

# **In Situ-Messungen von Reflexionseigenschaften von Fahrbahnoberflächen**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Verkehrstechnik Heft V 367**

**bast**

# **In Situ-Messungen von Reflexionseigenschaften von Fahrbahnoberflächen**

von

Christoph Schulze

Professur für Verkehrspsychologie  
Wahrnehmungslabor/Lichttechnik  
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“  
TU Dresden

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Verkehrstechnik Heft V 367**

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 04.0292**  
In Situ-Messungen von Reflexionseigenschaften von Fahrbahnoberflächen

**Fachbetreuung**  
Andreas Walkling  
Dirk Heuzeroth

**Referat**  
Umweltschutz, Immissionen

**Herausgeber**  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Kommunikation

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9331  
ISBN 978-3-95606-722-8

Bergisch Gladbach, Januar 2023

## Kurzfassung – Abstract

### In Situ – Messungen von Reflexionseigenschaften von Fahrbahnoberflächen

Eine bedeutsame Oberflächeneigenschaft von Straßen besteht darin, in welcher Intensität und Richtung auf sie auftreffendes Licht reflektiert wird. Beschreibungen erfolgen bislang für die Ansprüche der Straßen- und Tunnelbeleuchtung. Reflexionsmessungen werden nur in Laboren an Bohrkernen oder Laborproben durchgeführt.

Im vorliegenden Forschungsprojekt wurden geeignete Reflexionskennwerte unter Bezug zur kraftfahrzeugeigenen Beleuchtung, Barrierefreiheit, Lichtimmission, sowie zu Sicht- und Substanzaspekten bei Tageslicht begründet. Somit ist eine umfassende Beschreibung der Straßenreflexion möglich.

Dazu erfolgten lichttechnische Labormessungen an insgesamt 57 Straßenproben aus Asphalt und Beton sowie an Beschichtungen. Für jede Oberfläche wurden mehrere Leuchtdichtefaktoren und über 450 Leuchtdichtekoeffizienten verschiedenster Konstellation aus Beleuchtung und Beobachtung bestimmt, sowie die Zusammenhänge zwischen diesen ermittelt.

Verteilungen für drei der identifizierten Reflexionskennwerte wurden in situ an 14 verschiedenen Straßenoberflächen erhoben. Für zwei Kennwerte wurde dabei die praktische Äquivalenz je zweier möglicher Messverfahren demonstriert. Gemeinsam mit den Laborergebnissen erlauben die Feldmessungen erstmals belastbare Abschätzungen über die Größe der Messfläche, die für Reflexionsmessungen bestimmter Unsicherheit notwendig ist.

Im Ergebnis zeigt sich, dass die Reflexion von Straßenoberflächen aus Sicht der Infrastruktur mit einer überschaubaren Anzahl von Kennwerten umfassend beschrieben werden kann. Fast alle Kennwerte können sowohl im Labor als auch bei Feldmessungen bestimmt werden, wobei damit auch eigene Möglichkeiten und Grenzen hinsichtlich Aussageumfang und Belastbarkeit verbunden sind.

Weiterführende Forschung ist zu den Aspekten der Straßenreflexion notwendig, die nicht in situ gemessen werden können. Auch in Hinsicht kommerziell verfügbarer mobiler Messgeräte und der Qualitätssicherung von Messungen bedarf es weiterer Untersuchungen.

### Measuring the reflection of roads in situ

Reflection properties are an important aspect in road surface characteristics. Characterisations deal almost always with public lighting and tunnel lighting. Reflective properties of road surfaces are almost only measured in laboratories.

This research project investigates road reflection properties with regard to road lighting, vehicle headlight as illuminator, Accessibility aspects, environmental impacts of outdoor lighting and daylight. As a result, a system of characteristic values is identified, covering all these aspects.

To get this, reflection properties of 57 different road surfaces were measured in detail in the lighting lab. The sample included cement concrete pavements, asphaltic pavements and coatings with aggregates. Every surface was characterized by several luminance factors and more than 450 luminance coefficients. The relations between many of them were analysed.

With portable devices, measurements were made on-site on 14 different road surfaces. The variation of the reflection properties across the road width was characterized for three characteristic values. These results were used to estimate the uncertainty of road reflection characterization by measured area and surface area to be characterized. In addition, two out of three characteristic values were measured with two different measurement methods each. The corresponding methods gave the same results.

As a conclusion, road reflection properties can be characterized as a road surface characteristic by a manageable set of characteristic values with regard to all identified aspects. Most of them can be measured in laboratory and in situ. Another conclusion is that measurements in the laboratory and in situ partly allow different characterizations and have different limitations in detail.

Research is recommended to address aspects of road reflection properties that can not be measured in situ. Some other work needs to be done to make equipment available commercially for in situ measurements and to ensure measurement quality.

## Summary

### Measuring the reflection of roads in situ

#### 1 Aim of the study

Reflection characteristics of road surfaces were investigated. A central goal, among several others, was to find a suitable and sufficient choice of characteristic values.

The reflection of roads is mostly described for road lighting. However, there are other aspects as well. This research project investigates road reflection properties with regard to road lighting, vehicle headlight as illuminator, Accessibility aspects, environmental impacts of outdoor lighting and daylight.

The reflective properties of road surfaces are almost only measured in laboratories. Measurements are made on core samples or samples made in the laboratory. Measurements directly on the road have many advantages. So whole areas can be measured and the road is not destroyed. This also makes it possible to characterise the same location of a road surface to different states. Therefore, the merits and limitations of measurements in situ were investigated.

The measurements on the road also had another goal. Little is known in the literature about how the reflectance values change within a road surface. For this reason, one does not know exactly how many samples are needed for measurements in the laboratory or how meaningful measured values are. It also helps to better understand the pros and cons as well as the effort required for road measurements.

#### 2 Method

Measurements were made in the laboratory and on the road. Four different test benches were used in the laboratory. In all settings it was also examined how the size of the measuring field influences the result. On a fifth test bench in the lab one of the two mobile devices for measurements in situ was examined. The measurements in the laboratory all used the standard illuminant A.

On a test bench, luminance coefficients  $Q_d$  were obtained under diffuse illumination and four observation angles  $\alpha=1^\circ$ ;  $2^\circ$ ;  $2,29^\circ$  and  $3^\circ$  (angle with the horizontal). On another test bench luminance fac-

tors were obtained with diffuse lighting and three viewing angles  $\alpha=0^\circ$ ,  $8^\circ$  und  $45^\circ$  (angle with the vertical). This allowed the reflectance to be determined. On another test bench all 396 luminance coefficients for r-tables were measured. This was done simultaneously for four observation angles  $\alpha=1^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $5^\circ$  and  $45^\circ$  (angle with the horizontal). From this, the characteristic values  $Q_0$  and  $S_1$  were calculated.

On the fourth test bench luminance coefficients with reference to vehicle headlight as illuminator were measured. Measurements included reflection in the direction of travel and against it. They combined three different viewing heights with two different headlight heights and five different distances.

For the laboratory measurements, the samples should reflect the range of reflection in practice, not the frequency distribution on roads. To achieve this, 57 samples of road surfaces were included, which differed in construction methods and materials. There were coatings with aggregates, cement concrete pavements and asphaltic pavements among them. Asphaltic pavements included among others porous asphalt and mastic asphalt.

Two mobile measurement setups were used to measure 14 different surfaces on the road. There were two cement concrete pavements and 12 asphaltic pavements among them. From each surface an area of  $1\text{m}^2$  was measured. Within this range, the three characteristic values of reflectance  $Q_d$ ,  $R_L$  (referred to the retroreflection of pavement markings) and the luminance factor with diffuse lighting and viewing angle  $\alpha=45^\circ$  (to characterise reflectance  $\rho$ ) were measured at 100 points each. The measuring grid had a spacing of 10cm in both directions.

Measurements were taken at road surfaces as homogeneous as possible. This meant that they were made of one material at a time and were similarly worn out. Areas with visible dirt or ruts were not considered.

On two sites, the three characteristic values above described were measured additionally within an area around of  $80\text{m}^2$  and  $100\text{m}^2$  respectively, representing a relevant portion of a whole street. The measuring grid had a spacing of 1m in both directions. Approximately in the middle of this area one value each was taken per one  $\text{m}^2$ .

Furthermore, photometric measurements of illuminances and luminances were carried out in these

two larger areas. This examined the relationship between illumination, reflection and luminance from observer views. On a street, the situation in daylight was examined in this way. On the other location, the situation at night with street lighting was examined.

### 3 Findings

In the laboratory measurements, the samples gave values for  $Q_d$  in the range  $0,045...0,201\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$ . The correlation between the values of a sample at different viewing angles is  $r=0.99$ . Therefore, it is sufficient to use a characteristic value  $Q_d$  per surface. The paper suggests  $Q_d$  ( $\alpha=2.29^\circ$ ), because it is already established as a parameter of visibility of road markings. However, for road surfaces, stable measurements can be made within a wider tolerance range of the observation angle ( $\alpha=2...3^\circ$ ) than is permitted for road markings.

The luminance factors results prove that road surfaces can be treated as diffuse reflecting surfaces if the observation angle exceeds  $45^\circ$ . Therefore, the reflectance can be determined in this way. The 57 samples had values in the range  $\rho=0,03...0,45$ .

The values of  $Q_0(\alpha=1^\circ)$  ranged within  $0,047...0,177\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$ . The sample includes road surfaces of all four standardized reflection properties (R1-R4). In addition, the results show that  $Q_0$  and the reflection factor  $S_1$  become smaller as the observation angle becomes larger. In German publications is an approximation of  $Q_0$  in use, which is called " $Q_{0,\text{Range}}$ ".  $Q_0$  differs from  $Q_{0,\text{Range}}$  for the examined samples on average by  $\pm 0,011\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$ .

With regard to vehicle headlamps as illumination the height of the headlamp, the height of the observation and the distance influence reflection intensity. With little overall influence, the reflection decreases with increasing distance. However, there are negligible differences in the range  $d=30...65\text{m}$ . The height of the headlights and of the observation affect the reflection much more. As the distance between the height of the headlights and the observation increases, the intensity of the reflection strongly decreases.

With regard to headlamps as illumination, the way in which the reflection depends on the geometry is approximately similar for most road surfaces meas-

ured. Therefore, a characteristic value for the description of a road surface is sufficient for this purpose, too. The paper suggests  $R_L$  because it's already established as a parameter of the reflection of road markings when illuminated by vehicle headlights. The 57 samples ranged within  $R_L=0,002...0,088\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$ .

In summary, the ranges of the laboratory samples in all the values shown in the literature include or exceed the range given there.

The reflection determined during the measurement significantly depends on the size of the measuring area for all the values investigated. For  $Q_0$ ,  $Q_d$  and  $\rho$  stable values are obtained starting from a size of the measuring area of  $50$  to  $60\text{cm}^2$ , referencing an uncertainty of about 1%. If  $R_L$  is measured with this size of the measurement area, there is a slightly greater uncertainty of 2 to 3%. If  $S_1$  and  $r$ -tables are measured at measurement areas of  $A\approx 100\text{cm}^2$ , the mean uncertainty is about 5%.

The examined road surfaces all correlate positively in the characteristic parameters  $Q_0(1^\circ)$ ,  $Q_d(2,29^\circ)$ ,  $\rho(d/45^\circ)$  and  $R_L$ .  $S_1$  varies inversely with all other parameters, but shows the weakest correlations (Table 1).

Table 1: pairwise correlations of characteristic reflection values of  $N=57$  road samples (laboratory measurements)

r	$Q_d(2,29^\circ)$	$\rho(d/45^\circ)$	$R_L$	$S_1$
$Q_0(1^\circ)$	0,956	0,813	0,712	-0,206
$Q_d(2,29^\circ)$		0,863	0,791	-0,287
$\rho(d/45^\circ)$			0,893	-0,510
$R_L$				-0,544

Because  $Q_0$  and  $Q_d$  are highly correlated, the work concludes that  $Q_d$  can be used as well, at least for in situ characterizations of  $Q_0$ . Regardless of the objective,  $Q_0$  can be described more adequately by  $Q_d$  than by  $Q_{0,\text{Range}}$ . The significantly smaller correlations between the other characteristics show that the respective information of the road reflection is not sufficiently included. Additionally, for the observation angle  $\alpha=45^\circ$ , the average luminance coefficient ( $Q_0 45^\circ$ ) and the reflectance are practically identical.

In order to transfer them to measurements on the road, the specifications for measurements of reflection characteristics with regard to street lighting

were collected and compared in the international literature. It was concluded that neither r-tables nor their individual values can be measured on the road with acceptable effort and portable measurement setups that meet all these requirements. In order to know which tolerances are possible and acceptable, extensive systematic measurements would have to be carried out. Doing this was impossible in the research project. Therefore, Q0 and S1 could not be measured on the road.

Finally, the work outlines a choice of values to characterise reflection of road surfaces concerning the background of the infrastructure based on the literature and the measurements in the laboratory. It includes all characteristic values in table 1 and additionally the r-table. Q0 is substituted by Qd for measurements on the road. No solution is given for the measurement of r-tables or S1 on the road.

Measurements on the road followed during the course of the project. The three characteristic values Qd,  $R_L$  and  $\rho$  were measured, as described above. A test bench from the laboratory was rebuilt for the measurement of  $\rho$  in the field. A commercial mobile measurement device, designed to measure these values on the road, was used to measure Qd and  $R_L$ . Because the device is designed to measure road markings reflection characteristics, comparative measurements were made using all 57 laboratory samples. In doing so, regressions were obtained. Since these are probably specific to the device used, further investigations are necessary. Based on these results, all named characteristic values could be measured on the road with good uncertainty.

It was measured at 14 sites. Everywhere 100 values per characteristic value were measured within an area of  $1\text{m}^2$ . Each value represents an area of  $50\text{cm}^2$ . The results of all characteristic values obtained at all sites are within the range of the samples in laboratory.

The relationship between a single value and the average of an area of  $1\text{m}^2$  is of particular interest. If the reflection of an area of a road of  $100\text{cm}^2$  is measured, the average value of  $1\text{m}^2$  can only be determined with relatively high uncertainty. The uncertainties were identified as  $\rho(d/45^\circ) \pm 0,01$  ( $\pm 7\%$ ),  $R_L \pm 0,003\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ , or  $\pm 25\%$  respective, and  $Q_d \pm 0,009\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ , which is  $\pm 14\%$  based on the roads measured.

There are many influences on it. This includes the evenness of the surface and how the measurement is oriented in detail. But it also includes characteristics of the material and the manufacturing. Finally, the abrasion and the outdoor exposure have an influence. However, in order to know Qd with a uncertainty smaller than 10% with respect to  $A=1\text{m}^2$  of a road, about  $A=250\text{cm}^2$  thereof must be measured.

Furthermore, it was evaluated whether higher or lower values in a characteristic value at a measuring point of each investigated area of  $1\text{m}^2$  are accompanied by higher or lower values of the other reflection values. Only relatively small correlations were found. It was concluded that these variations can be treated as random in the understanding of statistics. It was further concluded that it is not necessary to specify exactly where the reflection of an approximately homogeneous road should be measured. How to take into account systematic features, such as ruts, needs further investigation.

The distribution of the reflection of a larger area ( $80$  to  $100\text{m}^2$ ) was measured for two of the streets, as described above. The variance of the results within the larger area corresponds nearly to the variance observed within a smaller area of  $1\text{m}^2$  in both cases. In this way, the mean value of the reflectance can be determined for a larger area. But the mean of Qd can not be determined for a larger area this way. This is not only because the reflection within the small areas ( $1\text{m}^2$ ) varies much more with respect to this characteristic value. In addition, the values of small areas ( $1\text{m}^2$ ) vary within the larger area ( $80$  to  $100\text{m}^2$ ) much more in Qd compared with  $\rho$ .

These findings are, like others, based on the further photometric measurements on the two roads. On a street, the distribution of illuminance at night was measured, which is generated by the street lighting. The measurement grid was identical to the one used for reflectance measurements and included the entire larger area of  $80\text{m}^2$ . Using the identical measurement grid luminances were measured with four angles of observation ( $\alpha=1^\circ, 3^\circ, 5^\circ$  and  $45^\circ$ ).

At constant illumination, the average luminance of the area decreases with increasing observation angle. This is very like the mean luminance coefficients Q0 of the 57 samples decrease with increasing angle of observation, shown in the results in laboratory. However, the average luminance for an

area, illuminated by street lighting and observed at angles less than  $5^\circ$ , can not be determined by knowing only the distribution of illuminance and average luminance coefficients such as  $Q_0$  or  $Q_d$ . It can only be calculated if the luminance coefficients are known, as served by an r-table.

But that's just the case for the entire area. Looking at the parts of the area with scattered reflection only, that is to say without specular reflection, the illuminance, the average luminance coefficient and the luminance are very closely related. This is true for all viewing angles and often for most of the area.

In addition, the inclination of the road surface considerably influences the interaction of illumination, reflection and luminance. At the road considered, there was a straight fall from the centerline to both edges which is very typical in urban roads at all, causing significant influences on the interaction described before.

Finally, the mean reflectance, measured by the mobile device, was identical to the mean luminance coefficient for the area, determined from illuminance of the area and luminance when observed at  $45^\circ$ . Thus, for observation angles of  $45^\circ$  and greater, reflection of even a large road area can be described as diffuse reflection.

On the other road, of which a larger area of  $100\text{m}^2$  was examined, additional measurements were taken in daylight. The sky was quite completely overcast and the ground was dry. Therefore, to a good approximation, diffuse illumination could be assumed. In every of the 100 fields of about  $1\text{m}^2$  of the grid, the luminance of the entire area measured at an observation angle of approximately  $2.3^\circ$  was divided by the current horizontal illuminance. Resulting luminance coefficients gave the true average of  $Q_d$  for the entire area.

Based on this,  $Q_d$  measured at an area of  $1\text{m}^2$  describes the true value of a road surface containing about  $100\text{m}^2$  with an uncertainty of about  $Q_d \pm 0,005\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ . This corresponds to a relative uncertainty of 10% or less. Increasing the actual measured area up to  $5\text{m}^2$  halves the quantified uncertainty. Results given before estimate also the variance for  $Q_d$  within an approximately homogeneous road surface of the named size under favorable circumstances.

As described above,  $Q_d$  was measured also with the mobile measuring device in 100 values within one of the 100 smaller areas of  $1\text{m}^2$  of the road. The values of  $Q_d$  obtained in the two ways described are virtually identical.

In summary, findings on the road confirm the laboratory' findings in all relevant aspects. All identified characteristic values remain relevant.

## 4 Implication

The reflection of roads can be comprehensively described for the intent of the infrastructure. This can be done with a collection of characteristic values. Almost all aspects of road reflection can be measured both in the laboratory and in situ.  $S_1$  and r-tables can only be measured in the laboratory at the moment. Approaches are needed, how to grasp the information herein using measurements in situ. Specularity needs to be addressed most urgently.

In addition, the results show that reflection from roads should be differentiated according to the material and a whole road. Characteristics of the material determine the reflection of small, homogeneous areas of road surfaces up to about  $1\text{m}^2$  maximum. Other surface properties, such as evenness and slope among others, affect the reflection of road areas at least from this size significantly and can therefore not be ignored if reflection of roads is described.

This leads to a further differentiation of purpose and use of measurements in the laboratory and in situ. Laboratory measurements can not be substituted by field measurements completely. On the other hand, the whole extend of information, served by measurements in situ, can not be achieved by measurements in the laboratory. Therefore, further investigations are necessary. Mobile measuring devices should also be made available more widely.

Finally, many factors influence the quality and the results of reflection measurements in situ, but also in laboratories. Some have been addressed in the present work, others will certainly come to that. Many of these factors are very likely related to each other. It would be an important step forward if they were outlined as a system.



## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einordnung und Überblick</b> .....	10	5.7	Reflexion und Wahrnehmungssituation für größere Teilflächen .....	56
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b> .....	11	<b>6</b>	<b>Zusammenführung der Befunde</b> .....	66
2.1	Kennwerte und Einordnung .....	11	6.1	Beschreibung der Reflexion von Straßenoberflächen durch Kennwerte .....	66
2.2	Vorgaben an Messaufbauten und Messgeräte .....	22	6.2	Mobile Messungen von Reflexionskennwerten .....	70
2.3	Diskussionen zum Messgegenstand .....	25	6.3	Anregungen für die Weiterentwicklung des Regelwerkes .....	73
2.4	Erkenntnisse zur Unsicherheit von Messungen .....	28	6.4	Ausblick.....	74
2.5	Fazit zu Grundlagen.....	29	<b>7</b>	<b>Literatur</b> .....	75
<b>3</b>	<b>Labormessungen von Reflexionskennwerten an Straßenproben</b> .....	30	<b>Bilder</b> .....		78
3.1	Einordnung.....	30	<b>Anhang zu „In Situ – Messungen von Reflexionseigenschaften von Fahrbahnoberflächen“-Schlussbericht</b> .....		80
3.2	Probenkollektiv.....	30			
3.3	Vorgehen.....	30			
<b>4</b>	<b>Ergebnisse der Labormessungen von Reflexionskennwerten an Straßenproben</b> .....	35			
4.1	Charakterisierung nach Bereichen/ Kennwerten .....	35			
4.2	Zusammenhänge zwischen Kennwertbereichen .....	40			
4.3	Analysen zur Messfeldgröße .....	42			
<b>5</b>	<b>Labor- und Feldmessungen bezüglich der in situ-Messkonzeption</b> .....	45			
5.1	Diskussion potentieller Kennwerte für in situ-Messungen.....	45			
5.2	Zielstellungen und Überblick der Messungen zur in situ-Messkonzeption....	46			
5.3	Aufbauten für in situ-Reflexionsmessungen .....	46			
5.4	Vergleichsmessungen $R_L$ und $Q_d$ an den Laborproben.....	47			
5.5	Reflexion kleiner Teilflächen von Straßen .....	48			
5.6	Reflexion größerer Teilflächen von Straßen .....	56			

## 1 Einordnung und Überblick

Gegenstand des im vorliegenden Bericht niedergelegten Forschungsprojektes war es, geeignete und möglichst erschöpfende lichttechnische Kennwerte zur angemessenen Charakterisierung des Reflexionsverhaltens von Fahrbahnoberflächen zu begründen, sowie deren Umsetzung in mobile Messungen (in situ-Messkonzeption) zu testen.

Die Reflexionseigenschaften von Straßenoberflächen dienen:

- als Eingangsgröße zur Dimensionierung von ortsfesten Beleuchtungsanlagen, die nach Leuchtdichte aus Nutzersicht bemessen werden (Leuchtdichtetechnik in der Straßen- und Tunnelbeleuchtung);
- zur Charakterisierung der Straßenhelligkeit (Leuchtdichte) aus Nutzersicht in Situationen ohne ortsfeste Beleuchtung bei Tag und Nacht sowie bei Nacht in Situationen mit ortsfester Verkehrsbeleuchtung, die nach Beleuchtungsstärke dimensioniert ist, sowie zur Beurteilung der indirekten Himmelaufhellung (Lichtimmission) bei Nacht;
- als Eingangsgröße zur Bewertung des visuellen Kontrastes im Kontext Barrierefreiheit;
- zur Charakterisierung der Anteile Reflexion und Absorption der Straßenoberfläche vor den Hintergründen Erwärmungsverhalten, Haltbarkeit und Stabilität (bei Tageslicht).

Dem ordnen sich Beiträge zu indirekten Zielgrößen zu. Dies sind vor allem solche aus der Verkehrsplanung, des Straßenbaus und des Straßenbetriebes, die Fragen der Dimensionierung, Verkehrssicherheit und Wirtschaftlichkeit betreffen.

Diesen Ansprüchen ist die Messung von Reflexionseigenschaften nebenzuordnen. Für die Messungen selber sind insbesondere die Aspekte Aufwand und Güte sowie Belastbarkeit der Ergebnisse zu betrachten. Ein wichtiger Fokus des Forschungsprojektes ist die in situ-Charakterisierung durch lichttechnische Messungen an der Straßenoberfläche.

Lichttechnische Labormessungen an Bohrkernen oder Laborproben sind prinzipiell etabliert, wenn auch nicht mit dem oben umrissenen Charakterisierungsumfang. Bei diesen Messgegenständen handelt es sich um durch Zerstörung entnommene

Proben aus bestehenden Straßen oder mit Labortechnik gesondert im Straßenbaulaboratorium hergestellte Probestücke. Messungen in situ stellen demgegenüber eine Ausnahme dar und sind bislang in der Literatur nicht ausreichend untersucht.

Gleichwohl verbinden sich mit in situ-Messungen viele Vorteile, etwa die flächenaufgelöste Messung, die Messung ohne Zerstörung der Oberfläche sowie die Möglichkeit der zeitlichen Verlaufsmessung an ein und der selben Oberfläche bei fortlaufender Nutzung.

Demgegenüber stehen deutliche Anhaltspunkte aus der internationalen Literatur, nach denen die Messung einiger Kennwerte mit erheblichen Schwierigkeiten und Unsicherheiten einhergeht.

Um eine geeignete Auswahl lichttechnischer Kennwerte zu begründen, sowie Referenzwerte für mobile Messungen zu erzeugen, erfolgten im Projekt umfangreiche Messungen an Straßenproben im lichttechnischen Labor. Weiterhin wurde durch Labor- und Feldmessungen untersucht, mit welchem Aufwand und welchen Grenzen mobile Messungen lichttechnischer Reflexionskennwerte möglich sind (In situ-Messanordnung).

Im Ergebnis wird ein vollumfänglich nur im Labor messbarer Kennwertekanon begründet, anhand dessen Charakterisierungen der Reflexion von Straßenoberflächen für alle oben umrissenen, primären Zielstellungen erfolgen können. Darüber hinaus wird eine derzeit auch in Feldmessungen mit akzeptablem Aufwand sowie akzeptabler Unsicherheit messbare Teilmenge begründet. Die dabei gültigen Randbedingungen, Möglichkeiten und Grenzen werden dargelegt.

Im Projekt wurden darüber hinaus umfangreiche Erkenntnisse zur messtechnischen Charakterisierung der Reflexionseigenschaften von Straßen mit Relevanz sowohl für Labor-, als auch Feldmessungen gewonnen.

Schließlich erfolgen Diskussionen hinsichtlich der Fortschreibung des Regelwerkes, darin unter anderem Anhaltspunkte zu Bewertungshintergründen für bislang darin nicht berücksichtigte Reflexionsparameter von Straßenoberflächen.

## 2 Grundlagen

Die Erörterungen in diesem Kapitel befassen sich im ersten Teil mit Reflexionskennwerten und deren Einordnung in die bereits eingangs umrissenen Anwendungshintergründe.

Danach folgen Abschnitte, in denen die Literaturlage bezüglich der relevanten Vorgaben und Erkenntnisse, die Messung von Reflexionseigenschaften an Fahrbahnoberflächen betreffend, analysiert wird. Dies beinhaltet Vorgaben an Messaufbauten und Messgeräte sowie zum Messgegenstand „Straßenoberfläche“ selbst und schließt mit Erkenntnissen zur Unsicherheit von Reflexionsmessungen an Straßen.

### 2.1 Kennwerte und Einordnung

#### 2.1.1 Reflexionskennwerte als Stoffkennzahlen

Reflexionskennwerte dienen der Charakterisierung eines bestimmten Teiles der Wechselwirkung von Licht mit der stofflichen Materie (DIN 5036). Allgemeiner gilt dies für Strahlung, nachfolgend jedoch wird auf den Bereich sichtbarer Strahlung bezogen, wenn nicht anders vermerkt. Ausgehend von auf eine oder mehrere Grenzflächen eines Körpers oder bestimmten Volumens auftreffenden Lichtstromes  $\Phi$ , beschreibt Reflexion  $\rho$  denjenigen Teil des Ausgangslichtes, der sich nach Wechselwirkung in Richtungen ausbreitet, die oberhalb beziehungsweise außerhalb der Grenzfläche liegen und damit relativ zu dieser auf Seite des auftreffenden Lichtes.

Transmission  $\tau$  hingegen beschreibt denjenigen Teil des Ausgangslichtes, der nach Durchdringung des Körpers oder Volumens diesen in Richtungen verlässt, die unterhalb beziehungsweise hinter der Grenzfläche liegen. Absorption  $\alpha$  schließlich beschreibt den innerhalb des Körpers oder Volumens verbleibenden Teil des Ausgangslichtes.

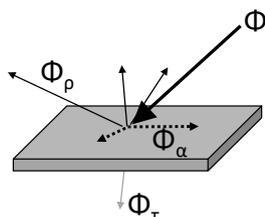


Abbildung 1: Grundformen der Interaktion von Licht mit Körpern

Im Sinne der Energieerhaltung summieren sich die Anteile von Reflexion, Transmission und Absorption definitionsgemäß zu Eins. Insofern eine der Auftretensformen ausgeschlossen werden kann, wie etwa Transmission bei Straßenoberflächen, genügt die umfassende Charakterisierung zu einer der beiden verbleibenden Formen, um die Wechselwirkung zwischen Licht und dem jeweiligen Körper oder Volumen vollständig zu beschreiben (Abbildung 1).

Die grundsätzlichen Auftretensformen von Interaktion zwischen Licht und Körpern beziehungsweise Volumen sind jedoch zunächst ohne irgendwelche geometrischen oder lichttechnischen Beschränkungen hinsichtlich des auftreffenden Lichtes und auch ohne geometrische Beschränkungen der Gestalt von Grenzflächen, Körpern oder Volumen.

Es ist nicht notwendig, dass es sich physisch tatsächlich um eine Grenzfläche der Gestalt handelt, wie sie bei der Definition des jeweiligen Kennwertes oft idealisiert angenommen wird. Dies führt dann in der Praxis zu virtuellen Grenzflächen, Körpern oder Volumen, beispielsweise zu ideal ebenen Flächen, die um oder auf den tatsächlichen Oberflächengestalten angeordnet sind und für die die Kennwerte definiert und erhoben werden (Abbildung 2).

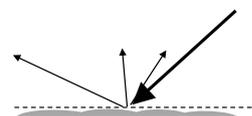


Abbildung 2: Tatsächliche und für die Beschreibung durch Kennwerte idealisiert ebene Oberfläche

Ebenso kann in der Praxis die Grenze zwischen Reflexion und Transmission unscharf sein, beispielsweise, wenn es sich um stark gekrümmte Oberflächen und transluzente Körper oder Volumen handelt. Hier sind dann jeweils entsprechende Partialdefinitionen einzuführen, die den konkret zu beschreibenden Gegenstand betreffen.

Lichttechnische Reflexionskennwerte sind Quotienten der allgemeinen Form

$$\text{Reflexion} = \frac{\text{reflektiertes Licht}}{\text{auftreffendes Licht}}$$

und werden unterschieden nach der lichttechnischen Größe, mit der jeweils das Ausgangslicht und das reflektierte Licht beschrieben wird. Es gibt Reflexionsgrade, Reflexionsfaktoren und Reflexionskoeffizienten.

Reflexionsgrade beschreiben beide Teile des Verhältnisses anhand von Lichtströmen. Reflexionsfaktoren beschreiben beide Teile hingegen durch andere lichttechnische Größen, wobei im Wesentlichen dafür Leuchtdichten in Frage kommen. Entsprechend setzen Leuchtdichtefaktoren für eine zu definierende Art der Beleuchtung die Leuchtdichte einer ideal mattweißen (diffusen) Oberfläche zur Leuchtdichte des zu charakterisierenden Stoffes in Relation. Für diffuse Beleuchtung und im relevanten Bewertungsbereich annähernd diffus reflektierende Oberflächen entsprechen sich Reflexionsgrad und Reflexionsfaktor.

Bei Reflexionskoeffizienten erfolgt eine von den Größen her gemischte Charakterisierung. Am häufigsten werden Leuchtdichten in Reflexion auf auftreffende Beleuchtungsstärken bezogen, wodurch dann von Leuchtdichtekoeffizienten zu sprechen ist. Es sind jedoch auch Kennwerte gebräuchlich, die die Reflexion anhand von Lichtstärken bezogen auf Beleuchtungsstärken beschreiben. Das ist beispielsweise beim Rückstrahlwert für retroreflektierende Oberflächen der Fall, der formal auch als Lichtstärkekoeffizient bezeichnet werden könnte. Für diffus reflektierende Oberflächen können Leuchtdichtekoeffizienten und Reflexionsgrad in einander umgerechnet werden. Für praktische Oberflächen, die diese Voraussetzung in aller Regel nicht erfüllen, ist dies nicht exakt möglich.

Tabelle 1: Grundformen gebräuchlicher Reflexionskennwerte

	Beschreibung des Lichtes, das	
	auftrifft	reflektiert wird
Reflexionsgrad $p$	Lichtstrom	Lichtstrom
Reflexionsfaktor $\beta$	Leuchtdichte	Leuchtdichte
Reflexionskoeffizient $q$	Beleuchtungsstärke	Leuchtdichte oder Lichtstärke

Für den Anwendungsfall lichttechnischer Reflexionskennwerte von Straßenoberflächen hängt deren Ausprägung sehr stark von geometrischen Parametern der Beleuchtung und Beobachtung ab. Für die meisten der Charakterisierungsansprüche ist nicht von einem diffusen Reflexionsverhalten auszugehen. Am häufigsten werden daher Leuchtdichtekoeffizienten der allgemeinen Form

$$q(\text{Geometrie}) = \frac{L(\text{Beobachtung})}{E(\text{Beleuchtung})} \text{ in } \frac{\text{cd}}{\text{m}^2 \cdot \text{lx}}$$

zur Charakterisierung der Reflexion verwendet.

Sowohl im Vergleich dazu, als auch relativ zu anderen Einflüssen betrachtet, spielen spektrale Aspekte in weit geringerem Maße eine Rolle, da die überwiegende Mehrzahl der relevanten Straßenoberflächen spektral integriert betrachtet nicht stark selektiv reflektiert. Im Wesentlichen handelt es sich um unbunte Oberflächen. Der Aspekt spektraler Reflexionskennzahlen wird daher nachfolgend nicht systematisch betrachtet.

Ein ungleich größerer Einfluss ist der witterungsbedingte Zustand von Straßen, der trocken im Unterschied zu nass oder schneebedeckt sein kann, wobei die beiden letzteren Zustände in praktisch unendlichen Variationsmöglichkeiten auftreten können. Diesbezügliche systematische Untersuchungen bedürfen auf dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik eines nicht unerheblichen Aufwandes in der Durchführung selbst und erfordern dafür vorgelagerte, umfangreiche Untersuchungen über die Möglichkeiten und Grenzen entsprechender Realisierungsmöglichkeiten für Labor-, als auch Feldmessungen. Der Aspekt wird daher im vorliegenden Projekt ebenfalls nicht berücksichtigt. Alle Betrachtungen erfolgen für trockene Straßenoberflächen.

Im Rahmen der Projektdefinition wurden insgesamt sechs relevante Anwendungsfälle identifiziert, für die eine Beschreibung der Reflexion der Straßenoberfläche notwendig oder zweckmäßig ist. Es sind dies die Helligkeit der Straße aus Nutzersicht bei ortsfester Beleuchtung, die Helligkeit der Straße aus Nutzersicht bei Tageslicht sowie bei ausschließlich kraftfahrzeugeigener Beleuchtung, die Charakterisierung der Kontrastwirkung der Straßenoberfläche im Kontext Barrierefreiheit, die Beschreibung des über die Straßenoberfläche erfolgenden Beitrages zur indirekten Himmelaufhellung im Kontext der Lichtimmissionsbetrachtung und schließlich die Beschreibung des in die Straßenoberfläche eingebrachten Anteiles der Globalstrahlung mit lichttechnischen Mitteln vor dem Hintergrund der Erwärmung des Baukörpers.

Nachfolgend ist zu betrachten, welche Zielgrößen unter Zuhilfenahme der Reflexionskennwerte bewertet oder dimensioniert werden sollen, welche Kennwerte dafür etabliert oder sinnvoll sind, wie die Relation zwischen Zielgröße und Reflexionskennwert ist und welche Ausprägungen etwa zu erwarten sind.

### 2.1.2 Anwendungsfall Leuchtdichtebe-messung ortsfester Beleuchtung

Die hierbei angesprochene Zielgröße ist die Helligkeit der Straßenoberfläche aus Nutzersicht bei ortsfester Verkehrsbeleuchtung. Helligkeit wird dabei als Leuchtdichte operationalisiert. Aus Gründen der Lesbarkeit wird nachfolgend Helligkeit äquivalent zu Leuchtdichte verwendet. Die Nutzersicht ist für die meisten Anwendungsfälle die international standardisierte, exemplarische Beobachterposition in der Mitte eines Fahrstreifens,  $h=1,5\text{m}$  über der Straßenoberfläche und in einer Entfernung von  $d=86\text{m}$  auf die Straßenoberfläche blickend. Daraus ergibt sich für ebene, gerade Straße ein Beobachtungswinkel  $\alpha=1^\circ$  gegenüber der Oberfläche (Abbildung 3).

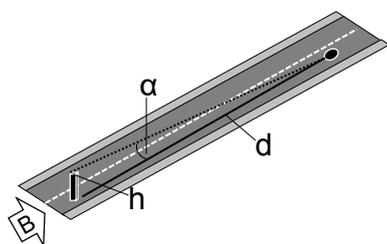


Abbildung 3: Geometrie einer Beobachtung B bei Leuchtdichtebe-messung

Diese Betrachtung wird oft als Perspektive des schneller fahrenden Kraftfahrzeugverkehrs angesehen. Die damit dimensionierte und bewertete ortsfeste Verkehrsbeleuchtung umfasst die Straßen- und Tunnelbeleuchtung.

Vor allem zur Nutzersicht sind Erweiterungen in der Diskussion. So eröffnet beispielsweise DIN 67524-2 für langsamere Bewegung mit etwa  $v=30\text{km/h}$  Beobachtungswinkel von  $\alpha=3^\circ$ . Das entspricht einer Beobachtungsentfernung von etwa  $d=29\text{m}$ , wenn auch hier auf die Beobachterhöhe  $h=1,5\text{m}$  bezogen wird. Diese Perspektive könnte wahrscheinlich auch die Verhältnisse des Radverkehrs besser abbilden als  $\alpha=1^\circ$ .

Ebenfalls kommt in jüngerer Zeit der Aspekt Helligkeitsabschätzung von ortsfest nach dem Beleuchtungsstärkeprinzip beleuchteten Flächen aus Sicht des Kraftfahrzeugverkehrs, aber auch anderer Nutzergruppen, wie beispielsweise Rad- und Fußverkehr hinzu. Hier kann man ausgehend von  $\alpha=3^\circ$  den Betrachtungsbereich über  $\alpha=5^\circ$ , der etwa  $d=17\text{m}$  Beobachtungsentfernung bei  $h=1,5\text{m}$  Beobachterhöhe entspricht, bis zu  $\alpha=45^\circ$  erweitern, bei dem sich Beobachtungsentfernung und Beobachterhöhe

entsprechen und der zur Charakterisierung der Orientierung im Nahbereich dienen könnte. Die letztgenannte Perspektive von  $\alpha=45^\circ$  ist ebenso für Belange der Automatisierungstechnik im Tunnelbetrieb relevant (DIN 67524-2).

Neben der prinzipiellen Zielgröße sind auch Vereinbarungen notwendig, für welche Bereiche die Helligkeit beschrieben werden soll und anhand welcher Kennwerte dies zu erfolgen hat.

Für die Leuchtdichtetechnik in der Straßen- und Tunnelbeleuchtung ist die mittlere Fahrbahnleuchtdichte die erste Zielgröße (z.B. CIE 30, DIN EN 13201, DIN 67524). Das umfasst in den meisten Fällen den Mittelwert eines als Bewertungsfeld bezeichneten Bereiches, der in der Länge oft eine Größenordnung etwa 10 bis 60m aufweist und dem Abstand einer gleichartig wiederkehrenden Lichtpunktanordnung entspricht. In der Breite wird zu meist die Straßenbreite, mindestens jedoch die Fahrstreifenbreite betrachtet, wodurch es sich um etwa 3m bis über 10m breite Flächen handelt. DIN EN 13201-2 (2016) definiert die mittlere Fahrbahnleuchtdichte als „über die Fahrbahn gemittelte Leuchtdichte der Straßenoberfläche“ (S.6). Benannt ist somit die mittlere Leuchtdichte eines Straßenabschnittes mit dem Flächeninhalt von größenordnungsmäßig  $30\text{m}^2$  bis über  $500\text{m}^2$ .

Als zweiter Anforderungsbereich wird die Gleichmäßigkeit der Leuchtdichteverteilung dimensioniert und bewertet. Dazu setzen entsprechende Kenngrößen für definierte Teilflächen im Bewertungsfeld deren Helligkeit in Relation. Diese Teilflächen nehmen typische Größen im Bereich  $A=1\text{m}^2$  bis etwa  $10\text{m}^2$  an.

Um die Leuchtdichte der relevanten Flächen bei Straßenbeleuchtung vorausberechnen zu können, bedarf es neben der Kenntnis der Lichtverteilung durch die Beleuchtung einer umfassenden Charakterisierung der Reflexion der Straßenoberfläche. Die dafür international vereinbarte vollständige Beschreibung erfolgt anhand einer r-Tabelle (CIE/PI-ARC 1983). Eine solche Reflexionstabelle enthält in reduzierter Form insgesamt 396 Leuchtdichtekoeffizienten für die Beleuchtung aus 377 Richtungen und beschreibt damit für den Beobachtungswinkel  $\alpha=1^\circ$  große Teile der Reflexion des aus dem Halbraum oberhalb der Fläche einstrahlenden Lichtes. Die Differenz zwischen der Anzahl von Leuchtdichtekoeffizienten und Richtungen beinhaltet 19

Koeffizienten für senkrechte Beleuchtung nominal verschiedener horizontaler Richtungen, die jedoch per Definition als identisch gesetzt werden.

Die 377 Beleuchtungsrichtungen werden durch den Winkel  $\beta$  für die Einstrahlrichtung in Draufsicht, sowie den Winkel  $\gamma$  für die Richtung in Seitenansicht beschrieben (Abbildung 4).

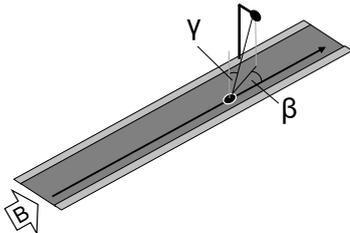


Abbildung 4: Geometrie der Beleuchtung bei Leuchtdichtebemessung (B-Beobachtungsrichtung)

Diese weisen einen Bereich  $\beta=0^\circ\dots 180^\circ$  sowie  $\gamma=0^\circ\dots 85,2^\circ$  relativ zur Normalen der Oberfläche auf. Dies entspricht einer Beleuchtung gegen die Blickrichtung bis in Blickrichtung sowie senkrechter Beleuchtung bis flach einstrahlender Beleuchtung (siehe auch Erläuterungen zum entsprechenden Messstand, dargestellt in Abbildung 12 auf S.27 in Kapitel 3.3.4).

Ein einzelner Leuchtdichtekoeffizient  $q$  ist dabei als Quotient der Leuchtdichte der Oberfläche zur ebenen horizontalen Beleuchtungsstärke bei jeweiliger Beleuchtungsrichtung definiert. Die tabellierte reduzierte Form der Leuchtdichtekoeffizienten ( $r$ -Werte) errechnet sich durch die Beziehung

$$r = q \cdot \cos^3 \gamma$$

aus den Leuchtdichtekoeffizienten.

Um eine handhabbare Charakterisierung der Gestalt dieser räumlichen Reflexionsverteilung zu ermöglichen, wurden zwei Merkmale als Beschreibungsgrößen vereinbart (CIE/PIARC 1983). Es handelt sich um das mittlere Gesamtniveau der Reflexion im beschriebenen Bereich ( $Q_0$ ) sowie um die relative Ausprägung der entgegen der Betrachtung gerichteten Reflexion, die oft als Glanz- oder Spiegelverhalten umschrieben und durch den Parameter  $S_1$  charakterisiert wird.

$Q_0$  ist als raumwinkelbezogener Mittelwert der 396 Leuchtdichtekoeffizienten gemäß dem Ausdruck

$$Q_0 = \frac{\int_0^{\Omega_0} q \cdot d\Omega}{\Omega_0}$$

definiert und wird im Allgemeinen auf Basis der  $r$ -Tabelle nach einer beispielsweise in CIE 30-2 (1990) angegebenen Kalkulation berechnet.  $S_1$  ist durch den Ausdruck

$$S_1 = \frac{r(\beta = 0^\circ, \gamma = 63,4^\circ)}{r(\beta = 0^\circ, \gamma = 0^\circ)}$$

als Quotient aus zwei reduzierten Leuchtdichtekoeffizienten definiert.

Praktische Ausprägungsbandbreiten zur Einordnung der Reflexion von Straßen sind für  $r$ -Tabellen schwer anzugeben. Angaben für  $Q_0$  und  $S_1$  sind jedoch möglich. So berichtet Erbay (1974) im Reflexionsatlas für die 62 Proben, die nicht synthetisch oder in der nachfolgenden Quelle (Sørensen, 1975) enthalten sind, die Bandbreiten von  $0,058 \leq Q_0 \leq 0,155 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  und  $0,11 \leq S_1 \leq 2,66$ . Die diesen zugrundeliegenden  $r$ -Tabellen entstammen Messungen der Labore von Schreder in Liege und Philips in Eindhoven. Sørensen (1975) gibt auf Basis der  $r$ -Tabellen von 286 Straßenproben als typische Bandbreite  $0,04 \leq Q_0 \leq 0,15 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  und  $0,05 \leq S_1 \leq 3$  an. CIE 30-2 (1990) beschreibt  $0,1 \leq S_1 \leq 3$ . Schulze (2012) beschreibt basierend auf der Messung der  $r$ -Tabellen von 105 Asphaltflächen eine Bandbreite  $0,03 \leq Q_0 \leq 0,11 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  und  $0,1 \leq S_1 \leq 8,1$ .

Alle im aktuellen nationalen und internationalen Normen- und Regelwerk hinterlegten Kalkulationen der Fahrbahnleuchtdichte bei ortsfester Verkehrsbeleuchtung benötigen die gesamte umschriebene Verteilung der Leuchtdichtekoeffizienten ( $r$ -Tabellen). Die Beschreibungsgrößen  $Q_0$  und  $S_1$  allein erlauben keine Kalkulation von Fahrbahnleuchtdichten bei ortsfester Beleuchtung. Sind sie jedoch anstatt einer gesamten  $r$ -Tabelle bekannt, kann eine näherungsweise Leuchtdichteberechnung unter Nutzung damit angepasster Standardreflexionstabellen (Standard- $r$ -Tabellen) erfolgen. Diese Standard- $r$ -Tabellen sind international seit mehreren Jahrzehnten vereinheitlicht und stellen die Reflexion von Straßen in idealisierter Form dar. Für viele Anwendungsfälle der Leuchtdichtetechnik wird dieses Vorgehen als ausreichend genau angesehen.

Darüber hinaus sind mit der Nutzung sowohl von individuellen als auch idealisierten  $r$ -Tabellen immer

mehrere Annahmen verknüpft. Die Reflexion für  $\beta=0^\circ \dots 180^\circ$  wird als identisch zur Reflexion für  $\beta=180^\circ \dots 360^\circ$  vereinbart. Das bedeutet, es herrscht Symmetrie hinsichtlich der Reflexion für aus dem Viertelraum einstrahlendes Licht. Ebenfalls ist die relative horizontale Orientierung der Oberfläche bezogen auf die Betrachtungsrichtung nicht relevant. Das bedeutet, sie wird als anisotrop vereinbart, wodurch Verdrehungen der Straßenoberfläche keinen bedeutsamen Einfluß haben. Die Straße ist zudem als ideal eben, gerade und homogen bezüglich der räumlichen Reflexion anzusehen. Die idealisierte Beobachtung erfolgt immer mit  $\alpha=1^\circ$ .

Insofern als Zielgröße die Leuchtdichtevertelung einer mit den oben aufgeführten Idealisierungen ausgestatteten Straße unter  $\alpha=1^\circ$  angesehen wird, besteht eine sehr enge Entsprechung zwischen der anhand der Reflexionswerte kalkulierten Leuchtdichtevertelung und der gemeinten. Dies gilt, wenn etwaige Abweichungen der tatsächlich erzeugten Beleuchtungsverteilung zu derjenigen Beleuchtungsverteilung ausgeklammert werden, mit der die Beleuchtungsanlage kalkuliert wird.

Insofern als Zielgröße die tatsächlich von einem Beobachter der Straße, der eine Person oder ein Leuchtdichtemessgerät sein kann, von einem bestimmten Punkt aus beobachtbare Leuchtdichtevertelung angesehen wird, dürften sich im Einzelfall nicht unerhebliche Abweichungen zeigen (vgl. DIN EN 13201-4). Diese werden zu bedeutsamen Anteilen von Merkmalen beeinflusst, die nicht die Reflexion der Straßenoberfläche berühren. Hierzu gehören beispielsweise die tatsächlichen Lichtpunktpositionen im Vergleich zu den geplanten, die tatsächliche Lichtstärkeverteilung der Leuchten im Vergleich zur geplanten oder die tatsächliche Versorgung mit elektrischer Energie im Vergleich zur Idealbedingung.

Andere Einflüsse stehen im engeren Sinne in Verbindung zur Reflexion der Straßenoberfläche. DIN EN 13201-4 benennt als empfohlenen Toleranzwert der Reflexionsdaten der Straßenoberfläche (Q0 und r-Werte)  $\pm 5\%$  für den Fall individueller Messung und  $\pm 20\%$  für den Fall, wenn Standard-r-Tabellen verwendet werden. Hierbei wird jedoch die potentielle Wirkung der oben aufgeführten Idealisierungen die Reflexion betreffend, etwa der mit der Betrachtungsentfernung wechselnde Beobachtungswinkel, die relative horizontale Orientierung der Oberfläche

und ihre Inhomogenität nicht berücksichtigt. Über die Höhe dieser Abweichungen liefert die Literatur keine Anhaltspunkte.

Ein weiterer Anwendungsfall besteht darin, die Leuchtdichte näherungsweise abzuschätzen für Flächen, die ortsfest nach Beleuchtungsstärkekriterien beleuchtet werden. Dies betrifft den größten Teil der Straßenbeleuchtungsanlagen und umfasst zum Beispiel Sammelstraßen, Anwohnerstraßen sowie Geh- und Radwege. Hierbei geht es nicht um exakte Leuchtdichtekalkulationen, sondern vielmehr Abschätzungen von Größenordnungen auf Ebene von Flächenmittelwerten.

Abschätzungen der mittleren Helligkeit können für diesen Anwendungsfall auch aus Gründen der vielfältigen relevanten Beobachtungspositionen und Betrachtungswinkel auf die Fläche nicht mit einer Detailliertheit erfolgen, wie sie im Rahmen der oberhalb umschriebenen Leuchtdichtetechnik erwartet werden kann. Daher ist selbst bei relativ schmalen Flächen, wie zum Beispiel bei Geh- oder Radwegen, eine minimal relevante Flächengröße von  $\geq 20\text{m}^2$  realistisch. Gleichmäßigkeitsanforderungen in Bezug zu Teilflächen spielen dabei aus den erläuterten Gründen keine Rolle, weswegen eine weitere Unterteilung in Teilflächen nicht nötig ist.

Für diesen Anwendungsfall kommt primär der Reflexionsgrad als Reflexionsparameter in Frage. Für den Reflexionsgrad enthält das übernächste Kapitel 2.1.4 weiterführende Erörterungen hinsichtlich der zu erwartenden praktischen Bandbreite und des Bezuges zur Wahrnehmungssituation. Die Auflösung in mittlere Leuchtdichtekoeffizienten oder ähnliche Kennwerte über den breiten Bereich relevanter Betrachtungswinkel ist prinzipiell möglich, der notwendige Detailliertheitsgrad kann im Moment jedoch nicht befriedigend abgeschätzt werden.

### 2.1.3 Anwendungsfall kraftfahrzeugeigene Beleuchtung

Die kraftfahrzeugeigene Beleuchtung ist für die Dunkelheit die primäre Beleuchtung für Fahrten auf allen nicht ortsfest beleuchteten Straßen, wozu bis auf wenige Ausnahmen die Landstraßen und Autobahnen im Bundesgebiet gehören. Für die Bewältigung der Fahraufgabe ist es notwendig, dass die Fläche „Straße“ eine wahrnehmungsrelevante Helligkeit aufweist CIE/PIARC (1983). Dies umfasst sowohl die Straße selbst, als auch die Wahrnehmung

von anderen nicht selbstleuchtenden Objekten wie der Markierung und baulichen Straßengrenzen bis hin zu Hindernissen, die oft im perspektivischen Kontrast zur Straße erscheinen.

Die Helligkeit der Straße wird durch das Zusammenwirken von Scheinwerferbeleuchtung und Reflexion der Oberfläche bewirkt. Aus sehphysiologischen Grundlagen der visuellen Wahrnehmung folgt für weite Bereiche der in der Praxis typischen Helligkeiten und Kontraste unstrittig, dass mit höheren diesbezüglichen Ausprägungen ein detaillierteres Sehvermögen einhergeht (Eckert 1993, Gebhardt, Grein und Nitsche 2009).

Insofern ist die kraftfahrzeugeigene Beleuchtung der nächtlichen Straßen nahezu seit Beginn des motorisierten Individualverkehrs ein bedeutsames Thema, wobei es primär bezüglich der Scheinwerfer behandelt wird. Aus Sicht der diesbezüglichen Straßenreflexion stellt die Arbeit von Sørensen (1975) einen bedeutsamen Meilenstein dar. Der relevante Betrachtungsbereich hinsichtlich der Reflexion wird darin auf ca. 40m bis 100m vor dem Fahrzeug beziffert. CIE/PIARC (1983) beschreibt den Kontrast zwischen Markierung und Straße als Sicherheits- und Komfortkriterium. In der Folgezeit münden umfangreiche internationale Bemühungen zur Definition von Beschreibungskriterien für die Reflexion von Markierungen in erfolgreichen Umsetzungen und einer aktiven Mess- und Bewertungspraxis.

Wambsganß (1993) benennt für die Straßenreflexion Beschreibungsentfernungen bis 100m als zentralen Beitrag für die „Seh- und Wahrnehmungsbedingung“ der Kraftfahrer bei Nacht und kfz-eigener Beleuchtung. Als typische Betrachtungsperspektive wird eine Augpunkthöhe von 1,2m und eine Scheinwerferhöhe von 0,65m beschrieben. Ähnliche Werte sind bereits bei der Charakterisierung der Markierungsreflexion gebräuchlich. CIE-144 (2001) überträgt schließlich die  $R_L$ -Geometrie aus dem Markierungsbereich explizit auf die Beschreibung der Straßenreflexion für die Beleuchtung mit kfz-eigenen Scheinwerfern ab 30m.

Die angesprochene  $R_L$ -Geometrie ist international harmonisiert (CIE 144, DIN EN 1436) mit dem Betrachtungswinkel  $\alpha=2,29^\circ$  (siehe Abbildung 3 auf Seite 7) und der Beleuchtung (siehe Abbildung 4 auf Seite 8) mit  $\beta=180^\circ$  und  $\varepsilon=1,24^\circ$  ( $\varepsilon=90^\circ-\gamma$ ). Dies wird oft als „Motorradgeometrie“ bezeichnet, da

Scheinwerfer und Beobachtung in Draufsicht in einer Linie liegen. Die Anordnung entspricht für eine Augpunkthöhe 1,2m und Scheinwerferhöhe 0,65m der Distanz  $d=30m$  vor dem Fahrzeug.

Die Sichtbarkeit von Markierungen bei Nacht und kraftfahrzeugeigenen Scheinwerfern hängt primär von der Helligkeit, weniger von farblichen Aspekten ab, wobei vor allem der Kontrast zur umgebenden Straßenoberfläche die für die Bewältigung der Fahraufgabe notwendige Wahrnehmungsgrundlage darstellt (CIE 1992, Meseberg 2009). Die Beschreibung erfolgt anhand des Leuchtdichtekoeffizienten  $R_L$ . DIN EN 1436 benennt Anforderungen für trockene, weiße Straßenmarkierung. Die niedrigste bezifferte Anforderung ist Klasse R2 mit  $R_L \geq 100 \text{ mcd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ . Die weiteren Unterteilungen erfolgen bei  $R_L \geq 150$  (R3),  $\geq 200$  (R4) sowie  $\geq 300 \text{ mcd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ , die als R5 bezeichnet wird. Bezüglich der Bezeichnung der Klassen ist auf eine sorgfältige Unterscheidung zu den oft ebenfalls als „R1“ bis „R4“ bezeichneten Standard-r-Klassen bei der Reflexionsbeschreibung von Straßenoberflächen hinsichtlich der Leuchtdichtebemessung bei ortsfester Verkehrsbeleuchtung (Kapitel 2.1.2) hinzuweisen.

ZTV M 13 (FGSV 2013) unterteilt Anforderungswerte nach Neu- und Gebrauchszustand, sowie Markierungsart „Folien“ und „übrige“. Diese Richtlinie sieht als Mindestwerte für neue Markierungsfolien R5 gemäß DIN EN 1436 und im Gebrauch R3 vor. Übrige Markierungsarten müssen R4 respektive R2 aufweisen. Als unterster Gebrauchszustand von richtliniengemäßen Markierungen auf trockenen Straßen können somit näherungsweise  $R_L \geq 100 \text{ mcd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  angesehen werden.

Die bislang betrachteten Beschreibungen beinhalten die Reflexion des durch kfz-eigene Beleuchtung auf die Straße gebrachten Lichtes in Richtung des Fahrers und werden deshalb oft als Rückwärtsreflexion oder Rückreflexion (RR) umschrieben. Für die Beschreibung der spiegelnden Reflexion über die Straßenoberfläche in Wahrnehmung durch den Gegenverkehr (Vorwärtsreflexion VR) gibt es Einzelbefunde in der Literatur (z.B. Wambsganß 1993), jedoch keine gelebte Praxis, keine Standards für Messung und Bewertung und keine verfügbaren Geräte (CIE-144, 2001).

Zur Beschreibung der Reflexion der Straße für die Belange der kfz-eigenen Beleuchtung sind als

Kennwerte Leuchtdichtekoeffizienten gemäß allgemeiner Definition  $q(\alpha, \beta, \gamma) = L/E$  mit zwei Abweichungen gegenüber denjenigen im Bereich Charakterisierung für ortsfeste Verkehrsbeleuchtung (Kapitel 2.1.2) gebräuchlich. Die Beleuchtung erfolgt von unterhalb der Beobachterhöhe, weswegen der vertikale Beleuchtungswinkel  $\gamma$  oft als  $\epsilon = 90^\circ - \gamma$  angegeben wird.

Außerdem wird aufgrund der sehr geringen Ausprägung von  $\epsilon$  die Beleuchtungsstärke nicht als ebene, horizontale Beleuchtungsstärke, sondern als ebene vertikale Beleuchtungsstärke definiert, wobei die Orientierung nicht vertikal zur Straßenoberfläche, sondern vertikal zur Beleuchtungsrichtung erfolgt. Damit variiert bei sich ändernder Beleuchtungsrichtung die Beleuchtungsintensität zwar faktisch gegenüber der Straßenoberfläche, nimmt jedoch per Definition einen unveränderten Wert an. Die beleuchtungswinkelabhängige Veränderung der Beleuchtungsintensität wird also bei dieser Definition vollständig im Reflexionskennwert abgebildet, während sie bei den Leuchtdichtekoeffizienten für ortsfeste Verkehrsbeleuchtung aus diesen herausgerechnet wird. Das gilt auch für den Bereich Vorwärtsreflexion, für den sich lediglich die horizontale Beleuchtungsrichtung um  $\Delta\beta = 180^\circ$  dreht.

Schließlich ist festzustellen, dass die Bezeichnung der Leuchtdichtekoeffizienten von Straßen bei kfz-eigener Beleuchtung nicht in dem Maße international harmonisiert ist, wie es für den Bereich ortsfester Beleuchtung der Fall ist. Während beispielsweise CIE/PIARC (1983) für die Rückwärtsreflexion „qH“ einführt, nutzt Wambsganß (1993) „RR“ und CIE 144 (2001) die Bezeichnung  $R_L$ . Letztere Bezeichnung ist für die Markierungsreflexion mit oben umschriebener Geometrie international gebräuchlich.

Ausprägungen der Leuchtdichtekoeffizienten für kfz-eigene Beleuchtung unterscheiden sich sehr stark zwischen Vorwärts- und Rückwärtsreflexion. Innerhalb der Bereiche werden in der Literatur Zusammenhänge mit der komplexen Beleuchtungs- und Beobachtungsgeometrie beschrieben.

Sørensen (1975) gibt als Bandbreite für 266 Straßenproben  $0,0032 \leq RR \leq 0,0543 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  an, wobei die Geometrie dieser RR-Werte  $\alpha = 1^\circ$ ,  $\beta = 175,7^\circ$  und  $\gamma = 89,5^\circ$  ist. Dem Beleuchtungswinkel  $\epsilon = 0,5^\circ$  entspricht bezogen auf eine exemplarische Scheinwerferhöhe  $h_s = 0,65 \text{ m}$  eine Entfernung  $d = 74,5 \text{ m}$ .

Mørketrafik night traffic report No.4 (1982) untersucht die Rückwärtsreflexion an 10 Proben für nicht vollständige Kombinationen aus  $\alpha = 0,57^\circ \dots 8,53^\circ$ ,  $\beta = 180 \dots 185^\circ$  und  $\epsilon = 0,37^\circ \dots 3,72^\circ$ . Für die oft angenommene Geometrie aus 1,2m Augpunkt- und 0,65m Scheinwerferhöhe folgen dafür Charakterisierungsbereiche von etwa 10...100m. Zur Beschreibung der Proben im Vergleich werden Werte für etwa 50m Entfernung herangezogen. Diese bewegen sich im Bereich  $0,011 \leq RR \leq 0,029 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ .

Fleischer (1984) definiert die Leuchtdichtekoeffizienten abweichend mittels ebener horizontaler Beleuchtungsstärke, weswegen diese Befunde nicht mit den anderen berichteten Erkenntnissen vergleichbar sind.

Wambsganß (1993) berichtet für 9 Proben und variiierende Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel  $0,003 \leq RR \leq 0,02 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  und  $0,2 \leq RV \leq 13 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ . Die geringsten Werte für RR je Probe treten bei den größten Beobachtungswinkeln (Beobachterhöhe 2,25m, LKW-Position) in Kombination mit den geringsten Beleuchtungswinkeln (Beleuchtungsentfernung 80m) auf. Die höchsten Werte treten bei den geringsten Beobachtungswinkeln (Beobachterhöhe 1,1m, niedrige PKW-Position), jedoch über die Proben wechselnd, entweder bei der kürzesten (30m) oder längsten (80m) Beleuchtungsentfernung auf. Die  $R_L$ -Geometrie ist nicht exakt abgebildet. Dieser nahe ist jedoch die realisierte 30m-Geometrie ( $\alpha = 2,23^\circ$  und  $\epsilon = 1,29^\circ$ ). Die Werte der 9 Proben variieren dabei im Bereich  $0,006 \leq RR (\approx R_L) \leq 0,018 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ . Für eine feste Beobachter- und Scheinwerferhöhe zeigt die Rückwärtsreflexion einen sehr geringen Zusammenhang mit der Beobachtungsentfernung.

Die höchsten Werte für die Vorwärtsreflexion RV treten bei Wambsganß (1993) je Probe bei der Kombination aus geringstem Beobachtungswinkel (Beobachterhöhe 1,1m, niedrige PKW-Position) und den geringsten Beleuchtungswinkeln (Beleuchtungsentfernung 80m) auf. Die jeweils niedrigste Vorwärtsreflexion wurde für alle Proben in der Kombination größter Beobachtungswinkel (Beobachterhöhe 2,25m, LKW-Position) mit den höchsten Beleuchtungswinkeln (Beleuchtungsentfernung 30m) gefunden.

Köhler (2011) berichtet für die Messung einer trockenen Asphaltfläche (Lichtkanal) die Rückwärtsreflexion  $q_r$  als Mittelwert von etwa  $0,014 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$

und für eine andere (Flugfeld Haxterberg in Paderborn)  $q_r=0,013 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ . Diese Arbeit belegt für insgesamt drei untersuchte Oberflächen eine relative Unabhängigkeit der Rückwärtsreflexion vom Betrachtungsort (vgl. auch Köhler & Neumann, 2013).

Bislang erfolgten die Betrachtungen auf der Ebene der Reflexion. Da jedoch nicht diese, sondern ausschließlich die Wahrnehmung einer Straße verhaltens- und sicherheitsrelevant sein kann, ist die Relation der Reflexionskennwerte dazu zu diskutieren.

Fleischer (1984) berichtet basierend auf der Messung der Rückreflexion an 20 Straßenproben im Labor und unter Nutzung dreier verschiedener Scheinwerferlichtstärkeverteilungen (Abblendlicht) rechnerische Leuchtdichtegradienten vor dem Fahrzeug von größer 1:10 für den Betrachtungsbereich 13m bis etwa 50m. Diese sind primär durch die Beleuchtungsstärkeverteilung verursacht, die aus physikalischen Gründen im Prinzip auch nicht erheblich anders gestaltet werden kann. Die durch Kraftfahrzeugscheinwerfer verursachte Beleuchtungsintensität zeigt einen deutlichen graduellen Verlauf über die vor dem Fahrzeug liegende Fahrbahn. Sie nimmt mit steigender Entfernung stark ab.

Die Daten von Sivak u.a. (2000) sowie Schoettle u.a. (2001) zeigen für 20 PKW, dass die vertikale Beleuchtungsstärke in Fahrzeugachse voraus für Fernlicht im Mittel von  $E \approx 60 \text{ lx}$  bei 30m über  $E \approx 30 \text{ lx}$  bei 50m auf  $E \approx 10 \text{ lx}$  bei 100m Entfernung abnimmt. Somit beträgt die Variation längs im Betrachtungsbereich von 30 bis 100m etwa 1:6. Zusätzlich beträgt die Bandbreite im Bereich 25. Perzentil zu 75. Perzentil der 20 Scheinwerfer um den jeweiligen Mittelwert etwa  $\pm 45\%$ .

Bei Abblendlicht nimmt die erzeugte vertikale Beleuchtungsstärke gemäß den benannten Quellen von  $E \approx 30 \text{ lx}$  bei 30m über  $E \approx 3 \dots 5 \text{ lx}$  bei 50m auf  $E < 1 \text{ lx}$  bei 100m ab. Somit beträgt das Verhältnis bereits im erheblich kürzeren Betrachtungsbereich von 30 bis 50m etwa 1:10. Die Bandbreite im Bereich 25. Perzentil zu 75. Perzentil der 20 Scheinwerfer um den jeweiligen Mittelwert beträgt etwa  $\pm 40\%$ . Die Daten repräsentieren etwa den Zustand von Neufahrzeugen zum Jahr 2000. Bei neueren Scheinwerfersystemen können Änderungen im Gesamtniveau und graduelle Entwicklungen auftreten.

Zur bereits statisch sehr ungleichmäßigen Beleuchtung der Fahrbahn kommen dynamische Aspekte hinzu. Hierzu gehören etwa die Fahrzeugbewegung (z.B. Lehnert 2001) und die räumliche Linienführung von Straßen, wodurch vorausliegende Straßenbereiche auch für ein Fahrzeug betrachtet sehr unterschiedlich beleuchtet sein können. Ebenfalls wird die Lichtverteilung moderner Kraftfahrzeuge über Abblendlicht und Fernlicht hinaus situativ variabler (Jebas u.a. 2008).

Das trifft prinzipiell dann ebenso für die Beleuchtungsintensität und deren Gleichmäßigkeit bezüglich der Markierung auf der Straße zu, für deren Wahrnehmung als Kontrastpartner die Reflexion der Straßenoberfläche entsprechend herangezogen werden soll.

Zusammengefasst ist davon auszugehen, dass die Zielgröße „Helligkeit von Straßen bei kraftfahrzeugeigener Beleuchtung“ in größerem Maße in Abhängigkeit der verschiedenen sowie ungleichmäßigen Beleuchtung, als in Abhängigkeit unterschiedlicher Reflexion der Straße variiert. Welche Ausschnitte davon als Ziel- oder Bewertungsgröße betrachtet werden sollen, bleibt zukünftigen Untersuchungen und Diskussionen vorbehalten. Ungeachtet dessen sind die Reflexionseigenschaften dafür zu beschreiben.

Außerdem treten aus Sicht einer Person in einem bestimmten Fahrzeug aufgrund der zumindest temporär dann relativ stabilen Beleuchtungssituation, deutliche Unterschiede in der Helligkeit zwischen vorausliegenden Straßen oder Straßenteilen mindestens bis zum Verhältnis 1:3 auf, die primär der unterschiedlichen Reflexion der Straße zugeschrieben werden müssen. Daher hat es aus Sicht der Verkehrsinfrastruktur heraus keinen Zweck, innerhalb dieser Zielstellung kleinere Flächen als einige Quadratmeter zu bewerten. Davon unbenommen ist die sicherheits- und komfortbezogene Frage des Kontrastes zwischen Straßenoberfläche und Markierung sowie anderen Objekten.

### 2.1.4 Anwendungsfall Barrierefreiheit

Für den Bewertungsbereich visueller Barrierefreiheit soll der visuelle Kontrast zwischen benachbarten Bodenmaterialien möglichst groß sein, wenn funktionelle Unterschiede zwischen diesen bestehen. Dies betrifft beispielsweise Flächen für Fußver-

kehr neben solchen für Kraftfahrzeugverkehr. Darüber hinaus sollen zur Orientierung dienende oder als Sicherheitshinweise konzipierte Leitlinien oder Streifen im Bodenbereich ebenfalls mit hohen visuellen Kontrasten zum umgebenden Material ausgestattet werden. Visueller Kontrast wird in vielen Normen und Regelwerken als Leuchtdichtekontrast spezifiziert, in anderen Werken erfolgt keine diesbezügliche Untersetzung.

Als bewertungsrelevante Flächengröße sieht die Norm DIN 32984 für Bodenindikatoren  $\geq 15\text{cm}^2$  vor, geht dabei jedoch von Labormessungen an homogenem Material aus. Aus der praktischen Anwendungssituation heraus handelt es sich bei barrierefreien Gestaltungen im öffentlichen Straßenraum oft um linienhafte, ausgedehnte Anordnungen, beispielsweise Fußgängerzonen, ÖPNV-Haltestellenbereiche und bauliche Streifen zwischen Geh- und Radwegen. Die dabei zu betrachtenden Flächen weisen somit ebenfalls Ausdehnungen mindestens in der Größenordnung auf, die oben bezüglich der Leuchtdichtebemessung bei ortsfester Beleuchtung mit ca.  $1\text{m}^2$  identifiziert wurden.

Als dafür zugeordneter Reflexionskennwert ist in der nationalen und internationalen Normung der Reflexionsgrad etabliert, der in den meisten Fällen nicht mit weiterführenden Angaben zur Messung, wie zum Beispiel der Lichtart verbunden wird (vgl. Zusammenstellung in Lohaus u.a. 2017). Einige nationale Normen (DIN 32975, DIN 32984) spezifizieren die Messung als diffuse Reflexionsgrade  $\rho_{\text{diff}/45}$  und  $\rho_{\text{diff}/0}$  im Einklang mit der Bestimmung gemäß DIN 5035-6 durch Messungen von Leuchtdichtefaktoren bei diffuser Beleuchtung und Beobachtungswinkel  $\alpha=45^\circ$  oder  $0^\circ$ , die auf die Flächennormale bezogen sind (vgl. Skizze zum entsprechenden Messaufbau in Abbildung 11 auf S.26), sowie mit Normlichtart A oder D65.

Ein zweiter, ebenfalls etablierter Reflexionskennwert ist der LRV-Wert (z.B. ISO/FDIS 21542 oder DIN EN 16584-1). Dieser erfordert die Bestimmung spektraler Remissionsfaktoren und ist nicht auf die Messung lichttechnischer Grundgrößen zurückzuführen. Insofern handelt es sich um eine Beschreibung, die sich außerhalb des in Kapitel 2.1.1 umrissenen Bereiches von Reflexionskennwerten als Stoffkennzahlen bewegt und wird daher nachfolgend nicht weiterführend betrachtet.

Zwischen dem sich einer beobachtenden Person bietenden Leuchtdichtekontrast zweier Bodenflächen in einer bestimmten Situation mit natürlicher oder künstlicher Beleuchtung und dem Reflexionsgrad der beiden Flächen besteht im Mittel ein systematischer, jedoch nicht sehr enger Zusammenhang. Im Einzelfall kann es zu deutlichen Abweichungen bis zur Kontrastumkehr kommen, die insbesondere durch Unterschiede der Oberflächentextur, wie zum Beispiel glatte neben rauen Oberflächen, im Zusammenspiel mit gerichteter Beleuchtung hervorgerufen werden (vgl. entspr. Befunde in Lohaus u.a. 2017). Da bislang jedoch keine systematischen Annahmen über exemplarische, charakteristische oder sonst spezifizierte Beleuchtungsbedingungen für die Bewertung visueller Kontraste im Kontext der Barrierefreiheit bestehen, handelt es sich beim Reflexionsgrad um die technisch angemessenste Beschreibungsgröße.

Anhaltspunkte über die Ausprägung des Reflexionsgrades von Straßenoberflächen, insbesondere solchen aus Asphalt, finden sich in der auf Barrierefreiheit bezogenen Literatur nicht. CIE 144 (2001) benennt  $\rho=0,25$  als „mittelhelles Material“, LiTG 12-3 (2011) gibt für Straßenoberflächen die Bandbreite  $\rho=0,06$  (dunkel) bis  $\rho=0,15$  (hell) sowie für Beton  $\rho=0,24$  an. CIE 150 (2017) benennt für Beton  $\rho=0,3\dots 0,4$ .

### 2.1.5 Anwendungsfall Himmelsaufhellung

Betrachtungsfall ist der von einer ganzen Straße oder größeren Abschnitten davon infolge ortsfester Beleuchtung indirekt durch Reflexion in die Umgebung gelangene Lichtstromanteil (LiTG 2011, CIE-150 2017). Dieser ergibt sich aus dem durch die Beleuchtungsanlage auf die Oberfläche aufgetragenen Lichtstrom und dem mittleren Reflexionsgrad der Fläche. Eine Binnendifferenzierung hinsichtlich Gleichmäßigkeit ist nicht relevant (Abbildung 5).

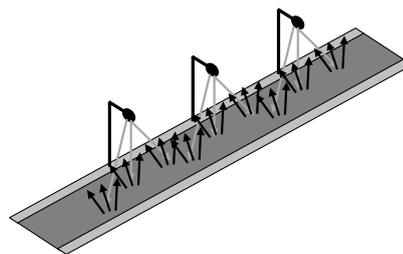


Abbildung 5: indirekte Himmelsaufhellung

Somit können die Flächengrößen angesetzt werden, wie oben zur mittleren Fahrbahnleuchtdichte

im Anwendungsfall Leuchtdichtebemessung ortsfester Beleuchtung diskutiert.

Als Reflexionskennwert für diese Bewertungen ist der diffuse Reflexionsgrad etabliert und sinnvoll. Wie die Darstellungen in Schulze (2018) für 22 Oberflächen aus Pflaster, Asphalt und Beton zeigen, genügt für die Frage der Himmelsaufhellung bei relativ verteilter Beleuchtungsanordnung die Charakterisierung der Reflexion anhand des Reflexionsgrades, obwohl die Mehrzahl dieser Oberflächen für bestimmte Beleuchtungs- und Beobachtungsbereiche ein deutlich gerichtetes Reflexionsverhalten zeigen.

Der Reflexionsgrad kann, entsprechend der Ausführungen im vorhergehenden Kapitel 2.1.4, über Leuchtdichtefaktoren bestimmt und dann entsprechend der Beobachtungsgeometrie, zum Beispiel als  $\rho_{\text{diff}/45}$ ,  $\rho_{\text{diff}/8}$ ,  $\rho_{\text{diff}/0}$  bezeichnet werden.

Somit ist auch davon auszugehen, dass die umrissene Zielgröße unter Nutzung des Reflexionsgrades eindeutig ermittelt werden kann, abgesehen von Abweichungen der relativen Lichtstärkeverteilung der Leuchten gegenüber dem Planungszustand. Dies ist jedoch kein Einfluss, der dem Charakterisierungsbereich Reflexion zufällt. Falls irgendwann nicht nur der Anteil des nach oben abgegebenen Lichtstroms, sondern sein absoluter Betrag für entsprechende Bewertungen interessant ist, wären auch Unterschiede zwischen der absoluten Lichtstärkeverteilung aus der Planung und derjenigen in der tatsächlichen Situation relevant, wodurch zusätzlich Einflüsse auf den Gesamtlichtstrom, wie Verschmutzungen und Verschleiß berücksichtigt werden müssten.

Werte zu typischen Ausprägungen von Reflexionsgraden für Straßen aus den Quellen LiTG 12-3 (2011) und CIE 150 (2017) sind im vorhergehenden Kapitel 2.1.4 dargestellt. Die Angaben von Schulze (2018) beinhalten darüber hinaus Werte im Bereich  $\rho=0,05\dots0,59$ , wobei darin auch Oberflächen berücksichtigt sind, die keine typischen Straßenoberflächen darstellen, wie etwa Kunst- und Natursteinpflaster.

### 2.1.6 Anwendungsfall Tageslicht

Im Charakterisierungsbereich Tageslicht sind zwei Zielgrößen zu betrachten. Es handelt sich einerseits

um die Helligkeit der Straße aus Nutzersicht bei Tageslicht und andererseits um das Erwärmungsverhalten des Baukörpers und nachfolgend seine Stabilität und Haltbarkeit in Abhängigkeit der Oberflächenreflexion bezüglich der Globalstrahlung.

Die Helligkeit der Straße aus Nutzersicht bei Tageslicht wird in der Literatur primär auf die Krafffahrzeugposition bezogen. CIE/PIARC (1983) sieht die Beschreibung der Fahrbahnleuchtdichte bei Tageslicht äquivalent zu derjenigen bei ortsfester künstlicher Beleuchtung vor. Damit beträgt der Betrachtungsbereich ca. 60...160m vor einem Krafffahrzeug und der Beobachtungswinkel gegenüber der Fahrbahnebene ist  $\alpha=1^\circ\pm0,5^\circ$  bei einer Beobachterhöhe von 1,5m.

CIE-144 (2001) bezieht alle diesbezüglichen Betrachtungen auf den Reflexionsparameter  $Q_d$ . Dieser ist als Leuchtdichtekoeffizient bei diffuser Beleuchtung und Beobachtung mit  $\alpha=2,29^\circ$  definiert (DIN EN 1436). Dies entspricht 30m Betrachtungsabstand für eine exemplarische Augpunkthöhe von 1,2m. Eine Skizze der geometrischen Verhältnisse ist in Abbildung 8 auf Seite 25 ersichtlich. Dazu ergänzend benennt CIE-144 (2001) auch eine Berechnungsanleitung zur näherungsweisen Kalkulation eines  $Q_d$  für  $\alpha=1^\circ$  auf Basis einer r-Tabelle.

Fragen der Gleichmäßigkeit spielen in diesem Bereich bislang keine Rolle. Als kleinteiligste Fragestellung kann der Kontrast zwischen Straße und Markierung angesehen werden. Gemäß ZTV M 13 (FGSV 2013) wird die Sichtbarkeit von Markierungen am Tag durch Helligkeits- und Farbmerkmale ermöglicht. Diese wirken in der visuellen Wahrnehmung als Kontrast zu ihrer Umgebung, die in aller Regel die Straßenoberfläche ist (Meseberg 2009).

Die Helligkeitsbeschreibung erfolgt anhand des mittleren Leuchtdichtekoeffizienten bei diffuser Beleuchtung  $Q_d$ . DIN EN 1436 unterteilt Anforderungen für weiße Straßenmarkierung nach Asphalt- und Zementbetonoberflächen. Die niedrigste beziferte Anforderung auf trockenem Asphalt ist Klasse Q2 mit  $Q_d\geq 100\text{mcd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$ . Die weiteren Unterteilungen erfolgen bei  $Q_d\geq 130$  (Q3),  $\geq 160$  (Q4) sowie  $\geq 200\text{mcd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$ , die als Q5 bezeichnet wird. Diese drei Klassen werden ebenfalls für die Anwendung auf Betonoberflächen vorgesehen. ZTV M 13 (FGSV 2013) sieht als Mindestwerte für den Neuzustand unabhängig von der Straßenoberfläche die

Klasse Q4 und im Gebrauchszustand die Klasse Q3 mit  $Q_d \geq 130 \text{ mcd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  vor.

Anwendungsbezogen können hierbei kontrastierende Straßenflächen ähnlicher Größen wie nachts bei Kfz-eigener Beleuchtung angesetzt werden, schon aus Gründen der äquivalenten Bewertung. Andere Fragestellungen, wie etwa die Beschreibung der Fahrbahnleuchtdichte bei Tageslicht vor Tunnelleinfahrten als Beitrag zur Adaptationsleuchtdichte beziehen sich auf wesentlich größere Flächen ab  $100 \text{ m}^2$  aufwärts.

Untersuchungen über den Einfluss wechselnder Beobachtungswinkel auf die Fahrbahnleuchtdichte bei Tageslichtbeleuchtung sind in der einschlägigen Literatur nicht erwähnt. Dagegen stellen die Quellen CIE/PIARC (1983) und CIE-144 (2001) ausführlich auf den Einfluss des Sonnenstandes, auch relativ zur Betrachtungsrichtung, die Unterscheidung in bedeckten versus unbedeckten Himmel sowie das Zusammenwirken mit der mittleren Reflexionsintensität und der räumlichen Reflexionsform der Straßenoberfläche ab.

Als Reflexionskennwert wird in CIE/PIARC (1983) die  $r$ -Tabelle benannt. Für näherungsweise Abschätzungen anhand der daraus berechneten Kennwerte  $Q_0$  und  $S_1$  wird auf Unsicherheiten in bis dato nicht quantifizierter Höhe verwiesen, weswegen keine Anwendungsempfehlungen gegeben werden.

CIE-144 (2001) benennt ebenfalls, dass entsprechende Berechnungen anhand von  $r$ -Tabellen unter Nutzung eines räumlichen Modells der Himmelleuchtdichte vorgenommen werden sollen. Diese erfolgen dann nahezu zwangsläufig für  $\alpha = 1^\circ$ , da  $r$ -Tabellen in aller Regel nur dafür gegeben sind. Für die näherungsweise Kalkulation wird die Nutzung des mittleren Leuchtdichtekoeffizienten  $Q_d$  ( $\alpha = 2,29^\circ$ ) empfohlen, der mit der Beleuchtungsstärke bei bedecktem Himmel multipliziert werden soll. Für diesen Anwendungsfall gibt CIE-144 (2001) Abweichungen im Bereich  $< 10\%$  an, wobei diese unter Nutzung von Standard- $r$ -Tabellen rechnerisch ermittelt wurden.

Wird eine im Betrachtungsbereich näherungsweise konstante Beleuchtung durch das Tageslicht angenommen, bleiben in der Relation zur Zielgröße „Fahrbahnhelligkeit aus Nutzersicht bei Tageslicht“

zwei relevante Variablen. Das eine ist die diesbezügliche Homogenität der Straßenoberfläche und das andere ist der Einfluß des mit der Betrachtungsentfernung und gegebenenfalls in Abhängigkeit der räumlichen Linienführung der Straße variierenden Beobachtungswinkels. Zumindest in größere Betrachtungsentfernungen hinein wären Übergänge zur Totalreflexion abzugrenzen. Insgesamt können diese Einflüsse auf Basis der einschlägigen Literatur nicht befriedigend abgeschätzt werden.

Anhaltspunkte zu Ausprägungen der benannten Reflexionskennwerte für die Helligkeit von Straßen bei Tag aus Nutzersicht wurden bereits in Kapitel 2.1.2 diskutiert.

Mit der Situation Tageslicht ist schließlich ein weiterer, primär bautechnischer Anwendungskontext für Reflexionsbeschreibungen von Straßenoberflächen verbunden. An Sommertagen führt die Globalstrahlung in Verbindung mit hohen Luft- und allgemeinen Bodentemperaturen zu einer Erwärmung des Straßenkörpers, in deren Folge bei bituminös gebundenen Materialien ein Erweichen der Substanz und ein geringerer Widerstand gegen Verformung auftreten können. Dabei ist davon auszugehen, dass neben dem Wärmespeicher- und Wärmetransportvermögen, das Reflexions- und damit einhergehende Absorptionsvermögen der Oberfläche zu diesem komplexen Gesamtverhalten einen Beitrag liefert (Abbildung 6).

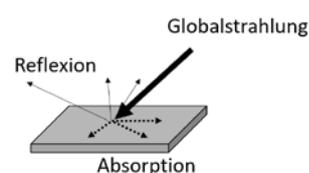


Abbildung 6: Reflexion und Absorption von Globalstrahlung durch Straßenoberflächen

Auch hierbei können mindestens die Flächengrößen wie oben zur mittleren Fahrbahnleuchtdichte im Anwendungsfall Leuchtdichtebemessung ortsfester Beleuchtung angesetzt werden. Tendenziell geht es jedoch um wesentlich größere Flächen, da typische Straßen über ausgedehnte Längen aus einem Material identischer Zusammensetzung und Fertigungstechnologie hergestellt werden.

Als Reflexionskennwerte für den Aspekt Absorption und Energieeintrag in den Baukörper kommen allgemein spektrale Strahlungs-Reflexionsgrade in

Frage. Übersetzt in den Bereich sichtbarer Strahlung korrespondiert damit der Reflexionsgrad, wie er in Kapitel 2.1.1 allgemein umschrieben wurde. Ebenfalls wurden literaturbasierte Erwartungen zu typischen Ausprägungen für Reflexionsgrade bereits in Kapitel 2.1.4 vorgestellt.

Die für eine geschlossene Gesamtmodellierung von physikalischen, bautechnischen, nutzungsseitigen und umweltbedingten Einflüssen auf die Haltbarkeit und das Verformungsverhalten von Asphaltstraßen notwendigen wissenschaftlichen Erkenntnisse und Untersuchungen sind noch nicht vollumfänglich verfügbar (z.B. Diskussion in Mielke und Lupascu 2019). Insofern kann der diesbezügliche Beitrag des Reflexionsgrades der Oberfläche nicht final abgeschätzt werden. Um zu Untersuchungen in diesem Kontext jedoch einen entsprechenden Informationsbeitrag zu ermöglichen, sind Reflexionsgrade zu messen. Solche Erhebungen in situ vornehmen zu können, ist eine bereits früher aufgestellte, bislang jedoch nicht umgesetzte Forderung (Roßberg u.a. 2000).

## 2.2 Vorgaben an Messaufbauten und Messgeräte

### 2.2.1 geometrische und lichttechnische Vorgaben

Vorgaben dieser Art sind vor allem bei gerichteter Beleuchtung und/oder Beobachtung zentral. In diesen Fällen erfolgen Beschreibungen durch Winkel im dreidimensionalen Raum, die in der Regel auf eine idealisierte Ebene bezogen sind, deren Reflexion beschrieben werden soll. Diese Winkel sind durch Linien definiert, deren Enden Punkte entsprechen. In der Praxis haben jedoch Beleuchtung, Messfläche und Empfänger eine Ausdehnung. Und während die Beleuchtung, zumindest theoretisch, mit parallelem Licht erfolgen könnte, besteht das reflektierte Lichtbündel infolge der unvermeidlichen Streuung an der Straßenoberfläche sicher nicht aus parallelen Strahlen. Häufig ist es gerade Zielsetzung der Reflexionsbeschreibung, dieses Streuverhalten zu charakterisieren. Unter praktischen Aspekten ist auch die Beleuchtung nicht im strengen Sinne als paralleles Lichtbündel auszubilden. Insofern muss eine Begrenzung der praktischen Abweichung der beleuchtenden und reflektierten Lichtstrahlen von den jeweiligen definierten Richtungen erfolgen.

Lichttechnische Vorgaben beziehen sich auf das Spektrum der Beleuchtung, mit der die Reflexion erhoben wird. In vielen Fällen reflektieren Straßenoberflächen spektral relativ aselektiv, es sind jedoch auch Beispiele nicht unbunter Oberflächen, beispielsweise durch farbige Gesteine, gefärbte Bindemittel oder Anstriche bekannt.

Mehr oder weniger implizit eindeutig vorgegeben, jedoch für praktische Messungen nicht minder bedeutsam, ist die spektrale Bewertung der reflektierten Strahlung mit der genormten Hellempfindlichkeitskurve für den Standardbeobachter, der  $v(\lambda)$ -Verteilung. Obwohl die Anpassung von Messempegängern an die  $v(\lambda)$ -Verteilung durch die Definition lichttechnischer Größen prinzipiell gegeben ist, bestehen in der Praxis deutliche Güteunterschiede zwischen Varianten messtechnischer Realisierungen. Auch der Grad der Abschirmung von Fremd- und Streulicht ist zu diskutieren. Hierbei ist der theoretische Anspruch ebenso ein absoluter, während in der Praxis ein je nach Gestaltung der Messanordnung variierendes Maß dessen auftritt.

Aus der umrissenen Motivation heraus werden nachfolgend entsprechende Anhaltspunkte und Vorgaben aus internationalen und nationalen Richtlinien sowie Untersuchungen aufgeführt.

Zur Art der Beleuchtung für Reflexionsmessungen an Straßenoberflächen führen CIE-30 (1976) und CIE-30\_2 (1990) aus, dass Glühlampen höherer Farbtemperatur (unspezifiziert) verwendet werden sollen. Die Beleuchtung kann, muss aber nicht optisch gebündelt sein. Es soll eine möglichst homogene Beleuchtungsstärke auf der Probe erzeugt werden, wobei keine expliziten Gleichmäßigkeitsanforderungen benannt sind. Die Beleuchtungsentfernung ist gemäß den beiden Quellen so zu wählen, dass für  $\gamma=0^\circ$  von der Lampe aus gesehen das Messfeld nicht größer als  $10^\circ \times 4^\circ$  erscheint. Dies wäre für eine beispielhafte Entfernung von 30cm, wie sie etwa innerhalb mobiler Messgeräte vorgesehen werden könnte, bei einem 5cm x 1cm großen Feld erfüllt. Die Beleuchtung soll so groß sein, dass ihre Ausdehnung von der Mitte des Messfeldes aus gesehen bei  $\gamma=0^\circ$  unter einem Winkel von weniger als  $4^\circ$  erscheint. Wiederum im Beispiel 30cm Entfernung entspricht dies einem Durchmesser der leuchtenden Fläche von  $<2,1$ cm.

CIE 144 (2001) führt aus, dass die diffuse Beleuchtung für die Ermittlung von  $Q_d$  durch eine homogene Leuchtdichte mit Normlichtart D65 erfolgen soll. Dazu ist aus praktischen Verhältnissen heraus anzumerken, dass die Erzeugung einer D65-gemäßen Lichtart mit sehr hohem Aufwand verbunden ist und praktisch alle kommerziell verfügbaren Messgeräte nur Näherungen oder andere Lichtarten verwenden. Es erfolgt keine Größenspezifikation der Lichtquelle.

Für  $R_L$  soll gemäß CIE 144 (2001) die gerichtete Beleuchtung mit maximal  $\pm 5'$  vertikalem Aperturwinkel ( $0,083^\circ$ ) und maximal  $\pm 10'$  horizontalem Aperturwinkel ( $0,167^\circ$ ) erfolgen, sowie Normlichtart A aufweisen. Wiederum am Beispiel einer Entfernung von 30cm entspricht dies aus Sicht der zu charakterisierenden Straßenoberfläche einer leuchtenden Fläche, die 0,9mm hoch und 1,75mm breit ist. Der beleuchtete Bereich soll das Messfeld homogen und mit der identischen Richtung an allen Positionen ausleuchten, wobei keine Angaben über Genauigkeitsgrenzen enthalten sind.

FGSV (2010) fordert für die Ermittlung von Leuchtdichtekoeffizienten gerichtetes Licht der Normlichtart A. Die Probe soll homogen ausgeleuchtet sein, wobei die maximale Differenz der Beleuchtungsstärke auf der Messfläche nicht größer als 5% des Mittelwertes betragen darf. Die zeitliche Konstanz soll besser 2% sein. Außerdem soll der doppelte Aperturwinkel der Beleuchtung ( $2 \cdot \sigma_B$ )  $\leq 1^\circ$  betragen. Das bedeutet, dass die Richtung der ungünstigsten Strahlen des einen bestimmten Punkt beleuchtenden Lichtbündels maximal  $0,5^\circ$  von der beabsichtigten Beleuchtungsrichtung abweichen dürfen. Hieraus folgt, dass der bezüglich eines beleuchteten Flächenelementes für die Beleuchtung relevante Raumwinkel der leuchtenden Fläche nicht mehr als  $\Omega = 2,4 \cdot 10^{-4}$  sr betragen darf. In eine mobile Messanordnung mit beispielsweise 30cm Entfernung zwischen Lichtquelle und Messfeld übersetzt folgt daraus, dass das Licht, das die Beleuchtung eines Punktes der Messfläche erzeugt, aus nicht mehr als 5mm leuchtendem Durchmesser entstammen dürfte.

Neben der Beleuchtung werden auch Vorgaben für die Beobachtung und dabei zu verwendender Messgeräte berichtet.

CIE-30 (1976) und CIE-30\_2 (1990) schreiben für die Ermittlung von Leuchtdichtekoeffizienten an

Straßen (r-Tabelle) eine Messfeldblende der Leuchtdichtemessung nicht größer als  $5'$  vertikal und  $10'$  horizontal vor. Das Messgerät soll an die  $V(\lambda)$ -Funktion angepasst sein, über die Güte der Anpassung werden keine Angaben gemacht.

CIE/PIARC (1983) benennt die Grenzen der Messblende ebenfalls mit vertikal x horizontal  $5' \times 10'$ . Da eine Beziehung zu den innerhalb einer r-Tabelle benachbarten Beleuchtungswinkeln besteht und diese im Minimum um  $0,2^\circ$  ( $12'$ ) von einander abweichen, ist diese Forderung plausibel. Proben für Messungen unter Kfz-Geometrie sollen mit vertikaler Messfeldblende der Größe 10% des Beobachtungswinkels und horizontal  $20'$  gemessen werden. Für die  $R_L$ -Geometrie folgt somit eine vertikale Öffnung von etwa  $14'$ . Für Messungen der Reflexion bei Kfz-eigener Beleuchtung in der Gegenverkehrssituation (Vorwärtsreflexion) werden geringe Aperturwinkel „weniger Minuten“ empfohlen, aber auch ausgeführt, dass dazu zu wenige Informationen vorliegen.

OECD (1984) benennt gegenüber CIE/PIARC (1983) keine abweichenden Anforderungen.

CIE 144 (2001) beschreibt im Hauptteil, dass  $Q_0$  nur durch numerische Integration von r-Tabellen ermittelt werden kann und diese unter anderem daher durch eine  $Q_d$ -Messung ersetzt werden soll. Im Anhang führt diese Quelle aus, dass für Labormessungen kalibrierte fokussierende Leuchtdichtemesser verwendet werden. Für diese werden runde Messfeldblenden von  $20'$  ( $0,33^\circ$ ) als angemessen beschrieben. Für  $Q_d$  und  $R_L$  wird gefordert, maximal  $\pm 10'$  vertikale und ebenfalls maximal  $\pm 10'$  horizontale Messblenden zu nutzen.

Die Arbeitsanleitung Straßenreflektometer (FGSV 1986) benennt als Öffnungswinkel der Beobachtung vertikal x horizontal  $6' \times 130'$ . Das Arbeitspapier FGSV (2010) beschreibt den horizontalen Öffnungswinkel der Leuchtdichtemessung mit bis zu  $20'$  und den vertikalen Öffnungswinkel mit bis zu  $2'$ . Es soll ein Messgerät mindestens der Klasse B nach DIN 5032 Teil 7 genutzt werden.

Nach DIN EN 13201-4 (2016) sollen Leuchtdichtemessungen eines „Punktes“ einer Straßenfläche mit Messgeräten erfolgen, die einen Öffnungswinkel vertikal x horizontal nicht größer von  $2' \times 20'$  abbilden.

Weitere Anhaltspunkte entstammen aus publizierten Studien. So benennt die Arbeit von Hentschel und Pohlmann (1968) als Blende der Leuchtdichtemessung horizontal x vertikal 120 x 10 Bogenminuten. Mørketrafik night traffic report No.4 (1982) gibt das Messfeld für die Straßenreflexion unter Kfz-Geometrie in den Maßen vertikal x horizontal 3,3'x21' an. Fleischer (1984) berichtet den Messfeldöffnungswinkel 1'x25' vertikal x horizontal. Schmidt-Clausen u.a. (1992) nutzen für in situ Reflexionsmessungen aus dem fahrenden Fahrzeug einen Leuchtdichtemesser LMT 1009s mit runder Blende von 20'. Sørensen (2017) berichtet für einen mobilen Messaufbau seitliche Öffnungswinkel des Messfeldes von  $\pm 0,72^\circ$  ( $43'$ ), die aufnahmeseitige Messfeldhöhe beträgt 6'.

Schließlich enthält die Literatur in einigen Fällen Anforderungen an die komplexe Positionierung von Beleuchtung, Beobachtung und Oberfläche. So fordert CIE-30\_2 (1990), dass die Probe horizontal liegen soll und die Flächennormale soll mit  $\gamma=0^\circ$  übereinstimmen. Es werden keine Toleranzen angegeben.

Das Arbeitspapier FGSV (2010) beschreibt den Messaufbau zur Messung an ebenen Bohrkernen im Labor. Die üblicherweise einen Durchmesser  $d=15\text{cm}$  aufweisenden Oberflächen sollen eine Durchbiegung von max. 2mm aufweisen und mit einer Lagetoleranz von höchstens  $0,1^\circ$  gegenüber dem Messaufbau positioniert werden.

Schließlich folgen aus der Definition der Kennwerte implizit gegebene Anforderungen für ihre Umsetzung bei Messungen. Für die Messung von r-Tabellen sollen Beleuchtungswinkel auf  $0,1^\circ$  Genauigkeit eingestellt werden (CIE-30 1976, CIE/PIARC 1983). Da sie sich im Minimum um  $0,2^\circ$  unterscheiden, ist eine Lageunsicherheit der Oberfläche größer  $0,1^\circ$  auszuschließen. Aus der Definitionen von  $R_L$  mit Beleuchtungs- und Beobachtungswinkeln auf Hundertstel Grad der Angabe (siehe Darstellungen in Kapitel 2.1.3) kann selbst bei praktischer Toleranz bezüglich der zweiten Nachkommastelle eine Lageunsicherheit nicht erheblich größer als  $0,1^\circ$  abgeleitet werden. Dies gilt aufgrund der identischen Definition des Beobachtungswinkels ebenfalls für  $Q_d$ .

## 2.2.2 Randbedingungen für mobile Messkonzeptionen

Die dafür identifizierten Reflexionskennwerte sollten auf der Straße mit vertretbarem Aufwand und angemessener Güte messbar sein. Sinngemäß sind somit die oberhalb aufgeführten Randbedingungen zu erfüllen.

Eine wesentliche weitere Randbedingung entsteht aus der Anforderung, mobile Messanordnungen in ihren Abmaßen sinnvoll zu begrenzen. Im Rahmen der Projektkonzeption wurden daher Aufbauten ausgeschlossen, die nicht von einer Person bewegt werden können oder gar selbst die Maße eines PKW-Anhängers, eigenen Fahrzeuges oder ähnlichem annehmen. Es wird der Transport mit PKW angenommen. Daraus folgen Maße, die etwa die Größenordnung  $H \times B \times L$  von  $60 \times 60 \times 120\text{cm}$  nicht wesentlich überschreiten sollten.

Zu berücksichtigen sind auch bauliche Aspekte der lichttechnischen Bestandteile. Hierzu zählt die Größe von verfügbaren Leuchtdichtemessgeräten. Die zur fokussierten Messung von Leuchtdichten einsetzbaren Leuchtdichtemesser weisen Maße auf, die die Positionierung des Objektivmittelpunktes nicht weniger als 4 bis 5cm oberhalb der Messfläche erlauben.

Weiterhin wäre es günstig, Spiegel als Elemente in Beleuchtungs- und Beobachtungsgang möglichst zu vermeiden. Sie ziehen die Unsicherheit der zusätzlichen Verschmutzung und Betauung sowie je nach baulicher Umsetzung auch der Lageänderung während des Transportes oder der Messung nach sich. Da dies für alle beweglichen Teile gilt, sollten bewegliche Teile im Messaufbau generell vermieden werden.

Außerdem sind Randbedingungen bezüglich des praktischen Messvorganges in situ aufzuführen. Die Messungen sollen mit möglichst geringem Zeitbedarf pro Messstelle erfolgen. Die Messungen sollen auf der Straße möglichst ohne fremde Spannungsversorgung erfolgen können. Eine möglichst weitgehende Automatisierung des Messvorganges ist wünschenswert.

## 2.3 Diskussionen zum Messgegenstand

### 2.3.1 Skalierung der Messgeometrie

Bei lichttechnischen Reflexionsmessungen an Fahrbahnoberflächenproben im Labor als auch an Fahrbahnausschnitten mittels mobiler Einrichtung im Feld ist eine Miniaturisierung beziehungsweise Skalierung der Beleuchtungs- und Beobachtungsverhältnisse gegenüber einem realen Beobachter einer Straße unvermeidlich.

Ebenso unvermeidlich handelt es sich dabei um eine partielle Skalierung. Die Miniaturisierung betrifft den Messaufbau, nicht jedoch den Messgegenstand. Die Struktur und Gestalt der Straßenoberfläche kann partiell betrachtet oder entnommen werden, nicht jedoch im Maße der Messanordnung verkleinert.

Hier ist zunächst zu diskutieren, welches Ausmaß der „Miniaturisierungsunterschied“ von Messung gegenüber Messgegenstand hat. Die Standardbeobachtungsgeometrie der Leuchtdichtetechnik in der ortsfesten Verkehrsbeleuchtung ist mit  $\alpha=1^\circ$  bei Beobachterhöhe  $h=1,5\text{m}$  und Beobachterentfernung  $d=86\text{m}$  definiert (CIE/PIARC 1983, CIE-30\_2 1990, CIE-144 2001). Typische Strukturgrößen werden, zumindest in Asphaltoberflächen von der Größe der Zuschlagstoffe bestimmt. Typische Korngrößen der Gesteinsanteile der Oberflächen liegen etwa im Bereich 2...12mm.

Wird die Beobachtergeometrie winkelrichtig verkleinert und beispielsweise in Laborversuchsstände mit bis zu 2m Beobachtungsentfernung übertragen, ergibt sich ein Skalierungsverhältnis von etwa 1:50. Eine in diesem Verhältnis angenommene Skalierung der Korngrößen führt theoretisch zu etwa 0,1mm großen Strukturen. Anders herum kalkuliert, entsprechen die miniaturisiert gemessenen, aber unskalierten Gesteinskörner aus Sicht der Realsituation Strukturgrößen theoretischen Ausdehnungen von etwa 20cm.

Für realistische in situ-Messanordnungen ist eine noch größere Skalierung der Messgeometrie relevant. So resultiert etwa bei 75cm Beobachtungsentfernung ein Maßstabsverhältnis von 1:115. In diesem Verhältnis gemessene einzelne Gesteinskörner nehmen daher in die Realgeometrie übertragen

hypothetische Ausdehnungen von 40cm und mehr an.

Die Ausführungen zeigen deutlich, dass durch die einseitige Miniaturisierung der Messgeometrie eine möglicherweise nicht unerhebliche Abbildungsselektion der Straßenoberflächen einhergeht. Es wird klar erkennbar, dass sowohl Labor- als auch insbesondere mobile Feldmessungen Kanten und Teiloberflächen und damit aus Praxissicht mikroskopisch kleine Anteile realer Straßenoberflächen abbilden.

Die internationale Literatur enthält zu diesem Aspekt keine Ausführungen. CIE/PIARC (1983) beschreibt lediglich, dass es günstig ist, eine Skalierungsgröße zu wählen, die eine gegenseitige geometrische Behinderung von Beleuchtung und Beobachtung ausschließt und fokussierende Leuchtdichtemessungen erlaubt. Welchem Skalierungsfaktor das entspricht, führt die Publikation nicht aus. CIE-144 (2001) sagt im Hauptteil nichts dazu. Im Anhang A führt diese Quelle lediglich aus, dass Labormessungen in Skalierung 1:1 oder „somewhat reduced scale“ durchgeführt werden. Anhaltspunkte über eine Auswirkung auf Messergebnisse finden sich in keiner Publikation.

Daher schließt sich die Diskussion zu notwendigen Messfeldgrößen an.

### 2.3.2 Anhaltspunkte zur notwendigen Flächengröße

Ausgehend von der nicht unplausiblen Annahme, dass das Reflexionsverhalten kleiner Anteile der Straßenoberfläche nicht identisch dem Reflexionsverhalten größerer Flächen ist (Abbildung 7), steht die Frage nach der notwendigen Stichprobengröße für Reflexionsmessungen an Straßenoberflächen. Da es sich bei der zu charakterisierenden Oberfläche zudem keineswegs um eine geometrisch homogene Ebene handelt, müssen auch diesbezügliche Aspekte betrachtet werden.



$A \approx 3\text{cm}^2$



$A \approx 100\text{cm}^2$

Abbildung 7: beispielhafter Oberflächenausschnitt verschiedener Größe (Asphalt)

Anhaltspunkte für die Beantwortung wurden zunächst in der internationalen Literatur gesucht. Dabei konnte keine Publikation gesichtet oder auch nur als Erwähnung in anderen Quellen identifiziert werden, die den Einfluß der Messfeldgröße auf das Messergebnis „Reflexionsverhalten von Straßenoberflächen“ explizit untersucht.

Einige Empfehlungen konnten identifiziert werden. So benennen CIE-30 (1976) und CIE-30\_2 (1990) keine Einflüsse oder Unsicherheiten, fordern aber eine absolute Messfeldgröße im Bereich Breite 5-10cm und Länge 20-30cm, folglich eine Fläche  $A=100...300\text{cm}^2$ .

CIE/PIARC (1983) beschreibt auf S. 66 ein Messfeld von „...at least 100 sq cm may be considered to be sufficiently large.“ Bei kleinerer Messfeldgröße sollen mehrere Messungen verschiedener Teiloberflächen bis zur Summe der genannten Flächengröße erfolgen. Eine Quelle oder Herleitung wird nicht benannt. Es werden keinerlei Randbedingungen benannt, wie etwa Oberflächenmerkmale oder Fehlergrößen in Abhängigkeit geringerer Flächengrößen angegeben. Proben für Messungen unter dem Aspekt Kfz-eigener Beleuchtung sollen 20x40cm aufweisen. Zu den bisher benannten Punkten aus CIE/PIARC (1983) enthält OECD (1984) gleichlautende Anforderungen.

Die benannte Messfeldgröße gilt nicht nur im Labor, sondern auch für Feldmessungen. CIE/PIARC (1983) benennt explizit, dass die für Labormessungen benannte Messfeldgröße ebenfalls für Feldmessungen erforderlich ist ( $\geq 100\text{cm}^2$ ) und bei Bedarf aus mehreren Messungen zusammengesetzt werden soll.

Darüber hinaus führt die Quelle aus, dass die Probe groß genug sein soll, um korrekte Schattenbildung zu ermöglichen (S.62). Auf S. 64 wird gefordert, dass die Probe groß im Verhältnis zu den typischen Höhenschwankungen sein soll. Ebenso wird beschrieben, dass das Messfeld groß genug sein soll, um eine signifikante Anzahl von Gesteinskörnern der Oberfläche abzubilden. Konkretisierungen dieser Empfehlungen sind nicht enthalten.

CIE-144 (2001) fordert für  $Q_d$  und  $R_L$ , mindestens  $A=50\text{cm}^2$  Messfeldgröße abzubilden. Bei kleinerer Messfeldgröße sollen mehrere Messungen bis zum Erreichen dieser Grenze erfolgen.

Damit erschöpfen sich die in der internationalen Literatur identifizierbaren konkreten Empfehlungen zur Messfeldgröße.

Den Charakter von Anhaltspunkten haben einerseits Richtlinien und Empfehlungen, die über den Messaufbau und die Messprozedur indirekt Vorgaben zur Messfeldgröße enthalten und andererseits Publikationen, die Messungen an Straßenoberflächen berichten und die Beobachtungsgeometrie und das Vorgehen so dezidiert schildern, dass Rückschlüsse über abgebildete Messfeldgrößen möglich sind.

Die Arbeitsanleitung Straßenreflektometer (FGSV 1986) benennt Öffnungswinkel der Beobachtung und die Beobachtungsentfernung. Die daraus erchenbare Messfeldgröße beträgt  $A\approx 50\text{cm}^2$ . Das Arbeitspapier FGSV (2010) beschreibt die Öffnungswinkel der Leuchtdichtemessung. Bei typischen Beobachtungsentfernungen für Labormessungen im Bereich bis etwa 2m ergeben sich je Einzelmessung charakterisierte Flächen von  $A\approx 6\text{cm}^2$ . Die Vorgabe eines Mittelwertes aus vier einzelnen Messungen unterschiedlicher Stellen der Probe erhöht die Fläche auf  $A\approx 24\text{cm}^2$ . Werden weiterhin die ebenfalls enthaltenen Vorgaben zur Charakterisierungen von Straßenabschnitten durch vier Bohrkern berücksichtigt, ergibt sich in Summe eine charakterisierte Gesamtfläche von  $A\approx 100\text{cm}^2$ .

Aus den Angaben der Publikation von Hentschel und Pohlmann (1968) ergibt sich ein ideal ebenes Messfeld von ca. 20cm Länge und 4cm Breite. Ziegler (1981) nutzt für Messungen mittels Goniometer unter  $\alpha=1^\circ$  ein Messfeld der Ausdehnung 30cm längs und 5cm quer ( $A=150\text{cm}^2$ ).

Mørketrafik night traffic report No.4 (1982) untersucht die Straßenreflexion unter Kfz-eigener Beleuchtungsgeometrie an 20x40cm messenden Platten. Das Messfeld ist auf die Oberfläche projiziert etwa 2,2cm breit und aufgrund der Variation des Beobachtungswinkels im Bereich  $0,57^\circ \leq \alpha \leq 8^\circ$  zwischen 2,3cm und 35cm lang. Als notwendige Messfeldgröße wird  $100\text{cm}^2$  benannt, weswegen je Position 18 Messungen durch Verschieben der Probe erzeugt wurden.

Helms (1983) benennt für mobile Reflexionsmessungen keine explizite Messfeldgröße, sondern beschreibt, dass die Leuchtdichtemessung in einem Bereich des Durchmessers 7,6cm (3 inch) erfolgt.

Fleischer (1984) berichtet Labormessungen unter Geometrie Kfz-eigener Beleuchtung an Bohrkernen mit  $d=22\text{cm}$ . Die Messentfernung beträgt  $10\text{m}$ , der Öffnungswinkel entspricht einer projizierten virtuellen Messblende von  $7,3\text{mm}$  Breite mal  $3\text{mm}$  Höhe. Diese wiederum bedeckt die maximale Probenlänge bei einem Beobachtungswinkel von  $0,8^\circ$  und weist dabei eine Breite von ca.  $4\text{cm}$  auf. Mit wechselndem Beobachtungswinkel schwankt die Messfeldgröße etwa zwischen  $A=30\text{cm}^2$  bis  $150\text{cm}^2$ .

Schmidt-Clausen u.a. (1992) berichten von umfangreichen Feldmessungen der Fahrbahnreflexion unter kfz-eigener Beleuchtung. Als Beleuchtung dienen die fahrzeugeigenen Scheinwerfer an Konstantspannungsversorgung, die in ihrer Lichtstärkeverteilung vermessen wurden. Die Beschreibung der Messgeometrie ist nicht einheitlich zwischen den Skizzen und verbalen Beschreibungen des Vorgehens. Die Leuchtdichtemessung erfolgte mit runder Blende von  $20'$  Öffnungswinkel. Das zeichnet gemäß den plausibleren Angaben ein elliptisches Messfeld etwa der Breite  $8,7\text{cm}$  und Länge  $1,17\text{m}$  auf die Straße und bildet somit eine Fläche von  $800\text{cm}^2$  ab.

Meyer und Gundert (1995) nutzen für die Reflexionsmessungen im Labor Proben der Größe  $55 \times 40\text{cm}$ , auf denen ein Messfeld der Ausdehnung  $40 \times 13\text{cm}$  abgebildet wird. Die erfasste Flächengröße beträgt somit etwa  $A \approx 500\text{cm}^2$ . Die von Gundert (1998) berichteten Reflexionsmessungen entstammen derselben Messanlage und haben damit eine identische Messfeldgröße.

Wambsganß (1995) berichtet Labormessungen zum Reflexionsverhalten von Fahrbahnoberflächen bei kfz-eigener Beleuchtung. Die konkreten Messfeldgrößen sind nicht benannt. Die Abbildungen legen zumindest für die Messungen anhand bildgebender Leuchtdichtetechnik eine fast vollflächige Berücksichtigung der etwa  $55 \times 40\text{cm}$  messenden Proben nahe.

Gibbons (1997) sowie Gibbons und Adrian (1997) berichten Reflexionsmessungen an Straßenproben in Form von Bohrkernen des Durchmessers  $d=22\text{cm}$  unter verschiedenen Beobachtungswinkeln im Bereich  $\alpha=1^\circ \dots 60^\circ$ . Die Leuchtdichtemessung erfolgte per rundem  $20'$ -Messfeld aus etwa  $50\text{cm}$  Entfernung. Das dadurch abgebildete Mess-

feld hatte somit auf der Probe eine mit dem Beobachtungswinkel variierende Größe von  $A=4,4\text{cm}^2$  bei  $\alpha=1^\circ$  und abnehmend bis  $A \approx 9\text{mm}^2$  bei  $\alpha=60^\circ$ .

Muzet u.a. (2008) berichten für das mobile Gerät COLUROUTE eine Messfeldgröße von etwa  $19\text{cm}^2$  je Einzelmessung. Stabile Aussagen werden für fünf Messungen (in Summe etwa  $100\text{cm}^2$ ) erwartet. Aufgrund der geringen Größe des Gerätes beträgt die Beobachtungsentfernung nur etwa  $20\text{cm}$ . Die Höhe der Beobachtung gegenüber der Messfläche beträgt zur Wahrung des Beobachtungswinkels von  $\alpha=1^\circ$  lediglich  $3,5\text{mm}$ , wodurch sich die Messfeldgröße bei geringsten Unebenheiten der gemessenen Oberfläche erheblich verändern dürfte.

Die letzte für Deutschland bekannte Entwicklung einer mobilen Messanordnung (de Boer u.a. 2009) enthält nur indirekt über eine Skizze eine Ausdehnung des Messfeldes in Längsrichtung von  $6\text{cm}$  bei etwa  $1\text{cm}$  Breite. In der Fehlerbetrachtung kommt Messfeldgröße nicht vor. Für die Feldmessungen werden vier bis sechs Messungen an sechs Messstellen vorgenommen. Tabelle 26 dieser Publikation zeigt die Einzelwerte der Messungen. Die mittlere Standardabweichung der etwa  $6\text{cm}^2$  abbildenden Messungen einer Messstelle beträgt etwa  $\text{Std}(Q_0) \approx 0,006\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ , woraus sich ein 95%-Vertrauensintervall der Messung von  $Q_0 \pm 0,01\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  ableiten lässt.

Sørensen (2017) berichtet für einen mobilen Messaufbau eine bei ideal ebener Fläche abgebildete Messfeldgröße von etwa  $20 \times 4\text{cm}$  ( $80\text{cm}^2$ ).

Im Fazit zeigt sich eine erhebliche Heterogenität der geometrischen Beobachtungsbedingungen und dabei abgebildeten Messfeldgrößen in der internationalen Literatur.

Belastbare Anhaltspunkte für eine Abschätzung minimal notwendiger Flächengrößen zur Abbildung stabiler Reflexionskennwerte von Fahrbahnoberflächen unter den Charakterisierungsaspekten ortsfeste Beleuchtung, kfz-eigene Beleuchtung sowie diffuse Beleuchtung konnten nicht identifiziert werden.

Einen weiteren, formal indirekten Anhaltspunkt bieten die Beschreibungen zur Leuchtdichtetechnik für die Straßen- und Tunnelbeleuchtung (vgl. Darstellungen in Kapitel 2.1.2).

Leuchtdichtemessungen sollen gemäß DIN EN 13201-4 (2016) als „Punkt“ eine Fläche der Straße nicht größer entsprechend eines Öffnungswinkels des Messgerätes von  $2' \times 20'$  bei Messentfernung von größer 60m abbilden. Die daraus für die standardisierte Beobachterhöhe 1,5m kalkulierbare Größe eines „Punktes“ beträgt somit am Anfang des Bewertungsfeldes in 60m Entfernung ca.  $0,48\text{m}^2$  ( $136\text{cm}$  Länge x  $35\text{cm}$  Breite) und in 86m Entfernung etwa  $1\text{m}^2$  ( $198\text{cm}$  Länge x  $50\text{cm}$  Breite).

Für die Anwendung „bewegter Beobachter“ wie in der Tunnelbeleuchtung (DIN 67524) kann konstant der Wert  $1\text{m}^2$  für 86m Beobachterentfernung zugrunde gelegt werden.

Diese Teilflächen sind größer als die in der Literatur als Messflächen empfohlenen Flächen. Flächenhafte Reflexionsmessungen dieser Größe können zumindest für diesen Beispielfall der r-Tabelle sowohl für Feld- als auch Laboruntersuchungen ausgeschlossen werden. Um wie viel kleinere Flächen genügen, um die Reflexion der benannten Flächen zu charakterisieren, lässt sich auf Basis der Literatur nicht genau beziffern. Daher wurden entsprechende Analysen im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes durchgeführt.

## 2.4 Erkenntnisse zur Unsicherheit von Messungen

Jede Messung ist mit Unsicherheit behaftet. Unsicherheit kann allgemein als erwartbare Variabilität von Messergebnissen bei mehrmaligen Messungen beschrieben werden. Sie ist daher von der Genauigkeit zu unterscheiden, für die die Unsicherheit einen Aspekt darstellt.

Unsicherheit ist sowohl im Sinne einer konkreten Quantität als auch deren qualitativer Einordnung ein relatives Konstrukt, da immer ein Vergleich oder Anspruch als Bezug dient, der wiederum mit deutlichen Freiheitsgraden versehen ist und entsprechend definiert werden muss.

CIE 30 (1976) und gleichlautend CIE 30-2 (1990) fordern eine Unsicherheit der einzelnen Leuchtdichtekoeffizienten im Bereich der Unsicherheit der Lichtstärkeeinzelwerte, die sich aus den relativen Lichtstärkeverteilungen von Leuchten und dem abgegebenen Lichtstrom ergeben. Dafür werden in diesen Publikationen keine Angaben vorgenom-

men. Im Kontext der internationalen Außenbeleuchtungspraxis kann ohne Anspruch auf uneingeschränkte Belastbarkeit für Lichtstärkewerte größenordnungsmäßig eine Unsicherheit von 10-20% angenommen werden. Diese speist sich aus etwa 10% Unsicherheit bezüglich des abgegebenen Lichtstromes und 10% Unsicherheit aus der relativen Lichtstärkeverteilung (DIN EN 13201-4).

CIE/PIARC (1983) sowie CIE 144 (2001) erwähnen konkrete Werte von Messunsicherheiten bei der Bestimmung von Fahrbahnreflexionswerten nicht. Dies trifft auch auf die umfangreichsten verfügbaren Veröffentlichungen gemessener Reflexionsverteilungen zu. Weder der „Reflexionsatlas“ (Erbay, 1974) mit 117 gemessenen r-Tabellen noch die allein 286 r-Tabellen für trockene Fahrbahnoberflächen enthaltene Publikation des dänischen Lichtlaboratoriums (Sørensen 1975) diskutieren oder erwähnen Unsicherheiten der publizierten Werte.

Die für die deutsche Messpraxis lange Zeit relevante Arbeitsanleitung der FGSV (1986) benennt ebenfalls keine Messunsicherheiten. Einen deutlichen Hinweis liefern jedoch die publizierten Ergebnisse eines Messgerätevergleiches (Fachausschuss Außenbeleuchtung, 1980). Für 10 Proben sind darin Abweichungen zwischen dem Gerät nach Range (ältere Methode gemäß Veröffentlichungen Range 1972/73) und der vollständigen Vermessung der r-Tabellen im Lichttechnischen Institut Karlsruhe ausgeführt. Es ergibt sich das 95%-Vertrauensintervall der Vergleichbarkeit für die S1-Bestimmung mit etwa  $\pm 15\%$  und für Q0 mit  $\pm 25\%$  des Ergebnisswertes. In die berichteten Unsicherheiten gehen neben der Näherungslösung auch Fehler aus der Bestimmung ‚in situ‘ auf der Straße sowie aller damit verbundener Einflüsse (Messgeräte, Fremdlicht usw.) ein.

Die Publikation FGSV (2010) führt aus: (Zitat, S.9, Kapitel 5.2.2): „Anmerkung: Im Rahmen von Vergleichsmessungen hat sich gezeigt, dass bei der Bestimmung von  $q_{0, \text{Range}}$  eine Messunsicherheit bis zu  $\pm 0,015 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  angenommen werden muss.“

Dieser Wert beinhaltet primär Einflüsse aus der Probe und den Messaufbauten. Die Näherungsgüte für die Schätzung von Q0 durch  $q_{0, \text{Range}}$  kann für typische Straßenoberflächen mit 95%-Vertrauensintervall von etwa ebenfalls  $\pm 0,015 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  abgeschätzt werden (Schulze 2012). Die Unabhängigkeit

der Unsicherheiten aus Laborvergleich und Näherungslösung kann keinesfalls vorausgesetzt werden, eine einfache Addition schließt sich somit aus.

In der internationalen Literatur werden an einigen Stellen Vergleichs- und Wiederholmessungen von Straßenreflexionskennwerten berichtet. So stellt Ziegler (1981) einen Vergleich von Werten zweier Proben da, die auf dem im Rahmen seiner Arbeit an der Universität Karlsruhe errichteten Goniometeraufbau und am dänischen Lichtlaboratorium gemessen wurden. Eine Probe zeigte eine Abweichung  $\Delta Q_0=5\%$  und die andere Probe  $\Delta Q_0=34\%$ . Die Spiegelgrade S1 wichen um 15% und 41% ab.

Gibbons (1997) berichtet Angaben sowohl zur Wiederholbarkeit als auch Vergleichbarkeit. Eine der 20 in seiner Arbeit auf einem eigens dafür errichteten Goniometerversuchsstand gemessenen Proben wurde zur Bestimmung der praktischen Messunsicherheit im Sinne Wiederholbarkeit insgesamt fünfmal neu in die Messanlage eingelegt und gemessen. Die Positionierung wurde anhand der an der Bohrkernprobe markierten Rollrichtung so gleich wie möglich ausgeführt.

Die mittlere Standardabweichung der 5 Messwerte jeweils gleicher Beleuchtungs- und Beobachtungsgeometrie über alle Kombinationen aus  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  betrug etwa 4% des Messwertes. Daraus folgt, dass das mittlere 95%-Vertrauensintervall der Wiederholbarkeit ca.  $\pm 6,5\%$  des Messwertes betrug.

Darüber hinaus berichtet Gibbons (1997) die Gegenüberstellung der eigenen  $Q_0$ -Ergebnisse von 20 Proben mit den  $Q_0$ -Werten der identischen Proben, die einige Jahre zuvor in einem anderen Labor (University of Toronto) ermittelt wurden. Es zeigte sich eine mittlere Abweichung von ca.  $\Delta Q_0=0,03\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$  bei einer Spannweite  $0,015\dots 0,07\text{ cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$  über die Proben. Dies entspricht einer mittleren Unsicherheit für  $Q_0$  im Sinne Vergleichbarkeit von etwa 30-40%.

Ylinen u.a. (2010) berichten Wiederholungsmessungen von drei Proben. Die wiederholt an den selben Proben in einem Versuchsstand ermittelten  $Q_0$ -Werte weichen im Mittel um  $\Delta Q_0=0,02\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$  von einander ab, die Spannweite betrug  $0,01\dots 0,03\text{ cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$ . Die mittlere Wiederholungsunsicherheit für  $Q_0$ , welches auf der Bestimmung und Verrechnung von fast 400 einzelnen Leuchtdichtekoeffizienten beruht, betrug somit etwa 30%.

Zusammenfassend zeigt sich eine erhebliche Unsicherheit in der Bestimmung von Reflexionseigenschaften an Straßenoberflächen. Das Unsicherheitsniveau kann im zweistelligen Prozentbereich angesiedelt werden. Auf Basis der Literatur kann nicht nach jeweiligen Beiträgen aus Wiederholbarkeit, Vergleichbarkeit oder konkreten Merkmalen von Proben, Messaufbauten, Auswerte- und Näherungsverfahren usw. verallgemeinert werden.

## 2.5 Fazit zu Grundlagen

In der Literatur wird Reflexion von Straßenoberflächen am umfassendsten, jedoch nicht ausschließlich, unter dem Aspekt Leuchtdichtetechnik bei ortsfester Verkehrsbeleuchtung abgebildet. Binnenbezüge zwischen Kennwerten oder Bezüge zu anderen Kennwertebereichen können theoretisch für idealisiert reflektierende Oberflächen begründet werden. In der Literatur fehlen jedoch Messergebnisse mehrerer Kennwerte an realen Straßenoberflächen. Daher können die tatsächlichen Bezüge nicht befriedigend abgeschätzt werden.

Die absehbar notwendige Charakterisierungsanforderung für die Reflexion der Straßenoberfläche sind mittlere Reflexionswerte für Straßenteilflächen ab etwa  $1\text{m}^2$ , teilweise erst ab  $10\text{m}^2$ . Für diese Flächengrößen sind direkte Reflexionsmessungen für gerichtete Beleuchtungen ausgeschlossen. Es ist daher notwendig, kleinere Flächen messtechnisch zu beschreiben und die Ergebnisse zur Charakterisierung der benannten Flächengröße zusammenzusetzen. Da jedoch belastbare Erkenntnisse über notwendige Flächengrößen fehlen, kann der damit verbundene messtechnische Aufwand nicht gut abgeschätzt werden.

Die lichttechnischen und vor allem die geometrischen Vorgaben zur Ermittlung von Reflexionswerten für gerichtete Beleuchtung und Beobachtung führen für mobile Messkonzeptionen zu Messflächengrößen von wenigen  $\text{cm}^2$  je Einzelmessung. Schließlich werden in der Literatur erhebliche Unsicherheiten für die Messungen von Reflexionskennwerten an Straßenoberflächen belegt.

### 3 Labormessungen von Reflexionskennwerten an Straßenproben

#### 3.1 Einordnung

Die Untersuchungen sollten unter möglichst weitgehender Kontrolle der Messbedingungen erfolgen und fanden daher im lichttechnischen Labor statt. Die Kontrolle betrifft die lichttechnischen Bedingungen genauso wie den Zustand der verwendeten Oberflächen. Nur auf diese Weise können belastbare Aussagen zu den bislang auf Basis der Literatur nicht ausreichend abschätzbaren Aspekten der Reflexionsbeschreibung von Straßenoberflächen begründet werden.

Konkret dienten die Messungen zur Abschätzung notwendiger Flächengrößen für stabile Kennwerte und von Bezügen zwischen verschiedenen Reflexionskennwerten für identische Oberfläche sowohl innerhalb eines Charakterisierungsbereiches als auch zwischen den im vorhergehenden Kapitel umschriebenen Charakterisierungsbereichen. Die Ergebnisse bilden die Grundlage zur Auswahl notwendiger Kennwerte und dienen damit gemeinsam mit den bereits aufgeführten messtechnischen Randbedingungen der Begründung einer in situ-Messkonzeption.

#### 3.2 Probenkollektiv

Bei den lichttechnischen Labormessungen wurden 57 Proben von Straßenoberflächen berücksichtigt (Tabelle 2). Es handelt sich sowohl um Labor- als auch Bohrkernproben (BK).

Tabelle 2: Probenübersicht Labormessungen

Bauweise	Probenanzahl
Beschichtungen	7
Beton (Labor und BK)	5
Asphalte, Laborproben	26
Asphalte, BK-Proben	15
offenporiger Asphalt	1
Gussasphalt	3

Die Probenauswahl erfolgte in Abstimmung mit dem Betreuerkreis des Forschungsprojektes. Sie orientierte sich vor allem daran, hinsichtlich der Reflexion eine große Bandbreite in der Praxis vorzufindender Straßenoberflächen zu berücksichtigen. Es war explizit nicht beabsichtigt, eine repräsentative Auswahl im Sinne des Flächenanteils an Straßen in

Deutschland zu treffen. Eine vollständige Darstellung aller Proben befindet sich als Anhang am Ende des vorliegenden Berichtes.

#### 3.3 Vorgehen

##### 3.3.1 Übersicht der Messstände

Die lichttechnischen Reflexionsmessungen erfolgten an insgesamt vier Laborversuchsständen und in allen Fällen unter Nutzung von Beleuchtungen mit genähert Normlichtart A. Alle Messungen erfolgten im lichttechnischen Labor unter Ausschluss von Fremdlicht. Der erste Versuchsstand „Qd“ diente zur Messung von Leuchtdichtkoeffizienten unter diffuser Beleuchtung bei flachem Beobachtungswinkel (Qd). Der zweite Versuchsstand „p“ erlaubte die Messung dreier Reflexionsgrade bei diffuser Beleuchtung.

Der dritte Versuchsstand „q-Gonio“ diente zur Ermittlung von Leuchtdichtkoeffizienten q bei gerichteter Beleuchtung für den gesamten in r-Tabellen gemäß CIE/PIARC (1983) definierten Beleuchtungsbereich. Somit können auch sämtliche daraus abgeleiteten Kennwerte wie  $Q_0$ ,  $q_{0,Range}$  und Spiegelfaktor S1 definitionsgemäß ermittelt werden. Die Messungen erfolgten sowohl unter normgerechtem ( $\alpha=1^\circ$ ) als auch weiteren Beobachtungswinkeln ( $\alpha=3^\circ$ ,  $5^\circ$  und  $45^\circ$ ).

Der vierte Versuchsstand „q-Kfz“ diente der Messung von Leuchtdichtkoeffizienten (q) bei gerichteter Beleuchtung gemäß den Verhältnissen bei kraftfahrzeugeigener Beleuchtung. Er erlaubte sowohl die Ermittlung der q-Werte bei Rückreflexion q(RR) entsprechend der Fahrerperspektive als auch der Vorwärtsreflexion q(VR) aus Perspektive des Gegenverkehrs.

In keinem Versuchsstand erfolgte eine vollflächige Abbildung der an sich auch unterschiedlich großen Probenoberflächen. Die je Probe potentiell messbare Oberfläche variierte im Bereich von mindestens etwa  $150\text{cm}^2$  bis zu etwa  $1.000\text{cm}^2$ . Um die Übereinstimmung des in den jeweiligen Messständen von einer Probe abgebildeten Ausschnitts zu erreichen, wurde vor den Messungen je Probe eine für alle Versuchsstände gültige Beobachtungsrichtung festgelegt und anhand seitlicher Markierung gekennzeichnet. In dieser Beobachtungsrichtung erfolgten alle Messungen für ein relativ zur Längsausdehnung mittig auf der Probe angeordnetes

Messfeld, das je nach Messstand eine etwas variierende Größe aufwies. Diese Aspekte werden ausführlich in Kapitel 4.3 „Analysen zur Messfeldgröße“ erläutert.

### 3.3.2 Versuchsstand Qd

Mit Qd werden im Kontext der Straßenreflektion Leuchtdichtekoeffizienten bei diffuser Beleuchtung bezeichnet. Der Praxisbezug besteht zu Situationen mit Tageslichtbeleuchtung und Beobachtung der Straße aus Fahrersicht.

Leuchtdichtekoeffizienten bezeichnen Quotienten aus reflektierter Leuchtdichte in Beobachtungsrichtung und auf der Probe beziehungsweise Straße herrschender Beleuchtungsstärke. Zur Charakterisierung der Beleuchtungsstärke wird dabei die ebene horizontale Beleuchtungsstärke  $E_h$  verwendet. Im Versuchsstand Qd diente zur Messung ein Beleuchtungsstärkemesser LMT B 360 (Fa. LMT, Berlin) mit Fehlerklasse A.

Zur Erzielung einer genähert diffusen Beleuchtung der Proben wurde eine mit hellem, genähert diffus reflektierendem Anstrich versehene Halbkugel des Durchmessers  $d=1,5\text{m}$  mittig oberhalb der Probenposition angeordnet. Sie wurde von mehreren großflächigen und stark streuenden Lichtquellen beleuchtet, die sich alle unterhalb der Ebene der Probenoberfläche befanden und keinen Direktanteil zur Probenbeleuchtung lieferten.

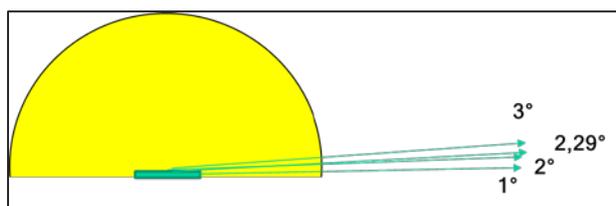


Abbildung 8: Versuchsstand Qd

An einer Seite der Halbkugel befand sich eine ovale Messöffnung für die Messung der Leuchtdichte. Leuchtdichtemessungen wurden je Probe bei vier verschiedenen Beobachtungswinkeln  $\alpha=1^\circ$ ;  $2^\circ$ ;  $2,29^\circ$ ;  $3^\circ$  vorgenommen. Die benannten Winkel ergeben sich zwischen Beobachtungsrichtung und Oberflächenebene der Probe. Zur Leuchtdichtemessung kam eine Leuchtdichtemesskamera LMK 98-3color (Fa. TechnoTeam Ilmenau) zum Einsatz. Die verschiedenen Beobachtungswinkel wurden nach einander bei ruhender Probe durch Veränderung der Lage der Leuchtdichtekamera realisiert.

Die Wiederholabweichung der einzelnen Positionen wurde über den Versuch mit maximal  $\pm 1\text{mm}$  bestimmt. Das entspricht einer Winkelunsicherheit im Beobachtungswinkel von etwa  $\alpha \pm 0,05^\circ$ .

Zur Überprüfung der Güte der genähert diffusen Beleuchtungsverteilung erfolgte eine halbräumliche Aufnahme der Leuchtdichteverteilung aus Probenposition mittels LMK 98-3color anhand Halbraumobjektiv (Öffnungswinkel  $180^\circ$ ). Wie in Abbildung 9 ersichtlich, konnte eine recht homogene Beleuchtungsverteilung im Versuchsstand genutzt werden.

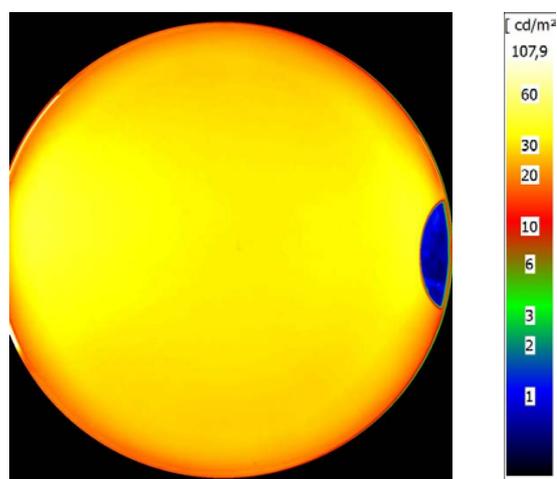


Abbildung 9: halbräumliche Leuchtdichteaufnahme der annähernd diffusen Beleuchtung in Versuchsstand Qd

Die Beleuchtung erfolgte anhand Halogenglühlampen (230V AC) an einer Spannungsversorgung mit etwa  $\pm 3\%$  zeitlicher Gesamtabweichung. Diese Spannungsschwankungen wirken sich direkt in entsprechenden Schwankungen der horizontalen Beleuchtungsstärke aus. Um die zum Moment der Messung am Probenort herrschende Beleuchtungsstärke mit Unsicherheit  $< 0,5\%$  für die Ermittlung der Leuchtdichtekoeffizienten belasten zu können, wurde daher bei jeder Messung zeitgleich die Momentanleistung der Beleuchtungseinrichtung aufgezeichnet. In Vorversuchen wurde die Beziehung zwischen horizontaler Beleuchtungsstärke am Probenort und Momentanleistung für einen großen Variationsbereich aufgenommen. Abbildung 8 belegt eine sehr hohe Näherungsgüte mit 99,7% erklärter Varianz.

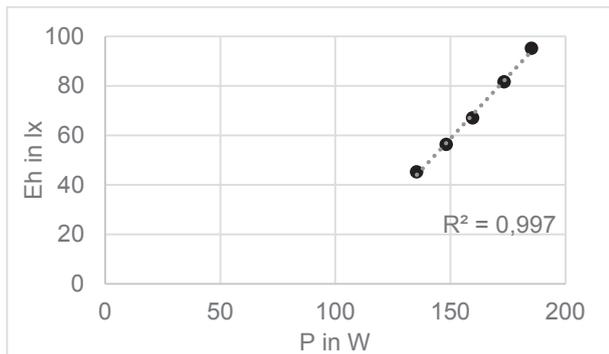


Abbildung 10: Bezug Beleuchtungsstärke am Probenort zu elektrischer Leistung der Beleuchtung in Versuchstand Qd

Die Wiederholabweichung des dargestellten Funktionsbezuges an zwei getrennten Tagen betrug  $<0,3\%$  des Beleuchtungsstärkemesswertes. Für Kalkulationen der Leuchtdichtekoeffizienten konnten somit neben den Leuchtdichtemessergebnissen auch über die Momentanleistung korrigierte Beleuchtungsstärkewerte mit ausreichend hoher Präzision genutzt werden.

### 3.3.3 Versuchstand p

Dieser Versuchstand diente der Bestimmung von Reflexionsgraden  $\rho(\text{dif})$  bei diffuser Beleuchtung und gerichteter Beobachtung. Sie dienen zur Charakterisierung der Straßenreflexion im Sinne einer Streulichtbewertung in Situationen bei Tageslicht und ortsfester Außenbeleuchtung. Bei Kenntnis dieser Reflexionsgrade lässt sich zudem der von einer Straßenoberfläche im sichtbaren Bereich absorbierte Strahlungsanteil in guter Näherung quantifizieren.

Die diffusen Reflexionsgrade wurden gemäß dem in DIN 5035-6 (Kap. 4.4.2) beschriebenen Verfahren mittels Leuchtdichtemessung ermittelt. Dabei kam eine mit annähernd diffus reflektierendem Innenanstrich versehene Kugel des Durchmessers  $d=0,5\text{m}$  zum Einsatz. Diese weist an der Unterseite eine größere Öffnung zur Beleuchtung der Probe auf, die ohne Abstand an dieser Öffnung positioniert wird (Abbildung 11). Über drei kleinere Öffnungen können Beobachtungen in den relativ zur Probenormalen bezeichneten Winkeln  $\alpha=0^\circ$ ,  $8^\circ$  sowie  $45^\circ$  vorgenommen werden. Diese Form der Reflexionsgradermittlung bedarf des Bezuges zu einem Reflexionsnormal. Im Versuchstand 2 kam ein diffus reflektierendes Normal mit einem Reflexionsgrad  $\rho=0,9$  (Fa. OptoPolymer, München) zum Einsatz.

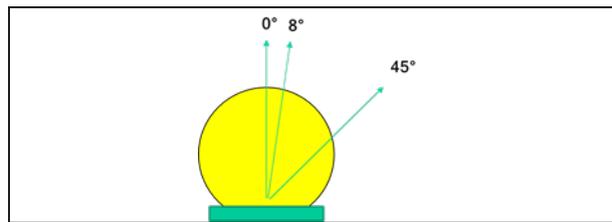


Abbildung 11: Versuchstand p

Die Lichtquelle ist sowohl gegenüber der Probenposition als auch gegenüber den drei Beobachtungszugängen abgeschirmt. Die Beleuchtung erfolgt anhand Halogenleuchte (12V DC) an sehr konstanter Spannungsversorgung mit einer zeitlichen Gesamtabweichung  $\Delta E < 0,2\%$  im Verlauf mehrerer Stunden. Die Wiederholabweichung der Beleuchtungsstärke an Probenposition an zwei getrennten Tagen betrug ebenfalls  $\Delta E < 0,2\%$  im Messwert.

Die Messung der Leuchtdichten erfolgte simultan unter den drei Beobachtungswinkeln anhand dreier zur Messung der Leuchtdichte herstellerekalibrierter Messgeräte. Es handelte sich um Leuchtdichtemesskamera LMK 98-3color, eine Leuchtdichtemesskamera LMK 98-3 (beide Fa. TechnoTeam, Ilmenau) sowie um ein Spektroradiometer specbos 1211 UV (Fa. JETI Technische Instrumente GmbH, Jena).

Es erfolgte eine gesonderte Bestimmung der systematischen Messwertabweichung der drei Leuchtdichtemessgeräte. Dazu wurde die Leuchtdichte des diffusen Reflexionsnormal an Probenposition simultan durch alle drei Geräte an jeweils drei Positionen gemessen. Durch Tausch der Geräte zwischen den Positionen wurden für jedes Gerät an jeder möglichen Position der entsprechende Leuchtdichtewert ermittelt. Aufgrund der vollständigen Variation von Gerät und Position konnten die Messwertabweichungen in einen Varianzanteil aufgrund der Beobachtungsrichtung und in einen beobachtungsrichtungsunabhängigen Geräteanteil aufgeteilt werden. Dieser Geräteanteil der Messwertvariation betrug  $2,7\%$  des mittleren Messwertes aller Geräte. Diese systematische rein gerätebedingte Abweichung der Leuchtdichtemessung wurde anhand von Messgerätefaktoren ausgeglichen, so dass die von allen Geräten an einer bestimmten Position bestimmte Leuchtdichte exakt dem Mittelwert der Messwerte der drei verwendeten Geräte entsprach. Dieser je Gerät korrigierte Wert wurde als Eingangswert bei der Reflexionsgradbestimmung der jeweiligen Betrachtungsrichtung verwendet, wodurch die Vergleichbarkeit der simultan anhand

verschiedener Geräte ermittelten Messwerte gesichert ist.

### 3.3.4 Versuchsstand q-Gonio

Dieser Versuchsstand dient der Ermittlung von Leuchtdichtekoeffizienten unter ortsfester Beleuchtung (r-Tabelle) und daraus abgeleiteten Kennwerten (Q0, S1).

Die Leuchtdichtemessung unter  $\alpha=1^\circ$  erfolgte mittels Leuchtdichtemesser LMT 1009 mit dem Messfeld der Blendenöffnung  $2' \times 20'$  (ca.  $6\text{cm}^2$  Messfläche). Zum Erreichen der anvisierten kummulierten Messflächengröße von mindestens  $100\text{cm}^2$  wurde für unterschiedliche Messflächen jeder Probe 17-mal die r-Tabelle (377 Beleuchtungsrichtungen) gemessen.

Mittels dreier bildgebender Leuchtdichtemesskameras (LMK 98-3color, LMK 98-3 und LMK 5-1, alle Fa. TechnoTeam, Ilmenau) wurden die Beobachtungswinkel  $\alpha=3^\circ$ ,  $\alpha=5^\circ$  und  $\alpha=45^\circ$  realisiert.

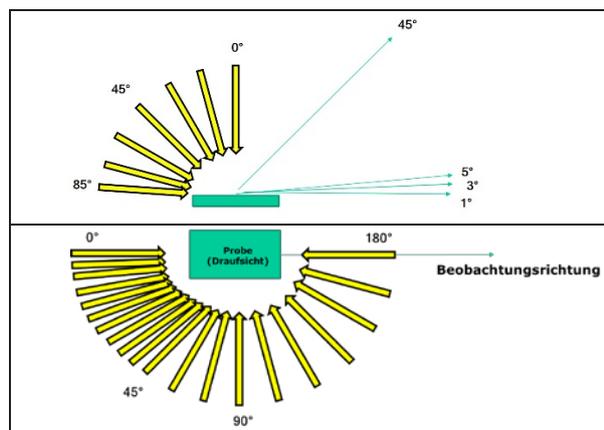


Abbildung 12: Versuchsstand q-Gonio, oben: Seitenansicht mit beispielhaften Beleuchtungswinkeln  $\gamma$  und Beobachtungswinkeln  $\alpha$  (grün); unten: Draufsicht mit allen Beleuchtungswinkeln  $\beta$

Die Beleuchtung erfolgte mittels Laborscheinwerfer mit Halogenlühlampe (12V DC) an stromkonstanter Spannungsversorgung. Die infolge der variierten Beleuchtungsrichtungen auftretende Verteilung der horizontalen ebenen Beleuchtungsstärke in Probenebene wurde als Bezugsverteilung für die Kalkulation der Leuchtdichtekoeffizienten durch Messung anhand Beleuchtungsstärkemesser (LMT B 360) ermittelt. Die Wiederholabweichung der Beleuchtungsstärkewerte über mehrstündige Messungen als auch an zwei getrennten Tagen betrug  $<0,5\%$  im Messwert.

Für die Messungen ist die gerichtete Beleuchtung aus insgesamt 377 verschiedenen Richtungen relativ zur Probe notwendig. Die Bezeichnung der Beleuchtungswinkel erfolgt relativ zur Betrachtungsrichtung zum einen Teil als Winkel  $\beta$ . Dieser Beleuchtungswinkel wird gemäß internationaler Vorgabe der r-Tabelle in 20 Schritten variiert. Je nach vorliegendem Winkel  $\beta$  erfolgt die Variation der Neigungsbeleuchtungswinkel  $\gamma$  bis zu  $\gamma=78,7^\circ$  im Bereich  $\beta=45^\circ \dots 180^\circ$  sowie bis zu noch flacherer Beleuchtung  $\gamma=85,2^\circ$  relativ zur Probenormalen im Bereich  $\beta=0^\circ \dots 15^\circ$ .

Zur Realisierung wurde eine Lichtquelle mit genähert paralleler Lichtausbreitung zum Messfeld und sehr geringem Streulichtanteil in Bereiche außerhalb der Probe verwendet. Anordnung und Größe der Beleuchtung erfüllen in Bezug zum realisierten Messfeld die Anforderungen der internationalen Literatur (CIE-30\_2 1990). Die Beleuchtungswinkelvariation erfolgte durch Drehung der Lichtquelle in zwei Ebenen anhand eines zweiachsigen Goniometers. Der Drehpunkt beider Achsen befindet sich in der Mitte des Messfeldes auf der Probenoberfläche. Das Goniometer erlaubt das Anfahren von Drehwinkeln mit einer Schrittweite  $0,1^\circ$ . Die Positionen werden praktisch identisch mit einer Wiederholabweichung erheblich kleiner als  $0,1^\circ$  angefahren. Im mehrwöchigen Messbetrieb konnten keine diesbezüglichen Abweichungen festgestellt werden.

### 3.3.5 Versuchsstand q-Kfz

Im vierten Versuchsstand wurden zur Charakterisierung der Straßenreflexion bei nächtlichen Situationen mit kraftfahrzeugeigener Beleuchtung Leuchtdichtekoeffizienten der Rückreflexion  $q(\text{RR})$  gemäß der Beobachtung aus Fahrerperspektive sowie für die Vorwärtsreflexion  $q(\text{VR})$ , entsprechend der Beobachtung durch den Gegenverkehr ermittelt.

Auch hier wird der Leuchtdichtekoeffizient als Quotient zwischen Leuchtdichte aus jeweiliger Beobachtungsrichtung und Beleuchtungsstärke definiert. In Übereinstimmung mit der Literatur wird die Beleuchtungsstärke hier jedoch nicht wie in den anderen Versuchsständen als ebene horizontale Beleuchtungsstärke auf der Probenoberfläche, sondern als vertikale Beleuchtungsstärke am Probenort, senkrecht orientiert zur Beleuchtungsrichtung angegeben.

Die Leuchtdichtekoeffizienten der Rück- und Vorwärtsreflexion wurden für alle Kombinationen von Scheinwerferhöhe  $h_s=0,65\text{m}$  und  $0,85\text{m}$  sowie Augpunkthöhen des Fahrers in den Varianten  $h_a=1,2\text{m}$ ,  $1,5\text{m}$  und  $2,25\text{m}$  für die Entfernungen  $20\text{m}$ ,  $35\text{m}$ ,  $50\text{m}$ ,  $65\text{m}$  und  $80\text{m}$  ermittelt. Aus geometrischen Gründen konnten die Leuchtdichtekoeffizienten der Rückreflexion  $q(\text{RR})$  in der Kombination  $h_s=0,85\text{m}$  und  $h_a=1,2\text{m}$  nicht ermittelt werden. Zusätzlich zur dargestellten Variation wurde jedoch der Leuchtdichtekoeffizient der Rückreflexion bei  $h_s=0,65\text{m}$ ,  $h_a=1,2\text{m}$  und Entfernung  $d=30\text{m}$  ermittelt, der in der Literatur als  $R_L$  bezeichnet wird und primär zur Charakterisierung der Nachreflexion von Markierungen Verwendung findet.

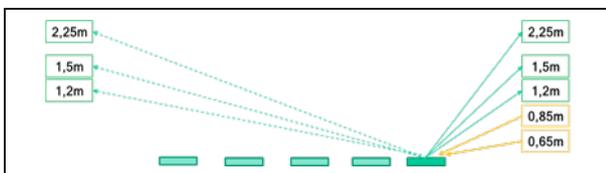


Abbildung 13: Versuchsstand q-Kfz (Seitenansicht, Angaben in Originalmaßstab, Messaufbau in Maßstab 1:10)

Der in Abbildung 13 skizzierte Versuchsstand realisierte die oben beschriebene geometrische Variation (Scheinwerfer- und Augpunkthöhe, Beobachtungsentfernung) im Maßstab 1:10. In Längsorientierung bestand kein seitlicher Versatz zwischen Scheinwerfer- und Beobachterposition ( $\beta=180^\circ$  beziehungsweise  $\beta=0^\circ$ ). Zur Leuchtdichtemessung an den beiden Beobachterpositionen „Fahrer“ und „Gegenverkehr“ wurde eine ortsauflösende Leuchtdichtemesskamera LMK 98-3color und LMK 98-3 (beide Fa. TechnoTeam, Ilmenau) verwendet.

Die Beleuchtung erfolgte anhand eines eng gebündelten Scheinwerfers, der einen Öffnungswinkel des Lichtkegels von etwa  $5^\circ$  aufwies mit Halogenglühlampe (24V DC, 150W) an stromkonstanter Spannungsversorgung. Sowohl die zeitliche Gesamtabweichung der Beleuchtung während mehrstündiger Messungen als auch ihre Wiederholabweichung an getrennten Tagen betrug  $\Delta E < 0,5\%$  im Messwert. Die Ermittlung der Beleuchtungsstärken erfolgte mittels Beleuchtungsstärkemesser LMT B 360 (Fa. LMT, Berlin).

Die Proben wurden auf einer den gesamten Entfernungsvariationsbereich abdeckenden optischen Bank gelagert und geführt bewegt. Die Unsicherheit der Probenpositionen über die gesamten Messungen wurde in Längsrichtung (Entfernung) mit  $\pm 2\text{mm}$

und in der Höhe  $\pm 1\text{mm}$  bestimmt. Die Beleuchtungs- und Beobachtungsgeometrie wurde über den Bezug zur Probe auf der optischen Bank anhand Laserentfernungsmesser mit geringem Gerätefehler eingestellt und geometrisch fixiert. Als Unsicherheit der variierenden Beobachtungshöhe über eine gesamte Messreihe wurde  $\pm 1\text{mm}$  bestimmt, so dass sich für die Beobachter- und Scheinwerferhöhe, ausgedrückt im Originalmaßstab, Gesamtunsicherheiten von  $\pm 2\text{cm}$  ergeben.

## 4 Ergebnisse der Labormessungen von Reflexionskennwerten an Straßenproben

### 4.1 Charakterisierung nach Bereichen/Kennwerten

#### 4.1.1 Laborergebnisse Qd

Die Messungen ergaben für jede Probe vier Qd-Werte entsprechend der vier Beobachtungswinkel. In Summe wurden 228 Werte ermittelt. Der Mittelwert aller Proben und Messungen betrug  $Q_d=0,093 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ . Die Spannweite der Einzelwerte (Min/Max) bewegte sich im Bereich  $Q_d=0,045 \dots 0,201 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ .

Die Gegenüberstellung nach Beobachtungswinkel ergab einen systematischen, aber geringen Einfluss des Beobachtungswinkels auf den Qd-Wert einer Probe. Im Mittel aller Proben nahm der Qd-Wert mit steigendem Beobachtungswinkel leicht ab (Abbildung 14). Dabei zeigten 60% von 57 Proben eine Variation  $<5\%$  des Wertes, 85% zeigten eine Variation  $<7,5\%$  des Wertes. Der Qd-Wert aller untersuchten Proben änderte sich im Bereich  $\alpha=1^\circ \dots 3^\circ$  um weniger als 10%.

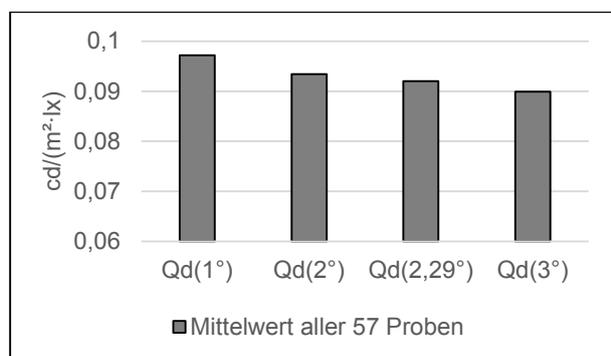


Abbildung 14: Mittelwert Leuchtdichtekoeffizient Qd nach Beobachtungswinkel

Entsprechend zeigte sich ein sehr hoher Zusammenhang des Qd-Wertes einer Probe unter wechselnden Beobachtungswinkeln. Die Korrelation betrug auch im ungünstigsten Fall des größten Winkelabstandes ( $\alpha=1^\circ$  auf  $3^\circ$ )  $r>0,99$  (Abbildung 15).

Zusammenfassend kann für die Charakterisierung der Straße unter diffuser Beleuchtung und flacher

gerichteter Beobachtung (Fahrerperspektive, Tagessituation) die Nutzung eines Beobachtungswinkels als völlig ausreichend belegt werden.

In Hinblick auf die Literaturlage, die perspektivische Verfügbarkeit potentieller Messgeräte und um einen direkten Bezug zur Tagessichtbarkeit von Markierungen herzustellen (Berechnung Markierungscontrast) wird hier der bereits in CIE-144 (2001) unterbreitete Vorschlag unterstützt, Qd bei  $\alpha=2,29^\circ$  zu nutzen. Allerdings kann bei Straßenoberflächen anders als bei der lichttechnischen Charakterisierung von Markierungen bei der Ermittlung eine erheblich größere Toleranz des Beobachtungswinkels gelten (Bereich  $\alpha=2^\circ \dots 3^\circ$ ).

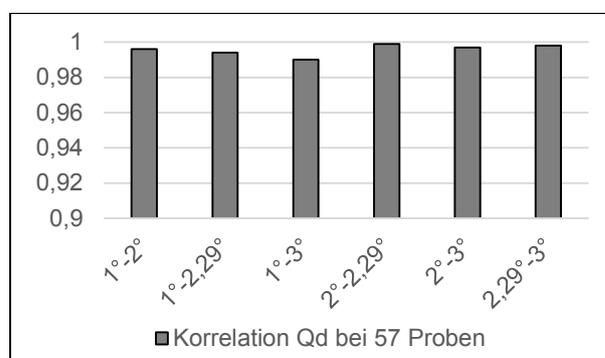


Abbildung 15: paarweise Korrelationen der Leuchtdichtekoeffizienten Qd verschiedener Beobachtungswinkel

#### 4.1.2 Laborergebnisse $\rho$

Je Probe wurde der Reflexionsgrad bei diffuser Beleuchtung und gerichteter Beobachtung für drei Beobachtungsrichtungen ermittelt. In Summe liegen somit 171 Werte vor. Der dabei über alle Proben und Messungen ermittelte Mittelwert beträgt  $\rho(d/\alpha)=0,14$ . Die Spannweite der Einzelwerte (Min/Max) bewegte sich zwischen  $\rho(d/\alpha)=0,03 \dots 0,45$ .

Auch bei den Reflexionsgraden zeigte sich im Mittel ein systematischer, aber geringer Einfluss des Beobachtungswinkels auf den Wert der Proben. Mit zunehmendem Beobachtungswinkel konnte eine leichte Zunahme des Reflexionsgrades ermittelt werden (Abbildung 16).

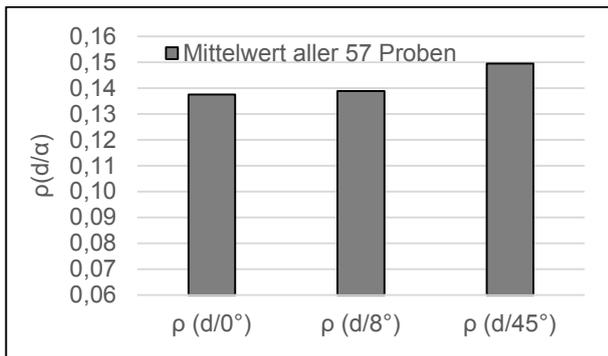


Abbildung 16: Mittelwert Reflexionsgrad bei gerichteter Beobachtung  $\rho(d/\alpha)$  nach Beobachtungswinkel

Die Hälfte der untersuchten Proben zeigte in Abhängigkeit des Beobachtungswinkels Variationen um weniger als 5% des  $\rho(d/\alpha)$ -Wertes. Bei vier von 57 untersuchten Proben änderte sich der  $\rho(d/\alpha)$ -Wert um mehr als 10% des jeweiligen Probenmittelwertes. Die höchste Absolutveränderung des Wertes einer Probe in Abhängigkeit des Beobachtungswinkels betrug  $\Delta\rho=0,02$ .

Weiterhin zeigten sich sehr hohe Zusammenhänge der  $\rho(d/\alpha)$ -Werte einer Probe. Die paarweisen Korrelationen der Probenwerte unter allen Beobachtungswinkeln betragen  $r>0,998$ . Es liegt somit praktisch eine Übereinstimmung der Probenreihung unter verschiedenen Beobachtungswinkeln vor. Diese Befunde stützen die Beschreibung der Straßenreflexion als näherungsweise diffus mittels Reflexionsgrad für den betrachteten Winkelbereich deutlich.

Somit kann auch für die Reflexion von Straßenoberflächen bezüglich Streulichtbewertung bei Tageslicht und ortsfester Außenbeleuchtung die Charakterisierung anhand eines  $\rho(d/\alpha)$ -Wertes als völlig ausreichend belegt werden. Unter Bezugnahme auf die deutsche Normungslage zur Reflexionscharakterisierung von Verkehrsoberflächen im Hinblick auf visuelle Barrierefreiheit wird als Vorschlag  $\rho(d/45^\circ)$  unterbreitet.

#### 4.1.3 Laborergebnisse q-Gonio

Zur Charakterisierung der Straßenreflexion unter ortsfester Verkehrsbeleuchtung wurden je Probe 377 q-Werte (r-Tabelle) für je vier Beobachtungswinkel erhoben, die jeweils für eine Messfläche von etwa 100cm<sup>2</sup> stehen. In Summe liegen damit rund 86.000 Leuchtdichtekoeffizienten vor. Zur Charakterisierung des mittleren Reflexionsniveaus wurde

aus der ermittelten Verteilung der Leuchtdichtekoeffizienten je Probe und Beobachtungswinkel der mittlere Leuchtdichtekoeffizient  $Q_0(\alpha)$  bestimmt.

Bezüglich der  $Q_0$ -Werte bei Beobachtung unter  $\alpha=1^\circ$  besteht ein umfangreicher Literatur- und Praxishintergrund. Daher werden diese Werte zur ersten Charakterisierung genutzt. Der Mittelwert aller 57 Proben betrug  $Q_0(1^\circ)=0,089$  cd/(m<sup>2</sup>·lx). Hier sei nochmals darauf hingewiesen, dass aufgrund der Auswahlkriterien des untersuchten Probenkollektives keine Repräsentativität bezogen auf den diesbezüglichen Erwartungswert für Straßen in Deutschland gegeben ist.

Die Spannweite der Probenwerte (Min/Max) bewegt sich im Bereich  $Q_0(1^\circ)=0,047\dots0,177$  cd/(m<sup>2</sup>·lx). Zur Beschreibung des Glanzbeitrages in der räumlichen Reflexionsverteilung wird in Literatur und Praxis der Spiegelgrad S1 verwendet. Die untersuchten Proben weisen einen Mittelwert  $S1(1^\circ)=0,850$  auf. Die Spannweite der Probenwerte beträgt  $S1(1^\circ)=0,069\dots5,254$ .

In Klassifizierung nach Standardreflexionsklassen bezüglich der Leuchtdichtetechnik in der Straßen- und Tunnelbeleuchtung (R-Klassen) sind Proben aller Klassen im Probenkollektiv enthalten (Abbildung 17). Mehr als die Hälfte der Proben wird der Klasse R1 zugeordnet.

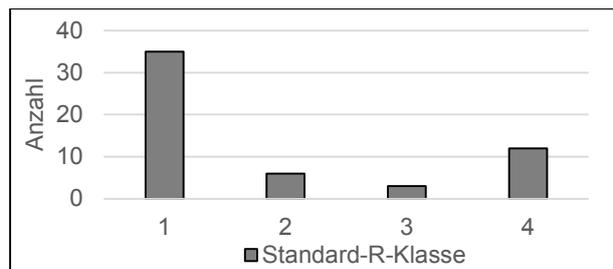


Abbildung 17: Standardreflexionsklassen der untersuchten Proben ( $\alpha=1^\circ$ )

In Anwendung der im „Arbeitspapier Reflexionseigenschaften von Gesteinskörnungen und Oberflächen aus Asphalt“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV 2010) publizierten Näherungslösung zur Ermittlung des  $Q_0(1^\circ)$ -Wertes mit der Bezeichnung „ $Q_0$ ,Range“ ergibt sich für die untersuchten Proben ein Mittelwert  $Q_0$ ,Range=0,086 cd/(m<sup>2</sup>·lx). Dieser weicht kaum vom oben berichteten Mittelwert  $Q_0(1^\circ)$  ab.

Auf Einzelprobenniveau zeigen sich jedoch erhebliche und nicht systematische Abweichungen zwischen dem gemäß internationaler Normungs- und Richtlinienlage bestimmten  $Q_0(1^\circ)$  und der aus identischen Messwerten berechneten Näherungslösung  $Q_0,Range$  (Abbildung 18).

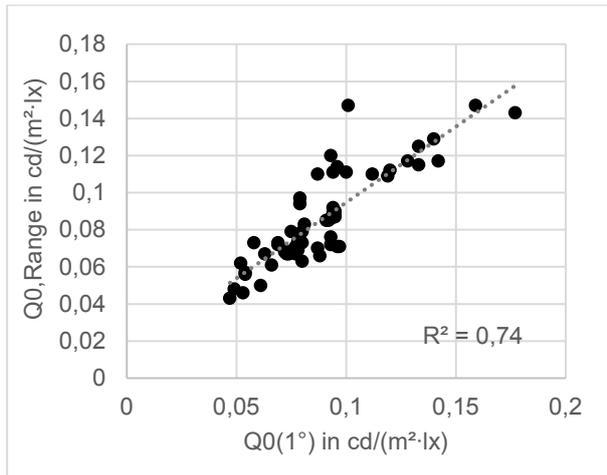


Abbildung 18: Bezug der Näherungslösung  $Q_0,Range$  zum damit genäherten Kennwert  $Q_0(1^\circ)$

Für 15% der untersuchten Proben (9 von 57) beträgt die Abweichung des genäherten Wertes vom zu nähernden Wert weniger als 5%. Für etwa die Hälfte der Proben beträgt diese Abweichung bis zu 10% des jeweiligen Probenwertes. Jede dritte Probe weist eine Abweichung des genäherten Wertes größer 15% auf und fast jede fünfte Probe (10 von 57) zeigt Abweichungen größer 20%. Die Absolutabweichung beträgt im Mittel aller Proben  $\Delta Q_0 = 0,011 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ , wobei fast die Hälfte der Proben Abweichungen im Absolutwert  $\Delta Q_0 > 0,010 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  aufweist.

Die damit für das hier vorliegende Probenkollektiv belegte Näherungsgüte der  $Q_0,Range$ -Werte ist schlechter als diejenige, die für Probenkollektive in der Literatur berichtet werden. Sie kann damit eher als obere Abschätzung der entsprechenden Abweichungen gelten.

Werden die für verschiedene Beobachtungswinkel ermittelten mittleren Leuchtdichtekoeffizienten  $Q_0(\alpha)$  gegenübergestellt, zeigt sich über alle Proben eine Abnahme der mittleren Reflexionsintensität mit steigendem Beobachtungswinkel (Abbildung 19).

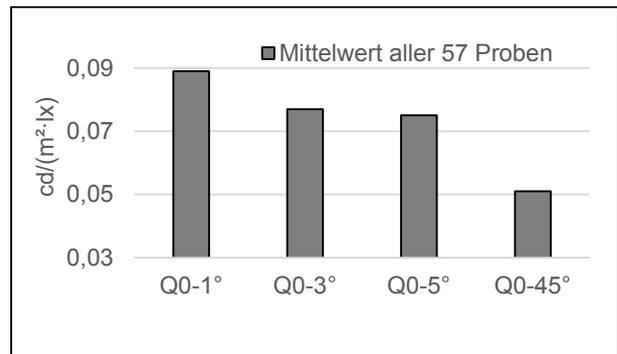


Abbildung 19: Mittelwert mittlerer Leuchtdichtekoeffizient  $Q_0$  bei verschiedenen Beobachtungswinkeln  $\alpha$

In noch höherem Maße hängt der Spiegelgrad  $S_1$  und damit die Glanzausprägung mit dem Beobachtungswinkel zusammen. Mit steigendem Beobachtungswinkel kommt es zu deutlich abnehmender Glanzwirkung in der Reflexion der untersuchten Proben (Abbildung 20).

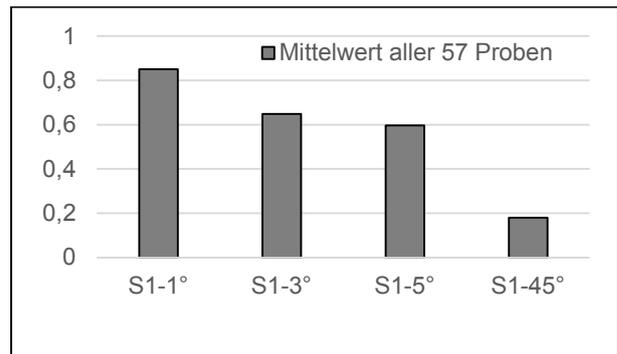


Abbildung 20: Mittelwert Spiegelgrad  $S_1$  bei verschiedenen Beobachtungswinkeln  $\alpha$

Die Abnahme der  $S_1$ -Werte zwischen  $\alpha = 1^\circ$  und  $\alpha = 3^\circ$  stellt sich primär als eine Niveaureduzierung dar, die die relativen Unterschiede zwischen Proben weitestgehend konsistent abbildet (Abbildung 21).

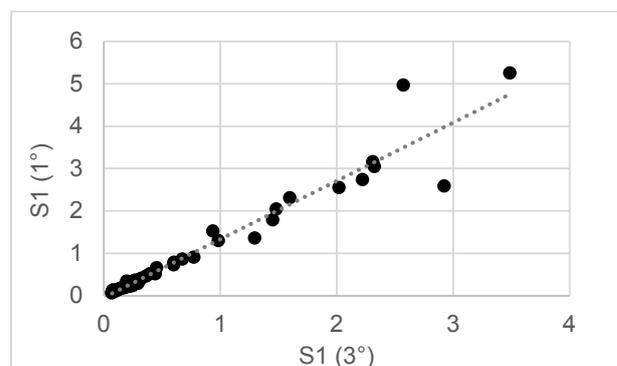


Abbildung 21: Gegenüberstellung Spiegelgrad  $S_1$  für  $\alpha = 3^\circ$  und  $\alpha = 1^\circ$  ( $N = 57$  Proben)

Die Proben mit bedeutsamen Abweichungen weisen alle Werte außerhalb des klassifizierungsrelevanten Bereiches auf. Es handelt sich ausnahmslos um R4-Proben. Eine Charakterisierung des Glanzverhaltens und die Einordnung in diesbezügliche Standard-Reflexions-Klassen anhand S1-3° anstatt S1-1° erscheint somit unter Berücksichtigung der Niveauanpassung möglich. Als diesbezügliche Näherung kann auf Basis der gezeigten Befunde Grenze(S1-3°)=0,75·Grenze(S1-1°) angesetzt werden.

Schließlich ist die Frage nach dem Zusammenhang der Q0-Ausprägung einer Probe bei verschiedenen Beobachtungswinkeln zu betrachten. Wie in Abbildung 22 ersichtlich, nimmt die mit dem Q0-Wert bei  $\alpha=3^\circ$  noch recht hohe Korrelation mit steigendem Beobachtungswinkel stetig und deutlich ab.

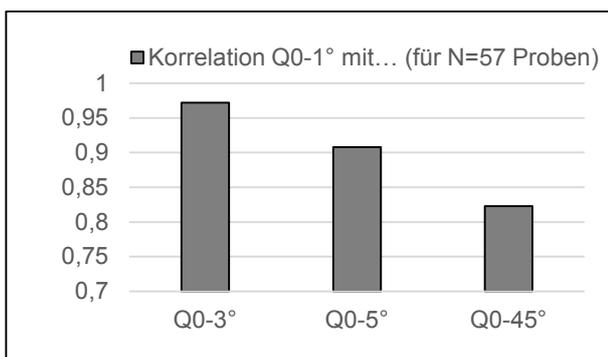


Abbildung 22: Korrelation des mittleren Leuchtdichtekoeffizienten Q0(1°) mit mittleren Leuchtdichtekoeffizienten Q0(α) bei anderen Beobachtungswinkeln α

Hieraus folgt, dass mit steigendem Beobachtungswinkel zunehmend andere Aspekte des Reflexionsverhaltens von Straßenoberflächen die Ausprägung des mittleren Leuchtdichtekoeffizienten bestimmen. Die stetig abnehmende Glanzausprägung (Abbildung 20) legt gemeinsam mit dem ebenfalls stetig fallenden Reflexionsniveau (Abbildung 19) nahe, dass mit steigendem Beobachtungswinkel zunehmend allein die eher streuenden Reflexionsanteile von Straßenoberflächen verbleiben oder dominieren, während bei geringeren Beobachtungswinkeln auch das gerichtete Reflexionsvermögen abgebildet wird.

#### 4.1.4 Laborergebnisse q-Kfz

##### 4.1.4.1 Leuchtdichtekoeffizienten q(RR)

Je Probe wurden 26 Leuchtdichtekoeffizienten bei Kfz-eigener Beleuchtung aus Fahrersicht q(RR) ermittelt. In Summe liegen somit 1.482 Werte vor. Der Mittelwert über alle untersuchten Proben und Messungen beträgt  $q(RR)=0,015 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ . Die Spannweite der Einzelwerte (Min/Max) bewegt sich im Bereich  $q(RR)=0,001 \dots 0,088 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ . Im Mittel aller Proben nimmt die Rückreflexion mit zunehmender Beobachtungsentfernung etwas ab (Abbildung 23).

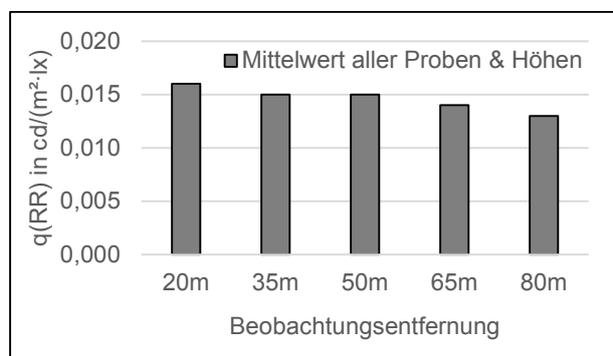


Abbildung 23: Mittelwert Leuchtdichtekoeffizient q(RR) nach Beobachtungsentfernung

Weiterhin zeigt sich im Mittel aller Proben ein systematischer Einfluss der Augpunkt- und Scheinwerferhöhe. Je größer die dadurch gebildete Differenz zwischen Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung ist, umso geringer fällt die resultierende Rückwärtsreflexion der Straßenoberfläche aus (Abbildung 24).

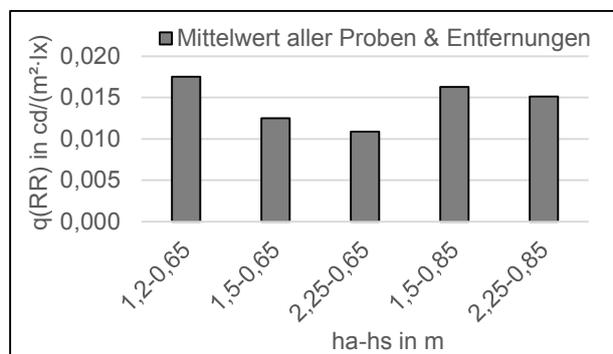


Abbildung 24: Mittelwert Leuchtdichtekoeffizient q(RR) nach Augpunkthöhe des Beobachters (ha) und Scheinwerferhöhe (hs)

Die aufgezeigten systematischen Zusammenhänge der Rückwärtsreflexion mit der Beleuchtungs- und

Beobachtungssituation des nächtlichen Kraftfahrzeugfahrers wirken sich bei nahezu allen Proben in ähnlicher Weise aus. Dies zeigt sich in den sehr hohen Zusammenhängen der  $q(RR)$ -Werte einer Probe. Die Korrelation eines  $q(RR)$ -Wertes einer Probe bei einer bestimmten Situation (Augpunkt- und Scheinwerferhöhe sowie Entfernung) mit dem  $q(RR)$ -Wert derselben Probe bei einer anderen Situation ist durchgängig sehr hoch. Sie beträgt bei nahezu allen Werten  $r > 0,9$  im bei Abblendlicht relevanten Bereich 20...50m und sinkt auf das Niveau von  $r \approx 0,8$ , wenn die Entfernungen  $d=65m$  und  $d=80m$  mitberücksichtigt werden.

Daher kann auch für den Bereich der Rückreflexion unter kfz-eigener Beleuchtung eine gute Charakterisierung und relative Rangreihung der Straßenoberflächen anhand eines Wertes bei einer bestimmten Kombination aus Augpunkt- und Scheinwerferhöhe sowie Entfernung erreicht werden. Um auch für diesen Bereich eine direkte Vergleichbarkeit zur Reflexion durch die Markierung herstellen zu können, bietet sich die Verwendung des dafür bereits etablierten Kennwertes  $R_L$  an ( $h_a=1,2m$ ,  $h_s=0,65m$ ,  $d=30m$ ). Die  $R_L$ -Werte der untersuchten Proben weisen ebenfalls eine sehr hohe Korrelation mit allen  $q(RR)$ -Werten im bezogen auf die Abblendlichtverteilung relevanten Abstandsbereich  $d=20...50m$  auf (Tabelle 3).

Tabelle 3: Korrelation zwischen  $R_L$  und  $q(RR)$

r mit $R_L$		Entfernung d		
		20m	35m	50m
ha-hs in m	1,2-0,65	0,991	0,987	0,963
	1,5-0,65	0,983	0,968	0,901
	2,25-0,65	0,989	0,946	0,936
	1,5-0,85	0,995	0,973	0,960
	2,25-0,85	0,995	0,974	0,930

Schließlich bestätigen die Messungen der Reflexion unter wechselnden Winkeln mit Kfz-Bezug, dass die typische Varianz der Reflexion erheblich geringer ist als die typische Varianz der durch Kfz-Scheinwerfer erzeugten Beleuchtungsintensität. Daraus folgt, dass es unter praktischen Gesichtspunkten eher unnötig ist, auf die geometrieabhängige Variabilität der Oberflächenreflexion abzustellen. Es genügt aus Sicht der Infrastruktur völlig, die globale materialabhängige Variabilität anhand eines Kennwertes zu charakterisieren.

#### 4.1.4.2 Leuchtdichtkoeffizienten $q(VR)$

Aus Sicht des Gegenverkehrs wurden je Probe 30 Leuchtdichtkoeffizienten bei Kfz-eigener Beleuchtung  $q(VR)$  ermittelt. In Summe liegen somit 1.710 Werte vor. Für diese beträgt der Mittelwert  $q(VR)=0,57 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ . Die Spannweite der Einzelwerte (Min/Max) bewegte sich zwischen  $q(VR)=0,002...5,79 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ .

In Gegenüberstellung zur Rückwärtsreflexion bewegen sich die für die Vorwärtsreflexion der untersuchten Proben ermittelten Werte in einer deutlich höheren absoluten Ausprägung. Der Faktor zwischen Rück- und Vorwärtsreflexion über alle Proben und Geometrien beträgt etwa 1:40. Dazu zeigt sich im Vergleich eine erheblich größere Varianz der  $q(VR)$ -Werte verglichen zur Rückwärtsreflexion (Kapitel 4.1.4.1). Dies zeigt sich auch im größeren systematischen Einfluss der Beobachtungsentfernung (Abbildung 25 im Vergleich zu Abbildung 23). Die Vorwärtsreflexion unter kfz-eigener Beleuchtung ist zu einem deutlich größeren Maße von der komplexen Beleuchtungs- und Beobachtungsgeometrie abhängig als die Rückreflexion.

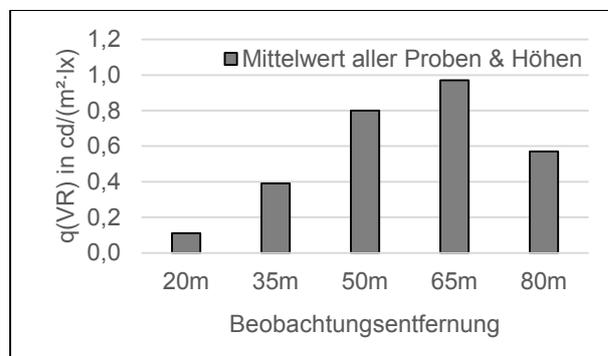


Abbildung 25: Mittelwert Leuchtdichtkoeffizient  $q(VR)$  nach Beobachtungsentfernung

Wird berücksichtigt, dass die Augpunkthöhe des Fahrers etwas oberhalb der Scheinwerferhöhe liegt, ergibt sich beim Abstand von 100m zwischen den beiden Fahrzeugen der Entfernungsbereich von etwa 65m (ausgehend vom Beobachter im Gegenverkehr) als Ort, an dem die geometrischen Bedingungen spiegelnder Reflexion erfüllt sind. Folgerichtig finden sich in diesem Bereich die höchsten Ausprägungen der  $q(VR)$ -Werte (Abbildung 25).

Auch die Kombination aus Augpunkthöhe des Fahrers im Gegenverkehr und der Scheinwerferhöhe des entgegenkommenden Fahrzeuges zeigt syste-

matische Variationen. Wie in Abbildung 26 ersichtlich, wirkt sich dabei die Augpunkthöhe des Beobachters wesentlich stärker aus als die Scheinwerferhöhe.



Abbildung 26: Mittelwert Leuchtdichtekoeffizient  $q(VR)$  nach Augpunkthöhe des Beobachters ( $ha$ ) und Scheinwerferhöhe ( $hs$ )

Bei Gegenüberstellung nach Unterschieden einzelner Proben zeigt sich jedoch auch bei der Vorwärtsreflexion, dass sich die in den Abbildungen oberhalb dargestellten Einflüsse bei der großen Mehrzahl untersuchter Oberflächen vergleichbar auswirken. Die relative Reihung der Proben auf dem Kontinuum „stark vorwärts reflektierend“ bis zu „schwach vorwärts reflektierend“ ist von den aufgezeigten systematischen Einflüssen nicht sehr stark beeinflusst.

Die Korrelation der  $q(VR)$ -Werte der Proben beträgt durchgängig  $r > 0,9$  im am stärksten interessierenden Entfernungsbereich  $d=35\dots65m$ . Bei 20m tritt eine wesentlich geringere Reflexion auf und bei 80m dürfte die Helligkeit des optisch sehr nahen Scheinwerfers dominieren. Somit kann eine gute Charakterisierung und relative Rangreihung der Straßenoberflächen bezüglich der Vorwärtsreflexion unter kfz-eigener Beleuchtung anhand nur eines Wertes bei einer bestimmten Kombination aus Augpunkt- und Scheinwerferhöhe sowie Entfernung erreicht werden. In Anlehnung an die der Blendungsbegrenzung von Kraftfahrzeugscheinwerfern hinterlegte Situation wird die Vorwärtsreflexion bei Entfernung  $d=50m$  und typischer Kfz-Geometrie  $ha=1,2m$  und  $hs=0,65m$  als Kennwert vorgeschlagen. Die  $q(VR)$ -Werte dieser Geometrie weisen für die untersuchten Proben eine sehr hohe Korrelation mit allen  $q(VR)$ -Werten im relevanten Abstandsreich  $d=35\dots65m$  auf (Tabelle 4).

Tabelle 4: Korrelation von  $q(VR-1,2-0,65-50m)$  mit anderen  $q(VR)$ -Werten

r mit $q(VR-1,2-0,65-50m)$		Entfernung d		
		35m	50m	65m
ha-hs in m	1,2-0,65	0,953	1	0,989
	1,5-0,65	0,922	0,997	0,981
	2,25-0,65	0,909	0,948	0,966
	1,2-0,85	0,984	0,988	0,967
	1,5-0,85	0,970	0,982	0,978
	2,25-0,85	0,941	0,950	0,969

## 4.2 Zusammenhänge zwischen Kennwertbereichen

Zunächst soll unter Bezugnahme auf die Verwendung in Literatur und Praxis der Zusammenhang zwischen Spiegelgrad und Vorwärtsreflexion untersucht werden. Hierbei zeigt sich, dass von den beiden Kennwerten ähnliche, aber deutlich nicht deckungsgleiche Informationen über das Reflexionsvermögen von Straßenoberflächen abgebildet werden (Abbildung 27).

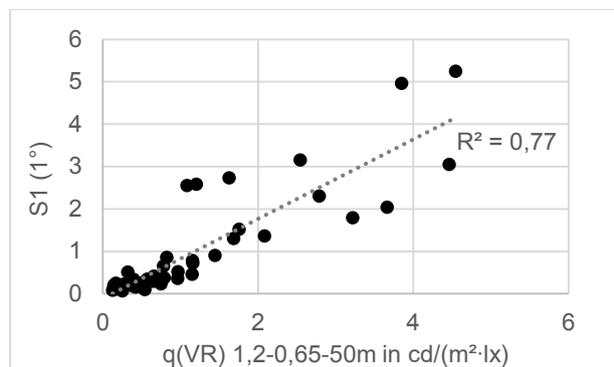


Abbildung 27: Gegenüberstellung Spiegelgrad  $S1$  und Vorwärtsreflexion  $q(VR)$

Die Glanzcharakterisierung unter gerichteter Beleuchtung mit Situationsbezug zur ortsfesten Verkehrsbeleuchtung ( $S1$ ) erfasst offensichtlich zu erheblichem Anteil andere Reflexionsaspekte der Straßenoberflächen als in der Vorwärtsreflexion bei kraftfahrzeugeigener Beleuchtung wirksam werden. In Hinblick auf die Begründung von Kennwerten und ein zugeordnetes Messkonzept ergibt sich daraus die Schlussfolgerung, dass wenn der Aspekt Vorwärtsreflexion bei kfz-eigener Beleuchtung charakterisiert werden soll, mit  $q(VR)$  auch ein dafür spezifischer Parameter verwendet werden muss und dieser Aspekt des Reflexionsverhaltens nicht gut durch den Glanzparameter  $S1$  ausgedrückt werden kann.

Im nächsten Schritt wird eine bereits im vorangehenden Kapitel aufgeworfenen Thematik aufgegriffen. Dort wurde ein zunehmend durch gestreute Reflexion dominiertes Reflexionsverhalten der Leuchtdichtekoeffizienten bei größeren Beobachtungswinkeln thematisiert. Hierzu kann durch Gegenüberstellung von diffusem Reflexionsgrad unter  $\alpha=45^\circ$  und mittlerem Leuchtdichtekoeffizienten  $Q_0$  ebenfalls bei  $\alpha=45^\circ$  weitere Erkenntnis gewonnen werden.

Wie in Abbildung 28 dargestellt, besteht zwischen diesen beiden Kennwerten praktisch Informationsdeckungsgleichheit.

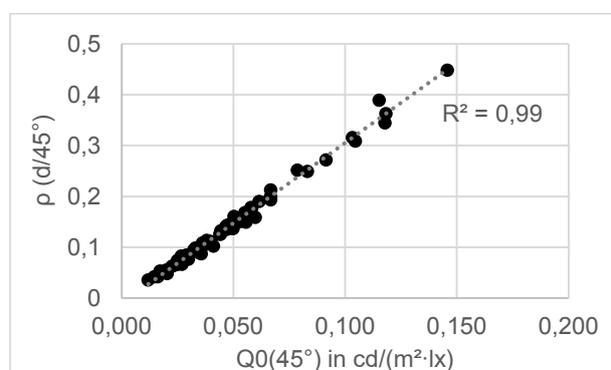


Abbildung 28: Gegenüberstellung mittlerer Leuchtdichtekoeffizient und diffuser Reflexionsgrad bei  $N=57$  Proben, beide für Beobachtungswinkel  $\alpha=45^\circ$

Die Analyse der Entwicklung des Zusammenhanges zwischen mittlerem Leuchtdichtekoeffizienten  $Q_0(\alpha)$  bei variierendem Beobachtungswinkel  $\alpha$  und diffusem Reflexionsgrad  $\rho(d/45)$  zeigt schließlich den stetigen Übergang (Abbildung 29). Hieraus folgt die Erkenntnis, dass bei Charakterisierung des Reflexionsverhaltens einer Straßenoberfläche anhand des diffusen Reflexionsgrades wie  $\rho(d/45)$  eine zusätzliche Charakterisierung anhand mittlerer Leuchtdichtekoeffizienten höherer Beobachtungswinkel keinen eigenständigen Informationsbeitrag liefert.

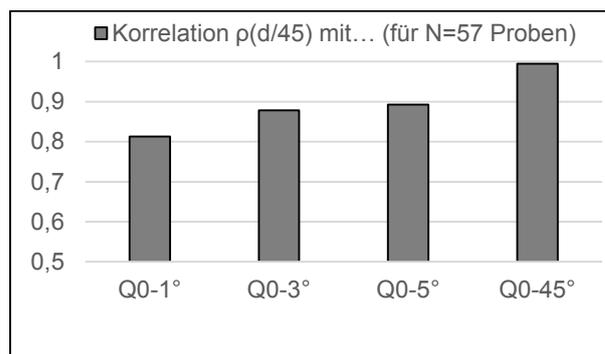


Abbildung 29: Korrelation der mittleren Leuchtdichtekoeffizienten  $Q_0(\alpha)$  mit dem diffusen Reflexionsgrad  $\rho(d/45)$

Weiterhin wird der Frage nach der wechselseitigen Informationsdeckung der anderen bislang identifizierten Kennwerte nachgegangen. In Tabelle 5 sind alle wechselseitigen Korrelationen aufgeführt. Es zeigt sich eine zweigeteilte Situation (Tabelle 5). Die Parameter  $Q_0(1^\circ)$ ,  $Q_d(2,29^\circ)$ ,  $\rho(d/45^\circ)$  und  $R_L$  hängen in unterschiedlichem Grad, aber alle positiv zusammen. Demgegenüber zeigt der Glanzgrad  $S_1$  geringere und durchweg negative Zusammenhänge mit allen anderen Kennwerten.

Tabelle 5: paarweise Korrelationen von Reflexionskennwerten für  $N=57$  Proben

r	$Q_d(2,29^\circ)$	$\rho(d/45^\circ)$	$R_L$	$S_1$
$Q_0(1^\circ)$	0,956	0,813	0,712	-0,206
$Q_d(2,29^\circ)$		0,863	0,791	-0,287
$\rho(d/45^\circ)$			0,893	-0,510
$R_L$				-0,544

Die höchste Korrelation mit  $r=0,96$  besteht zwischen mittlerem Leuchtdichtekoeffizienten  $Q_0(1^\circ)$  und dem Leuchtdichtekoeffizienten bei diffuser Beleuchtung  $Q_d(2,29^\circ)$ . Hier liefert der jeweils andere Parameter kaum zusätzliche Information zum Reflexionsverhalten einer Straßenoberfläche, wenn einer der beiden bekannt ist. Daher könnte in einer mobilen Messkonzeption auf die Charakterisierung anhand eines der beiden Kennwerte verzichtet werden (Abbildung 30).

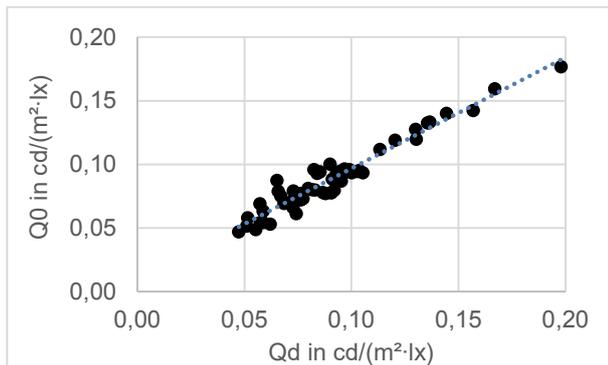


Abbildung 30: Gegenüberstellung mittlerer Leuchtdichtekoeffizient  $Q_d(\alpha=2,29^\circ)$  und  $Q_0(\alpha=1^\circ)$  bei  $N=57$  Proben

Aber bereits bei Gegenüberstellung des nächsthöchsten Zusammenhanges von  $r=0,89$  zwischen diffusem Reflexionsgrad  $\rho$  ( $d/45^\circ$ ) und Rückreflexion bei kfz-eigener Beleuchtung  $R_L$  wird deutlich, dass ein bedeutsamer Informationsgehalt über das Reflexionsverhalten der Straßenproben wechselseitig nicht abgedeckt ist. Dies zeigt sich beispielsweise in je nach Kennwert merklich unterschiedlichen Probenrangreihen (Abbildung 31).

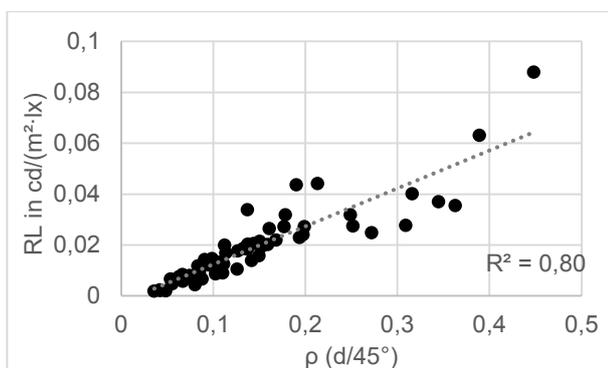


Abbildung 31: Gegenüberstellung diffuser Reflexionsgrad  $\rho$  ( $d/45^\circ$ ) und Rückreflexion  $R_L$

Im Fazit zeigt sich, dass die Charakterisierung aller vier Bereiche der Reflexion von Straßenoberflächen anhand eines Kennwertes nicht angemessen ist. Bezüglich jedes der bislang diskutierten Bereiche zeigen die untersuchten Straßenproben jeweils gewisse spezifische Reflexionsaspekte, die nur anhand darauf abzielender Charakterisierung durch jeweilige Kennwerte ausgedrückt werden können. Eine Reduzierung auf 3 Kennwerte ist gut möglich, wenn die relativ geringen wechselseitigen Informationszusätze von  $Q_0$  und  $Q_d$  vernachlässigt werden.

### 4.3 Analysen zur Messfeldgröße

Zur Überprüfung des Einflusses variierender Messfeldgröße auf die im Rahmen des Projektes erhobenen Probenkennwerte wurden entsprechende Analysen für alle vier Versuchsstände vorgenommen.

Die im vorhergehenden Kapitel 4.1 berichteten Erkenntnisse basieren alle auf den nachfolgend als maximal berichteten Messflächen.

Für alle 57 Oberflächenproben wurden  $Q_d$ -Werte mit variierender Messflächengröße im Bereich  $A=7,7\dots77\text{cm}^2$  in 10 Schritten ermittelt. Anschließend wurde der Mittelwert mit steigender Flächengröße errechnet. Für jeden Zuwachs an Messfläche wurde die prozentuale Abweichung des dann auf Basis größerer Messfläche ermittelten Wertes gegenüber dem vorangegangenen Wert, basierend auf geringerer Messfläche, berechnet.

Erwartungsgemäß kommt es mit steigender Flächengröße zu abnehmenden relativen Veränderungen des ermittelten Messwertes. Die nachfolgende Abbildung 32 zeigt das aufgrund der Standardabweichung der beschriebenen Veränderungen für 57 Proben berechnete 95%-Vertrauensintervall für die messfeldvergrößerungsbasierte Messwertänderung.

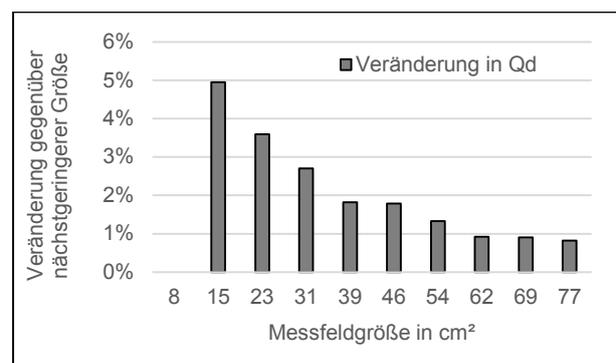


Abbildung 32: 95%-Vertrauensintervall der messfeldvergrößerungsbasierten Messwertänderung für  $Q_d$ ,  $\alpha=2,29^\circ$  an  $N=57$  Proben.

In vergleichbarer Weise wurde für die Ermittlung des diffusen Reflexionsgrades unter Beobachtung  $\alpha=45^\circ$  ( $\rho_{d/45}$ ) verfahren. Da hier für alle Proben Messflächen bis  $150\text{cm}^2$  abgebildet werden konnten, erfolgte die Variation entsprechend zwischen  $A=5\text{cm}^2\dots150\text{cm}^2$ .

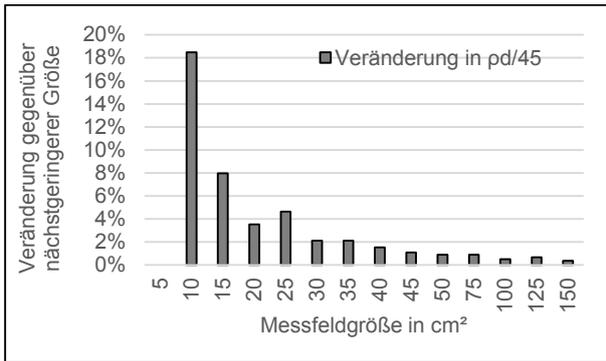


Abbildung 33: 95%-Vertrauensintervall der messfeldvergrößerungsbasierten Messwertänderung für  $\rho_{d/45}$  an N=57 Proben.

Schließlich wurde eine analoge Untersuchung für den Leuchtdichtekoeffizienten in Rückwärtsreflexion unter kfz-eigener Beleuchtung  $R_L$  mit Beobachterhöhe 1,2m, Beobachtungsentfernung 30m und Beleuchtungshöhe 0,65m angestellt. Aufgrund des Messaufbaus war eine Variation der Messfeldgröße bis 85cm<sup>2</sup> möglich.

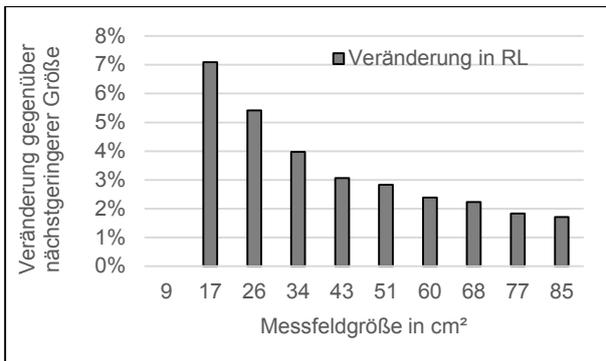


Abbildung 34: 95%-Vertrauensintervall der messfeldvergrößerungsbasierten Messwertänderung für  $R_L$  an N=57 Proben.

Die oberhalb berichteten Analysen sind aufgrund bildauflösender Leuchtdichtemessung basierend auf einmaligen Aufnahmen als reine Auswertung in der Software möglich. Der Messstand zur Ermittlung von Leuchtdichtekoeffizienten unter ortsfester Beleuchtung folgt in der Gestaltung der Messfeldgröße den entsprechenden Angaben aus der internationalen und nationalen Literatur und bildet dadurch je Messvorgang etwa ein Messfeld von 6cm<sup>2</sup> auf die Probe ab.

Um hierfür den Einfluss variierender Messfeldgröße untersuchen zu können, mussten je 6cm<sup>2</sup>-Schritt vollständige Erhebungen gesamter r-Tabellen erfolgen. Dies stellt ein Vorgehen mit hohem Zeitbedarf

dar. Für jede Probe wurden 17 Messungen mit jeweils relativer Lageänderung der Probe zum Messfeld des Leuchtdichtemessers realisiert. Das entspricht einem abgebildeten Messflächenumfang  $A=6...102\text{cm}^2$ .

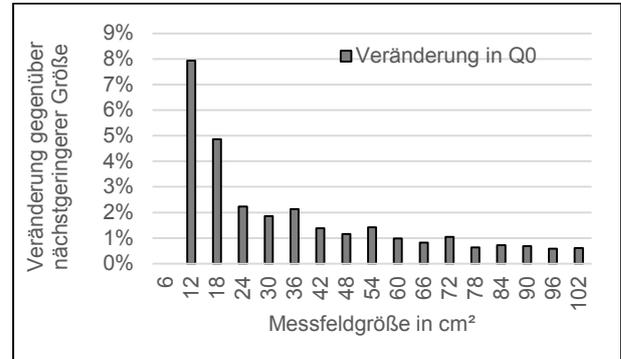


Abbildung 35: 95%-Vertrauensintervall der messfeldvergrößerungsbasierten Messwertänderung für  $Q_0$  ( $\alpha=1^\circ$ ) an N=57 Proben.

$Q_0$  basiert auf der Verrechnung aller 396 einzelnen Leuchtdichtekoeffizienten der verschiedenen Beleuchtungsrichtungen nahezu im gesamten Halbraum oberhalb der Probe. Hierfür unterschreitet das 95%-Vertrauensintervall dauerhaft 1% etwa ab 60cm<sup>2</sup> charakterisierter Fläche (Abbildung 35).

$S_1$  unterliegt als Quotient aus zwei einzelnen, jeweils bei gerichteter Beleuchtung und Beobachtung erhobener Leuchtdichtekoeffizienten deutlich größeren Schwankungen über die Probenoberfläche. Hierfür erreicht die Unsicherheit 5% etwa ab 85cm<sup>2</sup> und verbleibt in etwa bei dieser Größenordnung (Abbildung 36).

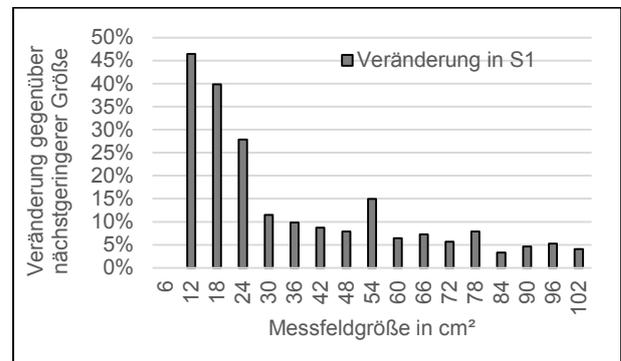


Abbildung 36: 95%-Vertrauensintervall der messfeldvergrößerungsbasierten Messwertänderung für  $S_1$  ( $\alpha=1^\circ$ ) an N=57 Proben.

Die näherungsweise Kalkulation von  $Q_0$  als  $q_{0,Range}$  nutzt ebenfalls zwei einzelne, jeweils bei gerichteter

Beleuchtung und Beobachtung erhobene Leuchtdichtekoeffizienten. Entsprechend zeigt sich auch hier eine größere Varianz über die Probenoberfläche (Abbildung 37).

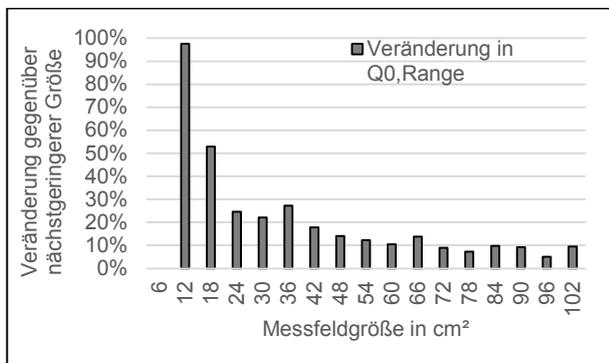


Abbildung 37: 95%-Vertrauensintervall der messfeldvergrößerungsbasierten Messwertänderung für  $Q_{0,Range}(\alpha=1^\circ)$  an N=57 Proben.

Da je Messung die Leuchtdichtekoeffizienten der gesamten r-Tabelle erhoben wurden, kann die relative Veränderung jedes einzelnen Leuchtdichtekoeffizienten mit steigender Messfeldgröße untersucht werden. Daraus ergibt sich je Flächengrößenschritt eine Veränderungsverteilung der 377 Werte, für die je Schritt eine Standardabweichung und darauf basierend ein 95%-Vertrauensintervall kalkuliert werden kann. Dieses charakterisiert die Unsicherheit, die im Mittel je Leuchtdichtekoeffizienten und Probe angesetzt werden muss. Aus diesen Werten wiederum ergibt sich über alle 57 Proben eine Verteilung dieser Unsicherheit, für die ein mittlerer Wert angegeben werden kann. Diese Verteilung schließlich bildet die Grundlage der in Abbildung 38 dargestellten messfeldgrößenabhängigen Vertrauensintervalle für die Bestimmung einzelner Leuchtdichtekoeffizienten für gerichtete Beleuchtung und Beobachtung unter  $\alpha=1^\circ$ .

Über alle einzelnen q-Werte und Proben ist ab etwa 60cm<sup>2</sup> mit mittleren Unsicherheiten um 5% zu rechnen, bei 100cm<sup>2</sup> geht dieser Wert geringfügig auf etwa 4% zurück. Der in Kapitel 2.1.2 unter Bezug auf DIN EN 13201-4 identifizierte Toleranzwert der Reflexionsdaten der Straßenoberfläche von  $\pm 5\%$  für den Fall individueller Messung kann für die Abbildung von etwa 100cm<sup>2</sup> Straße als r-Tabelle für gültig bestätigt werden. Für die darauf fußende Bestimmung von Q<sub>0</sub> kann eine erheblich geringere Toleranz von 1% gelten.

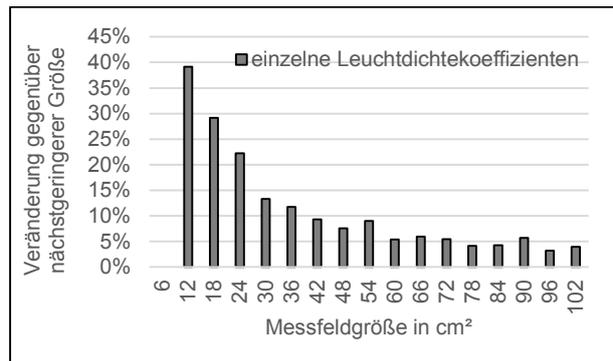


Abbildung 38: 95%-Vertrauensintervall der messfeldvergrößerungsbasierten Messwertänderung, gemittelt über alle einzelnen Leuchtdichtekoeffizienten an N=57 Proben.

Die Leuchtdichtekoeffizienten im Bereich  $\beta \leq 2^\circ$  (Spiegelung im Gegenlicht) sind maßgeblich für die Unterscheidung in Standardreflexionsklassen. Wird hierfür die messfeldvergrößerungsbasierte Messwertänderung gesondert betrachtet, zeigt sich eine größere diesbezügliche Schwankung ausgedrückt als 95%-Vertrauensintervall mit etwa 10% im Bereich  $A \approx 60\text{cm}^2$ . Über alle Proben betrachtet geht dieser Wert für  $A \approx 100\text{cm}^2$  auf etwa 6% zurück.

Diesbezüglich zeigt sich ein bedeutsamer Einfluss der Reflexionsform der Oberfläche. Bei Proben mit geringerer Glanzprägung (Standardreflexionsklasse R1,  $S1 < 0,4$ ) werden für die Leuchtdichtekoeffizienten im Gegenlichtbereich bei  $A \approx 100\text{cm}^2$  Messwertunsicherheiten von 5% erreicht, während die stärker spiegelnden Proben im Mittel 7,5% aufweisen.

Im Zwischenfazit zeigt sich ein deutliches Bild zum Einfluss der Messfeldgröße auf die ermittelten Kennwerte. Unter diffuser Beleuchtung zeigen sich sowohl für Q<sub>d</sub> als auch  $p_{d/45}$  ab Flächengrößen von etwa 50 bis 60cm<sup>2</sup> Kennwertschwankungen von 1% oder weniger. Für die gerichtete Beleuchtung und Beobachtung unter Kfz-Geometrie scheinen größere Messflächen notwendig. Hier wird für die im Messstand erreichbare Messflächengröße von 85cm<sup>2</sup> eine Unsicherheit von etwa 2% ermittelt.

Unter dem Aspekt ortsfester Beleuchtung zeigt sich eine befriedigende Stabilität des ermittelten Q<sub>0</sub>-Wertes ab etwa 60cm<sup>2</sup>. Der S1-Wert unterliegt einer größeren Schwankung (5% auch bei 100cm<sup>2</sup>), wobei sich offensichtlich einzelne besonders stark gerichtet reflektierende Stellen auf den Proben merklich auswirken.

## 5 Labor- und Feldmessungen bezüglich der in situ-Messkonzeption

### 5.1 Diskussion potentieller Kennwerte für in situ-Messungen

Die im Projekt durch Literaturrecherche und Laboruntersuchungen begründete Zusammenstellung von Kennwerten zur umfassenden Charakterisierung der Reflexion von Straßen unter den identifizierten Anwendungshintergründen wird in Tabelle 6 dargestellt. Diese Reflexionskennwerte können im lichttechnischen Labor potentiell an Straßenproben bestimmt werden, die eine messbare Oberfläche von mindestens 100cm<sup>2</sup> aufweisen. Dies ist beispielsweise für Bohrkernproben des Durchmessers 15cm gegeben.

Tabelle 6: Reflexionskennwerte zur Charakterisierung von Straßen

Reflexionskennwert(e)	Flächengröße für belastbaren Probenwert bei angegebener Unsicherheit	Anwendungsfall
r-Tabelle	≥100cm <sup>2</sup> (±5%)	Leuchtdichtebe-messung bei ortsfester Beleuchtung und Tageslicht (Nutzersicht)
Q0 (aus r-Tabelle)	≥30cm <sup>2</sup> (±2%) ≥60cm <sup>2</sup> (±1%)	Leuchtdichtebe-messung bei ortsfester Beleuchtung
S1	≥100cm <sup>2</sup> (±5%)	
Qd	≥30cm <sup>2</sup> (±3%) ≥60cm <sup>2</sup> (±1%)	Leuchtdichtebe-messung bei ortsfester Beleuchtung und Tageslicht (Nutzersicht)
R <sub>L</sub>	≥50cm <sup>2</sup> (±3%) ≥80cm <sup>2</sup> (±2%)	Kraftfahrzeugeigene Beleuchtung
ρ (ρ <sub>d/45</sub> )	≥25cm <sup>2</sup> (±5%) ≥50cm <sup>2</sup> (±1%)	Barrierefreiheit, Himmelsaufhellung, Tageslicht (Substanzsicht)

Ideal wäre es, alle Kennwerte mobil erheben zu können. Werden jedoch die bereits identifizierten messtechnischen, lichttechnischen und geometrischen Randbedingungen berücksichtigt, ergeben sich Einschränkungen. Diese Einschränkungen betreffen primär die Reflexionsbeschreibung bezüglich des Anwendungsfalles Leuchtdichtebe-messung bei ortsfester Verkehrsbeleuchtung.

Um Q0 und S1 gemäß entsprechender Definition in der internationalen Literatur bestimmen zu können,

müssen belastbare gerichtete Leuchtdichtekoeffizienten unter  $\alpha=1^\circ$  vorliegen. Dabei sind, mit nach den vorliegenden Erkenntnissen ähnlicher Unsicherheit, für Q0 je Messpunkt 377 Leuchtdichtekoeffizienten der r-Tabelle für Flächengrößen von etwa 20cm<sup>2</sup> und die beiden Leuchtdichtekoeffizienten von S1 für mindestens 100cm<sup>2</sup> zu erheben.

Sollen die in der lichttechnischen Literatur benannten Anforderungen an die Beleuchtung sowie Beobachtung berücksichtigt werden und ein mobiler Messaufbau die Dimensionen eines typischen PKW-Kofferraums nicht überschreiten, ergeben sich Messfeldgrößen je Einzelmessung von etwa 1 bis 2 cm<sup>2</sup>. Daraus folgt, dass je Beleuchtungsrichtung der r-Tabelle, insofern diese mobil überhaupt technisch realisiert werden können, 10 bis 20, sowie für die beiden Beleuchtungsrichtungen für S1 weitere 40 bis 80 Einzelmessungen erfolgen müssten.

Während für Q0 mittels Qd ein akzeptabler Ersatz in Aussicht steht, der zudem an ausreichenden Messflächen in einer Messung erhoben werden kann, verbleibt für die Charakterisierung durch den S1-Wert keine Alternative. Die in situ-Bestimmung von S1 für eine Stelle einer Straße durch rund einhundert Messungen ist unter praktischen Erwägungen nicht funktionell. Dies führt beim bislang vorliegenden Erkenntnisstand zwangsläufig zu einer durch in situ-Messungen unvollständigen Charakterisierung der Straßenreflexion vor dem Hintergrund der Leuchtdichtedimensionierung bei ortsfester Verkehrsbeleuchtung.

Insofern ist auch die diesbezügliche Aussage in CIE 144 (2001), dass akzeptable Messungen von S1 in situ mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden sind und keine direkt oder indirekt dafür nutzbaren kommerziellen mobilen Geräte zur Verfügung stehen, eher zu stützen als zu mildern.

Für die anderen Anwendungsbezüge stellt sich die Situation deutlich günstiger dar. Für die Reflexionskennwerte Qd und R<sub>L</sub> stehen aus dem Bereich Markierungsmessung kommerzielle Messgeräte zur Verfügung. Die Eignung für den Anwendungsfall Straßenreflexion müsste jedoch untersucht werden. Für die Bestimmung des Reflexionsgrades gibt es keine kommerziellen mobilen Geräte, das lichttechnische Prinzip wird für Laborumgebungen jedoch vielfach umgesetzt, so dass eine Adaption für mobile Messungen mit endlichem Aufwand in Aussicht

steht. Zusammengefasst stehen gut standardisierbare oder standardisierte Aufbauten für die Untersuchungen zur in situ-Charakterisierung der Straßenreflexion unter den Anwendungsfällen:

- Leuchtdichtebemessung bei ortsfester Beleuchtung (partiell),
- Kraftfahrzeugeigene Beleuchtung,
- Tageslicht (Nutzer- und Substanzsicht),
- Barrierefreiheit und
- Himmelsaufhellung

zur Verfügung, beziehungsweise lassen sich mit verfügbaren Mitteln erstellen.

## 5.2 Zielstellungen und Überblick der Messungen zur in situ-Messkonzeption

Es schließen sich Feldmessungen an, die Flächenverteilungen der in situ messbaren Kennwerte untersuchen. Auf Basis dieser Erhebungen entstehen Erkenntnisse dazu, wie viele Messungen mobil erfolgen müssen, beziehungsweise wie viele Bohrkerngegebenenfalls entnommen werden müssen. Darüber hinaus sind Fragen des Bewertungshintergrundes indirekt betroffen. Diesbezüglich sind Anhaltspunkte zu erheben, welche Toleranzen und Bewertungsunsicherheiten aufgrund typischer flächiger Inhomogenitäten berücksichtigt werden sollten.

Vor dem Hintergrund der Zielgrößen für alle Anwendungsfälle wurden in Kapitel 2.1 Teilflächen von  $1\text{m}^2$  als kleinste relevante Straßenfläche identifiziert, für die die mittlere Reflexion charakterisiert werden soll. Ebenfalls wurde bereits diskutiert, dass aus Gründen der Praktikabilität sowohl in situ als auch im Labor nur Ausschnitte davon bezüglich der Reflexion charakterisiert werden können. Zwischen der für akzeptabel belastbare Messwerte notwendigen Flächengröße von in der Größenordnung  $100\text{cm}^2$  (Kapitel 4.3) und  $1\text{m}^2$  steht der Faktor 1:100.

Insofern steht die Frage, wie stabil  $1\text{m}^2$  anschaulich homogener Straßenoberfläche anhand welches Kennwertes bei welcher Messflächensumme charakterisiert werden kann. Dies ermöglicht die Beantwortung der Frage, wie groß die durch Messung abgebildete Teilfläche sein sollte, um den Flächenmittelwert von  $1\text{m}^2$  Straße zu beschreiben.

Wiederum mit einem Faktor 1:100 ist die Beziehung zur nächstgrößeren relevanten Flächengröße verbunden. Mittelwerte von Bewertungsfeldern beispielsweise für die Anwendungsfälle Leuchtdichteniveau bei ortsfester Beleuchtung oder bei Tageslicht beschreiben Flächen der Größenordnung von etwa  $100\text{m}^2$ .

Neben der Reflexionsverteilung der Kennwerte über unterschiedliche Flächengrößen ist aus mehreren Gründen die Beziehung zwischen der praktischen Helligkeitsverteilung (Leuchtdichteverteilung) aus exemplarischen Nutzersichten, der Beleuchtungsverteilung und der Reflexionsverteilung relevant. Dadurch können Anhaltspunkte dazu abgeleitet werden, mit welcher Güte Reflexionswerte indirekt abgeschätzt werden können.

Außerdem kann dadurch abgeschätzt werden, in welchem Maße relevante Zielgrößen in Abhängigkeit der Variabilität der Reflexion innerhalb einer Betrachtungsfläche schwanken. Dies wiederum ist ein weiterer zentraler Anhaltspunkt für die Einschätzung, mit welchem räumlichen Auflösungsgrad die Reflexion von Straßen zweckmäßigerweise beschrieben werden sollte. Für diese Zielstellungen wurden drei typischen Beleuchtungssituationen identifiziert. Es sind dies die Straßenbeleuchtung, die Tunnelbeleuchtung und die Situation bei Tageslicht.

## 5.3 Aufbauten für in situ-Reflexionsmessungen

### 5.3.1 Messung von $\rho_{d/45}$

Für diese Messung wurde eine bestehende Messanordnung umgebaut, deren zentraler Teil aus einer Kugel mit innen mattweißem, diffus reflektierendem Anstrich besteht. Der Durchmesser der Kugel zur diffusen Beleuchtung betrug  $40\text{cm}$ . Der gesamte Aufbau umfasst etwa  $80\text{cm}$  Länge und je  $50\text{cm}$  in Breite und Höhe, wobei der Griff zum Bewegen eine Höhe von  $80\text{cm}$  aufweist (vgl. Abbildung 41). Der Gesamtaufbau wurde als stabiler Rahmen mit Rollen auf einer Seite zum einfachen Versetzen der Anordnung ausgeführt.

Diejenige Öffnung der Kugel an der Unterseite, die die Straße beleuchtet, weist einen Durchmesser von etwa  $9\text{cm}$  auf. Als Beobachtung diente eine Leuchtdichtemesskamera LMK 98-3 color, Fa. Technoteam, Ilmenau. Diese erfasst unter  $45^\circ$

durch eine gesonderte Öffnung die diffus beleuchtete Messfläche. Es wurde nicht das ganze beleuchtete Feld ausgewertet, sondern eine Kreisfläche von  $50\text{cm}^2$  (8cm Durchmesser).

Alle Öffnungen der Kugel sowie der Lichtweg zwischen Kugel und beobachtender Leuchtdichtekamera wurden lichtdicht gegenüber der Umgebung ausgeführt. So sind Messungen unabhängig von der äußeren Beleuchtungssituation möglich.

Die elektrische Versorgung der Leuchtdichtekamera erfolgt über einen Akku, der Laptopcomputer zur Messwertaufnahme wird über einen integrierten Akku betrieben. Die Beleuchtungsquelle in der Kugel ist eine 50W-Glühlampe an Gleichspannung (12V), die durch ein Netzteil mit Stromstabilisierung hoher Konstanz (zeitliche Abweichung der Stromstärke  $<0,2\%$ ) versorgt wurde. Dieses wiederum wurde über einen Transverter am Bordnetz eines PKW betrieben.

Da es sich um einen definitionsgemäßen Messaufbau für diesen Kennwert mit diffuser Beleuchtung und gerichteter Beobachtung unter  $45^\circ$  handelt, waren keine Referenz- oder Vergleichsmessungen zu den Labormessungen nötig.

### 5.3.2 Messung von $R_L$ und $Q_d$

Die Messungen von  $R_L$  und  $Q_d$  erfolgten mit einem handelsüblichen Messgerät, das für die Messung dieser Kennwerte an Markierungen auf der Straße konzipiert und kalibriert wurde. Es handelte sich um ein Retroreflektometer ZRM1013+ der Firma Zehntner Testing Instruments in Hölstein, Schweiz.

Die Messfläche beträgt laut Manual  $10 \times 5\text{cm}$  ( $50\text{cm}^2$ ). Das Gerät verfügt über eine integrierte Spannungsversorgung über Akku sowie Räder und Fernbedienung per Handgriff.

Bei der Umsetzung im Messgerät handelt es sich um die definitionsgemäße, skalierte Abbildung des Reflexionskennwertes  $R_L$  mit Beleuchtungswinkel  $\epsilon=1,24^\circ$  sowie Beobachtungswinkel  $\alpha=2,29^\circ$  und eine definitionsnahe Umsetzung von  $Q_d$  mit näherungsweise diffuser Beleuchtung und einem Beobachtungswinkel  $\alpha=2,29^\circ$ . Der Empfänger ist  $v(\lambda)$ -angepasst und der Messbereich beträgt laut Manual (Zehntner GmbH 2005)  $0 \leq R_L \leq 20.000\text{mcd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  sowie  $0 \leq Q_d \leq 318\text{mcd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ .

Fremdlicht wird bei Messungen durch an der Unterseite des Gerätes angebrachte Bürsten ausgeschlossen. Messungen sind somit zu jeder Beleuchtungssituation in der Umgebung möglich. Die Maße des Gerätes betragen  $56 \times 19 \times 28\text{cm}$  (ohne Räder/Fernbedienung).

Da die Konzeption des Gerätes primär für Markierungen erfolgte, wurden Vergleichsmessungen an den 57 Laborproben von Straßenoberflächen vorgenommen, für die sowohl  $R_L$  als auch  $Q_d$  in gesonderten Laborversuchsständen bestimmt worden waren (vgl. entsprechende Darstellungen in Kapitel 3 und 4).

## 5.4 Vergleichsmessungen $R_L$ und $Q_d$ an den Laborproben

### 5.4.1 Messaufbau

Für die Vergleichsmessungen wurde ein Versuchsstand aufgebaut, der im Wesentlichen die Zielsetzung verfolgte, die Positionierung zwischen den geometrisch sehr heterogenen Laborproben und dem Messgerät exakt zu realisieren sowie Fremdlicht von den Messungen auszuschließen. Dies wurde nötig, da aufgrund der Größe der meisten Laborproben immer Teile der Geräteunterseite gegenüber der Umgebung frei lagen. Da die Proben zudem sehr unterschiedliche Maße aufweisen, war der Aufbau entsprechend so zu gestalten, dass das Messgerät immer exakt auf den vorgesehenen Standpunkten auf der Unterseite sowie horizontal bezüglich der Probenoberfläche positioniert war. Abbildung 39 zeigt den Messaufbau in drei Schritten, zunächst nur mit Probe und ohne Gerät, darauffolgend mit Gerät und Probe und schließlich im Messzustand unter Ausschluss von Fremdlicht. Die Messungen haben zudem im lichttechnischen Dunkellabor ohne weitere Lichtquellen stattgefunden.





Abbildung 39: Messaufbau für Vergleichsmessungen  $R_L$  und  $Q_d$  an Laborproben (oben: Lagerung der Probe und Stützen für Messgerät; mitte: Gerät in Messposition, im vorderen Teil Probe unterhalb ersichtlich; unten: zur Messung Abdeckung der Anordnung zum Ausschluss von Fremdlicht)

#### 5.4.2 Ergebnisse der Vergleichsmessungen

Die Vergleichsmessungen zeigen für das genutzte Gerät einen engen systematischen Zusammenhang zwischen den auf den Laborversuchständen ermittelten Reflexionswerten und den anhand des mobilen Gerätes. Dabei zeigt die Regression für  $R_L$  einen direkteren und engeren Bezug als für  $Q_d$  (Tabelle 7).

Tabelle 7: Bezug Laborergebnisse zu Messergebnissen mit dem verwendeten mobilen  $R_L/Q_d$ -Messgerät (N=57 Proben)

Regression	Bestimmtheit
$R_L(\text{Lab})=1,01R_L(\text{mob})$	$R^2=0,99$
$Q_d(\text{Lab})=1,15Q_d(\text{mob})+0,0116$	$R^2=0,97$

Die Binnensystematik der per mobilem Gerät ermittelten Ergebnisse ist identisch zu den Labormessungen. Die Korrelation zwischen  $R_L$  und  $Q_d$  beträgt über die 57 Proben bei den Laborwerten  $r=0,85$ . Der identische Wert  $r=0,85$  wird bei den Messungen per mobilem Gerät gefunden. Es handelt sich somit eher um systematische als zufällige Abweichungen.

Insofern können diese Befunde auch nicht ohne weitere Untersuchungen auf andere mobile Messgeräte übertragen werden.

Als mögliche Ursache für Abweichungen kommt die Größe des Messfeldes in Betracht. Da jedoch auf Basis der Laboruntersuchungen für  $R_L$  größere Messfelder als für  $Q_d$  nötig scheinen und hier eine größere Abweichung in  $Q_d$  gefunden wird, ist das gefundene Muster der Abweichungen nicht plausibel durch das Argument Messfeldgröße zu erklären.

Ein weiterer möglicher Einfluss könnte in der Beleuchtungssituation für  $Q_d$  bestehen. Der Raum innerhalb des Gerätes, in dem die genähert diffuse Beleuchtung erzeugt wird, ist quaderförmig mit der langen Seite entlang des Messfeldes. Bei den Straßenoberflächen, die in sich wesentlich inhomogener als typische Markierungsmaterialien und zudem anderer räumlicher Reflexionsgestalt sind, könnte diese konstruktive Abweichung von der diffusen Beleuchtung einen großen Teil der gefundenen Abweichungen erklären. Um hier genauere Erkenntnisse zu generieren, müssten entsprechend gesonderte Untersuchungen erfolgen.

Für die weiteren mobilen Messungen wurden die im Feld anhand des mobilen Gerätes erhobenen Werte für  $R_L$  und  $Q_d$  anhand der in Tabelle 7 angegebenen Regression angepasst. Im Ergebnis lässt der Aufbau belastbare mobile Messwerte erwarten.

Die erweiterte Vergleichsunsicherheit (95%-Vertrauensintervall, nach regressiver Anpassung wie oberhalb beschrieben) zwischen Labor- und mobiler Messung beträgt für die 57 untersuchten Proben  $R_L \pm 0,0025 \text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ , entsprechend  $2,5 \text{mcd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  und für  $Q_d \pm 0,007 \text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ , entsprechend  $7 \text{mcd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ .

## 5.5 Reflexion kleiner Teilflächen von Straßen

### 5.5.1 Messorte

Gemäß der Zielstellung sollten möglichst homogene Straßenoberflächen untersucht werden. Diese sollten der Anschauung nach aus einem Material beziehungsweise Baustoff zu einem Zeitpunkt hergestellt und ähnlich beansprucht sein. Die Voraussetzungen waren so gewählt, dass ein hoher Grad an Homogenität erwartet werden kann, um eine

gute Schätzung für die unter praktisch günstigen Bedingungen typische Homogenität zu bekommen.

Alle untersuchten Oberflächen wurden vor mehreren Jahren gebaut und befinden sich seit dem unter freier Bewitterung und regelmäßiger Verkehrsbeanspruchung. Die 1m<sup>2</sup>-umfassenden Teilflächen wurden so ausgewählt, dass sie keine Spurrinnen oder offensichtlichen Verunreinigungen wie beispielsweise durch Baustellen aufwiesen.

Es wurden zwei Betonflächen (Messorte 1 und 7) und zwölf Asphaltflächen untersucht. Alle Messorte befinden sich im Stadtgebiet von Dresden. Eine Tabelle mit den Kurzbeschreibungen ist im Anhang ersichtlich. Messort 6 ist Teil der Straße, die auch als größere Teilfläche 1 in Kapitel 5.6 weiterführend betrachtet wird, Messort 13 korrespondiert entsprechend mit der größeren Teilfläche 2.

### 5.5.2 Beschreibung der Messungen

Als Vorbereitung wurde jeweils eine näherungsweise quadratische Fläche der Seitenlänge 1m umrissen, die vorher von groben Verschmutzungen und größerem losem Material durch Abkehren gereinigt wurde (Abbildung 40).



Abbildung 40: Umriss einer kleinen Teilfläche für die in situ-Messungen

Nach der fotografischen Dokumentation wurden zwei benachbarte Seiten in 10cm Abschnitte eingeteilt. Danach wurde das  $p_{d/45}$ -Messgerät im Messraster in Fahrtrichtung positioniert und in Funktion gesetzt (Laptop, Leuchtdichtemesskamera und Beleuchtung, siehe Abbildung 41). Daraufhin wurden 100 Messwerte aufgenommen, wobei ein zeilenweises Rücken und alle 10 Werte spaltenweises Versetzen des Gerätes jeweils um 10cm erfolgte. In

Summe wurde auf diese Weise aufgrund des Messfeldes von etwa 50cm<sup>2</sup> je Position jeweils die Hälfte der Teilfläche physikalisch abgebildet (0,5m<sup>2</sup> pro 1m<sup>2</sup>).

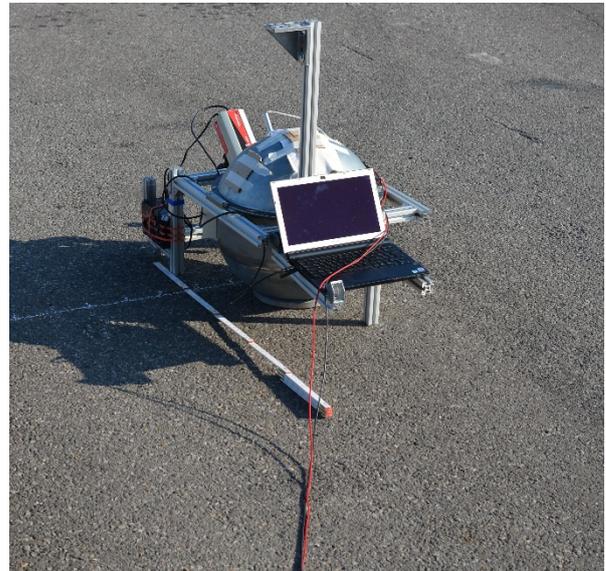


Abbildung 41: Messaufbauten bei den in situ-Messungen kleiner Teilflächen (oben: für  $p_{d/45}$ ); unten: für  $R_L/Q_d$ )

Als diesbezügliche Erfahrung ist zu berichten, dass das Verrücken des Messgerätes nahezu exakt um 10cm längs und quer im orthogonalen Messraster auf der Straße eine gewisse Herausforderung darstellt. Vollständige Abbildungen, bei gleichzeitigem Vermeiden von doppelten Abbildungen von Messflächen, sind ohne aufwändigere Aufbauten wie zum Beispiel automatisierte Führungen des Gerätes nur mit sehr großem Aufwand bei entsprechend

erheblich höherem Zeitbedarf realisierbar. So wie realisiert, betrug der Zeitumfang für die 100 Messwerte ca. 30-40min reine Messzeit.

Danach wurde das  $\rho_{d/45^\circ}$ -Messgerät abgebaut und ins Fahrzeug verladen, woraufhin das  $R_L/Q_d$ -Messgerät auf identische Weise im Raster angeordnet und bewegt wurde. Der Zeitumfang hierfür betrug etwa 40 Minuten. Somit kann die gesamte Messzeit inklusive Vorbereitung des Messfeldes sowie Auf- und Abbau der Geräte etwa mit 1,5-2h je Messort beziffert werden.

### 5.5.3 Ergebnisse zur Reflexion kleiner Teilflächen

Die auf die oberhalb beschriebene Weise ermittelten Reflexionskennwerteverteilungen sind für alle 14 Messorte vollständig im Anhang enthalten.

Zunächst werden die Ergebnisse hinsichtlich der Größenordnung der Reflexion eingeordnet. Alle in situ ermittelten Werte für  $\rho(d/45^\circ)$  waren größer als diejenigen der dunkelsten Laborprobe ( $\rho=0,04$ ) und geringer als die der hellsten Laborprobe ( $\rho=0,45$ ). Der Mittelwert über alle kleinen Teilflächen beträgt  $\rho=0,13$ . Für die zwölf Asphaltoberflächen beträgt der Mittelwert  $\rho=0,11$ .

Auch alle für  $R_L$  ermittelten Werte bewegen sich zwischen der diesbezüglich hellsten ( $R_L=0,088 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ ) und dunkelsten ( $R_L=0,002 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ ) Laborprobe. Der Mittelwert über alle kleinen Teilflächen beträgt  $R_L=0,011 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ . Für die zwölf Asphaltoberflächen beträgt der Mittelwert  $R_L=0,010 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ .

Anhand  $Q_d$  charakterisiert, bewegen sich zwei der Asphaltoberflächen mit  $Q_d < 0,05 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  im Bereich der in diesem Kennwert dunkelsten Laborprobe ( $Q_d=0,047 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ ). Alle in situ untersuchten Asphaltoberflächen ordnen sich in die Bandbreite der Asphalt-Bohrkernproben innerhalb der Laborproben ein. Der Mittelwert über alle kleinen Teilflächen beträgt  $Q_d=0,062 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ . Für die zwölf Asphaltoberflächen beträgt der Mittelwert  $Q_d=0,056 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ .

Die nachfolgende Tabelle 8 zeigt für die drei Kennwerte den Mittelwert und die Schwankungsbreite über die kleinen Teilflächen sowie das 95%-Vertrauensintervall des Einzelwertes, der für 50cm<sup>2</sup> Messfläche erhoben ist.

Tabelle 8: Ergebnisse zur Reflexion kleiner Teilflächen von 1m<sup>2</sup> (Min=minimaler Messwert, Max=maximaler Messwert, MW=Mittelwert, 95%-VI=95%-Vertrauensintervall)

Messort/Parameter	Min	Max	MW	95%-VI	
1	$\rho(d/45^\circ)$	0,24	0,31	0,26	$\pm 0,03$
	$R_L$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,006	0,027	0,020	$\pm 0,006$
	$Q_d$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,063	0,129	0,104	$\pm 0,027$
2	$\rho(d/45^\circ)$	0,11	0,13	0,12	$\pm 0,01$
	$R_L$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,008	0,017	0,012	$\pm 0,004$
	$Q_d$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,054	0,073	0,064	$\pm 0,008$
3	$\rho(d/45^\circ)$	0,09	0,10	0,09	$\pm 0,01$
	$R_L$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,004	0,012	0,008	$\pm 0,003$
	$Q_d$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,043	0,060	0,051	$\pm 0,007$
4	$\rho(d/45^\circ)$	0,07	0,09	0,08	$\pm 0,01$
	$R_L$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,005	0,012	0,009	$\pm 0,003$
	$Q_d$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,030	0,050	0,045	$\pm 0,006$
5	$\rho(d/45^\circ)$	0,11	0,12	0,11	$\pm 0,01$
	$R_L$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,005	0,014	0,010	$\pm 0,004$
	$Q_d$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,044	0,062	0,055	$\pm 0,006$
6	$\rho(d/45^\circ)$	0,12	0,13	0,12	$\pm 0,01$
	$R_L$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,004	0,015	0,010	$\pm 0,003$
	$Q_d$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,048	0,062	0,055	$\pm 0,005$
7	$\rho(d/45^\circ)$	0,20	0,25	0,22	$\pm 0,02$
	$R_L$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,009	0,019	0,015	$\pm 0,004$
	$Q_d$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,063	0,097	0,084	$\pm 0,013$
8	$\rho(d/45^\circ)$	0,10	0,12	0,11	$\pm 0,01$
	$R_L$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,008	0,019	0,013	$\pm 0,004$
	$Q_d$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,039	0,061	0,051	$\pm 0,010$
9	$\rho(d/45^\circ)$	0,09	0,12	0,11	$\pm 0,01$
	$R_L$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,007	0,016	0,011	$\pm 0,004$
	$Q_d$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,044	0,070	0,059	$\pm 0,012$
10	$\rho(d/45^\circ)$	0,08	0,11	0,10	$\pm 0,01$
	$R_L$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,005	0,012	0,008	$\pm 0,003$
	$Q_d$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,039	0,060	0,051	$\pm 0,007$
11	$\rho(d/45^\circ)$	0,08	0,10	0,09	$\pm 0,01$
	$R_L$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,005	0,013	0,009	$\pm 0,003$
	$Q_d$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,037	0,056	0,050	$\pm 0,009$
12	$\rho(d/45^\circ)$	0,10	0,15	0,13	$\pm 0,02$
	$R_L$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,009	0,019	0,013	$\pm 0,005$
	$Q_d$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,053	0,106	0,085	$\pm 0,017$
13	$\rho(d/45^\circ)$	0,09	0,14	0,12	$\pm 0,01$
	$R_L$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,007	0,018	0,012	$\pm 0,004$
	$Q_d$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,048	0,075	0,063	$\pm 0,009$
14	$\rho(d/45^\circ)$	0,09	0,10	0,09	$\pm 0,01$
	$R_L$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,004	0,014	0,010	$\pm 0,003$
	$Q_d$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,038	0,053	0,046	$\pm 0,006$

Zwischen der Ausprägung in den drei Parametern zeigen sich für die untersuchten Oberflächen enge Zusammenhänge über die 14 Messstellen. Die wechselseitigen Korrelationen betragen  $r(\rho-Q_d)=0,91$ ,  $r(\rho-R_L)=0,92$  und  $r(Q_d-R_L)=0,90$ . Die

entsprechenden Werte bei den 57 Laborproben betragen  $r(\rho-Q_d)=0,86$ ,  $r(\rho-R_L)=0,89$  und  $R(Q_d-R_L)=0,85$ . Die bei den Kleinflächen etwas höheren Werte sind teilweise mit der bei den in situ Messungen weniger gleichmäßigen Stichprobenverteilung zu erklären, bei der die beiden Betonoberflächen deutlich abgesetzt sind. Wird die Korrelation nur für die 12 Asphaltflächen berechnet, mindern sich die Zusammenhänge auf  $r(\rho-Q_d)=0,82$ ,  $r(\rho-R_L)=0,75$  und  $r(Q_d-R_L)=0,66$ .

Das 95%-Vertrauensintervall gibt etwa einen Eindruck über die Unsicherheit, die ausgehend von einem einzelnen Messwert, der jeweils ca. 50cm<sup>2</sup> Straßenoberfläche abbildet, bezüglich des Mittelwertes für 1m<sup>2</sup> anzusetzen ist. Wird diese Unsicherheit nicht absolut, sondern relativ als Prozentsatz des Mittelwertes der 1m<sup>2</sup>-Fläche ausgedrückt, zeigt sich die Größenordnung der Schwankungen. Über die 14 Messorte gemittelt ergibt sich eine Unsicherheit von  $\rho(d/45^\circ)\pm 9\%$ , für  $R_L$  von  $\pm 34\%$  und für  $Q_d$  von  $\pm 16\%$  des Messwertes für 50cm<sup>2</sup> Straßenoberfläche. Diesen relativen Werten entsprechen auf Basis der 14 Messorte absolute Unsicherheiten von im Mittel  $\rho(d/45^\circ)\pm 0,01$ ,  $R_L\pm 0,004\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$  und  $Q_d\pm 0,010\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$ .

Die Inhomogenität innerhalb 1m<sup>2</sup> realen Straßenoberflächen übersteigt damit die Unsicherheit deutlich, die aufgrund der Labormessungen mit variierender Messflächengröße (vgl. Kapitel 4.2) für eine Messfläche von 50cm<sup>2</sup> gefunden wurden. Die berichteten Unsicherheiten sind somit plausibel als diesbezügliche Inhomogenität der Straße zu interpretieren.

Mögliche Gründe könnten geometrische Merkmale sein, die beispielsweise die Aufstandsfläche und Orientierung der Geräte hinsichtlich tatsächlich realisierter Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel beeinflussen. Zudem ist ein genereller Unterschied dadurch zu erwarten, dass es sich nicht um Laborbedingungen handelt und die Oberflächen beispielsweise praktische Verschmutzung aufweisen, die, selbst wenn mit bloßem Auge kaum sichtbar, eher ungleichmäßig über die Oberfläche sein dürften. Schließlich kann ein Einfluss auch durch die unvermeidliche Heterogenität des Baustoffgemisches, die Fertigung der Oberfläche und vielem mehr entstehen. Praktisch können Einflüsse nicht nach Messaufbau, Messdurchführung und Oberfläche als potentielle Quellen von Unsicherheiten aufgesplittet

werden. Das ließe sich auch durch die Entnahme von Bohrkernen nicht klären, weil dadurch sowohl geometrische Bezüge zum Umfeld verloren gehen als auch die „natürliche Verschmutzung“ durch die unvermeidliche Reinigung der Oberfläche nach Bohrkernentnahme nicht abgebildet werden kann.

Wie bereits dargestellt (vgl. z.B. Kapitel 5.4), zeigen sich auf Ebene unterschiedlicher Oberflächen systematische Zusammenhänge zwischen den Reflexionsparametern, beispielhaft für  $Q_d$  und  $R_L$ . Prinzipiell liegt daher die Erwartung nahe, innerhalb der 100 Messungen in 1m<sup>2</sup> Straßenoberfläche ebenfalls einen solchen Zusammenhang zu finden. Wie die Ergebnisse zeigen, ist dies jedoch nicht der Fall.

Hierzu kann die Analyse der  $R_L$ - und  $Q_d$ -Werte Aufschluss geben, da diese mit demselben Gerät jeweils an einem identischem Messfeld erhoben wurden. Die Korrelation für die je 2x100 Werte der 14 Messstellen bewegt sich im Bereich  $-0,17\leq r\leq 0,56$  (Mittelwert 0,23). Damit zeigt sich kein bedeutsamer systematischer Zusammenhang. Es liegt demnach nahe, von einer eher zufälligen als systematischen Messwertschwankung auszugehen. Die zwischen den jeweiligen Werten eines Reflexionsparameters innerhalb von 1m<sup>2</sup> Straßenfläche beobachteten Schwankungen können damit primär als Auswirkung zufallsverteilter Messfehler interpretiert und behandelt werden.

Damit besteht formal kein Anlass, Reflexionsmessungen bezüglich einer augenscheinlich homogenen Teilfläche an bestimmten Stellen innerhalb derselben vornehmen zu müssen. Ebenso besteht keine Veranlassung, verschiedene Reflexionsparameter an identischen Stellen innerhalb der Fläche zu erheben. Voraussetzung ist lediglich, dass jeweils genügend große Messflächen abgebildet werden, um bei den unvermeidlichen zufälligen Schwankungen den Erwartungswert mit der beabsichtigten Sicherheit abschätzen zu können. Die Berücksichtigung augenscheinlich relevanter und für Straßen genauso typischer, wie praktisch unvermeidlicher Inhomogenitäten, wie etwa Rollspuren versus Bereich zwischen diesen oder Fahrstreifen versus Standstreifen, sind hierfür zunächst ausgeklammert und gesondert zu untersuchen.

Tabelle 9: Ergebnisse zur Messunsicherheit in Abhängigkeit von der Messfeldgröße bei kleinen Teilflächen (95%-VI=95%-Vertrauensintervall; M=Mittel über alle)

Messort/Parameter		95%-VI in % bzgl. des Flächenmittelwertes für 1m <sup>2</sup> Straße bei der Messung von			
		100cm <sup>2</sup>	150cm <sup>2</sup>	200cm <sup>2</sup>	250cm <sup>2</sup>
1	p(d/45°)	11%	5%	4%	1%
	R <sub>L</sub>	23%	16%	19%	11%
	Qd	21%	17%	17%	15%
2	p(d/45°)	8%	7%	7%	7%
	R <sub>L</sub>	22%	19%	19%	15%
	Qd	11%	10%	9%	8%
3	p(d/45°)	7%	6%	6%	6%
	R <sub>L</sub>	26%	29%	27%	23%
	Qd	12%	11%	11%	9%
4	p(d/45°)	6%	5%	5%	5%
	R <sub>L</sub>	27%	19%	23%	13%
	Qd	12%	9%	12%	6%
5	p(d/45°)	4%	4%	3%	3%
	R <sub>L</sub>	30%	29%	27%	26%
	Qd	12%	11%	11%	9%
6	p(d/45°)	3%	3%	3%	3%
	R <sub>L</sub>	24%	19%	17%	18%
	Qd	7%	6%	6%	6%
7	p(d/45°)	7%	6%	5%	3%
	R <sub>L</sub>	24%	16%	20%	13%
	Qd	13%	9%	11%	6%
8	p(d/45°)	9%	8%	8%	8%
	R <sub>L</sub>	24%	21%	17%	15%
	Qd	17%	15%	14%	12%
9	p(d/45°)	9%	8%	8%	8%
	R <sub>L</sub>	24%	21%	17%	15%
	Qd	17%	15%	14%	12%
10	p(d/45°)	10%	10%	8%	8%
	R <sub>L</sub>	31%	27%	24%	23%
	Qd	14%	12%	11%	9%
11	p(d/45°)	4%	4%	4%	4%
	R <sub>L</sub>	26%	21%	21%	15%
	Qd	16%	15%	12%	8%
12	p(d/45°)	13%	12%	10%	11%
	R <sub>L</sub>	28%	27%	23%	25%
	Qd	17%	16%	15%	16%
13	p(d/45°)	8%	6%	5%	6%
	R <sub>L</sub>	23%	21%	18%	16%
	Qd	11%	10%	8%	8%
14	p(d/45°)	4%	4%	3%	3%
	R <sub>L</sub>	24%	23%	15%	15%
	Qd	9%	9%	7%	8%
M	p(d/45°)	7%	6%	6%	5%
	R <sub>L</sub>	25%	22%	21%	17%
	Qd	14%	12%	11%	9%

Werden die Werte mehrerer Messungen zusammenfasst, ergeben sich in Summe größere Messflächen und die Unsicherheit beziehungsweise Schwankungsbreite um den Mittelwert nimmt tendenziell ab. Um dies für die untersuchten Messorte zu analysieren, wurden benachbarte Werte im Messraster rechnerisch in Schritten zu zwei bis fünf Werten zusammengefasst. Diese repräsentieren somit Messfelder von A=100 bis 250cm<sup>2</sup> (Tabelle 9).

Im Ergebnis zeigt sich über die drei Parameter bei den in situ-Messungen im Bereich 100cm<sup>2</sup> bis 250cm<sup>2</sup> eine zu den Laborbefunden für den Bereich ≤100cm<sup>2</sup> qualitativ gleichartig abnehmende Schwankung bezüglich des jeweiligen Bezugsmittelwertes.

Weiterhin unterscheidet sich die Größenordnung der prozentualen Unsicherheit je Kennwert kaum zwischen den Messorten und variiert somit nicht merklich mit dem Helligkeitsniveau oder der Bauart. Ein deutlicher Zusammenhang besteht jedoch mit dem Kennwert. Über die Messorte gemittelt ist die flächenabhängige Unsicherheit für Qd etwa doppelt so groß wie diejenige für p(d/45°) und diejenige für R<sub>L</sub> ist noch mal fast doppelt so groß wie die Messunsicherheit für Qd.

Zusammengenommen zeigen sich für die Charakterisierung des Flächenmittelwertes von 1m<sup>2</sup> anschaulich homogener Straßenoberfläche durch den Messwert für eine Fläche von A=100cm<sup>2</sup>, die etwa der Nettomessfläche eines üblichen Bohrkerns entspricht, Unsicherheiten für p(d/45°)±0,01 (±7%), R<sub>L</sub>±0,003cd/(m<sup>2</sup>·lx) beziehungsweise ±25% und Qd±0,009cd/(m<sup>2</sup>·lx) entsprechend ±14%. Das Beschreibungsverhältnis beträgt dabei 1:100 zwischen messtechnisch abgebildeter und zu charakterisierender Fläche und somit 1%.

Für die Reflexionsmessung von A=250cm<sup>2</sup> reduzieren sich die Unsicherheiten weiter, wenn auch nicht mehr so stark. Im Mittel der Kennwerte beträgt die Unsicherheit für A=250cm<sup>2</sup> etwa die Hälfte der Unsicherheit der Einzelmessung von 50cm<sup>2</sup>. Konkret zeigen sich für das mit dem genutzten Equipment fünfmalige Messen, das etwa der Nettomessfläche von zwei üblichen Bohrkernen entspricht, p(d/45°)±0,01 (±5%), R<sub>L</sub>±0,002cd/(m<sup>2</sup>·lx) entsprechend ±17% und Qd±0,006cd/(m<sup>2</sup>·lx) beziehungsweise ±9%.

Als ein Zwischenfazit zur Charakterisierung der Reflexion von  $1\text{m}^2$  Straße durch Messung an endlichen Teilflächen davon kann der Bezug zu internationalen Empfehlungen zur Messung und Bewertung hergestellt werden. Wie bereits umfangreich dargestellt (vgl. Ausführungen in Kapitel 2.2.1 und 2.3.2) wird die Charakterisierung anhand Messflächen von etwa  $100\text{cm}^2$  als ausreichend angesehen. Unsicherheiten werden mit der Größenordnung von etwa  $\pm 5\%$  angesetzt. Wie die Messungen im Labor zeigen (siehe Kapitel 4.3), ist das unter Bezug auf die Messung einer Fläche von  $100\text{cm}^2$  eher konservativ angesetzt.

Wird der Bezug jedoch in Richtung der Zielgröße „Beschreibung von mittleren Reflexionswerten für bewertungsrelevante Flächengrößen“ orientiert, zeigt sich ein etwas anderer Befund. Hierfür sind auch unter tendenziell eher günstigen als ungünstigen Bedingungen augenscheinlich homogener Straßenflächen merklich größere Unsicherheiten anzusetzen, beispielsweise für  $Q_d$  mit  $\pm 14\%$  von etwa dem Dreifachen. Die in DIN EN 13201-4 benannte Toleranz von  $\pm 5\%$  für  $Q_0$  bei Messung kann, hier zwar stellvertretend, jedoch in guter inhaltlicher Nähe anhand  $Q_d$  untersucht, bezogen auf  $1\text{m}^2$  Straße auch dann nicht angesetzt werden, wenn die Reflexionsmessungen für  $250\text{cm}^2$  davon erfolgen. Den hier gezeigten Ergebnissen nach wäre dafür mit  $Q_d \pm 9\%$  etwa die doppelte Toleranz anzusetzen, in der die variierende Güte von Messgeräten noch nicht inkludiert ist.

## 5.6 Reflexion größerer Teilflächen von Straßen

Eine Straße ist ein in der Länge potentiell weit ausgedehnter Baukörper. Welche Abschnitte davon hinsichtlich ihrer Reflexion einheitlich beschrieben werden sollen, hängt von Eigenschaften des Baukörpers und der Nutzung ab. Reflexionsrelevant verschiedene Teile oder Abschnitte von Straßen können beispielsweise durch die Verwendung verschiedener Baustoffe oder Bauweisen, infolge unterschiedlicher Beanspruchung, wie zum Beispiel vor und nach größeren Zu- und Abflüssen im Netz und dadurch stark unterschiedlichem Verkehrsaufkommen oder durch variierende Schwerverkehrsanteile und schließlich auch aufgrund der Gestaltung, wie etwa mit versus ohne ortsfeste Beleuchtung oder innerhalb versus außerhalb eines Tunnels definiert werden.

Im Vergleich zeigt sich, dass die relativ kleinsten Teilflächen in der Regel bei der Dimensionierung ortsfester Beleuchtung entstehen, bei der oft Berechnungen für einen repräsentativen Bewertungsabschnitt erfolgen (vgl. Darstellungen in Kapitel 2.1.2). Solche Bewertungsabschnitte haben zu meist längs die Ausdehnung eines Mastabstandes der Beleuchtung und damit der Größenordnung von etwa  $10\text{m}$  bis  $40\text{m}$ . Quer beinhalten sie eine Fahrbahnbreite, die außerhalb von Knotenpunkten typische Größenordnungen von etwa  $3\text{m}$  bis  $18\text{m}$  aufweist. Somit sind Flächen mit Inhalten von etwa  $30\text{m}^2$  bis zu einigen hundert  $\text{m}^2$  zu beschreiben.

Werden  $100\text{m}^2$  als Bezug angenommen, ergibt sich ein Faktor  $1:100$  zur Betrachtungsstufe von  $1\text{m}^2$  im vorhergehenden Kapitel 5.5. Eine erste Frage besteht nun darin, in welchem Maße innerhalb von  $100\text{m}^2$  die Reflexionswerte verglichen zu den Werten innerhalb  $1\text{m}^2$  schwanken. Damit einher geht die ebenfalls in Hinblick auf die Aufwandsschätzung von in situ-Messungen zentrale weitere Frage, mit welcher Unsicherheit die mittlere Reflexion eines etwa  $100\text{m}^2$  umfassenden, augenscheinlich homogenen Straßenabschnittes durch die Messung von  $50\text{cm}^2$  an endlich vielen Stellen charakterisiert werden kann. Wiederum wurde die augenscheinliche Homogenität dadurch definiert, dass es sich der Anschauung nach um aus einem Material zu einem Zeitpunkt zusammenhängend hergestellte und ähnlich beanspruchte Flächen handelt.

### 5.6.1 Messorte und Vorgehen

Da es sich hierbei um ungleich aufwändigere Messungen handelt, konnten nur einzelne Straßenabschnitte abgebildet werden. Entsprechende Untersuchungen erfolgten für zwei Messorte, je einen zur Untersuchung der Situation bei Straßenbeleuchtung und bei Tageslicht. Die ursprünglich ebenfalls geplante dritte Messung in einem Straßentunnel konnte aufgrund des großen Zeitabschnittes für die notwendigen Messungen von etwa fünf bis sechs Stunden, innerhalb dessen eine solche Verkehrsanlage gesperrt werden müsste und im Untersuchungsabschnitt keine anderen Arbeiten stattfinden können, nicht realisiert werden.

Messungen der Reflexionsverteilung sowie der Leuchtdichteverteilung mit Bezug zur Situation bei ortsfester Beleuchtung, konkret Straßenbeleuchtung, erfolgten auf einer Straße, die Teil des Geländes der TU Dresden ist. Der untersuchte Abschnitt

ist 4m breit und 20m lang. Die Längsneigung wurde in der Mitte in 2m-Schritten per elektronischer Wasserwaage bestimmt, wobei sich alle Werte im Bereich  $1,5^\circ \pm 0,1^\circ$  bewegten. Die Querneigung beträgt von der Mitte aus zu beiden Rändern hin konsistent etwa  $1,5^\circ$  (Dachprofil).

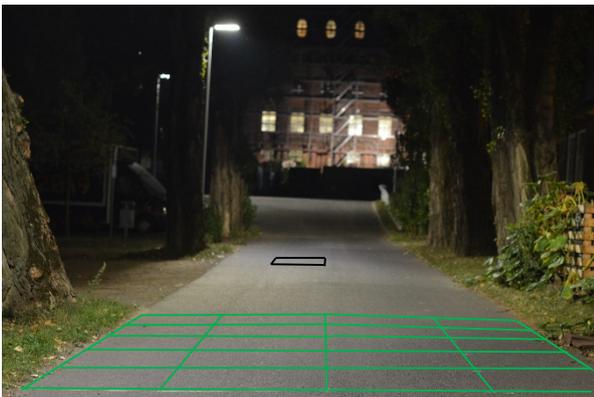


Abbildung 42: Messort 1 für Reflexion größerer Teilflächen bei Tag und Nacht (unten: im vorderen Bereich Messraster einskizziert, weiter hinten Lage der „kleinen Messfläche“ dunkel umrandet)

Die  $80\text{m}^2$  große Fläche wurde in ein rechteckiges Raster mit 80 Feldern von  $1 \times 1\text{m}$  eingeteilt (4 Spalten zu je 20 Zeilen). Je Rasterfeld wurden  $50\text{cm}^2$  Messfläche etwa mittig im Rasterfeld mittels der Messungen charakterisiert, die bereits in Kapitel 5.5 beschrieben wurden. Die in Kapitel 5.5 als Messort 6 beschriebene kleine Teilfläche ist Bestandteil dieser größeren Teilfläche und befindet sich bei Bezug auf Abbildung 42 in der zweiten Spalte von links 5m vor dem hinteren Ende des untersuchten Bereiches, welches durch den Fußpunkt der Leuchte ersichtlich ist.

Die zweite größere Teilfläche ist Teil eines Parkplatzes und wurde für die Untersuchung bei Tageslicht genutzt. Der untersuchte Abschnitt ist gerade und misst in der Länge 20m sowie in der Breite 5m. Auch diese etwa  $100\text{m}^2$  große Fläche wurde wie

oberhalb beschrieben eingeteilt, wobei hier 5 Spalten und 20 Zeilen aus Rasterfeldern mit je  $1 \times 1\text{m}$  Kantenlänge entstanden, die alle hinsichtlich der Reflexionskennwerte jeweils etwa mittig im Rasterfeld gemessen wurden. Die in Kapitel 5.5 als Messort 13 beschriebene kleine Teilfläche ist Bestandteil dieser größeren Teilfläche. Ihre Lage ist in Abbildung 43 ersichtlich.



Abbildung 43: Messort 2 für Reflexion größerer Teilflächen (kleine markierte Teilfläche darin entspricht Messort 13 in Kapitel 5.5)

### 5.6.2 Ergebnisse zur Reflexion größerer Teilflächen

Vollständige Ergebnistabellen mit allen jeweils 80 beziehungsweise 100 Reflexionswerten für die drei Kennwerte befinden sich im Anhang. Tabelle 10 stellt Mittelwerte, Bandbreiten und Vertrauensintervalle der drei Parameter für die jeweilige kleine Teilfläche ( $1\text{m}^2$ ) als Teil der größeren Teilfläche ( $100\text{m}^2$ ) gegenüber.

Tabelle 10: Reflexion innerhalb einer kleinen (kl., entspr.  $1\text{m}^2$ ) und großen (gr., entspr.  $80$  bzw.  $100\text{m}^2$ ) Teilfläche zweier Straßen (Min=minimaler Messwert, Max=maximaler Messwert, MW=Mittelwert, 95%-VI=95%-Vertrauensintervall)

Teilfläche/Parameter		Min	Max	MW	95%-VI
1 kl.	$\rho(d/45^\circ)$	0,12	0,13	0,12	$\pm 0,01$
	$R_L$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,004	0,015	0,010	$\pm 0,003$
	$Q_d$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,048	0,062	0,055	$\pm 0,005$
1 gr.	$\rho(d/45^\circ)$	0,11	0,14	0,13	$\pm 0,01$
	$R_L$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,007	0,018	0,011	$\pm 0,005$
	$Q_d$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,047	0,063	0,057	$\pm 0,007$
2 kl.	$\rho(d/45^\circ)$	0,09	0,14	0,12	$\pm 0,01$
	$R_L$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,007	0,018	0,012	$\pm 0,004$
	$Q_d$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,048	0,075	0,063	$\pm 0,009$
2 gr.	$\rho(d/45^\circ)$	0,09	0,14	0,12	$\pm 0,01$
	$R_L$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,008	0,016	0,012	$\pm 0,004$
	$Q_d$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,054	0,076	0,065	$\pm 0,008$

Selbst wenn geringere, als die in Tabelle 10 aufgeführten Unsicherheiten angesetzt werden, kann mit guter Belastbarkeit von der praktischen Gleichheit der jeweiligen Mittelwerte aller drei Reflexionsparameter zwischen den zusammengehörigen kleineren und größeren Teilflächen ausgegangen werden.

Im Vergleich der Unsicherheit (95%-Vertrauensintervall) zeigt sich für die Einzelmessung von  $50\text{cm}^2$

bezogen auf den jeweiligen Bezugsflächenmittelwert an Messort 1, dass diese für die größere Teilfläche (100m<sup>2</sup>) gegenüber der kleineren Teilfläche (1m<sup>2</sup>) etwas größer ausfällt. An Messort 2 zeigt sich die umgekehrte Tendenz. Hier ist die für die kleine Teilfläche ermittelte Unsicherheit größer als diejenige für die größere Teilfläche.

Über die beiden untersuchten größeren Teilflächen gemittelt zeigt sich eine Unsicherheit eines einzelnen Messwertes an 50cm<sup>2</sup> Straßenoberfläche bezüglich des Flächenmittelwertes von  $\rho(d/45^\circ) \pm 10\%$ , für  $R_L$  von  $\pm 36\%$  und für  $Q_d$  von  $\pm 13\%$ . Diesen relativen Werten entsprechen absolute Unsicherheiten für diese beiden Flächen von  $\rho(d/45^\circ) \pm 0,01$ ,  $R_L \pm 0,004 \text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  und  $Q_d \pm 0,008 \text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ . Damit entsprechen die an den beiden größeren Teilflächen ermittelten Unsicherheiten für Einzelmessungen von 50cm<sup>2</sup> ziemlich genau denjenigen, die für Einzelmessungen von 50cm<sup>2</sup> innerhalb der 14 kleineren Teilflächen gefunden wurden.

Dieser Eindruck der Ähnlichkeit der Verhältnisse bleibt auch bestehen, wenn innerhalb der größeren Teilflächen die Werte mehrerer benachbarter Messpunkte gemittelt werden (Tabelle 11).

Tabelle 11: Ergebnisse zur Messunsicherheit in Abhängigkeit von der Messfeldgröße bei kleinen (1m<sup>2</sup>) und großen (A=80 bzw. 100m<sup>2</sup>) Teilflächen zweier Straßen (95%-VI=95%-Vertrauensintervall)

Teilfläche/Parameter		95%-VI in % bzgl. des Flächenmittelwertes für $\approx 100\text{m}^2$ Straße bei der Messung von			
		100cm <sup>2</sup>	150cm <sup>2</sup>	200cm <sup>2</sup>	250cm <sup>2</sup>
1 kl.	$\rho(d/45^\circ)$	3%	3%	3%	3%
	$R_L$	24%	19%	17%	18%
	$Q_d$	7%	6%	6%	6%
1 gr.	$\rho(d/45^\circ)$	9%	8%	5%	8%
	$R_L$	34%	32%	20%	30%
	$Q_d$	11%	11%	7%	10%
2 kl.	$\rho(d/45^\circ)$	8%	6%	5%	6%
	$R_L$	23%	21%	18%	16%
	$Q_d$	11%	10%	8%	8%
2 gr.	$\rho(d/45^\circ)$	8%	6%	5%	6%
	$R_L$	22%	16%	18%	12%
	$Q_d$	10%	9%	9%	8%

Für die Charakterisierung des Flächenmittelwertes einer rund 100m<sup>2</sup> umfassenden und anschaulich homogenen Straßenoberfläche durch den Messwert für eine Fläche von A=100cm<sup>2</sup> lassen sich Unsicherheiten  $\rho(d/45^\circ) \pm 0,01$  und damit  $\pm 9\%$ ,  $R_L \pm 0,003 \text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  beziehungsweise  $\pm 28\%$  und  $Q_d \pm 0,006 \text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  entsprechend  $\pm 11\%$  belegen.

Das Beschreibungsverhältnis beträgt dabei 1:10.000 zwischen messtechnisch abgebildeter und zu charakterisierender Fläche und somit 0,01%.

Einschränkend ist anzumerken, dass als Bezugswert für die größeren Teilflächen der Mittelwert der 80 beziehungsweise 100 Messungen im Zentrum der Rasterfelder genutzt wurde. Dies entspricht einem Abbildungsanteil von 0,5% der jeweiligen Gesamtfläche durch Messung. Da sich jedoch im Vergleich zu den Befunden innerhalb der 1m<sup>2</sup> umfassenden kleineren Teilflächen, die zu 50% ihrer Fläche messtechnisch abgebildet wurden, ein sehr ähnliches Bild zeigt, kann bis auf weiteres von einer belastbaren Schätzung des Flächenmittelwertes ausgegangen werden. Für eine abschließende Bewertung sind jedoch die in Kapitel 5.7.4 berichteten Befunde zu berücksichtigen.

Für die Messung der Reflexion an A=250cm<sup>2</sup> beträgt die Unsicherheit wiederum etwa die Hälfte der Unsicherheit der Einzelmessung von 50cm<sup>2</sup>. Für ein aus fünf Einzelmessungen gemittelt und damit etwa der Nettomessfläche von zwei üblichen Bohrkernen entsprechendes Messergebnis zeigt sich  $\rho(d/45^\circ) \pm 0,01$  ( $\pm 7\%$ ),  $R_L \pm 0,002 \text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  entsprechend  $\pm 21\%$  und  $Q_d \pm 0,005 \text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  beziehungsweise  $\pm 9\%$ , jeweils bezogen auf den Flächenmittelwert für 100m<sup>2</sup> Straße. Somit nehmen die ermittelten Unsicherheiten auch für diese Betrachtung faktisch identische Ausprägungen in Bezug zu 100m<sup>2</sup> Straße verglichen zum diesbezüglichen Bezug auf 1m<sup>2</sup> an.

Schließlich wurde der Zusammenhang zwischen  $R_L$  und  $Q_d$  auch über die räumlich weiter verteilten Messpunkte der größeren Teilflächen untersucht. Während sich mit  $r=0,85$  bei den Laborproben für unterschiedliche Oberflächen ein deutlicher Zusammenhang zeigt, trat innerhalb der 14, jeweils 1m<sup>2</sup> umfassenden kleineren Teilflächen kein bedeutsamer Zusammenhang auf (siehe Kapitel 5.5.3).

Über die 80 Messpunkte an Messort 1 beträgt die Korrelation  $r(R_L-Q_d)=0,55$ . Für die 100 Messpunkte an Messort 2 beträgt der entsprechende Wert  $r(R_L-Q_d)=0,31$ . Damit bewegt sich diese Ausprägung etwa in der Mitte zwischen dem deutlich engeren Zusammenhang auf Ebene verschiedener Oberflächen und den überwiegend deutlich geringeren Zusammenhängen auf Ebene der 100 Messungen innerhalb der kleineren Flächen mit A=1m<sup>2</sup>. Es kann

somit innerhalb der untersuchten größeren Teilflächen von einer geringen systematischen Variation der Reflexion ausgegangen werden.

Im Fazit stützen die Ergebnisse für die beiden größeren Teilflächen die Befunde, die innerhalb der kleineren Teilflächen begründet wurden. Es zeigen sich keine so deutlichen systematischen Schwankungen, dass es notwendig würde, die Reflexion augenscheinlich homogener Straßen an bestimmten Stellen oder nach einem bestimmten Anordnungsmuster messen zu müssen. Nach den vorliegenden Befunden genügt es auch bezüglich größerer Teilflächen von Straßen mit  $A=100\text{m}^2$ , eine für die beabsichtigte Unsicherheit jeweilig notwendige Messflächengröße abzubilden. Wiederum sind die hier nicht untersuchten, jedoch für Straßen häufig gegebenen systematischen Inhomogenitäten wie beispielsweise Rollspuren dabei ausgeklammert.

Schließlich sind auch vorsichtige indirekte Abschätzungen zu den für die in situ nicht untersuchten Reflexionsaspekten möglich. Bei den Laboruntersuchungen (Kapitel 4.3) zeigte sich für eine identische Messfeldgröße eine um den Faktor zwei bis drei höhere relative Unsicherheit für  $R_L$  im Vergleich zu derjenigen für  $\rho$ ,  $Q_0$  und  $Q_d$ . Für  $S_1$  und das Mittel der einzelnen Leuchtdichtkoeffizienten in einer  $r$ -Tabelle wurde eine noch einmal etwa doppelt so hohe Unsicherheit verglichen mit derjenigen für  $R_L$  ermittelt.

Bei den in situ-Messungen zeigen sich sehr ähnliche Verhältnisse der flächenbezogenen Unsicherheiten. Die relative Unsicherheit für  $R_L$  nimmt für eine bestimmte Messfeldgröße, egal ob für die kleinen oder großen Teilflächen betrachtet, verglichen zu derjenigen für  $\rho$  und  $Q_d$  etwa den doppelten bis dreifachen Wert an.

Obwohl die Schwankungen von  $S_1$  und  $r$ -Tabellen für die Flächen in situ nicht untersucht werden konnten, kann daher dennoch plausibel vermutet werden, dass die diesbezügliche Unsicherheit auf größeren Teilflächen von Straßen wahrscheinlich auch oberhalb derjenigen von  $R_L$  liegen wird. Nimmt man dies an, müssen für die Ermittlung von  $S_1$  und  $r$ -Tabellen an  $100\text{cm}^2$  Messfläche bezogen auf den jeweiligen Mittelwert für  $1\text{m}^2$  bis zu  $100\text{m}^2$  Straße höchstwahrscheinlich Unsicherheiten von etwa 30-40% angesetzt werden. Erfolgt die Charakterisierung an Messflächen von  $250\text{cm}^2$ , reduziert sich

diese Unsicherheit aller Wahrscheinlichkeit nach auf etwa 25-30%.

Insofern sprechen die hier berichteten Befunde auch diesbezüglich eher dafür, sowohl die in der internationalen Literatur für die Messung der Reflexionseigenschaften von Straßen angegebenen Messflächen als auch Toleranzen beziehungsweise Unsicherheiten nach oben anzupassen.

## 5.7 Reflexion und Wahrnehmungssituation für größere Teilflächen

### 5.7.1 Beschreibung der lichttechnischen Messungen und Situationen

An beiden bereits in Kapitel 5.6.1 beschriebenen Messorten fanden neben den Reflexionsmessungen weitere lichttechnische Messungen statt. Diese stellen für Messort 1 den direktem Bezug zur Anwendungssituation Leuchtdichtebewertung bei Straßenbeleuchtung (vgl. Erläuterungen in Kapitel 2.1.2) und für Messort 2 den Bezug zur Anwendungssituation Nutzersicht bei Tageslicht (Kapitel 2.1.6) her.

Die zu Messort 1 zugeordnete ortsfeste Beleuchtungsanlage ist eine LED-basierte Straßenbeleuchtung mit Leuchten, die Linsenoptiken zur Lichtverteilung beinhalten. Diese erzeugen gemäß Planungsdokumentation eine asymmetrische, deutlich entlang der Straße orientierte Lichtverteilung.

Die Nennleistung je Lichtpunkt beträgt laut Herstellerangabe  $P=42\text{W}$ . Zum Messzeitraum erfolgte der Betrieb in nicht näher spezifizierter, jedoch über die Erhebungszeit konstanter Leistungsreduzierung. Die Lichtfarbe ist neutralweiß und beträgt, ausgedrückt als ähnlichste Farbtemperatur, gemäß orientierender Messung in situ mittels Spektroradiometer Specbos 1211UV (Fa. Yeti, Jena)  $T_a \approx 4.150\text{K}$ .

Die Lichtpunkthöhe der beiden den Betrachtungsbereich begrenzenden Leuchten beträgt  $4,9\text{m}$ , der Lichtpunktstand  $20\text{m}$ . Diese sind als einseitige Anordnung, in der gewählten Beobachtersicht linksseitig ausgeführt (vgl. Abbildung 42 auf S. 48).

Im bereits eingangs von Kapitel 5.6.1 beschriebenen Raster von 80 Feldern mit je  $1\text{x}1\text{m}$  Größe wurde für jedes Rasterfeld etwa mittig die horizontale Beleuchtungsstärke  $E_h$  in Höhe  $<10\text{cm}$  über dem Boden erhoben (Abbildung 44). Als Messgerät

kam ein Beleuchtungsstärkemesser RadioLux 111 (Fa. PRC Krochmann, Berlin) mit Fehlerklasse A zum Einsatz.

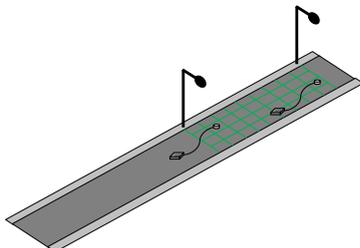


Abbildung 44: Beleuchtungsstärkemessung

Weiterhin erfolgten Leuchtdichtemessungen aus Beobachtersposition mittig bezüglich der Straßenbreite unter dem Beobachtungswinkel  $\alpha=1^\circ$  für die gesamte Bewertungsfläche in Perspektive eines „stehenden Beobachters“ gemäß DIN EN 13201-3 (Abbildung 45). Durch den festen Beobachterstandort ergibt sich bezüglich der Vorderkante des Messfeldes ein Beobachtungswinkel  $\alpha=1,2^\circ$ . Die Bereiche am Ende des Feldes werden unter  $\alpha=0,86^\circ$  aufgenommen.

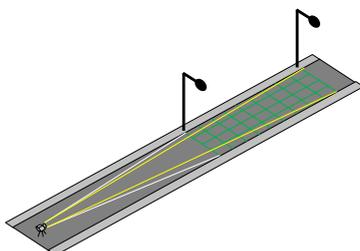


Abbildung 45: normgemäße Leuchtdichtemessung für  $\alpha=1^\circ$  mit konstantem Beobachtungsort

Die Leuchtdichtemessungen unter  $\alpha=3^\circ$  erfolgten durch zeilenweise Verschiebung als „bewegter Beobachter“ gemäß DIN 67524-2. Dies ist notwendig, damit der Beobachtungswinkel für alle zu charakterisierenden Flächenteile näherungsweise dem beabsichtigten Wert entspricht.

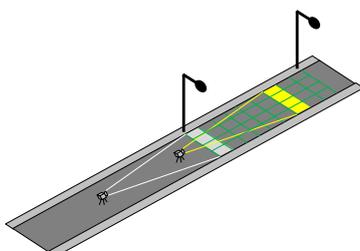


Abbildung 46: Leuchtdichtemessung mit konstantem Beobachtungswinkel durch variierenden Beobachtungsstandort bei  $\alpha=3^\circ$  und  $\alpha=5^\circ$

Für den Beobachtungswinkel  $\alpha=5^\circ$  wurde ebenfalls je Rasterzeile aus Position mittig im Querschnitt

eine Aufnahme erzeugt (Abbildung 46). Die Messungen unter Beobachtungswinkel  $\alpha=45^\circ$  erfolgten schließlich je Rasterfeld (Abbildung 47). Grund hierfür ist wiederum, dass bei handhabbarer Höhe der Beobachtung relativ zur Oberfläche nur dadurch der benannte Betrachtungswinkel je Rasterfeld eingehalten werden kann.

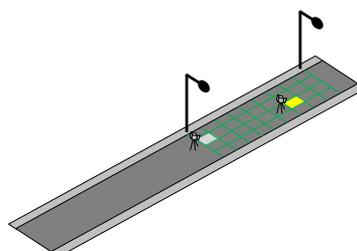


Abbildung 47: Leuchtdichtemessung mit konstantem Beobachtungswinkel durch variierenden Beobachtungsstandort bei  $\alpha=45^\circ$

Alle Messungen wurden mittels auf Stativ montierter und fixierter Leuchtdichtemesskamera LMK 98-3 color (Fa. Technoteam, Ilmenau) durchgeführt, die so gegenüber der Messfläche orientiert wurde, dass der jeweils gewünschte Beobachtungswinkel gegenüber der Messfläche resultierte.

Bei den Messungen unter  $\alpha=45^\circ$  ergaben sich teilweise Schatten von Stativ und Leuchtdichtemesskamera im Sichtfeld der Messung. Diese Bereiche wurden bei der Auswertung ausgespart.

Die Messungen erfolgten bei trockener Witterung und Straße mehr als 90 Minuten nach Sonnenuntergang und somit unter Ausschluss von Tageslicht. Kleinere Einflüsse weiterer Teile der Außenbeleuchtung innerhalb des umliegenden Geländes der TU Dresden können nicht ausgeschlossen werden. Ihr Einfluss kann aufgrund der Entfernungen zum nächsten relevanten, nicht zur untersuchten Straße gehörigen Lichtpunkt von größer 40m eher als gering eingeschätzt werden.

Die Messungen an Messort 2 erfolgten bei Tag, trockener Oberfläche und augenscheinlich vollständig bedecktem Himmel. Es erfolgten mittels der oberhalb bereits beschriebenen Messtechnik Leuchtdichtemessungen aus etwa  $\alpha=2,3^\circ$  nach dem ebenfalls schon dargestellten Prinzip der schrittweise bewegten Beobachtung (Abbildung 48), jeweils positioniert in der Mitte des Querschnitts. Der Beobachtungswinkel ergibt sich aus dem Beobachtungswinkel der Qd-Messung, der laut Definition des Kenn-

wertes  $\alpha=2,29^\circ$  betragen soll. Die heuristisch abgeschätzte Unsicherheit des realisierten Beobachtungswinkels beträgt  $\pm 0,2^\circ$ .

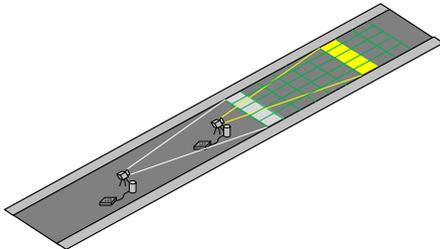


Abbildung 48: parallele Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtemessung mit konstantem Beobachtungswinkel  $\alpha \approx 2,3^\circ$  durch variierenden Beobachtungsstandort bei Tag

Parallel zur Leuchtdichtemessung wurde die ebene, horizontale Beleuchtungsstärke 1m über der Straßenhöhe nahe der Position des Leuchtdichtemessers kontinuierlich gemessen und für den Moment einer Leuchtdichteaufnahme dokumentiert. In einer Entfernung von mindestens 20m rund um die untersuchte Fläche befanden sich keine abschattungsrelevanten Objekte wie Bäume, Gebäude oder Fahrzeuge, die höher als 0,5m waren. In 40m rundherum befanden sich keine relevanten Objekte höher als 2m. Daher kann in Näherung von diffusen Beleuchtungsverhältnissen auf der untersuchten Fläche ausgegangen werden.

### 5.7.2 Ergebnisse der lichttechnischen Messungen bei ortsfester Beleuchtung (Messort 1)

Die nachfolgende Tabelle 12 stellt die ermittelte Beleuchtungsstärkeverteilung dar. Die Beleuchtungsstärke der Rasterfelder betrug im Minimum  $E_h=11,9\text{lx}$  und als höchster Wert  $E_h=38,8\text{lx}$ . Der Mittelwert war  $E_h=18,6\text{lx}$ . Die Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärkeverteilung ergibt sich somit zu  $U_0=0,64$ .

Eingeordnet in die europäische Straßenbeleuchtungsnormung erfüllt die Gesamtfläche damit die Klasse C3 nach DIN EN 13201-2 und übertrifft die höchste Anforderung einer P-Klasse in Form von P1 deutlich.

Für die untersuchte einseitige Leuchtenanordnung zeigt sich erwartungsgemäß eine geringere Beleuchtungsintensität auf der von den Leuchtenpositionen weiter entfernten Straßenhälfte. Im konkreten Fall

weist diese im Mittel eine um etwa 30% geringere Beleuchtungsstärke auf.

Tabelle 12: Beleuchtungsstärkeverteilung  $E_h$  auf der untersuchten Straße (Messort 1)

$E_h$ in lx	1	2	3	4
1	38,8	29,3	20,0	15,0
2	32,6	28,1	18,8	14,1
3	28,3	25,1	16,7	12,4
4	25,2	24,3	16,9	12,8
5	21,1	21,9	16,8	12,2
6	17,5	18,7	16,2	11,9
7	14,6	16,1	15,1	11,9
8	13,5	14,9	14,5	12,4
9	13,4	14,6	14,0	12,7
10	13,4	14,0	13,0	12,1
11	13,3	13,6	12,7	12,0
12	14,1	14,6	13,6	12,9
13	14,7	16,3	15,4	14,0
14	16,1	17,7	16,9	14,5
15	19,2	20,1	18,8	15,1
16	22,8	23,9	19,6	15,7
17	26,3	27,4	20,7	14,5
18	30,4	29,3	19,8	14,5
19	34,7	30,4	21,0	16,2
20	36,3	30,5	20,5	15,3

Die Beleuchtungsstärkeverteilung erfüllt auf beiden Hälften des Querschnittes die für eine Beleuchtungskategorie C3 sowie P1 nach DIN EN 13201-2 notwendige Güte (Tabelle 13).

Tabelle 13: Beleuchtungsgüte in Beleuchtungsstärke auf der untersuchten Straße (Messort 1)

	$E_h$ -MW	$E_h$ -Min	$E_h$ -Max	$U_0$ (=Min/MW)
leuchtennahe Flächenhälfte	21,9lx	13,3lx	38,8lx	0,61
leuchtenferne Flächenhälfte	15,3lx	11,9lx	21,0lx	0,78
Gesamtfläche	18,6lx	11,9lx	38,8lx	0,64

Vermittelt durch die Reflexion des Lichtes über die Oberfläche ergibt sich eine Leuchtdichteverteilung aus jeweils gewählter Beobachtersicht. Für den im Rahmen der Leuchtdichtetechnik für die Straßenbeleuchtung angewandten Beobachtungswinkel  $\alpha=1^\circ$  ist diese in Abbildung 49 dargestellt. Die an sich eindimensionale Skala der ortsaufgelösten Leuchtdichteverteilung wird zur besseren Einschätzbarkeit der Ausprägungen in Pseudocolorierung dargestellt.

Gemäß europäischer Normvorgaben zur Bewertung der Güte von Straßenbeleuchtungsanlagen mittels Leuchtdichtetechnik (DIN EN 13201) ist die Fläche in größengleiche rechteckige Teilflächen zu

unterteilen und deren Leuchtdichtewerte als Verteilung den Berechnungen der Güteparameter zugrunde zu legen.

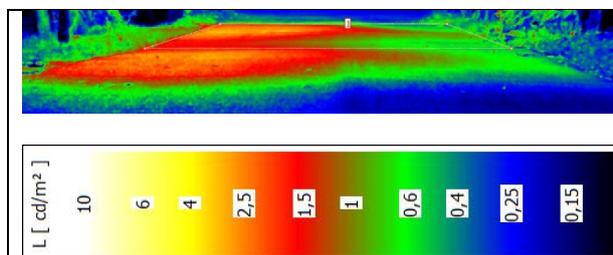


Abbildung 49: Leuchtdichteverteilung bei ortsfester Verkehrsbeleuchtung auf der untersuchten Straße Messort 1 ( $\alpha=1^\circ$ ) und zur Pseudocolorierung gehörige Skalenteilung

Um die durch die perspektivische Aufnahme verzerrt abgebildeten Teilflächen auswerten zu können, erfolgte eine perspektivische Entzerrung des aufgenommenen Bereiches in die Draufsicht. Dazu wurde die zur Leuchtdichtekamera gehörige Software „LMK LabSoft“ verwendet (Abbildung 50 links). Infolge der Entzerrung werden den einzelnen Teilflächen unterschiedliche Anzahlen von Originalpixeln zugeordnet. Im vorderen Bildbereich speist sich ein Rasterfeld aus etwa 220 Pixeln, während im hinteren Bereich die Information aus etwa 60 Pixeln eingeht.

In der perspektivisch entzerrten Leuchtdichteverteilung in Draufsicht wurden 80 deckungsgleiche und die Fläche völlig abbildende Teilflächen definiert. Damit korrespondiert dieses Bewertungsraster unmittelbar mit dem für die Reflexions- und Beleuchtungsstärkemessungen auf der untersuchten Straße genutzten Raster (Abbildung 50 mittig).

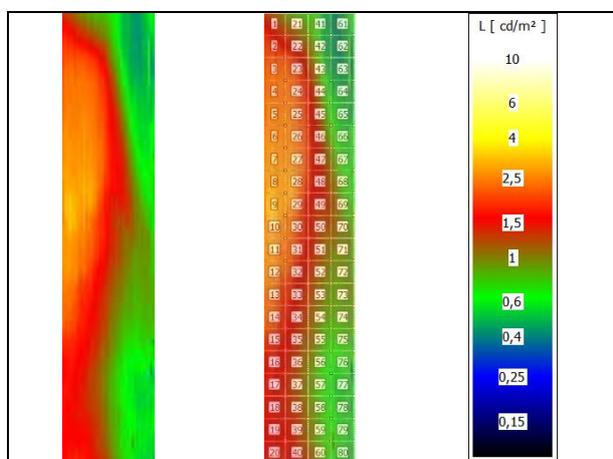


Abbildung 50: perspektivisch entzerrte Leuchtdichteverteilung zur normgemäßen Flächenbewertung (Messort 1,  $\alpha=1^\circ$  bezüglich Messfeldmitte, Variationsbereich  $1,21^\circ \geq \alpha \geq 0,86^\circ$ ).

In Anwendung der in Abbildung 50 gezeigten Bewertungsfelder ergibt sich die in Tabelle 14 dargestellte Werteverteilung.

Aus der ermittelten Leuchtdichteverteilung können die zentralen Güteparameter berechnet werden. Die geringste Leuchtdichte der Rasterfelder beträgt  $L=0,47\text{cd/m}^2$  an. Die höchste Helligkeit einer Rasterfeldfläche wurde zu  $L=2,98\text{cd/m}^2$  bestimmt. Der Flächenmittelwert beträgt  $L=1,41\text{cd/m}^2$ . Wird der Mittelwert der untersuchten Fläche direkt aus der perspektivischen Aufnahme in Abbildung 49 bestimmt, ergibt sich mit  $L=1,37\text{cd/m}^2$  ein nur geringfügig anderer Wert.

Bei Bewertung nach Straßenbeleuchtungsnorm DIN EN 13201-2 unterschreitet die Flächenverteilung mit Gesamtgleichmäßigkeit  $U_0=0,33$  und Längsgleichmäßigkeit  $U_L=0,4$  knapp die Gleichmäßigkeitsanforderungen der niedrigsten M-Klasse M6. Hinsichtlich des Leuchtdichteniveaus, bewertet anhand des Flächenmittelwertes, wird hingegen die Anforderung für die Klasse M3 deutlich überschritten und diejenige der zweithöchsten Klasse M2 nahezu erreicht.

Tabelle 14: Leuchtdichteverteilung für  $L(\alpha=1^\circ)$  auf der untersuchten Straße (Messort 1) im Raster wie in Abbildung 50 mittig dargestellt.

$L(1^\circ)$ in $\text{cd/m}^2$	1	2	3	4
1	1,33	0,97	0,61	0,49
2	1,82	1,40	0,68	0,48
3	2,24	1,90	0,83	0,47
4	2,41	2,16	1,02	0,51
5	2,51	2,28	1,19	0,55
6	2,64	2,39	1,34	0,61
7	2,72	2,47	1,46	0,68
8	2,84	2,51	1,49	0,78
9	2,98	2,36	1,41	0,88
10	2,83	2,13	1,29	0,93
11	2,62	1,99	1,22	0,92
12	2,50	1,78	1,12	0,88
13	2,20	1,58	1,03	0,86
14	2,05	1,47	0,95	0,81
15	1,80	1,37	0,87	0,71
16	1,64	1,25	0,78	0,62
17	1,57	1,18	0,73	0,56
18	1,53	1,22	0,76	0,57
19	1,57	1,31	0,80	0,60
20	1,67	1,42	0,84	0,58

In der Leuchtdichteverteilung für den Beobachtungswinkel  $\alpha=1^\circ$  zeigt sich ein sehr deutlicher Unterschied der beiden Straßenhälften. Die von den Leuchten weiter weg gelegene Hälfte der Straße zeigt mit einem Mittelwert  $L=0,85\text{cd/m}^2$  gegenüber

dem Mittelwert der leuchtnahen Straßenhälfte  $L=1,97\text{cd/m}^2$  eine um etwa 55% geringere Leuchtdichte.

Hierbei spielen prinzipiell drei Aspekte eine Rolle, die sich jedoch zwangsläufig gemeinsam auswirken. Die Lichtwege in der Relation Leuchte-Straße-Beobachter unterscheiden sich in Draufsicht systematisch zwischen den beiden Straßenhälften. Für die leuchtnahe Straßenhälfte kommt es ausgehend von der aus Beobachterperspektive hinteren Leuchte vom Ende der Bewertungsfläche aus, auch zu relativ geraden Lichtwegen. Neben der an der Oberfläche gestreuten Reflexion kann sich somit auch die spiegelnde Reflexion in direkter Gegenlichtkonstellation auswirken. Dies ist für die leuchtenfernere Straßenhälfte geometrisch nicht möglich. Für diese Seite wird für die Beobachtungsperspektive ausschließlich an der Oberfläche gestreut reflektiertes Licht wirksam. Für typische Asphaltflächen nimmt die Reflexion in der Gegenlichtkonstellation zudem erheblich größere Werte an als die gestreute Reflexion.

Weiterhin dürfte das Dachprofil der untersuchten Straßenfläche ebenfalls einen Beitrag liefern, bei dem die beiden Querschnittshälften der Straße, ausgehend von der höchsten Linie in der Straßenmitte, beidseitig nach außen abfallen. Durch die relative Neigung der linken Teilfläche hin zu den Lichtquellen und diejenige der rechten Teilfläche weg von den Lichtquellen kommt es aller Wahrscheinlichkeit nach zu einer Verstärkung des Effektes der geometrisch verschiedenen Reflexion zwischen den beiden Straßenhälften.

Über die vier untersuchten Beobachtungswinkel zeigt sich eine deutliche Variation der Leuchtdichten (Tabelle 15). Die vollständige Verteilung der Leuchtdichtewerte unter den Beobachtungswinkeln  $\alpha=3^\circ$ ,  $5^\circ$  und  $45^\circ$  ist im Anhang enthalten.

Tabelle 15: Kennwerte der Leuchtdichteverteilung von Messort 1 bei wechselndem Beobachtungswinkel

	Min	Max	MW
$L(\alpha=1^\circ)$	$0,47\text{cd/m}^2$	$2,98\text{cd/m}^2$	$1,41\text{cd/m}^2$
$L(\alpha=3^\circ)$	$0,46\text{cd/m}^2$	$2,33\text{cd/m}^2$	$1,26\text{cd/m}^2$
$L(\alpha=5^\circ)$	$0,54\text{cd/m}^2$	$1,72\text{cd/m}^2$	$1,05\text{cd/m}^2$
$L(\alpha=45^\circ)$	$0,51\text{cd/m}^2$	$1,29\text{cd/m}^2$	$0,79\text{cd/m}^2$

Hinsichtlich der jeweils geringsten Leuchtdichtewerte treten kaum größere und auch keine systematischen Variationen auf. Tendenziell scheinen

diese bei den größeren Beobachtungswinkeln eher größer zu sein. Dagegen nehmen die unter einem Beobachtungswinkel jeweils höchsten Helligkeiten mit steigendem Beobachtungswinkel systematisch immer niedrigere Ausprägungen an. Dadurch steigt einerseits die Gleichmäßigkeit der Leuchtdichteverteilung, während ihr Mittelwert andererseits stetig abnimmt. Der belegte Verlauf der mittleren Leuchtdichte zwischen Beobachtungswinkel  $\alpha=1^\circ$  und  $\alpha=45^\circ$  entspricht sowohl qualitativ als auch quantitativ sehr gut den Erkenntnissen über den Verlauf des mittleren Leuchtdichtekoeffizienten bei in dieser Bandbreite variierendem Beobachtungswinkel (vgl. Abbildung 19 auf Seite 31).

Diese systematischen Unterschiede betreffen primär das mittlere Niveau der Helligkeit aus den unterschiedlichen Beobachtungswinkeln, zumindest für  $\alpha=1^\circ$ ,  $3^\circ$  und  $5^\circ$ . Die Helligkeitsverteilungen für diese drei Beobachtungswinkel korrelieren alle wechselseitig mit  $r \geq 0,94$ . Das zeigt, dass sich die Werte zwar im Niveau ändern, die relative Lage der helleren und dunkleren Bereiche innerhalb der betrachteten Fläche jedoch weitestgehend erhalten bleibt.

Dies ist für den Bezug zur Leuchtdichte unter  $\alpha=45^\circ$  nicht mehr gegeben. Die dafür ermittelte Verteilung zeigt ihre höheren und niedrigeren Helligkeiten überwiegend an anderen Stellen, als dies für Betrachtung unter den anderen drei Beobachtungswinkeln der Fall ist. Entsprechend besteht mit  $r=0,28$  die geringste Korrelation der Leuchtdichteverteilung unter  $\alpha=45^\circ$  zur Verteilung unter  $\alpha=1^\circ$  und der engste Zusammenhang von  $r=0,40$  zur Verteilung unter  $\alpha=5^\circ$ .

### 5.7.3 Analysen zur Reflexion (Messort 1)

Um die in situ wirksame Beziehung zwischen Varianz von Beleuchtung, Reflexion und resultierender Leuchtdichte aus Nutzersicht zu untersuchen, wurden situative, empirische mittlere Leuchtdichtekoeffizienten  $Q_e$  ermittelt.  $Q_e$  ist dabei als Quotient aus dem Mittelwert der Leuchtdichte und dem zugehörigen Mittelwert der Beleuchtungsstärke in situ bestimmt. Es handelt sich somit um einen Quotienten der Flächenmittelwerte bei der herrschenden Beleuchtungssituation und gewählten Beobachtungsbedingung für die betrachtete Anlage und Straße.

Wird dieser Quotient für die Mittelwerte der gesamten Fläche sowie alle vier Beobachtungswinkel ermittelt, folgt das Ergebnis aufgrund des Bezuges zu einer identischen Beleuchtungsstärkeverteilung zwingend den beobachteten Verhältnissen der Leuchtdichteverteilung, wie sie in Tabelle 15 abgebildet sind. Erfolgt die Berechnung zusätzlich getrennt für die leuchtennahe und leuchtenferne Hälfte der Straße, zeigt sich ein insgesamt plausibel interpretierbares Bild (Tabelle 16).

Zunächst sei erwähnt, dass für die betrachtete Fläche per mobiler Reflexionsmessung  $Q_d = 0,057 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  als Flächenmittelwert bestimmt wurde (siehe Tabelle 10 auf S.48). Dieser Wert korrespondiert für den vorliegenden Fall eng mit dem empirischen mittleren Leuchtdichtekoeffizienten  $Q_e$  für die leuchtenfernere Hälfte der Straße bei den Beobachtungswinkeln  $\alpha = 1^\circ$  und  $3^\circ$ . Für  $\alpha = 5^\circ$  und über die gesamte Bewertungsfläche betrachtet haben  $Q_e$  und  $Q_d$  den identischen Wert. Die  $Q_e$ -Werte für  $\alpha = 1^\circ$  und  $3^\circ$  übersteigen sowohl im Straßenmittel, als auch insbesondere für die leuchtennahe Straßenhälfte, den  $Q_d$ -Wert deutlich.

Tabelle 16: empirischer mittlerer Leuchtdichtekoeffizient  $Q_e$  für ortsfeste Beleuchtung, verschiedene Beobachtungswinkel und Teile der untersuchten Straße (Messort 1)

Q <sub>e</sub> in cd/(m <sup>2</sup> ·lx) für			
	gesamte Fläche	leuchten- nahe Hälfte	leuchten- ferne Hälfte
L(α=1°)	0,075	0,090	0,055
L(α=3°)	0,067	0,077	0,054
L(α=5°)	0,057	0,061	0,050
L(α=45°)	0,042	0,041	0,043

Die möglichen Gründe sind bereits auf der vorhergehenden Seite bei der Einordnung der Leuchtdichtewerte diskutiert. Die Erkenntnis aus den empirischen mittleren Leuchtdichtekoeffizienten  $Q_e$  bestärkt diese Interpretation. Auf der leuchtenfernere Straßenseite ist das gestreute Reflexionsverhalten der Oberfläche wirksam und dieses wird hauptsächlich mit den integralen, mittleren Leuchtdichtekoeffizienten  $Q_d$ , aber auch  $Q_0$  beschrieben.

Die unterschiedliche Neigung der beiden Straßenhälften dürfte einen Anteil daran haben, dass sich das anhand  $Q_d$  charakterisierte Reflexionsver-

halten, das geometrisch für  $\alpha = 2 \dots 3^\circ$  auf lokale Bereiche der Oberfläche bezogen ist, bei Betrachtung aus Nutzerperspektive erst bei  $\alpha = 5^\circ$  zeigt. Diese Interpretation wird auch durch die mit steigendem Beobachtungswinkel stetig abnehmende Differenz zwischen den  $Q_e$ -Werten der beiden Straßenhälften gestützt. Dies ist insofern plausibel, als dass mit steigendem Beobachtungswinkel die konstante Querneigung einen immer geringeren relativen Beitrag zur tatsächlichen dreidimensionalen Beziehung von Beleuchtung, Reflexion und Beobachtung liefert, beziehungsweise der nominale Winkelunterschied der realen zu einer idealisierten Fläche ohne differenzierte Binnenneigungen stetig abnimmt. Folgerichtig verschwindet der Unterschied in  $Q_e$  für die beiden Straßenhälften praktisch bei  $\alpha = 45^\circ$ .

Noch weiter verdeutlichen und im Detail fortführend erläutern, lässt sich das komplexe Zusammenspiel aus Geometrie und Reflexionsverhalten, wenn die Verhältnisse zwischen leuchtenfernere und leuchtennäherer Straßenseite direkt als jeweiliger Quotient betrachtet werden. Tabelle 17 zeigt die Verhältnisse der beiden Flächenhälften bezüglich der Leuchtdichten, der Beleuchtungsstärken und der resultierenden empirischen Leuchtdichtekoeffizienten in Abhängigkeit des Beobachtungswinkels. Wie in Tabelle 17 dargestellt, ist die Beleuchtungsstärke unabhängig von der Beobachtung auf der leuchtenfernere Straßenhälfte immer 30% niedriger. Die Leuchtdichte ist für kleine Beobachtungswinkel in stärkerem Maße geringer, als es die geringere Beleuchtungsintensität erklären kann. Der größere Helligkeitsunterschied kann nur mit dem Wirken jeweils unterschiedlicher Aspekte des räumlichen Reflexionsverhaltens der Oberfläche erklärt werden.

Tabelle 17: Verhältnis der Werte zwischen leuchtenfernere Straßenhälfte zu leuchtennäherer Straßenhälfte in Leuchtdichte L (Helligkeit), Beleuchtungsintensität (E<sub>h</sub>) und empirischem mittleren Leuchtdichtekoeffizienten  $Q_e$  (Messort 1, nachts, ortsfeste Beleuchtung)

Beobach- tungswinkel	L	E <sub>h</sub>	Q <sub>e</sub>
α=1°	-55%	-30%	-39%
α=3°	-50%	-30%	-30%
α=5°	-45%	-30%	-18%
α=45°	-27%	-30%	+5%

Für den Beobachtungswinkel  $\alpha = 1^\circ$  zeigt sich zwischen der praktisch wirksamen Reflexion, ausgedrückt über das Verhältnis der empirischen mittlere-

ren Leuchtdichtekoeffizienten  $Q_e$  der beiden Straßenhälften, ein stärkeres Ungleichgewicht als für die Beleuchtungsintensität. Somit lässt sich daraus plausibel vermuten, dass der große Helligkeitsunterschied zwischen den beiden Straßenhälften unter dem Beobachtungswinkel  $\alpha=1^\circ$  zu einem größeren Anteil durch das Wirken anderer räumlicher Reflexionsanteile der Oberfläche, als durch die unterschiedliche Beleuchtungsintensität begründet ist.

Beim Beobachtungswinkel  $\alpha=3^\circ$  haben Ungleichmäßigkeit von Beleuchtung und Unterschiede in der wirksamen räumlichen Reflexion offensichtlich gleiche Anteile bei der Verursachung der Leuchtdichteunterschiede aus Nutzersicht. Beim Beobachtungswinkel  $\alpha=45^\circ$  schließlich wird der Helligkeitsunterschied zwischen leuchtenaher und leuchtenferner Straßenseite praktisch ausschließlich durch die Beleuchtungsintensität bewirkt.

Dies sind einerseits schlüssige Belege für den deutlichen funktionalen Bezug zwischen dem messtechnisch in situ bestimmten Reflexionskennwert  $Q_d$  und der Helligkeitsverteilung aus Nutzersicht als Zielgröße. Es sind jedoch auch deutliche Anhaltspunkte dafür, dass eine belastbare Kalkulation kleinflächiger Leuchtdichtewerte im Kontext der ortsfesten Verkehrsbeleuchtung nicht anhand mittlerer Leuchtdichtekoeffizienten, sondern nur durch die Kenntnis der räumlichen Reflexionsverteilung in Form von r-Tabellen erfolgen kann. Schließlich zeigt sich dadurch auch, dass bei Betrachtungen des komplexen Zusammenwirkens von Beleuchtung und Reflexion im Anwendungsfeld der Leuchtdichtetechnik bei der ortsfesten Verkehrsbeleuchtung die tatsächliche geometrische Gestalt der Straße differenzierter berücksichtigt werden sollte.

Diese Erkenntnisse sind aus rein geometrischen Gründen zunächst nur für einseitige Beleuchtungsanordnungen uneingeschränkt plausibel und müssen für zweiseitige und versetzte Anordnungen gesondert untersucht werden.

Weiterhin lässt sich auch ein anderer Befund aus den Laboruntersuchungen direkt an den empirisch ermittelten mittleren Leuchtdichtekoeffizienten  $Q_e$  bestätigen und damit in die Verhältnisse größerer Straßenflächen erweitern. Im Rahmen der Labormessungen wurde durch die Deckungsgleichheit des Informationsgehaltes von mittlerem Leuchtdichtekoeffizienten  $Q_0$  für den Beobachtungswinkel  $\alpha=45^\circ$  und diffusem Reflexionsgrad  $\rho(d/45)$  ein

praktisch diffuses Reflexionsverhalten der Straßenoberflächen für Beobachtungen unter  $\alpha=45^\circ$  oder noch größeren Winkeln belegt (Kapitel 4.2). Dies bestätigt sich nun an den Ergebnissen der untersuchten größeren Teilfläche. Liegt für eine Oberfläche im gewählten Betrachtungsbereich ein diffuses Reflexionsverhalten vor, entsprechen sich diffuser Reflexionsgrad und ein richtungsunabhängig gleicher Leuchtdichtekoeffizient (Kapitel 2.1.1).

Für den untersuchten Straßenabschnitt wurde mittels in situ-Messung  $\rho=0,13$  als Flächenmittelwert für den Reflexionsgrad bestimmt. Außerdem wurde für den Beobachtungswinkel  $\alpha=45^\circ$  aus dem Flächenmittel der Leuchtdichte  $L(45^\circ)$  und dem Flächenmittel der Beleuchtungsstärke  $E_h$  der  $Q_e=0,042\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$  bestimmt. Für eine diffus reflektierende Fläche mit einem im Beschreibungsbereich konstanten Leuchtdichtekoeffizienten  $q=0,042\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$  errechnet sich der Reflexionsgrad zu  $\rho=0,13$ . Dieser Wert entspricht genau dem per in situ-Reflexionsmessung bestimmten flächenmittleren Reflexionsgrad. Daher ist für den Beobachtungswinkel  $\alpha=45^\circ$  das praktisch diffuse Reflexionsverhalten auch dieser untersuchten Straßenoberfläche der Größe  $A=80\text{m}^2$  nachgewiesen.

Daraus folgt aus Praxis Gesichtspunkten heraus, dass für diese Beobachtungsgeometrie und aller Erkenntnis nach auch noch steilere Beobachtungswinkel bis zu senkrechter Betrachtung, bei Kenntnis von zwei beliebigen die jeweils dritte Größe des komplexen Zusammenspiels von mittlerem Reflexionsgrad, mittlerer ebener horizontaler Beleuchtungsstärke und mittlerer Leuchtdichte mit hoher Belastbarkeit berechnet werden kann.

Abschließend wurden weitere Betrachtungen angestellt, um erste Hinweise auf eventuell relevante Zusammenhänge zwischen der Inhomogenität der Reflexion der Straße und der Inhomogenität der Helligkeit aus Nutzersicht zu ermitteln.

Wie in Kapitel 5.6.2 dargestellt, wurden für die betrachtete größere Teilfläche von Messort 1 relativ stark variierende Reflexionswerte ermittelt. Im vorhergehenden Kapitel 5.7.2 wurde für diese Fläche bei ortsfester Beleuchtung die große Streuung der Leuchtdichte aus Beobachtungssicht dargestellt. Die bisher im aktuellen Kapitel angestellten Betrachtungen zeigten völlig übereinstimmend mit den Grundlagen der Leuchtdichtetechnik für die orts-

festen Verkehrsbeleuchtung, dass sich für Teilflächen je nach konkreter Geometrie aus Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung andere Aspekte der, üblicherweise deshalb zweckmäßig als r-Tabelle darzustellenden, differenzierten räumlichen Reflexionsgestalt der Straßenoberfläche auswirken.

Daher stellt sich die Frage, wie relevant darüber hinaus die beobachtete Varianz der mittleren Oberflächenreflexion für die ermittelten Helligkeitsschwankungen innerhalb größerer Teilflächen einer Straße ist. Daran knüpft die Frage an, ob diese dann gegebenenfalls messtechnisch beschrieben werden sollte.

Für das identische Raster von 4x20 Feldern wurden daher alle Korrelationen der drei Reflexionswertverteilungen mit den Leuchtdichteverteilungen unter den vier Beobachtungswinkeln bestimmt. Im Ergebnis zeigt sich, dass die Variationen der  $R_L$ - und  $Q_d$ -Werte nicht relevant mit den Variationen der Leuchtdichtewerte über die untersuchte Fläche zusammenhängen.

Die paarweisen Korrelationen, sowohl zwischen  $R_L$  und den Leuchtdichten aller Beobachtungswinkel, als auch  $Q_d$  und allen Leuchtdichten betragen  $r < 0,16$ . Wird bei der Bestimmung dieser jeweiligen paarweisen Zusammenhänge der Einfluss der unterschiedlichen Beleuchtungsintensität auspartialisiert und damit statistisch herausgerechnet, reduzieren sich die Korrelationen sogar weiter auf  $r < 0,12$ .

Die Verteilung des Reflexionsgrades über die Straßenfläche hängt mit  $r = 0,41 \dots 0,48$  in mittlerem Maße mit der Leuchtdichteverteilung für  $\alpha = 1^\circ$  bis  $5^\circ$  Beobachtungswinkel zusammen. Mit der Verteilung unter  $\alpha = 45^\circ$  besteht ein verglichen dazu geringerer Zusammenhang von  $r = 0,35$ . Auch hier nimmt die Stärke der Zusammenhänge ab, wenn der Einfluss der über die Fläche inhomogenen Beleuchtungsstärke herausgerechnet wird. Die Korrelationen betragen dann  $r = 0,35 \dots 0,28$  mit der Leuchtdichteverteilung für  $\alpha = 1^\circ$  bis  $5^\circ$  und  $r = 0,26$  mit der Helligkeitsverteilung bei  $\alpha = 45^\circ$ .

Insbesondere der Zusammenhang zu  $Q_d$  ist aufgrund der aus den Labormessungen gut belegten, großen inhaltlichen Nähe zu  $Q_0$  von besonderem Interesse bei den Betrachtungen im Kontext der

ortsfesten Verkehrsbeleuchtung. Die oberhalb berichteten Befunde sprechen eher gegen einen bedeutsamen Zusammenhang zwischen der Variation des mittleren Leuchtdichtekoeffizienten über die Fläche eines Bewertungsfeldes und der Variation der Helligkeit aus für die Leuchtdichtetechnik typischen Betrachtungswinkeln.

Folglich stützt dieses Ergebnis einerseits wiederum die Aussagen in der internationalen Literatur, nach denen Leuchtdichteberechnungen für diese Betrachtungssituation nur sinnvoll unter Nutzung von r-Tabellen vorzunehmen sind und spricht andererseits dafür, dass die Verteilung des mittleren Leuchtdichtekoeffizienten über eine größere Teilfläche einer Straße nicht erhoben werden muss, zumindest bei augenscheinlich homogenen Oberflächen.

Diese Schlussfolgerung ist im Kontext der anderen Befunde durchaus plausibel, jedoch auf Basis der dazu erfolgten in situ-Messungen trotzdem aus messtechnischen Gründen nicht völlig uneingeschränkt belastbar. In Einklang mit den Ergebnissen der Laboruntersuchungen zum Einfluss variierender Messfeldgröße auf die Stabilität des mittleren Leuchtdichtekoeffizienten  $Q_d$  (Kapitel 4.3) ist bei der Konzeption der in situ-Messungen davon ausgegangen worden, dass eine Messung an  $50\text{cm}^2$  Straße einen ausreichend belastbaren Wert erbringen würde. Wie die erst nach Auswertung der in situ-Messungen vorliegenden Befunde zum Einfluss variierender Messfeldgröße auf die Unsicherheit des einzelnen Messwertes bezüglich des Mittelwertes für kleine Teilflächen von  $1\text{m}^2$  ergaben, ist diese größer als auf Basis der Laboruntersuchung anzunehmen war. Hätte dieses Wissen vorher bestanden, hätten je Rasterfeld mehrere Messungen mit in Summe geringerer Unsicherheit bezüglich des auf  $1\text{m}^2$  bezogenen Reflexionswertes erfolgen können.

Konkret wurde für die kleine Teilfläche Nummer 6, die Teil der größeren Teilfläche Messort 1 war, eine Unsicherheit des Einzelwertes an  $50\text{cm}^2$  Messfläche bezogen auf den Mittelwert für  $1\text{m}^2$  von  $Q_d \pm 0,005\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  ermittelt. Lediglich jeder fünfte der für die 80 Rasterfelder ermittelten  $Q_d$ -Werte innerhalb Messort 1 weicht um mehr als die benannte Unsicherheit vom Flächenmittelwert ab. Es kann somit nicht ausgeschlossen werden, dass ein erhebli-

cher Anteil von Unterschieden der mittleren Reflexion zwischen den Teilflächen von  $1\text{m}^2$  durch die Messwerte nicht abgebildet wurde.

Dies betrifft jedoch primär Unterschiede, die geringer als die benannte Unsicherheit sind. Es zeigt sich jedoch auch kein Zusammenhang zwischen Qd-Verteilung und Leuchtdichteverteilung, wenn nur die belastbaren, größeren Abweichungen der Reflexionswerte im Sinne einer Extremwertanalyse berücksichtigt werden. Werden dazu rein zur hypothetischen Analyse alle Qd-Werte in der ermittelten Reflexionsverteilung, die um höchstens  $\pm 0,005\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$  vom Mittelwert abweichen, durch den Mittelwert ersetzt, verbleiben 80% identische Werte und 20% höhere und niedrigere „Extremwerte“, die um mehr als  $\pm 0,005\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$  vom Mittelwert abweichen und somit sicher eine höhere beziehungsweise niedrigere Qd-Ausprägung aufweisen. Die Korrelation dieser Verteilung von Qd mit den Leuchtdichteverteilungen beträgt in allen Fällen  $r < 0,1$ . Somit kann zwar trotzdem keine Aussage für den Bereich  $Qd \pm 0,005\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$  um den Mittelwert getroffen werden, es zeigt sich jedoch, dass größere Abweichungen des Reflexionskoeffizienten nach oben oder unten als diese in keinem bedeutsamen Zusammenhang zur beobachteten Helligkeitsverteilung bei der untersuchten ortsfesten Beleuchtung stehen.

#### 5.7.4 Ergebnisse der lichttechnischen Untersuchungen bei Tageslicht (Messort 2)

Bei augenscheinlich vollständig bedecktem Himmel schwankte die ebene horizontale Beleuchtungsstärke infolge Wolkenzug bedeutsam. Die momentanen Beleuchtungsstärken bewegten sich etwa zwischen  $E_h = 15 \dots 20\text{klx}$  und wichen damit innerhalb des Messzeitraum um mehr als 20% ab. Daher ist die Interpretation von flächigen Leuchtdichteverteilungen analog zu den bezüglich der Messungen an Messort 1 vorgestellten Tabellen nicht zweckmäßig. Sie sind jedoch im Anhang gemeinsam mit den zugehörigen Beleuchtungsstärken ersichtlich.

Stattdessen wird nachfolgend die Verteilung der praktischen Leuchtdichtekoeffizienten  $q_e$  herangezogen, die je Rasterfeld als Quotient aus der Leuchtdichte unter  $\alpha = 2,3^\circ$  und der Beleuchtungsstärke  $E_h$  ermittelt wurden (Tabelle 18).

Der Mittelwert über die gesamte Fläche beträgt  $Q_e = \text{MW}(q_e) = 0,064\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$ . Er entspricht damit

praktisch dem anhand Messung mit dem mobilen Gerät erhobenen Flächenmittelwert (vgl. Tabelle 10 auf S.48)  $Q_d = 0,065\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$ . Die je Rasterfeld erhobenen Werte schwanken zwischen  $0,061 \leq q_e \leq 0,070\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$ . Das 95%-Vertrauensintervall eines auf etwa  $1\text{m}^2$  fußenden Einzelwertes für  $q_e$  beträgt bezogen auf den Mittelwert der etwa  $100\text{m}^2$  umfassenden Gesamtfläche  $Q_e = q_e \pm 0,005\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$ . Dem entspricht im vorliegenden Fall eine relative Unsicherheit von  $\pm 7,5\%$  des Einzelwertes.

Der mit diesem Vorgehen für die kleine, in Kapitel 5.5 als Messort 13 beschriebene Teilfläche ermittelte Wert beträgt  $q_e = 0,062\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$ . Anhand der 100 in situ-Reflexionsmessungen mit dem mobilen Gerät wurde  $Q_d = 0,060\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$  als Mittelwert dieser  $1\text{m}^2$  großen Fläche bestimmt. Es zeigt sich somit auch auf dem Niveau kleinerer Teilflächen eine gute Übereinstimmung. Die verbleibende Differenz könnte einerseits durch Messfehler und andererseits auch durch die unterschiedliche Messflächensumme erklärt werden. Mittels mobiler Reflexionsmessung wurde in Summe 50% der kleinen Teilfläche durch Messung abgebildet (vgl. Darstellungen in den Kapiteln 5.5.2 und 5.5.3), während bei der ortsaufgelösten Leuchtdichtemessung praktisch vollflächige Aufnahmen erfolgten.

Mit diesen Befunden kann für die untersuchte, augenscheinlich homogene Straßenoberfläche mit guter Belastbarkeit geschlussfolgert werden, dass das mittlere Reflexionsniveau der Teilflächen von  $1\text{m}^2$ , ausgedrückt als mittlerer Leuchtdichtekoeffizient  $Q_d$ , innerhalb einer Bezugsfläche von  $100\text{m}^2$  im Bereich bis etwa  $\pm 7,5\%$ , beziehungsweise  $\pm 0,005\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$  um den Flächenmittelwert variiert.

Die Korrelation der in Tabelle 18 gezeigten empirischen Leuchtdichtekoeffizientenverteilung für Tageslicht, bedeckten Himmel und Beobachtung mit annähernd  $\alpha = 2,3^\circ$  mit der anhand des mobilen Gerätes per in situ-Reflexionsmessung ermittelten Verteilung von  $Q_d$  (vgl. Darstellungen in Kapitel 5.6.2) beträgt allerdings nur  $r = 0,36$ .

Hierfür dürfte wiederum der Einfluss der Messfeldgröße je Bewertungsfeld der beiden Erhebungsvarianten entscheidend sein. Während die  $q_e$ -Werte vollflächig pro Rasterfeld der Fläche  $1\text{m}^2$  bestimmt sind, wurden mit dem mobilen Gerät pro  $1\text{m}^2$  Oberfläche lediglich  $50\text{cm}^2$  Messfläche abgebildet. Eine ausführliche Diskussion dieses Aspektes erfolgte

bereits innerhalb des vorausgehenden Kapitels 5.7.3.

Tabelle 18: in situ bestimmte Leuchtdichtekoeffizienten  $q_e$  für Beobachtung bei Tageslicht (Messort 2)

$q_e$ in $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	1	2	3	4	5
1	0,066	0,066	0,066	0,067	0,066
2	0,065	0,066	0,065	0,066	0,065
3	0,067	0,066	0,067	0,067	0,068
4	0,065	0,065	0,064	0,065	0,065
5	0,067	0,066	0,068	0,067	0,066
6	0,063	0,065	0,063	0,064	0,065
7	0,062	0,064	0,061	0,064	0,062
8	0,066	0,065	0,066	0,065	0,067
9	0,067	0,068	0,067	0,068	0,068
10	0,062	0,063	0,061	0,062	0,064
11	0,068	0,067	0,068	0,070	0,068
12	0,067	0,066	0,068	0,068	0,067
13	0,062	0,063	0,061	0,062	0,063
14	0,068	0,070	0,066	0,070	0,067
15	0,063	0,064	0,063	0,064	0,064
16	0,063	0,062	0,063	0,063	0,064
17	0,062	0,061	0,061	0,062	0,062
18	0,062	0,063	0,063	0,063	0,063
19	0,062	0,061	0,061	0,061	0,062
20	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062

Für die hier gezeigten Ergebnisse kommt ein weiterer Anhaltspunkt hinzu. Die 100  $q_e$ -Werte zeigen für die untersuchte Fläche eine deutlich geringere Streubreite als die mittels mobiler Reflexionsmessung ermittelten  $Q_d$ -Werte, die im Bereich  $0,054 \leq Q_d \leq 0,076 \text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  variieren (siehe Tabelle 10, S.48).

Sowohl die geringere Streubreite als auch die geringere Korrelation der Werte unterstützen die bereits in vorangegangenen Kapiteln begründete Einschätzung, dass die mittlere Reflexion von  $1 \text{m}^2$  Straße durch die Messung an  $50 \text{cm}^2$  umfassenden Messfeldern nur mit merklicher Unsicherheit bestimmt werden kann. Gleichzeitig stützen die hier berichteten Befunde jedoch auch die ebenfalls schon getroffene Einschätzung, nach der es für die Ermittlung des Flächenmittelwertes einer homogen hergestellten Straße nicht notwendig ist, die flächige Reflexionsverteilung messtechnisch abzubilden. Es genügt vielmehr, ohne Anforderungen an deren Lage, eine für die beabsichtigte Unsicherheit notwendige Messflächengröße auf der zu charakterisierenden Fläche zu erheben.

Neben der bereits mehrfach angesprochenen Einschränkung hinsichtlich typischer Inhomogenitäten von Straßen, wie etwa Rollspureinflüssen, könnte

bei der in situ-Bestimmung von Leuchtdichtekoeffizienten  $q_e$  als Näherung für  $Q_d$  mittels flächiger Leuchtdichte- und Beleuchtungsstärkemessung wie oberhalb beschrieben ein weiterer Einfluß bestehen. Dieser resultiert aus der schrägen Betrachtung der im Querschnitt weiter außen liegenden Bereiche. Da die Leuchtdichteaufnahmen aus einer Position etwa mittig im Straßenquerschnitt erfolgten, betrug der Winkel zwischen Betrachtungsrichtung und Straßenlängsachse bei den Teilflächen am Straßenrand bis zu  $\delta \approx 7^\circ$ . Für den untersuchten Messort 2 treten keine systematischen Unterschiede zwischen den Mittelwerten von  $q_e$  der fünf Rasterpalten auf. Dies könnte für andere Straßenoberflächen jedoch der Fall sein und sollte daher bei Gelegenheit ebenfalls untersucht werden.

Darüberhinaus sind auch mit den an Messort 2 vorgenommenen Untersuchungen keine Aussagen darüber möglich, inwiefern über das mittlere räumliche Reflexionsniveau hinaus eventuell die räumliche Reflexionsgestalt der Oberfläche ( $r$ -Tabelle, S1) innerhalb der untersuchten Fläche variiert.

Werden schließlich mehrere Rasterflächen von je  $1 \text{m}^2$  rechnerisch zu größeren Betrachtungsflächen zusammengefasst, verringert sich erwartungsgemäß die Unsicherheit bezüglich des auf  $100 \text{m}^2$  bezogenen Flächenmittelwertes.

Werden drei Felder längs und eines quer gemeinsam ausgewertet, ergibt sich das 95%-Vertrauensintervall eines solchen Einzelwertes von dann  $3 \text{m}^2$  bezogen auf den Gesamtflächenmittelwert für  $100 \text{m}^2$  Straße mit  $Q_e = q_e \pm 0,003 \text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ , entsprechend  $\pm 5,2\%$ . Diese Unsicherheit reduziert sich kaum merklich auf  $\pm 5,0\%$ , wenn  $5 \text{m}$  längs und  $1 \text{m}$  quer kombiniert werden. Die Zusammenfassung der Werte eines  $10 \text{m}$  langen Streifens der Breite von  $1 \text{m}$  zur Messfläche von  $10 \text{m}^2$  reduziert die relative Unsicherheit bezüglich des Gesamtflächenmittelwertes noch einmal deutlich auf dann  $\pm 2,1\%$ . Diesem entspricht im untersuchten Fall mit  $Q_e = q_e \pm 0,001 \text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  eine geringe verbleibende absolute Unsicherheit.

## 6 Zusammenführung der Befunde

### 6.1 Beschreibung der Reflexion von Straßenoberflächen durch Kennwerte

#### 6.1.1 Kennwerteauswahl und Beziehung zwischen diesen

Auch in Zusammenschau aller Ergebnisse und Analysen aus den Feldmessungen bleiben zur umfassenden Charakterisierung unter allen für die Untersuchung identifizierten Anwendungsfällen alle bereits in Tabelle 6 auf S.39 aufgeführten und anschließend im Fortgang des Kapitels 5.1 diskutierten Reflexionskennwerte notwendig. Die Reflexion von Straßenoberflächen kann für die Belange der Infrastruktur daher umfassend beschrieben werden durch:

- r-Tabelle,
- mittleren Leuchtdichtekoeffizienten  $Q_0$  beziehungsweise  $Q_d$ ,
- $S_1$ ,
- Leuchtdichtekoeffizient  $R_L$ ,
- Reflexionsgrad  $\rho$ , beispielsweise operationalisiert als Leuchtdichtefaktor  $\rho(d/45)$ .

Diese können je nach Zielsetzung der Reflexionscharakterisierung einer Straßenoberfläche einzeln oder mehrere gemeinsam herangezogen werden.

Hinsichtlich der Beziehung zwischen den verschiedenen Reflexionskennwerten von Straßenoberflächen haben die Laboruntersuchungen bedeutsame Zusammenhänge belegt. Bei den in situ untersuchbaren Reflexionskennwerten hat sich gegenüber den Erkenntnissen aus der Labormessung gezeigt, dass diese in Gegenüberstellung verschiedener Oberflächen auch dort etwa in vergleichbarem Maße zusammenhängen. Innerhalb einer anschaulich homogenen Straßenoberfläche zeigen die Reflexionskennwerte jedoch keine bedeutsamen Zusammenhänge. Als anschaulich homogen wurde bei den Untersuchungen eine als am Stück gemeinsam zu einem Zeitpunkt aus einem Baustoff hergestellte Straßenoberfläche ohne offensichtliche partielle Beeinträchtigung durch Verschmutzung angesehen.

Die in situ gefundenen Reflexionsverteilungen innerhalb einer anschaulich homogenen Straßenoberfläche können somit in guter Näherung als eine je Kennwert zufallsbedingt schwankende Verteilung behandelt werden. Daraus folgt unter anderem, dass es, unter Ausklammerung von systematischen Inhomogenitäten, keine Anhaltspunkte dafür gibt, Reflexionsmessungen an bestimmten Stellen einer einheitlichen Straßenoberfläche oder nach einem bestimmten geometrischen Muster anordnen zu müssen.

#### 6.1.2 Messflächengröße und Reflexionscharakterisierung durch mittlere Leuchtdichtekoeffizienten ( $Q_0$ , $Q_d$ )

Als ein Hauptaspekt im Projekt hat sich der Zusammenhang zwischen Messflächengröße und Reflexionscharakterisierung dargestellt. Bedeutsame Anhaltspunkte wurden einerseits dazu ermittelt, mit welcher Unsicherheit bei welcher Messung die verschiedenen Reflexionskennwerte erhoben werden können und außerdem darüber, mit welchen Schwankungen innerhalb von typischen Betrachtungsflächen bereits bei günstigen Bedingungen gerechnet werden muss.

Damit kann auf Basis der Ergebnisse des vorliegenden Forschungsprojektes erstmals ein schlüssiges Gesamtbild über den Zusammenhang von Messflächengröße und diesbezüglicher Unsicherheit der Reflexionscharakterisierung bei anschaulich homogenen Straßenoberflächen gezeichnet werden.

Dies stellt sich am umfassendsten für  $Q_d$  und daran argumentativ angeschlossen  $Q_0$  dar. Für eine Straßenoberfläche mit der Bezugsfläche von  $100\text{cm}^2$ , die in der Größenordnung etwa den Dimensionen eines üblichen Bohrkerns des Durchmessers  $d=15\text{cm}$  mit einer Nettooberfläche von etwa  $150\text{cm}^2$  entspricht, kann durch Reflexionsmessung an etwa  $10\text{cm}^2$  und damit der Messfläche eines Zehntels der Bezugsfläche der Reflexionswert der Bezugsfläche mit einer Unsicherheit von etwa  $\pm 10\%$  ermittelt werden. Wird durch Messung eine Fläche von  $50\text{cm}^2$  und damit etwa die Hälfte der Bezugsfläche erfasst, reduziert sich die Unsicherheit auf etwa  $\pm 1\dots 2\%$ . Grund für diese Zusammenhänge dürfte die Inhomogenität typischer Straßenoberflächen auf Ebene der Bestandteile sein, aus denen sie zusammengesetzt ist. Es sind dies die Gesteinskörnungen und das Bindemittel mit ihren jeweiligen Gestalten, An-

teilen und Materialhelligkeiten. Hier könnten gegebenenfalls Texturbeschreibungen auf Ebene einzelner Gesteinskörner einen sinnvollen Beitrag zur Reflexionscharakterisierung liefern.

Für eine Straßenoberfläche mit der Bezugsfläche von  $1\text{m}^2$ , deren Dimension einer für die verschiedenen Zielsetzungen der Reflexionscharakterisierung von Straßenoberflächen kleinsten zweckmäßigen Teilfläche entspricht, kann durch Reflexionsmessung an  $100\text{cm}^2$  und damit einem Hundertstel der Bezugsfläche, der mittlere Reflexionswert mit einer Unsicherheit von etwa  $\pm 15\%$  ermittelt werden. Für eine Unsicherheit von  $\pm 10\%$  des Mittelwertes von  $1\text{m}^2$  Straße müssen etwa  $250\text{cm}^2$  davon gemessen werden. Die Unsicherheit von 1-2% dürfte sich wiederum beim Erfassen von etwa der Hälfte der Bezugsfläche ergeben, wie die in Kapitel 5.7.4 für ein Beispiel ermittelten Ergebnisse zeigen. Mögliche Gründe für diese Zusammenhänge dürften vor allem in der stochastischen Verteilung der Bestandteile der Straßenoberfläche wie Korngrößenverteilung und Gleichmäßigkeit der Kornlagerung, Heterogenität der Helligkeit der einzelnen Gesteinskörner, sowie Gleichmäßigkeit der Bindemittelverteilung bestehen, insofern dieses perspektivisch aus Sicht der Reflexionsmessung sichtbar ist. Darüber hinaus dürften sich auf Ebene von Teilflächen mit  $1\text{m}^2$  auch bereits geometrische Eigenschaften der Straßenoberfläche, wie zum Beispiel ihre Ebenheit in Längs- und Querrichtung auswirken. Diese Betrachtungsgröße bildet somit den Übergang zwischen rein materialbezogenen Einflüssen und solchen Einflüssen, die aus anderen Merkmalen der Straße und nicht dem Material resultieren.

Für eine Straße mit der Bezugsfläche von  $100\text{m}^2$ , die etwa der Größenordnung entspricht, für die unter diversen Anwendungshintergründen das „mittlere Reflexionsverhalten der Straße“ beschrieben werden soll, kann durch Reflexionsmessung an  $100\text{cm}^2$  Messfläche der Flächenmittelwert für  $Q_d$  oder  $Q_0$  mit einer Unsicherheit von etwa  $\pm 20\text{...}25\%$  bestimmt werden. Wird eine Messfläche von  $250\text{cm}^2$  messtechnisch untersucht, reduziert sich diese Unsicherheit auf etwa  $\pm 15\text{...}20\%$ . Um den Reflexionsmittelwert von  $100\text{m}^2$  augenscheinlich homogener Straßenoberfläche mit einer Unsicherheit  $< 10\%$  durch Messung zu ermitteln, muss etwa 1% der Fläche, damit  $1\text{m}^2$  Oberfläche erfasst werden. Durch die Abbildung von 10% dieser Bezugsfläche sind Unsicherheiten von deutlich unter 5%

begründbar. Auf dieser Betrachtungsebene dürften vor allem fertigungs-, nutzungs- und umweltbezogene Merkmale der Straße die beobachtete Inhomogenität bewirken. Ein relevanter Bezug zur Homogenität des Baumaterials ist wenig wahrscheinlich. Die Geometrie der Fläche im Sinne ihrer Ebenheit ist hierbei sicherlich genauso bedeutsam wie die durch langjährige Bewitterung und Nutzung auftretende Verteilung von inhomogenen Gebrauchsspuren und auch partiellen Verschmutzungen.

Zusammengefasst zeigt sich, dass Einzelmessungen im Sinne eines funktionalen „Punktes“ bezüglich mittlerer Leuchtdichtekoeffizienten wie  $Q_d$  oder  $Q_0$  für Straßenflächen ab etwa  $50\text{cm}^2$  belastbar sind. Sollen zielbezogene Aussagen über die mittlere Reflexion von Straßenflächen ab  $1\text{m}^2$  mit Unsicherheiten bis 10% getroffen werden, müssen Anteile von etwa 1 bis 2,5% der zu charakterisierenden Oberfläche tatsächlich messtechnisch erfasst werden. Für die Messung von etwa 10% der Straßenfläche sind Unsicherheiten von merklich weniger als 5% bezogen auf den tatsächlichen Flächenmittelwert zu erwarten.

Diese Betrachtungen gelten zunächst für das räumlich mittlere Reflexionsverhalten aus Beobachtungswinkeln  $\alpha \leq 5^\circ$ , wie es anhand der mittleren Leuchtdichtekoeffizienten  $Q_0$  und  $Q_d$  beschrieben werden kann.

### 6.1.3 Messflächengröße und Reflexionscharakterisierung durch Reflexionsgrade und gerichtete Reflexion

Deutlich geringere Zusammenhänge zwischen der Unsicherheit des Messwertes und der Größe der Messfläche in Bezug zur zu charakterisierenden Straßenfläche treten für Reflexionsgrade auf. Die Ausprägung des Reflexionsgrades, operationalisiert beispielsweise über die Erfassung von Leuchtdichtefaktoren als  $\rho(d/45)$ , nimmt ab etwa  $50\text{cm}^2$  gemessener Straßenfläche stabile Ausprägungen mit Unsicherheiten  $\rho \pm 0,01$  bezogen auf den Mittelwert augenscheinlich homogener Straßenflächen bis etwa  $1\text{m}^2$  an. Um das Flächenmittel einer augenscheinlich homogenen Straße bezüglich  $100\text{m}^2$  mittels Reflexionsgrad und der Unsicherheiten  $\rho \pm 0,01$  zu beschreiben, genügt die Messung von etwa 100 bis  $150\text{cm}^2$ . Dies entspricht etwa einem Zehntausendstel der zu charakterisierenden Fläche.

Für die Reflexion bei gerichteter Beobachtung und gerichteter Beleuchtung zeigt sich ein zweigeteiltes Bild hinsichtlich der Zusammenhänge zwischen der Unsicherheit des Messwertes und der Größe der Messfläche in Bezug zur zu charakterisierenden Straßenfläche. Ausschließlich gestreute Reflexion tritt an der Straßenoberfläche auf, wenn der dreidimensionale Lichtweg, ausgehend von der Lichtquelle, über die Oberfläche und hin zum Beobachter keine spiegelnden Reflexionsanteile aufweist. Dies ist bei der Rückwärtsreflexion aus Beobachtersicht der Fall, wie sie durch  $R_L$  beschrieben werden kann. Gibt es jedoch Anteile spiegelnder Reflexion, wie etwa in r-Tabellen oder im Kennwert S1, zeigen sich deutlich andere Zusammenhänge.

Für ausschließlich gestreute Reflexion an der Straßenoberfläche, nachfolgend am Kennwert  $R_L$  diskutiert, erlauben Messungen von Leuchtdichtekoeffizienten für Straßenflächen von  $50\text{cm}^2$  belastbare Aussagen mit Unsicherheiten deutlich kleiner als 5%. Es sind auch dies die kleinsten im Sinne der Reflexion zweckmäßig charakterisierbaren Teilflächengrößen. Auf die Ebene von  $1\text{m}^2$  Straßenoberfläche übertragen, zeigen sich für die Charakterisierung durch  $R_L$  starke Inhomogenitäten der Fläche. Aufgrund des sehr geringen Beobachtungs- und Beleuchtungswinkels dürfte sich die Ebenheit der Straße stärker auswirken als bei den bis hier besprochenen Reflexionskennwerten. Der Flächenmittelwert wird durch die Messung von 1% dieser Fläche ( $100\text{cm}^2$ ) mit einer Unsicherheit von  $R_L \pm 35\%$  ermittelt. Die Erfassung von  $250\text{cm}^2$  Messfläche führt zu einer Unsicherheit des diesbezüglichen Messwertes bezüglich des Mittelwertes der Fläche von  $R_L \pm 0,002\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ . Eben diese Messflächengröße muss den Ergebnissen nach ebenfalls herangezogen werden, um die Ausprägung von  $R_L$  innerhalb einer  $100\text{m}^2$  beinhaltenden, augenscheinlich homogenen Straßenfläche mit der Unsicherheit  $R_L \pm 0,002\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  respektive etwa  $\pm 15 \dots 20\%$  zu beschreiben. Da auf dieser Betrachtungsstufe von  $100\text{m}^2$  der tatsächliche Flächenmittelwert im Projekt jedoch nicht erhoben wurde, sind diese Werte vorsichtig zu interpretieren, wie die entsprechenden Befunde bezüglich des Kennwertes  $Q_d$  gezeigt haben. Daher sind zur Gewinnung diesbezüglicher Erkenntnisse entsprechende Felduntersuchungen anzulegen.

Für die Beschreibung der Straßenreflexion durch gerichtete Beleuchtung und Beobachtung unter expliziter Berücksichtigung spiegelnder Reflexion (r-Tabellen, S1) wurden bei den Laboruntersuchungen etwa 5% Unsicherheit bezogen auf  $100\text{cm}^2$  Messfläche ermittelt. Es sind dies somit die in ihrer Belastbarkeit am stärksten von der Größe der Messfläche abhängenden Reflexionskennwerte. Für diese sind keine in situ Messungen erfolgt, da sie unter Einhaltung der dafür notwendigen lichttechnischen und geometrischen Bedingungen unter Berücksichtigung der Durchführbarkeit entsprechender Messungen im Feld mit den derzeit zur Verfügung stehenden Mitteln nicht realisiert werden können.

Auf Basis der Befunde aus den Laboruntersuchungen und diesbezüglich bei den Feldmessungen stimmig replizierter Verhältnisse zwischen den Ausprägungen der anderen Reflexionskennwerte, konnte eine Unsicherheit jedoch zumindest abgeschätzt werden. Diese beträgt etwa 30-40% für die Werte einer r-Tabelle und von S1 für den Fall, dass diese an einer Messflächensumme von  $100\text{cm}^2$  erhoben und auf Straßenflächen ab etwa  $1\text{m}^2$  übertragen werden. Erfolgt die Messung an  $250\text{cm}^2$ , wurde als diesbezügliche Unsicherheit etwa 25-30% abgeschätzt. Wird diese Abschätzung mit der gebotenen Vorsicht im Kontext der anderen Befunde erweitert, folgt daraus, dass für belastbare Reflexionscharakterisierungen von typischen Straßenoberflächen mit hoher Wahrscheinlichkeit Messflächen von  $\geq 500\text{cm}^2$  benötigt werden. Da es sich um zentrale Grundlagen der Leuchtdichtetechnik für die Straßen- und Tunnelbeleuchtung handelt, sollten hierzu dringend und zeitnah weiterführende Untersuchungen stattfinden.

#### 6.1.4 Beschreibungsmöglichkeiten bei Messungen im Labor und in situ

Alle im Rahmen des Projektes betrachteten Reflexionskennwerte für Straßen können im lichttechnischen Laboren oder anderen entsprechend qualifizierten Messstellen erhoben werden. Dies setzt voraus, dass Straßenproben ausreichender Flächengröße im Labor zur Verfügung stehen. Insofern es sich um Proben aus realen Straßenoberflächen handeln soll, werden diese in aller Regel als Bohrkernproben gewonnen. Auch für im Straßenbaulaboratorium hergestellte Probeoberflächen besteht

die Frage, welche Flächengrößen für lichttechnische Messungen zur Verfügung gestellt werden müssen.

Hier liegt auf Basis der vorliegenden Befunde zunächst die Unterscheidung zwischen den Beschreibungsansprüchen „Materialbewertung“ und „Anlagencharakterisierung“ nahe. Mit dem Anspruch Materialbewertung verbindet sich primär die Charakterisierung eines Baustoffes. Diesbezüglich dürften Flächen von  $\leq 1\text{m}^2$  relevant sein, die als Materialproben bis zu kleineren Teilflächen von Straßen vorliegen können. Der Anspruch Anlagencharakterisierung kann darüber hinaus Aspekte der Straßenherstellung, des Straßenzustandes und insbesondere das komplexe Zusammenspiel innerhalb der in Kapitel 2.1 diskutierten Anwendungsfälle beinhalten. Hierfür sind näherungsweise größere Teilflächen der Größenordnung  $A \approx 100\text{m}^2$  zu betrachten.

Die mittleren Leuchtdichtkoeffizienten  $Q_d$  und  $Q_0$  sind beispielsweise zum Zwecke der Materialbewertung an Messflächen zu erheben, die zwei übliche Bohrkern mit  $d=15\text{cm}$  erfordern (Tabelle 19).

Tabelle 19: Messflächengrößen für Reflexionsmessungen nach Kennwert und Bewertungsanspruch (primär auf Labormessungen bezogen)

Kennwert	Materialbewertung (bis ca. $1\text{m}^2$ Fläche)	Anlagenbewertung (ca. $100\text{m}^2$ Fläche)
$Q_d$ ( $Q_0$ )	$\geq 250\text{cm}^2$	$\geq 1\text{m}^2$
$\rho$	$\geq 50\text{cm}^2$	$\geq 150\text{cm}^2$
$R_L$	$\geq 150\text{cm}^2$	keine ausreichenden Erkenntnisse
r-Tabelle und S1	$\geq 500\text{cm}^2$	keine ausreichenden Erkenntnisse

Eine Anlagencharakterisierung durch  $Q_d$  wird als Labormessung kaum realistisch durchführbar sein, da Messflächen abzubilden sind, die mehr als 50 Bohrkernen üblicher Größe entsprechen. Diese Beschreibung wird somit in der Regel Feldmessungen vorbehalten bleiben.

Sowohl zur Materialbewertung als auch Anlagencharakterisierung durch den Reflexionsgrad  $\rho$  genügt die Fläche eines üblichen Bohrkerns. Für die Anlagencharakterisierung sind zur Abbildung unterschiedlicher Stellen wahrscheinlich trotzdem zwei Proben empfehlenswert, wobei diese jeweils nicht vollflächig gemessen werden müssen.

Den vorliegenden Erkenntnissen nach ist eine Materialbewertung mittels  $R_L$  an einem Bohrkern üblicher Größe von  $d=15\text{cm}$  möglich. Aufgrund des starken Bezuges zur kleinflächigen Oberflächengeometrie sind diesbezügliche Labormessungen wahrscheinlich mit eingeschränktem Aussageumfang verbunden. Für belastbarere Aussagen müsste die eigentliche Messstelle (Bohrkern) inklusive den angrenzenden Bereichen ins Labor gebracht werden. Dies ist mechanisch mit erheblichen Aufwänden verbunden, so dass es eher unrealistisch sein dürfte. Möglicherweise könnten auch Aussagen zur Ebenheit sinnvolle Zusatzinformationen darstellen, die den erzielbaren Aussageumfang bei endlicher Messflächengröße zweckmäßig erweitern. Wie die Untersuchungen gezeigt haben, sind mittels mobiler  $R_L$ -Messung brauchbare Aussagen zu erhalten, so dass dies für viele Fälle möglicherweise genügen kann. Für den Aspekt Anlagencharakterisierung sind auf dem derzeitigen Informationsstand keine Aussagen über charakteristische Flächengrößen möglich. Hier braucht es ebenfalls weitere Forschung.

Für die Reflexionskennwerte r-Tabelle und S1 sind zum derzeitigen Kenntnisstand Messflächengrößen ebenfalls nur unter dem Aspekt Materialbewertung abschätzbar. Der vorliegenden Befundlage gemäß sind hierfür Messflächen notwendig, die beispielsweise mindestens vier übliche Bohrkern mit  $d=15\text{cm}$  erfordern. Für den Aspekt Anlagencharakterisierung sind derzeit keine Abschätzungen möglich.

### 6.1.5 Befunde zum Bewertungshintergrund

Schließlich ist ein auf dem derzeit vorliegenden Kenntnisstand anfänglicher Bewertungshintergrund für die Reflexionskennwerte anzugeben, darunter insbesondere für die bislang in der Praxis nicht angewendeten Kennwerte.

Für  $Q_d$  können aller vorliegenden Erkenntnis nach die für  $Q_0$  bestehenden Einteilungen angewendet werden (FGSV 2010). Eine Anpassung im mittleren Niveau könnte etwa im Bereich  $-5\%$  für  $Q_d$  bezüglich der  $Q_0$ -Referenz erfolgen, wäre jedoch vor einem erweiterten Erfahrungshintergrund zu diskutieren. Der Bewertungshintergrund beinhaltet im Wesentlichen für  $Q_0$  beziehungsweise  $Q_d$  die Bereiche, die anhand der Klassengrenzen bei  $0,07$  und  $0,09\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  eingeteilt werden können. Die Erweiterung sowohl in niedrigere Ausprägungsbereiche

mit einer Klassengrenze bei  $0,05\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$  als auch höhere Ausprägungen mittels  $0,11\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$  erscheinen vor den im Projekt gesammelten Befunden zweckmäßig. In Hinblick auf die Klasseneinteilungen für Markierungen (DIN EN 1436) sowie insbesondere den nationalen Anforderungen der ZTV M (FGSV 2013) wäre zur Abbildung eines direkten Bezuges zudem eine Klasseneinteilung für  $Q_d$  beziehungsweise  $Q_0$  im Bereich  $0,13\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$  sowie  $0,16\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$  sinnvoll, wie die im Projekt abgebildete Bandbreite der  $Q_d$ -Ausprägungen von Straßenoberflächen zeigt.

Für den Reflexionsgrad  $\rho$  fehlen Außenkriterien, anhand denen eine Bewertung erfolgen könnte. Lediglich aus dem Bereich Barrierefreiheit kann  $\rho(\text{dif}/\alpha) </> 0,5$  herangezogen werden (vgl. Darstellungen in Kapitel 2.1.4). Wie die Messungen zeigen, wird diese Grenze jedoch von typischen Straßenoberflächen nicht erreicht. Sollten für Straßen Werte  $\rho > 0,5$  angestrebt werden, erfolgen im Sinne einer „Sonderkonstruktion“ aller Wahrscheinlichkeit nach gesonderte Bewertungen, so dass es eine routinemäßige Bewertung danach eher nicht braucht.

Rein pragmatisch können aus den Anhaltspunkten in der Literatur sowie den Erfahrungen des vorliegenden Forschungsberichtes für Straßen die Bereiche  $\rho < 0,1$  als eher geringe Ausprägungen und Werte  $\rho > 0,2$  als eher höhere Ausprägung angesehen werden. Sollte es zu Klassifizierungen kommen, sollten aufgrund der innerhalb einer Straßenoberfläche gefundenen Schwankungen Klassenbreiten von nicht weniger als etwa  $\Delta\rho = 0,03$  angesetzt werden.

Schließlich kann für  $R_L$  derzeit ebenfalls kein relevanter Bezug oder ein bedeutsames Außenkriterium hergeleitet werden. Der Bezug zu Markierungen könnte prinzipiell hergestellt werden. Da jedoch praktisch alle untersuchten Straßenoberflächen weniger als die Hälfte und bis auf wenige Laborproben alle untersuchten Straßen kaum mehr als ein Fünftel des Mindestwertes von  $R_L$  für Markierungen im richtliniengemäßen Gebrauchszustand (FGSV 2013) zeigten, ist ein solcher Bezug als Bewertungshintergrund für Straßenoberflächen wenig relevant. In Berücksichtigung der relativ hohen Messunsicherheiten könnte aus den im Projekt gesammelten Erfahrungen heraus für Straßenoberflächen pragmatisch eine Unterscheidung in eher geringe Ausprägungen  $R_L \leq 0,01\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$  sowie eher

höhere Ausprägungen  $R_L \geq 0,02\text{cd}/(\text{m}^2\cdot\text{lx})$  vorgenommen werden.

## 6.2 Mobile Messungen von Reflexionskennwerten

### 6.2.1 Aussageumfang durch Messungen in situ

Wie in Kapitel 1 ausgeführt, sind mit Reflexionsmessungen in situ eine Reihe von Vorteilen verbunden. Es wurden jedoch auch Grenzen angesprochen. Im Rahmen des Projektes konnten zu diesen Aspekten bedeutsame weiterführende Erkenntnisse erzielt werden.

So konnte gezeigt werden, dass mobile Messungen charakteristischer Reflexionskennwerte für die überwiegende Mehrheit der in Kapitel 2.1 angeführten Anwendungsfälle mit akzeptabler Güte möglich sind. Für den mittleren Leuchtdichtekoeffizienten  $Q_d$  sowie den Reflexionsgrad  $\rho$  wurden sogar je zwei Varianten einer messtechnischen Umsetzung erfolgreich verglichen und die praktische Äquivalenz der Ausprägungen auf Ebene größerer Straßenflächen gezeigt.

Auch bezüglich der Anlässe und Grenzen mobiler Messungen wurden wertvolle Erkenntnisse begründet. So zeigen die Ergebnisse, dass nicht nur messtechnisch, sondern auch bezüglich des damit abbildbaren Aussageumfanges Unterschiede zwischen Labor- und Feldmessungen bestehen. Die im vorhergehenden Kapitel 6.1 aufgeführte Unterscheidung in Material- und Anlagencharakterisierung der Straßenreflexion ist bereits eine sichtbare Folge dieser Erkenntnisse.

So zeigt sich etwa, dass bestimmte Beschreibungen der Straßenreflexion realistisch nur durch mobile Messungen erfolgen können und andere aus messtechnischen Gründen im Labor durchgeführt werden müssen. Für wiederum andere Reflexionskennwerte scheint kein bedeutsamer Unterschied zwischen Labor- und Feldmessung zu bestehen.

Letzteres betrifft den Reflexionsgrad  $\rho$ , überwiegend als Leuchtdichtefaktor  $\rho(d/45)$  operationalisiert. Die bei Messungen im Projekt erhobenen Reflexionsgrade zeigen keine Anhaltspunkte, nach denen im Aussageumfang zwischen Feld- und Labormessungen differenziert werden müsste.

Dagegen zeigen mittlere Leuchtdichtekoeffizienten  $Q_d$  auf Ebene relevanter Flächengrößen von Straßen Ausprägungsverteilungen, die kaum ausschließlich mit materialtechnischen Aspekten im Zusammenhang stehen dürften. Sie könnten vielmehr eher der Herstellung, der Bewitterung und der Nutzung geschuldet sein. Diese Kennzeichen können den vorliegenden Befunden nach zweckmäßig nur durch mobile Messungen ermittelt werden. Dies dürfte aller Wahrscheinlichkeit nach in mindestens dem für  $Q_d$  beobachteten Umfang auch für  $Q_0$  der Fall sein.

In noch stärkerem Maße dürfte dies für die Rückreflexion bei kraftfahrzeugeigener Beleuchtung  $R_L$  relevant sein. Hier sind Erhebungen im Labor an kleinflächigen Proben, wie etwa Bohrkernen, messtechnisch möglich. Wie die mobilen Messungen jedoch nahelegen, wirkt sich die komplexe Geometrie der Oberfläche bedeutsam aus. Insbesondere die Ebenheit dürfte eine relevante Rolle spielen, so dass dadurch mit einer rein materialorientierten Beschreibung wahrscheinlich nur ein begrenzter Aussageumfang erreicht werden kann. Um diesen Umstand auch auf Ebene größerer Straßenflächen abschätzen zu können, sind weiterführende Untersuchungen notwendig.

Schließlich können komplexe Reflexionsverteilungen, wie  $r$ -Tabellen, aus messtechnischen Gründen nur im Labor an Proben erhoben werden. Ein Vergleich zwischen dem durch Labormessungen und dem bei Feldmessungen erzielbaren Aussageumfang ist daher nicht möglich. Die Vergleiche mit anderen Reflexionskennwerten legen jedoch nahe, dass für die Beschreibung auf Ebene größerer Straßenflächen ebenfalls bedeutsame Verteilungsaspekte gegenüber der rein materialtechnischen Komponente hinzukommen dürften. Konkrete Abschätzungen dazu liegen derzeit nicht vor. Sie sind jedoch dringend in Form weiterführender Forschung anzuregen, da es sich sowohl um einen bezüglich der Reflexionsbeschreibung von Straßenoberflächen als auch insgesamt in der Leuchtdichtetechnik der Straßen- und Tunnelbeleuchtung zentralen Umstand handelt.

### 6.2.2 Geräte und praktisches Messvorgehen

Weiterführend können auch zu gerätetechnischen und messpraktischen Aufwänden mobiler Reflexionsmessungen an Straßenoberflächen Erkenntnisse begründet werden.

Für die umgesetzten Kennwerte sind für eine augenscheinlich homogene Straßenoberfläche bei den oberhalb als notwendig abgeschätzten Messflächensummen in situ Messungen zum Zwecke der Materialcharakterisierung in etwa 15 Minuten realistisch, wenn Aufbauten dafür optimiert werden und der weitere Aufwand durch Einrichtung, Sicherung und Dokumentation der Messstelle zunächst unbeachtet bleibt.

Ein zur Erhebung von Reflexionsgraden notwendiger Aufbau, der diese beispielsweise mittels Leuchtdichtefaktoren bei diffuser Beleuchtung und Beobachtung unter größeren Beobachtungswinkeln  $\alpha \geq 45^\circ$  ermittelt, ist gerätetechnisch nicht sehr kompliziert und lässt sich für mobile Messungen konzipieren. Die für eine belastbare Beschreibung notwendigen Messfeldgrößen lassen sich bequem durch mehrere Messungen erheben, so dass zugunsten der Handlichkeit eine gegenüber dem hier im Projekt genutzten Aufbau kleinere Gerätegröße genutzt werden könnte.

Die in situ-Messungen zur Ermittlung von  $Q_d$  und  $\rho(d/45^\circ)$  könnten auch, insofern als dann etwas größerer Aufbau entsprechend konzipiert, ohne maßgebliche Beeinträchtigung bei einer Beleuchtungskonstellation simultan erfolgen. Aus rein lichttechnischen Erwägungen heraus ist zudem die Kombination mit der  $R_L$ -Messung, wie im genutzten Markierungsmessgerät, nicht ausgeschlossen.

Bezüglich  $Q_d$  legt die im Projekt für das verwendete mobile Gerät ermittelte Regressionsbeziehung (vgl. Darstellungen in Kapitel 5.4) nahe, dass weiterführende Untersuchungen erfolgen müssen.  $Q_d$  kann, wie ebenfalls im Projekt gezeigt, zudem flächig durch kombinierte Leuchtdichte- und Beleuchtungsstärkemessungen erhoben werden, wobei dies beim derzeitigen Kenntnisstand auf besondere, nicht sehr häufige Witterungsbedingungen angewiesen ist.

Erfahrungsgemäß kommt ein großer finanzieller Aufwand aus der einzusetzenden Lichtmesstechnik. Hier können durch weitere Untersuchungen, beispielsweise zur notwendigen Anpassungsgüte der Messtechnik an die genormte spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion, mit hoher Wahrscheinlichkeit wertvolle Erkenntnisse und möglicherweise Vereinfachungen begründet werden.

### 6.2.3 Einordnung mobiler Reflexionsmessungen an Straßenoberflächen

Im Fazit belegt die vorliegende Untersuchung einen bei Messungen in situ realistisch umsetzbaren Kennwertekanon für die Beschreibung der Reflexion von Straßenoberflächen. Dieser umfasst den Reflexionsgrad, mittlere Leuchtdichtekoeffizienten bei diffuser Beleuchtung, hier exemplarisch  $Q_d$ , sowie die Rückreflexion bei kraftfahrzeugeigener Beleuchtung, diesbezüglich ebenfalls exemplarisch  $R_L$ .

Die Grenzen der mobilen Reflexionsmessung decken sich mit den in der internationalen Literatur beschriebenen Einschränkungen. Sie betreffen insbesondere die Feldmessung gerichteter Leuchtdichtekoeffizientenverteilungen ( $r$ -Tabelle) und betreffen daher auch die ohne Näherung nur daraus zu ermittelnden Kennwerte  $S_1$  und  $Q_0$ .

Für viele diesbezügliche Anwendungen können jedoch auch Leuchtdichteberechnungen unter Verwendung idealisierter  $r$ -Tabellen erfolgen, wie sie beispielsweise international standardisiert vorliegen. Dies wiederum erfordert einerseits die Zuordnung einer Straßenoberfläche zu einer solchen Standard- $r$ -Tabelle und andererseits die Anpassung der idealisierten Tabellen an das tatsächliche mittlere Reflexionsniveau der Straße. Die Beschreibung des mittleren Reflexionsniveaus kann anstelle  $Q_0$  in guter Näherung auch mittels  $Q_d$  erfolgen, wie im Projekt gezeigt.

Die Zuordnung einer Standard- $r$ -Tabelle setzt die Kenntnis des Glanzverhaltens voraus, ausgedrückt als Parameter  $S_1$ , dessen Messung mit den umschriebenen Einschränkungen verbunden ist. Durch die relativ spezielle Beleuchtungsgeometrie ist die Nutzung gegebener Lichtquellen, wie beispielsweise des Tageslichtes eher nicht realistisch. Deshalb wird es wohl für diesbezügliche in situ-Messungen Aufbauten mit gerichteter Beleuchtung geben müssen. Diese sind einfacher und aller Erkenntnis nach hinsichtlich der Ergebnisse belastbarer, wenn nicht unter  $\alpha=1^\circ$  gemessen werden muss. Die im Rahmen des Projektes ermittelten Bezüge zwischen  $S_1(\alpha=1^\circ)$  und  $S_1(\alpha=3^\circ)$  eröffnen hier möglicherweise eine gewisse Erleichterung, auch diesen Kennwert einer mobilen Messung zugänglich zu machen. Insbesondere könnte dann unter Umständen auch eine gerätetechnische Kombination

mit den anderen Kennwerten möglich sein. Entsprechende Forschung ist unbedingt anzuregen.

Für die Bewertung mobiler Messung von Reflexionskennwerten ist außerdem der Umfang einer praxisbezogenen sinnvollen Unsicherheit zu diskutieren. Zunächst rechtfertigen die in der Untersuchung begründeten Unsicherheiten mobiler Reflexionskennwerte prinzipiell die Aufrechterhaltung der Bewertungshintergründe, wie sie im vorhergehenden Kapitel beschrieben wurden.

Die Ergebnisse haben jedoch auch gezeigt, dass die Unsicherheit deutlich davon abhängt, was beschrieben werden soll. Die Unsicherheit einer Messung, egal ob in situ oder auch im Labor durchgeführt, unterscheidet sich danach, bezüglich welcher Bezugsflächen die Reflexion beschrieben werden soll. Pauschale Unsicherheiten können somit nicht angegeben werden. Vom Prinzip her hat sich gezeigt, dass je größer die zu beschreibende Fläche ist, umso größer auch die Messfläche sein muss. Es scheint so, dass dieser Faktor mit größerer Fläche tendenziell abnimmt.

Relativ zwischen den Kennwerten hat sich gezeigt, dass Reflexionsgrade die geringsten Unsicherheiten aufweisen, gefolgt von den mittleren Leuchtdichtekoeffizienten bei diffuser oder ähnlich räumlicher Beleuchtung ( $Q_d$ ,  $Q_0$ ). Danach folgen die Leuchtdichtekoeffizienten, die keinen direkten Bezug zu spiegelnder Reflexion aufweisen, wie etwa  $R_L$ . Kennwerte mit Bezug zu spiegelnder oder glänzender Reflexion ( $r$ -Tabelle,  $S_1$ ) weisen die größten Unsicherheiten auf. Dies trifft aller vorliegenden Kenntnis nach auf mobile Messungen in vergleichbarem Maße zu, wie es für Labormessungen gilt. Ein großer diesbezüglicher Vorteil von Feldmessungen könnte darin bestehen, dass potentiell größere Flächenausschnitte als im Labor untersucht werden können.

Dieser Aspekt lässt schließlich die Gegenüberstellung mobiler Messungen zu Labormessungen in einem differenzierten Licht erscheinen. In der Literatur werden Feldmessungen gegenüber Messungen im Labor oft mit geringerer Messgüte bewertet. Die hier begründeten Erfahrungen zeigen jedoch, dass infolge der Abbildung größerer Flächen die Güte sogar besser sein kann oder bestimmte Erkenntnisse durch Labormessungen gar nicht erlangt werden können.

Dies führt abschließend zu einer kurzen Betrachtung des Praxisbezuges der mobil messbaren Kennwerte. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden alle untersuchten Kennwerte gemäß ihrer lichttechnischen Definition abgebildet oder durch Bezugsmessungen konsistent an diese angeschlossen. Die Bedeutsamkeit der Kennwerte in den verschiedenen Anwendungshintergründen wurden ausführlich in Kapitel 2.1 dargelegt. Darüber hinaus ist einzuschätzen, dass sich Reflexionsmessungen von Straßenoberflächen derzeit auf einem Stand von Technik und Praxis befinden, bei dem ausreichende Erfahrungen im Umgang mit den meisten der Kennwerte erst noch gesammelt werden müssen.

Wie demonstriert, sind Messungen in situ möglich und die absehbaren Aufwände dafür sind überschaubar. Aller Voraussicht nach werden sie sich bei Vorliegen gezielt darauf abstellender Messgeräte weiter reduzieren lassen. Jedoch werden erst häufigere Messungen Erfahrungen ermöglichen, auf deren Basis dann bewertet werden kann, welche Merkmale, Zusammenhänge und schließlich Bedeutsamkeiten eine Berücksichtigung welcher Reflexionskennwerte als relevante Oberflächeneigenschaft von Straßen rechtfertigen.

Im Moment scheint durch mobile Messungen eine sinnvolle Ergänzung und Erweiterung der bislang nahezu ausschließlich im Labor durchgeführten Reflexionscharakterisierungen von Straßenoberflächen möglich. Weder ist ein vollständiger Ersatz von Labormessungen durch Feldmessungen absehbar noch eine Abdeckung des in situ erreichbaren Beschreibungsumfanges im Rahmen von Labormessungen.

### 6.3 Anregungen für die Weiterentwicklung des Regelwerkes

Hauptbezug für die nachfolgenden Betrachtungen ist das Arbeitspapier Reflexionseigenschaften von Gesteinskörnungen und Oberflächen aus Asphalt. (FGSV 2010). Die Anregungen umfassen die Überarbeitung und Ergänzung vorhandener Inhalte sowie die Ergänzung neuer Aspekte. Die nachfolgend angesprochenen Punkte verstehen sich überwiegend als Zusammenfassung der diesbezüglichen Inhalte und Hinweis auf die bereits teilweise ausführlich in den vorhergehenden Abschnitten 6.1 und 6.2 des vorliegenden Berichtes angesprochenen Aspekte.

Das Arbeitspapier (AP) behandelt formal nur die Reflexionseigenschaften von Asphaltoberflächen. Eine Erweiterung auf Betonoberflächen erscheint nach den vorliegenden Befunden unproblematisch und auch folgerichtig. Darüber hinaus behandelt das Papier auch die Reflexionseigenschaften von Gesteinen. Hierzu kann aus dem vorliegenden Forschungsprojekt kein Input beigesteuert werden.

Das AP betrachtet zunächst die Bedeutung der Reflexionseigenschaften von Straßen. Hierzu kann angeregt werden, Beschreibungen der Zielgrößen und Anwendungsfälle, wie in Kapitel 2.1 des vorliegenden Berichtes vorgestellt, in angepasster Form aufzunehmen. Die zugehörigen Kennwerte werden im AP im dortigen Kapitel 4 behandelt. Die zu den ergänzten Zielgrößen und Anwendungsfällen zugehörigen Kennwertebeschreibungen wären an dieser Stelle aufzunehmen.

Das vierte Kapitel im AP beinhaltet auch die Definition des bislang überwiegend verwendeten Näherungswertes für  $Q_0$  mit der Bezeichnung „ $Q_{0,Range}$ “. Hier sollte zunächst die in der Literatur bereits bekannte und im Rahmen des vorliegenden Projektes bestätigte Unsicherheit der Näherung von  $Q_0$  durch  $Q_{0,Range}$  aufgeführt werden. Darüber hinaus wäre  $Q_d$  als erheblich bessere Näherung für  $Q_0$  vorzuziehen. Dieser Kennwert kann zudem in Labor und Feld erhoben werden. Auch die definitionsgemäße Messung von  $Q_0$  wäre zu ergänzen.

Voraussetzung für einen Ersatz von  $q_{0,Range}$  durch  $Q_d$  sind jedoch weiterführende Untersuchungen über die Unsicherheit, die mit der Messung von  $Q_d$  mittels der diversen dafür am Markt verfügbaren Messgeräte einhergeht, die im Moment primär für die Messung an Markierungen optimiert sind. Dies ist auch, wie im vorliegenden Projekt erfolgt, durch den Anschluss von Geräten an einen bestehenden Messhintergrund an einer ausreichenden Bandbreite unterschiedlicher Straßenoberflächen zu erreichen. Ein entsprechendes Prozedere dafür müsste im Regelwerk hinterlegt werden. Ein solches Vorgehen ist nicht nur für  $Q_d$ , sondern für alle Reflexionskennwerte möglich und empfehlenswert. Es könnte darüber hinaus auch als Basis für Messvergleiche und Ringversuche dienen, die als Anschluss neuer Messstellen und zur Qualitätssicherung aller messenden Institutionen dienen können. Der Ansatz ist prinzipiell im AP bereits durch das

Vorgehen „Relativmessung (Messung gegen eine kalibrierte Vergleichsprobe)“ angelegt.

Das fünfte Kapitel im AP behandelt die Klassifizierung. Hier könnten die ausführlich am Ende von Kapitel 6.1 des vorliegenden Berichtes diskutierten Anregungen bezüglich erweiterter und ergänzter Bewertungshintergründe der Reflexionskennwerte aufgenommen werden.

Umfangreiche Erweiterungen könnten die Abschnitte des AP erfahren, in denen die Messung der Reflexionskennwerte behandelt wird. Möglicherweise kann es günstig sein, Teile davon als separate Arbeitsanleitung zu konzipieren. In jedem Fall sollten Differenzierungen nach Labor- und Feldmessung sowie Material- und Anlagencharakterisierung erfolgen. Es wären sowohl die relevanten Anforderungen an das Messvorgehen und die einzusetzenden Geräte als auch insbesondere Ausführungen zu notwendigen Messfeldgrößen und Beschreibungsunsicherheiten bezüglich der möglichen Zielgrößen aufzunehmen.

## 6.4 Ausblick

Der Ausblick umfasst, ausgehend vom vorliegend dokumentierten Forschungsstand, vor allem Aspekte der Messpraxis und weiterführende Untersuchungen. Eine größere Anzahl diesbezüglicher Anregungen wurde bereits als Ausblick am Ende der diversen Diskussionsbeiträge innerhalb des vorliegenden Kapitels 6, als auch an anderen Stellen im vorliegenden Bericht aufgeführt und sollen hier nicht wiederholt werden.

Auf einige Punkte ist jedoch gesondert hinzuweisen. Dies betrifft den Aspekt „typischer Inhomogenität“ von Straßen. In der vorliegenden Arbeit wurden typische Merkmale wie Rollspuren als Inhomogenitätsbeitrag zunächst ausgeschlossen. Um hierzu differenziertere Empfehlungen, beispielsweise für die Entnahme von Bohrkernen oder die Lage von Messpunkten bei in situ-Messungen geben zu können, wären weiterführende Befunde wünschenswert.

Von besonderer Relevanz, daher bereits mehrfach betont und hier noch einmal wiederholt, dürfte die Frage der näherungsweisen in situ-geeigneten Beschreibung räumlicher Reflexion von Straßenoberflächen bezüglich der Leuchtdichtetechnik in der Straßen- und Tunnelbeleuchtung sein (r-Tabellen).

Damit verbunden ist nicht nur die Frage der messtechnischen Charakterisierung an sich, sondern auch die im Moment nicht abschätzbare diesbezügliche Zielgröße in Form konsistent reflexionsbezogen beschreibbarer Flächengrößen.

Ebenfalls in diesem Kontext angesiedelt, wenn auch von dazu im Vergleich geringerer Bedeutung, ist die Frage der notwendigen Reflexionsbeschreibung für die Straßenhelligkeit aus Nutzersicht bei Tageslicht, das nicht näherungsweise diffus ist. Hier wären Untersuchungen nötig, anhand welcher Kennwerte sowohl eine Beschreibung möglich, als auch Leuchtdichtekalkulation genügender Güte erfolgen könnten, sowie dazu, wie diese gegebenenfalls an welchen Messflächengrößen in situ erhoben werden könnten.

Insgesamt erscheint es wünschenswert, in Zukunft differenziertere Informationen auf der Zielsetzungsseite als indirekt notwendigen Güte- und Charakterisierungsanspruch für die Reflexionsbeschreibung von Straßenoberflächen vorliegen zu haben. Dies betrifft sowohl die Messpraxis als auch die Forschung. Viele Schlussfolgerungen über Ansprüche an die Reflexionsbeschreibung beziehen sich in Ermangelung von Angaben, was nötig ist, primär auf das, was möglich ist. Das führt jedoch im Detail zu möglicherweise unnötigem Aufwand, der einerseits darin bestehen kann, dass eventuell Merkmale zu differenziert beschrieben werden, als auch darin, dass Beschreibungen erfolgen, die den Ansprüchen an sie nicht genügen können.

Unter anderem auch dazu könnten vermehrt hergestellte Bezüge zwischen Reflexionseigenschaften und anderen Oberflächeneigenschaften von Straßen, insbesondere Textur und Ebenheit sowie gegebenenfalls des Oberflächenbildes beitragen.

## 7 Literatur

- CIE 30 (1976): Calculation and measurement of luminance and illuminance in road lighting. Wien: Internationale Beleuchtungskommission.
- CIE 30-2 (1990): Calculation and measurement of luminance and illuminance in road lighting. 2nd edition. Wien: Internationale Beleuchtungskommission.
- CIE 100 (1992): Fundamentals of the visual task of night driving. Wien: Internationale Beleuchtungskommission.
- CIE 144 (2001): Road surface and road marking reflection characteristics. Wien: Internationale Beleuchtungskommission.
- CIE 150 (2017): Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light from Outdoor Lighting Installations, 2nd Edition. Wien: Internationale Beleuchtungskommission.
- CIE/PIARC (1983). Road Surfaces and Lighting. Wien: Internationale Beleuchtungskommission.
- de Boer, J., Panhans, B., Reith, A., Otto, A., & Wellner, F. (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. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Bauphysik.
- DIN 5035-6 (2006-11): Beleuchtung mit künstlichem Licht – Teil 6: Messung und Bewertung. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 5036 (mehrere Teile): Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 32975 (2009): Gestaltung visueller Informationen im öffentlichen Raum zur barrierefreien Nutzung. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 32984 (2011): Bodenindikatoren im öffentlichen Raum. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 1436 (2018): Straßenmarkierungsmaterialien – Anforderungen an Markierungen auf Straßen und Prüfverfahren. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 16584-1 (2017): Bahnanwendungen – Gestaltung für die Nutzung durch PRM - Allgemeine Anforderungen – Teil 1: Kontrast. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- Erbay, A. (1974): Atlas der Reflexionseigenschaften von Fahrbahndecken. Berlin: Institut für Lichttechnik der Technischen Universität Berlin.
- Fachausschuss Außenbeleuchtung (1980): Straßenreflektometer-Messvergleiche. Hamburg: Lichttechnische Gesellschaft e.V.
- FGSV (1986): Anleitung zur Prüfung lichttechnischer Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen und Mineralstoffen mit dem Straßenreflektometer. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- FGSV (2010): Arbeitspapier Reflexionseigenschaften von Gesteinskörnungen und Oberflächen aus Asphalt. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- FGSV (2013): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Markierungen auf Straßen. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- Fleischer, K. (1984): Leuchtdichteverteilung auf Straßendecken durch kraftfahrzeugeigene Beleuchtung. Berlin: Fachbereich Umwelttechnik der Technischen Universität Berlin.
- Gebhardt, M., Grein, H.-J. & Nitsche, K. (2009): Dunkelheitsunfälle - Teil 3: Physiologisch-optische Grundlagen und visueller Wahrnehmungsprozess. In: Burg, H., Moser, A. (Hrsg.): Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion. 2. Aufl., Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Gibbons (1997): Influence of Pavement Reflection on Target Visibility. Waterloo: University of Waterloo.
- Gibbons, R.B.; Adrian, W.K. (1997): Influence of Observation Angle on Road Surface Reflection

- Characteristics. *Journal of the Illuminating Engineering Society* 26(2) S.139-149.
- Gundert, L. (1998): Grundlagen für ein kombiniertes Reflexions-Textur-Meßverfahren zur Bestimmung der Reflexionseigenschaften von Fahrbahnoberflächen. *Mitteilungen des Lehrstuhls für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau* Nr. 40. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule.
- Helms, R. N. (1983): Methodology for Determining Pavement Reflectivity for Roadway Luminance Calculation. Washington, DC: *Transportation Research Record* (904), S. 80-86.
- Hentschel, H.-J.; Pohlmann, R. (1968): Lichttechnische Kennzahlen bituminöser Fahrbahndecken. *Straße und Autobahn* (7), S. 239-244.
- ISO/FDIS 21542 (2011): Building construction — Accessibility and usability of the built environment. Geneva: International Organization for Standardization.
- Jebas C., Schellinger S., Klinger K., Manz K. & Kooß D. (2008): Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und Nutzfahrzeugen. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW.
- Köhler, S. (2011): Messtechnische Bestimmung von Leuchtdichtkoeffizienten für Fahrbahndeckschichten unter flachen Anstrahlwinkeln. Von der Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik der Technischen Universität Berlin zur Erlangung des akademischen Grades Doktorin der Ingenieurwissenschaften- Dr. Ing. -genehmigte Dissertation.
- Köhler, S. & Neumann, C. (2013): Luminance coefficients of road surfaces for low angles of illumination. *Lighting Research and Technology* 45: S. 599-613.
- Lehnert, P. (2001): Auswirkungen der Fahrzeugdynamik auf die Lichtverteilung von Scheinwerfern. München: Herbert Utz Verlag Wissenschaft.
- LiTG 12-3 (2011): Empfehlungen für die Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen künstlicher Lichtquellen 12.3. Berlin: Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V.
- Lohaus, I., Meyer, S., Kreiser, S., Schulze, C., Rehberg, K., Glasow, N., & Vorisková, S. (2017). Visuelle Barrierefreiheit durch die Gestaltung von Kontrasten. *Forschungsinitiative Zukunft Bau*, Band F 3063. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Meseberg, H.-H. (2009): Sichtbarkeit von Fahrbahnmarkierungen. *Straßenverkehrstechnik* 1/2009, S.19-25.
- Meyer, G; Gundert, L. (1995): Der Einfluß der Rauheit von Fahrbahnoberflächen auf deren Reflexionsverhalten. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Bonn-Bad Godesberg: Bundesminister für Verkehr.
- Mielke, T., Lupascu, D. C. (2019): Einfluss der Gesteinskörnung auf das Temperaturverhalten von Asphalt. *Straße und Autobahn* (4), S. 312-318.
- Mørketrafik night traffic report No.4 (1982): Reflection properties of road surfaces in headlight illumination. The Danish Illuminating Engineering Laboratory u.a..
- Muzet, V., Paumier, J.-L., & Guillard, Y. (2008). COLURROUTE: a mobile gonio-reflectometer to characterize the road surface photometry. *International Symposium on road surface photometric characterizations*. Torino: Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica.
- OECD (1984): Road surface Characteristics: their Interaction and their Optimisation. Paris: Organisation for Economic Co-Operation and Development.
- Range, H. D. (1972). Ein vereinfachtes Verfahren zur lichttechnischen Kennzeichnung von Fahrbahnbelägen. *Lichttechnik* (2), S. 608-610.
- Range, H. D. (1973a). Vereinfachte Bestimmung der lichttechnischen Eigenschaften von Straßendecken. *Straßenverkehrstechnik* (2), S. 42-45.
- Range, H. D. (1973b). Ein Straßenreflektometer zur vereinfachten Bestimmung der lichttechnischen Eigenschaften von Fahrbahnbelägen. *Lichttechnik* (8) S. 389-391.
- Roßberg, K., Eckert, M., Carraro, U. & Bader, E. (2000): Einfluß des spektralen Absorptions- und Reflexionsgrades von Mineralstoffen auf die Wärmebi-

lanz von Fahrbahnbefestigungen. Dresden: Professur für Straßenbau der TU Dresden. Heft 10 der Schriftenreihe am Institut Stadtbauwesen und Straßenbau.

Schmidt-Clausen, H.-J.; Damasky, J.; Wambsganß, H. (1992): Einfluß der Helligkeit von Fahrbahnoberflächen auf die Seh- und Wahrnehmungsbedingungen von Kraftfahrern bei Nacht. Bonn-Bad Godesberg: Bundesminister für Verkehr.

Schoettle, B., Sivak, M. & Flannagan, M. J. (2001): High-beam and low-beam headlighting patterns in the U.S. and Europe at the turn of the millennium. Ann Arbor, Michigan: The University of Michigan (Report No. UMTRI-2001-19).

Schulze, C. (2012): Untersuchungen zu Reflexionseigenschaften von Straßendeckschichten. Vortrag und Beitrag im Tagungsband auf der 20. Gemeinschaftstagung der lichttechnischen Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz; 11.09.-14.09.2012 in Berlin.

Schulze, C. (2018): Indirekte Himmelsaufhellung und Reflexion von Straßenoberflächen. Vortrag auf der 11. LiTG Stadt- und Außenbeleuchtungstagung; 05.06.-06.06.2018 in Berlin.

Sivak, M., Flannagan, M.J., & Schoettle, B. (2000): A market-weighted description of low-beam headlighting patterns in Europe (Technical Report No. UMTRI-2000-36). Ann Arbor: The University of Michigan Transportation Research Institute.

Sørensen, K (1975): Road surface reflection data. Report No. 10. Lyngby: Lysteknisk Laboratorium.

Sørensen, K. (2017): Prototype instrument for the measurement of road surface reflection properties - version 28 August 2017. <https://nmfv.dk/wp-content/uploads/2012/03/A-prototype-instrument-for-the-measurement-of-road-surface-reflection-properties-version-28-August-2017.pdf> [zuletzt abgerufen 30.09.2019].

Wambsganß, H. (1995): Bestimmung und messtechnische Erfassung des Reflexionsverhaltens von Fahrbahnoberflächen bei kfz-eigener Beleuchtung. Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau.

Ylinen, A.; Puolakka, M.; Halonen, L. (2010): Road surface reflection properties and applicability of the R-Tables for Today's pavement materials in Finland. Light & Engineering 18(1), S.78-90.

Zehntner GmbH (2005): Bedienungsanleitung Version 1.14, Januar 2005 ZRM1013+ Retroreflektometer R<sub>L</sub>/Qd.

Ziegler (1981): Reflexion trockener und feuchter Straßenbeläge. Freiburg: Hochschulverlag.

## Bilder

- Abbildung 1: Grundformen der Interaktion von Licht mit Körpern
- Abbildung 2: Tatsächliche und für die Beschreibung durch Kennwerte idealisiert ebene Oberfläche
- Abbildung 3: Geometrie einer Beobachtung B bei Leuchtdichtebemessung
- Abbildung 4: Geometrie der Beleuchtung bei Leuchtdichtebemessung (B-Beobachtungsrichtung)
- Abbildung 5: indirekte Himmelsaufhellung
- Abbildung 6: Reflexion und Absorption von Globalstrahlung durch Straßenoberflächen
- Abbildung 7: beispielhafter Oberflächenausschnitt verschiedener Größe (Asphalt). 19  
Abbildung 8: Versuchsstand Qd
- Abbildung 9: halbräumliche Leuchtdichteaufnahme der annähernd diffusen Beleuchtung in Versuchsstand Qd
- Abbildung 10: Bezug Beleuchtungsstärke am Probenort zu elektrischer Leistung der Beleuchtung in Versuchsstand Qd
- Abbildung 11: Versuchsstand p
- Abbildung 12: Versuchsstand q-Gonio, oben: Seitenansicht mit beispielhaften Beleuchtungswinkeln  $\gamma$  und Beobachtungswinkeln  $\alpha$  (grün); unten: Draufsicht mit allen Beleuchtungswinkeln  $\beta$
- Abbildung 13: Versuchsstand q-Kfz (Seitenansicht, Angaben in Originalmaßstab, Messaufbau in Maßstab 1:10)
- Abbildung 14: Mittelwert Leuchtdichtekoeffizient Qd nach Beobachtungswinkel
- Abbildung 15: paarweise Korrelationen der Leuchtdichtekoeffizienten Qd verschiedener Beobachtungswinkel
- Abbildung 16: Mittelwert Reflexionsgrad bei gerichteter Beobachtung  $\rho(d/\alpha)$  nach Beobachtungswinkel
- Abbildung 17: Standardreflexionsklassen der untersuchten Proben ( $\alpha=1^\circ$ )
- Abbildung 18: Bezug der Näherungslösung  $Q_0$ , Range zum damit genäherten Kennwert  $Q_0(1^\circ)$
- Abbildung 19: Mittelwert mittlerer Leuchtdichtekoeffizient  $Q_0$  bei verschiedenen Beobachtungswinkeln  $\alpha$
- Abbildung 20: Mittelwert Spiegelgrad S1 bei verschiedenen Beobachtungswinkeln  $\alpha$
- Abbildung 21: Gegenüberstellung Spiegelgrad S1 für  $\alpha=3^\circ$  und  $\alpha=1^\circ$  (N=57 Proben)
- Abbildung 22: Korrelation des mittleren Leuchtdichtekoeffizienten  $Q_0(1^\circ)$  mit mittleren Leuchtdichtekoeffizienten  $Q_0(\alpha)$  bei anderen Beobachtungswinkeln  $\alpha$
- Abbildung 23: Mittelwert Leuchtdichtekoeffizient  $q(RR)$  nach Beobachtungsentfernung
- Abbildung 24: Mittelwert Leuchtdichtekoeffizient  $q(RR)$  nach Augpunkthöhe des Beobachters ( $h_a$ ) und Scheinwerferhöhe ( $h_s$ )
- Abbildung 25: Mittelwert Leuchtdichtekoeffizient  $q(VR)$  nach Beobachtungsentfernung
- Abbildung 26: Mittelwert Leuchtdichtekoeffizient  $q(VR)$  nach Augpunkthöhe des Beobachters ( $h_a$ ) und Scheinwerferhöhe ( $h_s$ )
- Abbildung 27: Gegenüberstellung Spiegelgrad S1 und Vorwärtsreflexion  $q(VR)$
- Abbildung 28: Gegenüberstellung mittlerer Leuchtdichtekoeffizient und diffuser Reflexionsgrad bei N=57 Proben, beide für Beobachtungswinkel  $\alpha=45^\circ$
- Abbildung 29: Korrelation der mittleren Leuchtdichtekoeffizienten  $Q_0(\alpha)$  mit dem diffusen Reflexionsgrad  $\rho(d/45)$
- Abbildung 30: Gegenüberstellung mittlerer Leuchtdichtekoeffizient  $Q_d(\alpha=2,29^\circ)$  und  $Q_0(\alpha=1^\circ)$  bei N=57 Proben
- Abbildung 31: Gegenüberstellung diffuser Reflexionsgrad  $\rho(d/45^\circ)$  und Rückreflexion  $R_L$
- Abbildung 32: 95%-Vertrauensintervall der messfeldvergrößerungsbasierten Messwertänderung für Qd,  $\alpha=2,29^\circ$  an N=57 Proben.
- Abbildung 33: 95%-Vertrauensintervall der messfeldvergrößerungsbasierten Messwertänderung für  $\rho_{d/45}$  an N=57 Proben

- Abbildung 34: 95%-Vertrauensintervall der messfeldvergrößerungsbasierten Messwertänderung für  $R_L$  an  $N=57$  Proben
- Abbildung 35: 95%-Vertrauensintervall der messfeldvergrößerungsbasierten Messwertänderung für  $Q_0(\alpha=1^\circ)$  an  $N=57$  Proben
- Abbildung 36: 95%-Vertrauensintervall der messfeldvergrößerungsbasierten Messwertänderung für  $S_1(\alpha=1^\circ)$  an  $N=57$  Proben
- Abbildung 37: 95%-Vertrauensintervall der messfeldvergrößerungsbasierten Messwertänderung für  $q_{0,Range}(\alpha=1^\circ)$  an  $N=57$  Proben
- Abbildung 38: 95%-Vertrauensintervall der messfeldvergrößerungsbasierten Messwertänderung, gemittelt über alle einzelnen Leuchtdichtekoeffizienten an  $N=57$  Proben
- Abbildung 39: Messaufbau für Vergleichsmessungen  $R_L$  und  $Q_d$  an Laborproben (oben: Lagerung der Probe und Stützen für Messgerät; mitte: Gerät in Messposition, im vorderen Teil Probe unterhalb ersichtlich; unten: zur Messung Abdeckung der Anordnung zum Ausschluss von Fremdlicht)
- Abbildung 40: Umriss einer kleinen Teilfläche für die in situ-Messungen
- Abbildung 41: Messaufbauten bei den in situ-Messungen kleiner Teilflächen (oben: für  $p(d/45^\circ)$ ; unten: für  $R_L/Q_d$ )
- Abbildung 42: Messort 1 für Reflexion größerer Teilflächen bei Tag und Nacht (unten: im vorderen Bereich Messraster einskizziert, weiter hinten Lage der „kleinen Messfläche“ dunkel umrandet)
- Abbildung 43: Messort 2 für Reflexion größerer Teilflächen (kleine markierte Teilfläche darin entspricht Messort 13 in Kapitel 5.5)
- Abbildung 44: Beleuchtungsstärkemessung
- Abbildung 45: normgemäße Leuchtdichtemessung für  $\alpha=1^\circ$  mit konstantem Beobachtungsort
- Abbildung 46: Leuchtdichtemessung mit konstantem Beobachtungswinkel durch variierenden Beobachtungsstandort bei  $\alpha=3^\circ$  und  $\alpha=5^\circ$
- Abbildung 47: Leuchtdichtemessung mit konstantem Beobachtungswinkel durch variierenden Beobachtungsstandort bei  $\alpha=45^\circ$
- Abbildung 48: parallele Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtemessung mit konstantem Beobachtungswinkel  $\alpha \approx 2,3^\circ$  durch variierenden Beobachtungsstandort bei Tag 52
- Abbildung 49: Leuchtdichteverteilung bei ortsfester Verkehrsbeleuchtung auf der untersuchten Straße Messort 1 ( $\alpha=1^\circ$ ) und zur Pseudocolorierung gehörige Skalenteilung
- Abbildung 50: perspektivisch entzerrte Leuchtdichteverteilung zur normgemäßen Flächenbewertung (Messort 1,  $\alpha=1^\circ$  bezüglich Messfeldmitte, Variationsbereich  $1,21^\circ \geq \alpha \geq 0,86^\circ$ )

## **Anhang zu „In Situ – Messungen von Reflexionseigenschaften von Fahrbahnoberflächen“-Schlussbericht**

### **Übersicht der Inhalte**

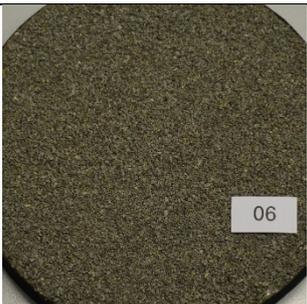
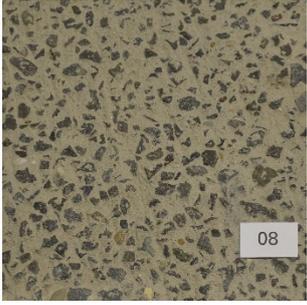
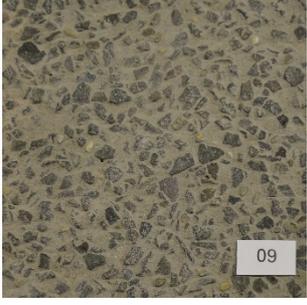
<b>1 - Darstellung der Laborproben</b>	<b>81</b>
<b>2 – Übersicht der zentralen Reflexionskennwerte der Laborproben</b>	<b>93</b>
<b>3 – Messorte der Feldmessungen (kleine Teilflächen)</b>	<b>95</b>
<b>4 – Reflexionsverteilungen der Feldmessungen (kleine Teilflächen)</b>	<b>98</b>
<b>5 – Reflexionsverteilungen der Feldmessungen (große Teilflächen)</b>	<b>112</b>
<b>6 – Weitere lichttechnische Daten der Feldmessungen (große Teilflächen)</b>	<b>114</b>

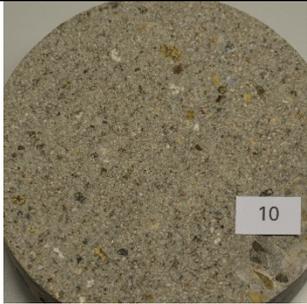
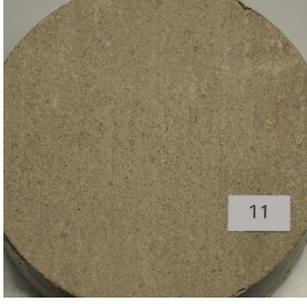
## 1 - Darstellung der Laborproben

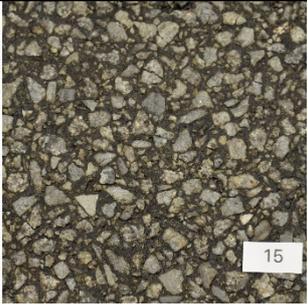
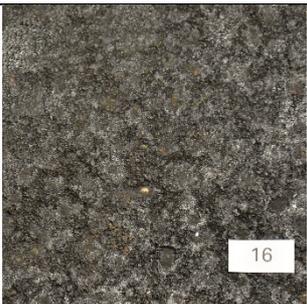
Erläuterung zu nachfolgender Tabelle:

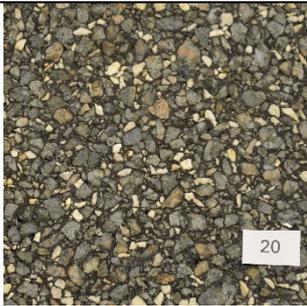
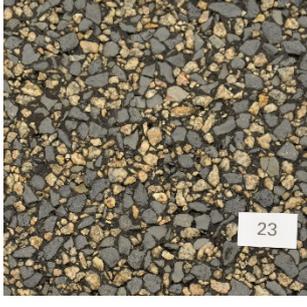
- Abbildung 80°: fotografische Aufnahme im Winkel 80° relativ zur Probenoberfläche
- Abbildung 20°: fotografische Aufnahme im Winkel 20° relativ zur Probenoberfläche

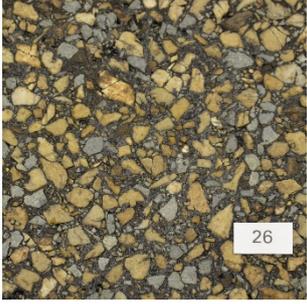
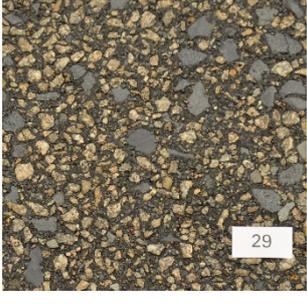
Nr.	Abbildung 80°	Abbildung 20° (Detail)	Bemerkung
1			Beschichtungsprobe
2			Beschichtungsprobe
3			Beschichtungsprobe
4			Beschichtungsprobe

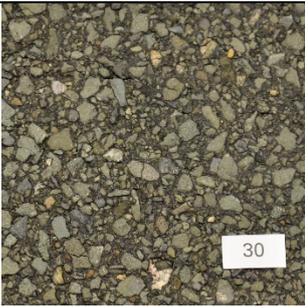
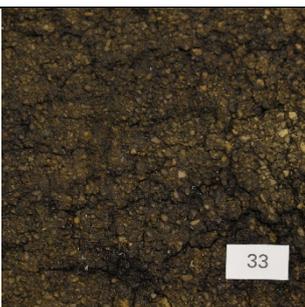
5	 05		Beschichtungsprobe
6	 06		Beschichtungsprobe
7	 07		Beschichtungsprobe
8	 08		Waschbeton
9	 09		Waschbeton

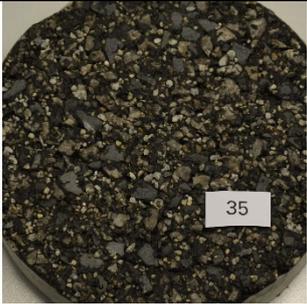
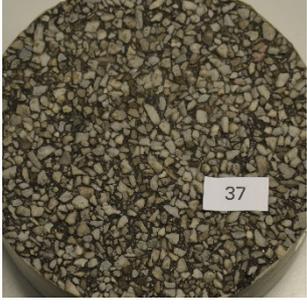
10	 <p>A circular concrete sample with a greyish-brown matrix and small, dark, irregularly shaped aggregates. A small white label with the number '10' is in the bottom right corner.</p>	 <p>A close-up view of the concrete surface, showing a fine, granular texture with some larger, light-colored aggregates.</p>	Beton, Mörteloberfläche
11	 <p>A circular concrete sample with a uniform, light brownish-grey color and a fine, granular texture. A small white label with the number '11' is in the bottom right corner.</p>	 <p>A close-up view of the concrete surface, showing a fine, granular texture with some larger, light-colored aggregates.</p>	Beton, Mörteloberfläche
12	 <p>A circular concrete sample with a uniform, light brownish-grey color and a fine, granular texture. A small white label with the number '12' is in the bottom right corner.</p>	 <p>A close-up view of the concrete surface, showing a fine, granular texture with some larger, light-colored aggregates.</p>	Beton, Mörteloberfläche
13	 <p>A close-up view of an asphalt surface, showing a dense, granular texture with many small, dark, irregularly shaped aggregates. A small white label with the number '13' is in the bottom right corner.</p>	 <p>A close-up view of the asphalt surface, showing a dense, granular texture with many small, dark, irregularly shaped aggregates.</p>	Asphalt, Laborprobe
14	 <p>A close-up view of an asphalt surface, showing a dense, granular texture with many small, dark, irregularly shaped aggregates. A small white label with the number '14' is in the bottom right corner.</p>	 <p>A close-up view of the asphalt surface, showing a dense, granular texture with many small, dark, irregularly shaped aggregates.</p>	Asphalt, Laborprobe

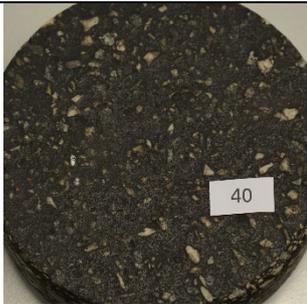
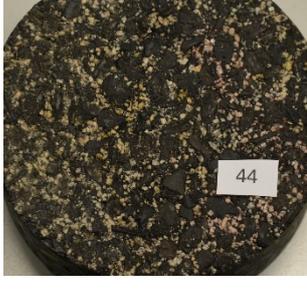
15	 <p>15</p>		Asphalt, Laborprobe
16	 <p>16</p>		Asphalt, Laborprobe, mit Bitumenoberfläche
17	 <p>17</p>		Asphalt, Laborprobe, mit Bitumenoberfläche
18	 <p>18</p>		Asphalt, Laborprobe, mit Bitumenoberfläche
19	 <p>19</p>		Asphalt, Laborprobe

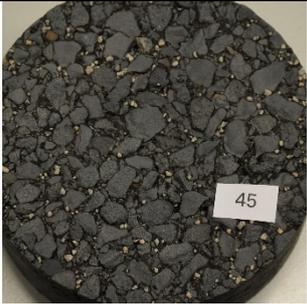
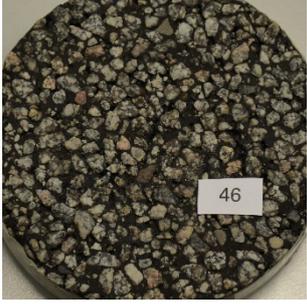
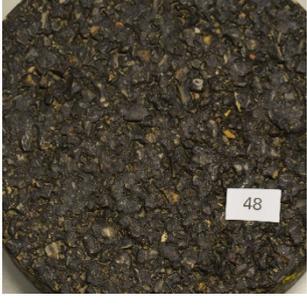
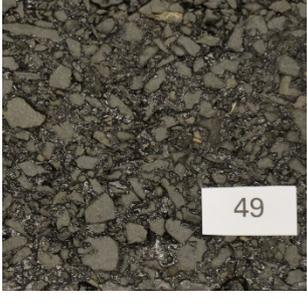
20	 <p>20</p>		Asphalt, Laborprobe
21	 <p>21</p>		Asphalt, Laborprobe
22	 <p>22</p>		Asphalt, Laborprobe
23	 <p>23</p>		Asphalt, Laborprobe
24	 <p>24</p>		Asphalt, Laborprobe

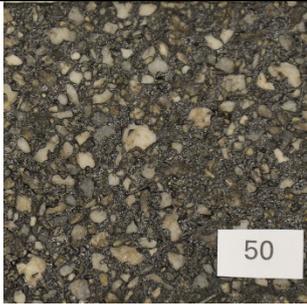
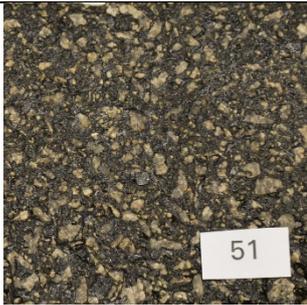
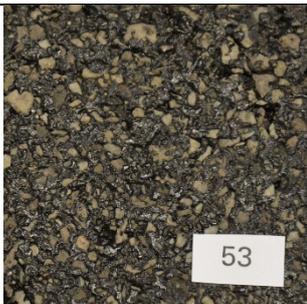
25	 <p>25</p>		Asphalt, Laborprobe
26	 <p>26</p>		Asphalt, Laborprobe
27	 <p>27</p>		Asphalt, Laborprobe
28	 <p>28</p>		Asphalt, Laborprobe
29	 <p>29</p>		Asphalt, Laborprobe

30	 <p>30</p>		Asphalt, Laborprobe
31	 <p>31</p>		Asphalt, Laborprobe
32	 <p>32</p>		Asphalt, Laborprobe
33	 <p>33</p>		Asphalt, Laborprobe, mit Bitumenoberfläche
34	 <p>34</p>		Asphalt, BK-Probe

35			Asphalt, BK-Probe
36			Asphalt, BK-Probe
37			Asphalt, BK-Probe
38			Asphalt, BK-Probe
39			Asphalt, BK-Probe

40			Asphalt, BK-Probe
41			Asphalt, BK-Probe
42			Asphalt, BK-Probe
43			Asphalt, BK-Probe
44			Asphalt, BK-Probe

45	 <p>A circular sample of asphalt BK-Probe 45, showing a dark, granular surface with a small white label '45' in the center.</p>	 <p>A close-up view of the asphalt BK-Probe 45, showing a dark, granular surface with some lighter-colored aggregates.</p>	Asphalt, BK-Probe
46	 <p>A circular sample of asphalt BK-Probe 46, showing a dark, granular surface with a small white label '46' in the center.</p>	 <p>A close-up view of the asphalt BK-Probe 46, showing a dark, granular surface with some lighter-colored aggregates.</p>	Asphalt, BK-Probe
47	 <p>A circular sample of asphalt BK-Probe 47, showing a dark, granular surface with a small white label '47' in the center.</p>	 <p>A close-up view of the asphalt BK-Probe 47, showing a dark, granular surface with some lighter-colored aggregates.</p>	Asphalt, BK-Probe
48	 <p>A circular sample of asphalt BK-Probe 48, showing a dark, granular surface with a small white label '48' in the center.</p>	 <p>A close-up view of the asphalt BK-Probe 48, showing a dark, granular surface with some lighter-colored aggregates.</p>	Asphalt, BK-Probe
49	 <p>A circular sample of asphalt Laborprobe 49, showing a dark, granular surface with a small white label '49' in the center.</p>	 <p>A close-up view of the asphalt Laborprobe 49, showing a dark, granular surface with some lighter-colored aggregates.</p>	Asphalt, Laborprobe

50	 <p>50</p>		Asphalt, Laborprobe
51	 <p>51</p>		Asphalt, Laborprobe
52	 <p>52</p>		Asphalt, Laborprobe
53	 <p>53</p>		Asphalt, Laborprobe
54	 <p>54</p>		Offenporiger Asphalt, Laborprobe

55			Gussasphalt, mit Abstreung, Laborprobe
56			Gussasphalt, mit kleinkörniger Abstreung, Laborprobe
57			Gussasphalt, mit Abstreung gebunden auf hellem Bindemittel, Laborprobe

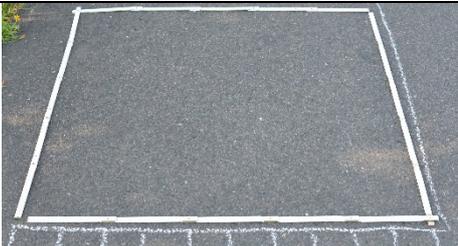
## 2 – Übersicht der zentralen Reflexionskennwerte der Laborproben

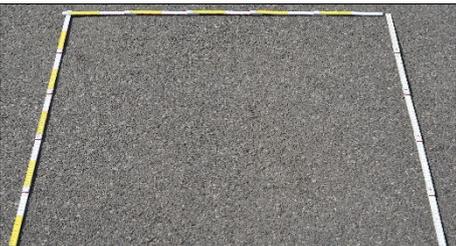
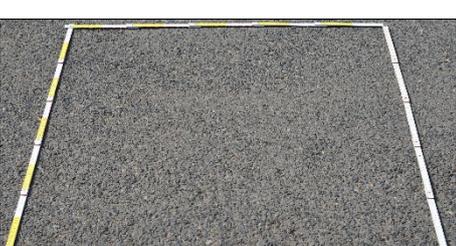
Probe	Qd(2,29°) cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	ρ(d/45°) -	R <sub>L</sub> cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	q(VR) 1,2-0,65- 50m cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	Q0 cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	Q <sub>0,Range</sub> cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	S1 -	S2 -	R-Klasse -
1	0,157	0,39	0,063	0,254	0,142	0,117	0,069	1,370	1
2	0,095	0,16	0,027	0,143	0,087	0,070	0,176	1,551	1
3	0,091	0,14	0,021	0,195	0,088	0,066	0,204	1,714	1
4	0,099	0,18	0,032	0,152	0,096	0,071	0,142	1,633	1
5	0,105	0,21	0,044	0,126	0,093	0,072	0,083	1,490	1
6	0,097	0,15	0,022	0,539	0,097	0,071	0,229	1,762	1
7	0,100	0,20	0,024	0,147	0,093	0,076	0,210	1,567	1
8	0,087	0,27	0,025	0,428	0,078	0,069	0,241	1,473	1
9	0,088	0,25	0,028	0,399	0,077	0,071	0,342	1,543	1
10	0,130	0,31	0,028	0,170	0,120	0,112	0,249	1,416	1
11	0,144	0,36	0,035	0,668	0,140	0,129	0,330	1,530	1
12	0,137	0,34	0,037	0,752	0,133	0,115	0,237	1,521	1
13	0,113	0,20	0,027	0,382	0,112	0,110	0,189	1,282	1
14	0,167	0,32	0,040	0,542	0,159	0,147	0,101	1,260	1
15	0,075	0,11	0,013	0,537	0,074	0,067	0,292	1,518	1
16	0,065	0,05	0,002	4,548	0,087	0,110	5,254	5,198	4
17	0,057	0,04	0,002	2,543	0,069	0,073	3,159	4,091	4
18	0,052	0,04	0,002	1,629	0,058	0,073	2,740	3,113	4
19	0,076	0,15	0,016	0,425	0,072	0,069	0,243	1,371	1
20	0,099	0,14	0,019	0,732	0,094	0,089	0,284	1,436	1
21	0,097	0,16	0,020	0,605	0,094	0,092	0,298	1,400	1
22	0,073	0,11	0,013	0,790	0,072	0,068	0,382	1,534	1
23	0,093	0,13	0,019	0,498	0,093	0,086	0,240	1,420	1
24	0,095	0,14	0,020	0,512	0,095	0,087	0,236	1,418	1
25	0,091	0,15	0,019	0,437	0,078	0,074	0,225	1,364	1
26	0,094	0,14	0,014	0,635	0,092	0,085	0,324	1,504	1
27	0,120	0,18	0,027	0,422	0,119	0,109	0,160	1,348	1
28	0,130	0,19	0,023	0,747	0,128	0,117	0,258	1,455	1
29	0,076	0,10	0,012	0,652	0,077	0,067	0,293	1,582	1
30	0,055	0,09	0,010	0,577	0,049	0,048	0,347	1,459	1
31	0,080	0,13	0,011	1,161	0,081	0,083	0,728	1,773	2
32	0,136	0,25	0,032	0,510	0,133	0,125	0,164	1,311	1
33	0,047	0,05	0,007	1,155	0,047	0,043	0,789	2,054	2
34	0,095	0,13	0,018	0,970	0,091	0,085	0,519	1,723	2
35	0,073	0,10	0,012	0,659	0,066	0,061	0,416	1,630	1
36	0,077	0,11	0,020	0,967	0,073	0,067	0,365	1,577	1
37	0,104	0,17	0,022	0,408	0,095	0,088	0,208	1,377	1
38	0,057	0,08	0,012	0,783	0,054	0,056	0,658	1,694	2
39	0,083	0,11	0,017	0,322	0,080	0,079	0,517	1,625	2
40	0,084	0,07	0,006	1,208	0,093	0,120	2,588	2,979	4

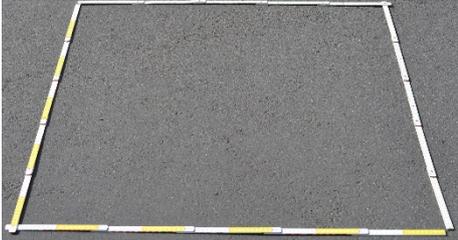
Probe	Qd(2,29°) cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	ρ(d/45°) -	R <sub>L</sub> cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	q(VR) 1,2-0,65- 50m cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	Q0 cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	q <sub>0,Range</sub> cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	S1 -	S2 -	R-Klasse -
41	0,067	0,07	0,008	1,686	0,075	0,079	1,305	2,326	3
42	0,059	0,06	0,008	1,756	0,063	0,067	1,526	2,566	4
43	0,059	0,07	0,008	0,824	0,054	0,057	0,861	1,878	3
44	0,082	0,10	0,015	1,151	0,080	0,073	0,463	1,701	2
45	0,062	0,09	0,014	0,268	0,053	0,046	0,232	1,490	1
46	0,103	0,14	0,019	0,173	0,095	0,090	0,189	1,318	1
47	0,069	0,07	0,007	1,445	0,069	0,072	0,908	1,963	3
48	0,066	0,06	0,005	4,463	0,079	0,094	3,050	3,637	4
49	0,073	0,08	0,007	2,791	0,079	0,097	2,307	2,834	4
50	0,090	0,10	0,009	2,085	0,100	0,111	1,362	2,232	4
51	0,082	0,09	0,007	3,665	0,096	0,114	2,046	2,689	4
52	0,085	0,11	0,009	3,219	0,094	0,111	1,792	2,481	4
53	0,140	0,08	0,004	3,849	0,101	0,147	4,968	4,287	4
54	0,051	0,04	0,002	1,087	0,052	0,062	2,555	3,102	4
55	0,074	0,14	0,034	0,167	0,061	0,050	0,131	1,465	1
56	0,092	0,19	0,044	0,221	0,080	0,063	0,137	1,533	1
57	0,198	0,45	0,088	0,149	0,177	0,143	0,103	1,445	1

Die vollständigen Reflexionsdaten Qd(α), ρ(d/α), q(VR/α,β), q(RR/α,β) sowie r-Tabellen sind für eine Darstellung hier zu umfangreich und daher dem elektronischen Anhang zu entnehmen.

### 3 –Messorte der Feldmessungen (kleine Teilflächen mit $A=1\text{m}^2$ )

Nr	Abbildung	Beschreibung (Mittelwerte)			
		Oberfläche	$Q_d(2,29^\circ)$ cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	$\rho(d/45^\circ)$ -	$R_L$ cd/(m <sup>2</sup> ·lx)
1		Beton (Aufnahme in der Sonne)	0,104	0,26	0,020
2		Asphalt (Aufnahme in der Sonne)	0,064	0,12	0,012
3		Asphalt (helle Flecken=Sonne, Rest im Schatten)	0,051	0,09	0,008
4		Asphalt (Aufnahme im Schatten)	0,045	0,08	0,009
5		Asphalt (helle Flecken=Sonne, Rest im Schatten)	0,055	0,11	0,010

Nr	Abbildung	Beschreibung (Mittelwerte)			
		Oberfläche	Qd(2,29°) cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	ρ(d/45°) -	R <sub>L</sub> cd/(m <sup>2</sup> ·lx)
6		Asphalt (Aufnahme in der Sonne)	0,055	0,12	0,010
7		Beton (Aufnahme im Schatten, helle Flecken=Sonne)	0,084	0,22	0,015
8		Asphalt (Aufnahme in der Sonne)	0,051	0,11	0,013
9		Asphalt (Aufnahme in der Sonne)	0,059	0,11	0,011
10		Asphalt (Aufnahme in der Sonne)	0,051	0,10	0,008

Nr	Abbildung	Beschreibung (Mittelwerte)			
		Oberfläche	$Q_d(2,29^\circ)$ cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	$\rho(d/45^\circ)$ -	$R_L$ cd/(m <sup>2</sup> ·lx)
11		Asphalt (Aufnahme in der Sonne)	0,050	0,09	0,009
12		Asphalt (Aufnahme bei bedecktem Himmel)	0,085	0,13	0,013
13		Asphalt (Aufnahme bei bedecktem Himmel)	0,063	0,12	0,012
14		Asphalt (Aufnahme bei bedecktem Himmel)	0,046	0,09	0,010

#### 4 – Reflexionsverteilungen der Feldmessungen (kleine Teilflächen)

##### Messort 1

P <sub>d/45</sub>									
0,27	0,26	0,26	0,30	0,24	0,27	0,29	0,25	0,25	0,24
0,25	0,28	0,25	0,24	0,26	0,26	0,24	0,26	0,26	0,27
0,26	0,27	0,26	0,30	0,30	0,25	0,28	0,29	0,30	0,30
0,28	0,25	0,28	0,30	0,26	0,25	0,24	0,27	0,26	0,24
0,26	0,25	0,27	0,30	0,24	0,29	0,27	0,24	0,24	0,28
0,26	0,26	0,25	0,30	0,29	0,29	0,25	0,24	0,27	0,30
0,27	0,26	0,25	0,24	0,26	0,24	0,24	0,28	0,29	0,30
0,25	0,29	0,26	0,30	0,30	0,29	0,24	0,24	0,24	0,24
0,29	0,25	0,31	0,28	0,27	0,24	0,26	0,30	0,29	0,27
0,27	0,26	0,26	0,26	0,30	0,25	0,26	0,30	0,26	0,24

Q <sub>d</sub> (2,29°) in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,113	0,088	0,091	0,088	0,094	0,114	0,106	0,111	0,115	0,091
0,112	0,107	0,097	0,083	0,112	0,107	0,078	0,107	0,106	0,096
0,104	0,100	0,122	0,115	0,096	0,116	0,097	0,102	0,101	0,063
0,105	0,092	0,102	0,123	0,116	0,108	0,105	0,109	0,123	0,089
0,107	0,094	0,114	0,116	0,122	0,115	0,109	0,119	0,108	0,114
0,113	0,094	0,101	0,097	0,084	0,086	0,083	0,089	0,081	0,070
0,119	0,096	0,104	0,115	0,114	0,101	0,100	0,090	0,078	0,096
0,113	0,076	0,119	0,116	0,117	0,121	0,107	0,089	0,075	0,084
0,117	0,123	0,129	0,111	0,112	0,115	0,115	0,105	0,114	0,098
0,123	0,112	0,116	0,120	0,098	0,104	0,111	0,116	0,122	0,106

R <sub>L</sub> in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,018	0,017	0,022	0,018	0,017	0,025	0,021	0,023	0,023	0,017
0,018	0,021	0,016	0,014	0,021	0,021	0,014	0,021	0,020	0,024
0,021	0,023	0,024	0,020	0,018	0,020	0,016	0,016	0,015	0,006
0,018	0,022	0,020	0,019	0,018	0,021	0,019	0,019	0,019	0,017
0,021	0,019	0,023	0,020	0,025	0,024	0,022	0,023	0,021	0,026
0,021	0,022	0,019	0,020	0,018	0,019	0,023	0,022	0,019	0,018
0,018	0,019	0,017	0,021	0,020	0,020	0,023	0,020	0,017	0,027
0,018	0,012	0,020	0,021	0,021	0,023	0,021	0,020	0,015	0,016
0,021	0,023	0,022	0,018	0,022	0,022	0,019	0,018	0,020	0,022
0,021	0,023	0,022	0,025	0,017	0,017	0,019	0,021	0,023	0,022

## Messort 2

Pd/45									
0,11	0,13	0,12	0,13	0,12	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12
0,11	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,11	0,13	0,12	0,12
0,12	0,12	0,13	0,13	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,11
0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11
0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11
0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11
0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
0,12	0,12	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11
0,12	0,11	0,13	0,12	0,12	0,11	0,12	0,12	0,12	0,11

Qd(2,29°) in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,068	0,063	0,063	0,060	0,062	0,069	0,062	0,061	0,063	0,063
0,067	0,061	0,063	0,056	0,065	0,066	0,065	0,065	0,066	0,066
0,062	0,060	0,063	0,065	0,066	0,071	0,068	0,068	0,066	0,063
0,055	0,054	0,060	0,066	0,063	0,073	0,071	0,067	0,062	0,060
0,059	0,059	0,061	0,060	0,062	0,066	0,069	0,071	0,068	0,066
0,059	0,060	0,062	0,062	0,070	0,070	0,068	0,073	0,068	0,066
0,062	0,065	0,067	0,063	0,070	0,067	0,068	0,065	0,062	0,070
0,062	0,067	0,062	0,061	0,067	0,068	0,069	0,073	0,066	0,068
0,065	0,063	0,063	0,063	0,062	0,067	0,065	0,071	0,070	0,062
0,062	0,063	0,059	0,066	0,059	0,062	0,059	0,061	0,062	0,060

R <sub>L</sub> in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,013	0,012	0,013	0,011	0,012	0,014	0,011	0,014	0,013	0,012
0,010	0,010	0,009	0,009	0,013	0,011	0,015	0,015	0,011	0,011
0,010	0,010	0,010	0,014	0,013	0,012	0,013	0,012	0,009	0,008
0,009	0,011	0,012	0,013	0,012	0,013	0,012	0,011	0,012	0,013
0,011	0,010	0,013	0,014	0,013	0,012	0,012	0,014	0,016	0,012
0,011	0,014	0,012	0,009	0,017	0,011	0,016	0,013	0,010	0,011
0,014	0,009	0,011	0,012	0,017	0,010	0,011	0,016	0,009	0,010
0,010	0,010	0,011	0,012	0,012	0,012	0,014	0,010	0,011	0,010
0,010	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,014	0,012	0,014	0,011
0,011	0,010	0,012	0,014	0,011	0,013	0,011	0,012	0,012	0,017

## Messort 3

P <sub>d/45</sub>									
0,09	0,10	0,09	0,10	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09
0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09
0,09	0,10	0,09	0,09	0,10	0,10	0,09	0,10	0,09	0,09
0,10	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09
0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,10	0,09	0,09
0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09
0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
0,10	0,09	0,09	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
0,10	0,10	0,10	0,09	0,10	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09
0,10	0,09	0,10	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09

Q <sub>d</sub> (2,29°) in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,044	0,046	0,051	0,053	0,053	0,054	0,056	0,058	0,056	0,052
0,051	0,053	0,051	0,052	0,050	0,053	0,052	0,053	0,052	0,050
0,052	0,051	0,048	0,052	0,052	0,053	0,054	0,053	0,048	0,050
0,054	0,050	0,052	0,048	0,051	0,052	0,047	0,051	0,052	0,054
0,052	0,050	0,048	0,053	0,046	0,047	0,052	0,052	0,054	0,050
0,052	0,052	0,051	0,053	0,055	0,051	0,055	0,051	0,058	0,056
0,046	0,046	0,050	0,054	0,054	0,055	0,060	0,056	0,055	0,053
0,044	0,044	0,043	0,048	0,052	0,052	0,059	0,056	0,058	0,055
0,047	0,046	0,044	0,046	0,047	0,051	0,052	0,054	0,055	0,053
0,045	0,051	0,047	0,047	0,050	0,050	0,046	0,050	0,047	0,050

R <sub>L</sub> in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,008	0,007	0,010	0,010	0,007	0,008	0,007	0,009	0,010	0,010
0,008	0,008	0,008	0,008	0,004	0,010	0,009	0,007	0,010	0,009
0,006	0,009	0,005	0,006	0,007	0,006	0,007	0,012	0,011	0,011
0,006	0,008	0,007	0,008	0,009	0,008	0,006	0,008	0,010	0,011
0,008	0,008	0,006	0,008	0,006	0,005	0,010	0,007	0,009	0,008
0,008	0,008	0,006	0,008	0,008	0,005	0,009	0,007	0,009	0,010
0,009	0,006	0,009	0,007	0,005	0,007	0,008	0,009	0,011	0,007
0,009	0,009	0,009	0,010	0,007	0,008	0,008	0,009	0,010	0,004
0,009	0,008	0,008	0,007	0,008	0,006	0,008	0,008	0,007	0,007
0,008	0,006	0,005	0,007	0,008	0,010	0,004	0,008	0,007	0,007

## Messort 4

Pd/45									
0,08	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
0,08	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,08
0,08	0,09	0,08	0,08	0,08	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08
0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
0,09	0,09	0,09	0,08	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

Qd(2,29°) in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,045	0,046	0,046	0,045	0,045	0,045	0,044	0,044	0,044	0,046
0,046	0,045	0,044	0,045	0,045	0,045	0,046	0,047	0,046	0,046
0,046	0,046	0,046	0,047	0,046	0,048	0,047	0,047	0,046	0,047
0,045	0,046	0,047	0,047	0,044	0,044	0,043	0,043	0,042	0,044
0,046	0,048	0,048	0,047	0,047	0,047	0,048	0,048	0,048	0,048
0,046	0,045	0,046	0,044	0,044	0,043	0,044	0,045	0,042	0,043
0,048	0,044	0,045	0,040	0,039	0,039	0,040	0,040	0,040	0,044
0,044	0,044	0,039	0,039	0,030	0,032	0,043	0,042	0,045	0,046
0,046	0,047	0,047	0,047	0,046	0,044	0,047	0,047	0,048	0,048
0,045	0,047	0,047	0,046	0,050	0,050	0,047	0,047	0,047	0,045

R <sub>L</sub> in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,009	0,008	0,007	0,007	0,008	0,009	0,010	0,009	0,009	0,011
0,007	0,005	0,010	0,008	0,009	0,009	0,009	0,008	0,009	0,009
0,010	0,009	0,008	0,008	0,009	0,009	0,007	0,007	0,006	0,008
0,011	0,008	0,008	0,008	0,005	0,008	0,009	0,008	0,006	0,006
0,010	0,010	0,009	0,009	0,010	0,008	0,011	0,010	0,012	0,009
0,007	0,010	0,010	0,011	0,010	0,008	0,009	0,012	0,010	0,010
0,010	0,008	0,011	0,009	0,009	0,008	0,009	0,008	0,007	0,010
0,009	0,011	0,007	0,010	0,008	0,007	0,010	0,006	0,008	0,008
0,011	0,010	0,008	0,007	0,009	0,007	0,010	0,006	0,008	0,009
0,010	0,009	0,008	0,011	0,011	0,010	0,007	0,008	0,010	0,007

## Messort 5

P <sub>d/45</sub>									
0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,11	0,12	0,12	0,12	0,11
0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,11	0,12	0,11	0,11
0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,11	0,11	0,11
0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11
0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,11	0,12	0,11	0,12	0,11
0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,11	0,12	0,11	0,11	0,11
0,12	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11
0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,11	0,12	0,11	0,12
0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,11	0,12	0,11
0,11	0,12	0,11	0,12	0,12	0,11	0,11	0,12	0,11	0,11

Q <sub>d</sub> (2,29°) in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,054	0,055	0,055	0,048	0,054	0,052	0,056	0,055	0,059	0,054
0,054	0,054	0,054	0,054	0,052	0,051	0,051	0,051	0,047	0,052
0,056	0,053	0,053	0,054	0,052	0,052	0,051	0,053	0,047	0,048
0,060	0,060	0,059	0,055	0,055	0,052	0,055	0,054	0,048	0,044
0,062	0,058	0,054	0,050	0,058	0,056	0,055	0,053	0,054	0,054
0,055	0,060	0,054	0,055	0,052	0,053	0,059	0,055	0,056	0,054
0,059	0,060	0,058	0,053	0,058	0,058	0,055	0,055	0,058	0,055
0,056	0,059	0,056	0,054	0,055	0,055	0,054	0,054	0,053	0,058
0,056	0,055	0,054	0,052	0,054	0,056	0,058	0,061	0,054	0,058
0,056	0,056	0,054	0,056	0,058	0,055	0,053	0,055	0,058	0,055

R <sub>L</sub> in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,009	0,011	0,008	0,008	0,010	0,011	0,012	0,012	0,011	0,014
0,008	0,010	0,010	0,010	0,010	0,008	0,009	0,010	0,013	0,011
0,007	0,007	0,008	0,007	0,009	0,012	0,012	0,011	0,013	0,013
0,006	0,011	0,009	0,010	0,011	0,011	0,012	0,011	0,010	0,009
0,007	0,011	0,010	0,008	0,010	0,012	0,012	0,011	0,013	0,013
0,010	0,008	0,009	0,008	0,008	0,011	0,011	0,010	0,011	0,010
0,010	0,010	0,007	0,010	0,010	0,005	0,009	0,010	0,011	0,011
0,007	0,009	0,009	0,007	0,013	0,012	0,007	0,008	0,011	0,013
0,010	0,007	0,009	0,007	0,009	0,007	0,012	0,013	0,011	0,014
0,008	0,009	0,011	0,011	0,010	0,010	0,010	0,011	0,011	0,011

## Messort 6

Pd/45									
0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12
0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,12	0,12
0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,12	0,13	0,12	0,13	0,12
0,13	0,12	0,13	0,12	0,13	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12
0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12
0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13
0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12
0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13
0,13	0,13	0,12	0,12	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,13
0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,12	0,12	0,13

Qd(2,29°) in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,051	0,054	0,055	0,052	0,051	0,053	0,058	0,055	0,060	0,058
0,054	0,055	0,055	0,056	0,053	0,053	0,050	0,055	0,058	0,054
0,054	0,056	0,055	0,054	0,051	0,051	0,053	0,053	0,051	0,055
0,054	0,051	0,054	0,048	0,054	0,052	0,053	0,052	0,055	0,055
0,052	0,055	0,051	0,050	0,053	0,053	0,054	0,058	0,055	0,058
0,055	0,054	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,053	0,056
0,056	0,054	0,060	0,053	0,059	0,060	0,058	0,062	0,059	0,056
0,058	0,058	0,054	0,056	0,055	0,053	0,055	0,059	0,056	0,054
0,058	0,054	0,058	0,051	0,053	0,055	0,053	0,054	0,055	0,060
0,054	0,054	0,054	0,053	0,051	0,058	0,055	0,056	0,059	0,054

R <sub>L</sub> in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,010	0,009	0,012	0,009	0,007	0,011	0,008	0,010	0,008	0,010
0,011	0,012	0,011	0,009	0,010	0,009	0,009	0,010	0,010	0,011
0,012	0,009	0,009	0,010	0,008	0,010	0,011	0,010	0,011	0,010
0,009	0,008	0,010	0,007	0,012	0,010	0,013	0,011	0,009	0,011
0,010	0,011	0,011	0,011	0,008	0,011	0,009	0,012	0,010	0,010
0,009	0,010	0,007	0,009	0,007	0,010	0,011	0,009	0,012	0,011
0,010	0,009	0,010	0,012	0,010	0,012	0,009	0,013	0,010	0,012
0,009	0,010	0,010	0,011	0,009	0,012	0,011	0,012	0,011	0,010
0,012	0,010	0,011	0,009	0,010	0,010	0,008	0,015	0,012	0,011
0,010	0,011	0,004	0,008	0,008	0,010	0,008	0,012	0,012	0,010

## Messort 7

P <sub>d/45</sub>									
0,22	0,22	0,22	0,23	0,22	0,21	0,22	0,21	0,20	0,22
0,22	0,22	0,23	0,21	0,22	0,23	0,22	0,23	0,23	0,21
0,23	0,24	0,22	0,22	0,22	0,22	0,25	0,22	0,25	0,23
0,22	0,24	0,22	0,24	0,22	0,23	0,23	0,25	0,23	0,24
0,24	0,23	0,22	0,24	0,23	0,23	0,22	0,23	0,22	0,24
0,22	0,21	0,23	0,22	0,23	0,23	0,22	0,23	0,23	0,23
0,24	0,20	0,23	0,21	0,23	0,22	0,22	0,23	0,23	0,22
0,22	0,23	0,24	0,22	0,22	0,22	0,23	0,25	0,22	0,24
0,22	0,23	0,23	0,24	0,21	0,22	0,21	0,22	0,23	0,21
0,23	0,22	0,20	0,22	0,22	0,21	0,22	0,21	0,20	0,20

Q <sub>d</sub> (2,29°) in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,082	0,083	0,084	0,090	0,091	0,096	0,086	0,078	0,076	0,075
0,091	0,078	0,084	0,077	0,085	0,082	0,083	0,090	0,071	0,077
0,091	0,085	0,088	0,078	0,088	0,091	0,083	0,093	0,093	0,092
0,086	0,081	0,077	0,082	0,091	0,085	0,089	0,082	0,090	0,091
0,083	0,090	0,082	0,086	0,086	0,090	0,086	0,088	0,091	0,082
0,088	0,086	0,081	0,083	0,081	0,097	0,081	0,086	0,089	0,086
0,077	0,091	0,079	0,076	0,085	0,084	0,086	0,079	0,089	0,094
0,089	0,085	0,081	0,068	0,088	0,094	0,090	0,081	0,086	0,088
0,076	0,077	0,075	0,079	0,091	0,089	0,084	0,084	0,081	0,077
0,077	0,083	0,082	0,091	0,078	0,063	0,075	0,069	0,066	0,071

R <sub>L</sub> in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,011	0,010	0,016	0,016	0,014	0,019	0,015	0,015	0,015	0,015
0,016	0,015	0,015	0,014	0,019	0,014	0,015	0,015	0,016	0,014
0,016	0,017	0,016	0,015	0,014	0,017	0,018	0,017	0,015	0,016
0,018	0,016	0,015	0,016	0,013	0,015	0,016	0,016	0,010	0,015
0,015	0,017	0,015	0,012	0,015	0,017	0,014	0,018	0,016	0,015
0,015	0,016	0,014	0,012	0,017	0,017	0,013	0,018	0,016	0,015
0,014	0,018	0,013	0,012	0,015	0,018	0,018	0,016	0,017	0,015
0,016	0,015	0,016	0,011	0,015	0,017	0,018	0,016	0,019	0,015
0,009	0,010	0,015	0,014	0,016	0,014	0,013	0,014	0,014	0,011
0,013	0,013	0,014	0,015	0,016	0,012	0,012	0,014	0,014	0,012

## Messort 8

Pd/45									
0,11	0,11	0,10	0,12	0,11	0,12	0,11	0,11	0,10	0,10
0,10	0,11	0,10	0,12	0,11	0,12	0,10	0,11	0,10	0,10
0,11	0,11	0,11	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10
0,10	0,11	0,10	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10
0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,11	0,10	0,10	0,11
0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,11	0,11
0,10	0,11	0,11	0,10	0,11	0,11	0,10	0,11	0,10	0,10
0,11	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10
0,11	0,10	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10
0,11	0,10	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10

Qd(2,29°) in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,056	0,050	0,055	0,058	0,056	0,047	0,055	0,053	0,043	0,039
0,053	0,058	0,054	0,058	0,053	0,059	0,052	0,052	0,054	0,040
0,052	0,051	0,059	0,059	0,051	0,051	0,048	0,040	0,052	0,045
0,050	0,042	0,059	0,059	0,048	0,052	0,046	0,047	0,051	0,050
0,044	0,051	0,055	0,046	0,053	0,053	0,051	0,060	0,056	0,046
0,047	0,058	0,054	0,058	0,058	0,061	0,055	0,050	0,052	0,042
0,053	0,053	0,055	0,050	0,056	0,056	0,052	0,051	0,056	0,054
0,053	0,050	0,054	0,039	0,061	0,054	0,043	0,052	0,058	0,045
0,052	0,044	0,054	0,048	0,058	0,050	0,045	0,053	0,044	0,046
0,052	0,054	0,044	0,052	0,054	0,052	0,048	0,050	0,048	0,043

R <sub>L</sub> in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,011	0,014	0,014	0,012	0,014	0,016	0,012	0,015	0,015	0,009
0,011	0,012	0,012	0,014	0,013	0,016	0,012	0,013	0,014	0,011
0,015	0,012	0,014	0,014	0,012	0,014	0,010	0,011	0,012	0,012
0,012	0,013	0,014	0,012	0,015	0,015	0,013	0,014	0,017	0,017
0,009	0,012	0,011	0,012	0,015	0,012	0,016	0,017	0,015	0,013
0,014	0,014	0,013	0,017	0,014	0,019	0,014	0,011	0,014	0,015
0,012	0,012	0,013	0,010	0,012	0,015	0,011	0,013	0,015	0,012
0,014	0,009	0,013	0,010	0,013	0,013	0,009	0,014	0,012	0,008
0,013	0,008	0,011	0,016	0,013	0,012	0,014	0,014	0,011	0,015
0,014	0,013	0,013	0,017	0,011	0,013	0,011	0,015	0,012	0,012

## Messort 9

P <sub>d/45</sub>									
0,11	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10
0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
0,11	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
0,11	0,11	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,10
0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,09	0,11	0,12	0,11
0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
0,12	0,12	0,11	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,11
0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11

Q <sub>d</sub> (2,29°) in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,060	0,056	0,067	0,053	0,055	0,063	0,056	0,062	0,059	0,061
0,062	0,060	0,068	0,053	0,062	0,063	0,058	0,061	0,066	0,062
0,055	0,066	0,056	0,059	0,058	0,067	0,059	0,051	0,060	0,058
0,066	0,062	0,051	0,062	0,060	0,070	0,066	0,045	0,061	0,058
0,058	0,047	0,058	0,062	0,058	0,065	0,059	0,068	0,062	0,067
0,056	0,054	0,060	0,067	0,059	0,059	0,056	0,067	0,065	0,068
0,058	0,056	0,066	0,068	0,052	0,059	0,051	0,065	0,066	0,056
0,065	0,054	0,060	0,061	0,044	0,063	0,052	0,065	0,065	0,059
0,051	0,054	0,052	0,053	0,045	0,050	0,066	0,060	0,068	0,051
0,066	0,061	0,050	0,050	0,060	0,047	0,055	0,061	0,062	0,059

R <sub>L</sub> in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,012	0,013	0,015	0,014	0,009	0,011	0,011	0,013	0,011	0,011
0,009	0,012	0,012	0,011	0,011	0,010	0,012	0,010	0,013	0,010
0,008	0,010	0,009	0,011	0,009	0,012	0,011	0,010	0,010	0,011
0,010	0,008	0,011	0,010	0,011	0,012	0,015	0,009	0,010	0,010
0,007	0,011	0,010	0,011	0,009	0,010	0,011	0,011	0,008	0,016
0,008	0,011	0,013	0,009	0,009	0,011	0,011	0,012	0,010	0,011
0,011	0,011	0,011	0,010	0,009	0,009	0,012	0,012	0,008	0,009
0,011	0,012	0,008	0,008	0,010	0,009	0,009	0,013	0,014	0,013
0,009	0,012	0,009	0,010	0,009	0,011	0,013	0,014	0,010	0,010
0,014	0,011	0,011	0,012	0,011	0,009	0,008	0,010	0,009	0,011

## Messort 10

Pd/45									
0,10	0,10	0,10	0,11	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10
0,09	0,10	0,10	0,10	0,09	0,10	0,10	0,09	0,10	0,10
0,10	0,08	0,10	0,10	0,08	0,10	0,10	0,09	0,11	0,10
0,09	0,10	0,08	0,08	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
0,10	0,10	0,11	0,08	0,08	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09
0,10	0,10	0,10	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11
0,09	0,10	0,09	0,08	0,10	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10
0,10	0,10	0,08	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
0,09	0,10	0,10	0,08	0,10	0,10	0,11	0,10	0,10	0,10
0,10	0,09	0,10	0,10	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

Qd(2,29°) in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,052	0,055	0,046	0,048	0,045	0,047	0,050	0,050	0,052	0,054
0,050	0,047	0,052	0,047	0,045	0,052	0,053	0,051	0,055	0,050
0,051	0,047	0,050	0,047	0,046	0,052	0,053	0,051	0,055	0,051
0,045	0,046	0,047	0,054	0,048	0,048	0,052	0,054	0,053	0,047
0,050	0,050	0,050	0,058	0,053	0,046	0,052	0,054	0,055	0,053
0,053	0,048	0,048	0,055	0,054	0,048	0,054	0,055	0,056	0,050
0,047	0,053	0,047	0,047	0,052	0,048	0,050	0,055	0,051	0,052
0,051	0,052	0,048	0,043	0,050	0,047	0,048	0,056	0,048	0,050
0,055	0,053	0,052	0,052	0,048	0,052	0,046	0,060	0,051	0,053
0,052	0,051	0,048	0,054	0,039	0,043	0,051	0,056	0,050	0,052

R <sub>L</sub> in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,007	0,007	0,009	0,011	0,006	0,010	0,007	0,006	0,011	0,010
0,007	0,006	0,010	0,009	0,009	0,008	0,007	0,008	0,007	0,009
0,005	0,011	0,008	0,012	0,012	0,009	0,009	0,009	0,010	0,011
0,006	0,008	0,006	0,009	0,010	0,009	0,006	0,007	0,009	0,011
0,007	0,008	0,006	0,007	0,008	0,008	0,005	0,008	0,009	0,009
0,007	0,008	0,007	0,009	0,009	0,006	0,009	0,009	0,007	0,009
0,010	0,007	0,008	0,010	0,009	0,009	0,009	0,006	0,011	0,010
0,009	0,007	0,008	0,011	0,007	0,009	0,009	0,009	0,008	0,011
0,006	0,007	0,007	0,009	0,009	0,009	0,008	0,008	0,009	0,007
0,006	0,009	0,010	0,010	0,008	0,008	0,008	0,006	0,007	0,009

## Messort 11

P <sub>d/45</sub>									
0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09

Q <sub>d</sub> (2,29°) in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,052	0,044	0,052	0,053	0,042	0,042	0,054	0,048	0,050	0,038
0,047	0,054	0,054	0,050	0,043	0,040	0,053	0,046	0,052	0,046
0,051	0,054	0,055	0,043	0,048	0,045	0,054	0,053	0,053	0,046
0,053	0,055	0,053	0,048	0,048	0,056	0,046	0,040	0,054	0,048
0,047	0,055	0,044	0,055	0,055	0,047	0,037	0,047	0,048	0,056
0,050	0,055	0,048	0,048	0,050	0,053	0,042	0,048	0,051	0,052
0,051	0,050	0,056	0,052	0,044	0,056	0,051	0,053	0,051	0,051
0,048	0,038	0,056	0,048	0,044	0,044	0,053	0,052	0,054	0,048
0,052	0,050	0,056	0,048	0,052	0,040	0,047	0,050	0,052	0,048
0,046	0,054	0,055	0,056	0,048	0,052	0,051	0,044	0,045	0,050

R <sub>L</sub> in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,009	0,010	0,009	0,009	0,007	0,010	0,006	0,011	0,009	0,011
0,010	0,010	0,009	0,006	0,010	0,007	0,007	0,009	0,009	0,008
0,009	0,009	0,010	0,010	0,009	0,008	0,005	0,007	0,007	0,009
0,010	0,011	0,007	0,010	0,010	0,009	0,008	0,007	0,008	0,006
0,008	0,010	0,010	0,011	0,009	0,006	0,010	0,010	0,012	0,011
0,010	0,007	0,013	0,007	0,008	0,009	0,008	0,010	0,009	0,007
0,008	0,007	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,007	0,008	0,010
0,007	0,007	0,007	0,007	0,010	0,006	0,009	0,010	0,008	0,008
0,005	0,009	0,007	0,009	0,009	0,009	0,008	0,009	0,012	0,008
0,009	0,010	0,007	0,007	0,010	0,011	0,007	0,008	0,006	0,009

## Messort 12

Pd/45									
0,11	0,13	0,12	0,11	0,11	0,12	0,13	0,13	0,13	0,12
0,13	0,13	0,11	0,14	0,11	0,12	0,13	0,13	0,11	0,14
0,13	0,13	0,13	0,14	0,12	0,12	0,13	0,14	0,13	0,12
0,13	0,13	0,11	0,12	0,13	0,11	0,14	0,12	0,12	0,13
0,12	0,13	0,13	0,13	0,11	0,13	0,15	0,15	0,14	0,13
0,12	0,12	0,12	0,10	0,12	0,12	0,13	0,12	0,13	0,13
0,12	0,11	0,11	0,11	0,14	0,13	0,14	0,14	0,14	0,13
0,13	0,12	0,12	0,10	0,11	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12
0,15	0,13	0,12	0,11	0,13	0,13	0,12	0,13	0,15	0,12
0,12	0,13	0,12	0,12	0,14	0,13	0,13	0,14	0,14	0,12

Qd(2,29°) in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,084	0,076	0,092	0,097	0,089	0,084	0,091	0,065	0,083	0,081
0,089	0,089	0,090	0,093	0,089	0,092	0,085	0,096	0,079	0,067
0,091	0,089	0,086	0,091	0,079	0,078	0,091	0,083	0,089	0,076
0,094	0,085	0,091	0,099	0,093	0,086	0,082	0,084	0,096	0,078
0,091	0,081	0,085	0,096	0,092	0,082	0,082	0,074	0,082	0,090
0,091	0,093	0,089	0,077	0,094	0,084	0,081	0,063	0,082	0,085
0,097	0,090	0,078	0,092	0,089	0,078	0,077	0,066	0,070	0,093
0,106	0,096	0,089	0,085	0,090	0,096	0,076	0,053	0,078	0,083
0,092	0,081	0,077	0,085	0,092	0,091	0,076	0,078	0,082	0,076
0,085	0,096	0,084	0,082	0,093	0,089	0,090	0,069	0,081	0,079

R <sub>L</sub> in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,010	0,011	0,010	0,015	0,013	0,015	0,018	0,012	0,015	0,014
0,015	0,012	0,011	0,012	0,012	0,015	0,009	0,014	0,016	0,014
0,013	0,011	0,014	0,012	0,012	0,011	0,014	0,013	0,018	0,015
0,012	0,012	0,012	0,010	0,012	0,015	0,012	0,014	0,018	0,013
0,009	0,010	0,013	0,012	0,014	0,011	0,012	0,012	0,016	0,016
0,010	0,010	0,013	0,013	0,011	0,010	0,012	0,010	0,014	0,018
0,013	0,011	0,011	0,014	0,010	0,010	0,010	0,011	0,009	0,019
0,013	0,012	0,015	0,009	0,013	0,015	0,014	0,010	0,014	0,017
0,014	0,009	0,012	0,011	0,012	0,012	0,014	0,012	0,012	0,016
0,010	0,014	0,013	0,013	0,011	0,011	0,013	0,010	0,012	0,012

## Messort 13

P <sub>d/45</sub>									
0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,12	0,12	0,11	0,12
0,12	0,12	0,09	0,12	0,12	0,11	0,13	0,12	0,12	0,12
0,12	0,11	0,12	0,12	0,11	0,12	0,11	0,12	0,12	0,13
0,12	0,12	0,11	0,12	0,12	0,11	0,11	0,13	0,13	0,12
0,11	0,12	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11
0,12	0,12	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,11	0,12	0,12
0,12	0,11	0,12	0,11	0,13	0,12	0,13	0,11	0,12	0,13
0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
0,11	0,11	0,12	0,11	0,11	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12
0,12	0,11	0,13	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,11	0,14

Q <sub>d</sub> (2,29°) in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,065	0,059	0,059	0,058	0,062	0,061	0,059	0,063	0,062	0,063
0,060	0,063	0,062	0,053	0,054	0,060	0,056	0,066	0,071	0,054
0,065	0,066	0,066	0,058	0,067	0,061	0,048	0,067	0,067	0,065
0,063	0,068	0,061	0,056	0,063	0,054	0,067	0,066	0,070	0,073
0,061	0,067	0,060	0,063	0,059	0,063	0,067	0,061	0,067	0,065
0,067	0,071	0,067	0,067	0,062	0,068	0,062	0,060	0,066	0,060
0,067	0,068	0,063	0,066	0,062	0,067	0,063	0,067	0,068	0,065
0,062	0,065	0,062	0,065	0,059	0,063	0,063	0,063	0,063	0,067
0,059	0,066	0,068	0,067	0,061	0,060	0,062	0,063	0,059	0,069
0,062	0,061	0,075	0,067	0,066	0,062	0,063	0,068	0,063	0,068

R <sub>L</sub> in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,012	0,010	0,012	0,008	0,012	0,011	0,010	0,010	0,008	0,012
0,009	0,012	0,011	0,012	0,010	0,011	0,013	0,013	0,013	0,007
0,013	0,010	0,013	0,011	0,013	0,014	0,008	0,012	0,011	0,013
0,011	0,012	0,013	0,011	0,013	0,011	0,013	0,012	0,018	0,014
0,010	0,014	0,008	0,014	0,014	0,010	0,011	0,011	0,012	0,012
0,012	0,012	0,012	0,013	0,014	0,013	0,011	0,014	0,014	0,011
0,014	0,010	0,016	0,017	0,011	0,013	0,013	0,013	0,016	0,012
0,012	0,010	0,012	0,013	0,016	0,012	0,011	0,014	0,013	0,014
0,012	0,012	0,012	0,014	0,010	0,015	0,009	0,014	0,012	0,010
0,012	0,012	0,014	0,012	0,011	0,014	0,011	0,014	0,010	0,012

## Messort 14

Pd/45									
0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10
0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,10
0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,10	0,10
0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09
0,09	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,09
0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09
0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,09	0,09
0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10
0,09	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,09	0,10

Qd(2,29°) in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,038	0,048	0,045	0,045	0,047	0,044	0,046	0,046	0,048	0,045
0,045	0,043	0,046	0,047	0,045	0,045	0,044	0,053	0,053	0,046
0,040	0,045	0,044	0,046	0,040	0,045	0,042	0,050	0,047	0,050
0,047	0,048	0,046	0,045	0,046	0,048	0,046	0,047	0,046	0,046
0,045	0,043	0,046	0,046	0,045	0,044	0,044	0,050	0,044	0,050
0,051	0,042	0,044	0,045	0,047	0,046	0,046	0,052	0,051	0,045
0,044	0,045	0,047	0,047	0,043	0,047	0,044	0,051	0,050	0,045
0,047	0,043	0,050	0,047	0,044	0,047	0,051	0,051	0,045	0,044
0,044	0,044	0,045	0,045	0,043	0,046	0,046	0,048	0,047	0,048
0,042	0,046	0,043	0,044	0,050	0,046	0,046	0,050	0,050	0,050

R <sub>L</sub> in cd/(m <sup>2</sup> ·lx)									
0,004	0,013	0,009	0,010	0,011	0,007	0,007	0,011	0,010	0,011
0,011	0,010	0,010	0,007	0,010	0,011	0,009	0,012	0,011	0,009
0,009	0,011	0,010	0,011	0,009	0,009	0,008	0,011	0,011	0,010
0,014	0,008	0,009	0,008	0,009	0,011	0,009	0,012	0,011	0,011
0,009	0,007	0,011	0,013	0,010	0,008	0,009	0,010	0,008	0,010
0,014	0,008	0,010	0,011	0,012	0,009	0,012	0,013	0,011	0,012
0,010	0,009	0,010	0,012	0,010	0,010	0,011	0,011	0,009	0,010
0,008	0,007	0,010	0,011	0,009	0,009	0,012	0,011	0,011	0,009
0,008	0,010	0,009	0,009	0,009	0,007	0,010	0,009	0,011	0,011
0,011	0,011	0,009	0,009	0,008	0,011	0,011	0,012	0,010	0,012

## 5 – Reflexionsverteilungen der Feldmessungen (große Teilflächen)

Fläche 1 (A≈80m<sup>2</sup>, Messraster 1x1m)

		1	$\rho_{d/45}$	2	$\rho_{d/45}$	3	$\rho_{d/45}$	4	$\rho_{d/45}$
1	Qd(2,29°)	0,058	0,14	0,055	0,13	0,059	0,13	0,060	0,13
	R <sub>L</sub>	0,011		0,009		0,010		0,014	
2	Qd(2,29°)	0,060	0,14	0,055	0,13	0,055	0,13	0,058	0,13
	R <sub>L</sub>	0,011		0,009		0,007		0,011	
3	Qd(2,29°)	0,059	0,14	0,055	0,13	0,058	0,12	0,062	0,13
	R <sub>L</sub>	0,014		0,010		0,014		0,013	
4	Qd(2,29°)	0,061	0,14	0,055	0,12	0,056	0,12	0,060	0,12
	R <sub>L</sub>	0,013		0,009		0,010		0,010	
5	Qd(2,29°)	0,062	0,14	0,054	0,13	0,055	0,13	0,060	0,13
	R <sub>L</sub>	0,013		0,011		0,010		0,011	
6	Qd(2,29°)	0,062	0,13	0,055	0,13	0,053	0,13	0,061	0,13
	R <sub>L</sub>	0,013		0,010		0,009		0,010	
7	Qd(2,29°)	0,062	0,14	0,055	0,13	0,053	0,13	0,059	0,13
	R <sub>L</sub>	0,018		0,009		0,008		0,011	
8	Qd(2,29°)	0,058	0,14	0,055	0,13	0,054	0,13	0,061	0,13
	R <sub>L</sub>	0,011		0,010		0,008		0,014	
9	Qd(2,29°)	0,063	0,13	0,056	0,12	0,056	0,13	0,061	0,14
	R <sub>L</sub>	0,013		0,008		0,007		0,012	
10	Qd(2,29°)	0,059	0,13	0,050	0,12	0,047	0,13	0,058	0,14
	R <sub>L</sub>	0,010		0,009		0,009		0,015	
11	Qd(2,29°)	0,060	0,14	0,055	0,12	0,048	0,12	0,060	0,12
	R <sub>L</sub>	0,014		0,010		0,009		0,010	
12	Qd(2,29°)	0,062	0,13	0,058	0,12	0,054	0,12	0,059	0,12
	R <sub>L</sub>	0,009		0,012		0,008		0,013	
13	Qd(2,29°)	0,062	0,13	0,054	0,12	0,048	0,12	0,062	0,12
	R <sub>L</sub>	0,013		0,011		0,010		0,013	
14	Qd(2,29°)	0,059	0,14	0,055	0,13	0,058	0,13	0,059	0,13
	R <sub>L</sub>	0,014		0,011		0,008		0,010	
15	Qd(2,29°)	0,058	0,14	0,053	0,13	0,056	0,13	0,063	0,13
	R <sub>L</sub>	0,013		0,008		0,007		0,011	
16	Qd(2,29°)	0,054	0,13	0,050	0,13	0,056	0,13	0,054	0,12
	R <sub>L</sub>	0,010		0,009		0,011		0,014	
17	Qd(2,29°)	0,061	0,13	0,055	0,12	0,050	0,13	0,060	0,12
	R <sub>L</sub>	0,012		0,008		0,009		0,008	
18	Qd(2,29°)	0,061	0,14	0,053	0,12	0,056	0,13	0,058	0,11
	R <sub>L</sub>	0,013		0,008		0,011		0,012	
19	Qd(2,29°)	0,062	0,14	0,056	0,12	0,054	0,12	0,058	0,12
	R <sub>L</sub>	0,016		0,009		0,009		0,012	
20	Qd(2,29°)	0,058	0,13	0,056	0,12	0,053	0,12	0,061	0,12
	R <sub>L</sub>	0,014		0,012		0,011		0,011	

Fläche 2 (A≈100m<sup>2</sup>, Messraster 1x1m)

			1	$\rho_{d/45}$	2	$\rho_{d/45}$	3	$\rho_{d/45}$	4	$\rho_{d/45}$	5	$\rho_{d/45}$
1	Qd(2,29°)	in	0,062	0,12	0,070	0,12	0,060	0,12	0,066	0,12	0,065	0,12
	R <sub>L</sub>	cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	0,013		0,013		0,009		0,012		0,011	
2	Qd(2,29°)	in	0,066	0,12	0,071	0,12	0,068	0,11	0,067	0,13	0,067	0,13
	R <sub>L</sub>	cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	0,013		0,014		0,010		0,011		0,012	
3	Qd(2,29°)	in	0,070	0,12	0,073	0,12	0,076	0,11	0,067	0,13	0,067	0,13
	R <sub>L</sub>	cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	0,009		0,013		0,015		0,013		0,014	
4	Qd(2,29°)	in	0,067	0,12	0,074	0,13	0,068	0,12	0,069	0,13	0,062	0,13
	R <sub>L</sub>	cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	0,010		0,012		0,011		0,013		0,011	
5	Qd(2,29°)	in	0,071	0,12	0,074	0,12	0,068	0,12	0,068	0,12	0,066	0,12
	R <sub>L</sub>	cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	0,014		0,010		0,013		0,010		0,011	
6	Qd(2,29°)	in	0,069	0,12	0,067	0,12	0,065	0,11	0,069	0,12	0,068	0,12
	R <sub>L</sub>	cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	0,015		0,012		0,011		0,013		0,014	
7	Qd(2,29°)	in	0,067	0,12	0,066	0,12	0,071	0,13	0,067	0,13	0,069	0,11
	R <sub>L</sub>	cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	0,012		0,011		0,014		0,010		0,011	
8	Qd(2,29°)	in	0,054	0,12	0,063	0,12	0,067	0,12	0,068	0,12	0,060	0,11
	R <sub>L</sub>	cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	0,008		0,013		0,010		0,010		0,011	
9	Qd(2,29°)	in	0,062	0,11	0,067	0,12	0,065	0,09	0,062	0,13	0,069	0,12
	R <sub>L</sub>	cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	0,010		0,011		0,013		0,012		0,016	
10	Qd(2,29°)	in	0,069	0,12	0,067	0,13	0,063	0,12	0,068	0,12	0,065	0,11
	R <sub>L</sub>	cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	0,015		0,009		0,014		0,011		0,013	
11	Qd(2,29°)	in	0,067	0,12	0,070	0,11	0,068	0,11	0,069	0,13	0,061	0,11
	R <sub>L</sub>	cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	0,011		0,013		0,013		0,011		0,010	
12	Qd(2,29°)	in	0,062	0,12	0,066	0,12	0,063	0,12	0,068	0,13	0,067	0,11
	R <sub>L</sub>	cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	0,014		0,012		0,013		0,011		0,012	
13	Qd(2,29°)	in	0,061	0,12	0,061	0,12	0,061	0,12	0,063	0,12	0,063	0,12
	R <sub>L</sub>	cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	0,011		0,014		0,015		0,014		0,013	
14	Qd(2,29°)	in	0,061	0,10	0,068	0,12	0,065	0,12	0,065	0,11	0,062	0,11
	R <sub>L</sub>	cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	0,012		0,016		0,013		0,011		0,012	
15	Qd(2,29°)	in	0,069	0,13	0,066	0,11	0,056	0,11	0,060	0,12	0,069	0,12
	R <sub>L</sub>	cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	0,015		0,011		0,010		0,011		0,014	
16	Qd(2,29°)	in	0,062	0,12	0,065	0,12	0,065	0,12	0,065	0,13	0,063	0,12
	R <sub>L</sub>	cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	0,011		0,012		0,013		0,008		0,010	
17	Qd(2,29°)	in	0,063	0,11	0,062	0,12	0,063	0,13	0,060	0,12	0,062	0,11
	R <sub>L</sub>	cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	0,009		0,012		0,010		0,014		0,011	
18	Qd(2,29°)	in	0,059	0,13	0,061	0,13	0,068	0,11	0,062	0,12	0,060	0,11
	R <sub>L</sub>	cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	0,013		0,011		0,012		0,013		0,009	
19	Qd(2,29°)	in	0,060	0,14	0,063	0,11	0,067	0,12	0,062	0,12	0,059	0,11
	R <sub>L</sub>	cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	0,013		0,010		0,012		0,011		0,012	
20	Qd(2,29°)	in	0,059	0,12	0,060	0,11	0,067	0,11	0,067	0,12	0,068	0,12
	R <sub>L</sub>	cd/(m <sup>2</sup> ·lx)	0,010		0,010		0,013		0,015		0,011	



**Leuchtdichtevertellung Fläche 2 (Messbedingung: Tag, bedeckter Himmel, Beleuchtungsstärke je Zeile identisch, da zeitgleiche Aufnahme)**

L(2,3°) in cd/m <sup>2</sup>	1	2	3	4	5	Eh in lx
1	1.121	1.126	1.128	1.144	1.122	17.100
2	1.351	1.374	1.357	1.365	1.357	20.800
3	1.312	1.288	1.301	1.307	1.323	19.500
4	987	986	978	992	1.000	15.300
5	1.307	1.280	1.315	1.296	1.284	19.400
6	1.245	1.286	1.248	1.257	1.285	19.700
7	1.022	1.062	999	1.061	1.017	16.500
8	1.279	1.258	1.285	1.269	1.302	19.400
9	1.103	1.119	1.101	1.123	1.108	16.400
10	1.004	1.013	979	995	1.033	16.200
11	1.144	1.124	1.142	1.175	1.141	16.900
12	1.225	1.218	1.242	1.252	1.236	18.400
13	967	983	938	957	984	15.500
14	1.358	1.396	1.306	1.393	1.332	19.900
15	1.116	1.133	1.128	1.132	1.140	17.800
16	1.238	1.222	1.254	1.244	1.270	19.800
17	1.187	1.173	1.174	1.189	1.186	19.200
18	1.044	1.071	1.057	1.066	1.069	16.900
19	1.253	1.217	1.225	1.234	1.245	20.100
20	1.225	1.230	1.235	1.229	1.236	19.900

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Verkehrstechnik“

#### 2020

- V 321: **Dynamisches umweltsensitives Verkehrsmanagement**  
Diegmann, Wursthorn, Breitenbach, Düring, Schönharting, Kraus, Klemm, Voigt, Kohlen, Löhner € 20,00
- V 324: **Konzept zur Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit und ohne LSA**  
Vortisch, Buck, Leyn, Baier, Schuckließ, Schimpf, Schmotz  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 325: **Entwurfsparameter von Hochleistungsstraßen innerhalb bebauter Gebiete**  
D. Schmitt, J. Gerlach, M. Schwedler, F. Huber, H. Sander  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 326: **Straßenverkehrszählung 2015 – Methodik der manuellen Zählungen**  
Schmidt, Frenken, Mahmoudi € 15,50
- V 327: **Straßenverkehrszählung 2015 – Ergebnisse**  
Frenken, Mahmoudi € 16,50
- V 328: **Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen und Entwicklung von Nachrüstlösungen**  
Meisel, Balzer-Hebborn, Ellmers, Jungfeld, Klostermeier, Kübler, Schmitz, Schwedhelm, Yu  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 329: **Streckenbezogene Glättevorhersage**  
Schedler, Gutbrod, Müller, Schröder € 24,50
- V 330: **Führung des Radverkehrs an Landstraßen**  
Baier, Leu, Rittershaus  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 331: **Leitfaden für die Streckenfreigabe für den Einsatz von Lang-Lkw**  
Lippold, Schemmel, Förg, Süßmann € 17,00
- V 332: **Räumliche Linienführung von Autobahnen**  
Lippold, Zösch  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 333: **Passive Schallschutzmaßnahmen – Akustische Wirksamkeit**  
Hänisch, Heidebrunn € 17,00
- V 334: **Akustische Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen**  
Lindner, Kluth, Ruhnau, Schulze € 17,00
- V 335: **Ermittlung aktualisierter Grundlagen für Beschleunigungsvergütungen in Bauverträgen**  
Geistefeldt, Hohmann, von der Heiden, Finkbeiner € 16,00
- V 336: **Vergleich der Detektoren für die Verkehrserfassung an signalisierten Knotenpunkten**  
Ungureanu, Ilić, Radon, Rothe, Reichert, Schober, Stamatakis, Heinrich € 18,50
- V 337: **Bridge-WIM Pilotversuch – Begleitung und Auswertung**  
Kathmann, Scotti, Kucera € 18,50

#### 2021

- V 338: **Streckenbeeinflussungsanlagen – Entwurf eines regelungstechnischen Modells zur verbesserten Harmonisierung des Verkehrsablaufs**  
Schwietering, Schwietering, Maier, Hakenberg, Pyta, Abel  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 339: **Aktualisierung der Datenbank MARLIS**  
Schneider, Turhan, Pelzer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 340: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2017**  
Fitschen, Nordmann € 31,00
- V 341: **Lebenszykluskostenbewertung von Schutzeinrichtungen**  
Eckert, Hendrich, Horlacher, Kathmann, Scotti, von Heel  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 342: **Entwicklung eines aktuellen, echtzeit-verfügbaren Key Performance Indicator (KPI) Systems für das deutsche Autobahnnetz**  
Peter, Janko, Schick, Waßmuth, Friedrich, Bawidamann € 21,00
- V 343: **Kreisverkehre an Landstraßen Auswirkungen der Erkennbarkeit und der Zufahrtsgestaltung auf die Verkehrssicherheit**  
Schmotz, Schröter, Schemmel, Lippold, Schulze € 21,50
- V 344: **Verkehrsträgerübergreifende Lärmkumulation in komplexen Situationen**  
Popp, Eggers, Heidebrunn, Cortes € 21,00
- V 345: **Aufbau einer Datenbank zur Berechnung exemplarischer Lärmsituationen mit Geräuschemissionsdaten der Straße und meteorologischen Daten**  
Liepert, Skowronek, Eberlei, Crijenkovic, Müller, Schady, Elsen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 346: **Zusammenhang reduzierter Geräuschgrenzwerte mit den in-use Geräuschemissionen bei unterschiedlichen Verkehrssituationen**  
Müller, Huth, Liepert € 15,00
- V 347: **Chancen in der Verkehrsbeeinflussung durch Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation**  
Schwietering, Löbbering, Spangler, Gabloner, Busch, Roszak, Dobmeier, Neumann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 348: **Einsatz und Verkehrssicherheit von Fußgängerüberwegen**  
Bohle, Busek, Schröder € 18,50
- V 349: **Straßenbepflanzung und Verkehrssicherheit – Ermittlung unfallbeeinflussender Merkmale auf Basis empirischer Modelle unter besonderer Berücksichtigung der Bepflanzung im Seitenraum an Landstraßen**  
Schreck-von Below € 22,00
- V 350: **Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen**  
Bartolomaeus, Strigari, Sammet  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 351: **Effektivität und Wirtschaftlichkeit der Streustofflagerung – TAUSALA II**  
Holldorb, Cypra, Pape  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**2022****V 352: Abriebe von Fahrbahnoberflächen**

Düring, Schmidt, Johannsen € 19,00

**V 353: Nutzung der C2X-basierten ÖV-Priorisierung an signalisierten Knotenpunkten**

Gay, Grimm, Otto, Partzsch, Gersdorf, Gierisch, Löwe, Schütze € 16,00

**V 354: Anwendung der Methode BIM in Konformität mit den Regelwerken der FGSV und des IT-Ko**Radenberg, Müller, König, Hagedorn, Geistefeldt, Hohmann, Heinrichs, Stiehler, Kortemeyer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**V 355: Pilotversuch des Rechtsabbiegens von Rad Fahrern bei Rot**Niestegge, Schüller, Hantschel, Schröter, Gerike  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**V 356: Entwicklung von Einsatzkriterien für Fußgänger-schutzanlagen mit unterschiedlichen Grundstellungen**Medicus, Schmotz, Gerike, Reinartz, Baier  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**V 357: Qualifizierung der in Deutschland verwendeten Fahrzeug-Rückhaltesysteme mit verbessertem Schutz für Motorradfahrer nach den aktuellen europäischen Spezifikationen**Klöckner, Gärtner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**V 358: Nutzenpotenziale von eCall im Verkehrsmanagement**Schaarschmidt, van Driel, Reinthaler, Nitsche, Aleksa  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**V 359: Management von Neophyten – Ein Überblick über die aktuelle Situation auf Straßenbegleitflächen**Bartels  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**V 360: Wirksamkeit von Tunnelwänden als Träger photokatalytischer Oberflächen – Hauptstudie**Stephan, Ehm, Kamaruddin  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**V 361: Nachhaltigkeitsbewertung von Streckenzügen der Straßeninfrastruktur**Hess, Lohmeier, Mielecke, Kunz  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**V 362: Simulation des hochautomatisierten Fahrens auf Autobahnen mit kollektiver Streckenbeeinflussung**Hilgers, Krabbe, Haug, Grimm, Kutter, Tempelhahn, Schwietering, Füg  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**V 363: PERTA – Passive Sicherheit in der Straßenausstattung**Tomasch, Radeschnig, Dünser, Sinz, Gstrein  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**V 364: Verkehrsträgerübergreifender Austausch von Erneuerbarer Energie**

Chvanova, Haller, Leprich, U. Mayr, C. Mayr, Oßwald, Altmock, Gemmer, Michaels, Wagner € 23,50

**V 365: Bundesweite Verkehrsdaten 2019**Schneider, Pelzer, Gallus, Dick, Lensing  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.**2023****V 366: Akzeptanz und Verkehrssicherheit des Radverkehrs im Mischverkehr auf Hauptverkehrsstraßen**Schüller, Niestegge, Hantschel, Kühn, Gerike, Huber  
in Vorbereitung**V 367: In Situ-Messungen von Reflexionseigenschaften von Fahrbahnoberflächen**Schulze  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

---

 Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG  
 Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
 Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.