. Es bedient jedoch auch andererseits die Belange mobiler Messungen, weil nur dadurch belastbare Aussagen sowohl über Vor- und Nachteile mobiler Messungen als auch deren Aufwand getroffen werden können.

2 Untersuchungsmethodik

Gemäß der Projektkonzeption erfolgten Untersuchungen sowohl im Labor als auch im Feld. Bei den Labormessungen kamen vier Versuchsstände zum Einsatz. Weiterhin wurden die

Vergleichsmessungen mit einem der beiden bei den Feldmessungen eingesetzten mobilen Geräten ebenfalls im Labor durchgeführt.

Die Labormessungen erfolgten in allen Fällen unter Nutzung von Beleuchtungen mit genäherter Normlichtart A. Alle Messungen erfolgten unter Ausschluss von Fremdlicht. Der erste Versuchsstand diente zur Messung von Leuchtdichtkoeffizienten unter diffuser Beleuchtung bei den vier Beobachtungswinkeln $\alpha = 1^\circ$, 2° , $2,29^\circ$ und 3° (Qd).

Der zweite Versuchsstand erlaubte die Messung des Reflexionsgrads ρ mittels Leuchtdichtefaktoren bei diffuser Beleuchtung und den Beobachtungswinkeln $\alpha = 0^\circ$, 8° und 45° . Der dritte Versuchsstand diente zur Ermittlung von Leuchtdichtkoeffizienten q bei gerichteter Beleuchtung für den gesamten, in r-Tabellen definierten Beleuchtungsbereich. Dieser beinhaltet 396 Leuchtdichtkoeffizienten. Darauf basierend können sämtliche diesbezüglichen Kennwerte wie Q_0 , $q_{0,Range}$ und Spiegelfaktor S_1 definitionsgemäß ermittelt werden. Diese Messungen erfolgten sowohl unter normgerechtem ($\alpha = 1^\circ$) als auch weiteren Beobachtungswinkeln ($\alpha = 3^\circ$, 5° und 45°).

Der vierte Versuchsstand diente der Messung von Leuchtdichtkoeffizienten (q) bei gerichteter Beleuchtung gemäß den Verhältnissen bei kraftfahrzeugeigener Beleuchtung. Dies beinhaltete die Ermittlung der q -Werte bei Rückreflexion $q(RR)$ entsprechend der Fahrerperspektive für die fast vollständige Kombination aus drei Augpunkthöhen, zwei Scheinwerferhöhen und fünf Entfernungen. Darüber hinaus wurde auch die Vorwärtsreflexion $q(VR)$ aus Perspektive des Gegenverkehrs für die vollständige Kombination aus drei Augpunkthöhen, zwei Scheinwerferhöhen und fünf Entfernungen ermittelt.

Im Labor wurden 57 Proben von Straßenoberflächen verschiedener Materialien und Bauweisen gemessen. Zielstellung der Probenauswahl war nicht die repräsentative Abbildung gemäß der Flächenverteilung auf den Straßen, sondern es sollte die praxisrelevante Bandbreite lichttechnisch verschiedener Straßenoberflächen abgebildet werden. Darunter befanden sich Beschichtungen, Betonoberflächen und Asphalte, darunter offenporiger Asphalt und Gussasphalt.

Die Feldmessungen erfolgten an insgesamt 14 verschiedenen Straßen, darunter zwölf Asphalt- und zwei Betonoberflächen. Es wurden möglichst homogene Straßenoberflächen untersucht. Diese waren der Anschauung nach aus einem Material beziehungsweise Baustoff zu einem Zeitpunkt hergestellt und ähnlich beansprucht. Inhomogenitäten wie Verschmutzungen oder Rollspuren wurden vermieden.

Von allen Oberflächen wurde eine $A = 1 \text{ m}^2$ umfassende Teilfläche unter Nutzung zweier mobiler Messeinrichtungen anhand der drei Reflexionskennwerte mittlerer Leuchtdichtkoeffizient bei diffuser Beleuchtung Q_d , Leuchtdichtkoeffizient für die Rückreflexion R_L und Reflexionsgrad ρ charakterisiert. Die Charakterisierung erfolgte durch eine jeweils 100 Messwerte umfassende Flächenverteilung der Kennwerte.

Darüber hinaus wurden zwei dieser Oberflächen anhand der Verteilungen der drei Reflexionskennwerte in einem erweiterten Flächenausschnitt von $A = 80 \text{ m}^2$ beziehungsweise $A = 100 \text{ m}^2$

beschrieben. Anhand dieser Flächen wurden weiterhin die Bezüge zwischen der Beleuchtungssituation, Reflexion der Straße und der Helligkeit (Leuchtdichte) aus exemplarischen Beobachterpositionen durch lichttechnische Messungen untersucht. Hierbei erfolgten Messungen der Beleuchtungsstärke und der Leuchtdichte. Eine dieser erweiterten Messungen bildet beispielhaft die Situation bei Nacht und Straßenbeleuchtung ab. Die andere Messung beschäftigt sich mit der Situation bei Tageslicht.

3 Untersuchungsergebnisse

Die Stichprobe der Labormessungen bildet die Bandbreite unterschiedlich reflektierender Straßenoberflächen in allen identifizierten Reflexionskennwerten gut ab, insofern diesbezüglich Anhaltspunkte aus der Literatur bestehen.

Die Spannweite der Probenwerte bewegte sich im Bereich Qd = 0,045...0,201 cd/(m²·lx). Über die vier Beobachtungswinkel besteht eine hohe Korrelation (r > 0,99). Es ist daher ausreichend, einen Qd-Wert je Oberfläche zu erheben. Es wird Qd (α = 2,29°) vorgeschlagen, weil dieser bereits als Kennwert der Tagessichtbarkeit von Markierungen etabliert ist. Dieser kann gegenüber Markierungen bei Straßenoberflächen jedoch mit erheblich größerer Winkeltoleranz erhoben werden (α = 2...3°).

Die Auswertung der Leuchtdichtefaktoren ergab, dass Straßenoberflächen ein praktisch diffuses Verhalten im Bereich Beobachtung α ≥ 45° aufweisen. Somit kann der Reflexionsgrad auf diese Weise bestimmt werden. Die Probenwerte betragen ρ = 0,03...0,45.

Die Probenwerte für Q0 bewegten sich im Bereich Q0 (1°) = 0,047...0,177 cd/(m²·lx). Es befanden sich Proben mit allen vier Standardreflexionsklassen (R1 bis R4) im Kollektiv. Für die näherungsweise Abschätzung von Q0 durch q_{0,Range} wurde eine mittlere Abweichung von ±0,011 cd/(m²·lx) ermittelt. Mit steigendem Beobachtungswinkel α nehmen der Spiegelgrad (S1) und Q0 im Mittel ab.

Die Reflexion der Straße aus Sicht des Kraftfahrzeugs nimmt im Mittel aller Proben mit steigender Entfernung etwas ab, zeigt im Bereich d = 30...65 m jedoch praktisch konstante Werte. Einen deutlich größeren Einfluss zeigen Augpunkt- und Scheinwerferhöhe. Mit steigendem Abstand zwischen beiden nimmt die Reflexion deutlich ab. Aufgrund der hohen Korrelation zwischen den Werten einer Oberfläche bei variierender Beleuchtungs- und Beobachtungskonstellation genügt zur Straßenbeschreibung ein Kennwert. Es wird R_L vorgeschlagen, weil dieser bereits als Kennwert der Nachtsichtbarkeit von Markierungen etabliert ist. Die Spannweite der Proben bewegte sich im Bereich R_L = 0,002...0,088 cd/(m²·lx).

Als kleinste, stabil beschreibbare Flächengröße wurde für die Messung von Q0, Qd und des Reflexionsgrads A = 50...60 cm² identifiziert. An dieser Flächengröße erhoben, zeigt R_L eine etwas größere Unsicherheit von ±2...3 %. S1 und r-Tabellen zeigen bei Messflächengröße A≈100 cm² eine noch größere Unsicherheit von im Mittel ±5 %.

Die Parameter Q0 (1°), Qd (2,29°), ρ (d/45°) und R_L hängen alle positiv zusammen, während S1 mit allen in geringerem Maße, jedoch negativ zusammenhängt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Paarweise Korrelationen von Reflexionskennwerten für N = 57 Proben (Labormessungen)

r	Qd(2,29°)	ρ (d/45°)	R _L	S1
Q0(1°)	0,956	0,813	0,712	-0,206
Qd(2,29°)		0,863	0,791	-0,287
ρ (d/45°)			0,893	-0,510
R _L				-0,544

Die hohe Korrelation zwischen Qd und Q0 zeigt, dass zumindest für eine in-situ-orientierte Charakterisierung eine gute Beschreibung von Q0 durch Qd möglich ist. Die Näherungsgüte durch Qd für Q0 ist bedeutsam höher als diejenige durch q_{0,Range}. Die deutlich geringeren Zusammenhänge zwischen den anderen Kennwerten zeigen, dass die jeweilige Information über die Straßenreflexion nicht substituiert werden kann. Für den Beobachtungswinkel α = 45° geht der mittlere Leuchtdichtekoeffizient (Q0 45°) in den Reflexionsgrad über.

Im Fazit werden zur Charakterisierung der Reflexion von Straßenoberflächen bezüglich aller identifizierten Bewertungsaspekte aus Sicht der Infrastruktur die fünf Kennwerte in Tabelle 1 sowie die r-Tabelle begründet, wobei Q0 und Qd sehr ähnliche Beschreibungen erlauben.

Im Projekt wurden die in der internationalen Literatur enthaltenen Vorgaben und Messbedingungen für die Erhebung der Reflexionskennwerte zusammengestellt und hinsichtlich der Übertragbarkeit in eine mobile Messanordnung diskutiert. Im Ergebnis zeigt sich, dass die Messung von r-Tabellen in situ nicht realisierbar ist. Somit können auch die nur daraus oder aus Teilmengen davon näherungsweise kalkulierbaren Kennwerte Q0 und S1 nicht belastbar mobil erhoben werden. Für Q0 ist mit Qd eine akzeptable Substitution verfügbar. R-Tabelle und S1 jedoch verbleiben vorerst ohne praktische Lösung.

Im Projekt schlossen sich Feldmessungen an, die an 14 Straßen Flächenverteilungen der in situ messbaren Kennwerte Qd, R_L und ρ untersuchten. Für die Messung von ρ wurde eine im Labor bestehende Messanordnung für den Einsatz im Feld umgebaut. R_L und Qd wurden mit einem handelsüblichen Messgerät erhoben, das für die Messung dieser Kennwerte an Markierungen auf der Straße konzipiert wurde. Da das Gerät primär für Markierungen konzipiert ist, wurden Vergleichsmessungen an allen 57 Laborproben vorgenommen. Somit konnten beide Kennwerte mit guter Belastbarkeit erhoben werden. Die ermittelten Gerätefaktoren sind aller Wahrscheinlichkeit nach gerätespezifisch. Das zeigt den Bedarf an diesbezüglich weiterführenden Untersuchungen.

Für alle Straßen wurden in einem A = 1 m² umfassenden Bereich je Kennwert 100 Messwerte in gleichmäßigem Raster von 10 cm Rasterweite erhoben, die jeweils 50 cm² Messfläche repräsentieren. Alle untersuchten Straßen zeigten in allen drei Kennwerten Ausprägungen innerhalb der jeweiligen Bandbreite der Laborproben.

Über die 14 Messorte betrachtet, kann der jeweilige Flächenmittelwert für A = 1 m² anhand der Messung einer 100 cm² umfassenden Teilfläche mit der Unsicherheit von ρ(d/45°) ±0,01 (± 7%), R_L ±0,003 cd/(m²·lx) beziehungsweise ±25 % und Qd ±0,009 cd/(m²·lx) entsprechend ±14 % gemessen werden. Hier gehen geometrische Merkmale von Oberfläche und Messung, Merkmale der Baustoffe und der Fertigung der Oberfläche sowie

der Nutzung und Bewitterung ein. Um Qd mit einer Unsicherheit < 10 % bezüglich $A = 1 \text{ m}^2$ Straße zu erheben, müssen etwa $A = 250 \text{ cm}^2$ davon gemessen werden.

Zwischen den Werteverteilungen innerhalb der Flächen wurden Zusammenhänge untersucht. Diese nahmen recht geringe Ausprägungen an. Es wurde geschlossen, dass die Messwertschwankungen im statistischen Sinne als zufällig betrachtet werden können. Daraus folgt, dass für augenscheinlich homogene Straßenoberflächen nicht vorgegeben werden muss, an welchen Stellen gemessen wird. Die Einflüsse augenscheinlicher Inhomogenitäten, wie etwa Rollspuren, müssen weiterführend untersucht werden.

Für zwei der Straßen wurden Flächenverteilungen von Qd, R_L und ρ einer größeren Teilfläche von $A = 80 \text{ m}^2$ ($20 \times 4 \text{ m}$) beziehungsweise $A = 100 \text{ m}^2$ ($20 \times 5 \text{ m}$) erhoben. In relativem Abstand 1 m längs und quer wurden 80, respektive 100 Werte ermittelt. Diese schwanken vergleichbar zu den Werten innerhalb der zugehörigen, $A = 1 \text{ m}^2$ umfassenden Teilflächen. Wie die weiterführenden Analysen zeigten, kann auf diese Weise jedoch nur für den Reflexionsgrad ein belastbarer Flächenmittelwert so großer Straßenflächen ermittelt werden. Für Qd kommt zur Schwankung innerhalb einer kleinen Teilfläche von $A = 1 \text{ m}^2$ noch eine bedeutende Schwankung der Mittelwerte der 1 m^2 umfassenden kleinen Teilflächen innerhalb größerer Teilflächen bis $A = 100 \text{ m}^2$ hinzu.

Diese Befunde fußen auf umfangreichen weiteren lichttechnischen Messungen an den beiden Straßen, für die größere Teilflächen betrachtet wurden. Auf einer Straße wurde bei Nacht die Beleuchtungsverteilung erhoben, die durch die Straßenbeleuchtung erzeugt wird. Die Messungen erfolgten in demjenigen Raster, in dem auch die Reflexion erhoben wurde ($1 \times 1 \text{ m}$). Korrespondierend dazu wurde die Leuchtdichte aus den vier Beobachtungswinkeln $\alpha = 1^\circ, 3^\circ, 5^\circ$ und 45° erhoben.

Die mittlere Leuchtdichte des untersuchten Straßenabschnitts nimmt bei steigendem Beobachtungswinkel in etwa dem Maße ab, wie es als Verhältnis der Q_0 -Werte zwischen den Beobachtungswinkeln anhand der Labormessungen bestimmt wurde. Die absolute Ausprägung der mittleren Leuchtdichte der Straßenfläche unter flachen Beobachtungswinkeln kann aus Kenntnis der Beleuchtungsstärkeverteilung und des mittleren Leuchtdichtekoeffizienten jedoch nicht bestimmt werden. Hierfür ist die Kenntnis der r-Tabelle notwendig.

Belastbare Zusammenhänge zwischen Beleuchtungsstärke, mittlerem Leuchtdichtekoeffizienten und der mittleren Leuchtdichte bestanden jedoch durchaus für diejenigen Teilflächen der untersuchten Straße, bei denen aufgrund der Beleuchtungsgeometrie an der Oberfläche vor allem gestreute Reflexion erfolgte. Dies gilt auch unter flacher Beobachtung. Weiterhin zeigen die Untersuchungen bedeutsame Einflüsse der Flächengeometrie, im konkreten Fall des Dachprofils der Straße. Schließlich wurde durch die Deckungsgleichheit von Reflexionsgrad und Leuchtdichtekoeffizient unter $\alpha = 45^\circ$ auch für eine größere Teilfläche von $A = 80 \text{ m}^2$ gezeigt, dass für Beobachtung unter $\alpha \geq 45^\circ$ die Reflexion als diffus gelten kann.

Auf der anderen Straße, die als größere Teilfläche untersucht wurde, erfolgten Messungen bei Tageslicht und augenscheinlich bedecktem Himmel, jedoch trockenen Verhältnissen. Dadurch

konnte in guter Näherung von großflächig diffuser Beleuchtung ausgegangen werden. Aus ebener, horizontaler Beleuchtungsstärke und der unter $\alpha \approx 2,3^\circ$ gemessenen Leuchtdichte wurden in situ Leuchtdichtekoeffizienten für die 100 Teilflächen von $A = 1 \text{ m}^2$ jeweils vollflächig bestimmt.

Darauf basierend wurde gezeigt, dass der Qd-Flächenmittelwert für die untersuchte, $A = 100 \text{ m}^2$ umfassende Asphaltfläche anhand des Qd-Werts für eine Teilfläche von $A = 1 \text{ m}^2$ mit einer Unsicherheit von Qd $\pm 0,005 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ bestimmt werden kann. Dies entspricht einer relativen Unsicherheit von < 10 %. Für Messflächen ab 5 m^2 werden Unsicherheiten $\leq 5 \%$ begründet. Für die $A = 1 \text{ m}^2$ umfassende kleine Teilfläche, auf der anhand des mobilen Reflexionsmessgeräts fast vollflächig Qd gemessen wurde, deckten sich die mit den beiden Messprozeduren ermittelten Qd-Werte bis auf eine vernachlässigbare Differenz. Insgesamt stützen die Befunde der Feldmessungen die Bedeutung aller identifizierten Reflexionskennwerte. An der Auswahl ist somit festzuhalten.

4 Folgerung für die Praxis

Im Ergebnis zeigt sich, dass die Reflexion von Straßenoberflächen aus Sicht der Infrastruktur mit einer überschaubaren Anzahl von Kennwerten hinsichtlich aller identifizierten Charakterisierungsansprüche umfassend beschrieben werden kann. Dabei können bis auf die Glanzbeschreibung (S1, r-Tabelle) Aussagen zu allen Ansprüchen sowohl im Labor als auch in situ erfolgen.

Die Befunde legen die Unterscheidung in eine Material- versus Anlagencharakterisierung der Reflexionsmerkmale nahe. Die Reflexion kleinerer, homogener Straßenflächen bis etwa 1 m^2 ist überwiegend durch Merkmale des Materials bestimmt, während für Flächen $> 1 \text{ m}^2$ bedeutsame Anteile aus der Geometrie der Oberfläche (Neigung, Ebenheit), der Nutzung sowie wahrscheinlich weiteren Einflüssen hinzukommen.

Dies führt zu einer Differenzierung der mit Messungen im Labor und in situ verbundenen Möglichkeiten und Grenzen. Labormessungen können nicht völlig durch Feldmessungen ersetzt werden. Gleichzeitig kann der Beschreibungsumfang von Messungen in situ nicht durch Labormessungen erreicht werden. Daher sind weiterführende Untersuchungen notwendig. Sie zielen ab auf die kommerzielle Verfügbarkeit mobiler Messgeräte und die Qualitätssicherung von Messungen. Auch für die nicht im Feld messbaren Reflexionsaspekte bedarf es weiterer Untersuchungen.