



Aktuelles zu Betonstrassen und zur Verkehrsinfrastruktur
Ausgabe November 2016

update 46

„TunnelHELL“ – Einfluss von Fahrbahnen aus Beton in Tunnelbauwerken: Erhöhung der Sicherheit bei gleichzeitiger Energieeinsparung

Die Verwendung von Betonfahrbahnen im Tunnel führt zu einer verbesserten Be- und Ausleuchtung der Fahrbahnoberfläche sowie der Tunnelwand. Durch die guten lichttechnischen Eigenschaften des Betons, insbesondere bei Verwendung von aufhellendem Titanoxid als Zusatzstoff, und der daraus resultierenden erhöhten Helligkeit von Fahrbahn und Tunnelwand, lässt sich das subjektive Sicherheitsgefühl steigern und der Energieaufwand für die Beleuchtung senken.

„TunnelHELL“ – Einfluss von Fahrbahnen aus Beton in Tunnelbauwerken: Erhöhung der Sicherheit bei gleichzeitiger Energieeinsparung

DI Gerald Maier, DI Dr. Martin Peyerl, DI Dr. Stefan Krispel (Smart Minerals GmbH Wien)

1 Einleitung Problemstellung und Ziele

Tunnel und Unterflurtrassen sind besonders in gebirgigen Regionen für die Infrastruktur unverzichtbar und stellen daher bedeutende Bauwerke im Straßenverkehr dar. Neben den Vorteilen, wie der Verkürzung der Fahrzeit und -strecke, stellen Tunnel aber hohe sicherheitstechnische Anforderungen an den Straßenerhalter bzw. Tunnelbetreiber. Eine entsprechende Be- und Ausleuchtung des Verkehrsraums leistet dabei sowohl im Hinblick auf die Sicherheit des Einzelnen als auch auf die Betriebskosten des Tunnels den größten Beitrag. Helligkeit und Lichtverteilung im Tunnel werden nicht nur durch die Art bzw. Leistung der Beleuchtung, sondern auch zu einem großen Teil durch die optischen Oberflächeneigenschaften von Fahrbahn und Tunnelwand (z. B. Helligkeit, Reflexionsvermögen und Verschmutzungsgrad) beeinflusst. Eine entsprechende Wahl von Baustoffen hinsichtlich ihrer Oberflächenhelligkeit und ihres Reflexionsvermögens ist daher von wesentlicher Bedeutung.

Ziel des von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft FFG geförderten Forschungsprojekts „TunnelHELL“ war die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Baustoffe für die Fahrbahn (Asphalt, Betondecke, Betondecke aufgehellt) und für die Tunnelwand (Tunnelanstriche mit unterschiedlichen Verschmutzungsgraden, grauer und weißer Spritzbeton) auf die Beleuchtungsqualität und den Energieverbrauch von Tunnelbauwerken. Zur Erzielung vergleichbarer Ergebnisse wurden die Untersuchungen unter gleichbleibenden Rahmenbedingungen an einem bestehenden Versuchstunnel durchgeführt. Dadurch konnten Einflüsse aus tunnelspezifischen Parametern wie z. B. Geometrie und Beleuchtungsanordnung auf das Ergebnis ausgeschlossen werden. Zusätzlich wurden die Auswirkungen der optimalen Oberflächenwahl auch optisch dargestellt. Dem Planer von zukünftigen Tunnelbauwerken soll

somit ermöglicht werden, eine verbesserte Beleuchtungssituation in Tunnel und Unterflurtrassen zu schaffen und so einen Beitrag zur Verstärkung des subjektiven Sicherheitsgefühls für den einzelnen Verkehrsteilnehmer zu leisten.

2 Projektumsetzung

Für die Simulation unterschiedlicher Verschmutzungszustände von Tunnelwänden erfolgte die Messung von Hellbezugswerte an verschiedenen, im Verkehr befindlichen, Tunnelbauwerken. Hierzu wurden drei verschmutzte Tunnelbauwerke unterschiedlichen Alters ausgewählt und die lichttechnischen Kennwerte vor und nach einer Tunnelwaschung bestimmt. Die Erfassung erfolgte an 5 repräsentativen Stellen mit je 10 Einzelmessungen. Abbildung 1 zeigt exemplarisch die Bestimmung der Hellbezugswerte an einer verschmutzten Tunneloberfläche mit einem Spectrophotometer.

Auf Basis der ermittelten Helligkeitseigenschaften erfolgte anschließend die Zuordnung der ermittelten Hellbezugswerte bzw. lichttechnischen Kennwerte zu Anstrichen mit gleichen lichttechnischen Eigenschaften in einem Farblabor. Dadurch war es möglich, unterschiedliche Verschmutzungszustände (Abnahmezustand, leicht verschmutzt, stark verschmutzt, gereinigt) durch Einfärben der Innenschale des Versuchstunnels zu simulieren. Zusätzlich wurden mit grauen und weißen Spritzmörtel alternative Innenschalenbeschichtungen für die Untersuchungen herangezogen.



Abbildung 1: Messung der Hellbezugswerte an 5 verschiedenen Stellen vor und nach der Tunnelwäsche (Quelle: SMG)



Abbildung 2: Ursprünglicher Versuchstunnel (Quelle: VÖZFI)

2.1 Versuchsbedingungen und messtechnische Erfassung

Abbildung 2 zeigt den Versuchstunnel im ursprünglichen Zustand mit einem Durchmesser von etwa 6 m und einer Länge von etwa 20 m. Nach der Adaptierung des Tunnels konnten auf dessen Innenseite die unterschiedlichen Oberflächensysteme appliziert werden.

In Abbildung 3 sind typische Beispiele einer Tunnelbeschichtung mit unterschiedlich starker Verschmutzung sowie eines applizierten weißen Spritzmörtels zu sehen.

Als Fahrbahnbelag wurde Asphalt, herkömmlicher Fahrbahnbeton in Waschbetonbauweise und besonders heller Waschbeton ausgewählt. Aus der Kombination der Fahrbahnbeläge, der Tunnelanstrichsysteme und des Verschmutzungsgrads (sauber/schmutzig) ergeben sich in Summe 36 unterschiedliche Beurteilungszustände.



Abbildung 3: Auswahl von Tunnelanstrichsystemen mit unterschiedlicher Verschmutzung (oben und Mitte) sowie einem weißen Spritzmörtel (unten) (Quelle: VÖZFI)

Die Beurteilung der jeweiligen Zustände erfolgte mit drei, in der Beleuchtung von Straßenbauwerken verwendeten, Lampentypen: Metallhalogenlampen (HQL-Lampen), Natriumdampf-Lampen (NVA-Lampen) und Leuchtdioden-Lampen (LED-Lampen). Die Lampen mit unterschiedlichen Abmessungen wurden mittig im Versuchstunnel situiert und konnten so verschoben werden, dass eine Fixierung an exakt der gleichen Position (Höhe und Lage) möglich war. Zur Messung der Leuchtdichte der Fahrbahnoberfläche wurde eine Leuchtdichtekamera in 60 m Entfernung von der Leuchte in einer Höhe von 1,5 m montiert. Diese erste Kalibrierung erfolgte bei Nacht. Die weiteren Messungen wurden dann bei verdunkelten Portalen auch in geringerem Abstand von der Tunnelleuchte im Tunnel selbst durchgeführt.

Einen weiteren wichtigen Punkt stellte die Einbeziehung der Leuchtdichte der Wand dar. Derzeit wird in manchen europäischen Regelwerken das Verhältnis „Leuchtdichte Fahrbahn“ zu „Leuchtdichte Wand“ berücksichtigt. Dadurch kann beispielsweise das Beleuchtungsniveau bei einer höheren Leuchtdichte der Wand abgesenkt werden.^{[1][2]} Das österreichische Regelwerk beinhaltet hierzu keine konkreten Vorschläge^[3].

Die Steuerung der unterschiedlichen Lampentypen erfolgte über einen speziell adaptierten Steuerschrank, der es ermöglichte, die Beleuchtungskörper so zu dimmen, dass an einem definierten Punkt der Fahrbahnoberfläche immer die gleiche Leuchtdichte vorherrschte. Darüber hinaus wurde am Steuerschrank die im gedimmten Zustand benötigte Energie ermittelt. Der eingesetzte Leuchtdichtesensor der Firma Electric Special bietet die Möglichkeit, mehrere Leuchtdichten (z. B. Tunnelwand und Fahrbahn) miteinander zu vergleichen und statistisch auszuwerten. Abbildung 4 zeigt exemplarisch Leuchtdichteverteilungen gemessen an Tunnelbauwerken mit unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit der Tunnelwand.

Durch die exakt gleiche Oberflächengeometrie des Versuchstunnels ist es möglich, alle Ergebnisse direkt zu vergleichen und so fundierte Aussagen über Oberflächeneigenschaften und deren Auswirkung zu treffen.



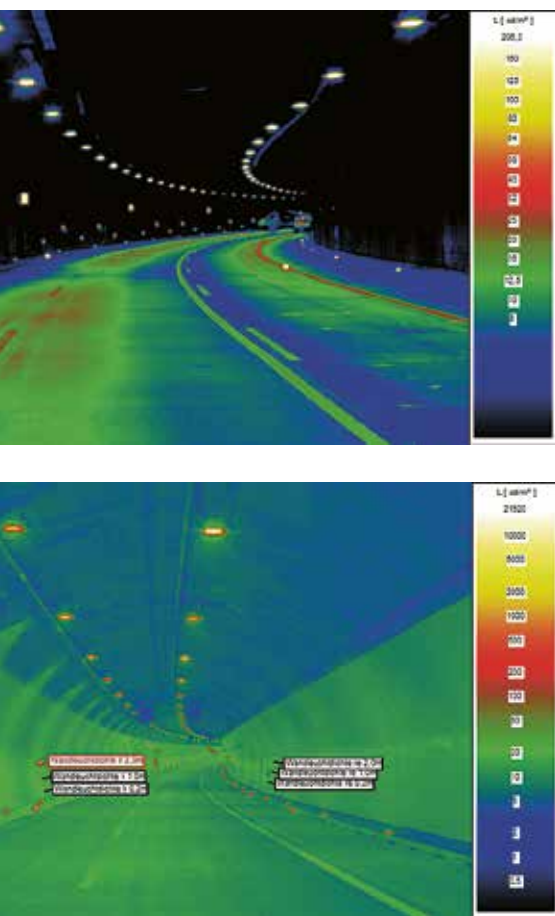


Abbildung 4: Beleuchtungsbeispiele mit sehr geringen (oben) und hohen Leuchtdichtewerten (unten) an der Wand (Quelle: Broll lighting systems)

Tabelle 1: Unterschiedliche Beurteilungszustände

Innenschalen-beurteilungszustand	Seitenwände	Oberflächenzustand	Tunnelfirste
1	Tunnelanstrich	Abnahmezustand	verschmutzt
2	Tunnelanstrich	Abnahmezustand	gereinigt
3	Tunnelanstrich	leicht verschmutzt	verschmutzt
4	Tunnelanstrich	leicht verschmutzt	gereinigt
5	Tunnelanstrich	gereinigt	verschmutzt
6	Tunnelanstrich	gereinigt	gereinigt
7	Spritzmörtel grau	Abnahmezustand	verschmutzt
8	Spritzmörtel grau	Abnahmezustand	gereinigt
9	Spritzmörtel weiß	Abnahmezustand	verschmutzt
10	Spritzmörtel weiß	Abnahmezustand	gereinigt
11	Tunnelanstrich	stark verschmutzt	verschmutzt
12	Tunnelanstrich	stark verschmutzt	gereinigt
Fahrbahn-beurteilungszustand	Fahrbahn	Oberflächenzustand	Tunnelfirste
1	Asphalt	Abnahmezustand ¹⁾	–
2	Waschbeton normal	Abnahmezustand	–
3	Waschbeton hell	Abnahmezustand	–

¹⁾ Asphalt wurde sandgestrahlt, um den Oberflächenzustand nach etwa 1 Jahr Betrieb zu simulieren (leichte Aufhellung durch Abfahren des Bitumens auf Gesteinskörnung der Fahrbahnoberfläche)



a



b



c



d



e



f



Abbildung 5: Herstellung der Betonoberfläche für den Versuchstunnel

- a: vorbereitete Behelfsschalung 3,2 × 23,4 m
- b: Betonieren von Waschbeton normal (MV101 - Oberbeton F52 GK8 CEMII/B-S 32,5R (DZ) ohne Titanoxid)
- c: Betonieren von Waschbeton hell (MV102 Oberbeton F52 GK8 CEMII/B-S 32,5R (DZ) mit Titanoxid) und Aufbringen des Nachbehandlungsmittels
- d: Schneiden der einzelnen Betonplatten auf Palettengröße (1,2 × 0,8 m)
- e: Lagerung der Platten
- f: fertige Waschbetonoberfläche (Quelle: SMG)

2.2 Herstellung der Betonfahrbahndecke

Die Betonfahrbahnoberfläche für den Versuchstunnel sollte austauschbar und transportabel sein, um die Fahrbahnen im Zuge des Versuchs bei verschiedenen Beurteilungszuständen wechseln zu können. Die Betonoberfläche wurde gemäß den Anforderungen der RVS 08.17.02^[4] als Oberbeton in Waschbetonbauweise hergestellt. Neben der konventionellen Betonfahrbahn (MV101) wurde eine Betonfahrbahn mit aufhellenden Titanoxid-Farbpigmenten hergestellt (MV102). Die Fahrbahn wurde in einer Behelfsschalung auf XPS Platten (2 cm) mit einer Dicke von 8 cm hergestellt. Die Fläche der herzustellenden Fahrbahn betrug etwa 45 m². Anschließend wurde der Zementleim ausgebürstet und die Betonfahrbahn in 72 Platten mit einer Größe von 80 × 130 cm geschnitten und einzeln auf Paletten (80 × 130 cm) gelagert (siehe Abbildung 5).

Die Rezepturen der Mischungsverhältnisse MV101 und MV102 bzw. die Ergebnisse der Frischbetonprüfung gemäß ONR 23303:2010^[5] sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Frischbetonkennwerte der hergestellten Betonfahrbahn		
	Waschbeton herkömmlich (MV 101)	Waschbeton hell (MV 102)
Zementgehalt Lafarge Mannersdorf, CEM II/B-S 42, 5 N, DZ	470 kg/m ³	470 kg/m ³
Luftgehalt lt. Frischbetonprüfung	12,0 %	8,0 %
W/B – Wert lt. Frischbetonprüfung	0,39	0,39
Gesteinskörnung RK 0/1 Transportbeton Schönkirchen	500 kg/m ³	500 kg/m ³
Gesteinskörnung KK 4/8 Alas Solosnica	1200 kg/m ³	1200 kg/m ³
Zusatzmittel 1: Herst. Betontechnik, Duriment LP 100	4,0 kg/m ³	2,1 kg/m ³
Zusatzmittel 2: Herst. Betontechnik Duriment LZF	4,2 kg/m ³	4,2 kg/m ³
Ausbreitmaß, Konsistenz (lt. Frischbetonprüfung)	58 cm	48 cm
Frischbetonrohddichte (lt. Frischbetonprüfung)	2119 kg/m ³	2257 kg/m ³
Zugabe Titanoxid ja/nein	nein	ja – 3% der Zementmasse = 14,1 kg/m ³

2.3 Adaptierung des Versuchstunnel

Um die Versuche unter gleichbleibenden Rahmenbedingungen durchzuführen, wurde ein bei der Firma Junger bereits bestehender Versuchstunnel adaptiert (siehe Abbildung 6a – 6f). Hierfür erfolgte die Asphaltierung des Bodens und der lichtdichte Abschluss der Tunnelportale durch Abmauerung bzw. Verschluss mit einer Holzschalung sowie ein schwarzer Anstrich.

Für die Messungen wurde je nach Beurteilungszustand eine der beiden Betonfahrbahnen verlegt oder die Asphaltoberfläche belassen, die von der Firma Broll zur Verfügung gestellte Beleuchtung installiert und mit der erforderlichen Steuerung ausgestattet. Von der Firma Electric Special erfolgte die Montage von zwei Leuchtdichtesensoren zur Ermittlung der Leuchtdichte an der Tunnelinnenschalenwand sowie an der Fahrbahnoberfläche. Im Rahmen des Probebetriebes wurden Steuerschrank und Regelungstechnik mit den 3 Lampentypen (LED, NAV, HQI) getestet. Die Einstellung erfolgte so, dass grundsätzlich bei allen 3 Lampentypen eine Leuchtdichte von 10 cd/m^2 an der Fahrbahnoberfläche erreicht werden soll.

In Abbildung 7 ist der Ablauf der Vorbereitungsmaßnahmen für die Messungen der jeweiligen Kombinationen von Firstfarbe, Tunnelwand und Fahrbahnoberfläche dargestellt.

Abbildung 6: Versuchstunnel

- a: Ursprünglicher Zustand des Versuchstunnels der Firma Junger
- b: Außenansicht des für das Forschungsprojekt adaptierten Versuchstunnels mit geschlossenem Tunnelportal und Lagerung der Betonfahrbahn vor dem Tunnel
- c: Adaptierter Versuchstunnel mit schwarzem Tunnelportal und Betonfahrbahn
- d: Versuchstunnel mit Asphaltfahrbahn, Tunnelanstrich Abnahme und gestrichener Firste „verschmutzt“
- e/f: Beleuchtungsmessung durch die MA 39 (Quelle: SMG)



a



c



e



b



d



f



a



b



c



d

Abbildung 7: Herstellen der Beurteilungszustände im adaptierten Versuchstunnel
a: Verlegen der Betonfahrbahn
b: Verlegung von Randplatten
c: Installation der Lampen
d: Streichen der Tunnelinnenschale mit Deckenanstrich (Quelle: SMG)



a



b



c



d

2.4 Messungsdurchführung

Im Zuge der Messungen wurden die unterschiedlichen Beurteilungszustände (siehe Tabelle 1) untersucht. Als erster Arbeitsschritt wurden die jeweiligen Oberflächen an den Tunnelwänden durch Applikation der Farben bzw. Materialien hergestellt. Dann wurde die Fahrbahnoberfläche bzw. die Firste des Tunnels an den zu messenden Beurteilungszustand angepasst. In Abbildung 8 ist der Arbeitsablauf dargestellt. Nach abgeschlossener Herstellung eines Beurteilungszustands gemäß Tabelle 1 erfolgte die Montage einer der drei untersuchten Tunnelleuchttypen.

Die Messdurchführung selbst erfolgte im lichtdicht verschlossenen Tunnel. Die Lampen wurden jeweils so eingestellt, dass auf der Fahrbahnoberfläche eine Leuchtdichte von 10 cd/m^2 erreicht wurde. Die Leuchtdichte der Tunnelinnenschalenwand wurde mitgemessen. Nachdem ein konstanter Betrieb sichergestellt war, konnte die Messung abgeschlossen werden und es erfolgte der Lampentausch.

Abbildung 8: Arbeitsvorgänge im Versuchstunnel in Irdning

- a: Für eine Messung vorbereiteter Tunnel
- b: NAV Lampe
- c: Schaltschrank zur Steuerung der Beleuchtung
- d: Messtechnische Einrichtung
(Quelle: SMG)

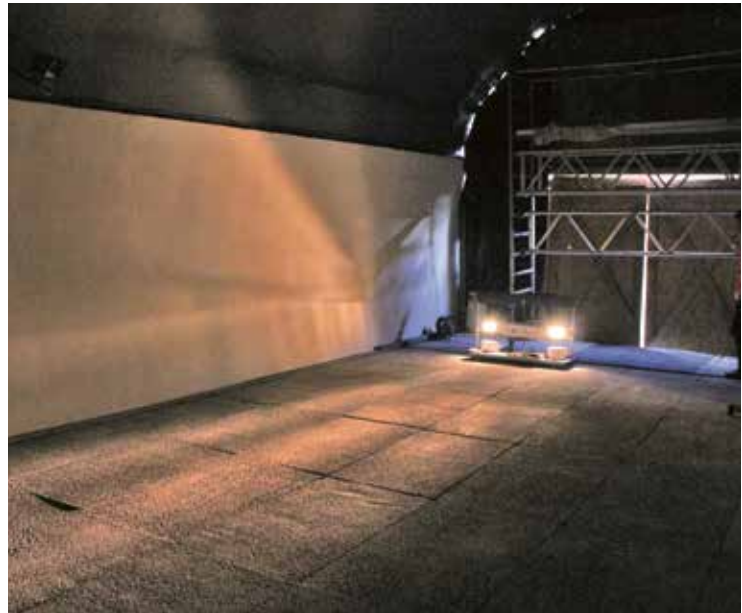


a

Abbildung 9: Messung der Analyse der Sichtbarkeit von Objekten im Tunnel durch unterschiedliche Oberflächen

a: Autoatruppe

b: Erstellung der Aufnahme im verdunkelten Tunnel
(Quelle: SMG)



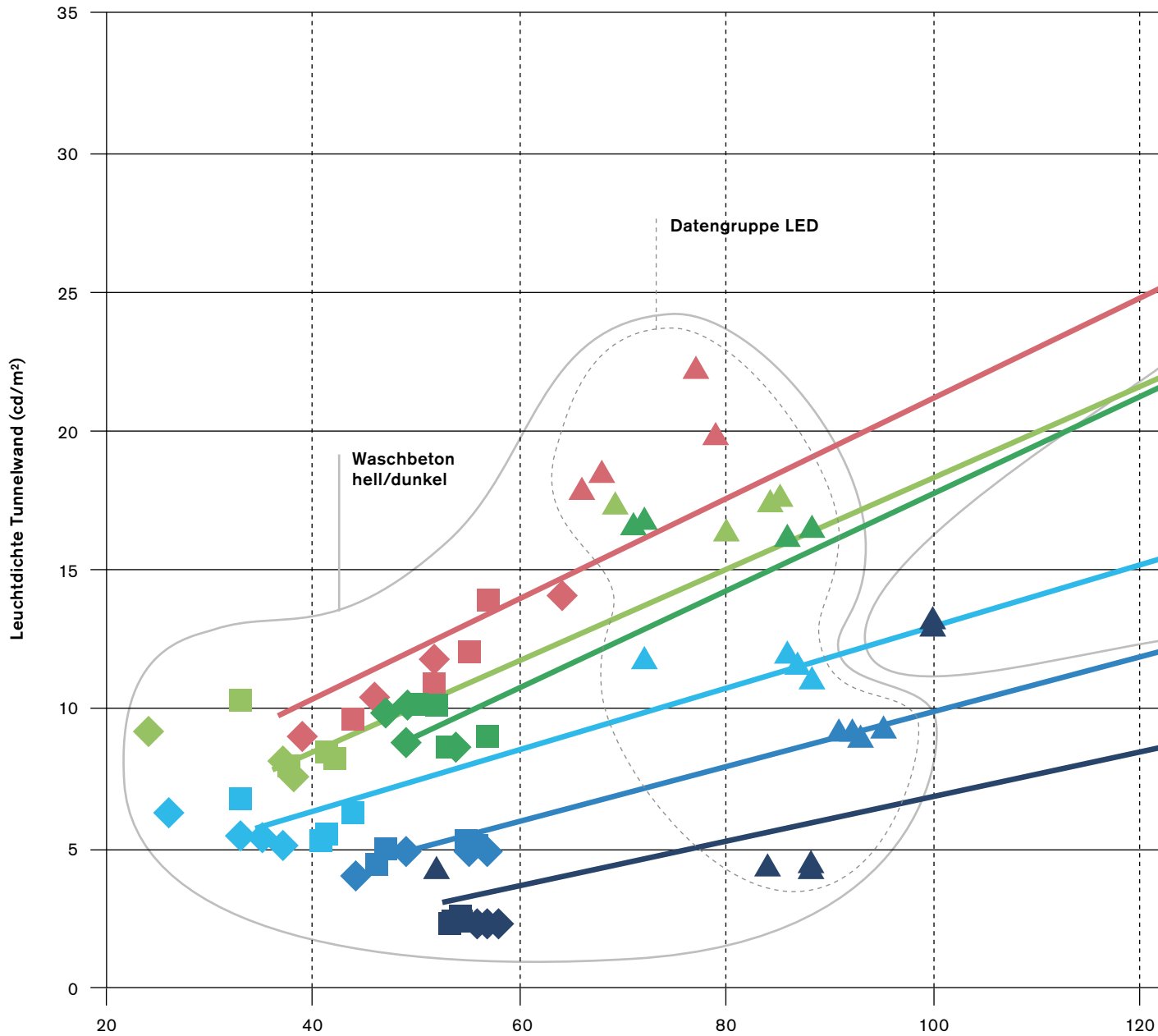
b

Zusätzlich zur messtechnischen Quantifizierung des Helligkeitszustandes wurde die Veränderung der Be- und Ausleuchtungssituation für die ausgewählten Kombinationen von Tunnelanstrich, Fahrbahn und Lampentyp im Tunnel fotografisch dokumentiert. Zur visuellen Erfassung wurde eine Autoatruppe jeweils an derselben Stelle im Tunnel positioniert. Die Abmessungen (Scheinwerferabstand) der Autoatruppe wurden an die verkleinerten Tunnelabmessungen angepasst. Um eine Vergleichbarkeit zu garantieren, erfolgten die Aufnahmen mit der Kamera mit konstanter Blende (4,5), mit konstantem Zoom (18mm) und festgelegter ISO-Einstellung (3200). Es wurden jeweils Fotos mit und ohne Personen auf der Fahrbahn bei unterschiedlichen Lichteinstellungen aufgenommen. Abbildung 9 zeigt die eingesetzte Autoatruppe sowie die Erstellung der Aufnahmen im verdunkelten Tunnel.

3 Ergebnisse

Im Zuge des Forschungsprojekts wurden 36 Beurteilungszustände im Versuchstunnel hergestellt und analysiert. Die Ergebnisse der Messungen und die zugehörigen Auswertungen sind in Form von Diagrammen dargestellt. Die Leistungen der drei Lampentypen HQI, NAV und LED sind mit 100, 100 und 105 W vergleichbar. Die Leistungsdaten der Lampen mussten beim Fahrbahnbelag Asphalt extrapoliert werden, da keine der Lampen bei 100 % Leistung die für den Vergleich notwendige Leuchtintensität der Fahrbahnoberfläche von 10 cd/m^2 erreichten.

Abbildung 10 zeigt die Leuchtdichte an der Tunnelwand in Abhängigkeit von der Leistung der Lampen bei 10 cd/m^2 an der Fahrbahnoberfläche. Die Datenpunkte werden durch lineare Funktionen angenähert. Dadurch lassen sich die unterschiedlichen Tunnelanstrichsysteme unabhängig von Fahrbahnoberfläche und Lampensystem nach deren Leuchtintensität reihen.



- | | |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| — Spritzmörtel weiß | ◆ HQI Tunnelanstrich Abnahme |
| — Tunnelanstrich gereinigt | ◆ HQI Tunnelanstrich leicht verschmutzt |
| — Tunnelanstrich Abnahme | ◆ HQI Tunnelanstrich stark verschmutzt |
| — Spritzbeton grau | ◆ HQI Tunnelanstrich gereinigt |
| — Tunnelanstrich leicht verschmutzt | ◆ HQI Spritzbeton grau |
| — Tunnelanstrich stark verschmutzt | ◆ HQI Tunnelanstrich Spritzmörtel weiß |

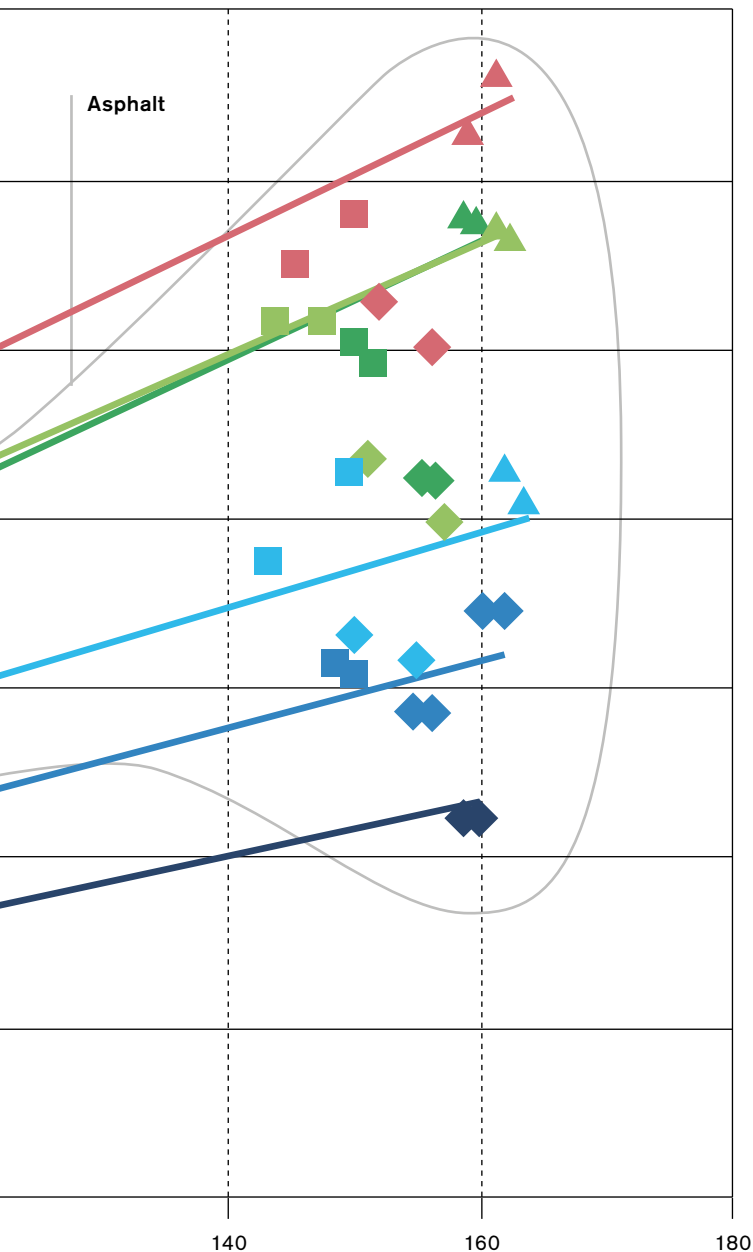


Abbildung 10: Gesamtübersicht Messwerte, eingefärbt nach Tunnelwandbeschichtung. Der weiße Spritzbeton liefert die höchsten Leuchtintensitäten an der Tunnelwand.

3.1 Einfluss des Fahrbelags

Die Messwerte lassen sich zunächst in zwei Gruppen einteilen. Die Messwerte „Fahrbelag Asphalt“ bildet dabei die Datengruppe mit dem höchsten, durch Extrapolation berechneten Stromverbrauch zwischen 140 und 165 % der Maximalleistung. Die hohen Lampenleistungen resultieren zwangsläufig in recht hohe Leuchtintensitäten an der Tunnelwand.

Die zweite Datenwolke beinhaltet die Messwerte der Fahrbahnoberflächen „Waschbeton herkömmlich“ und „Waschbeton hell“. Hier konnte auch durch eindeutige Zuordnung der Datenpunkte keine generelle Unterscheidung zwischen den beiden Fahrbahnoberflächen getroffen werden. Beispielsweise liegen alle 4 Datenpunkte „LED Tunnelanstrich leicht verschmutzt“ auf zirka einer Linie und zeigen lediglich geringe Abweichungen im Stromverbrauch. Generell können jedoch die LED-Lampen in dieser Datenwolke abgegrenzt werden (siehe Abbildung 10, strichliert markiert). Sie liefern bei insgesamt mittleren Stromverbräuchen die höchsten Leuchtdichten an der Tunnelwand.

- | | |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| ■ NAV Tunnelanstrich Abnahme | ▲ LED Tunnelanstrich Abnahme |
| ■ NAV Tunnelanstrich leicht verschmutzt | ▲ LED Tunnelanstrich leicht verschmutzt |
| ■ NAV Tunnelanstrich stark verschmutzt | ▲ LED Tunnelanstrich stark verschmutzt |
| ■ NAV Tunnelanstrich gereinigt | ▲ LED Tunnelanstrich gereinigt |
| ■ NAV Spitzbeton grau | ▲ LED Spitzbeton grau |
| ■ NAV Tunnelanstrich Spritzmörtel weiß | ▲ LED Tunnelanstrich Spritzmörtel weiß |

3.2 Einfluss der Tunnelwand

Erwartungsgemäß zeigt der weiße Spritzmörtel das beste Ergebnis. Unabhängig von Fahrbahn und Lampentyp liefert er die höchsten Leuchtintensitäten an der Tunnelwand. Beim Vergleich des weißen Spritzmörtels bei NAV- und HQI-Beleuchtung mit dem anderen Anstrichtypen schneidet der weiße Spritzmörtel zwar am besten ab, ist jedoch von den Leuchtintensitäten durchaus mit dem Tunnelanstrich „Abnahme“ und „gereinigt“ zu vergleichen. Hier sind die Unterschiede nur sehr klein.

Auch die Tunnelanstriche „Abnahme“ und „gereinigt“ zeigen in Abbildung 10 durchaus ähnliche Verläufe. Der graue Spritzbeton liefert bessere Werte als der leicht bzw. stark verschmutzte Tunnelanstrich. Der stark bzw. leicht verschmutzte Tunnelanstrich zeigt mit $2,5 - 10 \text{ cd/m}^2$ bzw. $5 - 15 \text{ cd/m}^2$ die geringsten Werte.

Generell ist der Einfluss einer gereinigten bzw. neuen Tunnelwandfarbe auf den für die Ausleuchtung der Fahrbahnoberfläche mit 10 cd/m^2 notwendigen Stromverbrauch gering. Dies wird bei Analyse der Datengruppe mit den Lampentypen HQI und NAV im linken unteren Bereich des Diagramms in Abbildung 10 deutlich. Hier treten bei allen Beurteilungszuständen bei NAV- und HQI-Beleuchtung ähnliche Stromverbräuche zwischen zirka 40 % und 60 % der Maximalleistung auf.

Ein deutlicher Vorteil einer Tunnelwäsche ist jedoch bei der Erhöhung der Verkehrssicherheit zu beobachten. Die Helligkeit der Tunnelwand erhöht sich beispielsweise von „stark verschmutzt“ auf „gereinigt“ von $2,5 \text{ cd/m}^2$ auf $8 - 10 \text{ cd/m}^2$, was eine Verdreifachung der Beleuchtungsdichte der Tunnelwand bedeutet.

Tunnelanstrich Abnahme – Firste gereinigt

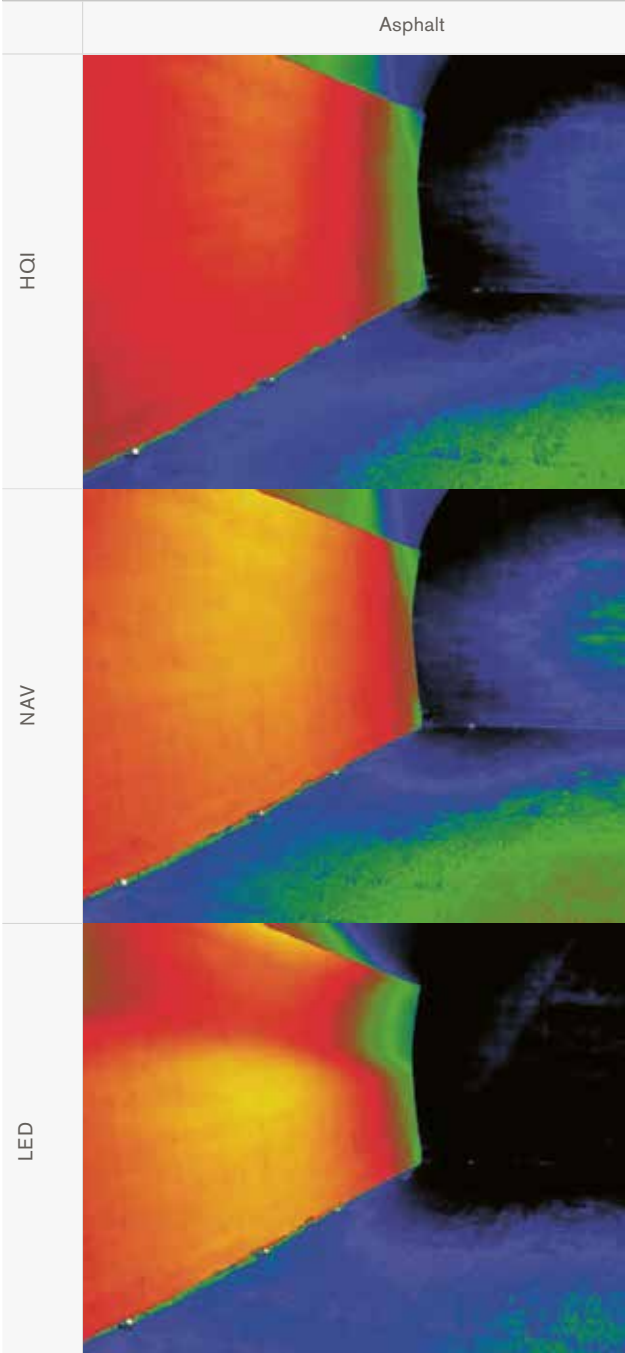
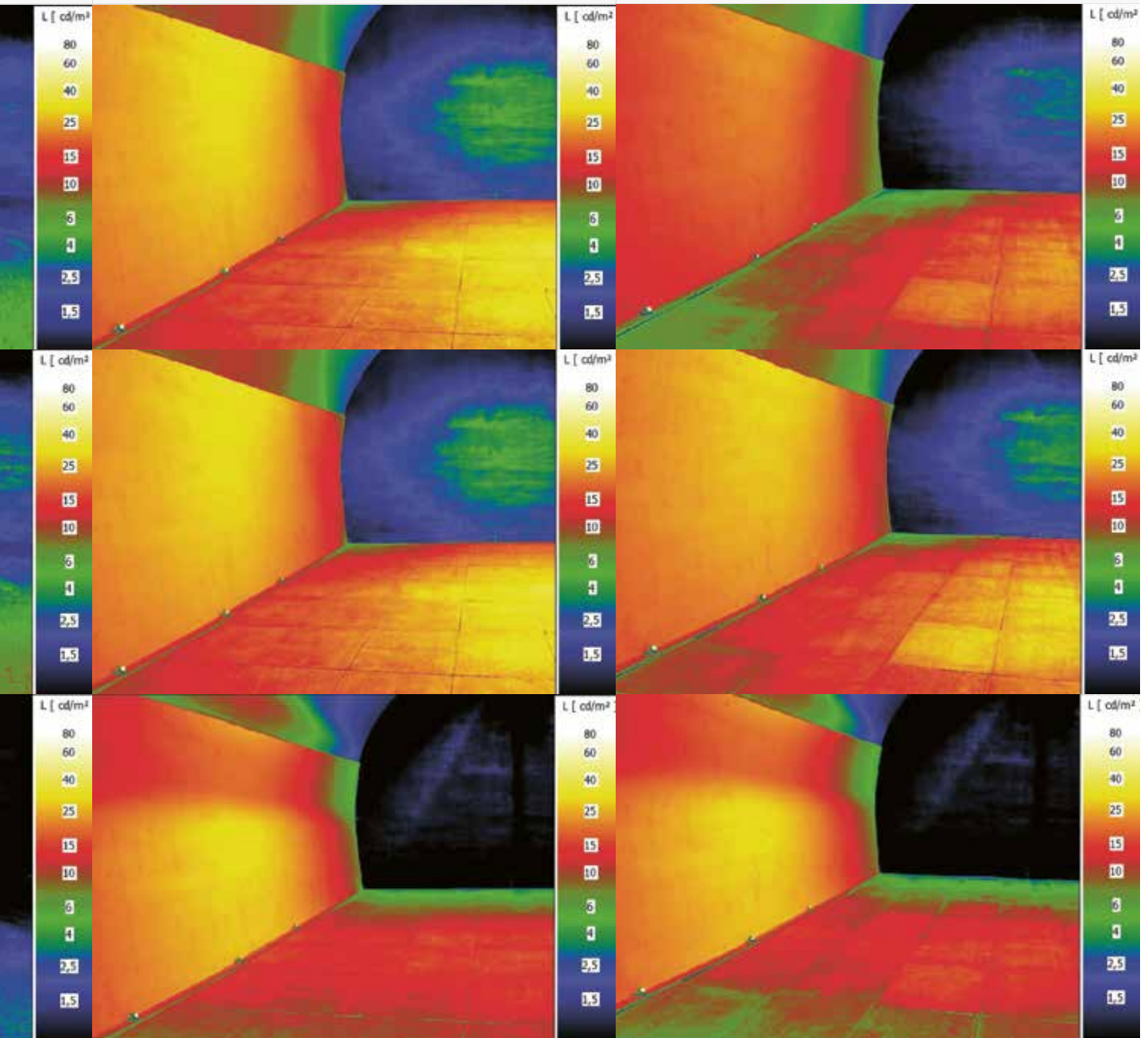


Abbildung 11: Leuchtdichtebilder des Versuchstunnels bei Asphalt, Waschbeton hell und Waschbeton normal und gereinigter Firste. Tunnelanstrich: Tunnelwand Abnahme (Abb. Magistralabteilung MA 39)

Waschbeton hell

Waschbeton normal



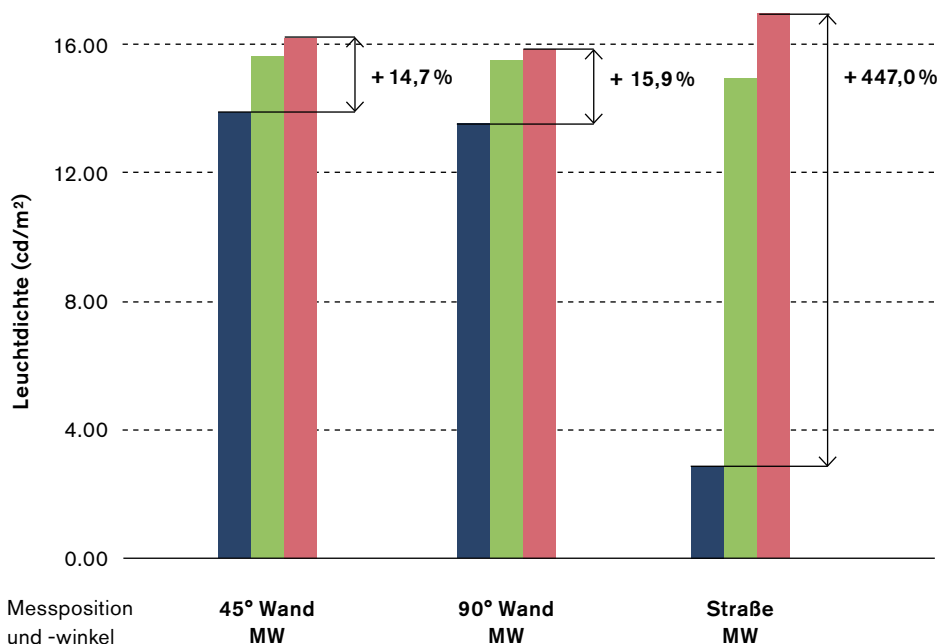


Abbildung 12: Leuchtdichte der Tunnelwand bei unterschiedlichen Fahrbahnen und Messwinkeln. Es sind jeweils die Mittelwerte aus Beurteilungszustand „Firste verschmutzt“ und „Firste gereinigt“ sowie den Lampentypen NAV, HQI und LED dargestellt.

■ Asphalt
 ■ Waschbeton herkömmlich
 ■ Waschbeton hell

3.3 Ergebnis der Leuchtdichtemessung durch die MA 39

Die Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien (Magistratsabteilung MA 39) wurde beauftragt, eine messtechnische Ermittlung der Leuchtdichte und der Farbinformationen von Tunneloberflächen bei unterschiedlichen Beurteilungszuständen und einer Lampenleistung von 100% zu erstellen. Die Messung der Leuchtdichte und der Farbinformation erfolgte situationsbedingt in Anlehnung an ÖNORM EN 13201-4: 2005 „Straßenbeleuchtung – Methoden zur Messung der Güteermkmale von Straßenbeleuchtungsanlagen“^[6] mit einer orts aufgelösten Leuchtdichtekamera in einer Messhöhe von 1,5 m. Als Messgerät wurde ein Photometer mit Beleuchtungsstärkemesskopf verwendet.

In Abbildung 11 ist ein Auszug der von der MA 39 erstellten Leuchtdichtebilder für den Tunnelwandanstrich „Abnahme“ dargestellt. Die Leuchtdichtebilder

zeigen eindeutig den Unterschied zwischen Asphalt- und den Betonfahrbahnen.

In Abbildung 12 sind die Mittelwerte der Leuchtdichtemessung (Mittelwert der Lampentypen HQI, NAV, LED) über alle untersuchten Oberflächen bei unterschiedlichen Fahrbahnen dargestellt. Bei Betonfahrbahnen sind die Leuchtintensitäten bei gleicher Beleuchtungsstärke um mehr als das 5-fache höher (Waschbeton hell: 16,9 cd/m², Waschbeton normal: 15,0 cd/m² und Asphalt: 2,9 cd/m²).

In Abbildung 13 sind die Ergebnisse der Leuchtdichtemessung der MA39 graphisch in Form von Säulendiagrammen für die „Tunnelwand Abnahme“ dargestellt. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurden nur Beurteilungszustände bei gereinigten Firsten dargestellt.

Die Leuchtdichten der Tunnelwände sind bei den Betonfahrbahnen deutlich erhöht, wobei die besten Ergebnisse bei der hellen Betonfahrbahn erzielt wur-

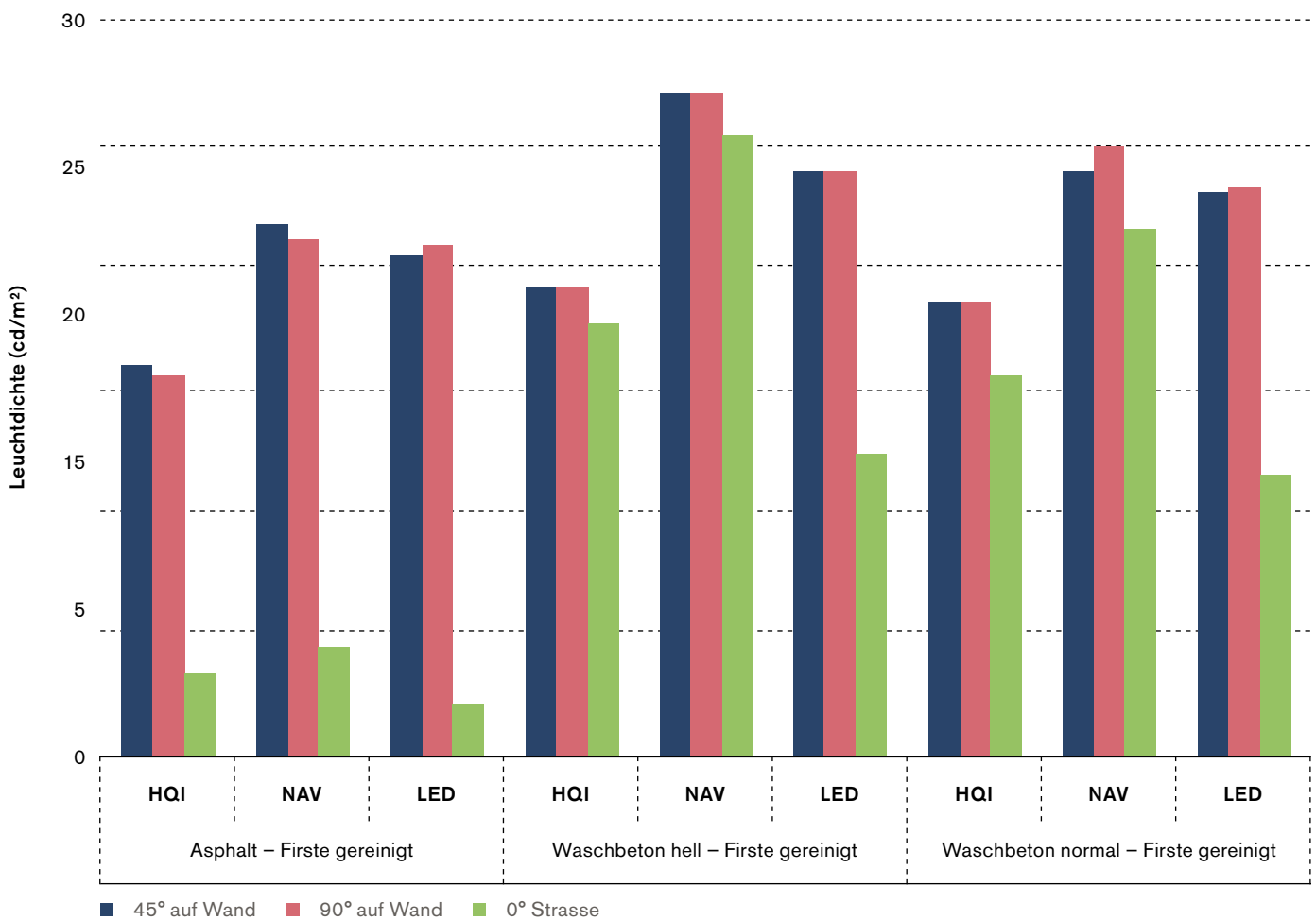


Abbildung 13: Leuchtdichten an Tunnelwand (Blickwinkel 45° und 90°) sowie Fahrbahnoberfläche bei „Tunnelanstrich Abnahme“ und unterschiedlichen Fahrbahnbelägen und Beleuchtungskörper.

Fahrbahnbelag (cd/m²):	HQI	NAV	LED
Asphalt (cd/m²):	2,6 (HQI)	3,6 (NAV)	1,5 (LED)
Waschbeton hell (cd/m²):	17,7 (HQI)	25,4 (NAV)	12,4 (LED)
Waschbeton normal (cd/m²):	15,5 (HQI)	21,6 (NAV)	11,4 (LED)

den. Dabei steigen die Leuchtdichten beim Wechsel von „Asphalt“ auf „Waschbeton hell“ um durchschnittlich 21 % bzw. bei Wechsel auf Waschbeton herkömmlich um 15 %. Noch deutlicher ist der Unterschied bei der Leuchtdichte der Fahrbahnoberfläche (siehe Tabelle 3).



a



b



c

Abbildung 14: Ausleuchtung von Fahrbahnoberflächen bei vergleichbaren Gegebenheiten (Wand leicht verschmutzt, Decke gereinigt)

- a Beton herkömmlich
- b Beton hell
- c Asphalt

3.4 Ausleuchtung von Fahrbahnoberflächen: Darstellung der Erhöhung der Verkehrssicherheit

McIntosh [7] berichtete bereits 1987 über die positiven Effekte von Betonfahrbahnen gegenüber Asphaltfahrbahnen in Bezug auf Reflexionsvermögen und damit verbesserter Helligkeit und Sichtbarkeit von Objekten im Straßenverkehr. Zur Darstellung der Erhöhung der Verkehrssicherheit wurden im Zuge des Forschungsprojekts Versuche unter vergleichbaren Bedingungen im Versuchstunnel nachgestellt und fotografische Aufnahmen erstellt.

Die Untersuchungen erfolgten im abgedunkelten Tunnel mit der Autoatruppe jeweils bei eingeschaltetem Fern- und Abblendlicht mit denselben Kameraeinstellungen. In Abbildung 14 sind vergleichbare Aufnahmen der Sichtverhältnisse ohne Tunnelbeleuchtung dargestellt.

Generell sind die Betonfahrbahnen durch das Abblendlicht deutlich heller und besser ausgeleuchtet. Unterschiede zwischen Waschbeton hell und herkömmlichen Waschbeton sind eventuell an der etwas dunkleren bzw. weicheren Farbe des Lichtkegels in Abbildung 14a gegenüber dem weißeren Lichtkegel in Abbildung 14b erkennbar. Durch die höhere Helligkeit und das bessere Reflexionsvermögen des Betons sind Objekte, wie zum Beispiel ein Fußgänger, deutlich früher und besser zu erkennen. Die Asphaltfahrbahn in Abbildung 14c wird durch das Abblendlicht nur schwach ausgeleuchtet und Objekte auf der Fahrbahn sind daher nur verspätet und schlechter zu erkennen.

Ähnliche Ergebnisse sind auch unter Fernlicht abzuleiten. Der Beton reflektiert einen höheren Anteil des Lichts und sorgt für eine bessere Ausleuchtung des Verkehrsraums. Die Unterschiede sind jedoch nicht so groß wie bei Abblendlicht, da das Fernlicht höher und fokussierter eingestellt ist und somit weniger Licht auf die Fahrbahn fällt und reflektiert wird.

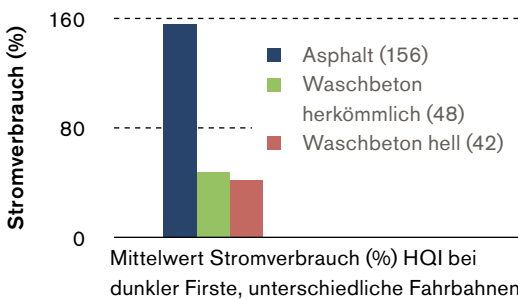


Abbildung 15: Mittelwert der Leistung einer HQI-Lampe in Watt bei einer Leuchtintensität von 10 cd/m² über alle geprüften Fahrbahnoberflächen und Tunnelwandfarben

3.5 Ermittlung der Beleuchtungskosten

Die Darstellung der Beleuchtungskosten erfolgte auf Basis des Stromverbrauchs im Verhältnis zur Maximalleistung. In Abbildung 15 ist der Mittelwert des tatsächlichen Stromverbrauchs in Prozent der Maximalleistung einer HQI-Lampe bei einer Leuchtintensität der unterschiedlichen Fahrbahnoberflächen von 10 cd/m² über alle Tunnelwandfarben dargestellt. Bei Asphalt wurden die extrapolierten Leistungswerte aus Abbildung 10 verwendet und dem Mittelwert der Betonfahrbahnen „Waschbeton hell“ und „Waschbeton dunkel“ gegenübergestellt.

Markant ist die für das Erreichen einer Leuchtdichte von 10 cd/m² erforderliche hohe Leistung der Lampe bei Asphaltfahrbahn, die teilweise dem 4-fachen Stromverbrauch bei Verwendung einer Betonfahrbahn entspricht. Grund für diesen großen Unterschied ist, dass die Daten aus Messungen mit nur einer Lampe stammen. Die Asphaltoberfläche ist so beschaffen, dass die Lampen auch bei 100 % Leistung die geforderten Leuchtintensitäten der Fahrbahnoberflächen von 10 cd/m² nicht erreichten. Die Leistungen wurden dann mithilfe linearer Extrapolation angeglichen, um die Vergleichbarkeit wiederherzustellen.

Der Einfluss der Tunnelwandfarbe ist auf die Beleuchtungsintensität auf der Fahrbahn und somit für den Stromverbrauch unwesentlich und daher in dieser Abbildung nicht dargestellt.

4 Zusammenfassung

Im Zuge des Forschungsprojekts konnte eine Vielzahl an unterschiedlichen Beleuchtungssituationen in einem Versuchstunnel unter gleichbleibenden Bedingungen simuliert und ausgewertet werden.

Der positive Einfluss einer Betonfahrbahn auf die lichttechnischen Eigenschaften eines Tunnels kann als signifikant beurteilt werden. Um die geforderte Leuchtdichte der Fahrbahn sicherzustellen, benötigen Betonfahrbahnen unabhängig vom Lampentyp weitaus geringere Lampenleistungen. Dabei kann theoretisch die Lampenleistung gegenüber Asphaltfahrbahnen um zwei Drittel reduziert werden. Der Einfluss der Unterschiede zwischen herkömmlichen Deckenbeton und Deckenbeton mit Titanoxid als Zusatzstoff auf die erforderliche Lampenleistung ist vernachlässigbar. Generell sind Objekte, wie zum Beispiel ein Fußgänger, durch die höhere Helligkeit und das bessere Reflexionsvermögen des Betons deutlich früher und besser zu erkennen. Der Beton reflektiert einen höheren Anteil des Lichts und sorgt für eine bessere indirekte Ausleuchtung des Verkehrsraums. Unterschiede zwischen „Waschbeton hell“ und „Waschbeton dunkel“ sind auf den erstellten Vergleichsfotos mit simulierten Autoscheinwerfern und Fußgänger nur schwer zu erkennen. In den erstellten Leuchtdichtebildern der MA 39 werden die Unterschiede in der Leuchtdichte der Fahrbahnen und Tunnelwände visualisiert und bestätigen diesen subjektiven Eindruck. Auch die gemessenen Leuchtintensitäten bestätigen diese Beobachtung: Bei Betonfahrbahnen sind die Leuchtdichten bei gleicher Beleuchtungsstärke um zirka 450 % höher.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN 67 524: Beleuchtung von Straßentunneln und Unterführungen – Teil 1: Allgemeine Gütemerkmale und Richtwerte. Juli 2008
- [2] DIN 67 524: Beleuchtung von Straßentunneln und Unterführungen – Teil 2: Berechnung und Messung. Juni 2011
- [3] RVS 09.02.41: Tunnel. Tunnelausrüstung. Lichttechnik. Beleuchtung. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr. Wien. Februar 2014
- [4] RVS 08.17.02: Technische Vertragsbedingungen. Betondecken. Deckenherstellung. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr. Wien. 2011
- [5] ONR 23303: Prüfverfahren Beton (PVB) – Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe. Austrian Standards Institute. Wien. 2010
- [6] ÖNORM EN 13201-4: „Straßenbeleuchtung. Teil 4: Methoden zur Messung der Gütemerkmale von Straßenbeleuchtungsanlagen“, Austria Standards Institute. Wien. 2005
- [7] McIntosh, B.: Do Concrete Streets really reflect up?; Concrete International. July 1987



Für weiterführende Informationen steht Ihnen der Verein Betonmarketing Österreich jederzeit zur Verfügung

www.betonmarketing.at



Vereinigung der Österreichischen
Zementindustrie
Reisnerstraße 53
A-1030 Wien
Tel. +43 (0)1 714 66 81-0



Verband Österreichischer
Beton- und Fertigteilwerke
Gablenzgasse 3/5. OG
A-1150 Wien
Tel. +43 (0)1 403 48 00



Güteverband
Transportbeton
Wiedner Hauptstraße 63
A-1045 Wien
Tel. +43 (0)5 90 900-4882



Forum
Betonzusatzmittel
Wiedner Hauptstraße 63
A-1045 Wien
Tel. +43 (0)5 90 900-3749

Vertrieb durch

BETONSUISSE

BETONSUISSE Marketing AG
Marktgasse 53, CH-3011 Bern
Telefon +41 (0)31 327 97 87, Fax +41 (0)31 327 97 70
info@betonsuisse.ch, www.betonsuisse.ch



InformationsZentrum Beton GmbH
Steinhof 39, D-40699 Erkrath
Telefon +49 (0)211 28048-1, Fax +49 (0)211 28048-320
erkrath@beton.org, www.beton.org



Verein Betonmarketing Österreich
Anfragen für den Bereich Betonstraßen an Zement + Beton
Handels- und Werbeges.m.b.H., Reisnerstraße 53, A-1030 Wien
Telefon +43 (0) 1 714 66 85-0
zement@zement-beton.co.at, www.zement.at