

BILAG:3

Dr. Hans Meseberg
LSC Lichttechnik und Straßenausstattung Consult
Fährstr. 10
13503 Berlin
Tel. und Fax 030/82707832
Email: hmeseberg@t-online.de

St u d i e G 04/2011 **- Entwurf vom 23. 9. 2011 -**

Einfluss der Aufhellung von Fahrbahnoberflächen auf Energieeinsparung, Reduzierung von CO₂-Emissionen, Verringerung des Hitzeinseleffektes und Verkehrssicherheit

Vorbemerkung

Die öffentliche Beleuchtung erfüllt im wesentlichen drei Aufgaben: Sie gewährleistet die Verkehrssicherheit für den Fahrzeug- und Personenverkehr in den Dunkelstunden, liefert einen Beitrag zur Unterstützung der öffentlichen Ordnung und des Schutzes der Bürger vor Kriminalität und trägt zur Erhöhung der Lebensqualität bei und stellt insofern einen Aspekt der Daseinsfürsorge der Kommunen für ihre Bürger dar. Doch Straßenbeleuchtung kostet Geld, verbraucht natürliche Ressourcen und ist mit CO₂-Emissionen verbunden. Insbesondere in Zeiten knapper kommunaler Kassen versucht man auch bei der Straßenbeleuchtung zu sparen, z.B. durch Reduzierung des Beleuchtungsniveaus, Abschalten von Leuchten oder gar Abschalten der gesamten Beleuchtung. Der Einspareffekt ist jedoch beschränkt; die Reduzierung des Beleuchtungsniveaus, erst recht komplettes Abschalten, führt zu einem erhöhten Unfallrisiko selbst in den tiefen Nachtstunden, wie die vielen Untersuchungen zu diesem Gebiet zeigen [1], und erhöhter Kriminalität. Wirkungsvoller ist die Erneuerung von Beleuchtungsanlagen und/oder Umrüstung auf effektivere Leuchten und energiesparende Lampen, hier ist v.a. die LED-Technik zu nennen. Eine ebenfalls sehr wirkungsvolle Methode Kosten, Energieverbrauch und CO₂-Emissionen zu senken, die Aufhellung der Fahrbahnoberfläche, wird in Teilen Nord- und Ostdeutschland zwar häufig, bundesweit jedoch leider viel zu wenig angewandt. Ein Beispiel: Das Berliner Lichtkonzept 2011 [2] enthält viele Aussagen zur Optimierung der Straßenbeleuchtung auch unter dem Aspekt der Kostenreduzierung, aber kein Wort zur Helligkeit der Fahrbahnoberflächen.

Deutschland will die Elektroenergiegewinnung aus Kernkraftwerken bis zum Jahr 2022 beenden. Um dieses Ziel zu erreichen, bedarf es nicht nur eines gesellschaftlichen und politischen Konsenses, sondern auch vielfältiger technischer Anstrengungen: Bereitstellung von alternativen Energiequellen, Erweiterung des Leitungsnetzes und nicht zuletzt auch die Nutzung aller sinnvollen Einsparmöglichkeiten. Letzten Endes kann die Aufhellung von Straßen auch einen Beitrag leisten, das Abschalten von Kernkraftwerken in Deutschland bis 2022 ohne Gefährdung der Versorgungssicherheit zu erreichen.

1 Auftraggeber

Diese Studie wurde auf Anregung des Arbeitskreises 4.3.4 „Helligkeit“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Köln (FGSV) vom 22. September 2010 erarbeitet. Es stellt eine Erweiterung und Aktualisierung des Gutachtens G 07/2009 des Verfassers „Ermittlung des optimalen Leuchtdichtkoeffizienten q_0 von Fahrbahnoberflächen hinsichtlich Energieeinsparung ortsfest beleuchteter Straßen, Standfestigkeit von Fahrbahndecken und Kontrastverhältnissen nicht ortsfest beleuchteter Straßen“ vom 14. September 2009 dar.

2 Auftragsache

Helle Fahrbahnoberflächen haben gegenüber dunklen eine Reihe von Vorteilen. Bei starker sommerlicher Sonneneinstrahlung erwärmt sich die Fahrbahn nicht so stark, was bei bituminösen Deckschichten zu weniger Verformung, geringerer Spurrinnentiefe und insbesondere bei hoch belasteten Straßen letztlich zu weniger Unfällen führt; die geringere Erwärmung bedingt auch eine geringere sommerliche Aufheizung von Innenstädten („städtischer Hitzeinsel-Effekt“). Bei ortsfest beleuchteten Straßen können mit hellen Fahrbahnoberflächen erhebliche Investitions-, Beleuchtungs- und Instandhaltungskosten eingespart werden. Damit verbunden ist eine entsprechende Verringerung des CO₂-Ausstoßes. Bei unbeleuchteten Straßen bewirken helle Fahrbahnoberflächen eine Verbesserung des nächtlichen Kontrastes, unter dem auf der Fahrbahn befindliche Personen und Hindernisse gesehen werden können. Dies führt zu einer Verringerung des nächtlichen Unfallgeschehens.

Inhalt der Studie ist die qualitative Beschreibung der genannten Effekte und die quantitative Abschätzung bzw. Berechnung des Energiesparpotentials und der möglichen Verringerung von Verkehrsunfällen. Die Ergebnisse sollen in das FGSV-Arbeitspapier „Reflexionseigenschaften von Fahrbahnoberflächen“ einfließen.

3 Lichttechnische Größen von Fahrbahnoberflächen

3.1 Helligkeit und Reflexionsvermögen

Der Begriff Helligkeit hat zwei Bedeutungen: a. Helligkeit steht für den vom Menschen visuell empfundenen Helligkeitseindruck einer Oberfläche; diese Empfindung hängt außer von dem subjektiven Empfinden des jeweiligen Beobachters von den Materialeigenschaften und der Intensität ab, mit der die Oberfläche beleuchtet wird. b. Unter Helligkeit versteht man die Höhe des Reflexionsvermögens einer Oberfläche. In diesem Sinne ist Helligkeit eine objektiv messbare Materialeigenschaft. Wenn man von hellen oder dunklen Fahrbahnoberflächen spricht, ist in der Regel zu verstehen, wie gut eine Fahrbahn das auftreffende Himmels- oder künstliche Licht reflektiert.

Beim Reflexionsvermögen unterscheidet man zwischen dem Grad der Helligkeit (welcher Anteil des auftreffenden Lichts wird reflektiert?) und der Art der Reflexion (in welche Richtung oder Richtungen wird das Licht reflektiert?). Von den Reflexionsarten sind für Fahrbahnoberflächen die spiegelnde Reflexion (Einfallswinkel = Ausfallswinkel) und die diffuse Reflexion (das Licht wird gleichmäßig in alle Richtungen reflektiert) von besonderer Bedeutung. Alle Fahrbahnoberflächen reflektieren das Licht sowohl spiegelnd als auch diffus, je nach Aufbau der Deckschicht in unterschiedlichen Anteilen; man spricht daher auch von Fahrbahnoberflächen als „matten Spiegeln“. Zur vollständigen Charakterisierung der Reflexionseigenschaften einer Fahrbahnoberfläche gehören daher immer Angaben über den Helligkeitsgrad und die Art der Reflexion.

Die visuell wahrgenommene Helligkeit einer Fahrbahnoberfläche (Leuchtdichte L in cd/m^2) wird berechnet nach der Formel

$$L = q \cdot E \quad (1)$$

Die horizontale Beleuchtungsstärke E (gemessen in lx) (Kurzzeichen: E) gibt den Lichtstrom (die Lichtmenge; gemessen in Lumen: lm) an, der von einer Lichtquelle ausgehend auf die Fahrbahnoberfläche auftrifft. Der Leuchtdichtekoeffizient q (Dimension: $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$) ist demnach der Quotient der Fahrbahnleuchtdichte und der Beleuchtungsstärke an einem Punkt der Fahrbahnoberfläche. q hängt von der Lichteinfall- und der Beobachtungsrichtung ab.

3.2 Die lichttechnischen Größen q_0 und κ_P nach DIN 5044

Der mittlere Leuchtdichtekoeffizient q_0 wird nach DIN 5044-2 [3] als Maß für die Helligkeit einer Fahrbahnoberfläche verwendet. Der Spiegelfaktor κ_P dient nach DIN 5044-2 als Maß für den Grad der spiegelnden Reflexion. κ_P wird bestimmt aus der Formel

$$\kappa_P = \log(q_0/q_p) \quad (2)$$

q_p ist der Leuchtdichtekoeffizient bei senkrechter Anleuchtung. In DIN 5044-2 sind Fahrbahnbedeckschichten nach der Höhe des Spiegelfaktors in 4 Standards (s. Tabelle 1) klassifiziert.

Standard	Bereich von κ_P
R 1	$\leq 0,22$
R 2	$0,22 < \kappa_P \leq 0,33$
R 3	$0,33 < \kappa_P \leq 0,44$
R 4	$0,44 < \kappa_P \leq 0,55$

Tabelle 1: Klassifizierung von Straßenbelägen nach DIN 5044-2 [3]

Klassifizierungsgröße ist allein der Spiegelfaktor κ_P und nicht, wie oft angenommen wird, auch q_0 . Die in DIN 5044-2 aufgeführten q_0 -Bereiche für die 4 Standards stellen nur die Bereiche dar, die man bei umfangreichen Messungen in den 1960er Jahren in der Praxis gefunden hat. Deshalb ist folgende, in dieser oder ähnlicher Form oft zu lesende Aussage nicht korrekt: „Es wurde ein Leuchtdichtekoeffizient $q_0 = 0,11 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ gemessen. Der Fahrbahnbelag ist daher in Klasse 1 nach DIN 5044 einzuordnen“.

Hohe q_0 -Werte bedeuten hohe Reflexion des einfallenden Lichts, hohe κ_P -Werte bedeuten hohen spiegelnden und daher geringen diffusen Anteil reflektierten Lichts. Man hat allerdings bei umfangreichen Messungen festgestellt, dass die Reflexionseigenschaften der Fahrbahnoberflächen, die in die Klassen R2 bis R4 einzuordnen sind, sehr ähnlich sind. Daher genügt eine Einteilung der Oberflächen in zwei Klassen, wie in der Publikation 66 [4] der CIE (Commission Internationale d'Éclairage, Internationale Beleuchtungskommission) vereinbart (s. Tabelle 2). Die Klasse C1 der CIE enthält diffus, die Klasse C2 eher spiegelnd reflektierende Fahrbahnoberflächen. Diese einfache Einteilung trägt auch dem Umstand Rechnung, dass wegen der ständigen Überrollungen praktisch alle Fahrbahnoberflächen im Laufe der Zeit zunehmend spiegelnd reflektieren. Bei Berechnungen für die Auslegung der Straßenbeleuchtung (s. Abschnitt 8.3) wird international wie auch in Deutschland gemäß DIN/DIN EN 13201 [5], [6] im Allgemeinen nur noch das CIE-System verwendet¹⁾.

Bereich von κ_P	Standard DIN 5044	Standard nach CIE-Publikation 66
$\leq 0,22$	R 1	C1
$0,22 < \kappa_P \leq 0,33$	R 2	C2
$0,33 < \kappa_P \leq 0,44$	R 3	
$0,44 < \kappa_P \leq 0,55$	R 4	

Tabelle 2: Zuordnung der Klassen nach DIN 5044 und CIE-Publikation 66 [4]

Das DIN-System wurde ursprünglich für Leuchtdichteberechnungen von Asphaltdeckschichten entwickelt; DIN- und CIE-System sind aber genauso gut für Betondecken anwendbar.

¹⁾) DIN 5044-2 ist durch DIN/DIN EN 13201 ersetzt worden. Entgegen anderer Auffassung kann das R-Klassifizierungssystem der DIN 5044-2 aber durchaus weiter verwendet werden, wenn dafür Gründe vorliegen.

3.3 Veränderung der lichttechnischen Eigenschaften bei feuchter Straßenoberfläche

Bei feuchter Fahrbahnoberfläche und insbesondere bei Regen verändern sich die lichttechnischen Eigenschaften ganz erheblich. Die Helligkeit nimmt ab, d.h. der Leuchtdichtekoeffizient q verringert sich und die Reflexion erfolgt stärker spiegelnd, κ_P nimmt zu. Ganz allgemein zeigt sich die Tendenz, dass bei aufgehellten Fahrbahnoberflächen die Abnahme von q_0 und die Zunahme von κ_P weniger stark ausgeprägt sind als bei dunklen Fahrbahnoberflächen. Dies wirkt sich hinsichtlich des Unfallgeschehens sowohl bei den Sehbedingungen bei ortsfester als auch bei kfz-eigener Beleuchtung positiv aus (s. Abschnitt 12).

3.4 Bedeutung von q_0 und κ_P

Bei Tageslicht wird die Helligkeit einer Fahrbahnoberfläche im wesentlichen durch q_0 bestimmt. Bei nächtlicher Anleuchtung der Fahrbahn durch ortsfeste oder kfz-eigene Beleuchtung hängt der Helligkeitseindruck aber auch stark vom Spiegelfaktor κ_P ab. So ist bei gleichem q_0 die Helligkeit des Teils der Fahrbahn, die unmittelbar vor dem Kraftfahrer liegt, niedriger, wenn der Spiegelfaktor höher ist, die Fahrbahn also mehr Licht vom Kraftfahrer weg spiegelt. Auch bei der ortsfesten Beleuchtung beeinflusst neben dem Leuchtdichtekoeffizienten q_0 der Spiegelfaktor die Höhe und die Gleichmäßigkeit der Leuchtdichte der Fahrbahn.

Bei der Ermittlung der Erwärmung einer Fahrbahn durch das Sonnenlicht spielt der Spiegelfaktor keine Rolle. Hier ist q_0 der entscheidende Parameter hinsichtlich der Reflexion bzw. Absorption des **sichtbaren** Teils des Sonnenlichts durch die Fahrbahnoberfläche. Das Sonnenlicht enthält aber auch Strahlungsanteile im **ultravioletten** und v.a. im **infraroten** Teil des Spektrums. Daher muss bei der Bestimmung der Erwärmung einer Fahrbahn theoretisch auch das Reflexionsverhalten der Fahrbahnoberfläche in diesen beiden Wellenlängenbereichen berücksichtigt werden. Allerdings ist der Anteil der UV-Strahlung, die die Erdoberfläche erreicht, so gering, dass sie bei der Ermittlung der Erwärmung praktisch keine Rolle spielt. Der Einfluss der sichtbaren und der IR-Strahlung auf die Erwärmung wird in den Abschnitten 6 und 7 behandelt.

4 Messung der lichttechnischen Größen von Fahrbahnoberflächen

Europaweit wurden verschiedenste tragbare Geräte zur Messung der Parameter q_0 und κ_P entwickelt, vorwiegend im Auftrag von Firmen, die Straßenbeleuchtungsanlagen liefern. Die meisten sind wegen schlechter Handhabbarkeit, ungenügender Messgenauigkeit und des mit der Messung verbundenen hohen Zeitaufwandes nicht über das Entwicklungsstadium von Prototypen bzw. Einzelexemplaren nicht hinaus gekommen. Als einziges Gerät, das sich in Deutschland durchgesetzt hat, ist das Straßenreflektometer nach Range (s. [7], [8]) zu nennen. Dieses Gerät wird auch von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) zur Messung der lichttechnischen Größen von Fahrbahnoberflächen empfohlen [9]. Das Gerät besteht im wesentlichen aus einer kreisförmigen Schiene, auf die ein Projektor montiert ist. Unter der Schiene befindet sich die Messprobe. Der Projektor beleuchtet die Messprobe unter verschiedenen Winkeln γ , die durch Verschieben des Projektors auf der Schiene eingestellt werden. Das unter 1° entgegen der Fahrtrichtung reflektierte Licht wird mit einem Leuchtdichtemesser gemessen. Nach einem vereinfachten Verfahren werden q_0 und κ_P nach folgenden Formeln ermittelt:

$$\kappa_P = \log (0,22 \cdot L_{63,5^\circ} / L_{0^\circ} + 1,06) \quad (3)$$

$$q_0 = L_{0^\circ} / E_h \cdot 10^{\kappa_P} \text{ in cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx}) \quad (4)$$

Es genügt also die Messung der Leuchtdichte der Messprobe unter den beiden Winkeln $\gamma = 63,5^\circ$ und 0° sowie der horizontalen Beleuchtungsstärke E_h , die am Ort der Messprobe gemessen wird, um die Parameter q_0 und κ_p bestimmen zu können. Jedoch gestaltet sich die Messung auch mit dem Range-Gerät nicht einfach. Man muss die Messung bei Dunkelheit durchführen oder das Gerät so abschirmen, dass Tageslicht die Messung nicht verfälschen kann. Unter der Beobachtung der beleuchteten Fläche unter 1° ist die Messprobe als extrem schmale Ellipse zu sehen; es ist schwierig, mit der Messblende des Leuchtdichtemessers genau dieses leuchtende Feld zu treffen. Jede Inhomogenität der Messoberfläche wirkt sich sofort auf das Messergebnis aus. Insgesamt ist die Messgenauigkeit dieses Gerätes als mäßig zu bezeichnen; nach den Erfahrungen des Gutachters kann q_0 nur mit einer Genauigkeit von $\pm 0,015 \text{ cd/lx.m}^2$ bestimmt werden. Die Norddeutsche Expertengruppe für aufgehellte Asphaltdeckschichten (s. [11]) empfiehlt, bei einer Einzelmessung von q_0 als Prüftoleranz $\pm 0,015 \text{ cd/lx.m}^2$ anzusetzen, im Entwurf des FGSV-Arbeitspapiers „Reflexionseigenschaften von Gesteinskörnungen und Oberflächen aus Asphalt“ vom Februar 2009 [10] wird ebenfalls auf eine zu erwartende Messunsicherheit von $\pm 0,015 \text{ cd/(m}^2 \cdot \text{lx)}$ hingewiesen.

Es hat in den letzten Jahrzehnten immer wieder Versuche gegeben, neue Straßenreflektometer zu entwickeln. Diese Vorhaben scheiterten, weil der Entwicklungsaufwand in keinem Verhältnis zur zu erwartenden Verbreitung der Geräte stand. Erst in den letzten Jahren hat man sich diesem Thema wieder verstärkt gewidmet (s. z.B. [12] bis [14]). Vor kurzem erschien ein Bericht über einen im Fraunhofer-Institut für Bautechnik Stuttgart im Auftrag des Deutschen Asphaltverbandes (DAV) entwickelten Prototyp eines transportablen Geräts zur Messung der lichttechnischen Eigenschaften von Straßendecken [15]. Die Autoren stellen fest, dass mit dieser Messeinrichtung tendenziell etwas höhere Messwerte erzielt werden als über das Messverfahren auf der Basis der Formeln (3), (4), insgesamt die Vergleichbarkeit der Messergebnisse aber gut sei. BLATTNER und DUDLI geben in [12] eine Messgenauigkeit für q_0 von 10 % an. Betrachtet man die in [12] bis [15] vorgestellten Messeinrichtungen sowie weitere, nur im Internet vorgestellte Firmengeräte und die damit erzielten Messergebnisse aber genauer, kommt man einerseits zu dem Schluss, dass nicht zuletzt wegen der heutigen Möglichkeiten, die die elektronisch basierte Messtechnik bietet, die Durchführung der Messungen vielleicht schneller und der Umgang mit diesen neuen Messeinrichtungen leichter sein mag als mit dem Range-Gerät. Andererseits scheint es bis zur Serienreife eines solchen Gerätes immer noch ein weiter Weg zu sein.

5 Möglichkeiten der Aufhellung von Fahrbahndeckschichten

Deckschichten können durch folgende Maßnahmen hell gestaltet werden:

- Verwendung von Zementbetondecken
- Aufhellung von Asphaltdecken durch
 - teilweisen Ersatz der Splittfraktion durch natürliches und/oder künstliches Aufhellungsgestein
 - Ersatz des dunklen durch farbloses oder helles Bitumen oder andere helle Bindemittel
 - Kombination der Verwendung von Aufhellungsgestein und hellem Bitumen
 - Zugabe von anderen hellen Zusätzen ins Mischgut wie Hochofenschlacken, Porzellan- oder glasartigen Zuschlagstoffen, Kunststoffen, Aluminiumgrieß

Zementbetondecken werden in Deutschland praktisch nur auf Autobahnen gebaut. Sie werden im Folgenden daher nicht näher behandelt. Die Aufhellung mittels der im letzten Spiegelstrich genannten Zuschlagstoffe hat sich nicht bewährt. Hochofenschlacken, Porzellan- oder glasartige Zuschlagstoffe sind nicht schlagfest genug, die Aufhellwirkung lässt zu wünschen übrig und ist nicht dauerhaft möglich. Kunststoffe sind zu weich, so dass sie sich zu flachen Elementen verformen, keine Aufhellwirkung ergeben und die Griffigkeit herabsetzen.

Wie Versuchsstrecken in den 1970er Jahren in Nordrhein-Westfalen gezeigt haben, ist durch die Zugabe von Aluminiumgrieß anfangs zwar eine gute Aufhellwirkung erreichbar, die aber schnell nachlässt, da sich die Aluminiumpartikel wegen ihrer Weichheit ebenfalls verformen und wegen ihrer mangelnden Haftung aus der Deckschicht herausgeschlagen werden.

Deshalb erfolgen Aufhellmaßnahmen derzeit überwiegend durch teilweisen Ersatz der Splittfraktion durch natürliches und/oder künstliches Aufhellungsgestein, in seltenen Fällen durch Ersatz des dunklen durch helles Bitumen oder andere helle Bindemittel.

5.1 Aufhellung durch natürliches und/oder künstliches Aufhellungsgestein

Als natürliche Aufhellungsgesteine werden verwendet (Aufzählung nicht vollständig): Anorthosit, Basalt, Diabas, Granit, Granodiorit, Grauwacke, Moräne (gebrochene Gerölle unterschiedlicher Gesteine), Quarzit, Porphyrt.

Kalkstein und Dolomit werden als Aufhellungsmaterial nicht verwendet.

Als künstliche Aufheller kommen vor allem bei hohen Temperaturen (ca. 1200 °C) gebrannte Flinte wie Granusil oder Luxovite (Firmenbezeichnungen) infrage. Das früher auch eingesetzte Synopal (Firmenbezeichnung; künstliches Kalziummetasilikat/Wollastonit, hergestellt durch Brennen von Kalziumcarbonat, Quarz und anderen Bestandteilen bei 1500 °C) wird nicht mehr geliefert. In der DDR wurde als künstlicher Aufheller Luminat verwendet; dieses Material wird ebenfalls nicht mehr hergestellt.

Eine zielgerichtete Aufhellung von Asphaltdeckschichten wird traditionell in Norddeutschland und in den neuen Bundesländern vorgenommen. In anderen Bundesländern erfolgt die Aufhellung meist nur dann, wenn Aufhellungsmaterial zufällig regional (und damit kostengünstig) zur Verfügung steht. Die Bauverwaltungen einiger Bundesländer haben Empfehlungen zur Verwendung von Aufhellungssplitten herausgegeben (Brandenburg, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Landschaftsverband Rheinland, Rheinland-Pfalz, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein, Thüringen, Saarland, dazu die DEGES). Eine Zusammenfassung der Empfehlungen enthalten die Abschnitte 5.1.1 bis 5.1.3.

5.1.1 Anteil des Aufhellungsmaterials am Mineralstoffgemisch

Werden natürliche Aufhellungsmaterialien verwendet, wird ein Anteil von 20 bis 40 Gew.-% und bei künstlichen Aufhellungsmaterialien ein Anteil von 15 bis 25 Gew.-% am Mineralstoffgemisch empfohlen, wobei teilweise 2 % natürlichen durch 1 % künstlichen Aufhellungsmaterials ersetzt werden dürfen. Entgegen früherer Erkenntnisse liefern auch helle Brechsande (Körnung 0/2) einen Beitrag zur Aufhellung, was sich in den unter 5.1 angeführten Länderempfehlungen, die überwiegend aus den 1990er Jahren stammen, noch nicht niedergeschlagen hat. So wird erst in den aus dem Jahre 2004 stammenden Hinweisen [11] empfohlen, auch in der Sandfraktion natürliche und/oder künstliche Aufheller zu verwenden.

5.1.2 Körnung des Aufhellungsmaterials

Es werden die Körnungen 2/5; 5/8 und 8/11 in wechselnden Anteilen empfohlen, als Ausnahme auch die Körnung 11/16.

5.1.3 Abstreumaterial

Um nach dem Deckeneinbau eine sofortige Aufhellung zu erreichen, ist es empfehlenswert, aufgehellte Deckschichten mit hellem Brechsand oder Splitt der Körnung 1/3 abzustreuen. In [11] wird hierfür alternativ auch die Körnung 2/5 empfohlen.

5.2 Aufhellung durch farbloses oder helles Bitumen oder andere helle Bindemittel

Versuche, eine merkbliche Aufhellung durch farblose Bindemittel wie Mexphalt C oder Ebano (Firmenbezeichnungen) zu erreichen, sind mehrfach fehlgeschlagen (s. [16], [17]). Das ist physikalisch leicht erklärlich: Ein farbloser Stoff reflektiert nicht mehr Licht als das Material, von dem der farblose Stoff umgeben ist, weil das umgebende Material durchscheint. Eine zusätzliche Aufhellwirkung von farblosem Bindemittel kann daher nur in Kombination mit hellen Zuschlagstoffen erreicht werden oder indem in das farblose Bindemittel helles Pigment, z.B. Titandioxid, eingemischt wird. Eine solche Fahrbahnoberfläche mit sehr guter Aufhellwirkung wurden vom Gutachter (s. [18]) im Tunnel Prüfening (Bayern, BAB A 93) gefunden. Die Asphaltdeckschicht des Tunnels besteht aus einem Splittmastixasphalt mit farblosem Bindemittel Mexphalt C 50/70, dem Titandioxid beigefügt wurde. Auf die noch heiße Oberfläche wurde Luxovite der Körnung 2/5, umhüllt mit Mexphalt C 50/70, aufgestreut und eingewalzt. Der Leuchtdichtekoeffizient q_0 beträgt ca. $0,10 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$, wie aus einem Prüfbericht des Labors für optische Wahrnehmungssicherheit der TU Dresden hervorgeht. Auch nach 8 Jahren Liegezeit hatte die Fahrbahnoberfläche im Jahr 2007 nach visuellem Urteil des Gutachters immer noch mindestens den gleich hohen Leuchtdichtekoeffizienten q_0 wie ursprünglich gemessen.

Eine gute Aufhellwirkung kann auch durch den Einsatz eines hellen Bindemittels erzielt werden. Im weitesten Sinn gehört auch die Verschleißschicht des Grenztunnels Füssen (Bayern, Ende der BAB A 7) zu dieser Kategorie (s. [18]). Hier wurde 2006 auf die Fahrbahn eine 6 cm dicke, aus hellem Epoxidharz bestehende Verschleißschicht aufgebracht, die mit hellgrauem Bauxit 1/3 abgestreut wurde. Der Leuchtdichtekoeffizient q_0 betrug nach Einschätzung des Gutachters im Jahr 2007 ca. $0,12 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$. Die Mehrkosten gegenüber eine dunklen Fahrbahnoberfläche betragen ca. 18 €/m^2 .

5.3 Zeitliche Veränderung der Aufhellwirkung

Da das Aufhellungsgestein anfangs vom dunklen Bindemittelfilm umhüllt ist, tritt die Aufhellwirkung erst nach einer gewissen Zeit nach Inbetriebnahme der Strecke ein. Um von Anfang eine aufhellende Wirkung zu erzielen, ist daher das Abstreuen der noch heißen Oberfläche mit aufgehelltem Brechsand oder Splitt und eventuelles Einwalzen dieses Splitts empfehlenswert. Alternativ, wenn auch aufwändiger, ist das Wasser- oder Sandstrahlen der Fahrbahnoberfläche. Da dadurch aber die Mörtelmasse reduziert wird, sollte gemäß der in [11] gegebenen Empfehlungen das Abstrahlen auf Sonderfälle beschränkt bleiben.

Auch trotz Abstreuens mit hellem Splitt oder des Abstrahlens der Oberfläche tritt hinsichtlich des Aufhellungseffektes ein stabiler Zustand erst nach vollständiger Entfernung des Bindemittelfilms von den an der Oberfläche befindlichen Mineralstoffkörnern ein. Nach Hamburger Erfahrungen [16] ist dafür eher die Abwitterung als die Überfahung durch die Kfz verantwortlich. Gemäß [16] wird der endgültige Aufhellungseffekt erst nach ca. 1,5 Jahren erreicht. Die aufhellende Wirkung bleibt solange erhalten, wie die die Deckschicht noch intakt ist. Von der Deckschicht der B 501 Neustadt-Grömitz (Asphaltbeton 0/11 mit 16 Gew.-% künstliche Aufheller), die 30 Jahre unter Verkehr gelegen hatte, wurden Bohrkerne lichttechnisch vermessen und mit Probekörpern gleicher Zusammensetzung verglichen (s. [19]). Es wurde festgestellt, dass die unter 30 Jahre unter Verkehr gelegenen Bohrkerne einen um ca. 50 % höheren Leuchtdichtefaktor q_0 aufwiesen als neue Probekörper (s. auch Bild 1).

Durch die ständige Überrollung wird die Oberfläche vor allem von nicht aufgehellten Deckschichten glatter und damit auch spiegelnder, der Spiegelfaktor κ_p steigt an. Das führt dazu, dass Fahrbahnoberflächen, die ursprünglich in die Klasse R1 bzw. C1 einzuordnen waren, mit zunehmender Nutzungsdauer über die Klasse R2 schließlich in Klasse R3 oder sogar R4 wandern, bzw. nach CIE-Klassifikation [4] in Klasse C2. Es ist daher tatsächlich sinnvoll, bei

der Planung von Straßen- oder Tunnelbeleuchtungsanlagen grundsätzlich die Klasse C2 zugrunde zu legen, wie es DIN/DIN EN 13201 ([5], [6]) auch vorschreibt.



Bild 1: Oben: Bohrkerne der Deckschicht B 501. Unten: Neue Probekörper, aus aufgeschmolzenem Mischgut der B 501 hergestellt. Jeweils links unbehandelt, rechts sandgestrahlt (entnommen [19])

5.4 Einteilung von aufgehellten Deckschichten

Es hat sich als sinnvoll erwiesen, Fahrbahndeckschichten je nach Aufhellungsgrad in Gruppen einzuordnen. Als Ordnungsparameter empfiehlt sich der mittlere Leuchtdichtekoeffizient q_0 . Ursprünglich war im Vorläuferentwurf von 2003 des FGSV-Papiers [10] die Einteilung gemäß Tabelle 3 vorgesehen. Der weiterentwickelte Entwurf dieses Papiers enthielt die in Tabelle 4 wiedergegebene Einteilung. Im aktuellen Entwurf des FGSV-Papiers [10] findet sich die Klassifizierung nach Tabelle 5, die bereits 2004 von der Norddeutschen Expertengruppe für aufgehellte Asphaltdeckschichten entwickelt wurde [11]. In den Entwürfen der FGSV-Papiere sind den Helligkeitsklassen Einsatzkriterien zugeordnet. Nicht enthalten sind in beiden Entwürfen Hinweise, mit welchem Anteil von natürlichen und/oder künstlichen Aufhellern im Mischgut diese Klassen erreicht werden können. Trotz der Vielzahl an durchgeführten Messungen sowohl der Helligkeit der Aufhellgesteine als auch der daraus hergestellten Asphaltdeckschichten ist es bisher nicht gelungen, einen einigermaßen verlässlichen Zusammenhang zwischen Helligkeit der Gesteine und Helligkeit der fertigen Fahrbahnoberfläche herzustellen. Das führt immer wieder zu Problemen, wie die in Ausschreibungen vorgegebenen q_0 -Mindestwerte in der Praxis auch erreicht werden können. Insbesondere beim Tunnelbau führt dies oft zu Auseinandersetzungen zwischen den Beteiligten, wenn die Fahrbahnleuchtdichte nicht dem Planungswert entspricht und nicht zu klären ist, wer dafür die Verantwortung trägt.

Helligkeitstyp	$q_{0, Range}$ cd/(m ² .lx)	Hinweise zur Anwendung
A	> 0,11	für Abschnitte mit einer besonderen Beanspruchung aus Verkehr und Temperatur sowie einem hohen Kosteneinsparungspotential bei der ortsfesten Beleuchtung
B	≥ 0,09	für Abschnitte mit einer hohen Beanspruchung aus Verkehr und/oder Temperatur oder einem moderaten Kosteneinsparungspotential bei der ortsfesten Beleuchtung
C	≥ 0,07	für Abschnitte mit insgesamt niedrigen Beanspruchungen aus Verkehr und/oder Temperatur sowie mit einem untergeordneten Kosteneinsparungspotential bei der ortsfesten Beleuchtung
0		ohne besondere Anforderungen

Tabelle 3: Definition von Helligkeitstypen aufgehellter Fahrbahnoberflächen in der Vorläuferversion von [10]

Helligkeitsklasse	$q_{0, Range}$ cd/(m ² .lx)	Beispielhafte Anwendung
A	≥ 0,09	Tunnel
B	≥ 0,07	Ortsdurchfahrten
C		ohne besondere Anforderungen

Tabelle 4: Nicht mehr geltende Klassifizierung der Helligkeit von Oberflächen aus Asphalt nach [10]

Kategorie	q_0 cd/(m ² .lx)	Beschreibung der Deckschichtoberfläche
D I	> 0,11	Stark aufgehellte Deckschichten
D II	≥ 0,09	Aufgehellte Deckschichten
D III	≥ 0,07	Helle Deckschichten
D IV	< 0,07	Dunkle Deckschichten

Tabelle 5: Aktuelle, geltende Klassifizierung der Helligkeit von Fahrbahnoberflächen nach [11]

6 Einfluss aufgehellter Fahrbahndeckschichten auf Spurrinnenbildung und Unfallgeschehen

6.1 Temperaturen von Asphaltdeckschichten

Länger anhaltende hohe Temperaturen im Sommer führen dazu, dass dunkle Asphaltdecken sich tagsüber stark aufheizen. Die Erwärmung findet nicht nur an der Oberfläche, sondern auch in den tieferen Schichten des Asphaltkörpers statt. Auch nachts geht die Temperatur des Asphaltkörpers dann kaum zurück.

Die Oberflächentemperatur hängt von der Reflexion des eingestrahltten Sonnenlichts im sichtbaren und infraroten Teil des Sonnenspektrums ab. Das Reflexionsvermögen der verwendeten Gesteine und Bindemittel ist im sichtbaren und im infraroten Strahlungsbereich durchaus unterschiedlich. Umfangreiche Messungen hierzu wurden von CARRARO u.a. [20], durchgeführt. Sie stellten folgende Tendenz fest: Das Reflexionsvermögen von Stoffen, die im sichtbaren Bereich schon relativ hell sind, steigt im Infraroten weniger stark als das von im Sichtbaren eher dunklen Materialien. Es gibt jedoch keine Umkehrung der Reihenfolge des Reflexionsvermögens derart, dass sichtbar helle Materialien weniger infrarote Strahlung reflektieren als sichtbar dunkle Materialien.

V. STOSCH [23] hat erstmals in den 1960er Jahren die Oberflächentemperaturen von Asphaltfahrbahnen gemessen und Werte von max. 65 °C festgestellt. Diese Temperatur ist jedoch als Extremwert anzusehen. POHLMANN [24] hat die zu diesem Thema verfügbaren Untersuchungen ausgewertet sowie eigene Messungen durchgeführt und kommt zu dem Schluss, dass die Oberflächentemperaturen nicht aufgehellter Asphaltdeckschichten im Regelfall maximal 55 °C betragen und Werte darüber als absolute Ausnahme anzusehen sind. Auch SCHULTE [25] sowie KAYSER und WELLNER [26] berichten über ausführliche Messungen der Oberflächentemperaturen, bei denen Messwerte von 55° relativ häufig, darüber hinausgehende Werte aber nur sehr selten erreicht werden.

V. STOSCH stellte in [23] fest, dass die Oberflächentemperatur einer aufgehellten Deckschicht nur 50 °C betrug, also 15 °C weniger als die der nicht aufgehellten Deckschicht, weist aber selbst auf evtl. Messfehler hin und Schwankungen der Einzelmesswerte hin. POHLMANN [24] findet bei seinen Messungen maximale Unterschiede von 8 °C, während CARRARO u.a. [20], [21] sogar nur Temperaturunterschiede von höchstens 5 °C messen konnten. SCHÄFER [27] berichtet, dass infolge der Verwendung hellen Odenwaldgranitsplitts in Asphaltdeckschichten in Wiesbaden die Temperaturdifferenzen nach Abfahren des Bindemittelfilms gegenüber den frisch hergestellten, schwarzen Asphaltbelägen „sogar mehr als 20 %“ betragen. Man kann diese physikalisch inkorrekte Aussage wohl so interpretieren, dass damit gemeint z.B. ist: 50 °C schwarze Oberfläche minus 20 % gleich 40 °C, also 10 °C Temperaturdifferenz. MÜLLER, PIRSKAWETZ und WEISE [28] haben berechnet, dass eine stark aufgehellte Asphaltdeckschicht (ein q_0 -Wert wird allerdings nicht angegeben) eine um 8°C geringere Oberflächentemperatur hat als dunkle Asphaltdeckschichten.

Insgesamt kann man davon ausgehen, dass die Aufhellung von Asphaltfahrbahnen um 5 °C bis 10 °C niedrigere Oberflächentemperaturen im Vergleich zu dunklen Asphaltdeckschichten nach sich zieht.

6.2 Vertikaler Temperaturverlauf in Asphaltbefestigungen

Die Erwärmung der Fahrbahnoberfläche hat auch eine Erwärmung der tiefer liegenden Schichten der Fahrbahnbefestigung zur Folge. Der Grad der Erwärmung ist neben den Reflexionseigenschaften der Oberfläche auch von der Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der Fahrbahndecke und der Wärmekonvektion an der Oberfläche abhängig. Die Änderung der Temperatur der tieferen Schichten folgt dem Temperaturverlauf der Oberfläche mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung. In Tabelle 6 sind die in der Literatur verfügbaren Messergebnisse zusammengestellt. Unter „Temperatur“ sind die bei der jeweiligen Messtiefe in der Fahrbahnbefestigung gemessenen Höchstwerte zu verstehen, die wegen der zeitlichen Verzögerung i.a. zu verschiedenen Zeitpunkten auftreten. Der Temperaturgradient ergibt sich aus der Temperaturdifferenz dividiert durch die Differenz der jeweiligen Messtiefen. Die linke Hälfte der Tabelle enthält die Messwerte für eine Tiefe bis zu ca. 20 cm, die rechte Hälfte die Messwerte für den Tiefenbereich ca. 10 cm bis max. 60 cm. Die Tabelle enthält auch die von CARRARO u.a. [20], [21] ermittelten Werte, die an 19 überwiegend aufgehellten Asphaltproben gemessen wurden. Diese waren in ein Kiessandbett eingelassen und wurden im Außenraum der normalen Sonnenbestrahlung ausgesetzt. Nach dem gleichen Verfahren ermittelte auch CHAKAR [22] den vertikalen Temperaturverlauf von 8 Asphaltprobekörpern; ihre Ergebnisse sind ebenfalls in Tabelle 6 wiedergegeben.

Autor	Temperatur (°C)	Mess-tiefe (cm)	Temperatur (°C)	Mess-tiefe (cm)	Temperaturgradient °C/cm	Temperatur (°C)	Mess-tiefe (cm)	Temperatur (°C)	Mess-tiefe (cm)	Temperaturgradient (°C/cm)
HALFMANN [29], zitiert nach KIRK [30]; Mittelwert 12 Versuchsstrecken	51,9	1,75	42,9	12	0,98	42,9	12	36,2	30	0,37
KIRK [30]	42,8	2	32	19	0,57					
KALLAS [31], zitiert nach [25]	52	0	34	10	1,80	34	10	26,5	30	0,375
EISENMANN und LEYKAUF [32], zitiert nach [25]	45	0	35,5	10	0,95	35,5	10	24	35	0,46
SCHULTE [25], nach Bild 49	55	2	39	11	1,78	39	11	30	25	0,64
SCHULTE [25], nach Bild 50	53	0	40	11	1,18					
CARRARO u.a. [20], [21], Mittelwert 2 Versuchsstrecken	49	0	43,75	8	0,66					
CARRARO u.a. [20], [21], Messserien an je 4 Asphaltproben (Messserien 2;3;4;6;7;8)	42,1 bis 50,9	1	35,3 bis 43,2	8	0,97 bis 1,27					
CHAKAR [22] 8 Asphaltproben	53,8 bis 70	0	41,1 bis 43,7	20	0,635 bis 1,41	41,1 bis 43,7	20	30,6 bis 36,2	60	0,135 bis 0,255

Tabelle 6: Temperaturen von bituminösen Fahrbahnbefestigungen, gemessen an der Oberfläche und bis zu einer Tiefe von 60 cm

Die Temperaturen können in ca. 10 cm Tiefe noch über 40 °C und in 30 cm Tiefe noch mehr als 35 °C betragen. Der Temperaturgradient ist in der Schicht bis ca. 20 cm naturgemäß höher als in tieferen Schichten; die Temperatur fällt in der oberen Schicht mehr als doppelt so schnell ab wie in der unteren. Man sollte aus physikalischen Gründen auch erwarten, dass der Temperaturgradient umso höher ist, je höher die Oberflächentemperatur ausfällt; dies entspricht auch den von SCHULTE [25] sowie KAYSER und WELLNER [26] beschriebenen Rechenmodellen. Anhand der Messwerte der Fahrbahnbefestigungen ist das jedoch kaum zu erkennen und auch bei den von CARRARO [20], [21] u.a. bzw. CHAKAR [22] untersuchten Asphaltproben zeigt sich dafür allenfalls eine leichte Tendenz. Verantwortlich dafür sind der verschiedene Deckenaufbau und die unterschiedlichen Wetterbedingungen bei den Untersuchungen, die eine Vergleichbarkeit der Messwerte kaum zulassen.

6.3 Einfluss der Fahrbahntemperatur auf die Standfestigkeit und Spurrinnenbildung bei Asphaltbefestigungen

Unter den Merkmalen einer Straßendecke nimmt der Kraftfahrer Unebenheiten der Fahrbahn am schnellsten wahr, weil sie den Fahrkomfort beeinträchtigen. Unebenheiten beeinflussen aber auch Verkehrssicherheit und Wirtschaftlichkeit der betroffenen Straße. Als Unebenheit bezeichnet man vertikale Differenzen zwischen der tatsächlich vorhandenen und der ursprünglich geplanten Straßenoberfläche. Aus praktischen Erwägungen unterscheidet man Längs- und Querunebenheiten. Zu den Querunebenheiten gehören auch Spurrinnen. Ein erhöhtes Risiko des Auftretens von Spurrinnen entsteht durch

- Fehler bei der Mischgutzusammensetzung (insbesondere falsches, zu „weiches“, zu „dünnflüssiges“ Bindemittel)
- Fehler bei Einbau und Verdichtung von Asphalten
- unzureichende Tragfähigkeit des Untergrundes.

Diese Fehler führen zu einer mangelnden Verformungsbeständigkeit der fertigen Straßendecke. Spurrinnen in merklichem Ausmaß entstehen aber erst in Verbindung mit

- zu hohen, länger anhaltenden Asphaltkörpertemperaturen
- hohen Verkehrsstärken mit hohem Schwerlastanteil
- langsam fahrendem Schwerlastverkehr (z.B. an Steigungsstrecken)
- besonderen Belastungen durch den Verkehr, z.B. durch Schubkräfte beim Halt vor Lichtsignalanlagen.

Es kommt also - natürlich neben der Vermeidung der genannten Fehler - darauf an, die Asphaltkörpertemperaturen auch bei längeren Hitzeperioden möglichst gering zu halten. In Abschnitt 6.1 wurde festgestellt, dass die Oberflächentemperaturen von Asphaltfahrbahnen durch Aufhellung um 5 °C bis 10 °C reduziert werden können. Dies führt nach Tabelle 6 auch zu einer Reduzierung der Temperatur des gesamten Asphaltkörpers, so dass die aus plastischen, viskosen und viskoelastischen Anteilen bestehende, bleibende Verformung der Asphaltbefestigung ebenfalls reduziert werden kann.

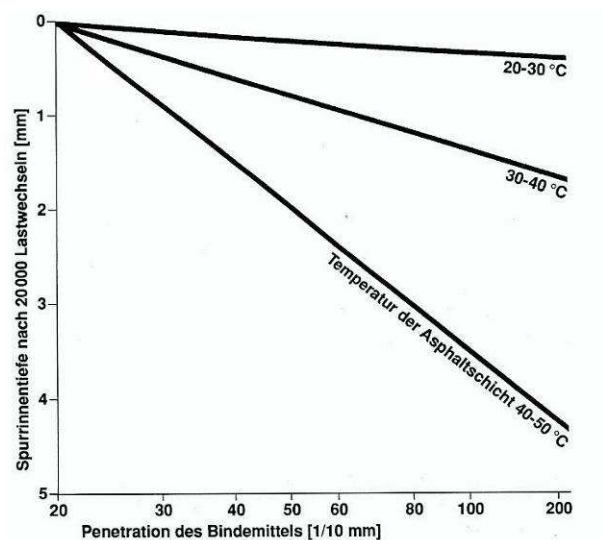
V. STOSCH zeigte schon 1968 [23], dass sich unter Verwendung von künstlichen Aufhellern hergestellte Asphalt-Probepplatten unter Hitzeeinwirkung und Druckbelastung weniger stark verformen als dunkle Proben.

POHLMANN zitiert in [24] eine Reihe von Autoren, die einen ursächlichen Zusammenhang zwischen Temperatur einer Asphaltbefestigung und Spurrinentiefe nachgewiesen haben. So zeigt er ein Diagramm von BLUMER [35], (s. Bild 2), der bei Ermüdungsversuchen festgestellt hat, dass eine Temperaturreduzierung zu einem erheblichen Rückgang der Spurrinentiefe geführt hat. POHLMANN selbst hat an drei Arten Splittmastix-Asphaltproben (nicht aufgehellte; mit 25 % Gew.-% künstlichem bzw. 35 Gew.-% natürlichem Aufheller der Kornfraktion

2/5 und 5/8 aufgehellt) den einaxialen Druckschwellenversuch durchgeführt. Die dunklen Proben wurde dabei auf 50 °C und die aufgehellten Proben auf 45 °C erhitzt (gemäß der von POHLMANN festgestellten Temperaturdifferenz zwischen diesen Oberflächen, s. Abschnitt 6.1). POHLMANN ermittelte, dass die Verformungsraten der aufgehellten Proben (Quotient aus bleibender Verformung pro 1000 Lastwechsel zu Beginn der Bruchphase im Vergleich zur Verformung der dunklen Variante) um mindestens 50 % geringer sind. Aufgehellte Splittmastixasphalte haben damit wegen der geringeren Temperatur eine höhere Verformungsstabilität, die in der Praxis auch zu geringeren Spurrinntiefen führen dürfte.

ARAND [34] berichtet, dass die Spurrinntiefe der bituminösen Fahrbahnbefestigung auf der BAB A 7 bei Neumünster nach 26 Betriebsjahren trotz der Überrollung durch 315 Mio. Kfz, davon 12,7 % Schwerlastverkehrsanteil, nur 7,7 mm beträgt und führt dies auf die hohe Verformungsresistenz zurück, die u.a. durch die Verwendung von künstlichen Aufhellern in der Gussasphaltdeckschicht entstanden ist.

Bild 2: Spurrinntiefe in Abhängigkeit von der Bindemittelhärte (beurteilt nach Penetrationsprüfung) und der Temperatur einer Asphalttschicht. Entnommen [24]



6.4 Spurrinnen und Unfallgeschehen

Spurrinnenbildung wird v.a. auf die hohe Belastung der Straße durch den Schwerlastverkehr in Verbindung mit hohen sommerlichen Temperaturen zurückgeführt. Die mögliche Aufheizung der Fahrbahn durch Fahrzeugkatalysatoren wurde nach Wissen des Gutachters bisher noch nicht untersucht; insbesondere bei stehendem oder langsam fahrendem Verkehr in Stausituationen ist nicht auszuschließen, dass die hohe Temperatur der Katalysatoren einen Beitrag zur Spurrinnenbildung liefert. Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Spurrinnen und Unfallgeschehen sind nicht bekannt. Die OECD schreibt in ihrem Bericht „Charakteristische Eigenschaften von Straßendecken“ aus dem Jahr 1985 [35] nur, dass transversale Ebenheitsdeformationen negativen Einfluss auf Lenkmanöver, v.a. bei Zweiradfahrern, haben können und dass es Wechselwirkungen zwischen Fahrspuren (damit sind wohl Spurrinnen gemeint) und Unfällen gibt. OERTEL, MAERSCHALK und KRAUSE zeigen in [36] auf S. 87 eine Grafik, nach der „Verschlechterung der Ebenheit im Querprofil“ zu Wasseransammlungen, verringertem Kraftschluss und infolgedessen zu erhöhter Unfallgefahr führt; im Text heißt es dazu lapidar „Zusätzliche Unfallkosten infolge von Spurführungseffekten bei Spurrinnen sind, sofern überhaupt relevant, derzeit nicht quantifizierbar“. Dieses Statement - die Publikation [36] ist 2007 erschienen - ist nicht korrekt, denn das Statistische Bundesamt führt in seiner Verkehrsunfallstatistik zumindest seit dem Jahr 2003 (seit dieser Zeit ist die Verkehrsunfallstatistik online verfügbar) in Abschnitt 6.7 unter der Rubrik „Straßenzustand als Unfallursachen“ auch die Kategorie „Spurrillen, im Zusammenhang mit Regen, Schnee oder Eis“ auf (s. [37]). In Tabelle 7 sind die Unfallzahlen von 2003 bis 2009 wiedergegeben.

Spurrinnen stellen also ein reales Unfallrisiko dar. Auch wenn die Zahlen statistisch nicht signifikant sind, lässt sich sagen, dass die Unfallzahlen von 2003 bis 2009 etwa konstant sind (im Durchschnitt 267), und die Getötetenzahl in diesem Zeitraum leider sogar zugenommen hat. Diese Zahlen folgen damit nicht dem allgemeinen Trend der Abnahme der Unfallzahlen in Deutschland in den letzten Jahren. Die Zahlen belegen auch, dass entgegen gelegentlicher anderslautender Behauptungen, die Spurrinnenbildung trotz verbesserter Asphaltbauweisen immer noch nicht vermeidbar ist.

Bei Unfällen mit sonstigem Sachschaden wird vom Statistischen Bundesamt die mögliche Unfallursache Spurrinnen nicht registriert. Ebenfalls wird nicht registriert, wenn Spurrinnen **ohne** Vorhandensein von Regen, Schnee oder Eis einen Unfall (mit)verursacht haben. Es muss darauf hingewiesen werden, dass auch andere, schwere Unfälle durch Spurrinnen zumindest mitverursacht werden können. Kommt z.B. bei einer Gefahrenbremsung ein Kfz ins Schleudern, können Spurrinnen schon bei trockener Straße die Schleuderamplitude erhöhen und dadurch das Unfallrisiko erhöhen. Bei nasser Straße erhöhen Spurrinnen, in denen evtl. Wasser steht, das Aquaplaning- und damit das Unfallrisiko, ohne dass es den Unfallbeteiligten oder der Polizei aufgefallen sein muss, was insbesondere bei Nacht öfter der Fall sein dürfte. Die tatsächliche Zahl von Unfällen, die durch Spurrinnen zumindest mitverursacht worden sind, dürfte damit deutlich höher sein als aus der offiziellen Unfallstatistik ablesbar.

Unfallart	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Unfälle mit Toten	2	4	1	3	5	5	6
Unfälle mit Personenschaden	160	180	163	163	150	128	165
Unfälle mit Sachschaden i. e. S. *)	91	85	127	145	96	69	122
Summe	253	269	291	311	251	202	293

*) Unfälle mit Sachschaden im engeren Sinn; Unfallursache ist das Vorliegen einer bußgeldbewehrten Ordnungswidrigkeit oder einer Straftat, gleichzeitig ist Kfz nicht mehr fahrbereit.

Tabelle 7: Durch Spurrinnen im Zeitraum von 2003 bis 2009 verursachte Unfälle. Nach [37]

Die „ZTV Zustandserfassung und -bewertung von Straßen“ [38] enthalten ein Diagramm, das die Normierung des Zustandswertes der Spurrinnentiefe wiedergibt (s. Bild 3). Für Autobahnen und Bundesstraßen außerhalb von Ortsdurchfahrten gilt Funktionsklasse 1 (FK 1), für andere Straßen werden in der Regel die Funktionsklassen 2 oder 3 verwendet. Der Zustandswert 1,5 entspricht dem Zielwert (Toleranz bei der Abnahme nach der Herstellung). Ein Zustandswert (ZW) < 1,5 beschreibt einen sehr guten Zustand. Der Zustandswert 3,5 kennzeichnet den Warnwert. Ab hier ist Anlass zur intensiven Beobachtung, zur Analyse der Ursachen für den schlechten Zustand und ggf. zur Planung geeigneter Maßnahmen gegeben. Ein guter Zustand ist wie folgt definiert: $1,5 \leq ZW < 3,5$. Der Zustandswert 4,5 kennzeichnet den Schwellenwert. Bei Erreichen des Schwellenwertes ist die Einleitung baulicher oder verkehrsbeschränkender Maßnahmen zu prüfen. Ein schlechter Zustand ist erreicht, wenn gilt: $3,5 \leq ZW < 4,5$. Ein sehr schlechter Zustand ist erreicht, wenn gilt $ZW \geq 4,5$. Nach Meinung der Fachleute für Zustandserfassung und -bewertung ist diese Normierung vorrangig wegen der Notwendigkeit der Substanzerhaltung der Straße getroffen worden und weniger, um Unfällen vorzubeugen. Als zweiter Grund wird die Notwendigkeit der Überwachung der Gebrauchseigenschaften der Fahrbahn genannt; eine Fahrbahndecke ist dann nicht mehr gebrauchstauglich, wenn mit mehr Unfällen gerechnet werden muss. D.h., dass die Unfallvermeidung bei der Zustandserfassung und -bewertung, wenn auch unausgesprochen, doch eine Rolle spielt.

Diese Normierung bedeutet beispielsweise, dass bei einer Autobahn oder Bundesstraße bereits bei 20 mm Spurrinnentiefe (FK 1) bauliche oder verkehrsbeschränkende Maßnahmen eingeleitet werden sollen, bei einer Landesstraße (FK 2 oder 3) aber erst bei 25 mm oder 30 mm. Man lässt also auf einer Landesstraße tiefere Spurrinnen zu als auf der Autobahn,

obwohl die Gesamtdicke einer Asphaltbefestigung einer Landesstraße sicher geringer ist als die einer Autobahn. Die Substanz der Landesstraßenbefestigung wäre damit viel schneller gefährdet als die der Autobahn. Insoweit ist diese Argumentation unbefriedigend. Ein weiteres Indiz, dass bei der Festlegung der Normierung doch die Verkehrssicherheit indirekt eine Rolle gespielt haben könnte, ist die Bestimmung, dass bei Erreichen eines ZW 4,5 „verkehrsbeschränkende Maßnahmen“ zu prüfen sind. Mit solchen Maßnahmen - das dürften überwiegend Geschwindigkeitsbegrenzungen sein - können Unfälle verhindert werden, aber die Substanz der Asphaltbefestigung nicht geschützt werden; denn bei geringerer Geschwindigkeit wirkt die Radlast auf die Fahrbahn über eine längere Zeit ein, das Risiko der Spurrinnenbildung wird sogar größer.

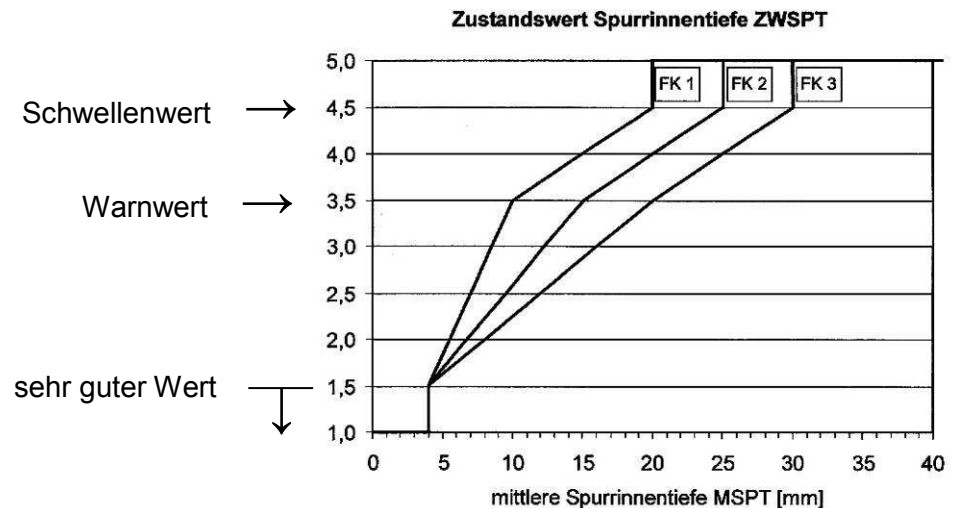


Bild 3: Normierung der Spurrinentiefe nach [38]

Man kann aus diesen Überlegungen das Fazit ziehen, dass Spurrinnen das Unfallgeschehen stärker beeinflussen, als aus der amtlichen Straßenunfallstatistik und den einschlägigen Regelwerken ablesbar.

7 Einfluss aufgehellter Fahrbahndeckschichten auf den „städtischen Hitzeinsel“-Effekt

Bei längeren Hitzeperioden heizt sich die Luft der Innenstädte v.a. großer Städte stärker auf als die der ländlichen Umgebung. Verantwortlich dafür sind die großen Baumassen, ein hoher Anteil versiegelter Flächen (Straßen, Plätze), wenig Grünflächen (die die Umgebung durch Verdunstungskälte abkühlen) und weniger Luftaustausch, weil die Bebauung die Windgeschwindigkeit in den Innenstädten reduziert. Dazu kommt eine hohe Wärmeenergieabgabe von Gewerbebetrieben, Verkehrsmitteln, Wohn- und Bürogebäuden. Dieser Effekt wird v.a. in den USA seit einiger Zeit gründlich untersucht, während er in Europa bisher weniger Beachtung findet. Eine Vielzahl von Informationen über den Hitzeinseleffekt findet man auf der homepage der US-Umweltschutzagentur EPA (s. [39]) sowie der homepage der „Heat Island Group“, einer der EPA angeschlossenen Organisation [40]).

Die Lufttemperatur in städtischen Hitzeinseln kann 2 °C bis 10 °C über der der ländlichen Umgebung liegen (s. Bild 4). Die Wahrscheinlichkeit der Ausbildung einer Hitzeinsel steigt mit der Einwohnerzahl und der Bevölkerungsdichte, wie Bild 5 zeigt. In Deutschland besonders gefährdet sind Berlin, Hamburg und München und Ballungsgebiete wie das Rhein-Main- und das Rhein-Ruhr-Gebiet. Man erkennt aber aus Bild 5 auch, dass selbst in kleineren Städten Hitzeinseln entstehen können. Eine zu Bild 5 vergleichbare Grafik für Nordrhein-Westfalen zeigt, dass auch dort mit Temperaturdifferenzen von bis zu 8°C gerechnet werden muss [41]. Bild 6 macht deutlich, dass die Temperatur in Großstädten innerhalb von 10 Jah-

ren um bis zu $0,4^{\circ}\text{C}$ angestiegen ist. Bis zum Jahr 2050 werden die Temperaturen in Städten gegenüber dem Zeitraum 1961 - 1990 um 2° ansteigen [42], Experten erwarten, dass die Durchschnittstemperatur in Deutschland bis zum Jahr 2100 um ca. $3,5^{\circ}\text{C}$ ansteigen wird [43]. In der Region Mannheim-Stuttgart-Freiburg wird die Zahl der tropischen Nächte (Temperatur $> 20^{\circ}\text{C}$) in den nächsten Jahren um 5 bis 10 Nächte zunehmen [44]. Im Zuge des Klimawandels sind Hitzeinsel-Effekte auch in Deutschland künftig viel öfter zu erwarten. Hohe Temperaturen erfordern mehr Kühlenergie, sind gesundheitsschädlich, verringern die Leistungsfähigkeit des Menschen und erhöhen auch das Unfallrisiko. Die Folgen von extremer, länger andauernder Hitze für die Gesundheit sollen hier nur schlaglichtartig genannt werden: Die „Berliner Zeitung“ meldete am 20. Juni 2007, dass gemäß einer Studie des Kieler Instituts für Weltwirtschaft die Zahl der jährlichen Hitzetoten in Deutschland im Laufe des 21. Jahrhunderts auf bis zu 12 000 steigen könne. Schon heute würden etwa 24 500 Patienten jährlich wegen hitzebedingter Beschwerden in die Krankenhäuser eingeliefert. Nach [43] sind im Sommer des Jahres 2003 schätzungsweise über 20.000 Menschen in Europa, davon ca. 7000 in Deutschland, an den Folgen der damaligen Hitzewelle gestorben. Hohe Lufttemperaturen erleichtern auch die Bildung von Ozon und Smog und erhöhen so weiter das Gesundheitsrisiko.

Die Eindämmung des Temperaturanstiegs in Großstädten ist also nicht eine Frage des Komforts, sondern in wahrstem Sinnen des Wortes lebensnotwendig.

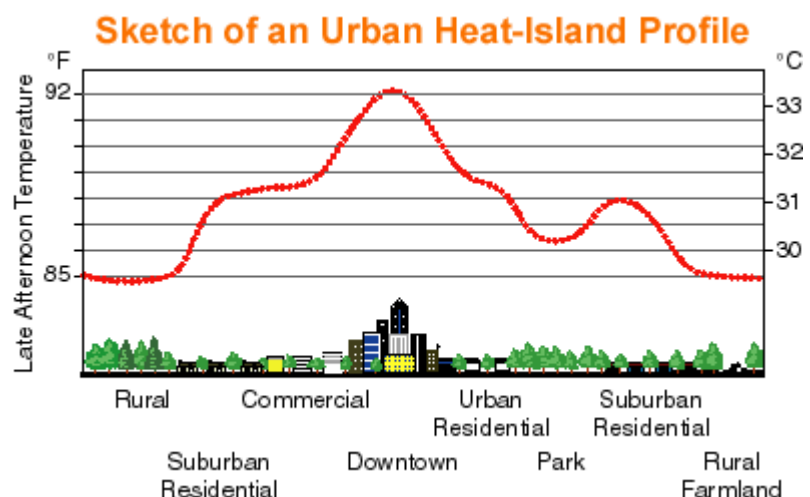


Bild 4: Temperaturen in Abhängigkeit von der Art der Bebauung. (Nach [40])

Welchen Einfluss dunkle Fahrbahndecken auf den Hitzeinsel-Effekt haben können, zeigten YILMAZ u.a. [48]. Sie maßen in Erzurum/Türkei Asphaltbeton-Temperaturen von bis zu $46,5^{\circ}\text{C}$ und Temperaturen benachbarter Rasenflächen von maximal $35,5^{\circ}\text{C}$. Die Lufttemperatur in 2 m Höhe betrug über dem Asphalt $38,5^{\circ}\text{C}$ und über dem Rasen $30,6^{\circ}\text{C}$. AKBARI von der Heat Island Group [40] maß die Temperaturunterschiede von Asphalt-Oberflächen (Bild 7). Eine Steigerung des Reflexionsgrades von 5 % auf 50 % ergab eine Temperaturabsenkung von 52°C auf 32°C . Natürlich ist es nicht möglich, Asphalt dauerhaft mit einem Reflexionsgrad von 50 % zu versehen; Bild 7 zeigt jedoch sehr plakativ, welchen großen Einfluss die Asphalthelligkeit auf die Fahrbahntemperatur hat. Deshalb empfiehlt die EPA auf ihrer homepage [39] neben anderen Maßnahmen auch die Verwendung heller Straßendecken, weil dadurch die Lufttemperatur abgesenkt werden kann. Nebenbei verweist die EPA auch darauf, dass dadurch Energie bei der Straßenbeleuchtung gespart werden kann. In den USA gilt als Hauptmöglichkeit, die Temperaturen der Innenstädte abzusenken, die Verwendung weißer Hausdächer („cool roofs“) und heller Fahrbahndecken („cool pavements“). AKBARI [45] hat errechnet, dass die weltweite Verwendung von weißen Dächern wegen der damit verbundenen Temperaturabsenkung, die zu einem verringerten Einsatz von Klimaanlage führt, eine Einsparung von $63\text{ kg CO}_2\text{ je m}^2\text{ Dachfläche}$ und von aufgehellten Fahrbahndecken von $38\text{ kg CO}_2\text{ je m}^2\text{ Fahrbahndecke}$ zur Folge hätte. Die jährlichen Einsparungen

gibt er mit 24 bzw. 20 Gigatonnen CO₂ an! AKBARI [46] hat auch berechnet, dass die Verwendung heller Oberflächen und die Bepflanzung von Innenstädten mit Bäumen durch Verringerung des Energiebedarfes für Klimaanlagen in den USA Kosteneinsparungen von jährlich 5 Mrd. \$ mit sich bringen würde.

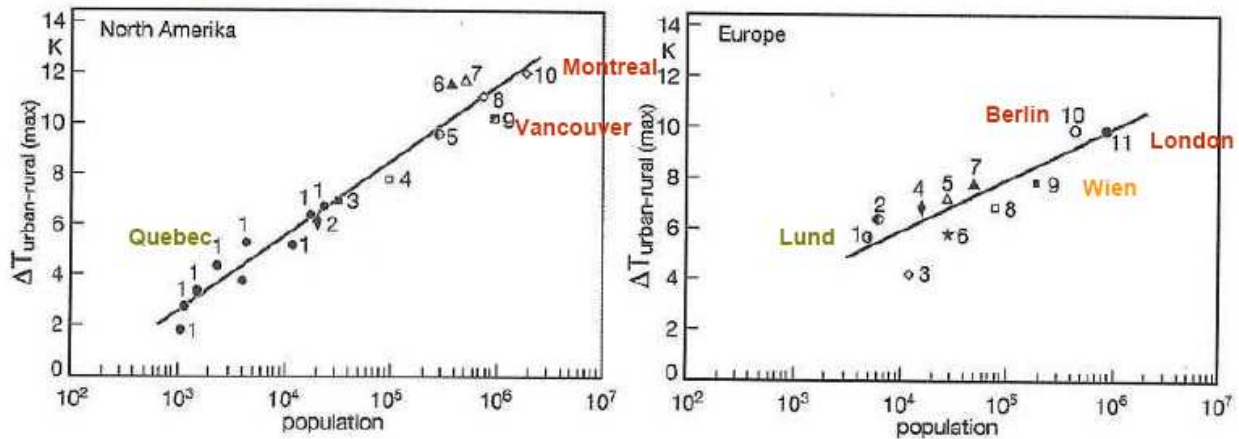


Bild 5: Temperaturdifferenz ΔT Innenstadt-Umland in Abhängigkeit von der Bevölkerungszahl. Zusammengestellt aus verschiedenen Literaturquellen, entnommen [47]. Weitere deutsche Städte: 4: Karlsruhe, 8: München

In Deutschland ist man sich, wie sich aus den bereits zitierten Quellen ergibt, mittlerweile zwar des Problems der städtischen Hitzeinseln bewusst, die Planung und Realisierung von Kompensationsmaßnahmen ist aber noch sehr bruchstückhaft. So hat Berlin einen Klimaschutzplan vorgestellt, um u.a. die sommerliche Aufheizung der Stadt möglichst zu mindern [49]. Zitat: „Um dem Klimawandel zu begegnen, hat der Senat den seit langem geplanten Klimaplan beschlossen. Er enthält Informationen und Ziele, um Berlin den Veränderungen anzupassen und die sommerliche Aufheizung der Stadt möglichst zu mindern. Bäume sollen erhalten und gepflanzt werden, die den südlichen Temperaturen standhalten. Dächer und Wände sollen bepflanz, Fassaden möglichst hell gehalten und Parks stärker bewässert werden, zudem seien Kaltluftschneisen in der Stadt nötig, sagte Senatsbaudirektorin Regula Lüscher ...“. Dieses Statement zeigt, dass Berlin auf einem guten Wege ist, sich dem Problem der Hitzeinseln zu stellen, lässt aber auch erkennen, dass der Plan durchaus verbesserungswürdig ist. So dürfte die Empfehlung, Fassaden hell zu gestalten, wenig Einfluss auf die Temperaturen der Innenstadt haben: 1. sind die Fassaden der meisten Berliner Häuser hell, 2. hat der Reflexionsgrad von Fassaden wegen der vertikalen Anordnung der Fassaden und die teilweise Verschattung von Fassaden durch vorspringende Dächer oder Bäume wenig Einfluss auf die Gesamtreflexion des Sonnenlichts. Auch hier wird die Aufhellung von Straßendecken als Mittel zur Verringerung der Temperaturen von Innenstädten nicht einmal erwähnt. Hier ist offensichtlich noch viel Aufklärungsarbeit zu leisten.

In jedem Fall sollte künftig bei Entscheidungen, ob aufgehellte Fahrbahnoberflächen eingesetzt werden sollen, der städtische Hitzeinseleffekt mit berücksichtigt werden und umgekehrt bei Maßnahmen zur Verringerung dieses Effektes auch die Aufhellung von Fahrbahndecken in die Planungen einbezogen werden.

Bild 6: Zunahme der Temperatur von Innenstädten innerhalb von 10 Jahren. (Nach [40])

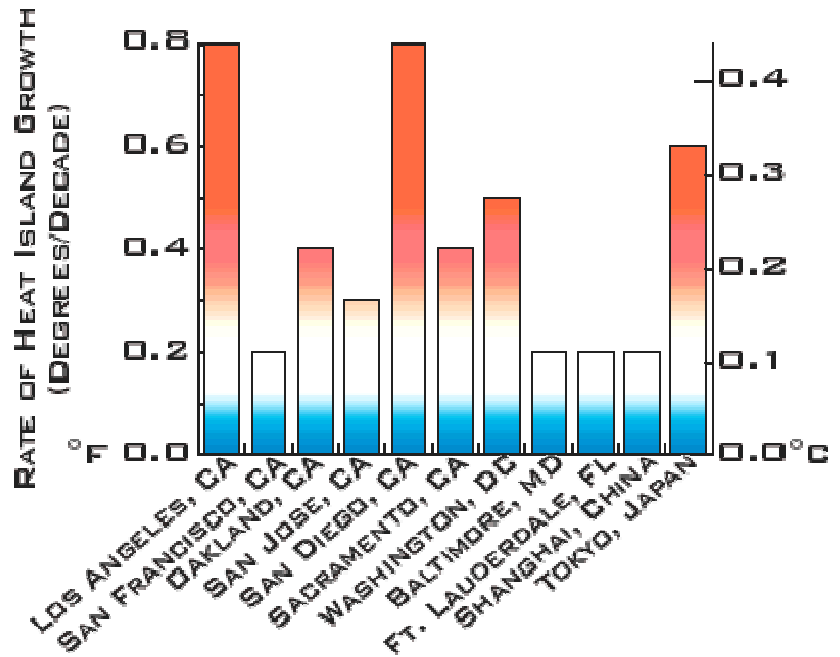


Bild 7: Temperaturen von Asphaltflächen mit unterschiedlichem Reflexionsgrad. (Nach [40]; die Fahrenheit-Temperaturen entsprechen 51°C, 46°C, 32°)

FRESH ASPHALT
 REFLECTIVITY: 5%
 TEMPERATURE: 123°F

AGED ASPHALT
 REFLECTIVITY: 10%
 TEMPERATURE: 115°F

PROTOTYPE ASPHALT COATING
 REFLECTIVITY: 50%
 TEMPERATURE: 90°F



8 Aufgehellte Fahrbahndeckschichten und Straßenbeleuchtung

8.1 Grundlagen der Straßenbeleuchtung

Gleichung (1) ist die Grundgleichung zur Berechnung der Leuchtdichte einer Fahrbahnoberfläche, die ortsfest beleuchtet wird. Die Fahrbahnleuchtdichte eines bestimmten Punktes, gesehen von einem Kraftfahrer unter dem Winkel von 1° , hängt nicht nur von den Leuchten in unmittelbarer Nähe dieses Punktes ab, sondern weiter entfernte Leuchten liefern ebenfalls einen Anteil der Fahrbahnleuchtdichte. Deshalb muss die Lichtstärkeverteilung der Leuchten (diese sagt aus, in welche Richtung welche Lichtintensität von der Leuchte abgestrahlt wird) bekannt sein und auch die Winkelabhängigkeit des Leuchtdichtekoeffizienten q ; für Standardbeläge liegt diese Verteilung tabellarisch vor. Ist diese nicht bekannt, setzt man bei Leuchtdichteberechnungen näherungsweise den mittleren Leuchtdichtekoeffizienten q_0 ein und berücksichtigt die Winkelabhängigkeit durch Verwendung des Spiegelfaktors κ_P bzw. einer der Reflexionsklassen R1 bis R4 bzw. C1 oder C2. Die Berechnung der Fahrbahnleuchtdichte erfolgt nach DIN EN 13201-3 [50].

Bei allen Betrachtungen über den Einfluss des Leuchtdichtekoeffizienten q_0 auf die Fahrbahnleuchtdichte L wird in der Literatur stillschweigend davon ausgegangen, dass bei sonst identischen Parametern die Fahrbahnleuchtdichte L linear mit q_0 steigt bzw. dass sich der

benötigte Energieeinsatz reziprok zu q_0 verhält. Da aber bei Berechnung der Auslegung einer Straßenbeleuchtungsanlage in Abhängigkeit von Beleuchtungsniveau, Reflexionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche und der Straßengeometrie auch die Beleuchtungsgeometrie (Mastabstand, und -höhe) variiert werden kann, kann man nicht ohne weiteres von einer Linearität zwischen L und q_0 ausgehen. Im aktuellen Entwurf der CIE-Publikation „Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic“ [51] wird ein Zusammenhang zwischen L und q_0 und der horizontalen Beleuchtungsstärke E hergestellt, aus dem man folgern könnte, dass L mit q_0 etwas schwächer als linear zunimmt. Diese Nichtlinearität könnte aber auch darauf zurückzuführen sein, dass in [51] einfach Leuchtdichte-Klassen der Beleuchtung bestimmte, feststehende Beleuchtungsstärke-Klassen zugeordnet werden und die Nichtlinearität nichts weiter ist als eine Ungenauigkeit der Zuordnung.

Um diesen Sachverhalt zu klären, müssen konkrete Berechnungen der Beleuchtung herangezogen werden. Dies erfolgt im Abschnitt 8.2 an drei typischen Straßensituationen, die nach dem Kriterium Leuchtdichte zu beleuchten sind.

Die Beleuchtung der meisten Straßen sind nach dem Kriterium Fahrbahnleuchtdichte auszuliegen, weil die Leuchtdichte ein Maß für die vom menschlichen Auge wahrgenommene Helligkeit einer selbstleuchtenden oder angeleuchteten Oberfläche ist. Nur bei Straßenräumen, bei denen die Leuchtdichtetechnik nicht sinnvoll verwendet werden kann (z.B. unregelmäßige Form zu beleuchtenden Fläche, sehr unterschiedliche Reflexionseigenschaften der Verkehrsfläche) oder andere Kriterien sinnvoller sind (z.B. wegen der Notwendigkeit der Gesichtserkennung), verwendet man statt der Leuchtdichte die Beleuchtungsstärke als Auslegungskriterium für die Beleuchtungsanlage. In Abschnitt 8.3 wird erläutert, welchen Einfluss der Leuchtdichtekoeffizient auf Straßen hat, die nach dem Kriterium Beleuchtungsstärke beleuchtet werden.

8.2 Zusammenhang Fahrbahnleuchtdichte - Leuchtdichtekoeffizient

Für drei Situationen wurde die Fahrbahnleuchtdichte nach den Vorgaben der DIN/DIN EN 13201 [5], [6] mit dem Programm von Prof. Stockmar (LCI Light Consult International Celle) berechnet.

- a. Hochbelastete Autobahn oder autobahnähnliche Straße (im folgenden auch einfach Autobahn genannt) mit 2 getrennten Fahrbahnen; Fahrbahngeometrie: Regelquerschnitt RQ 29,5 nach RAS-Q 96 [52]; 2 Fahrstreifen à 3,75 m, 2 Randstreifen à 0,75 m, Standstreifen 2 m, Mittelstreifenbreite 3,50 m. Nach den Vorgaben von DIN/DIN EN 13201 ist diese Straße mit einer Fahrbahnleuchtdichte von $2,0 \text{ cd/m}^2$ (Wartungswert) zu beleuchten. Verwendete Leuchten: 2 Leuchten je Mast, bestückt mit 250 W-Natriumhochdrucklampen, installiert auf dem Mittelstreifen, Lichtpunkthöhe 14 m, der Mastabstand ist variabel.
- b. Innerstädtische Hauptverkehrsstraße (Geschäftsstraße) mit Parkmöglichkeiten an beiden Straßenseiten und Gehwegen; Fahrbahngeometrie: Fahrbahnbreite 6,5 m, 2 Parkstreifen à 2 m, 2 Gehwege à 2 m. Nach den Vorgaben von DIN/DIN EN 13201 ist diese Straße mit einer Fahrbahnleuchtdichte von $1,5 \text{ cd/m}^2$ (Wartungswert) zu beleuchten. Verwendete Leuchten: 1 Leuchte je Mast, bestückt mit 100 W-Natriumhochdrucklampen, Lichtpunkthöhe 9,50 m, zweiseitig versetzte Leuchtenanordnung, der Mastabstand ist variabel.
- c. Sammelstraße; Fahrbahngeometrie: Regelquerschnitt RQ 10,5 nach [52]; 1 Fahrbahn mit 2 Fahrstreifen à 3,50 m und 2 Randstreifen à 0,25 m. Nach den Vorgaben von DIN/DIN EN 13201 ist diese Straße mit einer Fahrbahnleuchtdichte von $0,75 \text{ cd/m}^2$ (Wartungswert) zu beleuchten. Verwendete Leuchten: 1 Leuchte je Mast, bestückt mit 70 W-Natriumhochdrucklampen. Lichtpunkthöhe 8 m, der Mastabstand ist variabel.

Die Berechnungen wurden jeweils für die Leuchtdichtekoeffizienten $q_0 = 0,07 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$; $0,09 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ und $0,11 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$, jeweils Klasse C2 nach [4], für eine Straßenlänge von 1 km durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 8 bis 10 dargestellt. Erläuterung zu den Tabellen: Da der Energiebedarf mit zunehmendem q_0 abnimmt, kann der Mastabstand größer gewählt bzw. die Leuchtenzahl je km verringert werden. Die Anforderungen der DIN/DIN EN 13201 an die Gleichmäßigkeit werden auch bei größeren Mastabständen erfüllt. Die Schwellenwerterhöhung (Maß für die von den Leuchten ausgehende physiologische Blendung) verbessert sich sogar leicht. Die Effizienz der Erhöhung von q_0 kann anhand der Leuchtstellenanzahl, des Anschlusswertes, des Jahresstromverbrauchs oder der Instandhaltungskosten ermittelt werden, da diese Größen zueinander linear sind. Es ist aber zu berücksichtigen, dass die Berechnung nicht genau auf $2,0 \text{ cd}/\text{m}^2$, $1,5 \text{ cd}/\text{m}^2$ bzw. $0,75 \text{ cd}/\text{m}^2$ abgestimmt werden kann, so dass die errechneten L_m -Werte erst auf diese vorgegebenen Werte umgerechnet werden müssen. In der letzten Zeile der Tabellen wurde diese Umrechnung durchgeführt und die Werte für den Jahresstromverbrauch auf den Ausgangswert $q_0 = 0,07 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ bezogen. Der Vergleich dieser Werte mit dem Verhältnis der q_0 -Werte $0,07/0,09 = 77,8 \%$ und $0,07/0,11 = 63,7 \%$ zeigt, dass trotz Veränderung der Mastabstände der Leuchtdichtekoeffizient q_0 sowohl die Fahrbahnleuchtdichte als auch die Auslegung der Straßenbeleuchtung tatsächlich linear beeinflusst. Beim Vergleich der Instandhaltungskosten wurde diese Umrechnung nicht durchgeführt, dieser bezieht sich vielmehr auf das Verhältnis der je km zu installierenden Leuchten.

Leuchtdichtekoeffizient $q_0 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,07	0,09	0,11
Mastabstand (m)	30,50	39,50	46,00
mittlere Leuchtdichte $L_m \text{ (cd}/\text{m}^2)$	2,01	2,00	2,10
Gesamtgleichmäßigkeit U_0	0,52	0,50	0,48
Längsgleichmäßigkeit U_l	0,84	0,73	0,70
Schwellenwerterhöhung TI (%)	10,60	9,30	8,20
Leuchten je km	65,57	50,63	43,48
Anschlusswert (kW/km)	18,03	13,92	11,96
Jahresstromverbrauch kWh/a je km (bei 4200 Brennstunden)	75 738	58 481	50 217
Vergleich Instandhaltungskosten	100 %	77,2 %	66,3 %
Vergleich Jahresstromverbrauch, bezogen auf $2 \text{ cd}/\text{m}^2$	100 %	76,8 %	63,5 %

Tabelle 8: Auslegung einer Beleuchtungsanlage einer Stadtautobahn mit $L = 2 \text{ cd}/\text{m}^2$ für 3 Leuchtdichtekoeffizienten q_0

Leuchtdichtekoeffizient $q_0 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	0,07	0,09	0,11
Mastabstand (m)	40,00	51,50	54,00
mittlere Leuchtdichte $L_m \text{ (cd}/\text{m}^2)$	1,52	1,51	1,71
Gesamtgleichmäßigkeit U_0	0,80	0,78	0,76
Längsgleichmäßigkeit U_l	0,75	0,72	0,71
Schwellenwerterhöhung TI (%)	8,50	7,60	6,60
Leuchten je km	50,00	38,83	37,04
Anschlusswert (kW/km)	5,75	4,47	4,26
Jahresstromverbrauch kWh/a je km (bei 4200 Brennstunden)	23 575	18 311	17 463
Vergleich Instandhaltungskosten	100 %	77,7 %	74,1 %
Vergleich Jahresstromverbrauch, bezogen auf $1,5 \text{ cd}/\text{m}^2$	100 %	77,1 %	63,6 %

Tabelle 9: Auslegung einer Beleuchtungsanlage einer innerstädtischen Hauptverkehrsstraße mit $L = 1,5 \text{ cd}/\text{m}^2$ für 3 Leuchtdichtekoeffizienten q_0

Leuchtdichtekoeffizient q_0 cd/(m².lx)	0,07	0,09	0,11
Mastabstand (m)	49,00	61,00	66,00
mittlere Leuchtdichte L_m (cd/m ²)	0,75	0,77	0,82
Gesamtgleichmäßigkeit U_0	0,53	0,43	0,43
Längsgleichmäßigkeit U_l	0,57	0,50	0,50
Schwellenwerterhöhung TI (%)	10,20	9,80	8,40
Leuchten je km	40,82	32,79	30,30
Anschlusswert (kW/km)	3,39	2,72	2,52
Jahresstromverbrauch kWh/a je km (bei 4200 Brennstunden)	13 890	11 157	10 312
Vergleich Instandhaltungskosten	100 %	80,3 %	74,2 %
Vergleich Jahresstromverbrauch, bezogen auf 0,75 cd/m²	100 %	78,2 %	67,9 %

Tabelle 10: Auslegung einer Beleuchtungsanlage einer Sammelstraße mit $L = 0,75$ cd/m² für 3 Leuchtdichtekoeffizienten q_0

Øbro hat eine ähnliche Rechnung für eine Straßensituation durchgeführt, bei der aber Lichtpunktabstand und die Lampenleistung verändert wurden [53]. Zusätzlich wurde auch berücksichtigt, dass Beläge mit höheren q_0 -Werten, erzielt mit künstlichen Aufhellern, meist eine rauere Oberfläche besitzen; deshalb wurde von auch die C-Klasse nach [4] variiert. Es handelte sich um eine einbahnige Straße mit 8 m Breite, für die nach DIN/DIN EN 13201 [5], [6] eine Leuchtdichte von 1 cd/m² (Wartungswert) gefordert wird. Die Lichtpunkthöhe betrug 8 m. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 11.

Leuchtdichtekoeffizient q_0 cd/(m².lx)	0,07	0,10	0,11
C-Klasse nach [2]	C2	C1	C1
Lampenleistung (W)	150	100	100
Leuchten je km	31	29	27
Anschlusswert (kW/km)	5,2	3,6	3,1
Betriebskosten je km und Jahr (€)	4900	3570	3040
Vergleich Betriebskosten	100 %	72,9 %	62,0 %

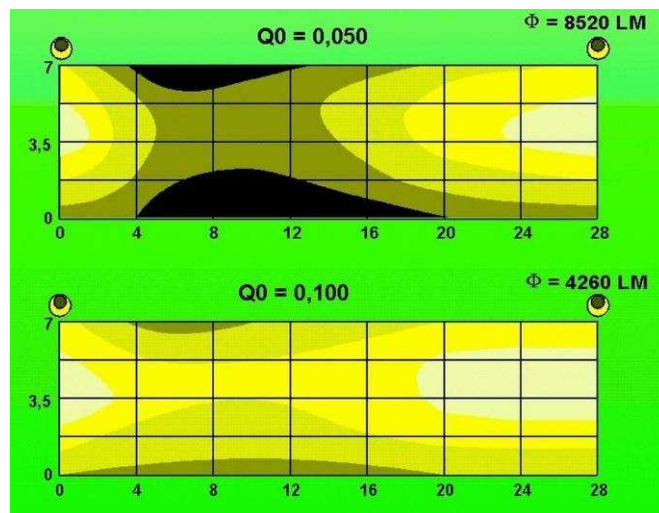
Tabelle 11: Auslegung einer Beleuchtungsanlage für eine Straße mit $L = 1,0$ cd/m² für 3 Leuchtdichtekoeffizienten q_0 nach Øbro [53]

Vergleicht man die Prozentsätze der letzten Zeile wieder mit dem Verhältnis der q_0 -Werte $0,07/0,10 = 70,0$ % und $0,07/0,11 = 63,7$ %, stellt man fest, dass sich die Betriebskosten (und auch die Auslegung der Beleuchtungsanlage) reziprok mit der Höhe von q_0 ändern. Damit ist auch nachgewiesen, dass die Leuchtdichte linear mit q_0 steigt.

Von einer Aufhellung kann man erst ab einem $q_0 = 0,07$ cd/(m².lx) sprechen (s. auch Tabellen 3 und 4). Wegen des linearen Zusammenhangs zwischen Leuchtdichte und q_0 kann aus den Tabellen 8 bis 10 auch die Auslegung der Beleuchtung und der Energiebedarf für eine dunkle Fahrbahnoberfläche mit einem $q_0 = 0,055$ cd/(m².lx) berechnet werden. Die Ergebnisse, bezogen auf die Werte für $q_0 = 0,07$ cd/(m².lx), zeigt Tabelle 12.

Aus den Tabellen 8 bis 10 könnte man schließen, dass die Aufhellung zu einer verschlechterten Gleichmäßigkeit der Leuchtdichte führt. Diese ist dort allein auf die Vergrößerung des Mastabstandes zurückzuführen. Tatsächlich führt die Aufhellung jedoch eher zu einer Verbesserung der Gleichmäßigkeit, da aufgehellte Fahrbahnoberflächen meist weniger spiegelnd sind als dunkle Oberflächen. Dies wird auch durch Bild 8 demonstriert.

Leuchtdichte (cd/m ²)	2,0 (Auto- bahn)	1,5 (innerstädtische Hauptverkehrsstraße)	0,75 (Sammelstraße)
Leuchten je km	83,45	63,64	51,95
Anschlusswert (kW/km)	22,95	7,32	4,31
Jahresstromverbrauch kWh/a je km (bei 4200 Brennstunden)	96 394	30 005	17 678
Betriebskosten steigen auf	127,3 %		

Tabelle 12: Verhältnis der Betriebskosten bei q_0 -Werten 0,055 und 0,07 cd/(m².lx)Bild 8: Leuchtdichteverteilung einer Fahrbahnoberfläche mit $q_0 = 0,05$ cd/(m².lx), (oben) und 0,10 cd/(m².lx)

8.3 Zusammenhang Beleuchtungsstärke - Leuchtdichtekoeffizient

Wie in Abschnitt 8.1 erläutert, ist die Verwendung der Fahrbahnleuchtdichte bei der Beleuchtung mancher Straßenräume nicht möglich oder nicht sinnvoll; dann wird die Beleuchtungsstärke als Auslegungskriterium der Straßenbeleuchtung benutzt. In DIN/DIN EN 13201 werden zwar explizit keine Straßen genannt, deren Beleuchtung nach Beleuchtungsstärke ausgelegt werden, gemeint sind aber v.a. die Anliegerstraßen (Wohnstraßen) mit einer „typischen Geschwindigkeit des Hauptnutzers“ (diese Formulierung der Norm bezieht sich sowohl auf Autofahrer als auch Fußgänger und Radfahrer) bis maximal 30 km/h. Bei diesen kann die Leuchtdichtetechnik meist nicht sinnvoll verwendet werden; außerdem werden diese Straßen nicht nur von Kfz, sondern überwiegend von Fußgängern und Radfahrern genutzt, deren Sehbedürfnisse sich wesentlich von denen eines Autofahrers unterscheiden. Kommt es bei letzterem vor allem darauf an, Sehobjekte (z.B. Personen, Hindernisse) auf der Fahrbahn zu erkennen - hierfür ist der Leuchtdichtekontrast zwischen Sehobjekt und Fahrbahn maßgeblich - muss ein Fußgänger oder Radfahrer sich räumlich orientieren können, er muss erkennen können, wer ihm mit welchen Absichten entgegenkommt (Gesichtserkennung), er muss die Struktur der Fahrbahn/Fußwegoberfläche erkennen können (z.B. Pflaster, Stufen, Schlaglöcher). Hierfür ist weniger die Fahrbahnleuchtdichte geeignet als die Beleuchtungsstärke, die die Erkennung von räumlichen Strukturen bzw. visuellen Strukturen auch oberhalb der Fahrbahn ermöglicht. Allerdings können Anliegerstraßen unter bestimmten Bedingungen (zulässige Geschwindigkeit > 30 km/h; relativ breite und homogene Fahrbahn, Vorhandensein von baulich getrennten Fußwegen) ebenfalls nach Leuchtdichte ausgelegt werden.

Bei Anliegerstraßen, deren Beleuchtung nach Beleuchtungsstärke ausgelegt ist, werden das Niveau der Beleuchtungsstärke und damit auch die Beleuchtungskosten allein von den Eigenschaften der Beleuchtungsanlage bestimmt. Erhöht man die Helligkeit der Fahrbahn,

erhöht man zwar die Fahrbahnleuchtdichte, aber nicht die eingestrahlte Beleuchtungsstärke. Bei diesen Straßen ist eine Aufhellung der Fahrbahn unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht sinnvoll. Gleichwohl führt eine hellere Fahrbahnoberfläche auch in Anliegerstraßen zu besseren Sichtbedingungen für alle Straßennutzer sowie zu einem erhöhten Sicherheitsgefühl der Passanten und ist deshalb grundsätzlich auch hier angebracht.

8.4 Einfluss aufgehellter Fahrbahndeckschichten auf die Auslegung und Kosten der Straßenbeleuchtung

8.4.1 Beleuchtungskosten Deutschland

Neuere Berechnungen über den Einfluss der Fahrbahnaufhellung auf die Beleuchtungskosten liegen nicht vor. Die verfügbaren Publikationen stammen aus dem Zeitraum 1969 bis 1980: KNUDSEN [54] ermittelte 1969 für Dänemark, dass sich die Mehrkosten für die Aufhellung mit künstlichem Aufhellern bereits nach 3 Jahren amortisieren. PREVOT [54] errechnete für Belgien 1977 Beleuchtungskosten-Reduzierungen zwischen 2,25 und 5 bfr. durch Verwendung aufgehellter Deckschichten. SCHOLZ und v. STOSCH [55] wiesen 1978 nach, dass in Hamburg die Mehrkosten durch Aufhellung von 2 DM/m² zu Betriebskostensparnissen von 0,35 - 0,45 DM/m² und Jahr führen und sich je nach Straßenart und Beleuchtungsanlage bereits im 1. bis 4. Betriebsjahr amortisieren. In der DDR wurden mit aufgehellten Deckschichten Energieeinsparungen von 1,27 kWh je m² und Jahr und eine Energiekostensparnis von 0,35 Mark je m² und Jahr erreicht (s. [57]).

Offizielle Statistiken über die Kosten der Straßenbeleuchtung sind bis es heute nicht verfügbar. Aus verschiedensten Einzelangaben und Statistiken wurde folgendes Bild ermittelt: In Deutschland sind ca. 9,125 Mio. Lichtpunkte (LP) vorhanden. Die mittlere Anschlussleistung je LP beträgt ca. 100 W. Bei einer jährlichen Brenndauer von 4200 Stunden beträgt der Energieaufwand je LP ca. 420 kWh. Der kWh-Preis schwankt von Ort zu Ort sehr stark und kann zwischen 0,18 €/kWh und 0,25 €/kWh liegen. Auch unter dem Aspekt, dass die Energiekosten vermutlich weiter relativ stark ansteigen werden, dürfte ein mittlerer Preis von 0,22 €/kWh für 2011 und die nähere Zukunft angemessen sein. Bei diesem Preis ergeben sich Stromkosten je LP von ca. 92,40 €. Die gesamten Beleuchtungskosten betragen in Deutschland 9,125 Mio. LP · 92,40 € = 843,15 Mio. €. Der Energieaufwand errechnet sich zu 9,125 Mio. LP · 420 kWh = 3,83 TWh (Terawattstunden; 1 TWh = 10¹² Wh oder 10⁹ kWh).

Die jährlichen sonstigen pro LP betragen je nach Gemeindegröße 55 - 70 €. Bei einem angenommenen Mittelwert der Betriebskosten von 64 €/LP belaufen sich die jährlichen Betriebskosten auf 9,125 Mio. LP · 64 € = 684 Mio. €. und die Gesamtkosten für die Straßenbeleuchtung auf 584 Mio. € + 843,15 Mio. € = ca. 1,427 Mrd. €.

Prinzipiell ist das gesamte kommunale Straßennetz beleuchtet; ausgenommen davon sind in der Regel nur unbebaute Gebiete innerhalb der Ortschaften. Es ist aber nicht bekannt, welcher Teil der kommunalen Straßen aufgehellt ist. Für eine Abschätzung wird folgendes Modell verwendet: In den Bundesländern Brandenburg, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein und Thüringen sind alle innerörtlichen Straßen aufgehellt; der Mittelwert q_0 beträgt 0,075 cd/(m²·lx). Der größte Teil ist mit natürlichen Aufhellern aufgehellt, hier ist $q_0 = 0,07$ cd/(m²·lx); der kleinere Teil mit künstlichen Aufhellern, mit einem $q_0 = 0,11$ cd/(m²·lx). In den anderen Bundesländern gibt es keine aufgehellten innerörtlichen Straßen, hier ist $q_0 = 0,055$ cd/(m²·lx). Die Länge aller kommunalen Straßen in Baulast der Kommunen in Deutschland beträgt ca. 410 000 km; die Verteilung auf die einzelnen Bundesländer ist nicht bekannt. Zusätzlich befinden sich 51 240 km kommunale Straßen in Baulast des Bundes, der Länder und Kreise. Davon haben die genannten 6 Bundesländer einen Anteil von 12 448 km = 24,3 %. Dieser Anteil soll als repräsentativ für das kommunale Straßennetz aller Bundesländer angesehen werden. Der potenziell aufhellbare Anteil der kommunalen Straßen beträgt daher 410 000 km · (1 - 0,243) = 348 500 km (kommunale Baulast) und 51 240 km · (1 - 0,243) = 38 800 km (andere Baulastträger). Man kann davon ausgehen, das

die Beleuchtung sämtlicher kommunaler Straßen anderer Baulastträger nach dem Kriterium Leuchtdichte ausgelegt sind, während bei den kommunalen Straßen in kommunaler Baulast geschätzte 40 % des Straßennetzes solche Anliegerstraßen sind, deren Beleuchtung nach Beleuchtungsstärke ausgelegt ist. Es ist aber zu berücksichtigen, dass Anliegerstraßen sehr viel schmaler sind als sonstige Straßen und mit einem Beleuchtungsniveau ausgestattet sind, dass im Mittel nur ein Drittel des Niveaus von sonstigen Straßen beträgt. Gewichtet man die Anliegerstraßen mit diesen beiden Aspekten, sind von 348 500 km rechnerisch nur 10 % = 34 850 km Anliegerstraßen zu berücksichtigen. 34 850 km stellen 7,6 % des gesamten kommunalen Straßennetzes von 461 240 (41000 km + 52 240 km) dar. Dieser Prozentsatz ist zu dem genannten Prozentsatz von 24,3 % zu addieren, wenn der Gesamtanteil des kommunalen Straßennetzes zu ermitteln ist, der entweder bereits aufgehellt ist oder bei dem eine Aufhellung keine Einsparung von Beleuchtungskosten (Anliegerstraßen) erbringt: 24,3 % + 7,6 % = 31,9 %.

Würde auch der dunkle Teil des kommunalen Straßennetzes, der nicht bereits aufgehellt ist und der nicht nach Beleuchtungsstärke ausgelegt ist, auf das Niveau von 0,075 cd/(m².lx) aufgehellt, würden sich die Beleuchtungskosten wie folgt ändern:

$843,15 \text{ Mio. €} \cdot 0,319 + 843,15 \text{ Mio. €} \cdot (1 - 0,319) \cdot 0,055/0,075 = 670,03 \text{ Mio.}$ Eingespart würden **173,12 Mio. € = 20,5 %**

Würde das ganze kommunale Straßennetz auf $q_0 = 0,09 \text{ cd}/(\text{m}^2.\text{lx})$ aufgehellt, entstünden folgende Beleuchtungskosten:

$843,15 \text{ Mio. €} \cdot 0,319 + 843,15 \text{ Mio. €} \cdot (1 - 0,319) \cdot 0,055/0,09 = 619,85 \text{ Mio.}$ Eingespart würden **210,51 Mio. € = 26,5 %**

Würde das ganze kommunale Straßennetz auf $q_0 = 0,11 \text{ cd}/(\text{m}^2.\text{lx})$ aufgehellt, ergäbe sich:

$843,15 \text{ Mio. €} \cdot 0,319 + 843,15 \text{ Mio. €} \cdot (1 - 0,319) \cdot 0,055/0,11 = 556,10 \text{ Mio.}$ Eingespart würden **287,05 Mio. € = 34,0 %**.

Dieses hier berechnete volle Einsparpotential käme erst dann zum Tragen, wenn die Beleuchtungsanlage selbst erneuert wird. Wird nur die Straße aufgehellt, können auch Energiekosten eingespart werden, weil dann die Lampenleistung reduziert werden kann. Dies ist in vielen Fällen technisch möglich.

8.4.2 Kostenersparnis bei Neubaustraßen

Für die Errichtung eines Lichtpunktes werden meist pauschalisierte Preise angesetzt, die die Kosten für Fundament, Leuchten und Leuchtmittel sowie die anteiligen Kosten je Lichtmast für Erdarbeiten, Verkabelung, Energieverteilung, Ansteuerung und Montage enthalten. Die Errichtung eines Lichtpunktes in einem Wohngebiet (Sammelstraße) kostet ca. 1800 €, in innerstädtischem Gebiet 2000 € und bei einer Stadtautobahn ca. 2400 €. Die Mehrkosten für die Aufhellung einer Fahrbahnoberfläche zur Erreichung eines $q_0 = 0,07 \text{ cd}/(\text{m}^2.\text{lx})$ werden zu ca. 1,25 €/m² und zur Erreichung eines 0,09 cd/(m².lx) zu ca. 1,50 € angesetzt. Bei Aufhellung auf 0,11 cd/(m².lx) entstehen je nach Deckschichtdicke Kosten von 1,75 € bis 2 €. Stellt man den durch die Aufhellung eingesparten Lichtpunkt-kosten lt. den Tabellen 8 bis 10 und 12 die Mehrkosten für die Aufhellung gegenüber, erhält man für den Neubau einer Autobahn/Innerstädtischen Hauptstraße/Sammelstraße die in Tabelle 13 zusammengestellten Ergebnisse. In allen Fällen sind die Kostenreduzierungen durch die eingesparten Lichtpunkte bereits im ersten Jahr nach Neubau des Straßenabschnittes größer als die Mehrkosten durch die Aufhellung.

	Aufhellung auf cd/(m².lx)	Kostensparnis durch Lichtpunkt-reduzierung (€)	Mehrkosten durch Aufhellung (€)	Differenz (€)
Autobahn	0,07	21 456	20 625	831
innerstädt. Hauptstraße		27 080	8 125	18 955
Sammelstraße		20 034	9 375	10 659
Autobahn	0,09	39 384	24 750	14 634
innerstädt. Hauptstraße		49 620	9 750	39 870
Sammelstraße		34 488	10 250	24 238
Autobahn	0,11	47 964	33 000	14 964
innerstädt. Hauptstraße		63 250	13 000	50 250
Sammelstraße		38 322	13 125	23 197

Tabelle 13: Kostenänderung beim Neubau von ortsfest beleuchteten Straßen durch Aufhellung auf $q_0 = 0,07$ bis $0,11$ cd/(m².lx)

8.4.3 Kostensparnis bei nachträglicher Aufhellung von Straßen

Hier ist zu berücksichtigen, dass durch die Aufhellung überwiegend nur Beleuchtungskosten eingespart werden können. Die Lampenleistung kann zwar reduziert werden, die ursprünglich getätigten Investitionen für die Beleuchtungsanlage bleiben aber erhalten. Von den sonstigen Betriebskosten (Autobahn/innerstädtische Hauptstraße: 70 €/Lichtpunkt, Sammelstraße 60 €/LP) kann nur ein Anteil von ca. 10 % bei $q_0 = 0,07$ cd/(m².lx), 20 % bei $q_0 = 0,09$ cd/(m².lx) bzw. 25 % bei $q_0 = 0,11$ cd/(m².lx) eingespart werden. Die Tabellen 14 bis 16 enthalten die Rechnungen für eine Aufhellung auf diese 3 Werte.

	jährliche Betriebskostensparnis (€)			Mehrkosten durch Aufhellung (€)	Mehrkosten amortisieren sich in Jahren
	Beleuchtungskosten	Betriebskosten	Summe		
Autobahn	4 664	64	4 728	20 625	4,8
innerstädt. Hauptstraße	1 414	95	1 509	8 125	5,4
Sammelstraße	833	67	900	9 375	10,4

Tabelle 14: Kostenänderung beim nachträglicher Aufhellung von ortsfest beleuchteten Straßen auf $q_0 = 0,07$ cd/(m².lx)

	jährliche Betriebskostensparnis (€)			Mehrkosten durch Aufhellung (€)	Mehrkosten amortisieren sich in Jahren
	Beleuchtungskosten	Betriebskosten	Summe		
Autobahn	8 460	230	8 690	24 750	2,8
innerstädt. Hauptstraße	2 573	347	2 920	9 750	3,3
Sammelstraße	1 461	240	1 701	10 250	6,0

Tabelle 15: Kostenänderung beim nachträglicher Aufhellung von ortsfest beleuchteten Straßen auf $q_0 = 0,09$ cd/(m².lx)

	jährliche Betriebskostensparnis (€)			Mehrkosten durch Aufhellung (€)	Mehrkosten amortisieren sich in Jahren
	Beleuchtungskosten	Betriebskosten	Summe		
Autobahn	10 278	368	10 646	33 000	3,1
innerstädt. Hauptstraße	2 759	558	3 317	13 000	3,9
Sammelstraße	1 621	364	1 985	13 125	6,6

Tabelle 16: Kostenänderung beim nachträglicher Aufhellung von ortsfest beleuchteten Straßen auf $q_0 = 0,11 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$

Die Berechnungen zeigen, dass eine Amortisierung der Aufhellungskosten innerhalb der Nutzungsdauer einer Asphaltdeckschicht immer gegeben ist. Am relativ ungünstigsten schneidet eine Aufhellung von 0,055 auf nur 0,07 $\text{cd}/(\text{lx} \cdot \text{m}^2)$ ab, weil mit zunehmender Aufhellung die Einsparungen schneller steigen als die Aufhellungskosten.

8.5 Verringerung des CO₂-Ausstoßes von Straßenbeleuchtungsanlagen durch Fahrbahnaufhellung

Ein weiterer, immer wichtiger werdender Aspekt ist die Notwendigkeit, den CO₂-Ausstoß in die Atmosphäre zu reduzieren, der durch Elektroenergie verursacht wird. Für den Energieaufwand, die für die Straßenbeleuchtung benötigt wird, gibt es keine bundesweite Statistik; die Schätzungen schwanken zwischen 3 und 6 TWh. In Abschnitt 8.4.1 waren 3,83 TWh ermittelt worden. Nach Berechnungen des ZVEI [58] beträgt der Energieaufwand für die Straßenbeleuchtung 5,3 TWh. Diese Zahl wurde indirekt aus dem Verkauf von Lampen und Leuchten ermittelt und enthält somit auch den Energiebedarf für die Beleuchtung von Sportstätten, Industrie- und Bahnverkehrsanlagen, Tunneln sowie für Anstrahlungszwecke (Gebäudefassaden). Im Folgenden wird der Wert 4 TWh verwendet.

Die Angaben über die Menge CO₂, die durch Elektroenergie erzeugt wird, differieren je nach energiepolitischer Interessenslage beträchtlich; man findet Zahlen von 400 g bis 700 g CO₂/kWh. Aus der offiziellen Statistik des Umweltbundesamtes (UBA, s. Bild 9) ergibt sich, dass der Wert von 744 g CO₂/kWh im Jahr 1990 auf 563 g CO₂/kWh im Jahr 2010 (Prognose) abgenommen hat; in der weiteren Rechnung wird ein Wert von 560 g CO₂/kWh eingesetzt.

In Abschnitt 8.4.1 wurden die Prozentsätze der Beleuchtungskostenreduzierung ermittelt, die sich bei Aufhellung des gesamten deutschen, ortsfest beleuchteten Straßennetzes auf $q_0 = 0,075$; 0,09 bzw. 0,11 $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ ergeben. Der Gesamtausstoß für die Beleuchtung beträgt $4 \cdot 10^9 \text{ kWh} \cdot 0,56 \text{ kg/kWh} = 2,24 \cdot 10^9 \text{ kg}$ oder 2,24 Mio. t CO₂. Die Aufhellung würde den CO₂-Ausstoß verringern um

$$q_0 = 0,075 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx}): 2,24 \cdot 10^9 \text{ kg} \cdot 0,202 = 0,452 \cdot 10^9 \text{ kg} \text{ oder } 0,452 \text{ Mio. t CO}_2$$

$$q_0 = 0,09 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx}): 2,24 \cdot 10^9 \text{ kg} \cdot 0,335 = 0,750 \cdot 10^9 \text{ kg} \text{ oder } 0,750 \text{ Mio. t CO}_2$$

$$q_0 = 0,11 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx}): 2,24 \cdot 10^9 \text{ kg} \cdot 0,456 = 1,021 \cdot 10^9 \text{ kg} \text{ oder } 1,021 \text{ Mio. t CO}_2$$

Für die Aufhellung mit natürlichen Aufhellern wird keine zusätzliche Energie benötigt, da der Energiebedarf bei der Herstellung von Splitt von dessen Helligkeit unabhängig ist. Zur Aufhellung auf 0,11 $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ benötigt man aber einen gewissen Anteil künstlichen Aufhellers. Für die Produktion von 1 t eines künstlichen Splittes durch Brennen von Flint benötigt man 25 kg Petrokoks. Dabei entstehen 83 kg CO₂. Um ein q_0 von 0,11 $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ zu erreichen, muss man dem Mischgut ca. 20 % natürlichen und ca. 16 % künstlichen Aufheller beimischen. Für eine 4 cm dicke Deckschicht (Mineralstoffgehalt 93 %; Binder 7 %; spezifisches Gewicht ca. 2,5 g/cm^3) bedeutet das 14,88 kg künstlichen Aufheller je m^2 Asphaltdeckschicht, der die Umwelt einmalig mit $14,88 \cdot 83 = 1153 \text{ g CO}_2$ belastet; verteilt auf eine Nut-

zungsdauer dieser Deckschicht von 15 Jahren heißt das 76,8 g CO₂/m² und Jahr. Aus den Tabellen 8 bis 10 kann man errechnen, dass durch die Aufhellung von 0,055 auf 0,11 cd/(m².lx) bei der Autobahn 1,63 kg CO₂/m² und Jahr und der Sammelstraße 0,601 kg CO₂/m² und Jahr eingespart werden. Der Mittelwert über alle Straßen wird mit 1,2 kg CO₂/m² und Jahr angesetzt. Damit reduziert sich bei Aufhellung auf 0,11 cd/(m².lx) die CO₂-Ersparnis um 76,8/1200 = 6,4 %. Insgesamt ergibt sich für die drei Aufhellgrade folgende CO₂-Ersparnis:

q₀ = 0,075 cd/(m².lx): 0,452 · 10⁹ kg oder **0,452 Mio. t CO₂**

q₀ = 0,09 cd/(m².lx): 0,750 · 10⁹ kg oder **0,750 Mio. t CO₂**

q₀ = 0,11 cd/(m².lx): 0,956 · 10⁹ kg oder **0,956 Mio. t CO₂**

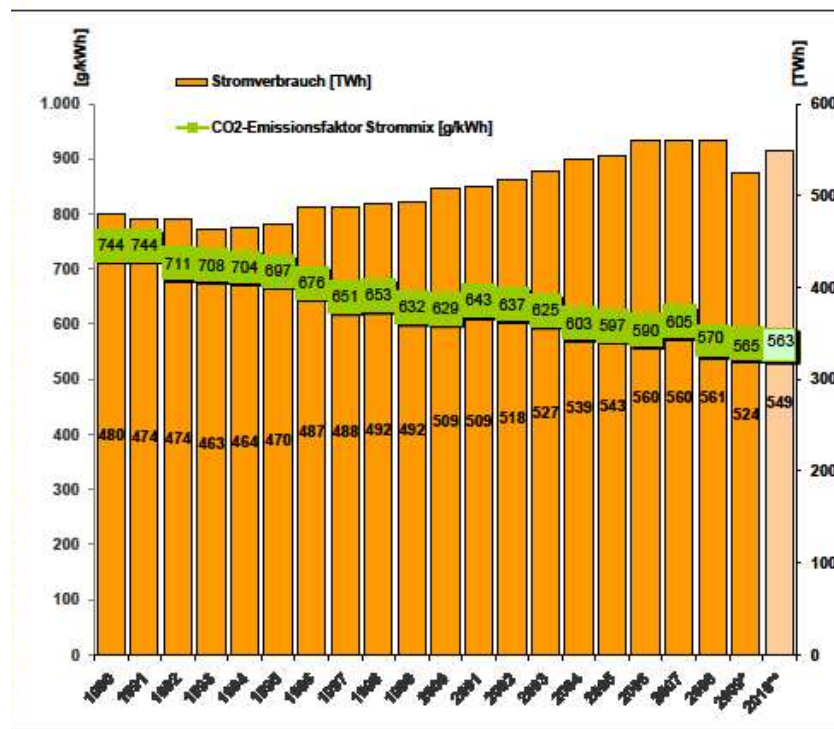


Bild 9:
Entwicklung des CO₂-Emissionsfaktors für den deutschen Strommix. Quelle: Umweltbundesamt

9 Aufgehellte Fahrbahndeckschichten und Tunnelbeleuchtung

9.1 Grundlagen der Tunnelbeleuchtung

Die Beleuchtung von Tunneln unterscheidet sich grundlegend von der Beleuchtung von Straßen. Nähert sich ein Kraftfahrer einem Tunnel, sieht er die Tunneleinfahrt als „schwarzes Loch“, in der sich Personen oder Hindernisse tarnen können. Deshalb muss die an die Tunneleinfahrt anschließende Tunnelstrecke - die Einsichtsstrecke - so hell beleuchtet werden, dass die Personen oder Hindernisse wieder sichtbar werden. Die Länge der Einsichtsstrecke entspricht der Haltesichtweite des mit der zulässigen Geschwindigkeit v_{zul} fahrenden Kraftfahrers. Die Leuchtdichte dieser Strecke muss umso höher sein, je höher die Außenhelligkeit ist. Je nach Tunnelgeometrie, Umgebungsbedingungen und v_{zul} liegt die Fahrbahnleuchtdichte der Einsichtsstrecke bei 100 cd/m² - 350 cd/m², also ca. um den Faktor 100 höher als bei der Straßenbeleuchtung. Nach der Einsichtsstrecke wird die Leuchtdichte in der Übergangsstrecke kontinuierlich oder stufenweise auf das Niveau der Innenstrecke (2 cd/m² - 6 cd/m²) reduziert. Die Übergangsstrecke ist umso länger, je höher die Einsichtsstreckenleuchtdichte ist. Die hohe Anfangsleuchtdichte der Einsichtsstrecke wird aber nur bei voller Sonne benötigt; je nach Bewölkungsgrad und Sonnenstand kann die Leuchtdichte reduziert werden. Bei Nacht beträgt die Einsichtsstreckenleuchtdichte dann nur noch 0,5 cd/m² - 2 cd/m². Im Gegensatz zur Straßenbeleuchtung werden Tunnel also v.a. bei Tageslicht beleuchtet. Die Be-

leuchtungskosten der Einsichts- und Übergangsstrecke betragen i.a. ca. 90 % der Beleuchtungskosten für den ganzen Tunnel.

9.2 Einfluss aufgehellter Fahrbahndeckschichten auf die Auslegung und Kosten der Tunnelbeleuchtung

Das Leuchtdichteniveau in Straßentunneln steigt wie bei der offenen Straße linear mit dem Leuchtdichtekoeffizienten q_0 an bzw. die Energiekosten verhalten sich reziprok zur Höhe von q_0 . EBERBACH [59] hat gezeigt, dass die Fahrbahnleuchtdichte mit zunehmenden q_0 wegen der Mehrfachreflexion des Lichts zwischen Tunnelwänden und Fahrbahn sogar etwas stärker als linear ansteigt. Im Folgenden wird von einem linearen Zusammenhang zwischen q_0 und der Fahrbahnleuchtdichte ausgegangen. Bei den erforderlichen hohen Fahrbahnleuchtdichten ist die Aufhellung von Tunnelfahrbahnen, insbesondere der Einsichtsstrecken, noch stärker geboten als bei offenen Straßen. Leider werden die in allen einschlägigen Tunnelregelwerken enthaltenen Empfehlungen, Tunnelfahrbahnen aufzuhellen, in den meisten Fällen ignoriert.

Für einen in Bau befindlichen Autobahntunnel wurden die Beleuchtungskosten in Abhängigkeit von der Aufhellung errechnet. Für die Mehrkosten der Aufhellung wurden die in Abschnitt 5.2 bzw. 8.4.2 genannten Beträge eingesetzt. Die Einsichtsstrecke dieses Tunnels (Nordportal) soll mit einer Leuchtdichte von 344 cd/m^2 versehen werden. Die Länge der Einsichts- und Übergangsstrecke beträgt 339 m. Die Fahrbahnbreite beträgt 7,50 m; Notgehwege werden nicht in die Betrachtungen einbezogen, da diese nicht aufgehellt werden müssen. Das Sparpotential zeigt Tabelle 17. In den Investitionskosten für die Beleuchtung sind die Kosten für Lampen, Leuchten, Verkabelung und sonstigen Aufwand enthalten.

q_0 $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$	Einsparung Investitions- kosten Be- leuchtung (€)	Einsparung jähr- licher Strom- und Wartungs- kosten (€)	Summe Ein- sparung 1 Jahr ab In- vestition (€)	Mehr- kosten Aufhel- lung (€)	Gesamtein- sparung 1 Jahr ab In- vestition (€)
0,07	67 000	16 000	83 000	3 200	80 800
0,09	105 000	26 000	131 000	3 800	127 200
0,11	131 000	33 000	164 000	5 100	158 900
$\geq 0,12$	140 000	35 000	175 000	45 800	129 200

Tabelle 17: Sparpotential an Beleuchtungskosten durch Aufhellung der Einsichts- und Übergangsstrecke eines Autobahntunnels, versehen mit einer Einsichtsstreckenleuchtdichte von 344 cd/m^2

Nach Tabelle 17 ist es in jedem Fall sinnvoll, die Deckschicht neuer Tunnel aufzuhellen, da die Mehrkosten für die Aufhellung bei weitem übertroffen werden durch die eingesparten Investitions- und die laufenden Beleuchtungskosten. Das größte Sparpotential besteht bei der Aufhellung auf $q_0 = 0,11 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$. Die Aufhellung auf $q_0 \geq 0,12 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$, nur erreichbar mit den in Abschnitt 5.2 genannten hellen Bindemitteln, ergibt eine schlechtere Wirtschaftlichkeit gegenüber der Aufhellung durch Verwendung heller Splitte: Den Mehrkosten von ca. 40 000 € gegenüber der Aufhellung auf $0,11 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ steht nur eine Einsparung von Strom- und Wartungskosten von 2000 € gegenüber; wenn überhaupt, amortisieren sich die Mehrkosten frühestens nach 20 Jahren.

Der Vergleich der Einsparung jährlicher Strom- und Wartungskosten mit den Mehrkosten für die Aufhellung zeigt, dass selbst eine nachträgliche Aufhellung sehr wirtschaftlich ist, da die Mehrkosten für die Aufhellung in wenigen Monaten durch verringerte Strom- und Wartungskosten kompensiert werden.

Die Einsichtsstreckenleuchtdichte von 344 cd/m^2 des Tunnels, für den das Sparpotential in Tabelle 17 berechnet wurde, ist ein außergewöhnlich hoher Wert. Die FGSV hat 1996 eine Tunneldokumentation veröffentlicht [61], aus der hervorgeht, dass die mittlere Einsichtsstreckenleuchtdichte der damals 170 Tunnel bei 177 cd/m^2 liegt, also nur bei ca. 50 % der Einsichtsstreckenleuchtdichte des Beispieltunnels. Die Zahlen der Tabelle 17 zeigen aber, dass selbst bei einem Leuchtdichteniveau von 50 % oder weniger - bei dem die Einsparung auch um den entsprechenden Prozentsatz zurückgeht, die Aufhellungskosten aber konstant bleiben - immer noch ein erhebliches Einsparpotential vorhanden ist.

9.3 Sparpotential beim Betrieb von Tunnelbeleuchtungsanlagen durch Fahrbahnaufhellung

Der Gutachter hat mehr als 60 Tunnel lichttechnisch untersucht (s. [19], [60]). Von 61 auswertbaren Tunneln hatten 23, das sind nur 37,7 % aller Tunnel, q_0 -Werte von 0,09 bis $0,15 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ (stark aufgehellte Asphaltfahrbahnen oder Betonfahrbahnen). Bei 38 Tunneln oder 62,3 % lag der q_0 -Wert im Bereich von 0,04 - $0,08 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ bei einem Mittelwert von $0,069 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ (nicht oder nur schwach aufgehellte Asphaltfahrbahnen). Bei einer Aufhellung auf $0,09 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ bzw. $0,11 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ würden die Energiekosten dieser Tunnel um 23 % bzw. 37 % sinken.

Aus [60] geht hervor, dass 63,5 % aller 1996 in Deutschland in Betrieb befindlichen 170 Straßentunnel nicht oder nur schwach aufgehellte sind; das ist ziemlich genau der gleiche Prozentsatz wie vom Gutachter festgestellt. Die Zahl von 63 % nicht aufgehellter Tunnel kann daher als repräsentativ für alle ca. 360 heute in Betrieb befindlichen deutschen Straßentunnel angesehen werden. Damit besteht bei $360 \cdot 0,63 = \text{ca. } 227$ Tunneln die Möglichkeit, durch nachträgliche Aufhellung Beleuchtungs- und Betriebskosten einzusparen. Aus [60] wurde die mittlere Anschlussleistung für die Beleuchtungsanlage von Tunneln, Stand 1996, zu $145,7 \text{ kW}$ ermittelt. Da gegenüber dem damaligen Stand heute zwar energieeffizientere Lampen und Leuchten verwendet werden, die mittlere Tunnellänge und damit der Energiebedarf aber gestiegen sind, hat sich die mittlere Anschlussleistung seit 1996 kaum verändert und wird daher auch der folgenden Rechnung zugrunde gelegt. Nach EBERBACH [62] beträgt der mittlere Verbrauch je kW Anschlussleistung $3,3 \text{ MWh}$ im Jahr. Nach Berechnungen des Gutachters entfallen davon ca. 90 %, also ca. 3 MWh , auf die Einsichts- und Übergangsstrecke. Bei einer Aufhellung der Einsichts- und Übergangsstrecken der 227 Tunnel, bei denen der Leuchtdichtekoeffizient q_0 dieser Strecken heute im Mittel nur $0,069 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ beträgt, auf $0,11 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ ergibt sich folgendes Sparpotential:

Das Energiesparpotential beträgt $143,7 \text{ kW} \cdot 3 \text{ MWh/kW und Jahr} \cdot 227 \text{ Tunnel} \cdot 0,069/0,11 = \mathbf{61\ 400 \text{ MWh}}$.

Das Kostensparpotential beträgt $0,614 \cdot 10^8 \text{ kWh} \cdot 0,22 \text{ €/kWh} = \mathbf{13,5 \text{ Mio. €}}$. Durch verringerte Wartungskosten würde sich das Kostensparpotential weiter erhöhen.

Das Einsparpotential an CO_2 -Emissionen beträgt $0,614 \cdot 10^8 \text{ kWh} \cdot 0,56 \text{ kg CO}_2/\text{kWh} = \mathbf{34\ 400 \text{ t CO}_2}$, wovon bei Aufhellung unter Verwendung von künstlichem Aufheller ein geringer Teil abzuziehen ist.

10 Einfluss aufgehellter Fahrbahnoberflächen auf die nächtlichen Seh- und Wahrnehmungsbedingungen bei nicht ortsfest beleuchteten Straßen

10.1 Reflexionseigenschaften von Fahrbahnoberflächen bei Beleuchtung mit Kfz-Scheinwerfern

Innerorts wird die Aufhellung von Straßen v.a. dazu genutzt, Energie für die Straßenbeleuchtung einzusparen, das Leuchtdichteniveau der Fahrbahn verändert sich durch die Aufhellung

nicht. Deshalb bleiben die Seh- und Wahrnehmungsbedingungen weitgehend unverändert. Die Aufhellung unbeleuchteter Straßen ändert jedoch diese Bedingungen deutlich.

Wird die Fahrbahn ortsfest beleuchtet, fällt das Licht unter steilen Winkeln auf die Fahrbahn. Bei Beleuchtung mit Kfz-Scheinwerfern fällt das Licht dagegen sehr streifend, unter kleinen Winkeln, auf die Fahrbahn. Wegen der Winkelabhängigkeit von q unterscheiden sich die für streifende Winkel geltenden q -Werte von den bisher besprochenen q_0 -Werten. Bei feuchter oder nasser Oberfläche verändern sich die Reflexionseigenschaften weiter; i.a. wird weniger Licht zum Fahrer zurückreflektiert, während die Intensität des vom Fahrer weggespiegelten Lichts ansteigt. Die Reflexionseigenschaften von trockenen Fahrbahnoberflächen hat WAMBSGANß [63] gemessen, SCHMIDT-CLAUSEN und SCHWENKSCHUSTER [64] haben trockene und nasse Fahrbahnoberflächen untersucht. In diesen Untersuchungen werden Leuchtdichtekoeffizienten R_R für die Rückwärtsreflexion (in Richtung anleuchtendes Kfz) und für die Vorwärtsreflexion R_V (Maß für das vom Kfz weggespiegelte Licht), Dimension jeweils $\text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$, definiert. Die Ergebnisse von [63] und [64] lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Trockene Fahrbahnoberflächen mit hohen q_0 -Werten haben tendenziell auch relativ hohe R_R -Werte. Es besteht ein gewisser, aber nicht sehr ausgeprägter Zusammenhang derart, dass Oberflächen mit hohen R_R -Werten geringe R_V -Werte besitzen. Fahrbahnoberflächen mit künstlichen Aufhellern haben allerdings die höchsten R_R -Werte und die geringsten R_V -Werte; dieses Verhalten ist hinsichtlich der Verkehrssicherheit als am günstigsten zu bezeichnen. Das Reflexionsniveau von R_R liegt etwa eine Zehnerpotenz niedriger als bei q_0 , das Reflexionsniveau von R_V liegt etwa um den Faktor 20 höher als bei q_0 .

Fahrbahnoberflächen mit hohen q_0 -Werten besitzen auch bei Nässe noch die höchsten R_R -Werte; die R_V -Werte streuen allerdings in einem weiten Bereich. Die R_R -Werte liegen nochmals etwa eine Zehnerpotenz niedriger als trockener Straße, während die R_V -Werte um den Faktor 100 - 400, im Extremfall sogar um den Faktor 1000 gegenüber dem trockenen Zustand ansteigen können.

Die Reflexionseigenschaften werden unter den extrem streifenden Winkeln nicht nur von den Reflexionseigenschaften der verwendeten Mineralien beeinflusst, sondern hängen auch stark von der Korngrößenverteilung an der Oberfläche sowie der Rauheit der Straße bzw. der Polierfähigkeit der Mineralien ab. Bei Nässe bildet sich ein Wasserfilm auf der Fahrbahnoberfläche aus, der je nach Makro- und Mikrorauheit zu der extremen Zunahme der R_R -Werte führt.

10.2 Veränderung von Reichweiten, Sichtweiten und Kontrasten bei unbeleuchteten Straßen durch Fahrbahnaufhellung

Beim nächtlichen Fahren nur mit kfz-eigener Beleuchtung sind die Begriffe „Reichweite“ und „Sichtweite“ genau voneinander zu trennen. Unter Reichweite ist die Entfernung zu verstehen, auf die die Scheinwerfer eines Kfz die Straße ausleuchten können. Die Reichweite hängt von der Bauform und den lichttechnischen Eigenschaften der Scheinwerfer ab. Sichtweite oder Erkennbarkeitsweite ist die Entfernung, bei der ein Sehobjekt im Gesichtsfeld des Kraftfahrers gerade noch sichtbar ist. Die Sichtweite wird beeinflusst von der Fahrbahnhelligkeit sowie der Helligkeit, Größe, Position und Bewegung des Sehobjektes.

Der dritte wichtige Begriff ist der Kontrast. Ein Sehobjekt kann nur erkannt werden, wenn es einen gewissen Leuchtdichteunterschied zu seiner Umgebung besitzt. Ist das Sehobjekt heller bzw. dunkler als die Umgebung, handelt es sich um einen Positiv- bzw. Negativkontrast.

Mit steigender Fahrbahnhelligkeit steigt auch die Reichweite. Das bedeutet, dass der Kraftfahrer Informationen über eine größere, vor ihm liegende Strecke erhält; gleichzeitig steigt die Sehleistung an. Das bedeutet in diesem Fall, dass der Schwellenkontrast sinkt, bei der

ein Hindernis gerade wahrgenommen werden kann, bzw. kontrastärmere Hindernisse können leichter erkannt werden.

Helle Sehobjekte besitzen nach übereinstimmender Auffassung in der Fachliteratur i.a. eine größere Sichtweite als dunkle. So stellte SCHMIDT-CLAUSEN [65] fest, dass bei Abblendlicht und trockener Fahrbahn hell gekleidete Fußgänger je nach ihrer Position auf der Fahrbahn auf 40 m - 65 m, dunkel gekleidete dagegen nur auf 10 m - 28 m erkennbar sind. BARTMANN u.a. [66] ermittelten ebenfalls bei Abblendlicht und trockener Fahrbahn für helle Fußgänger auf kurvigen Streckenabschnitten Sichtweiten von 52 m, für dunkle 39 m. Bei geraden Streckenabschnitten betragen die entsprechenden Werte 92 m bzw. 46 m. Leider kleiden sich Fußgänger trotz aller Aufklärungsmaßnahmen überwiegend dunkel, insbesondere im Winterhalbjahr, wenn beim morgendlichen und abendlichen Berufsverkehr besonders viele Fußgänger unterwegs sind. RUWENSTROTH, KULLER und RADDER [67] stellten 1993 fest, dass 58,3 % aller Fußgänger abends dunkle Kleidung trugen. 35,1 % trugen helle, obere und 13,9 % helle, untere Kleidung. Nur 5,6 % aller Fußgänger trugen insgesamt helle Kleidung. Diese Zahlen dürften sich nach der Beobachtung des Gutachters bis heute nicht wesentlich verändert haben. Die meisten Hindernisse, die im Verkehrsraum eine Unfallgefahr bilden, sind ebenfalls dunkel: Herabgefallene Äste, Teile von Kfz (z.B. verlorene Reifenteile, Auspuffs), verlorene Ladung oder Wild. Die meisten Personen, Tiere und Hindernisse werden demnach, mindestens im Nahbereich, im Negativkontrast gegen die Fahrbahn gesehen. Je heller die Fahrbahn ist, umso größer ist der Negativkontrast und umso eher können Personen und Hindernisse erkannt werden.

Dem Thema Sichtweite von Sehobjekten in Abhängigkeit von der Fahrbahnelligkeit bei nur mit Kfz-Scheinwerfern beleuchteten Straßen haben sich leider nur sehr wenige Forscher gewidmet. HELMERS und RUMAR [68] stellten fest, dass Hindernisse auf hellen Fahrbahnoberflächen bei Abblendlicht 10 m bis 20 m höhere Sichtweiten besitzen als auf dunklen; das gilt für trockene und nasse Fahrbahnen. HELMERS und YTTARBOM [69] zeigten, dass sich die Sichtweite von sehr dunklen Hindernissen auf der Fahrbahn je nach Versuchsbedingungen um 30 % bis 100 % vergrößern kann, wenn die Fahrbahnelligkeit verfünffacht wird. Gleichzeitig sinkt die Sichtweite von helleren Hindernissen um 10 % bis 60 %, weil der Positivkontrast mit zunehmender Fahrbahnelligkeit kleiner wird.

Helle Fahrbahndecken verringern demnach nachts sowohl bei trockener als auch bei nasser Fahrbahn das Unfallrisiko.

11 Veränderung der Sichtweiten von Leiteinrichtungen durch Fahrbahnaufhellung

Die visuelle Führung auf Straßen wird durch vertikal angeordnete Leiteinrichtungen - Verkehrszeichen, Kurventafeln, Rückstrahler an Leitpfosten - und horizontal angeordnete Leiteinrichtungen - Fahrbahnmarkierungen - gewährleistet. Vertikale Leiteinrichtungen sind wegen ihrer sehr viel höheren Rückstrahlwerte auf größere Entfernungen erkennbar als Fahrbahnmarkierungen. Fahrbahnmarkierungen bewirken daher die visuelle Führung im Nahbereich, etwa 60 m bis 70 m, während die vertikalen Leiteinrichtungen eine visuelle Führung bis 150 m gewährleisten können. Oft besteht die Besorgnis, dass die Erhöhung der nächtlichen Helligkeit von Fahrbahnoberflächen die Wirksamkeit der Leiteinrichtungen verringern könnte, weil deren Kontrast zur Fahrbahnoberfläche und damit die Sichtweite geringer wird. Diese Befürchtungen sind jedoch unbegründet.

Alle vertikalen Leiteinrichtungen werden nicht vor dem Hintergrund der Fahrbahn, sondern nur vor dem Hintergrund der Umgebung der Straße gesehen. Der Kontrast und die Sichtweite sind damit von der Fahrbahnelligkeit unabhängig. Fahrbahnmarkierungen befinden sich dagegen auf der Fahrbahn; wird deren Helligkeit durch Aufhellungsmaßnahmen erhöht, sinkt bei nicht ortsfest beleuchteten Straßen die Sichtweite der Fahrbahnmarkierungen. Nach Un-

tersuchungen des Gutachters [70] beträgt der Sichtweitenverlust beim Übergang von dunklen zu aufgehellten Fahrbahnoberflächen ca. 4 m bei trockener und ca. 3 m bei feuchter Fahrbahn. Dieser geringe Verlust ist jedoch akzeptabel, da die vertikalen Leiteinrichtungen wie ausgeführt weiterhin die visuelle Führung im Fernbereich ohne Sichtweitenverlust gewährleisten. Bei ortsfest beleuchteten Straßen wird der Kontrast der Fahrbahnmarkierung zur Fahrbahnoberfläche zwar ebenfalls etwas geringer, aber bei diesen Beleuchtungsbedingungen sind die Sichtweiten von Fahrbahnmarkierungen so hoch, dass ein Verlust von einigen wenigen Metern, auch angesichts der niedrigeren innerorts gefahrenen Geschwindigkeiten, ebenfalls hingenommen werden kann; auch hier wird die visuelle Führung überwiegend von den vertikalen Leiteinrichtungen getragen.

12 Fahrbahnaufhellung und nächtliches Unfallgeschehen

Bei Tageslicht beeinflusst die Fahrbahnaufhellung im Wesentlichen das Temperaturverhalten, hat aber praktisch keine Auswirkungen auf das Unfallgeschehen. Nachts ist die Situation völlig anders.

Nachtunfälle sind relativ häufiger und folgenschwerer als Tagunfälle. So ereigneten sich nach LERNER, ALBRECHT und EVERS [71] im Jahr 2002 28 % aller Unfälle mit Personenschaden bei Nacht, der Anteil nachts Getöteter an allen Unfällen betrug 42 %. Dabei wird nach Angaben der BAST nur ca. 19 % der Nachtfahrleistung bei Nacht erbracht. Das höhere nächtliche Unfallrisiko ist auf viele Gründe zurückzuführen. Einige der wichtigsten Ursachen sind: Verschlechterte Seh- und Wahrnehmungsbedingungen, geringere Anzahl von Informationsquellen, verringertes Sehvermögen der Verkehrsteilnehmer, größerer Einfluss von Müdigkeit, Alkohol und Drogen, höheres Geschwindigkeitsniveau und größere Geschwindigkeitsdifferenzen, höherer Zeitanteil nasser Straßen. In diesem Abschnitt soll abgeschätzt werden, welche Unfallrisiken durch Fahrbahnaufhellung reduziert werden können.

Die Aufhellung von beleuchteten Innerortsstraßen geht in der Regel mit der Reduzierung der Lichtleistung einher, so dass das Helligkeitsniveau der Straße und damit auch das Unfallgeschehen im Wesentlichen konstant bleibt. Eine gewisse Verbesserung der Seh- und Wahrnehmungsbedingungen ist allerdings bei nasser Fahrbahn zu erwarten, da aufgehellte Fahrbahnoberflächen tendenziell etwas weniger spiegeln als dunkle (s. Abschnitt 10.1). Deshalb kann durch Aufhellung eine leichte Verbesserung der Erkennbarkeit von Personen oder Hindernissen auf nachts beleuchteten, nassen Straßen erzielt werden.

Merklich verbessert werden die Seh- und Wahrnehmungsbedingungen auf nicht ortsfest beleuchteten Straßen, die also nur durch die Kfz-Scheinwerfer beleuchtet werden. Einmal sind die meist dunklen Sehobjekte - Personen, Tiere oder Hindernisse - wegen ihres erhöhten Kontrastes besser erkennbar. Zum anderen erhöht sich die Reichweite, d.h. die Straße wird über eine größere Entfernung ausgeleuchtet und die visuelle Führung wird verbessert. Die erhöhte Reichweite liefert auch einen gewissen zusätzlichen Beitrag zur besseren Erkennbarkeit von im Straßenraum befindlichen Sehobjekten.

Tabelle 18 zeigt die Anzahl von Nachtunfällen aus dem Jahr 2002 für bestimmte Unfallarten, die durch Aufhellung der Straße evtl. beeinflusst werden können; die Zahlen wurden [71] entnommen.

Folgende Annahmen werden gemacht: Durch die erhöhte Sichtweite von Fußgängern und Hindernissen (in der Statistik gehören Wild- und andere Tiere auf der Fahrbahn zu den Hindernissen) auf aufgehellten Straßen können außerorts 1/3 der Unfälle mit Fußgängern und Hindernissen verhindert werden. Da die meisten Innerortsstraßen beleuchtet sind, kommt die unfallverhindernde Wirkung der Aufhellung auf diesen Straßen nur bei einem viel kleineren Anteil, vielleicht 5 % der Unfälle, zum Tragen. Bei Fahrradunfällen wird bei dieser Statistik nicht nach Inner- und Außerortsunfällen unterschieden. Es wird angenommen, dass das

Verhältnis Innerorts- zu Außerortsunfällen etwa dem der Fußgänger entspricht. Fahrräder müssen mit einer eigenen Beleuchtungsanlage und mit Reflektoren ausgestattet sein; Unfälle durch Aufhellung können nur bei den Fahrradfahrern beeinflusst werden, deren Fahrräder weder Reflektoren noch Beleuchtung haben/bei denen die Beleuchtung nicht eingeschaltet ist. Durch Aufhellung können insgesamt vielleicht 10 % der Außerorts- und 5 % der Innerorts-Fahrradunfälle verhindert werden. Abkommensunfälle können nur dann durch Aufhellwirkung verhindert werden, wenn mangelnde Reichweite/visuelle Führung für einen Unfall verantwortlich war. Dies ist vielleicht bei 5 % der Außerorts-, aber nur bei 1% der Innerortsunfälle der Fall. Multipliziert man diese angenommenen Prozentsätze mit den Zahlen der Tabelle 18, ergibt sich das in Tabelle 19 zusammengestellte Unfallverhütungspotential. Die Gesamtzahl von 2904 evtl. zu verhindernden Unfällen entspricht immerhin knapp 3 % aller Nachtunfälle im Jahr 2002 (100 149 Unfälle).

Unfallart	Zusammenstoß zwischen Fahrzeug und Fußgänger	Unfälle mit Fahrradeteiligung (Mittelwert 2001 - 2003)	Auffahren auf ein Hindernis auf der Fahrbahn	Abkommen von der Fahrbahn
außerorts	1217	13143	786	18813
innerorts	9458		438	6824

Tabelle 18: Jährliche Unfälle 2002 bei einigen Unfallarten, die evtl. durch Aufhellung beeinflusst werden können

Unfallart	Zusammenstoß zwischen Fahrzeug und Fußgänger	Unfälle mit Fahrradeteiligung (Mittelwert 2001 - 2003)	Auffahren auf ein Hindernis auf der Fahrbahn	Abkommen von der Fahrbahn	Summe
Unfälle	879	732	284	1009	2904

Tabelle 19: Jährliche Zahl von Unfällen, die durch Aufhellung von Straßen evtl. verhindert werden könnten

In [71] wird auch die „durchschnittliche Höhe der volkswirtschaftlichen Kosten für Personenschäden durch Straßenverkehrsunfälle“ für die verschiedenen Unfallarten angegeben. Multipliziert man die jeweilige Anzahl von Unfällen in Tabelle 19 mit diesen Kostensätzen, kommt man auf ein monetarisierbares jährliches Unfallverhütungspotential von 255,4 Mio. €.

13 Optimale Leuchtdichtkoeffizienten

Der Gutachter hat seit dem Jahr 1986 in einer Reihe von Veröffentlichungen auf die Vorteile von aufgehellten Fahrbahnoberflächen für die Standfestigkeit von Straßen, den Energieverbrauch und die Verkehrssicherheit hingewiesen (s. beispielsweise [60], [72] bis [74]). In vorliegender Studie versucht, diese Vorteile hinsichtlich Unfallgeschehen, Energieverbrauch und CO₂-Ausstoß auch quantitativ abzuschätzen. Daraus können Empfehlungen zur optimalen Aufhellung für verschiedene Straßensituationen abgeleitet werden. Da eine hohe Verkehrsbelastung einer Innerortsstraße nicht gleichbedeutend ist mit hohem Beleuchtungsniveau dieser Straße, erfolgen die Empfehlungen einmal in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung zur Erhöhung der Standfestigkeit sowie bei beleuchteten Straßen in Abhängigkeit vom geforderten Beleuchtungsniveau.

13.1 Optimale Leuchtdichtekoeffizienten zur Erhöhung der Standfestigkeit

In Abschnitt 6.4 wurde ausgeführt, dass Spurrinnen nach wie vor ein Verkehrssicherheitsrisiko darstellen. Trotz der zu erwartenden Verbesserung der Standfestigkeit von Asphaltbefestigungen wird dieses Risiko auch in Zukunft bestehen bleiben, weil nach allen Prognosen der Schwerverkehr langfristig zunehmen wird, ebenfalls die Zahl der mit geregelten Katalysatoren ausgestatteten Kfz. Nach den Erfahrungen des ADAC fahren Lkw zunehmend spurbezogen; d.h., mit weniger Lenkausschlag. Das hat die Folge, dass die Spurrinnen zwar schmaler, dafür aber umso tiefer ausgebildet sind. Kommt es zur Einführung der seit einigen Jahren diskutierten „elektronischen Deichsel“ (eine Reihe von Lkw wird elektronisch aneinander gekoppelt, Brems- und Lenkmanöver werden automatisch gesteuert, dadurch kann auch der Abstand zwischen den Lkw verringert werden), wird sich das spurbezogene Fahren weiter erhöhen. Es gibt also genügend Gründe, der Bildung von Spurrinnen auch durch Fahrbahnaufhellung entgegen zu wirken.

13.1.1 Straßen mit hoher Verkehrsbeanspruchung

Straßen mit hoher Verkehrsbeanspruchung sind einer erhöhten Gefahr der Spurrinnenbildung ausgesetzt. Unter diesen Straßen sollen hier verstanden werden alle mehrbahnigen Straßen mit einem DTV von mindestens 50 000 Kfz/24 h und/oder einem Schwerverkehrsanteil am DTV von mindestens 15 %. Zum Schwerverkehr zählen alle Lkw und Busse mit einem zulässigen Gesamtgewicht > 3,5 t. Es wird empfohlen, diese Straßen so aufzuhellen, dass ein $q_0 \geq 0,011 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ erreicht wird.

13.1.2 Straßen mit moderater Verkehrsbeanspruchung

Auch Straßen mit moderater Verkehrsbeanspruchung sind einer gewissen Gefahr der Spurrinnenbildung ausgesetzt. Unter diesen Straßen sollen hier verstanden werden alle einbahnigen Straßen mit einem DTV von mindestens 25 000 Kfz/24 h und/oder einem Schwerverkehrsanteil am DTV von mindestens 15 %. Selbstverständlich wäre es ideal, auch diese Straßen auf $0,11 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ aufzuhellen. Unter dem Gebot der Wirtschaftlichkeit wird jedoch empfohlen, diese Straßen so aufzuhellen, dass ein $q_0 \geq 0,09 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ erreicht wird.

13.1.3 Straßen mit geringer Verkehrsbeanspruchung

Auf Straßen mit geringer Verkehrsbeanspruchung - das sind alle Straßen, die nicht unter die Abschnitte 13.1.1 und 13.1.2 fallen - sind Aufhellungsmaßnahmen zur Verhinderung der Spurrinnenbildung nicht angezeigt. Zur Reduktion der Beleuchtungskosten und CO₂-Emission ist aber eine Aufhellung auch dieser Straßen (s. Abschnitt 13.2) sinnvoll.

13.2 Optimale Leuchtdichtekoeffizienten für ortsfest beleuchtete Straßen

Das Beleuchtungsniveau auf ortsfest beleuchteten Straßen richtet sich nach dem vermuteten Unfallrisiko auf diesen Straßen. Deshalb wird das Beleuchtungsniveau nach [3] und [4] nicht allein durch den DTV bestimmt, sondern durch die Komplexität des Verkehrsgeschehens, das seinerseits je nach Funktion des betrachteten Straßenraumes von vielen weiteren Parametern abhängt: Einige der wichtigsten dieser Parameter sind Art der Haupt- und Nebenbenutzer des Straßenraums (motorisierter Verkehr, langsam fahrende Fahrzeuge, Radfahrer, Fußgänger), Verkehrsmischung Kfz/Radfahrer/Fußgänger, Kreuzungsdichte, Zulässigkeit des Parkens an der Fahrbahn, bauliche Maßnahmen zur Verkehrsberuhigung.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass bei den nachfolgenden Empfehlungen nur die Mehrkosten der Aufhellung gegenüber eingesparten Investitions- und laufenden Beleuchtungs- und Wartungskosten betrachtet wurden (betriebswirtschaftliche Situation), während die volkswirtschaftlichen Vorteile der CO₂-Einsparung nicht berücksichtigt wurden, da diese

z.Zt. nicht sicher quantifiziert werden können und bei Entscheidungsfindungen im Straßenbau nach Kenntnis des Gutachters noch keine Rolle spielen.

13.2.1 Aufhellung von Neubaustraßen

In Abschnitt 8.2 wurde eine Auslegung der Beleuchtung für eine Autobahn/Stadtautobahn oder autobahnähnliche Straße, also einer Straße mit hoher Verkehrsbelastung, behandelt. Nach [4] ist diese Straße mit einer Fahrbahnleuchtdichte von 2 cd/m^2 (Wartungswert) auszustatten. Ähnlich hohe Leuchtdichten ($1,5 \text{ cd/m}^2$) werden nur für innerstädtische Hauptstraßen oder Geschäftsstraßen gefordert, weil das Unfallrisiko wegen der im Abschnitt 13.2 genannten, Unfälle beeinflussenden Parameter, mindestens so hoch ist wie auf einer Stadtautobahn. Andere Straßen, bei denen das Unfallrisiko v.a. wegen der geringeren Geschwindigkeiten und der geringeren Verkehrsdichten kleiner ist, z.B. Anlieger und Sammelstraßen, sind mit einer Leuchtdichte von $0,3$ bis $0,75 \text{ cd/m}^2$ (Wartungswert) zu versehen. In Abschnitt 8.4.2 wurde ermittelt, dass auf Neubaustrecken die eingesparten Installations- und Beleuchtungskosten bereits im ersten Jahr höher sind als die Mehrkosten für die Aufhellung. Auf allen Neubaustrecken, bei denen nach [3] und [4] Fahrbahnleuchtdichten von mindestens $0,75 \text{ cd/m}^2$ verlangt werden, ist daher eine Fahrbahnaufhellung auf $0,11 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ empfehlenswert. Bei Straßen, die nur mit einem Leuchtdichteniveau von $0,3$ bis $0,5 \text{ cd/m}^2$ (oder einem vergleichbaren Beleuchtungsstärkeniveau) ausgestattet werden müssen, ist eine Aufhellung auf $0,07$ bis $0,09 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ empfehlenswert. Diese Straßen dienen vorwiegend dem Fußgänger- und Radverkehr, bei denen es nicht nur auf eine Mindestleuchtdichte der Fahrbahn ankommt, sondern bei denen auch ein Mindestwert der horizontalen oder halbzyklischen Beleuchtungsstärke nicht unterschritten werden darf, damit z.B. ein Passant die Gesichter entgegenkommender Personen erkennen kann. Rechnerisch ist zwar auch hier eine Aufhellung auf $0,11 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ günstig, darunter würde aber die Gesichtserkennbarkeit zu stark leiden. Es wird darauf hingewiesen, dass eine Aufhellung von Straßen, die nach dem Kriterium Beleuchtungsstärke ausgelegt sind (Anliegerstraßen), lichttechnisch sinnvoll ist, aber keine erhöhte Wirtschaftlichkeit und Energieeinsparung nach sich zieht.

13.2.2 Nachträgliche Aufhellung von Straßen

Hier amortisieren sich die Mehrkosten nicht bereits innerhalb eines Jahres nach Aufhellung. Für eine Straße mit einem installierten Leuchtdichteniveau von 2 cd/m^2 beträgt nach den Tabellen 14 bis 16 die Amortisationszeit (ohne Kapitaldienst) 3 bis 5 Jahre. Für das Leuchtdichteniveau von innerstädtischen Hauptstraßen amortisiert sich eine Aufhellung innerhalb von 3,3 bis 5,4 Jahren. Für das Leuchtdichteniveau von $0,75 \text{ cd/m}^2$ wurden Amortisationszeiten von 6 bis 11 Jahren ermittelt. In allen Fällen ist die Amortisationszeit für $q_0 = 0,11 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ am kürzesten. Die nachträgliche Aufhellung von Straßen, die mit einem Leuchtdichteniveau von $1,5$ bis 2 cd/m^2 betrieben werden, ist daher empfehlenswert; sinnvoll ist wegen der kürzesten Amortisationszeit nur eine Aufhellung auf $0,11 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$. Alle anderen Straßen sollten, wenn eine Aufhellung ins Auge gefasst wird, auf $0,09 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ aufgehellt werden.

13.3 Optimale Leuchtdichtekoeffizienten für nicht ortsfest beleuchtete Straßen

In Abschnitt 12 war eine Zahl von ca. 2900 Nachtunfällen auf nicht ortsfest beleuchteten Straßen ermittelt worden, die durch Aufhellung verhindert werden könnte. Dem entspräche eine Einsparung von ca. 255 Mio. € volkswirtschaftlicher Kosten. In Abschnitt 13.1 waren optimale Leuchtdichtefaktoren zur Verhinderung von Spurrinnenbildung in Abhängigkeit vom DTV und des Schwerverkehrsanteils am DTV empfohlen worden. Der Anteil des Verkehrsaufkommens in der Nacht am DTV ist zwar nicht konstant, gleiches gilt für den SV-Anteil; dennoch können diese beiden Parameter als wesentliche Einflussgrößen sowohl für das gesamte auch für das nächtliche Unfallrisiko auf dem entsprechenden Streckenabschnitt ange-

sehen werden. Deshalb können für die Bedingungen des Fahrens auf nachts nicht ortsfest beleuchteten Straßen die gleichen Leuchtdichtkoeffizienten in Abhängigkeit von DTV und SV-Anteil empfohlen werden, die in Abschnitt 13.1 zur Verhinderung von Spurrinnen genannt worden sind.

13.4 Optimale Leuchtdichtkoeffizienten für Tunnel

Für alle neuen Tunnel als auch bei Erneuerung der Fahrbahndeckschicht in bestehenden Tunneln wird eine Aufhellung der Einsichts- und Übergangsstrecke auf $0,11 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ empfohlen, die die mit Abstand wirtschaftlichste Lösung darstellt. Bei neuen Tunneln übersteigen die eingesparten Investitionskosten bei weitem die Mehrkosten für die Aufhellung. Selbst bei nachträglicher Aufhellung amortisieren sich die Aufhellungskosten innerhalb einiger Monate.

14 Zusammenfassung

Durch Verwendung von natürlichen und/oder künstlichen Aufhellungsgesteinen im Mineralstoffgemisch kann der Leuchtdichtkoeffizient q_0 von sonst dunklen Asphaltbefestigungen auf bis zu ca. $0,11 \text{ cd}/(\text{lx} \cdot \text{m}^2)$ angehoben werden. Eine noch höhere Aufhellung kann mit hellen Bitumina erzielt werden; diese Art der Aufhellung ist jedoch unwirtschaftlich.

Durch Aufhellung von Asphaltfahrbahnen ist eine Reduzierung der Oberflächentemperatur von bis zu $8 \text{ }^\circ\text{C}$ möglich, die auch eine Temperaturerniedrigung in tieferen Schichten der Asphaltbefestigung bewirkt. Dadurch sinken die Verformungsgefahr und die Neigung zur Spurrinnenbildung. Die Zahl der Unfälle, die durch Spurrinnen verursacht werden, ist vermutlich deutlich höher als aus der amtlichen Unfallstatistik ablesbar. Diese Unfallzahl kann durch aufgehellte Asphaltbefestigungen verringert werden.

Bei längeren Hitzeperioden bilden sich insbesondere in Innenstädten großer Städte sogenannte Hitzeinseln aus, in denen die Lufttemperatur $2 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $10 \text{ }^\circ\text{C}$ über der ländlichen Umgebung liegt. Hohe Temperaturen sind gesundheitsschädlich, verringern die Leistungsfähigkeit und erhöhen das Unfallrisiko. Die Aufhellung innerstädtischer Asphaltstraßen ist geeignet, den städtischen Hitzeinseleffekt zu reduzieren.

Der Energieaufwand für die Straßenbeleuchtung verhält sich reziprok zur Fahrbahnhelligkeit. In Deutschland wird nur ein Teil des kommunalen Straßennetzes aufgehellt; würde auch der dunkle Teil des Straßennetzes auf ein Niveau von $q_0 = 0,075$ bis $0,11 \text{ cd}/\text{lx} \cdot \text{m}^2$ aufgehellt, könnten Beleuchtungskosten von ca. 173 Mio. € bis 287 Mio. € eingespart werden. Beim Neubau von Straßen sind die Kostenreduzierungen durch die eingesparten Lichtpunkte bereits im ersten Jahr nach Neubau des Straßenabschnittes größer als die Mehrkosten durch die Aufhellung. Bei nachträglicher Aufhellung amortisieren sich die Mehrkosten innerhalb der Nutzungsdauer der Asphaltdeckschicht.

Eine Aufhellung des ortsfest beleuchteten Straßennetzes auf $q_0 = 0,075$ bis $0,11 \text{ cd}/\text{lx} \cdot \text{m}^2$ würde den CO_2 -Ausstoß um ca. 0,45 Mio. t bis 0,95 Mio. t verringern. Der Energieaufwand für das Brennen von Flint zu künstlichen Aufhellern ist dabei berücksichtigt.

Ein noch höherer Einspareffekt als bei der Straßenbeleuchtung besteht bei der Tunnelbeleuchtung. Selbst bei nachträglicher Aufhellung der Einsichts- und Übergangsstrecke mit natürlichen und künstlichen Aufhellern amortisieren sich die Mehrkosten in wenigen Monaten. In Deutschland sind die Einsichts- und Übergangsstrecken von ca. 63 % aller Straßentunnel nicht aufgehellt; würden auch diese aufgehellt, könnten ca. 13,5 Mio. € Beleuchtungskosten und zusätzliche Wartungskosten sowie ca. 34 400 t CO_2 eingespart werden.

Aufgehellte Fahrbahnoberflächen erhöhen die Reichweite (Ausleuchtung der Straße) und in vielen Fällen die Sichtweite von Personen, Tieren und Hindernissen auf der Fahrbahn, da

diese Sehobjekte überwiegend dunkler sind als die Fahrbahn und sich bei Aufhellung der Negativkontrast verbessert. Durch die verbesserte Erkennbarkeit kann das nächtliche Unfallrisiko verringert werden; nach einer vorsichtigen Abschätzung können durch Fahrbahnaufhellung ca. 2900 Nachtunfälle, das sind fast 3 % aller Nachtunfälle, verhindert werden. Das monetarisierbare Unfallverhütungspotential beträgt ca. 255 Mio. €.

15 Empfehlungen

Verhinderung von Spurrinnenunfällen: Alle Straßen mit hoher Verkehrsbeanspruchung (mehrbahnige Straßen mit DTV $\geq 50\,000$ Kfz/24 h und/oder Schwerverkehrsanteil $\geq 15\%$) sollten mit einem $q_0 = 0,11$ cd/(m².lx) aufgehellt werden. Alle Straßen mit moderater Verkehrsbeanspruchung (einbahnige Straßen mit DTV $\geq 25\,000$ Kfz/24 h und/oder Schwerverkehrsanteil $> 15\%$) sollten mit einem $q_0 = 0,09$ cd/(m².lx) versehen werden.

Ortsfest beleuchtete Straßen: Neubastraßen, die mit einer Fahrbahnleuchtdichte von mindestens 0,75 cd/m² ausgestattet werden müssen, sollten mit einem $q_0 = 0,11$ cd/(m².lx) aufgehellt werden. Bei Neubastraßen mit einem Leuchtdichteniveau von 0,3 - 0,5 cd/m² ist eine Aufhellung auf 0,07 - 0,09 cd/(lx.m²) empfehlenswert. Wird bei bestehenden Straßen eine Aufhellung ins Auge gefasst, ist bei Straßen mit einem Leuchtdichteniveau von 1,5 - 2 cd/m² nur eine Aufhellung auf 0,11 cd/(m².lx) empfehlenswert, bei anderen Straßen eine Aufhellung auf 0,09 cd/(m².lx).

Nicht ortsfest beleuchtete Straßen: Es werden die gleichen Werte wie zur Verhinderung von Spurrinnen empfohlen.

Tunnel: Es wird grundsätzlich eine Aufhellung der Einsichts- und Übergangsstrecke auf 0,11 cd/(m².lx) empfohlen.

U. Muschke

Literatur

- 1 Eckert, M. und Meseberg, H. H.: Straßenbeleuchtung und Sicherheit. Publikation der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft (LiTG) Nr. 17:1998, Berlin 1998
- 2: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin: Stadtbild Berlin Lichtkonzept, Februar 2011
- 3: DIN 5044, Ausgabe August 1982: Ortsfeste Verkehrsbeleuchtung. Teil 2: Beleuchtung von Straßen für den Kraftfahrzeugverkehr, Berechnung und Messung
- 4: CIE-Publikation 66 1984: Road Surfaces and Lighting
- 5: DIN 13201-1, Ausgabe 11/2005: Straßenbeleuchtung - Auswahl der Beleuchtungsklassen
- 6: DIN EN 13201-2, Ausgabe 4/2004: Straßenbeleuchtung - Gütemerkmale
- 7: Range, H.: Ein Straßenreflektometer zur vereinfachten Bestimmung der lichttechnische Eigenschaften von Fahrbahnbelägen. Lichttechnik 25(1973), S. 389
- 8: Range, H.: Helle bituminöse Deckschichten. Licht 38(1986), S. 224
- 9: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 1986: Anleitung zur Prüfung lichttechnischer Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen und Mineralstoffen mit dem Straßenreflektometer
- 10: FGSV-Arbeitspapier Reflexionseigenschaften von Gesteinskörnungen und Oberflächen aus Asphalt. Entwurf 2/2009
- 11: Norddeutsche Expertengruppe für aufgehellte Asphaltdeckschichten: Praktische Hinweise für den Bau von hellen Asphaltdeckschichten. Broschüre 2004, zu beziehen bei Norddeutsche Asphaltmischwerke, Niederlassung Hamburger Asphaltmischwerke
- 12: Blattner, P und Dudli, H.: Mobiles Fahrbahnoberflächenreflektometer. Tagung „Licht 2006“ Bern 2006
- 13: Luisi, F.: Charakterisierung von Straßenbelägen mittels mobilen Gonio-Reflektometern. Tagung „Licht 2006“ Bern 2006
- 14: Schreuder, D.: In situ-Messung der Reflexionseigenschaften von Straßenbelägen. Tagung „Licht 2006“ Bern 2006
- 15: de Boer, J.; Panhas, B.; Reith, A.; Otto, A. und Wellner, F.: 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. Fraunhofer-Institut Bauphysik Stuttgart, IBP-Bericht WB145/2009
- 16: Damm, K.: Helle Asphaltdeckschichten für den Elbtunnel. Bericht, herausgegeben vom Bundesverband unabhängiger Institute für bautechnische Prüfungen e.V. (bup), Hannover, Sommer 1994
- 17: Behörde für Bau und Verkehr Hamburg: Aufgehellte Asphaltdeckschichten. Hamburg, August 2002 (nicht veröffentlicht)
- 18: Meseberg, H.-H.: Beleuchtungsscheck der bayerischen Autobahntunnel. Schlussbericht Juli 2007, erarbeitet für die Oberste Bayerische Baubehörde (nicht veröffentlicht)
- 19: Asphaltlabor Wahlstedt: Lichttechnische Messungen an Bohrkernen im Originalzustand sowie im nachbehandelten Zustand durch Sandstrahlen, lichttechnische Messungen an im Labor hergestellten Probekörpern und Mischgutuntersuchungen. Untersuchungsbefund 2178/05 vom 4. 5. 2005
- 20: Carraro, U.; Becker, E.; Eckert, M und Roßberg, K.: Einfluß des spektralen Absorptions- und Reflexionsgrades von Mineralstoffen auf die Wärmebilanz von Fahrbahnbefestigungen. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben 04.178/1997 des Bundesministeriums für Verkehr, Dresden 1997
- 21: Roßberg, K.; Eckert, M.; Carraro, U.; Bader, E.: Verwendung von Gesteinsbaustoffen für die Verbesserung der Wärmebilanz von Asphalt-Deckschichten. Straße und Autobahn 11/2000, S. 699

- 22: Chakar, L.: Optimierung des Verformungswiderstandes von Splittmastikasphalt durch Modifikation mit Elektroofenschlacke. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Veröffentlichungen des Institutes für Straßen- und Eisenbahnwesen, Band 58 (Dissertation)
- 23: v. Stosch, H.-J.: Einfluß des Aufhellungsgrades auf den Verformungswiderstand von bituminösen Deckschichten bei Wärmeeinstrahlung. Bitumen 30(1968), S: 197
- 24: Pohlmann, P.: Helle Asphaltstraßen verbessern deren Verformungsresistenz. Bitumen 58(1996), S. 2
- 25: Schulte, W.: Analyse des Temperaturgeschehens im Straßenoberbau und dessen Einfluß auf Ergebnisse von Einsenkungsmessungen nach Benkelman. H. 423 der Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des Bundesministeriums für Verkehr, Bonn 1984
- 26: Kayser, S. und Wellner, F.: Grundlagen zur Erfassung der Temperaturbedingungen für eine analytische Bemessung von Asphaltbefestigungen. H. 996 der Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn 2008
- 27: Schäfer, P.: Temperaturverhalten von Fahrbahnbelägen aus Asphalt im Stadtgebiet bei Verwendung unterschiedlicher Gesteinsarten im Splittbereich. Bitumen 62(2000), S. 50
- 28: Müller, R.; Pirskawetz, S. und Weise, F.: Einfluss der Wärmeabstrahlung, -leitfähigkeit und -kapazität von Mineralstoffen auf die Energiebilanz von Fahrbahnbefestigungen. H. 968 der Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn 2007
- 29: Halfmann, U.: Hitzeschäden an bituminösen Fahrbahnbefestigungen. Erfahrungen des Sommers 1976. Straße und Autobahn 28(1977), S. 48
- 30: Kirk, J. M.: Berechnung der Temperaturhöchstwerte in Asphalt. Bitumen 57(1995), S. 6
- 31: Kallas, B. F.: Asphalt Pavement Temperatures, Highway Research Record 1150, 1966
- 32: Eisenmann, J. und Leykauf, G.: Temperaturuntersuchungen an Beton- und Schwarzdeckenfeldern mit und ohne Wärmedämmschichten. H. 112 der Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des Bundesministeriums für Verkehr, Bonn 1971
- 33: Blumer, M.: Zum Verformungsverhalten bituminöser Beläge und Tragschichten. Bitumen 37(1975), S. 73
- 34: Arand, W.: Langjährig bewährte Asphaltstraßen unter schwerster Belastung. Broschüre des Deutschen Asphaltinstitutes, Bonn 1995, S. 4
- 35: OECD: Charakteristische Eigenschaften von Straßendecken: Wechselwirkung und Optimierung. H. 446 der Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des Bundesministeriums für Verkehr, Bonn 1985
- 36: Oertelt, S.; Maerschalk, G. und Krause, G.: Verbesserung der praxisnahen Bewertung des Straßenzustandes. H. 950 der Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn 2007
- 37: Statistisches Bundesamt, www.destatis.de: Verkehr, Verkehrsunfälle. Fachserie 8 Reihe 7, 2003 bis 2009
- 38: FGSV: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen, Ausgabe 2006 (ZTV ZEB-StB 06)
- 39: United States Environmental Protection Agency (EPA): www.epa.gov/heatisld/index.htm
- 40: Heat Island Group: <http://eetd.lbl.gov/HeatIsland/>
- 41: Fox-Kämper, R.: Ansatzpunkte für Klimaschutz und Klimafolgenanpassung in der Stadtentwicklung. Vortrag 15. 12. 2009 Düsseldorf
- 42: Handbuch Stadtklima des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes NRW, Januar 2011
- 43: Kommunen in Wandel - Wege zur Anpassung (Modellvorhaben Klamis). RegionalverbandFrankfurtRheinMain März 2011

- 44: Regionaler Klimaatlas Deutschland
- 45: Akbari, H.: Global Cooling: Increasing World-wide Urban Albedos to Offset CO₂. Fifth Annual California Climate Change Conference, Sacramento 9. 9. 2008
- 46: Akbari, H.: Cooling the Cities to Reduce Energy. Physics Colloquium Series, California State University, Sacramento, Department of Physics & Astronomy, Fall 2005
- 47: Bruns-Berentelg, J.: Nachhaltige innere Stadtentwicklung HafenCity Hamburg. Vortrag Bremer Symposium Nachhaltiges Bauen, 6. 11. 2008
- 48: Yilmaz, H.; Toy, S, Irmak, M. A.; Yilmaz, S. und Bulut, Y.: Determination of temperature differences between asphalt concrete, soil and grass surfaces in the City of Erzurum. Atmosfera 21(2) (2008) S. 135
- 49: dpa-Meldung, zitiert nach der Zeitung Hannoversche Allgemeine vom 31. 5. 2011: Berlin nähert sich tropischem Klima
- 50: DIN EN 13201-3, Ausgabe 4/2004: Straßenbeleuchtung - Berechnung der Gütemerkmale
- 51: CIE-Publikation (Entwurf): Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic. Wien, April 2009
- 52: FGSV: Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil Querschnitte, Ausgabe 1996(RAS-Q 96)
- 53: Øbro, P.: Aufgehellte Asphaltdeckschichten. Die Energiekosten senken mit sicheren, hellen und griffigen Straßen. Dokumentation AF Hansen & Henneberg 2009 (nicht veröffentlicht)
- 54: Knudsen, B.: Helle oder dunkle Straßendecken? Straßenverkehrstechnik 13(1969), S. 104
- 55: Prevot, M.: Incidence de la nature des revêtements sur le coût des installations d'éclairage. La technique routière 22(1977), S. 1
- 56: Scholz, I. und v. Stosch, H.-J.: Wechselbeziehungen zwischen dem Unfallgeschehen, der ortsfesten Straßenbeleuchtung und den Reflexionseigenschaften der bituminösen Deckschicht. Bitumen 40(1978), S. 148
- 57: Blessmann, W. und Kirchner, S.: Energieeffektive Straßenbeleuchtung durch Anwendung aufgehellter bituminöser Verschleißschichten und Oberflächenbehandlungen. Die Straße 20(1980), S. 276
- 58: Waldorf, J.: (Geschäftsführer der Fachverbände Elektroleuchten und elektrische Lampen im ZVEI-Fachverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.) Mündliche Mitteilung 7/2009
- 59: Eberbach, K.: Gutachterliche Stellungnahme zur Wirtschaftlichkeit stark aufgehellter Deckschichten. Versuchsstrecke in der Weströhre des Elbtunnels BAB A 7 Hamburg 1994. (nicht veröffentlicht)
- 60: Meseberg, H.-H.: Zur lichttechnischen Relevanz der Gestaltung von Tunnelportalen und Fahrbahnoberflächen in Tunneln. „Oldenburger Tunneltage 2007“, 18./19. 10. 2007 Oldenburg/O., Tagungsband
- 61: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 1996: Dokumentation von Straßentunneln in Deutschland
- 62: Eberbach, K.: Mündliche Mitteilung 17. 8. 2009
- 63: Wambsganß, H.: Bestimmung und messtechnische Erfassung des Reflexionsverhaltens von Fahrbahnoberflächen bei kfz-eigener Beleuchtung. H. 699 der Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des Bundesministeriums für Verkehr, Bonn 1995
- 64: Schmidt-Clausen, H.-J. und Schwenkschuster, L.: Einfluss der Helligkeit und des Reflexionsvermögens von nassen Fahrbahnoberflächen auf die Seh- und Wahrnehmungsbedingungen von Kraftfahrern bei Nacht. H. 812 der Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Wohnungswesen, Bonn 2001
- 65: Schmidt-Clausen, H.-J.: Das lichttechnische Gutachten bei Dunkelheitsunfällen. Deutsches Autorecht 1/82, S. 3
- 66: Bartmann, A.; Reiffenrath, D.; Jacobs, A. M.; Leder, H.; Walkowiak, M. und Szymkowiak, A.: Sichtabstand bei Fahrten in der Dunkelheit. Berichte der BASt, H. M 4, Bergisch Gladbach 1993

- 67: Ruwenstroth, G.; Kuller, E. C. und Radder, F.: Sicherheit von Fußgängern außerorts bei eingeschränkten Sichtverhältnissen. Berichte der BASt, H. M 3, Bergisch Gladbach 1993
- 68: Helmers, G und Rumar, K.: Obstacle visibility in rural night driving as related to road surface reflectivity qualities. Transportation research record 502(1074), S. 58
- 69: Helmers, G und Ytterbom, U.: Siktsträcka i halvljus till hinder på torra vägbanor av varierande ljushet (Sichtweiten von Hindernissen bei Abblendlicht als Funktion der Retroreflexion der Fahrbahn). VTI-report 202, Linköping/Schweden 1980
- 70: Meseberg, H.H.: Überprüfung der Erkennbarkeit von Fahrbahnmarkierungen auf aufgehellten Deckschichten. Forschungsberichte der BASt, Bereich Straßenverkehrstechnik, Bergisch Gladbach 1985
- 71: Lerner, M.; Albrecht, M. und Evers, C.: Das Unfallgeschehen bei Nacht. Broschüre der BASt, Bergisch Gladbach 2004
- 72: Meseberg, H.-H. und Schreiber, G.: Die Bedeutung aufgehellter bituminöser Deckschichten und die Messung ihrer lichttechnischen Eigenschaften. Straße und Autobahn, 37(1986), S. 350
- 73: Meseberg, H.-H.: Vorgaben von DIN- und Euronormen und ihre Umsetzung in die Praxis. 1. Fachkongress Straßenbeleuchtung, Wirtschaftlicher Betrieb und Kostenoptimierung des Institute for International Research IIR Deutschland GmbH, Bonn 28./29.1. 2003, Tagungsband
- 74: Meseberg, H.-H.: Aufhellung von Tunneldeckschichten. LiTG-Sondertagung „Aktuelles zur Tunnelbeleuchtung“ Bergisch Gladbach, 22./23. 9. 1999. Tagungsband S. 60