

Name der Forschungsstelle(n)

15083 BG/2 / 1

IGF-Vorhaben-Nr. / GAG

1.2.2007 bis 30.11.2008

Bewilligungszeitraum

Schlussbericht für den Zeitraum : 1.2.2007 - 30.11.2008

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten IGF-Forschungsvorhaben

Normalverfahren

Fördervariante ZUTECH

Forschungsthema :

Überprüfung verschiedener lichttechnischer Kennziffern bezüglich ihrer Eignung zur Erfassung der Helligkeit von Straßendeck-schichten und die Entwicklung einer trans-portablen Einrichtung für die Messung der Helligkeit vor Ort und im Labor

Für ein ZUTECH-Vorhaben sind folgende zusätzliche Angaben zu machen:

Der fortgeschriebene Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

ist beigefügt

liegt bereits vor

wird fristgerecht nachgereicht

Stuttgart, 25.3.2009

Ort, Datum


Unterschrift der/des Projektleiter(s)

IBP-Bericht WB145/2009

Überprüfung verschiedener lichttechnischer Kennziffern bezüglich ihrer Eignung zur Erfassung der Helligkeit von Straßendeckschichten und die Entwicklung einer transportablen Einrichtung für die Messung der Helligkeit vor Ort und im Labor

Durchgeführt im Auftrag des Deutschen Asphaltverbands (DAV) e.V. und der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF)

Jan de Boer
Bernd Panhans
Andreas Reith
Andreas Otto
Frohmut Wellner



Fraunhofer Institut
Bauphysik

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle
für Prüfung, Überwachung und
Zertifizierung
Zulassung neuer Baustoffe, Bauteile
und Bauarten
Forschung, Entwicklung, Demonstration
und Beratung auf den Gebieten
der Bauphysik

Institutsleitung
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

IBP-Bericht WB 145/2009

Überprüfung verschiedener lichttechnischer Kennziffern bezüglich ihrer Eignung zur Erfassung der Helligkeit von Straßendeckschichten und die Entwicklung einer transportablen Einrichtung für die Messung der Helligkeit vor Ort und im Labor

Durchgeführt im Auftrag des Deutschen Asphaltverbands (DAV) e.V. und der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF)

Der Bericht umfasst
51 Seiten Text
9 Tabellen
32 Abbildungen

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit
schriftlicher Genehmigung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik gestattet.

Dr.-Ing. Jan de Boer, Dipl.-Ing. Bernd Panhans, Andreas Reith,
Fraunhofer Institut für Bauphysik
Dipl.-Ing. Andreas Otto, Prof. Dr.-Ing. Frohmut Wellner,
Technische Universität Dresden

Stuttgart, 25. März 2009

Institutsleiter

Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Gerd Hauser

Abteilungsleiter

Dipl.-Ing. Hans Erhorn

Bearbeiter

Dr. Ing. Jan de Boer

Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Nobelstraße 12 · D-70569 Stuttgart
Telefon +49 (0) 711/970-00
Telefax +49 (0) 711/970-3395
www.ibp.fraunhofer.de

Institutsteil Holzkirchen
Fraunhoferstr. 10 · D-83626 Valley
Telefon +49 (0) 8024/643-0
Telefax +49 (0) 8024/643-66
www.bauphysik.de

Projektgruppe Kassel
Gottschalkstr. 28a · D-34127 Kassel
Telefon +49 (0) 561/804-1870
Telefax +49 (0) 561/804-3187

Das Vorhaben wurde unter der Fördernummer 15083 BG/2 gefördert durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) für das BMWI.

Durchführende Forschungsstellen

Forschungsstelle 1:

Fraunhofer-Gesellschaft e.V.
Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Forschungsstelle 2:

Technische Universität Dresden
Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau
Professur für Straßenbau
01062 Dresden

Inhalt

Verzeichnis der Formelzeichen	4
1 Zusammenfassung	6
2 Darstellung der erzielten Ergebnisse	7
2.1 Einleitung und Problemdarstellung	7
2.2 Überprüfung verschiedener lichttechnischer Kennwerte von Straßendeckschichten	8
2.2.1 Beleuchtungstechnische Anforderungen an Straßendeckschichten	8
2.2.1.1 Photometrie und Klassifizierung von Straßenbelägen	9
2.2.1.2 Einzuhaltende Anforderungen	13
2.2.1.3 Exemplarische Straßenbeleuchtungsszene	13
2.2.2 Überprüfung des Kennwertsystems	14
2.2.2.1 Absolutwert der Reflexion	14
2.2.2.2 Räumliche Reflexionscharakteristik	16
2.2.2.3 Steilerer Beobachtungswinkel	17
2.3 Konzeption und Bau eines prototypischen mobilen Messgerätes	17
2.3.1 Stand der Technik, bisherige mobile Messeinrichtungen	17
2.3.2 Konzeption	19
2.3.3 Prototypischer Messaufbau	21
2.3.4 Fehlerbetrachtung	24
2.4 Validierung des Messgerätes	30
2.4.1 Erstellung und lichttechnische Quantifizierung von Straßenbelagsmustern	30
2.4.2 Messungen an Straßenbelagsmustern	33
2.4.3 Auswahl Probestrecken	36
2.4.4 Messungen auf der Probestrecke	36
2.4.5 Vergleich und Diskussion der Messwerte	37
2.4.5.1 Absolutwert der Reflexion	40
2.4.5.2 Räumliche Reflexionscharakteristik	43
2.4.5.3 Einfluss des Beobachtungswinkels	46
2.4.5.4 Praktische Konsequenzen	47
2.5 Literatur	49
3 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen insbesondere für KMU	50
4 Veröffentlichung der Vorhabensergebnisse	50
5 Gewerbliche Schutzrechte	51

Verzeichnis der Formelzeichen

Lateinische Zeichen

E	Beleuchtungsstärke	[lx]
h	Lichtpunkthöhe	[m]
I	Lichtstärke	[cd]
L	Leuchtdichte	[cd/m ²]
q	Leuchtdichtekoeffizient	[cd/m ² *lx]
q ₀	mittlerer Leuchtdichtekoeffizient	[cd/m ² *lx]
q _d	Leuchtdichtekoeffizient bei diffuser Beleuchtung	[cd/m ² *lx]
r	reduzierter Leuchtdichtekoeffizient	[cd/m ⁴ *lx]
T _i	Schwellenwerterhöhung	[%]
U ₀	Gesamtgleichmäßigkeit	[%]
U _l	Längsgleichmäßigkeit	[%]

Griechische Zeichen

α	Beobachtungswinkel	[°]
β	Winkel zwischen Beobachtungs- und Beleuchtungsebene	[°]
γ	Einstrahlwinkel	[°]
κ _p	Spiegelfaktor	[-]
Ω	Raumwinkel	[sr]

Indizes

diff0	Diffuse Beleuchtung zur Bestimmung von q ₀
diffD	Diffuse Beleuchtung zur Bestimmung von q _d
dir0°	Direktlichtquelle, Beleuchtung unter γ = 0°
dir63,5°	Direktlichtquelle, Beleuchtung unter γ = 63,5°
direkt	direkt gemessen
gemess	gemessener Wert, nicht errechnet
h	horizontal
i	Leuchte

in-situ Messgerät	Messung mit dem in-situ Messgerät
Labor	Messung im Labor der TU Dresden
m	mittel
Regression	über Regressionsansatz ermittelter Wert

1 Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens war die Überprüfung verschiedener praxisüblicher lichttechnischer Kennziffern bzgl. ihrer Eignung zur Erfassung der Helligkeit von Straßendeckschichten und die Entwicklung einer transportablen Einrichtung für die Messung der Helligkeit vor Ort und im Labor.

Die verschiedenen in Deutschland gebräuchlichen Kennwerte und international von der CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) vorgeschlagenen Messgrößen wurden zusammengestellt und diskutiert. Hierbei wurde insbesondere die Zuordnung von Belägen zu Standardklassen über Näherungsverfahren untersucht, die auf einigen wenigen Messungen basieren. Zwischen gebräuchlichen Näherungsverfahren und der genauen Bewertung der Standardbelagsklassen kommt es dabei teilweise zu merklichen Abweichungen. Diese sind in wesentlichen Teilen auf nur eine genäherte Ermittlung des mittleren Leuchtdichtekoeffizienten q_0 zurückzuführen.

Grundlage der anschließenden Konzeption und prototypischen Umsetzung des Messgerätes war daher die verbesserte Messung von q_0 . Basierend auf einem aktiv steuerbaren Leuchtdichteschirm, der über dem Messfeld positioniert wird, wird gezielt die zur Messung von q_0 erforderliche Leuchtdichteverteilung eingestellt. Zur Ermittlung der gerichteten Reflexion von Belägen wurden in den Leuchtdichteschirm Direktlichtquellen integriert. Der Messgerät ist für die Messung unter verschiedenen Beobachtungswinkeln ausgelegt. Die gesamte Anordnung kommt ohne bewegliche Teile aus und erlaubt durch die automatisierte Steuerung zeiteffiziente Messungen im Feld. Unterstützt werden die in Deutschland üblichen Messprotokolle und auch die international nach CIE formulierten Empfehlungen.

Die neue Versuchseinrichtung wurde anschließend in zwei Phasen auf Funktionalität geprüft und validiert. Referenzwerte wurden mit einer bestehenden Messeinrichtung im Labor ermittelt. Zunächst wurden Vergleiche für speziell angefertigte Straßenbelagsmuster durchgeführt, die das praxisübliche Kennwertspektrum abdecken. Anschließend wurde die Versuchseinrichtung im Feld auf verschiedenen eingebauten Belägen getestet. Im Vergleich zu der auf einem Näherungsverfahren basierenden Messung im Labor lagen tendenziell sowohl q_0 als auch die Messung der gerichteten Reflexion und damit die Klassifizierung durch die neue Versuchseinrichtung etwas höher. Dies wurde im Wesentlichen durch die verbesserte q_0 Messung gegenüber dem Näherungsverfahren erklärt.

Neben einer neuartigen Art der Bestimmung lichttechnischer Kennwerte von Straßenbelägen im Labor ermöglicht das Ergebnis des Vorhabens zukünftig die in-situ Bestimmung der Kennwerte. Somit kann die Abnutzung eingebauter Beläge über die Zeit erfasst werden. Straßenbeleuchtungsanlagen können sowohl visuell als auch energetisch besser geplant und optimiert werden. Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

2 Darstellung der erzielten Ergebnisse

2.1 Einleitung und Problemdarstellung

Straßenbeleuchtung dient der Verkehrssicherung, der Gefahrenminderung krimineller Übergriffe im öffentlichen Raum, der Steigerung der Attraktivität des öffentlichen Raums sowie der Förderung der Kommunikation in demselben.

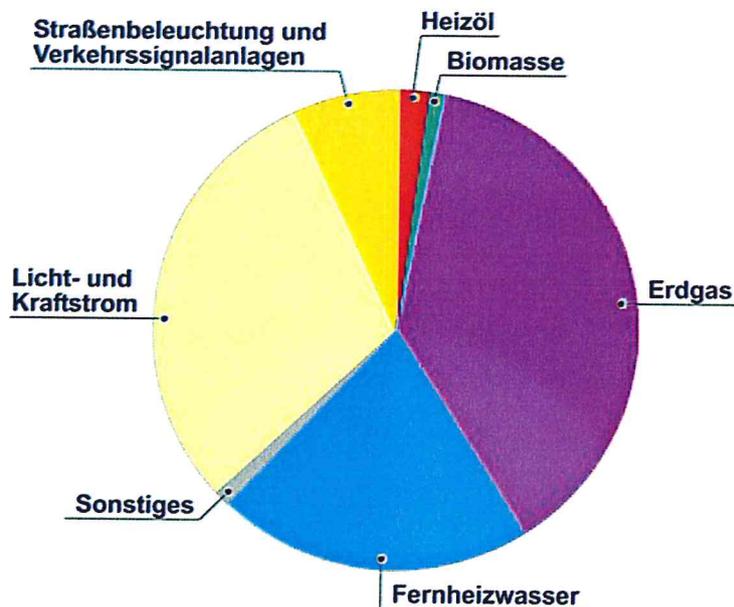


Bild 1: Anteil der Straßenbeleuchtung am Energiebezug einer deutschen Großstadt am Beispiel der Stadt Stuttgart [8].

Bei dem Betrieb von Straßenbeleuchtungsanlagen sind zunehmend hohe ökologische Anforderungen zu erfüllen, wie die Begrenzung störender Lichtimmissionen und Entsorgung von Materialien mit umweltrelevanten Bestandteilen (Austausch von Quecksilberdampfleuchten). Direkte Auswirkung auf Kosten und Ökologie hat der Energieverbrauch der Beleuchtungsanlagen. Der Anteil des Energiebedarfs für Straßenbeleuchtung in Deutschland am Gesamtstromverbrauch liegt bei 0,72 % [5]. Somit macht die Straßenbeleuchtung etwa 10 % des Strombedarfs für Beleuchtungszwecke aus. Die Gesamtbetriebskosten für die Straßenbeleuchtung liegen in Deutschland bei etwa 1 Mrd. €/a. Wie in Bild 1 exemplarisch dargestellt lagen die Energiekosten für Straßenbeleuchtung und Verkehrssignalanlagen der Stadt Stuttgart im Jahr 2005 mit 4,1 Mio. € bei 11,3 % der Gesamtenergiekosten der Kommune von 36,3 Mio. € [8].

Im Bereich der Straßenbeleuchtung ist das lichttechnische Verhalten von Straßendeckschichten planerisch bei der Auslegung der künstlichen Beleuchtungsanlagen zu berücksichtigen und – so es die weiteren Anforderungen an die Beläge zulassen – zu optimieren.

So hat neben einer energieeffizienten Lichttechnik der Leuchten die Wahl des Straßenbelags einen hohen Einfluss auf den Energiebedarf für die Straßenbeleuchtung. Der Einsatz heller gegenüber dunkler Straßenbelagsarten ermöglicht

eine Absenkung der erforderlichen energetischen Aufwendungen auf ein Drittel – dies bei Bereitstellung verkehrssicherheitstechnisch vergleichbarer Leuchtdichteniveaus. Aufgrund der geringeren Wärmeabsorption bieten helle Beläge darüber hinaus den Vorteil einer geringeren thermischen Belastung von Straßen.

Zur Auslegung der künstlichen Beleuchtungsanlage und zur Qualitätssicherung wurde das Reflexionsverhalten der Beläge bisher zumeist an Bohrkernen der zu untersuchenden Straße oder an Mustern von neuen Belägen im Labor bestimmt. Bei Bohrkernen besteht neben der aufwendigen Entnahmeprozedur die Gefahr nicht repräsentativer Stichprobenentnahmen. So werden Muster neuer Beläge beispielsweise künstlich abgerieben. Dies verlangt viel Erfahrung der Messverantwortlichen in der Versuchsvorbereitung. Mit Durchführung einer in-situ Kennwertbestimmung direkt auf der Straße kann dagegen zerstörungsfrei gemessen werden. Des Weiteren können die Messungen an mehreren Stellen des untersuchten Belags wiederholt werden, wodurch repräsentative mittlere Kennwerte über größere Straßenbereiche bestimmt werden können. Auch kann letztendlich mit deutlich geringerem Aufwand ein zeitliches Kennwertprofil zur Dokumentation der Veränderungen des Reflexionsverhaltens durch die Verkehrsbelastung ermittelt werden.

Im Folgenden werden in Kapitel 2.2 zunächst die beleuchtungstechnischen Anforderungen an die Straßendeckschichten beschrieben und anschließend auf ihre Eignung für mobile Messbarkeit geprüft. In Kapitel 2.3 werden die Konzeption und der Bau des prototypischen transportablen Messgerätes dargestellt. Die Validierung des Messgerätes ist in Kapitel 2.4 beschrieben.

2.2 Überprüfung verschiedener lichttechnischer Kennwerte von Straßendeckschichten

2.2.1 Beleuchtungstechnische Anforderungen an Straßendeckschichten

Die Photometrie von Straßenbelägen stellt einen Zusammenhang zwischen Leuchten (Abstrahlcharakteristik, Position und Orientierung), Straßenbelag und dem Beobachter (z. B. Autofahrer oder Fußgänger) her. Wie in Bild 2 dargestellt ist Ziel der Berechnung die Ermittlung der für den Beobachter sichtbaren Leuchtdichteverhältnisse. Diese ergeben sich aus der Reflexion des von den Straßenleuchten abgestrahlten Lichts. Die Beleuchtungsanlage ist sodann derart auszulegen, dass normative Vorgaben an die Leuchtdichteverhältnisse z. B. zur Gewährleistung ausreichender Verkehrssicherheit eingehalten werden.

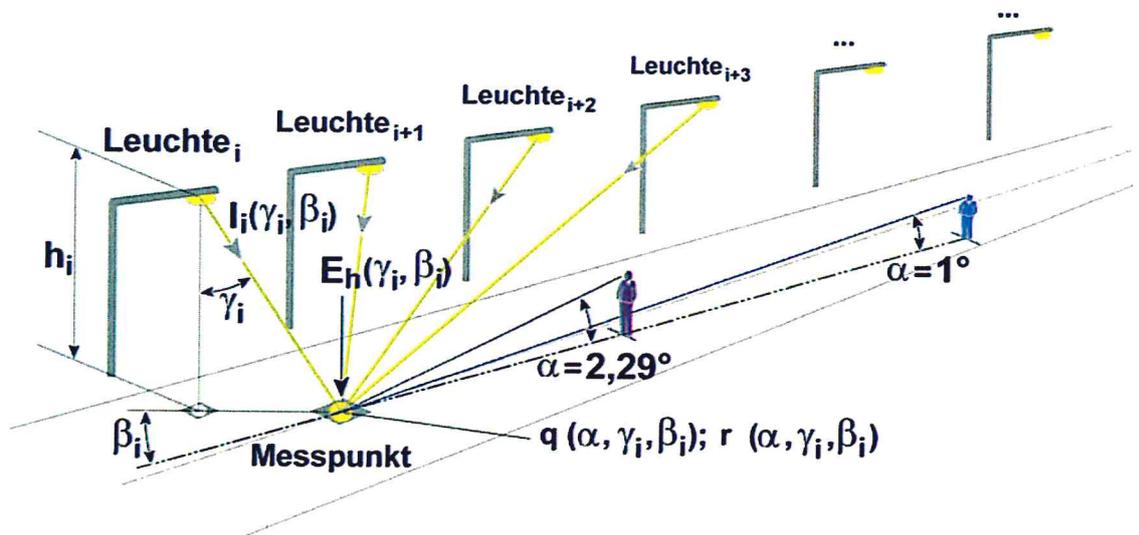


Bild 2: Zur Ermittlung der von Straßenleuchten hervorgerufenen für einen Beobachter sichtbaren Leuchtdichte.

2.2.1.1 Photometrie und Klassifizierung von Straßenbelägen

Photometrie

Die von einer Leuchte i am Messpunkt für den Beobachter hervorgerufene sichtbare Leuchtdichte ergibt sich aus

$$L(\alpha, \gamma_i, \beta_i) = q(\alpha, \gamma_i, \beta_i) E_h(\gamma_i, \beta_i) \quad [\text{cd/m}^2] \quad (1)$$

mit

$q(\gamma_i, \beta_i)$	$[\text{cd/m}^2 \times]$	Leuchtdichtekoeffizient des Straßenbelags für die Beleuchtungsrichtung γ_i , β_i der Leuchte i
$E_h(\gamma_i, \beta_i)$	$[\text{lx}]$	Horizontalbeleuchtungsstärke auf dem Straßenbelag für die Beleuchtungsrichtung γ_i , β_i der Leuchte i .

Der Beobachtungswinkel, unter dem die Leuchtdichte erfasst wird, ist mit $1^\circ \pm 0,5^\circ$ standardisiert und entspricht bei einer genormten Augenhöhe von 1,5 m einem Straßenbereich von etwa 60 - 160 m vor dem Beobachter [2]¹. Die vom Beobachter wahrnehmbare Gesamtleuchtdichte am Messpunkt ergibt sich zu

$$L = \sum_{i=1}^N q(\alpha, \gamma_i, \beta_i) E_{hi}(\gamma_i, \beta_i) \quad [\text{cd/m}^2] \quad (2)$$

wobei N die Anzahl der den Messpunkt beleuchtenden Leuchten ist.

¹ In [2] wird alternativ ein Beobachtungswinkel von $\alpha = 2,29^\circ$ empfohlen, der heutigen, höheren Verkehrsdichten Rechnung tragen soll. Vgl. auch Kapitel 2.3.1.

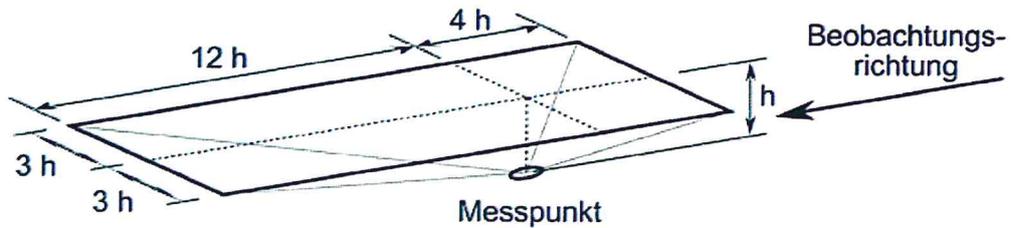


Bild 3: Bereich oberhalb eines Messpunktes auf dem Straßenbelag, der durch Standard r-Tabellen abgedeckt wird. In diesem Bereich positionierte Leuchten werden in der Berechnung berücksichtigt.

Formt man Gleichung (1) unter Berücksichtigung der Höhe h_i der Leuchte über dem Leuchtenfußpunkt und der Winkelbeziehung zwischen Leuchtenkopf und Messfläche um, kann $L_i(\alpha, \gamma_i, \beta_i)$ direkt in Abhängigkeit der Lichtstärke $I_i(\gamma_i, \beta_i)$ der Leuchte i in Richtung auf den Messpunkt bestimmt werden:

$$L_i(\alpha, \gamma_i, \beta_i) = r(\alpha, \gamma_i, \beta_i) I_i(\gamma_i, \beta_i) \quad [\text{cd/m}^2] \quad (3)$$

mit dem reduzierten Leuchtdichtekoeffizienten

$$r(\alpha, \gamma_i, \beta_i) = q(\alpha, \gamma_i, \beta_i) \frac{\cos^3(\gamma_i)}{h_i^2} \quad [\text{cd/m}^4\text{lx}].$$

Somit kann direkt aus den vom Hersteller bereitgestellten Lichtstärkeverteilungskurven die Leuchtdichte ermittelt werden.

In der Praxis wird auf einen nach CIE [2] Definition in Bild 3 dargestellten Bereich über dem Messfeld zurückgegriffen, in dem vorhandene Leuchten in der Berechnung berücksichtigt werden. Das Reflexionsverhalten beschrieben durch $q(\alpha, \gamma_i, \beta_i)$ und / oder $r(\alpha, \gamma_i, \beta_i)$ ist stark abhängig von der Lichteinstrahlrichtung. Bild 4 zeigt exemplarisch das Reflexionsverhalten eines diffus reflektierenden Belages und eines gerichtet reflektierenden Belages nach [2]. Formal werden die Werte in einem standardisierten Format in sogenannten r-Tabellen angegeben.

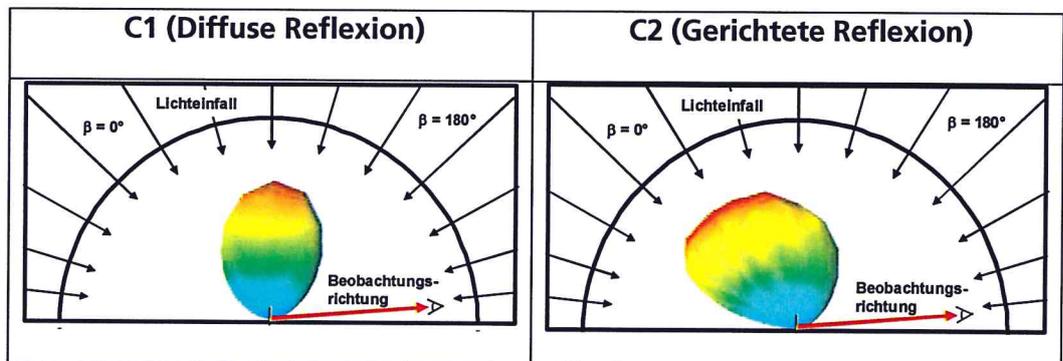


Bild 4: Grafische Darstellung der normierten Standard r-Tabellen C1 und C2 nach dem CIE Klassifikationsschema. Der Beobachtungswinkel von 1° ist eingezeichnet.

Klassifizierung

Für praktische Anwendungen ist die jeweilige Ermittlung der umfangreichen r-Tabellen mit Goniophotometern im Allgemeinen zu aufwendig. Daher werden Beläge typisierten r-Tabellen, sogenannten Standardbelägen, zugeordnet. Diese Klassifizierung der Reflexionscharakteristik erfolgt nach dem Grad der Spiegelung. Die typisierten r-Tabellen sind in normierter Form angegeben und werden mit dem mittleren Leuchtdichtekoeffizienten, der den Grad der Helligkeit angibt, skaliert.

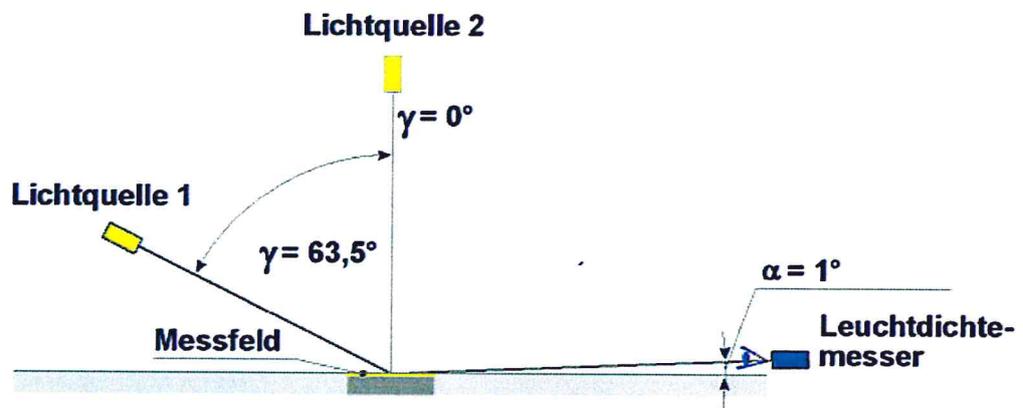


Bild 5: Messwinkel zur vereinfachten Bestimmung des Spiegelgrades.

Der Grad der Spiegelung wird beschrieben durch

$$S1 = \frac{r(\alpha = 1^\circ, \beta = 0^\circ, \gamma = 63,5^\circ)}{r(\alpha = 1^\circ, \beta = 0^\circ, \gamma = 0^\circ)} = \frac{q_{63,5^\circ}}{q_{0^\circ}} \cdot \cos^3 63,5^\circ \quad [-] \quad (4)$$

Gemäß Bild 5 kann der Grad der Spiegelung durch Bestimmung der Leuchtdichtekoeffizienten q_{0° für einen Einstrahlwinkel von $\gamma = 0^\circ$ und $q_{63,5^\circ}$ für $\gamma = 63,5^\circ$ erfasst werden.

Kleine Werte von $S1$ stellen eher diffus reflektierende, große Werte stärker gerichtet reflektierende Straßendeckschichten dar.

In der Praxis ist des Weiteren zur Beschreibung der Reflexionscharakteristik der sogenannte Spiegelfaktor κ_p

$$\kappa_p = \log \frac{q_0}{q_{0^\circ}} \quad [-] \quad (5)$$

mit

q_0 [cd/m²lx] mittlerer Leuchtdichtekoeffizient

gebräuchlich. κ_p kann durch

$$\kappa_p = \log\left(0,098 \cdot \frac{q^{63,5^\circ}}{q^{0^\circ}} + 1,06\right) \quad [-] \quad (6)$$

genähert werden [7]². Analog zu S1 stellen kleinere Werte von κ_p eher diffus reflektierende, große Werte stärker gerichtet reflektierende Straßendeckschichten dar.

Die durch S1 oder κ_p beschriebene Reflexionscharakteristik wird nun zur Klassifikation von Belägen genutzt. Hierbei sind in unterschiedlichen Ländern unterschiedliche Klassifikationssysteme gebräuchlich. In Deutschland sind dies im Allgemeinen für trockene Straßenbeläge die Standardbeläge der R-Klassifikation. Ergänzend sind die Standardbeläge der C-Klassifikation nach CIE gebräuchlich.

In der Klassifizierung nach CIE wird das winkelabhängige Reflexionsverhalten eines Belags gemäß Tabelle 1 den zwei Klassen C1 und C2 zugeordnet, die bereits in Bild 4 dargestellt wurden. In der R-Klassifikation erfolgt, wie ebenfalls Tabelle 1 zu entnehmen ist, eine Zuordnung zu den Klassen R1 bis R4.

Beschreibung		Klasse	κ_p	S1
R-Klasse	Beton, rau	R1	<0,22	<0,42
	Gussasphalt, neu	R2	0,22<...≤0,33	0,42<...≤0,85
	Asphaltfeinbeton, abgefahren	R3	0,33<...≤0,44	0,85<...≤1,35
	Gussasphalt, abgefahren	R4	0,44<...≤0,55	≥1,35
C-Klasse	Diffus streuende Beläge	C1	<0,18	<0,4
	Spiegelnde Beläge	C2	≥0,18	≥0,4

Tabelle 1: Klassifizierung der Reflexionscharakteristik nach R-Klasse und C-Klasse³.

Die Klassen R1 bis R4 und C1 bis C2 beschreiben die räumliche Reflexionscharakteristik. Der Absolutwert der Reflexion kann dagegen variieren. Photometrisch kann der Absolutwert der Reflexion über den mittleren Leuchtdichtekoeffizienten

$$q_0 = \frac{1}{\Omega_i} \cdot \int_{\Omega_i} q d\omega \quad [\text{cd/m}^2\text{lx}] \quad (7)$$

² Ein weiterer Regressionsansatz ist in [10] angegeben. Da die für Referenzmessungen genutzte Messeinrichtung der TU Dresden (vgl. Kapitel 2.4) auf dem hier angegebenen Ansatz basiert, ist hier lediglich der Ansatz nach [7] angegeben.

³ Zu Vergleichszwecken wurden der Spiegelfaktor κ_p und der Spiegelgrad S1 über Gleichung (6) ineinander überführt. Beläge mit einem Spiegelfaktor $\kappa_p > 0,55$ wurden, analog der nach oben unbegrenzten C-Klassifizierung, der Klasse R4 zugeteilt.

beschrieben werden. Dieser kann numerisch aus vollständig messtechnisch erfassten q - bzw. r -Tabellen durch eine entsprechende Gewichtung mit den jeweiligen Raumwinkelsegmenten oder direkt durch Aufprägen einer speziellen Leuchtdichteverteilung oberhalb des Messpunktes bestimmt werden. q und r liegen aber in der Praxis zumeist nicht derart detailliert vor bzw. eine direkte messtechnische Bestimmung mit einer entsprechenden Leuchtdichteverteilung, die sich invers zu $\cos(\gamma)$ verhält, wurde bisher nicht erfolgreich realisiert. Daher wird bisher q_0 näherungsweise über Korrelationsverfahren mittels einiger weniger Messungen ermittelt [7]⁴. Der bei den Labormessungen an der TU-Dresden genutzte Ansatz greift über Gleichung (5) auf die genäherte Bestimmung von κ_p nach Gleichung (6) zurück:

$$q_0 = q_{0^\circ} \cdot 10^{\kappa_p} \quad [\text{cd/m}^2\text{x}] \quad (8)$$

mit

E_{0° [lx] Horizontale Beleuchtungsstärke bei Beleuchtung der Probe unter 0°

2.2.1.2 Einzuhaltende Anforderungen

Die einschlägige Normung [3], [4] für Straßenbeleuchtungsanlagen ermöglicht die Beschreibung einer Beleuchtungssituation in Abhängigkeit von

- der Geometrie der betrachteten Fläche,
- der verkehrstechnischen Verwendung der Fläche,
- dem Einfluss der Umgebung.

Den so standardisiert beschriebenen Beleuchtungssituationen werden definierte Beleuchtungsklassen zugewiesen, die Vorgaben an einzuhaltende lichttechnische Grenzwerte beinhalten, wie die Leuchtdichten und Gleichmäßigkeiten der Leuchtdichten. So liegen beispielsweise geforderte mittlere Leuchtdichten auf den Straßenbelägen im Bereich von 0,3 bis 2,0 cd/m^2 . Diese Anforderungen müssen durch das im vorherigen Abschnitt beschriebene Zusammenspiel aus Straßenbeleuchtung und Reflexionsverhalten des Belags eingehalten werden.

2.2.1.3 Exemplarische Straßenbeleuchtungsszene

Exemplarisch wurde die Wirkung der lichttechnischen Kennwerte von Straßenbelägen auf die Anforderungsgröße der Leuchtdichte auf den Belägen bei normierten Beobachtungsbedingungen untersucht. Hierbei wurde mit einem Lichtsimulationsprogramm eine Straßenszene unter folgenden wesentlichen Randbedingungen berechnet:

- Breitstrahlende Leuchte

⁴ siehe Fußnote 2

- Lichtpunkthöhe 7,5 m
- Mastabstand 22 m
- Fahrbahnstreifenbreite 4 m

Variiert wurden der mittlere Leuchtdichtekoeffizient q_0 und die Belagsklasse. Der mittlere Leuchtdichtekoeffizient geht linear in die zu beobachtende Leuchtdichte ein. Der Einfluss der Belagsklasse ist für einen fixierten Wert von $q_0=0,07 \text{ cd}/(\text{m}^2\text{x})$ in Tabelle 2 zusammengefasst und weitaus geringer als der Einfluss von q_0 .

Belagsklasse	L_m	U_o	U_i	T_i
	[cd/m^2]	[%]	[%]	[%]
R1	1,4	0,6	0,6	9
R4	1,4	0,8	0,8	9
Abweichung	0%	33%	33%	0%
C1	1,5	0,6	0,6	9
C2	1,5	0,6	0,6	9
Abweichung	0%	33%	33%	0%

Tabelle 2: Einfluss der Belagsklasse auf die Leuchtdichteverteilung der exemplarischen Straßenszene bei einem mittleren Leuchtdichtekoeffizienten von $q_0=0,07 \text{ cd}/(\text{m}^2\text{x})$.

2.2.2 Überprüfung des Kennwertsystems

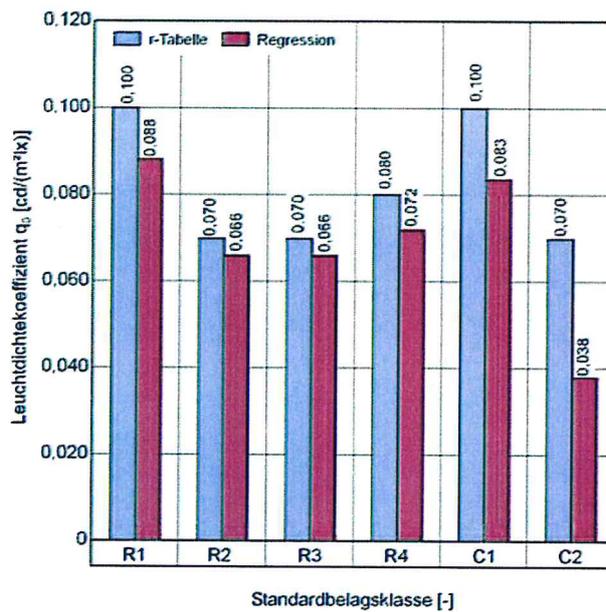
Die generelle photometrische Bewertungsmethodik ist eingeführt und bewährt. Aus der Prüfung des Kennwertsystems u. a. hinsichtlich Eignung auf mobile Messbarkeit und Konzeption eines Messgeräts wurden jedoch folgende Empfehlungen abgeleitet.

2.2.2.1 Absolutwert der Reflexion

Mittlerer Leuchtdichtekoeffizient q_0

Bild 6 zeigt eine Gegenüberstellung der numerisch direkt aus den r-Tabellen der Standardbeläge R1-R4 ermittelten q_0 -Werte mit den nach dem Regressionsansatz ermittelten q_0 -Werten nach Gleichung (8) mit κ_p nach Gleichung (6), wobei die entsprechenden Werte für q_{0° und $q_{63,5^\circ}$ aus den genauen r-Tabellen der jeweiligen Standardbeläge genommen wurden.

Gegenüberstellung von q_0



Gegenüberstellung von κ_p

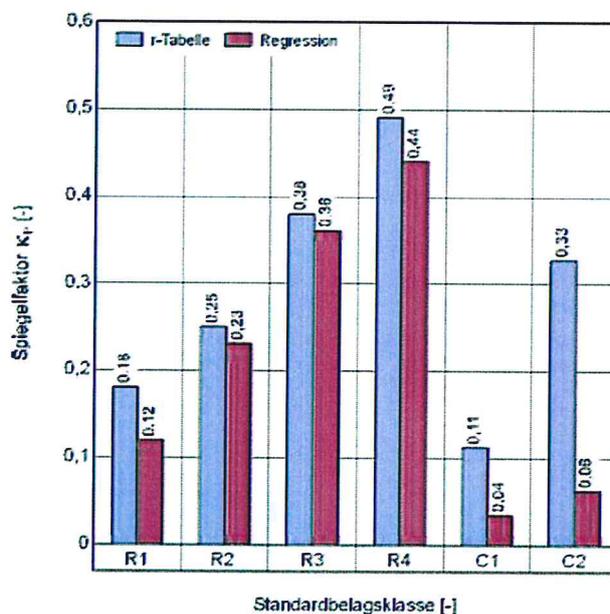


Bild 6: Gegenüberstellung von q_0 ermittelt direkt aus der r-Tabelle und ermittelt nach Gleichung (6) in Gleichung (8) für unterschiedliche Belagsklassen (Bild oben). Gegenüberstellung von κ_p , bestimmt über die Regression nach Gleichung (6) und bestimmt über eine Auswertung nach Gleichung (5) mit bekanntem q_0 (Bild unten).

Die mit der Regressionsgleichung (6) in Gleichung (8) ermittelten mittleren Leuchtdichtekoeffizienten weichen von den numerisch direkt aus den r-Tabellen der Standardklassen bestimmten mittleren Leuchtdichtekoeffizienten ab. Es ergibt sich ein BIAS von -16 %. Für die Standardbeläge nach C-Klassifizierung liegen die Abweichungen mit max. -46 % höher als für die Standardklassen nach R-Klassifizierung. Die Abweichung mag darin begründet

sein, dass die C-Klassen-Standardverteilungen nicht prägender Bestandteil der Verteilung waren, mit denen der Näherungsansatz nach Gleichung (6) durch Regression bestimmt wurde.

Weitere Fehleranalysen zu den Regressionsansätzen sind [9] und [10] zu entnehmen.

Wie exemplarisch in Kapitel 2.2.1.3 dargestellt ist q_0 der dominierende Parameter bzgl. der sich einstellenden Leuchtdichten auf Straßenbelägen.

Unter der Annahme repräsentativer Standardbeläge, die typisch für übliche Straßenbeläge sind, ist die direkte Messung von q_0 gegenüber bisher üblichen Korrelationsverfahren zu bevorzugen. Abweichungen aus Regressionsansätzen können somit vermieden werden.

Wie dargestellt, kann die direkte Bestimmung von q_0 entweder durch eine vollständige Messung der Streuindikatrix des Leuchtdichtekoeffizienten oder durch Aufprägung einer definierten Leuchtdichteverteilung auf das Messfeld, die sich invers zu $\cos(\gamma)$ verhält, erfolgen (vgl. auch Kapitel 2.3).

Leuchtdichtekoeffizient bei diffuser Beleuchtung q_d

Die CIE empfiehlt in [2] die Messung von q_d statt q_0 . q_d kann unter einer gleichförmigen Leuchtdichteverteilung messtechnisch einfacher bestimmt werden. Ein neues Messgerät sollte derartige Messungen ebenfalls durchführen können, um Vergleiche mit ggf. vorliegenden q_d -Messungen anstellen zu können.

Vergleich der Kennzahlen

Es ist allerdings zu betonen, dass die Belagscharakterisierung durch q_0 der durch q_d eindeutig vorzuziehen ist. q_d stellt abermals über erforderliche Umrechnungsfaktoren, die wiederum nur für Typverteilungen eine exakte Überführung in q_0 gestatten, eine potentielle Fehlerquelle bei der Bewertung unbekannter Beläge dar.

2.2.2.2 Räumliche Reflexionscharakteristik

Spiegelgrad S1

International ist nach CIE-Empfehlung der Spiegelgrad S1 zur Charakterisierung des räumlichen Reflexionsverhaltens gebräuchlich. Zu seiner Bestimmung ist gemäß Gleichung (4) neben der Bestimmung von q_0 auch die Messung von $q_{63,5}$ erforderlich. Da wie in Tabelle 1: dargestellt auch über S1 eine eindeutige Zuordnung zu relevanten Standardbelägen möglich ist, bietet es sich zukünftig an, auf den auch international eingeführten Spiegelgrad S1 statt des Spiegelfaktors κ_p überzugehen.

Spiegelfaktor κ_p

Der in Deutschland verbreitet gebräuchliche Spiegelfaktor κ_p wird üblicherweise analog der Bestimmung von q_0 ebenfalls über einen Regressionsansatz, wie in Gleichung (6) angegeben, bestimmt.

κ_p kann über den Regressionsansatz nach Gleichung (6) oder bei Kenntnis von q_0 gemäß Gleichung (5) ermittelt werden. Es sollte daher ebenfalls zukünftig auf eine direkte Ermittlung von κ_p gemäß Gleichung (5) mit direkt gemessenem q_0 zurückgegriffen werden. Bild 6 (rechts) stellt für die Standardverteilungen die unterschiedlich ermittelten Werte gegenüber. Auch hier liegen die direkt über den bekannten mittleren Leuchtdichtekoeffizienten q_0 bestimmten Werte κ_p höher.

Vergleich der Kennzahlen

Im Unterschied zu κ_p beschreibt S1 die gerichtete Reflexion anhand zweier räumlich gerichteter Messgrößen ($q_{63,5^\circ}$ und q_{0°) und berücksichtigt explizit einen Einstrahlbereich, welcher der Beobachtungsrichtung gegenüber liegt und somit potentiell gerichtete Reflexion beschreibt. κ_p setzt dagegen die gerichtete Reflexion unter Einstrahlung von 0° lediglich in Beziehung zu der integralen Messgröße q_0 , in der keine richtungsaufgelöste Information enthalten ist. Zudem besteht eine direkte Abhängigkeit von κ_p von dem vorzugsweise als unabhängig zu betrachtenden mittleren Leuchtdichtekoeffizienten q_0 .

Die Beschreibung eines Belages durch q_0 und S1 erfolgt somit über drei unabhängige Variablen, wogegen die Beschreibung eines Belages durch q_0 und κ_p durch nur 2 unabhängige Variablen gefasst wird. Dies kann bei dem komplexen räumlichen Abstrahlverhalten nachteilig sein

Der genutzte Korrelationsansatz von κ_p wurde speziell auf die R-Klassen Standardbeläge abgestimmt. Mithilfe von S1 können dagegen, da hier direkte Messwerte ohne Regressionsverfahren hinzugezogen werden, Beläge beliebig beschrieben werden.

2.2.2.3 Steilerer Beobachtungswinkel

Auf internationaler Ebene wird durch die CIE die Messung unter einem steileren Beobachtungswinkel von $2,29^\circ$ empfohlen. Die zu entwickelnde Messmethodik sollte dies berücksichtigen und daher unter Beobachtungswinkeln von sowohl 1° als auch $2,29^\circ$ messen können. Dies entspricht einer Entfernung des relevanten Straßenbereichs vom Beobachter von nur noch ca. 37,5 m und trägt heutigen, höheren Verkehrsdichten Rechnung, die durch geringere freie Sichtweiten auf die Straße gekennzeichnet sind.

2.3 Konzeption und Bau eines prototypischen mobilen Messgerätes

2.3.1 Stand der Technik, bisherige mobile Messeinrichtungen

Goniophotometer mit 4 vier freien Drehachsen (2 einstrahl-, 2 abstrahlseitig) ermöglichen die vollständige bidirektionale Vermessung von Reflexionskenn-

werten. Auf Grundlage derart gewonnener Messwerte wurden die zuvor dargestellten vereinfachten Messverfahren abgeleitet, die wenige Messgrößen mit den vollständigen r-Tabellen von Standardbelegen korrelieren. Zu nennen ist hier vor allem der Messaufbau nach Range [9], [10], [7], welcher bis heute in Deutschland hauptsächlich an Bohrkernen oder präparierten Belagsmustern zur Anwendung kommt. Er basiert auf der Bestimmung von 2 relativen Leuchtdichten und einer absolut zu messenden Beleuchtungsstärke. Aufgrund der Abmessungen der Messanordnungen sind die beschriebenen Einrichtungen jedoch nicht für den in-situ Einsatz geeignet.

In den letzten Jahren sind mehrere kompakte Messeinrichtungen vorgeschlagen worden, welche die unmittelbare Messung vor Ort direkt auf den Straßenbelägen ermöglichen [1], [6], [11]. Konzeptionell neue Ansätze sind in [1] und [11] zu finden.

Der in Bild 7 dargestellte Versuchsaufbau nach Blattner [1] stellt ein miniaturisiertes Goniophotometer dar, mit dem die r-Tabellen vollständig erfasst werden können. Der Zeitaufwand für das Anfahren der verschiedenen Messpositionen und Messen der Kennwerte ist im Vergleich zu den anderen Messeinrichtungen relativ hoch.

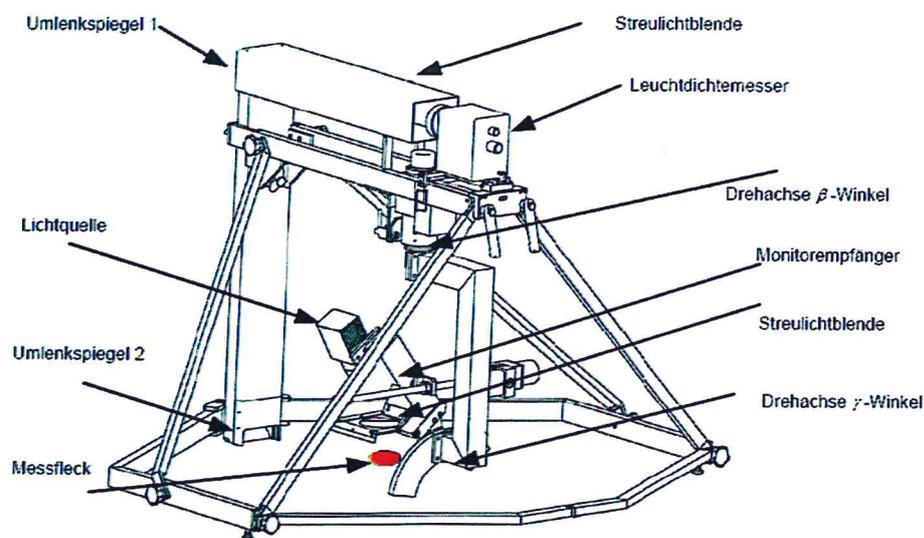


Bild 7: Prinzipschema des Messaufbaus nach Blattner [1].

Der Messansatz nach Schreuder [11] nutzt die strahlenoptische Bidirektionalität der Lichtausbreitung. Ggf. vorhandene Beugungseffekte von Proben können hierbei nicht berücksichtigt werden, spielen bei Straßenbelägen im Allgemeinen aber auch keine Rolle. Anstatt die Leuchtdichte unter einem Beobachtungswinkel von 1° zu messen, wird der Messbereich unter diesem Winkel beleuchtet und die Reflexion an ausgewählten Winkeln gemessen. Hieraus kann sodann der reduzierte Leuchtdichtekoeffizient errechnet und mit den r-Tabellen der Standardbeläge korreliert werden. Zur statistisch belastbaren Kennwertermittlung sieht der Ansatz darüber hinaus Mehrfachmessungen auf dem Straßenbelag an verschiedenen Positionen vor.

Versuche, die Fragestellung der in-situ Messungen von Asphaltkennwerten zu lösen, sind somit in den letzten Jahren in verschiedenen Projekten unternommen worden. Zahlreiche Teilfragen sind jedoch noch nicht zufriedenstellend gelöst. Im Wesentlichen sind die Messgenauigkeit und die Messzeiten zu optimieren. Darüber hinaus sollten neuere Messempfehlungen [2] zukünftig berücksichtigt werden können. So empfiehlt die CIE wie dargestellt unter einem größeren Messwinkel ($\alpha = 2,29^\circ$) zu messen. Keine der bekannten Messeinrichtungen erlaubt die wichtige direkte Messung des mittleren Leuchtdichtekoeffizienten q_0 .

2.3.2 Konzeption

Es wurden zwei alternative Konzepte für eine in-situ Messeinrichtung entwickelt und bewertet:

Konzept 1: steuerbarer Leuchtdichteschirm

Der Ansatz basiert, wie in Bild 8 dargestellt, auf einer direkten Messung von q_0 durch Bereitstellung einer abgestimmten Leuchtdichteverteilung oberhalb des Messfeldes mittels eines steuerbaren Leuchtdichteschirms und zwei integrierter Direktlichtquellen zur Bestimmung der Kennzahlen zur Beschreibung der räumlichen Reflexionscharakteristik.

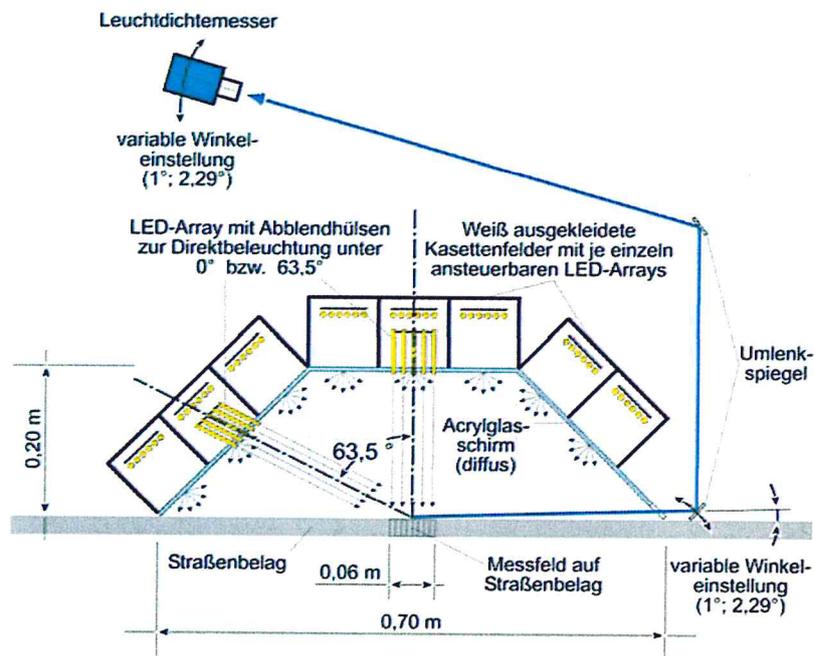


Bild 8: Prinzipschema Messaufbau zur Direktmessung von q_0 (q_d) auf Basis eines Leuchtdichteschirms und zwei in den Schirm integrierten Direktlichtquellen.

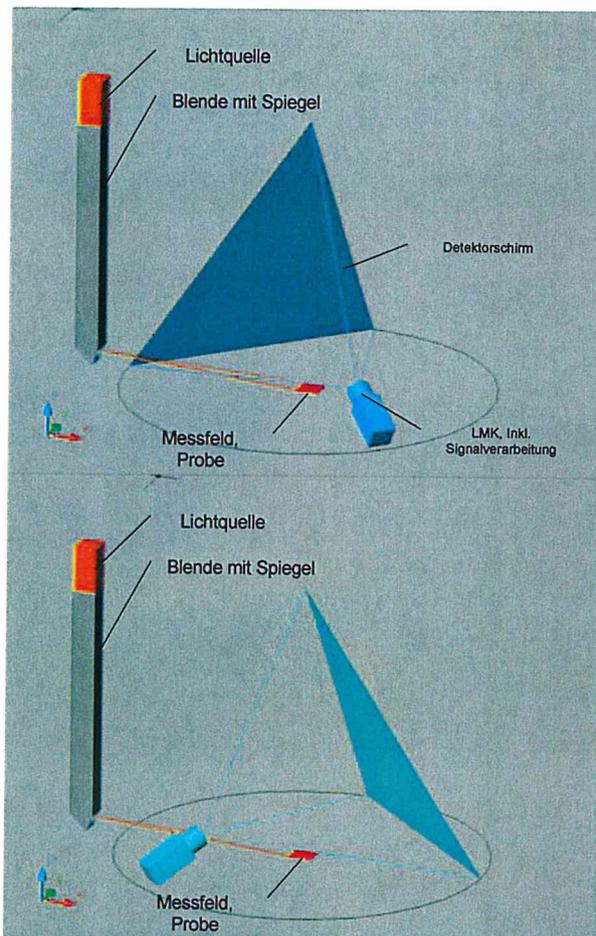


Bild 9: Prinzipschema, Messaufbau mit Detektorschirm und Leuchtdichtekamera.

Konzept 2: integraler Detektorschirm

Das in Bild 9 dargestellte Messprinzip basiert auf der Bidirektionalität des Reflexionsverhaltens der Straßenbeläge. Die Probe wird mit einer engstrahlenden Lichtquelle aus der eigentlichen Beobachtungsrichtung (1° bzw. $2,29^\circ$) beleuchtet. Auf einem beweglichen Messschirm mit dem definierten Reflexionsverhalten einer speziellen Photometerfarbe wird die richtungsaufgelöste Abstrahlcharakteristik mittels einer Leuchtdichtekamera erfasst und mit Hilfe einer Software in die gesuchte photometrische Größe des (reduzierten) Leuchtdichtekoeffizienten umgerechnet. Bei einem Detektorschirm, der einen projizierten Viertel-Halbraum über dem Messbereich umschreibt, ist aufgrund der Symmetrie des Reflexionsverhaltens der Belagsprobe die Einheit Schirm - Leuchtdichtekamera einmal, wie in Bild 9 dargestellt, zu drehen.

Das 1. Konzept wurde umgesetzt, wogegen der 2. Ansatz verworfen wurde. Die beim 2. Ansatz aufgrund des flachen Messwinkels erforderliche extrem lokalisiert abstrahlende Linienlichtquelle hätte nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand konstruiert werden können. Darüber hinaus hat der 1. Messansatz den Vorteil, dass er weitestgehend auf bewegliche und damit für einen in-situ Einsatz fehleranfällige Mechaniken verzichtet. Aufgrund des entfallenden Positionierungsaufwandes können die Messungen mit dieser Anordnung schnell er-

folgen. Der Ansatz ermöglicht somit, in kurzer Zeit auch mehrere stichprobenartig ausgewählte Straßenbereiche zu erfassen. Hierdurch können evtl. Variationen in der Belagsbeschaffenheit wie Inhomogenitäten der Gesteinszusammensetzung und Oberflächenunebenheiten statistisch bewertet werden.

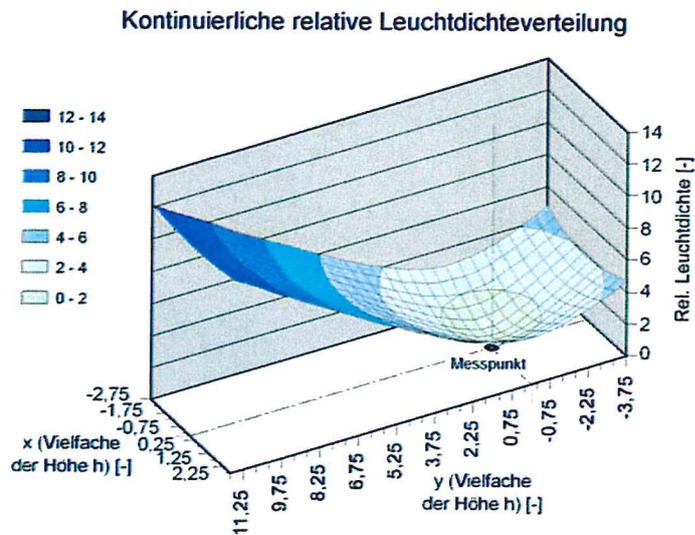


Bild 10: Erforderliche kontinuierliche relative Leuchtdichteverteilung in Höhe h über dem Messfeld.

2.3.3 Prototypischer Messaufbau

Das Konstruktionsprinzip des Messgerätes basiert auf einer Diskretisierung der über der Probe erforderlichen diffusen Leuchtdichteverteilung. Die erforderliche kontinuierliche rel. Leuchtdichteverteilung ist in Bild 10 dargestellt, der Prototyp des Messgerätes in Bild 11. Über einer Plexiglaskuppel wurden 26 mit LEDs bestückte Kassettenfelder angeordnet, die mittels einer DMX - Lichtsteuerung jeweils separat angesteuert werden können. Die diskretisierten Leuchtdichteverteilungen für eine q_0 und eine q_d Messung sind in Bild 12 dargestellt. Für die Messung des Spiegelgrades sind zwei gerichtete Lichtquellen (integrierte engstrahlende LED Arrays) in den Schirm integriert, wie in Bild 13 dargestellt.

Das in-situ Messgerät weist Flexibilität bzgl. der Ermittlung unterschiedlicher Kennwerte auf. So können durch die frei einstellbaren Leuchtdichten des Leuchtschirmes heute übliche q_0 Messungen durchgeführt werden als auch die von der CIE vorgeschlagenen Messungen des Kennwertes q_d (komplett gleichförmiges Leuchtdichtefeld über der Probe). Darüber hinaus kann die Probe aus unterschiedlichen Beobachtungswinkeln (1° - $2,29^\circ$ und größer) gemessen werden. Zur Kontrolle der Beleuchtungsstärke während der Messung ist seitlich des Messfeldes im Leuchtdichteschirm ein Luxmeter installiert.

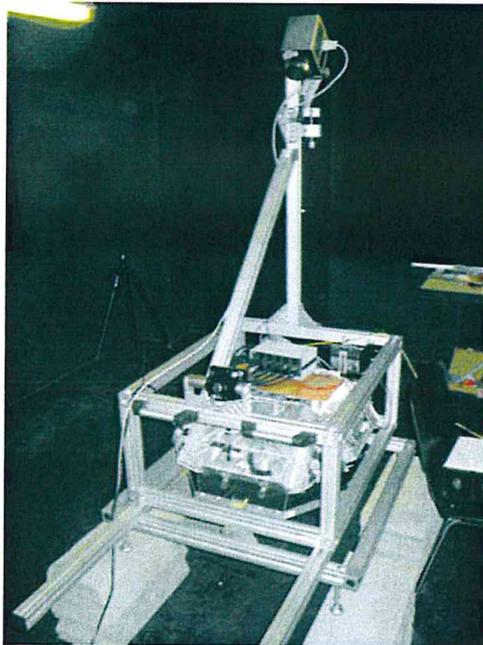
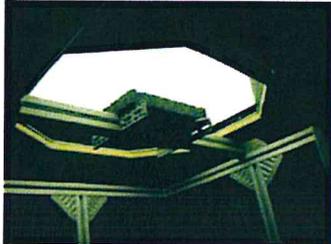
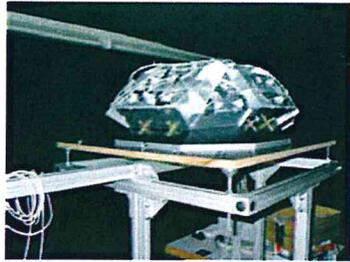


Bild 11: Bild links oben: Außenansicht der einzeln ansteuerbaren Kassettenfelder mit integrierten LEDs. Bild links Mitte: Beleuchtung einer Straßenbelagsprobe mit dem aktiven Leuchtdichteschirm. Bild rechts oben: PC-basierter DMX-Controller. Bild rechts unten: Ansicht des Gesamtgerätes von außen ohne Gerätehülle. Bild links unten: Ansicht des Gesamtgerätes von außen mit Gerätehülle bei einer Messung im Feld.

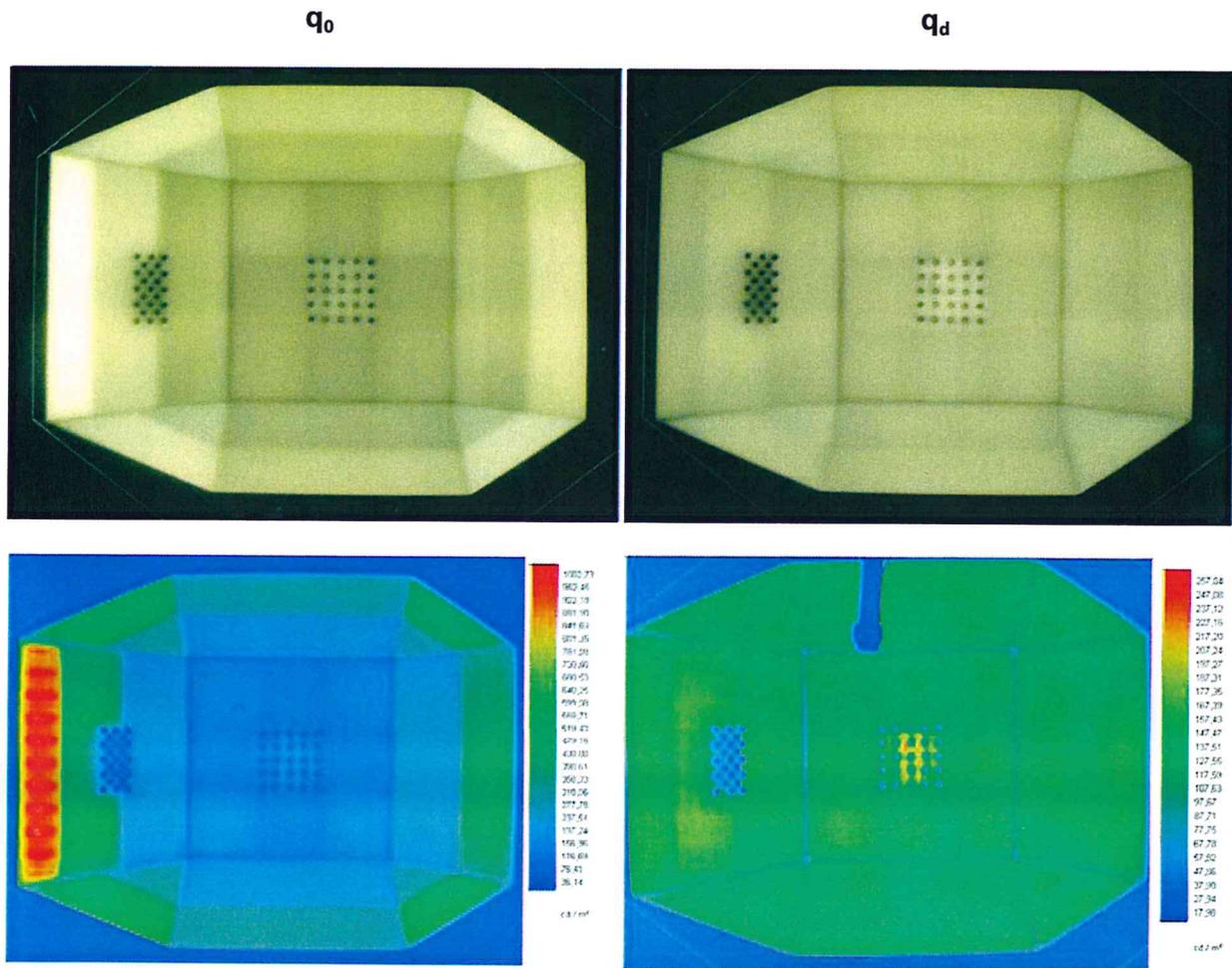


Bild 12: fotografische Aufnahmen des Leuchtdichteschirms von unten aus Richtung des Messpunktes gesehen für die Messung von q_0 und die Messung von q_d . Falschfarbendarstellung der Leuchtdichten der jeweiligen Verteilungen (unten).



Bild 13: fotografische Aufnahme des LED-Arrays zur Direktbeleuchtung unter einem Einstrahlwinkel von $63,5^\circ$.

2.3.4 Fehlerbetrachtung

Eine Fehlerbetrachtung des realen Aufbaus gegenüber den idealen theoretischen Messbedingungen wird für die Beleuchtung der Probe durch den steuerbaren Leuchtdichteschirm und durch die beiden Direktlichtquellen durchgeführt. Als mögliche Messfehler sind zu untersuchen:

- Diskretisierung der kontinuierlichen Leuchtdichteverteilung,
- Einbringung der Direktlichtquellen in den Leuchtdichteschirm,
- Homogenität der Beleuchtungsstärke auf dem Messfeld,
- Einfluss der Spektren der eingesetzten LEDs,
- Einfluss der Umgebungstemperaturen auf die Leuchtdichteverteilung,
- Ausleuchtung durch die Direktlichtquelle.

Diskretisierung der kontinuierlichen Leuchtdichteverteilung

In Bild 14 ist die kontinuierliche relative Leuchtdichteverteilung der diskretisierten relativen Leuchtdichteverteilung gegenübergestellt. Die diskrete Leuchtdichteverteilung wurde derart eingestellt, dass der mittlere quadratische Fehler bei der gewählten konstruktiven Unterteilung des Schirms minimiert wurde.

Für die Bewertung der Diskretisierung ist jedoch nicht direkt die Leuchtdichteverteilung relevant, sondern die im Messbereich raumwinkelbezogen bereitgestellte Beleuchtungsstärke bzw. bei Kenntnis der Reflexionscharakteristik die mit den Leuchtdichtekoeffizienten gewichtete Beleuchtungsstärke, d. h. die zu messenden Leuchtdichten unter dem gegebenen Beobachtungswinkel.

Für die Optimierung der Güte der Diskretisierung der Leuchtdichteverteilung ist somit letztendlich die Abweichung hinsichtlich der Zielgröße, d. h. der Leuchtdichte in Beobachtungsrichtung L_r , bei der dem Belag aufgeprägten kontinuierlichen Leuchtdichteverteilung zu minimieren. Da diese Bewertung von der unbekannt, zu bewertenden Verteilung des reduzierten Leuchtdichtekoeffizienten abhängt, lässt sie sich per se nicht optimieren.

Zur Deutung der Güte hinzugezogen werden kann aber die im Messbereich raumwinkelbezogene bereitgestellte horizontale Beleuchtungsstärke gemäß Gleichung (1). Bild 15 ist die kontinuierliche, diskretisierte und die entsprechende Differenz des Beitrages der relativen Leuchtdichteverteilung zur Beleuchtungsstärke auf dem Messfeld zu entnehmen. Bei dieser raumwinkelgewichteten Betrachtung stellt sich nur eine geringe Abweichung ein.

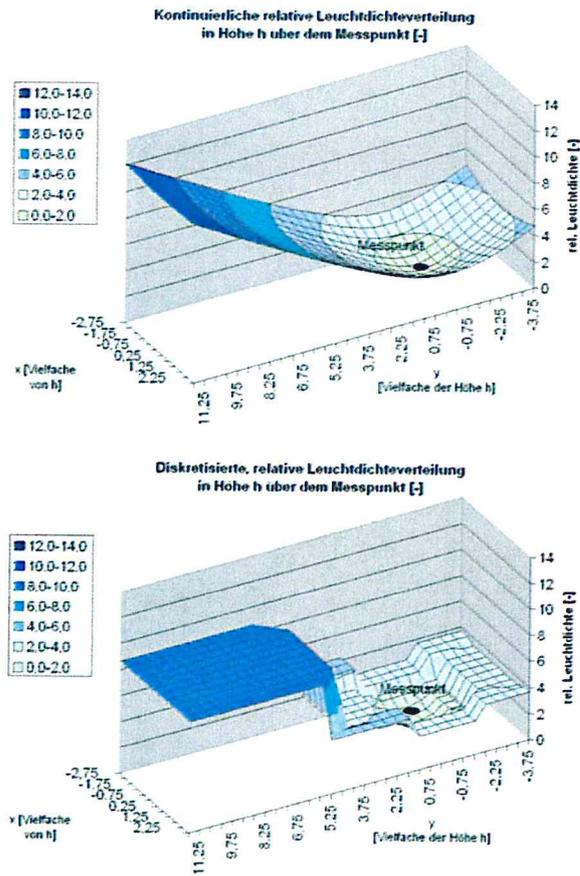


Bild 14: Gegenüberstellung der kontinuierlichen und diskretisierten Leuchtdichteverteilung des Leuchtschirms.

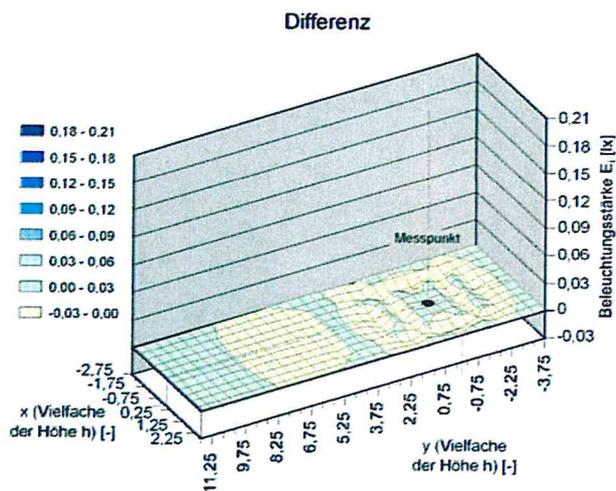
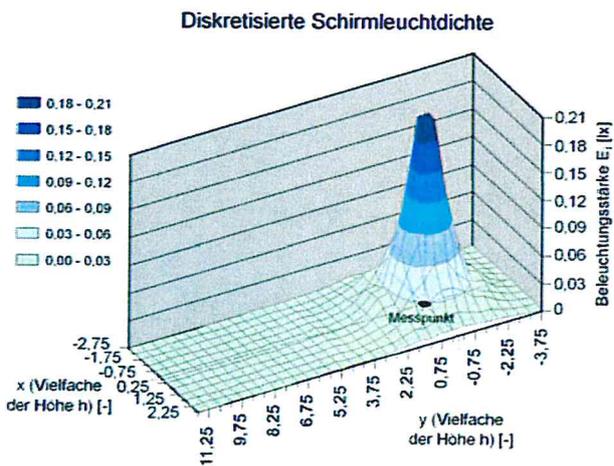
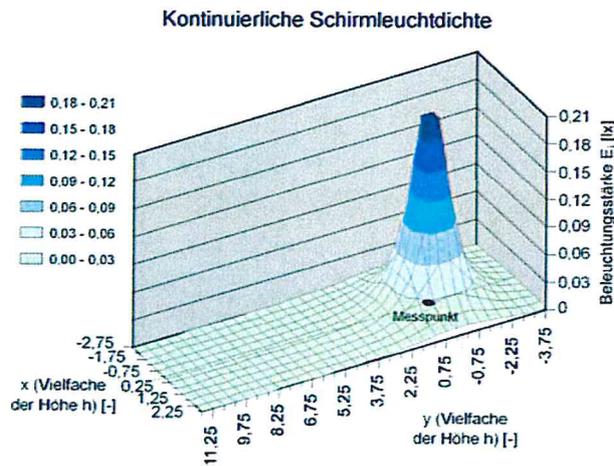


Bild 15: Vergleich der Beleuchtungsstärkeanteile von kontinuierlichen und diskretisierten raumwinkelgewichteten relativen Leuchtdichteverteilungen oberhalb der Probe.

Einbringung der Direktlichtquellen in den Messschirm

Durch die Einbringung der Direktlicht-LED-Arrays kommt es wie in Bild 12 dargestellt zu lokalen Abschattungen des Leuchtdichteschirms. Die opaken Anteile

der LEDs werden durch eine Erhöhung der Leuchtdichte der entsprechenden Leuchtdichtefelder des Leuchtdichteschirms kompensiert. Kontrollmessungen konnten keine signifikante Beeinflussung der Messung von q_0 feststellen.

Homogenität der Beleuchtungsstärke auf dem Messfeld

Für die Leuchtdichteschirmeinstellung zur Messung von q_0 und q_d sind in Bild 16 die Beleuchtungsstärkeverläufe im Messfeld aufgetragen. Es stellt sich in beiden Fällen eine Gleichmäßigkeit größer 98 % ein.

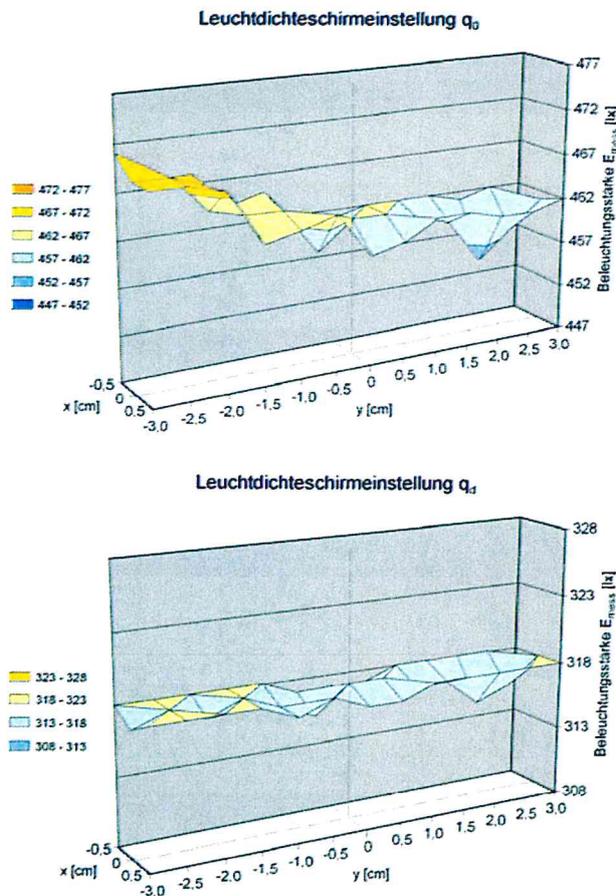


Bild 16: Beleuchtungsstärkeverläufe im Messfeld bei den Leuchtdichteschirmeinstellungen zur Messung von q_0 und q_d .

Einfluss der Spektren der eingesetzten LED

Das in-situ Messgerät ist mit warmweißen LEDs bestückt. Bild 17 zeigt unterschiedliche $V(\lambda)$ hellempfindlichkeitsbewertete Reflexionsgrade, die mit dem typisierten genutzten Lampenspektrum, dem typisierten Spektrum tageslichtweißer LED und den Normlichtarten A und D65 beleuchtet werden. Tabelle 3 enthält die auf die Normlichtart D65 bezogenen relativen Abweichungen. Das von den Normlichtarten abweichende Spektrum der eingesetzten LEDs verursacht

bei den zu erwartenden Reflexionscharakteristika (im Wesentlichen graue Beläge) nur geringe Abweichungen.

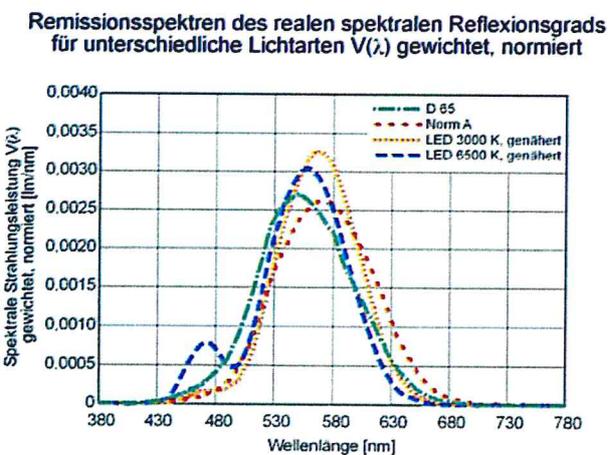
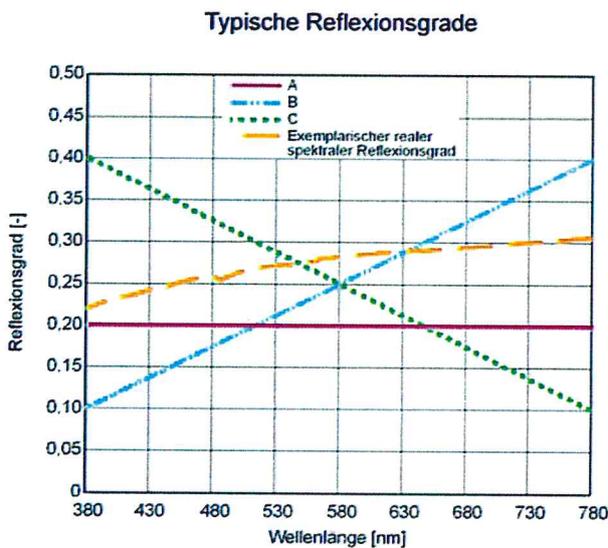
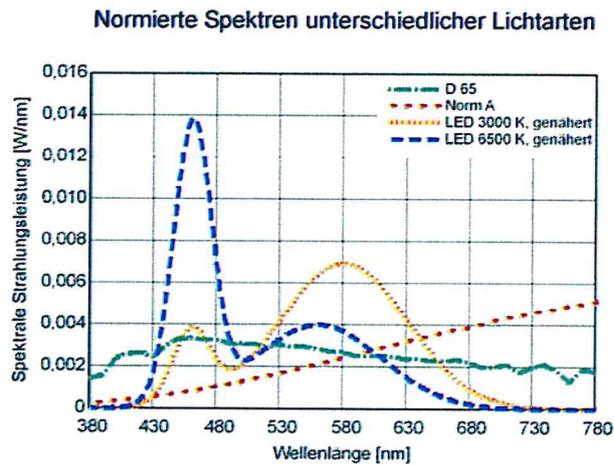


Bild 17: Unterschiedliche $V(\lambda)$ hellempfindlichkeitsbewertete Reflexionsgrade, die mit dem typisierten genutzten Lampenspektrum, dem typisierten Spektrum tageslichtweiße LED und den Normlichtarten A und D65 beleuchtet werden.

		Lampenspektrum			
		D65 (Bezug)	Normlicht A	LED 3000 K, genähert	LED 6500 K, genähert
		[%]	[%]	[%]	[%]
Reflexionsgradtyp	A	0,0	0,0	0,0	0,0
	B	0,0	5,0	3,1	-2,0
	C	0,0	-4,3	-2,7	1,7
	Exemplarisches reales Spektrum	0,0	1,1	0,8	-0,4

Tabelle 3: Auf die Normlichtart D65 bezogene relative Abweichungen der $V(\lambda)$ gewichteten Remissionsspektren.

Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Leuchtdichteverteilung

Das in-situ Messgerät wurde unter verschiedenen Umgebungstemperaturen betrieben (bis 33°C). Es konnte keine Veränderung der Leuchtdichteverteilung festgestellt werden. Bei extremen Umgebungstemperaturen kann durch einen in das mobile Messgerät eingebauten Beleuchtungsstärkemesser nachkalibriert werden.

Ausleuchtung durch Direktlichtquelle

Die bei Ausleuchtung durch die Direktlichtquellen im Messfeld gemessenen Beleuchtungsstärkeverteilungen sind jeweils für die Beleuchtungswinkel von $\gamma = 0^\circ$ und von $\gamma = 63,5^\circ$ in Bild 18 im Schnitt dargestellt.

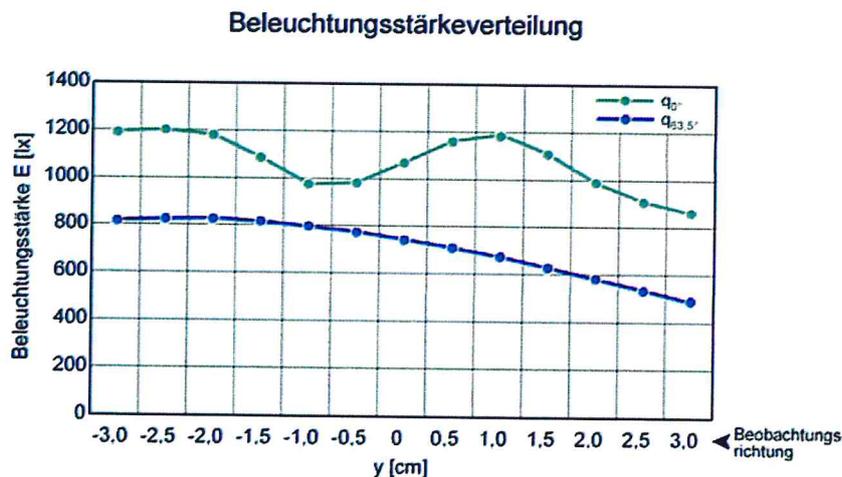


Bild 18: Beleuchtungsstärkeverteilung in der Mitte des Messfeldes bei Beleuchtung mit den Direktlichtquellen unter 0° und $63,5^\circ$.

Die Ungleichmäßigkeit bei Beleuchtung unter $\gamma = 0^\circ$ ist auf die Varianz der Lichtstärken der einzelnen LEDs zurückzuführen. Abhilfe kann hier z.B. die Selektion von LEDs mit geringerer Bauteiltoleranz schaffen. Bei Beleuchtung unter

$\gamma = 63,5^\circ$ sorgt die stärkere Überlagerung infolge schrägem Einfalls für einen geglätteten Verlauf der Beleuchtungsstärke im Messfeld; jedoch auch für einen Gradienten in der Intensität. Eine gezielte Ansteuerung der LEDs kann diesem entgegenwirken. Die beiden Effekte können jedoch bei dem in-situ Messgerät durch mehrerer Messungen auf dem jeweiligen Prüfbelag statistisch kompensiert werden. Ebenso können durch die Mehrfachmessung die Einflüsse von Unebenheiten und Inhomogenitäten realer Beläge vermindert werden.

2.4 Validierung des Messgerätes

Das Messgerät wurde in zwei Phasen validiert. Zunächst wurden Vergleichsmessungen mit sieben Straßenbelagsmustern, die im Labor erstellt und lichttechnisch vermessen wurden, durchgeführt. Im Anschluss wurde das Messgerät im Feld auf eingebauten Belägen validiert. Vergleichswerte wurden auf Basis von Bohrkernen bestimmt, die aus der Straße gezogen wurden.

2.4.1 Erstellung und lichttechnische Quantifizierung von Straßenbelagsmustern

Für die lichttechnische Quantifizierung von Asphaltoberflächen wurden im Straßenbaulabor der TU Dresden Musterproben hergestellt. Zunächst wurden dafür verschiedene Mischgutarten und –sorten festgelegt und dann die entsprechenden Gesteinskörnungen sowie die Bindemittel ausgewählt. Das jeweilige Mischgut wurde chargenweise nach einer vorher erarbeiteten Eignungsprüfung produziert. Die anschließende Herstellung der Probeplatten erfolgte mittels Walzsektorverdichtungsgerät gemäß [12]. Abschließend wurden die hergestellten Probeplatten auf eine leicht zu handhabende Größe von 26 x 15 x 4 cm (L x B x D) gesägt und der auf der Oberfläche vorhandene Bindemittelfilm mittels Strahlen (Medium: Glasperlen) vorsichtig entfernt.

Beschreibung der Straßenbelagsmuster

Bild 19 enthält eine Gegenüberstellung der betrachteten Straßenbelagsmuster. Wie Bild 20 zeigt deckt der Probensatz ein weites Spektrum der in der Praxis vorkommenden lichttechnischen und damit zu messenden Eigenschaften ab:

- mittlerer Leuchtdichtekoeffizient q_0 : 0,038 cd/(m²*lx) bis 0,148 cd/(m²*lx)
- gerichtete Reflexionscharakteristik: R1-R4 (κ_p : 0,080 bis 0,444; S1: 0,13 bis 1,55)
- Belagsfarbe (spektrale Reflexionscharakteristik): neutrale graue Beläge, gelbliche und rötliche Beläge.

Tabelle 4 enthält die an der Messeinrichtung an der TU Dresden ermittelten Kennwerte.

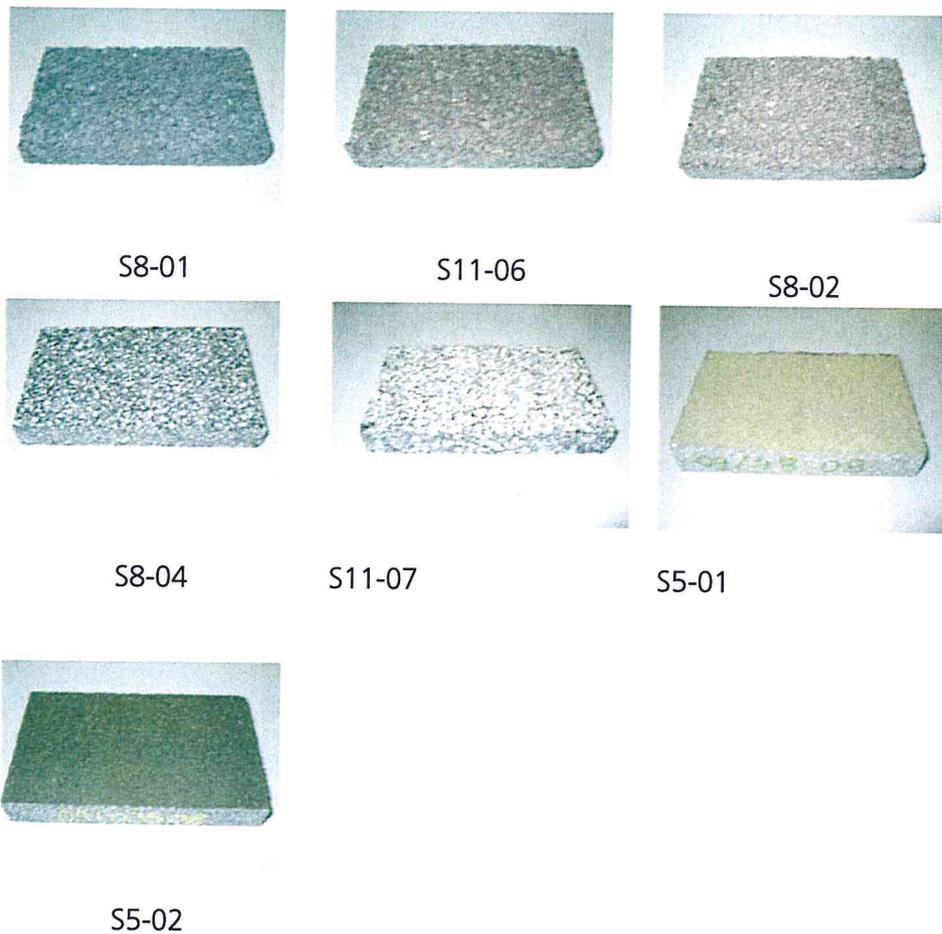


Bild 19: Fotografische Darstellung der 7 Straßenbelagsmuster und Bezeichnung.

Bild 21 zeigt spektrale Reflexionsgrade ausgewählter Proben, die am Fraunhofer-Institut für Bauphysik vermessen wurden. Die Abweichung aufgrund der Beleuchtung der Proben mit einer Halogenlampe (genähert Normlichtart A) an der TU Dresden und Beleuchtung der Proben mit LEDs durch das neue Messgerät liegt in dem in Kapitel 2.3.4 diskutierten Einflussbereich des Lampenspektrums.

Photometrische Eigenschaften der ausgewählten Proben

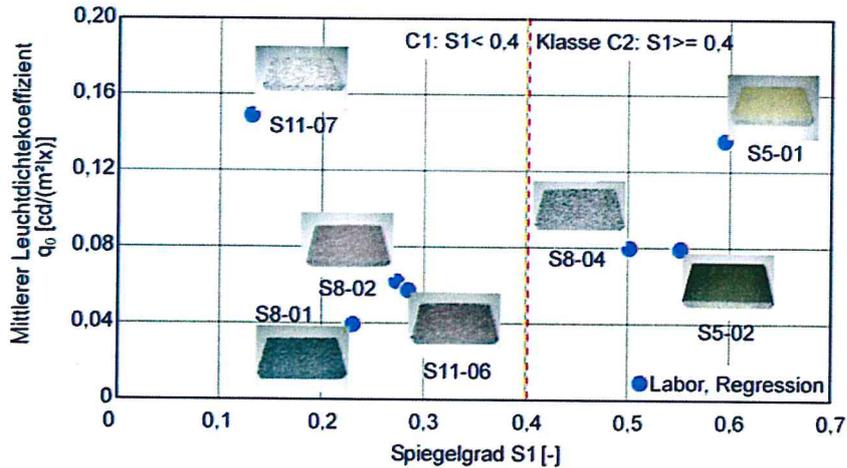


Bild 20: mittlerer Leuchtdichtekoeffizient q_0 aufgetragen über dem Spiegelgrad S_1 der ausgewählten Straßenbelagsmuster.

Probennummer	Gemessene Werte			Errechnete Kennwerte					Belagstyp Klassifizierung	
	E	L_{0°	$L_{63,5^\circ}$	q_{0°	$q_{63,5^\circ}$	q_0	κ_p	S_1	R-System nach κ_p	C-System (CIE) nach S_1
	[lx]	[cd/m ²]	[cd/m ²]	[cd/m ² lx]	[cd/m ² lx]	[cd/m ² lx]	[-]	[-]		
S 8-01	460	13,3	15,68	0,029	0,076	0,038	0,12	0,23	R1	C1
S 11-06	457	19,1	26,82	0,042	0,132	0,057	0,14	0,28	R1	C1
S 8-02	457	20,46	28,06	0,045	0,138	0,061	0,13	0,27	R1	C1
S 8-04	457	22,72	57,48	0,050	0,282	0,080	0,22	0,50	R1/R2	C2
S 11-07	457	56,06	37,68	0,123	0,185	0,148	0,08	0,13	R1	C1
S 5-01	459	36,18	107,64	0,079	0,526	0,135	0,23	0,59	R2	C2
S 5-02	459	13,06	100,14	0,028	0,489	0,078	0,44	1,55	R3/R4	C2

Tabelle 4: Zusammenstellung der an der TU Dresden gemessenen Werte, der hieraus errechneten Kennwerte und der zugehörigen Klassifikation.

Spektrale Reflexionsgrade

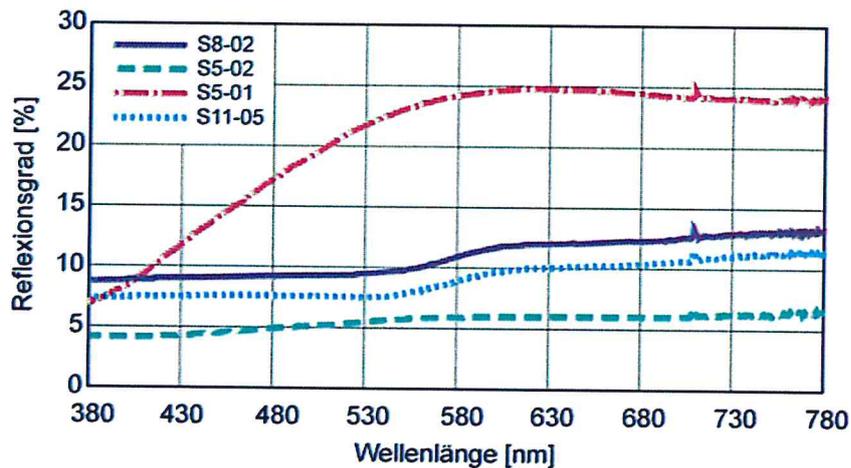


Bild 21: Gegenüberstellung gemessener spektraler Reflexionsgrade ausgewählter Proben.

2.4.2 Messungen an Straßenbelagsmustern

Tabelle 5 enthält die Zusammenstellung der mit dem in-situ Messgerät gemessenen Größen, der hieraus errechneten Kennwerte und der sich ergebenden Klassifizierung. Die Kenngröße q_0 wurde hierbei auf 2 Arten bestimmt. Zum einen wurde sie als $q_{0,direkt}$ über den Leuchtdichteschirm gemessen. Zum anderen erfolgte über das beschriebene Näherungsverfahren nach Gleichung (6) in (8) eine Bestimmung bezeichnet als $q_{0,Regression}$. Entsprechendes gilt für κ_p , das einmal mit $q_{0,direkt}$ errechnet als $\kappa_{p,direkt}$ und des Weiteren nach dem Näherungsansatz nach Gleichung (6) als $\kappa_{p,Regression}$ bestimmt wurde.

Des Weiteren wurde über die Referenzwerte der TU Dresden hinausgehend der Kennwert q_d nach [2] durch die Erzeugung einer gleichförmigen Leuchtdichteverteilung über der Probe bestimmt. Ergänzend wurden sämtliche Werte für einen Beobachtungswinkel von $\alpha = 2,29^\circ$ nach Empfehlung [2] ermittelt. Diese sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

Probennummer	Gemessene Werte										Errechnete Werte						Belagstyp Klassifizierung	
	E_{diff0}	L_{diff0}	E_{diff0}	L_{diff0}	E_{dir0}	L_{0°	$E_{\text{dir } 63,5^\circ}$	$L_{63,5^\circ}$	Q_0 gemess	Q_0 Regression	Q_{d} gemess	Q_0 gemess / Q_{d} gemess	K_p direkt	K_p Reg- ression	S1	R- System nach k_p	C- System (CIE) nach S1	
	[lx]	[cd/ m ²]	[lx]	[cd/ m ²]	[lx]	[cd/ m ²]	[lx]	[cd/ m ²]	[cd/ m ² lx]	[cd/ m ² lx]	[cd/ m ² lx]	[-]	[-]	[-]	0,23			
S 8-01	450	20,1	309	11,3	1.110	32,0	750	56,8	0,045	0,038	0,037	1,22	0,19	0,12	0,23	R1	C1	
S 11-06	450	27,7	309	15,3	1.110	41,5	750	98,5	0,062	0,053	0,050	1,24	0,22	0,15	0,31	R1/R2	C1	
S 8-02	450	28,5	309	16,2	1.110	42,2	750	120,5	0,063	0,056	0,052	1,21	0,22	0,17	0,38	R1/R2	C1	
S 8-04	450	52,1	309	27,6	1.110	54,0	750	281,4	0,116	0,088	0,089	1,30	0,38	0,26	0,69	R3	C2	
S 11-07	450	70,0	309	44,1	1.110	125,2	750	148,9	0,156	0,139	0,143	1,09	0,14	0,09	0,16	R1	C1	
S 5-01	450	54,5	309	29,0	1.110	59,7	750	248,0	0,121	0,089	0,094	1,29	0,35	0,22	0,55	R3	C2	
S 5-02	450	38,9	309	17,1	1.110	30,1	750	291,6	0,086	0,067	0,055	1,56	0,50	0,39	1,27	R4	C2	

Tabelle 5: Zusammenstellung der mit dem prototypischen Messgerät unter einem Beobachtungswinkel von $\alpha = 1^\circ$ gemessenen Werte, der hieraus errechneten Kennwerte und der zugehörigen Klassifikation.

Probennummer	Gemessene Werte										Errechnete Werte					Belagstyp Klassifizierung	
	E_{diff0}	L_{diff0}	E_{diff0}	L_{diff0}	E_{dir0}	L_0	$E_{\text{dir } 63,5^\circ}$	$L_{63,5^\circ}$	Q_0 gemess	Q_d gemess	Q_0 gemess / Q_d gemess	κ_p direkt	S1	R-System nach κ_p	C-System (CIE) nach S1		
	[lx]	[cd/m ²]	[lx]	[cd/m ²]	[lx]	[cd/m ²]	[lx]	[cd/m ²]	[cd/m ² lx]	[cd/m ² lx]	[-]	[-]	[-]	-	-		
S 8-01	450	19,5	309	11,8	1.113	34,9	772	76,1	0,043	0,038	1,13	0,14	0,28	-	-		
S 11-06	450	27,0	309	15,9	1.113	46,0	772	95,7	0,060	0,051	1,17	0,16	0,27	-	-		
S 8-02	450	28,8	309	16,6	1.113	50,7	772	90,6	0,064	0,054	1,19	0,15	0,23	-	-		
S 8-04	450	49,3	309	29,3	1.113	81,9	772	312,2	0,109	0,095	1,16	0,17	0,49	-	-		
S 11-07	450	67,1	309	44,4	1.113	146,1	772	145,3	0,149	0,144	1,04	0,06	0,13	-	-		
S 5-01	450	55,8	309	31,7	1.113	86,3	772	332,8	0,124	0,103	1,21	0,20	0,49	-	-		
S 5-02	450	35,7	309	16,3	1.113	35,8	772	293,2	0,079	0,053	1,50	0,39	1,05	-	-		

Tabelle 6: Unter einem Beobachtungswinkel von $\alpha = 2,29^\circ$ gemessene Werte.

2.4.3 Auswahl Probestrecken

Für die Messung der Helligkeit in-situ mit dem in-situ Messgerät wurden in Dresden verschiedene Strecken ausgewählt. Es wurden Deckschichtbeläge (Mischgutart und -sorte) ausgewählt, die zum einen häufig in der Praxis Anwendung finden und die bereits eine mehrjährige Verkehrsbeanspruchung aufweisen können. Zum anderen wurde bei der Vorauswahl versucht, verschiedenen helle Strecken zu finden, die ein möglichst weites Spektrum der lichttechnischen Eigenschaften abdecken. Tabelle 7 enthält die ausgewählten Strecken.

Nr.	Strecke	Mischgutart und -sorte	Vorwiegend enthaltene Gesteinskörnung
1	Franklinstraße	SMA 0/8 S	Syenodiorit
2	Zellescher Weg	SMA 0/11 S	Syenodiorit
3	Käthe-Kollwitz-Ufer	SMA 0/11 S	Granodiorit
4	Hüblerstraße	Halbstarre Deckschicht	Diabas
5	Tolkewitzer Straße	SMA 0/11 S	Granodiorit
6	Neubertstraße	AB 0/11 S	Lamprophyr

Tabelle 7: Auswahl der Strecken für die in-situ Messungen.

2.4.4 Messungen auf der Probestrecke

Die Messungen auf den ausgewählten Strecken fanden am 10. September und 11. September 2008 bei trockener und sonniger Witterung statt. Wie in Bild 22 und Bild 23 dargestellt, wurde zunächst die Deckschicht mit dem prototypischen Messgerät an jeweils 4-5 Stellen vermessen. Anschließend erfolgte an der Messstelle die Entnahme eines Bohrkernes (Durchmesser 225 mm). Die Bohrkernkerne wurden umgehend gesäubert (Entfernung des Bohrschlammes). Im Straßenbaulabor der TU Dresden erfolgte das Abtrennen, Reinigen und Trocknen der jeweiligen Deckschicht. Anschließend wurden die lichttechnischen Kennwerte im Labor der TU Dresden an den Deckschichten ermittelt.

Zur weiteren Bestätigung der Messwerte wurden die Bohrkernkerne abschließend mit dem in-situ Messgerät im IBP Stuttgart nochmals vermessen.



Bild 22: Messung in-situ und anschließende Bohrkernentnahme.

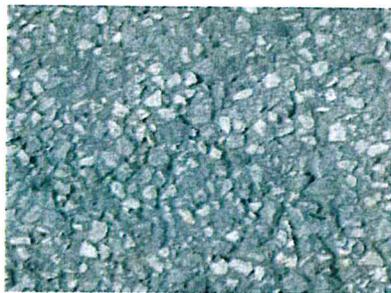


Bild 23: Exemplarische Darstellung einer gemessenen Oberflächenstruktur, Deckschicht aus SMA 0/11 S.

Tabelle 8 enthält die an der Labormesseinrichtung an der TU-Dresden ermittelten Kennwerte der entnommenen Bohrkern. In Tabelle 9 sind die mit dem in-situ Messgerät gemessenen Größen, die hieraus errechneten Kennwerte und die sich ergebende Klassifizierung zusammengefasst.

2.4.5 Vergleich und Diskussion der Messwerte

Im Folgenden werden die mit dem prototypischen Messgerät ermittelten Kennwerte diskutiert und mit den Referenzmessung aus dem Labor verglichen. Hierbei wird jeweils auf die separaten Messdatensätze „Straßenbelagsmuster“ und „Probestrecke“ eingegangen.

Probennummer	Gemessene Werte			Errechnete Werte					Belagstyp Klassifizierung	
	E	L _{0°}	L _{63,5°}	q _{0°}	q _{63,5°}	q ₀	κ _p	S1	R-System nach κ _p	C-System (CIE) nach S1
	[lx]	[cd/m ²]	[cd/m ²]	[cd/m ² lx]	[cd/m ² lx]	[cd/m ² lx]	[-]	[-]		
Probe 1	458	19,45	49,98	0,043	0,245	0,069	0,21	0,51	R1	C2
Probe 2	458	17,06	64,90	0,037	0,318	0,071	0,28	0,76	R2	C2
Probe 3	458	19,64	56,90	0,043	0,278	0,073	0,23	0,57	R2	C2
Probe 4	457	15,86	136,52	0,035	0,670	0,103	0,47	1,70	R4	C2
Probe 5	457	14,04	75,70	0,031	0,371	0,069	0,35	1,06	R3	C2
Probe 6	457	15,52	52,46	0,034	0,257	0,061	0,26	0,67	R2	C2

Tabelle 8: Zusammenstellung der an der TU-Dresden am Labormessgerät gemessenen Werte der entnommenen Bohrkerne der Probestrecken, der hieraus errechneten Kennwerte und der zugehörigen Klassifikation.

Probennummer	Gemessene Werte										Errechnete Werte						Belagstyp Klassifizierung	
	E_{diff0}	L_{diff0}	E_{diff0}	L_{diff0}	E_{dir0}	L_{0°	$E_{\text{dir } 63,5^\circ}$	$L_{63,5^\circ}$	Q_0 gemess	Q_0 Regression	Q_d gemess	Q_0 gemess/ Q_d gemess	K_p direkt	K_p Reg- ression	S1	R- System nach K_p	C- System (CIE) nach S1	
	[lx]	[cd/ m ²]	[lx]	[cd/ m ²]	[lx]	[cd/ m ²]	[lx]	[cd/ m ²]	[cd/ m ² lx]	[cd/ m ² lx]	[cd/ m ² lx]	[cd/ m ² lx]	[cd/ m ² lx]	[cd/ m ² lx]	[-]			[-]
Probe 1	478	41,2	327	21,7	1082	36,6	730	211,5	0,086	0,064	0,066	1,30	0,41	0,28	0,79	R3	C2	
Probe 2	461	35,3	317	17,9	1082	33,3	730	288,5	0,077	0,071	0,057	1,35	0,40	0,36	1,15	R3	C2	
Probe 3	482	46,5	330	21,6	1082	19,2	730	191,8	0,096	0,045	0,065	1,48	0,75	0,40	1,32	R4	C2	
Probe 4	502	56,1	341	22,9	1082	18,7	730	445,0	0,112	0,078	0,067	1,67	0,82	0,66	3,21	R4	C2	
Probe 5	460	37,5	315	18,2	1082	24,1	730	235,0	0,082	0,055	0,058	1,42	0,57	0,39	1,29	R4	C2	
Probe 6	461	40,1	316	20,0	1082	24,6	730	170,3	0,087	0,047	0,063	1,38	0,58	0,32	0,91	R4	C2	

Tabelle 9: Zusammenstellung der mit dem prototypischen Messgerät unter einem Beobachtungswinkel von 1° gemessenen Werte auf den Probestrecken, der hieraus errechneten Kennwerte und der zugehörigen Klassifikation.

2.4.5.1 Absolutwert der Reflexion

Mittlerer Leuchtdichtekoeffizient q_0

Für die speziell angefertigten Straßenbelagsmuster ist generell eine gute Übereinstimmung von Mess- und Referenzwerten festzustellen. Bis auf Probe S5-01 liegen, wie in Bild 24 oben dargestellt, die Werte $q_{0, \text{in-situ Messgerät, direkt}}$ höher als die über das Näherungsverfahren bestimmten Kennwerte $q_{0, \text{Labor, Regression}}$ und auch $q_{0, \text{in-situ Messgerät, Regression}}$. Dies entspricht der in Bild 6 dargestellten Tendenz, dass das Näherungsverfahren q_0 tendenziell eher leicht unterschätzt. Die mittlere Abweichung liegt nach Tabelle 5 bei etwa -18% und liegt somit im Bereich der in Kapitel 2.2.2.1 konstatierten Abweichung. Die Abweichungen bei Probe S8-04 werden durch die sehr unebene Probe erklärt, die bei mehrmaligem Messen große Varianzen aufwies.

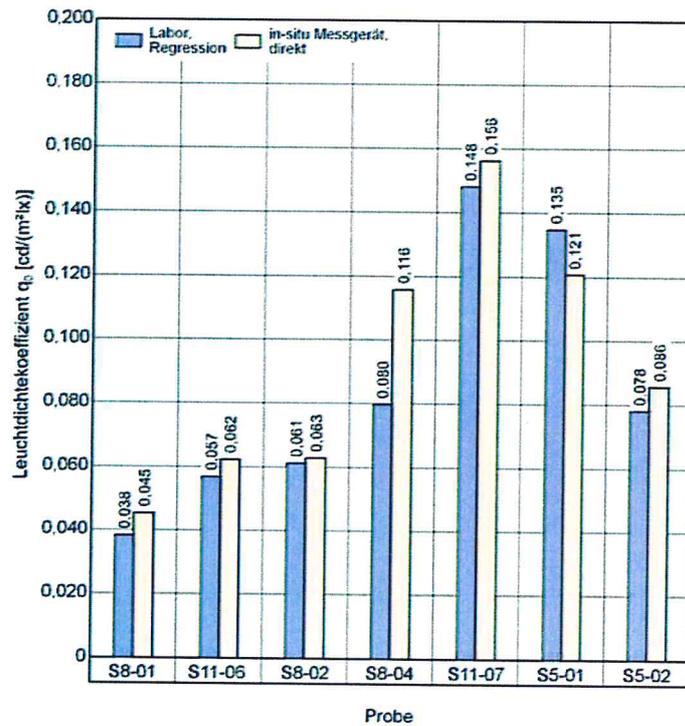
Vergleicht man ergänzend rein zu Validierungszwecken die Werte $q_{0, \text{Reg., Labor}}$ mit $q_{0, \text{Reg., in-situ Messgerät}}$ zeigt sich eine generell gute Übereinstimmung, welche auf eine richtige konstruktive Umsetzung der Direktlichtarrays im Leuchtdichteschirm schließen lässt.

Entsprechende Zusammenhänge stellen sich für die Messungen auf den Probestrecken ein. Die in Bild 24 unten dargestellten direkt gemessenen Werte stellen Mittelwerte aus jeweils an 4 bis 6 verschiedenen Straßenstellen gemessenen Einzelwerten dar. Die Einzelwerte sind in Bild 26 zusammengestellt.

Der in Bild 25 dargestellte Vergleich der Werte, die durch die Näherungsverfahren ermittelt wurden, bestätigt auch hier die Tendenz, dass die direkt gemessenen Werte $q_{0, \text{in-situ Messgerät, direkt}}$ höher als die Näherungswerte $q_{0, \text{Labor, Regression}}$ liegen.

Bzgl. der Einzelmessungen auf den Straßen, dargestellt in Bild 26, liegen die Standardabweichungen zwischen 3 % und 8 %, wobei maximal Abweichungen gegenüber dem Mittelwert von 14 % gemessen wurden. Die Abweichungen sind auf lokale Schwankungen in der Zusammensetzung der Beläge, auf Unebenheiten und unterschiedliche Abnutzungen zurückzuführen. Die Abweichungen sind nicht vernachlässigbar und zeigen das Erfordernis, an mehreren Stellen im Feld zu messen, um lokale Schwankungen der Reflexionscharakteristik berücksichtigen zu können.

Straßenbelagsmuster Gegenüberstellung von q_0



Probestrecken Gegenüberstellung von q_0

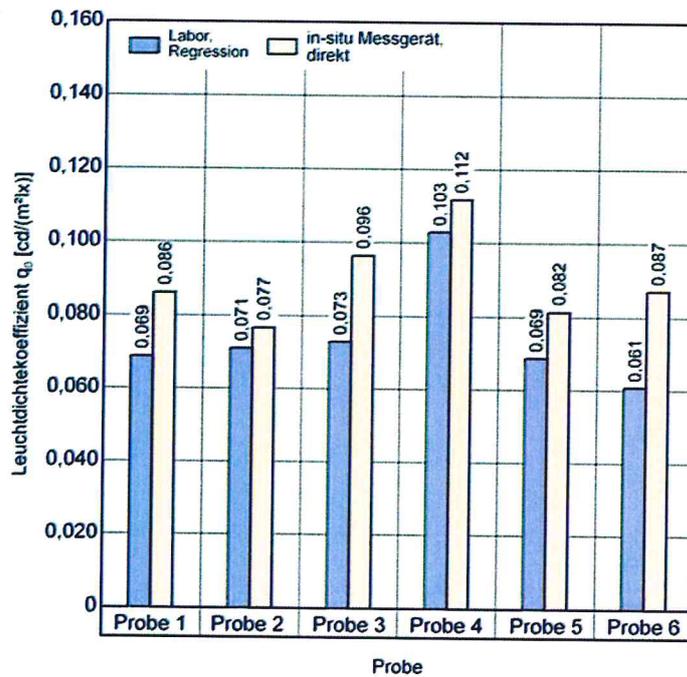


Bild 24: Gegenüberstellung der gemessenen mittleren Leuchtdichtekoeffizienten q_0 . Die obere Grafik zeigt die Messungen an im Labor hergestellten Straßenbelagsmustern. Die untere Grafik stellt die Messungen der Probestrecken dar.

Straßenbelagsmuster Gegenüberstellung von q_0

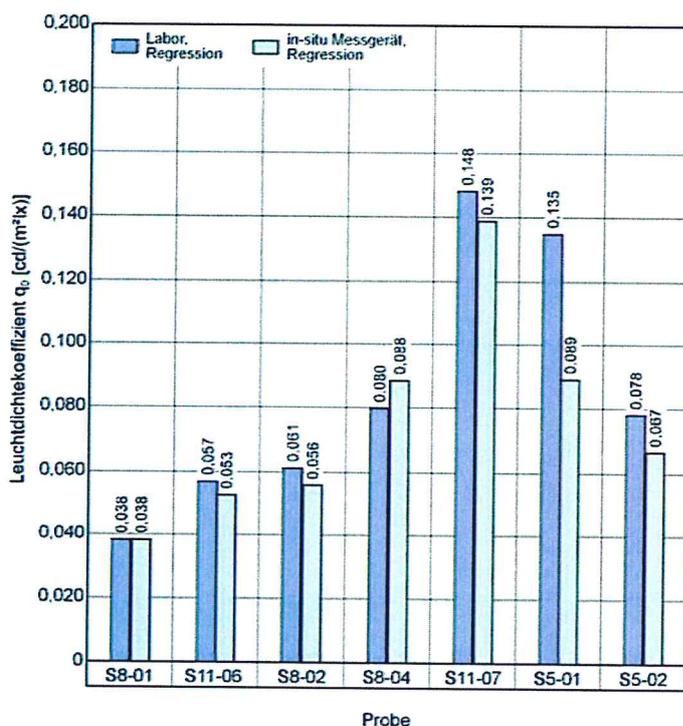


Bild 25: Gegenüberstellung der über das Näherungsverfahren ermittelten mittleren Leuchtdichtekoeffizienten q_0 für Messungen mit der Labor Messeinrichtung und Messungen mit der neuen in-situ Messeinrichtung.

Probestrecken Gegenüberstellung von q_0 , gemessene Einzelwerte

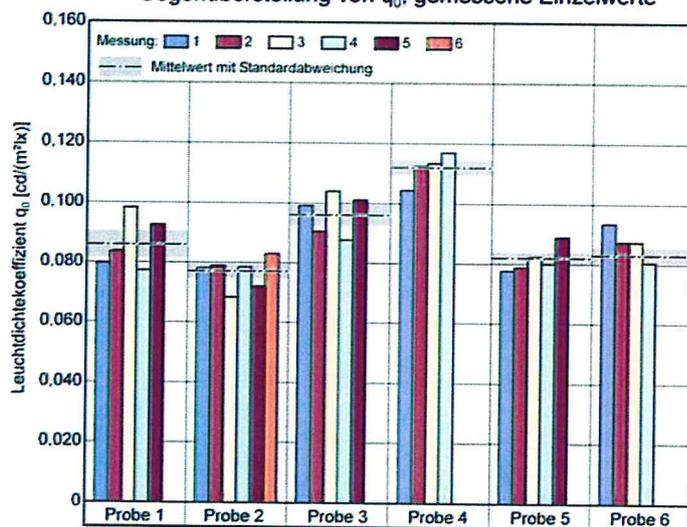


Bild 26: Gegenüberstellung der Einzelmessungen auf den Probestrecken mit Standardabweichungen.

Leuchtdichtekoeffizient bei diffuser Beleuchtung q_d

Für diese Kennwerte liegen keine Referenzwerte vor. Dennoch kann über einen in [2] angegebenen Zusammenhang, der den Verhältniswert q_0/q_d als Funktion von S_1 zeigt, eine tendenzielle Aussage getroffen werden. Die mit dem prototypischen Messgerät gemessenen Verhältniswerte decken sich, wie Bild 27 zu entnehmen ist, gut mit dem Verlauf der Verhältniswerte, der für die Typverteilungen R1–R4 und C1, C2 in [2] angegeben wird.

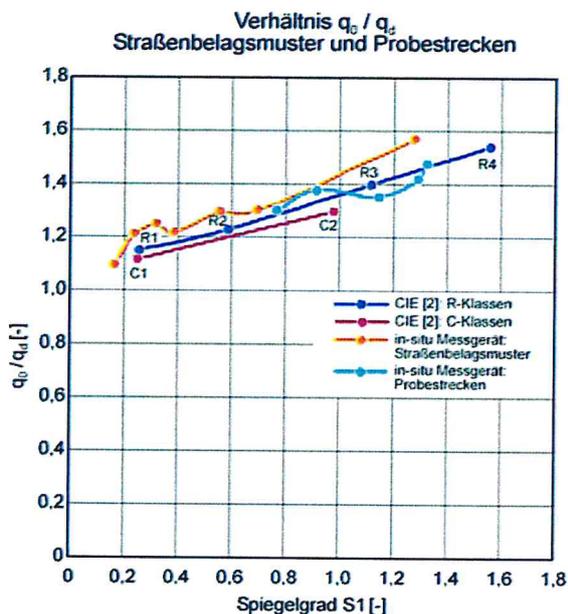


Bild 27: Vergleich der Verhältniswerte q_0/q_d als Funktion des Spiegelgrades S_1 .

2.4.5.2 Räumliche Reflexionscharakteristik

Spiegelgrad S_1

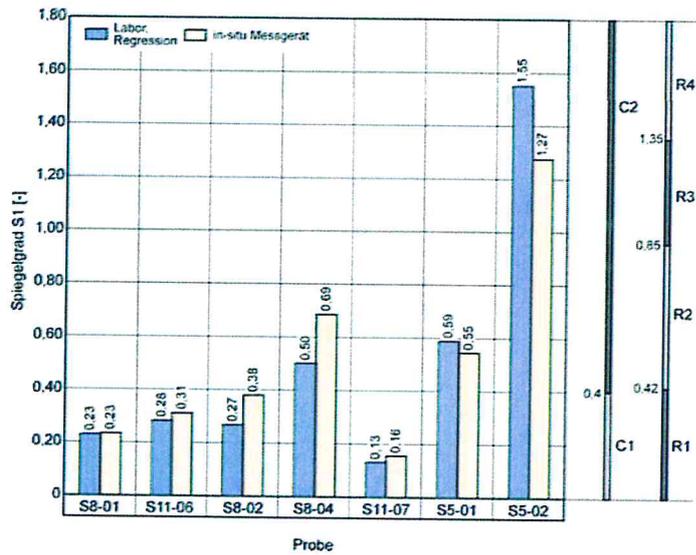
Der Spiegelgrad S_1 wird nach Gleichung (4) direkt, d. h. ohne ein auf nicht verfügbaren Basisdaten basierendes Näherungsverfahren, ermittelt. Wie Bild 28 zu entnehmen ergibt sich für die Straßenbelagsmuster im Mittel eine gute Übereinstimmung. Es ist keine systematische Abweichung festzustellen. Für die Probestrecke werden in-situ generell höhere Spiegelfaktoren gemessen.

Spiegelfaktor κ_p

Der Vollständigkeit halber wird auch der Spiegelfaktor κ_p diskutiert, wobei bereits in Kapitel 2.2.2.2 eine kritische Diskussion dieser Kennzahl erfolgte. Bestimmt man κ_p als $\kappa_{p, \text{in-situ Messgerät, direkt}}$, d. h. nach Gleichung (5) basierend auf den direkt gemessenen Kennwert $q_{0, \text{direkt}}$, ergeben sich höhere Werte. Dies stimmt mit den zuvor gemachten Beobachtungen hinsichtlich der Direktmessung von q_0 überein.

Wie Bild 29 zu entnehmen herrscht generell gute Übereinstimmung zwischen den Kennwerten $\kappa_{p, \text{Labor, Regression}}$ und $\kappa_{p, \text{in-situ Messgerät, Regression}}$. Dies impliziert, dass die Messeinrichtungen unter Laborbedingungen vergleichbar sind.

Straßenbelagsmuster Gegenüberstellung von S1,



Probestrecken Gegenüberstellung von S1

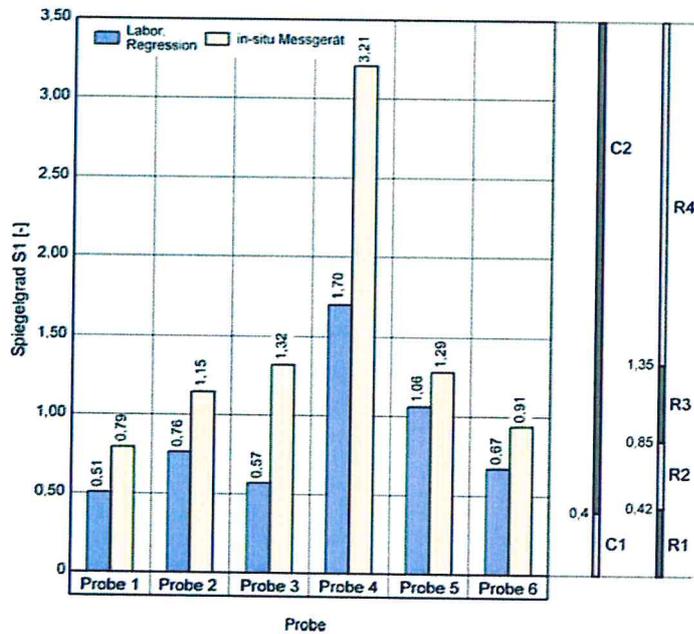


Bild 28: Gegenüberstellung des gemessenen Kennwertes S1 zur Beschreibung der gerichteten Transmission. Die obere Grafik zeigt die Messungen an im Labor hergestellten Straßenbelagsmustern. Die untere Grafik stellt die Messungen der Probestrecken dar. Die Klassifikationsskala folgt Tabelle 1.

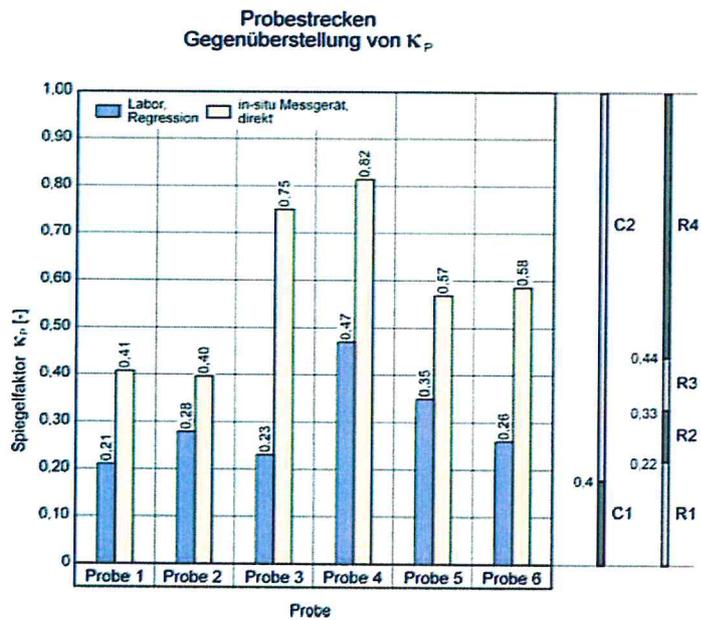
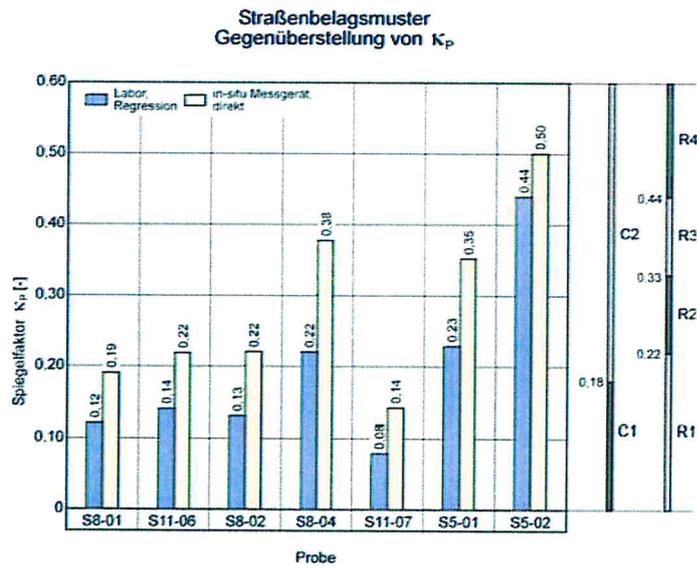


Bild 29: Gegenüberstellung des gemessenen Kennwertes κ_p zur Beschreibung der gerichteten Transmission. Die obere Grafik zeigt die Messungen an im Labor hergestellten Straßenbelagsmustern. Die untere Grafik stellt die Messungen der Probestrecken dar. Die Klassifikationskala folgt Tabelle 1.

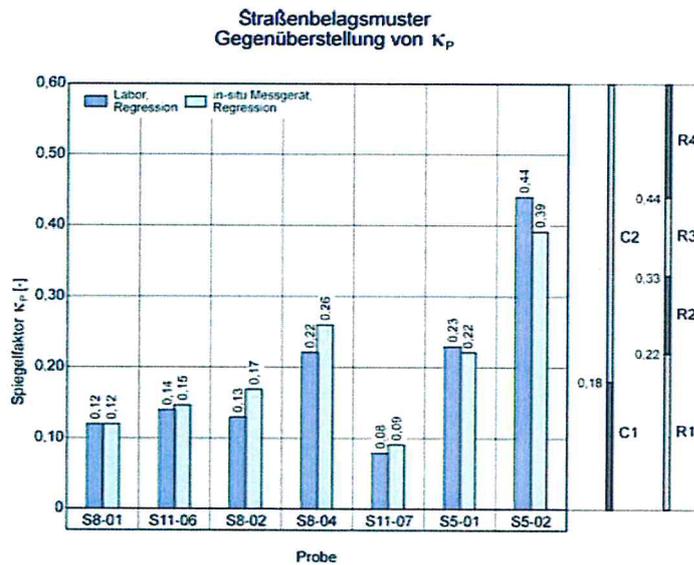


Bild 30: Gegenüberstellung der über das Näherungsverfahren ermittelten Spiegelfaktoren κ_p für Messungen mit der Labor Messeinrichtung und Messungen mit der neuen in-situ Messeinrichtung. Die Klassifikationskala folgt Tabelle 1.

Klassifizierung

Planungstechnisch ist letztendlich die Zuordnung der Beläge zu den Standardbelägen maßgeblich. Wie bereits in Kapitel 2.2.1 dargestellt erfolgt die lichttechnische Berechnung der Straßenbeleuchtung anhand der zugewiesenen Standardklasse.

Die Klassifizierung über S1 hinsichtlich der C-Standardbeläge ist sowohl für die Straßenbelagsmuster als auch die Probestrecken zwischen Labor- und in-situ Messung vollständig identisch. Beide Ansätze führen daher zur selben Bewertung der Beläge. Hinsichtlich R-Klassifizierung ist bei der in-situ Messung bei einigen Proben eine Höherklassifizierung (stärker gerichtete Reflexion) um eine Klasse gegenüber den Labormessungen festzustellen.

Erfolgt die Klassifizierung nach dem direkt bestimmtem Wert κ_p , stellen sich in stärkerem Maße Abweichungen ein. Bzgl. der R-Klassen ist in 4 von 7 Fällen eine Einstufung in Belagsklassen mit stärker gerichteten Reflexionseigenschaften festzustellen. Hierbei wird jeweils eine Klasse höher eingestuft. Hinsichtlich der Einstufung nach C-Klassen, werden 5 von 7 Proben gleich klassifiziert. Für die Probestrecken ergibt sich vollständige Übereinstimmung bei der C-Klassifizierung. Bzgl. R-Klassifizierung ergeben sich wiederum tendenziell höhere Klassifizierungen der neuen Messeinrichtung gegenüber den Labormessungen. Die Abweichungen liegen im Bereich der in Kapitel 2.2.2.2 aufgezeigten Verfahrensgenauigkeit des Regressionsansatzes.

2.4.5.3 Einfluss des Beobachtungswinkels

Das mit der in-situ Messeinrichtung erfasste lichttechnische Verhalten (q_0 und S1) ist in Bild 31 und Bild 32 dargestellt. Für q_0 ergibt sich im Mittel etwa gleiches Verhalten, wogegen das unter dem steileren Winkel von $2,29^\circ$ erfasste gerichtet reflektierende Verhalten tendenziell schwächer ausgeprägt ist. Für diese

Kennwerte liegen keine Referenzwerte aus dem Labor vor, so dass keine Vergleiche gezogen werden können.

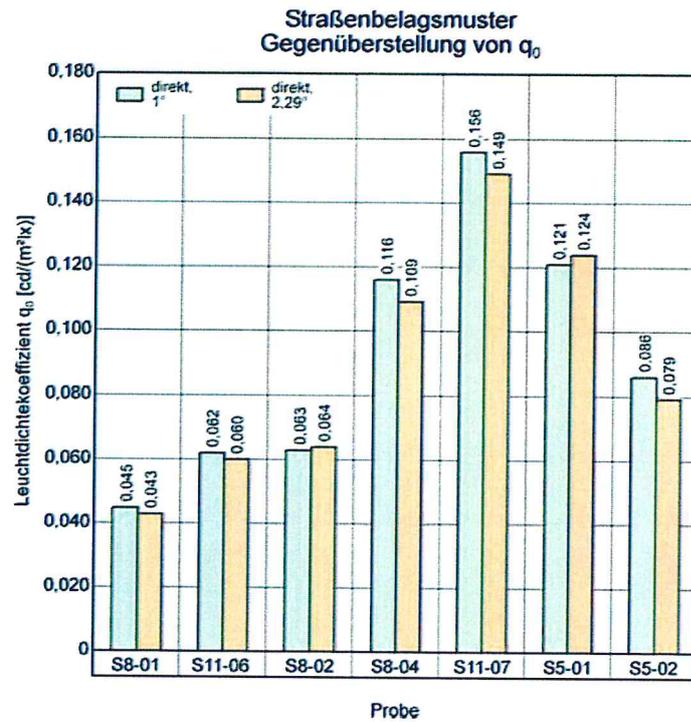


Bild 31: Gegenüberstellung von $q_{0, \text{direkt}, 1^\circ}$ und $q_{0, \text{direkt}, 2,29^\circ}$.

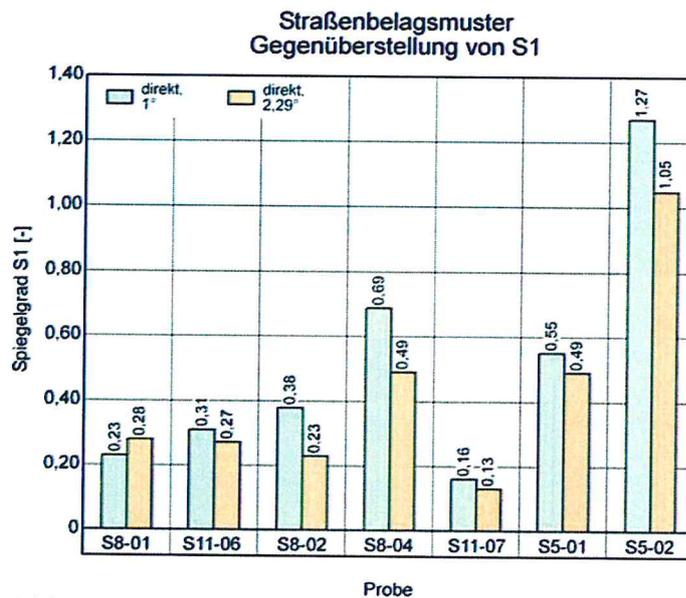


Bild 32: Gegenüberstellung von $S1_{\text{direkt}, 1^\circ}$ und $S1_{\text{direkt}, 2,29^\circ}$.

2.4.5.4 Praktische Konsequenzen

Der Vergleich und die Diskussion der Messwerte lässt sich wie folgt zusammenfassen.

Absolutwert der Reflexion

- Die zur lichttechnischen Bewertung von Belägen maßgebliche Bestimmung von q_0 mit der neuen Messeinrichtung erscheint aufgrund der durchgeführten Messungen verlässlich.
- Die neuartige direkte Messung von q_0 führt allgemein zu etwas höheren Werten im Vergleich zu den herangezogenen Referenzwerten. Dies deckt sich mit der in Bild 6 dargestellten Tendenz, dass das Näherungsverfahren etwas zu niedrige Werte gegenüber Standardbelägen liefert. Es empfiehlt sich daher, q_0 zukünftig direkt zu messen.
- Die durchgeführte Messung von q_d erscheint plausibel. Die zukünftige Generierung von Referenzwerten mit anschließendem Vergleich ist wünschenswert.

Gerichtete Reflexion

- Für die Belagsklassifikation mittels S1 ergaben sich gute Übereinstimmungen zwischen in-situ Messeinrichtung und Labormessung. Die S1-Messung ist unabhängig von q_0 und sollte zukünftig stärker zur Beschreibung der gerichteten Reflexion herangezogen werden.
- Die Messeinrichtung ermöglicht im aufgezeigten Genauigkeitsbereich (vgl. 2.2.2.2) ebenfalls die Erfassung von κ_p . Bei der Errechnung von κ_p sollte jedoch vorzugsweise die mit der Messeinrichtung nun mögliche direkte Bestimmung von q_0 (Leuchtdichteschirm) angewandt werden.

Einfluss des Beobachtungswinkels

- Sichtweiten, die einem Beobachtungswinkel von $2,29^\circ$ zuzuordnen sind, entsprechen eher der heutigen Realität im Straßenverkehr als Beobachtungen unter 1° . Die Einsetzbarkeit der Messeinrichtung für diese Messbedingung wurde gezeigt. Zukünftig sollten vollständige r-Tabellen als Referenzwerte für derartige Beobachtungswinkel ermittelt werden.

Neben einer neuartigen Art der Bestimmung lichttechnischer Kennwerte von Straßenbelägen im Labor ermöglicht das Messgerät zukünftig die in-situ Bestimmung der Kennwerte. Somit kann die Abnutzung eingebauter Beläge über die Zeit erfasst werden. Eine Dokumentation dieser Zeitprofile inklusive Entwicklung eines ergänzenden - auf dieser Grundlage basierenden - Klassifizierungssystems real eingebauter Beläge wäre wünschenswert.

2.5 Literatur

- [1] Blattner, P.: Mobiles Fahrbahnoberflächenreflektometer, Licht 2006, Tagungsband, Bern (2006), S. 106.
- [2] CIE 144:2001: Road Surface and road marking reflection characteristics, Commission internationale de l'éclairage, Technical report, Vienna (2001).
- [3] DIN 13201-1: Straßenbeleuchtung – Teil 1: Auswahl der Beleuchtungsklassen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2005.
- [4] DIN 13201-2: Straßenbeleuchtung – Teil 2: Gütemerkmale. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2004.
- [5] Höhne, L.; Schröter, G.: Straßenbeleuchtung. 2. Auflage. Anlagentechnik für elektrische Verteilungsnetze, Band 10 (Hrsg. Cichowski), Berlin: VDE Verlag, 2002.
- [6] Luisi, F.: Charakterisierung von Straßenbelägen mittels mobilen Gonio-Reflektometern, Licht 2006, Tagungsband, Bern (2006), S. 106.
- [7] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Asphaltstraßen (herausgeber): Anleitung zur Prüfung lichttechnischer Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen und Mineralstoffen mit dem Straßenreflektometer, Köln (1986).
- [8] Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz (Herausgeber): Energiebericht Fortschreibung für das Jahr 2005, Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz – Heft 2/2006, Stuttgart (2006).
- [9] Range, H.: Ein Straßenreflektometer zur vereinfachten Bestimmung der lichttechnischen Eigenschaften von Fahrbahnbelägen, Lichttechnik (1973), H. 2, S. 389-391.
- [10] Range, H.: Vereinfachte Bestimmung der lichttechnischen Eigenschaften von Straßendecken, Straßenverkehrstechnik (1973), H. 2, S. 42-45.
- [11] Schreuder, D.: In situ Messung der Reflexionseigenschaften von Strassenbelägen, Licht 2006, Tagungsband, Bern (2006), S. 99.
- [12] Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau TP A-StB Teil: Spurbildungsversuch Asphalt (Ausgabe 1997).

3 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen insbesondere für KMU

Die Ergebnisse liefern einen wissenschaftlich-technischen Beitrag zur Verbesserung einer seit langem bestehenden messtechnischen Fragestellung. Durch die Messung mit einem steuerbaren Leuchtdichteschirm ohne Mechanik kann die Erfassung der Größe q_0 , die wesentlich die Helligkeit von Straßenbelägen beschreibt, in der Baupraxis zukünftig robust im Feld erfolgen.

Das Messverfahren ist von wirtschaftlichem Interesse für Unternehmen aus den Branchen Straßenbau und Straßenbeleuchtung sowie für Prüflaboratorien. Die Ergebnisse des Vorhabens haben einen hohen wirtschaftlichen Nutzen bei der Planung und dem Betrieb von Straßenbeleuchtungsanlagen. Jährlich werden in Deutschland 15,96 Mio Tonnen neue Straßenbeläge eingebaut oder bestehende erneuert. Das Vorhaben ist für die gezielte Auslegung der Beleuchtung dieser Straßenabschnitte relevant. Beleuchtungsanlagen können gezielter und energieeffizienter auf die Beläge abgestimmt werden. Das Verhalten der Beläge in ihrer Wirkung auf die Beleuchtungssituation kann über die Zeit erfasst werden. Eingebaute Beläge konnten bis dato nur mittels zeit- und kostenintensiver Messungen (Entnahme von Bohrkernen) lichttechnisch charakterisiert werden. Die Vorhabensergebnisse ermöglichen eine deutlich wirtschaftlichere Bewertung.

Das Messkonzept kann von Messgeräteherstellern übernommen werden. Interessierte Hersteller können nach dem erarbeiteten Prinzip funktionierende Messgeräte vermarkten.

4 Veröffentlichung der Vorhabensergebnisse

Erfolgte Veröffentlichungen und Vorhabensvorstellung:

- de Boer, J.: Zum Einfluss des Reflexionsverhaltens von Straßenbelägen auf den Energiebedarf für die Straßenbeleuchtung – Messverfahren: Stand der Technik und Ausblick. In: Umweltbewusstes Bauen, Energieeffizienz - Behaglichkeit – Materialien. Festschrift zum 60. Geburtstag von Gerd Hauser, Hrsg. Maas, A., Fraunhofer - IRB-Verlag, Stuttgart (2007).
- Vorstellung Vorhabensergebnisse auf dem Asphaltseminar 2009, 500 Teilnehmer.

Geplante Veröffentlichung und Vorhabensvorstellung:

- Abschlußbericht, über DAV e.V..
- Lux Europa 2009, 9/2009, Istanbul. Eingereichter Beitrag zum Vorhaben angenommen.
- Mitteilung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, voraussichtlich 6 / 2009.

- Internationale Fachveröffentlichung (z.B. Lighting Research and Technology).

5 Gewerbliche Schutzrechte

Es wurden keine gewerblichen Schutzrechte zum Vorhaben angemeldet. Es ist nicht geplant gewerbliche Schutzrechte zum Vorhaben anzumelden.

Kurzbericht!

noch in Asphalt nach
Bericht ...

praxisüblicher lichttech-
r Helligkeit von Stra-
olen Einrichtung für die

werte und international
orgeschlagenen Mess-
i wurde insbesondere
nerungsverfahren un-
zwischen gebräuchli-

den Näherungsverfahren und der genauen Bewertung der Standardbelags-
klassen kommt es dabei teilweise zu merklichen Abweichungen. Diese sind in
wesentlichen Teilen auf nur eine genäherte Ermittlung des mittleren Leucht-
dichtekoeffizienten q_0 zurückzuführen.

Grundlage der anschließenden Konzeption und prototypischen Umsetzung des
Messgerätes war daher die verbesserte Messung von q_0 . Basierend auf einem
aktiv steuerbaren Leuchtdichteschirm, der über dem Messfeld positioniert wird,
wird gezielt die zur Messung von q_0 erforderliche Leuchtdichteverteilung einge-
stellt. Zur Ermittlung der gerichteten Reflexion von Belägen wurden in den
Leuchtdichteschirm Direktlichtquellen integriert. Der Messgerät ist für die Mes-
sung unter verschiedenen Beobachtungswinkeln ausgelegt. Die gesamte An-
ordnung kommt ohne bewegliche Teile aus und erlaubt durch die automatisier-
te Steuerung zeiteffiziente Messungen im Feld. Unterstützt werden die in
Deutschland üblichen Messprotokolle und auch die international nach CIE for-
mulierten Empfehlungen.

Die neue Versuchseinrichtung wurde anschließend in zwei Phasen auf Funkti-
onstüchtigkeit geprüft und validiert. Referenzwerte wurden mit einer beste-
henden Messeinrichtung im Labor ermittelt. Zunächst wurden Vergleiche für
speziell angefertigte Straßenbelagsmuster durchgeführt, die das praxisübliche
Kennwertspektrum abdecken. Anschließend wurde die Versuchseinrichtung im
Feld auf verschiedenen eingebauten Belägen getestet. Im Vergleich zu der auf
einem Näherungsverfahren basierenden Messung im Labor lagen tendenziell
sowohl q_0 als auch die Messung der gerichteten Reflexion und damit die Klassi-
fizierung durch die neue Versuchseinrichtung etwas höher. Dies wurde im Wes-
entlichen durch die verbesserte q_0 Messung gegenüber dem Näherungsverfah-
ren erklärt.

Neben einer neuartigen Art der Bestimmung lichttechnischer Kennwerte von
Straßenbelägen im Labor ermöglicht das Ergebnis des Vorhaben zukünftig die
in-situ Bestimmung der Kennwerte. Somit kann die Abnutzung eingebauter Be-
läge über die Zeit erfasst werden. Straßenbeleuchtungsanlagen können sowohl
visuell als auch energetisch besser geplant und optimiert werden. Das Ziel des
Vorhabens wurde erreicht.