

Licht- und oberflächentechnische Gestaltung von Tunnelanlagen LiObTu

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2018
(VIF 2018)

Oktober 2021



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Klimaschutz
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
1030 Wien

 **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG
Praterstern 3
1020 Wien

 **ÖBB**
INFRA

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-
Aktiengesellschaft
Rotenturmstraße 5-9
1010 Wien

 **ASFiNAG**

Für den Inhalt verantwortlich:

Bartenbach GmbH
Rinner Straße 14
6072 Aldrans

 **Bartenbach**
THE LIGHTING INNOVATORS
since 1960

Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
1090 Wien

 **FFG**
Forschung wirkt.

Licht- und oberflächentechnische Gestaltung von Tunnelanlagen LiObTu

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF 2018)

AutorInnen:

Mag. Wilfried POHL

Maximilian DICK, MSc

Dipl.-Ing. Manfred GSTREIN

Auftraggeber:

Bundesministerium für Klimaschutz

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

Bartenbach GmbH

INHALTSVERZEICHNIS

AP2: Evaluierung.....	6
Einleitung	6
Sehbedingungen.....	7
Tunnel-Gesamträume	8
Tunnel-Deckenleuchten	19
Tunnel-Wandbeschichtungen	20
Material-Studie.....	24
Spiegelbild-Analyse:	30
Remissionsverläufe der Messproben.....	31
Empfohlenes Beschichtungs-Material:.....	34
AP3: Verschmutzung.....	35
Einleitung	35
Messungen	35
Berechnungsformel:.....	46
Alterungserscheinungen:	49
Reinigungsverfahren der Tunnelanlagen	52
Mehrfachreflexionen	53
Tunnel-Querschnitte	54
Stand der Wissenschaft bezüglich Tunnelgestaltung	55
Menschliche Wahrnehmung	56
AP4: Innovative Farb- und Beleuchtungskonzepte.....	59
Homogenität der Fahrbahnausleuchtung.....	60
Helligkeit der Tunnelwände.....	62
Farbe der Tunnelwände.....	64
Markierungen an der Tunnelwand	68
Aufhellung der Tunnelanschlussstrecke	69
AP5: Farbgestaltung von Fluchtwegen und Pannenbuchten.....	71
Farbgebung von Notausgängen in Tunnelanlagen	71
Zonierung der Beleuchtung von Pannenbuchten.....	74
Beispiele innovativer Tunneldesigns	75
Eurasien-Tunnel	75
AP6: Empfehlungen und Wissensverbreitung	76
Oberflächen und Reinigung	76
Beleuchtung und Spektrum.....	77

Tunnelwandgestaltung	77
Sicherheitsaspekte	79
Wissensverbreitung	80
Literaturverzeichnis	81

AP2: EVALUIERUNG

Einleitung

In Abstimmung mit ASFINAG und BMVIT wurde folgende Vorgangsweise zur Erfassung der Auswirkung durch Verschmutzung und Reinigung vereinbart.

- Auswahl von 5 geeigneten Tunnel-Anlagen
- Einbau von jeweils 3 identischen Musterplatten je Tunnel
- Musterplatten mit jeweils 4 verschiedenen Beschichtungs-Materialien
- Montage an den Tunnel-Wänden im Einfahrts-, Mittel- und Ausfahrtsbereich
- Lichttechnische Messungen und Auswertungen über einen Zeitraum von 2 Jahren

Folgende Kriterien wurden für die Tunnel-Auswahl herangezogen.

- Tunnel mit hohem Verkehrsaufkommen (PKW und vor allem LKW)
- Tunnel mit hohem Schadstoffausstoß (durch Steigungen)
- Tunnel mit zumindest 750m Länge (oder mehr)
- Tunnel mit LED-Beleuchtung

Es wurden die von den beiden relevanten Herstellern (Mapei und Avenarius Agro) aktuell verwendeten Materialien (Epoxidharz und Polyurethanlack) für die Tunnel-Anlagen (Pfänder, Langen, Quadratsch, Perjen und Plabutsch) lt. nachfolgender Tabelle herangezogen.

Tunnel-Übersicht							
Tunnel	Leuchten	Ausführung	Lieferant	Material-Bezeichnung	Beschichtung	RAL-Ton	Waschung
Pfänder Bregenz 2 x 6750 m	Swareflex	2011	Mapei	Mapecoat TU	Wasser-Epoxidharz	1015	04-05 / 09-10
		2012	Avenarius Agro	Agropox TU Coat W	Wasser-Epoxidharz	1015	04-05 / 09-10
Langen Klösterle 2 x 2350 m	Broll	2018 / 2019	Avenarius Agro	Agropox TU Coat SF	Epoxidharz	1015	04-05 / 09-10
		?	Avenarius Agro	Agropox TU Coat W	Wasser-Epoxidharz	1015	04-05 / 09-10
Quadratsch Pians 2 x 750 m	Swareflex	2018	Avenarius Agro	AgroPUR TU Coat Flex	Polyasparticharz	1015	04-05 / 09-10
Perjen Stanz 1 x 2950 m	Broll	2017 / 2018	Mapei	Mapecoat SF95	Rein-Epoxidharz	1015	04-05 / 09-10
Plabutsch Graz 2 x 10000 m	Portal-Bereich	2017 / 2018	Mapei	Mapecoat PU T1	Polyurethan-Lack	1015	04-05 / 09-10
	Muster-Flächen	2019	Avenarius Agro	AgroPUR TU Coat Flex	Polyasparticharz	1015+9010	04-05 / 09-10

Auswahl von 5 Tunnel-Anlagen und 4 Beschichtungs-Materialien (ausgewählte Oberflächen gelb markiert)

Lichttechnische Messungen wurden sowohl im Bartenbach-Labor als auch in den 5 Tunnel-Anlagen mit folgenden Messgeräten durchgeführt:

Luxmeter:	Minolta Pocket Lux
Leuchtdichtemeter:	Minolta LS110
Leuchtdichtekamera:	Canon EOS80D
Spektroradiometer:	JETI Specbos 1211 UV
Ulbrichtkugel:	Öffnungs-Durchmesser 120mm
Sonstiges:	Zubehör

Sehbedingungen

Das menschliche Auge ist mit zwei unterschiedlichen Fotorezeptoren an der Netzhaut ausgebildet. Die Zapfen der Netzhaut dienen dem Tag-Sehen (Photopischer Bereich), und die Stäbchen sorgen für das Nacht-Sehen (Skotopischer Bereich). Das Dämmerungs-Sehen (Mesopischer Bereich) wird sowohl mit den Zapfen als auch mit den Stäbchen gewährleistet.

In der Nacht werden Blautöne tendenziell heller empfunden und eher wahrgenommen als Rottöne.

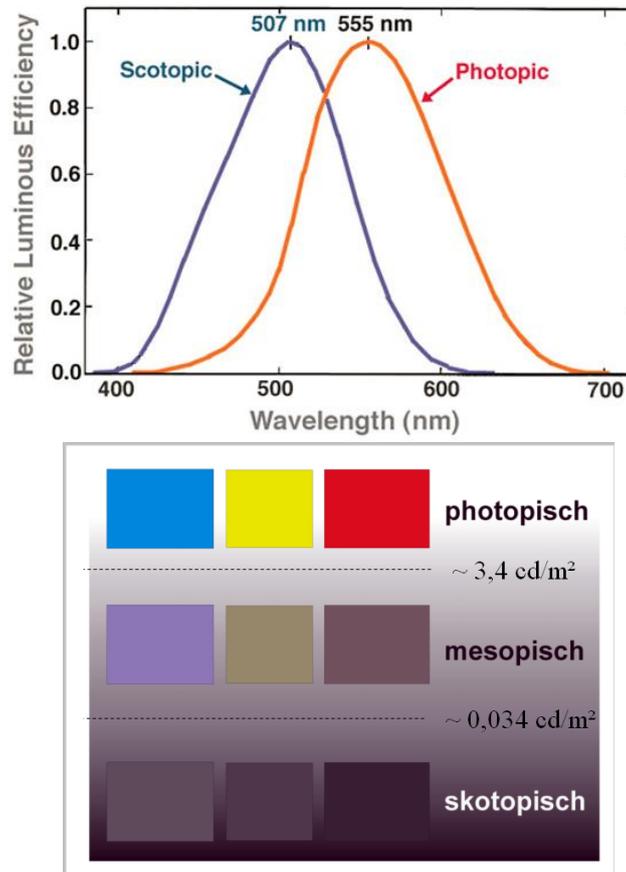


Abbildung 1: Lichtempfindlichkeit des menschlichen Auges

Tunneloberflächen: Decke / Wände / Straße
Leuchtdichte-Richtwerte: 1 / 10 / 6 cd/m²

Bis vor ungefähr 25 Jahren wurden die Fahrbahnen der Tunnel-Anlagen sehr häufig auf nur 2 cd/m² ausgelegt. In letzter Zeit wurden die Straßen mit ungefähr 6 cd/m² geplant, wodurch man sich bereits im photopischen Bereich befindet.

Die erfassten Messwerte müssen daher nicht umgerechnet werden.

Tunnel-Gesamträume

Mithilfe von Fotos und Leuchtdichtebildern wurden die 5 Tunnel-Anlagen jeweils vor und nach der Reinigung exakt evaluiert. Dabei konnte festgestellt werden, dass die lichttechnischen Daten mit den Vorgaben lt. RVS übereinstimmen.

Die folgenden, gerundeten Eckdaten gelten mehr oder weniger für alle fünf Tunnel-Anlagen.

Tunnel-Oberflächen: Decke / Wände / Straße
Richtwerte: 25 / 50 / 100 lx und 1 / 10 / 6 cd/m²



Abbildung 2: Pfändertunnel (verschmutzt)

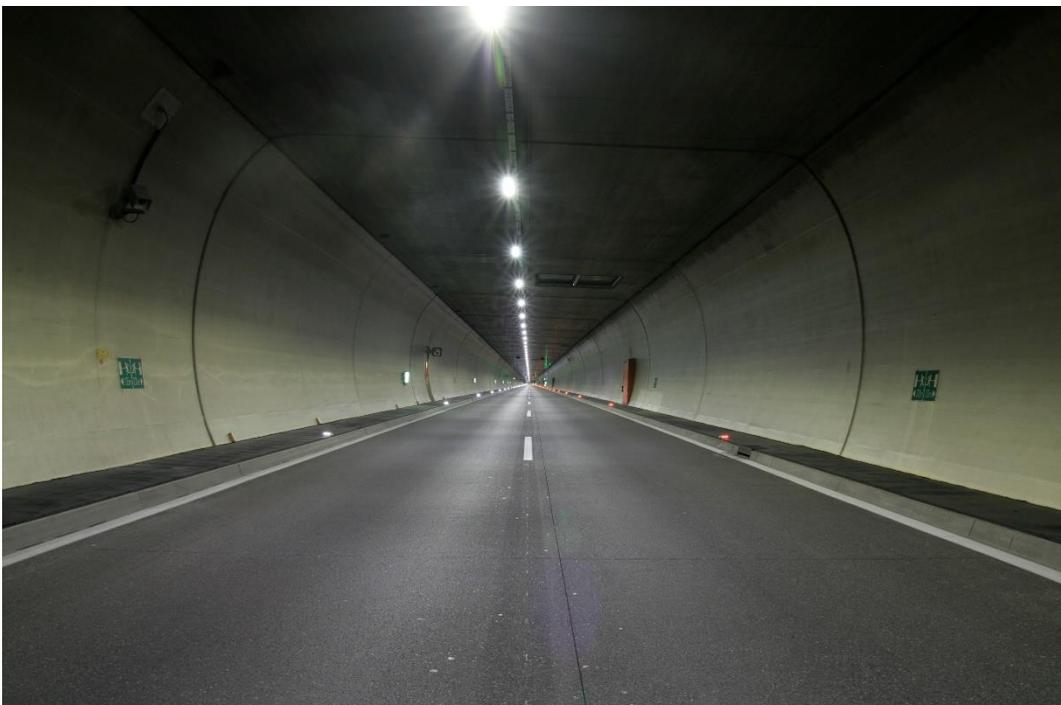


Abbildung 3: Pfändertunnel (gereinigt)

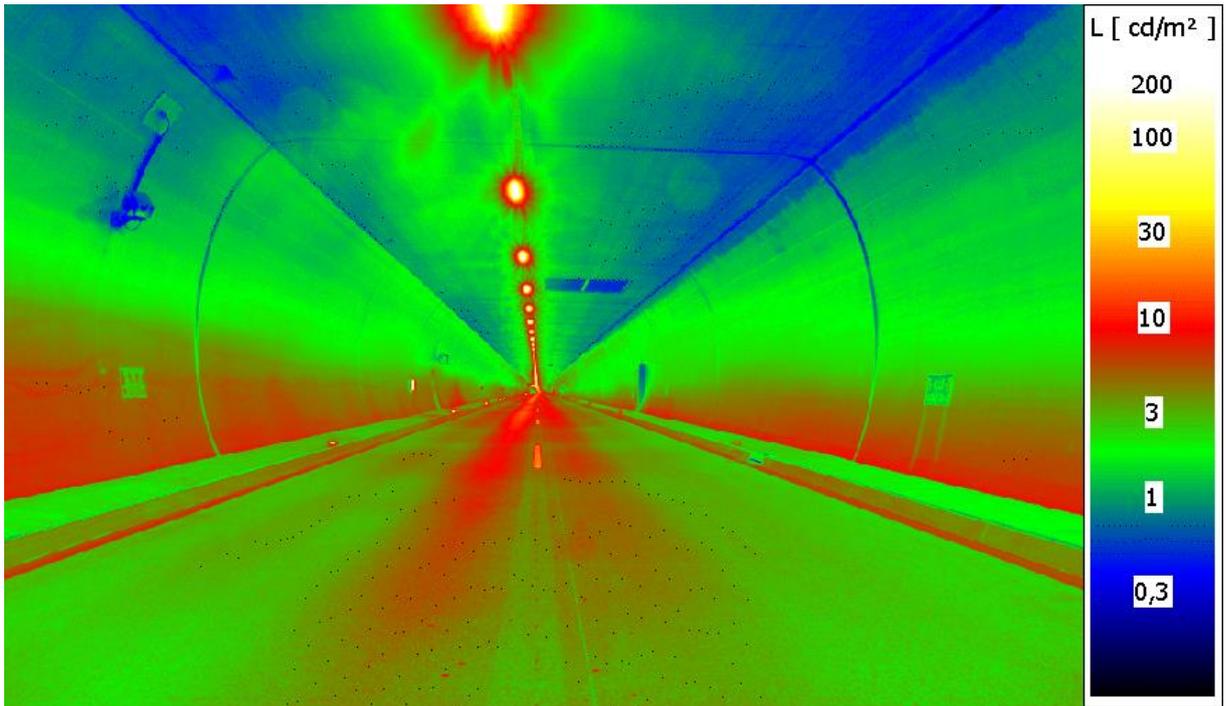


Abbildung 4: Pfändertunnel (verschmutzt) - Leuchtdichtebild

Oberfläche: Decke / Wände / Straße <=> Leuchtdichte: 1 / 4 / 5 cd/m²

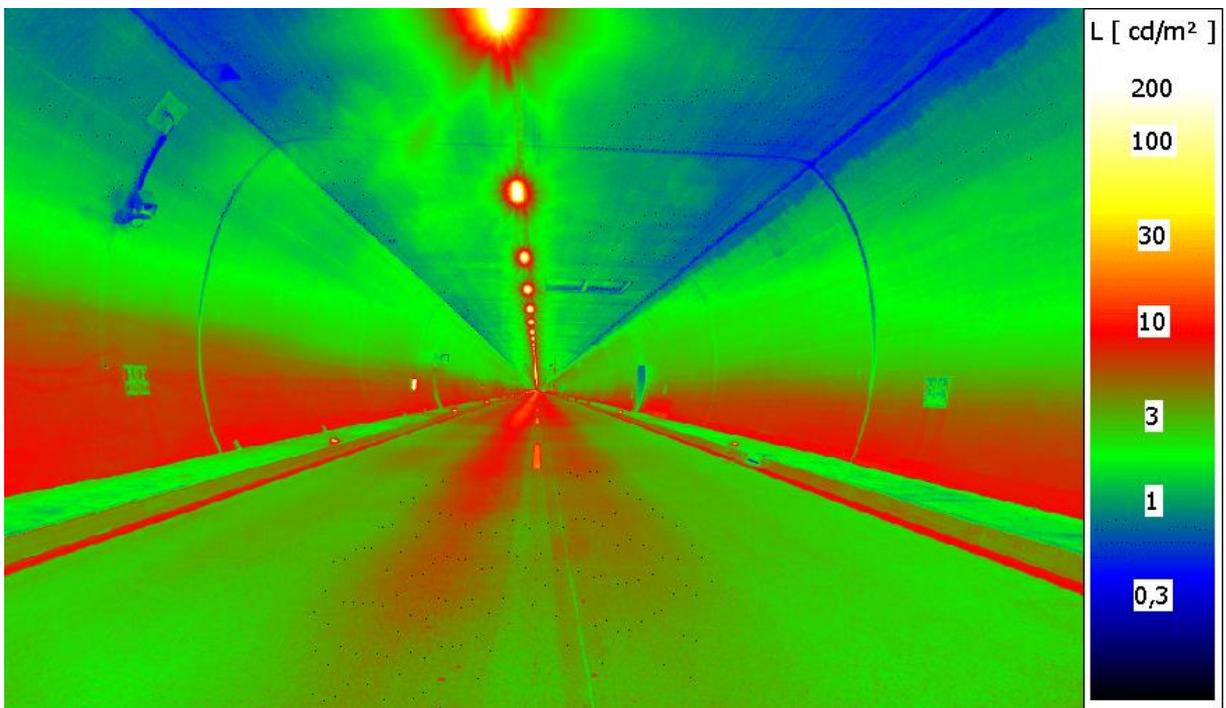


Abbildung 5: Pfändertunnel (gereinigt) - Leuchtdichtebild

Oberfläche: Decke / Wände / Straße <=> Leuchtdichte: 1 / 6 / 6 cd/m²



Abbildung 6: Langener Tunnel (verschmutzt)



Abbildung 7: Langener Tunnel (gereinigt)

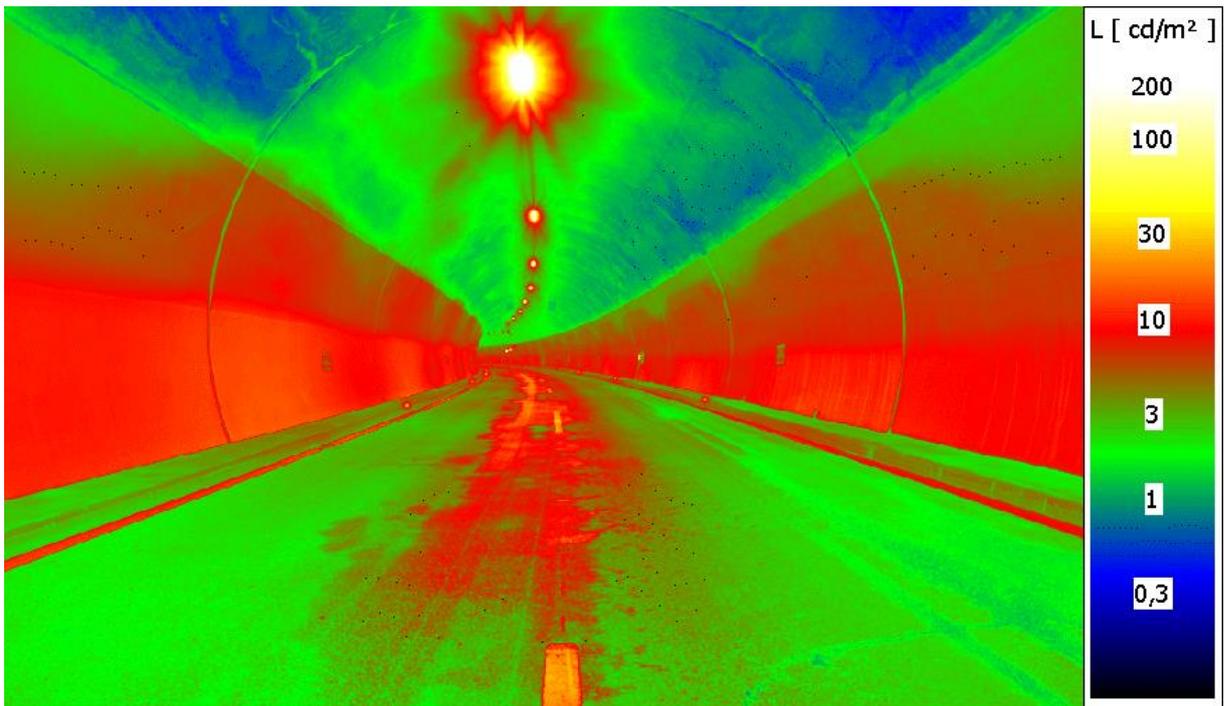


Abbildung 8: Langener Tunnel (verschmutzt) - Leuchtdichtebild

Oberfläche: Decke / Wände / Straße <=> Leuchtdichte: 1 / 6 / 5 cd/m²

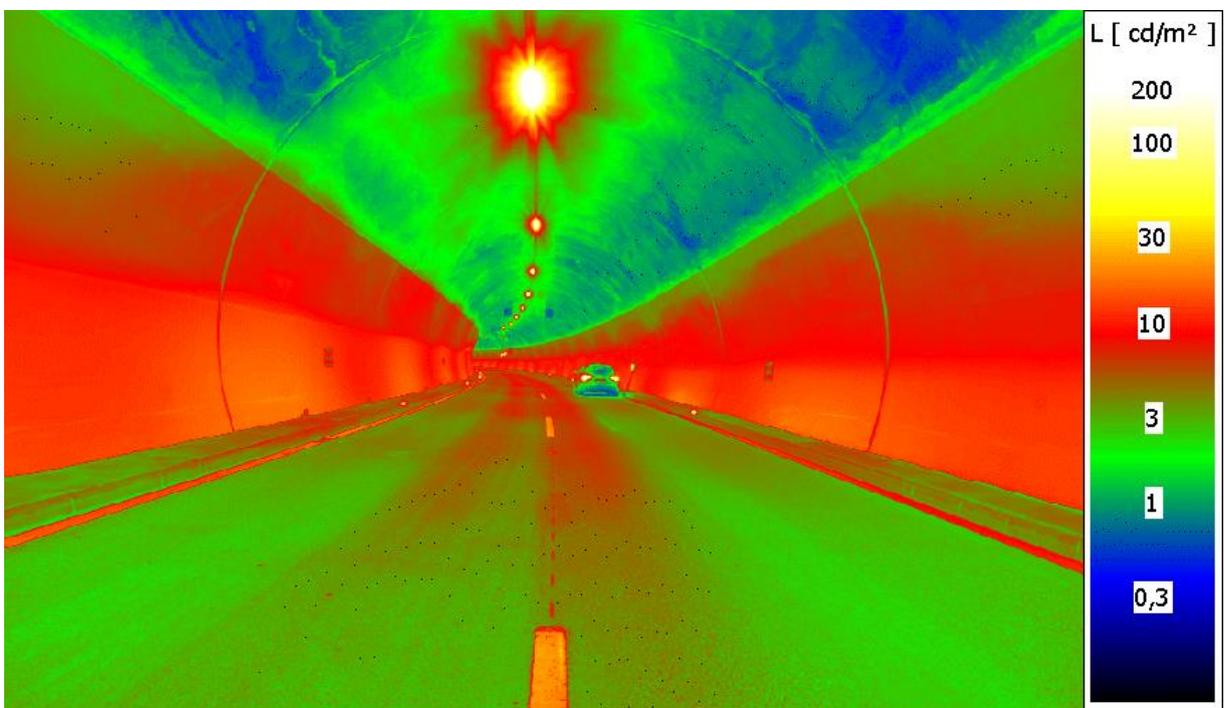


Abbildung 9: Langener Tunnel (gereinigt) - Leuchtdichtebild

Oberfläche: Decke / Wände / Straße <=> Leuchtdichte: 1 / 9 / 6 cd/m²



Abbildung 10: Quadratsch-Tunnel (verschmutzt)



Abbildung 11: Quadratsch-Tunnel (gereinigt)

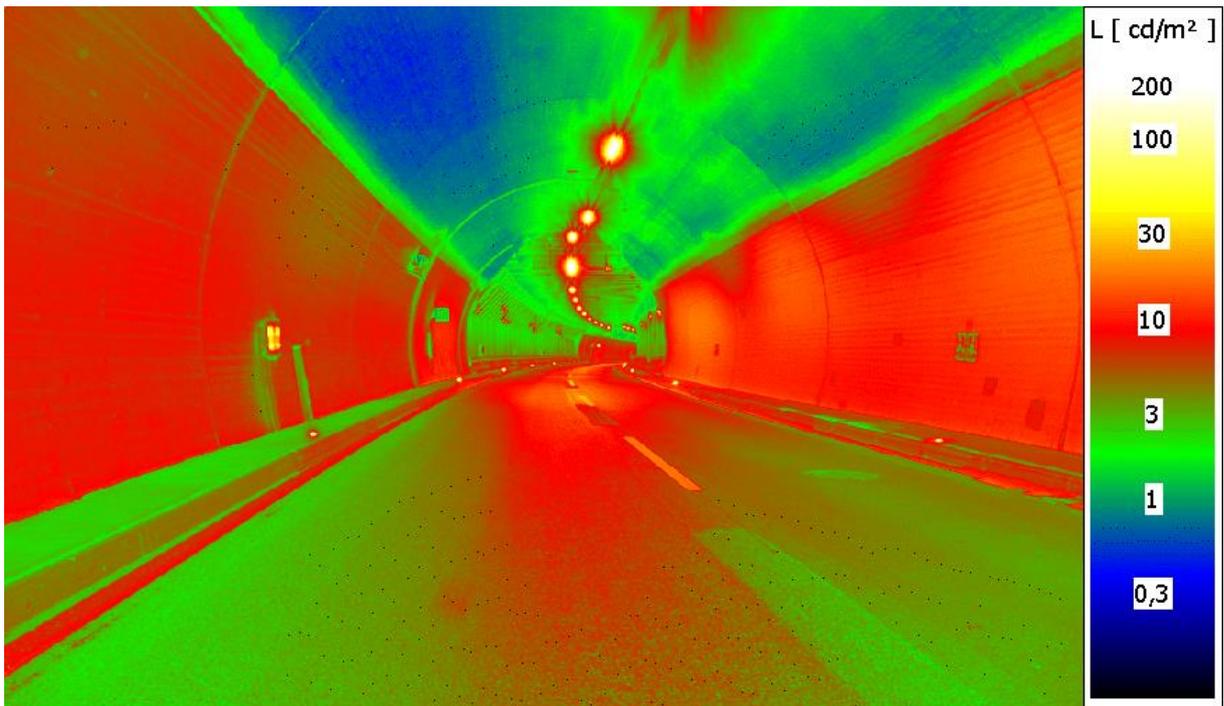


Abbildung 12: Quadratsch-Tunnel (verschmutzt) - Leuchtdichtebild

Oberfläche: Decke / Wände / Straße <=> Leuchtdichte: 1 / 6 / 6 cd/m²

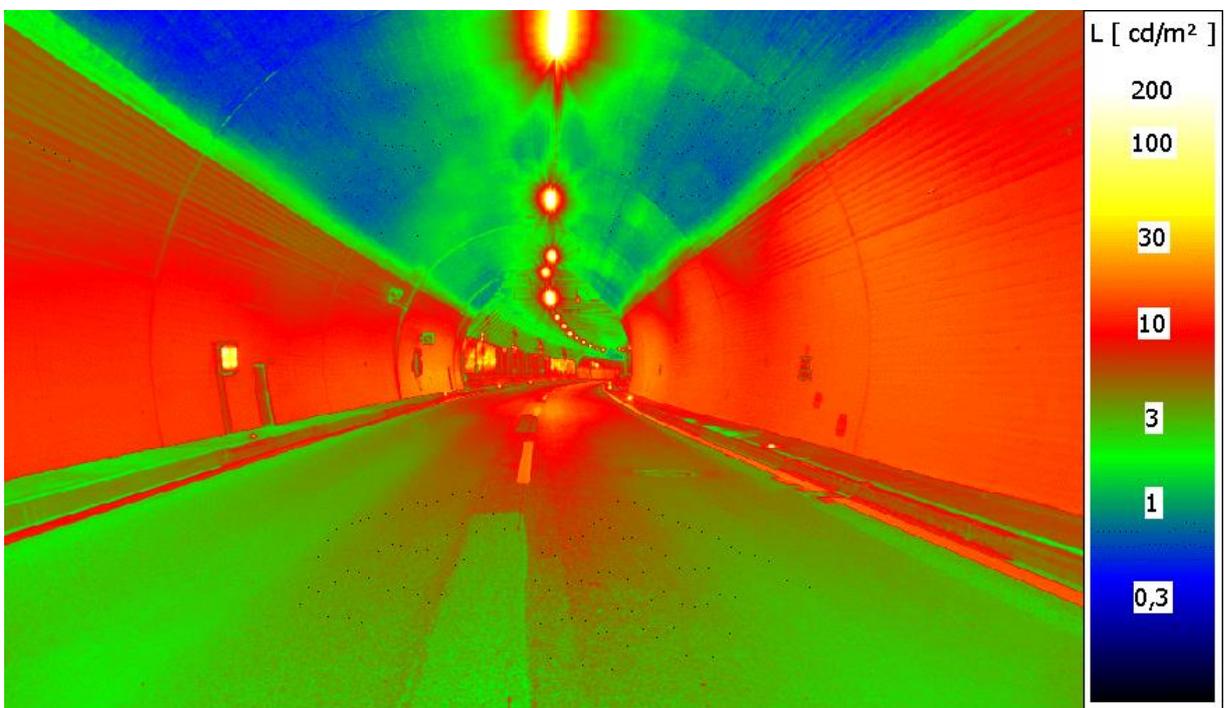


Abbildung 13: Quadratsch-Tunnel (gereinigt) - Leuchtdichtebild

Oberfläche: Decke / Wände / Straße <=> Leuchtdichte: 1 / 9 / 7 cd/m²



Abbildung 14: Perjen-Tunnel (verschmutzt)



Abbildung 15: Perjen-Tunnel (gereinigt)

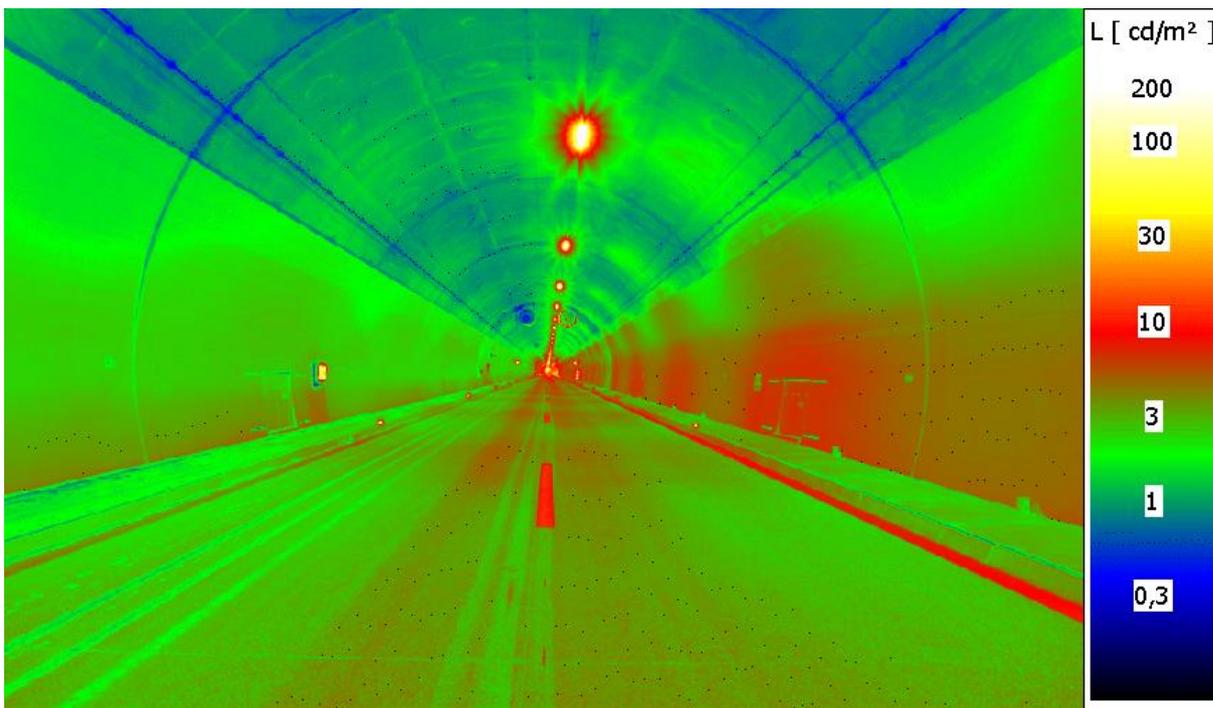


Abbildung 16: Perjen-Tunnel (verschmutzt) - Leuchtdichtebild

Oberfläche: Decke / Wände / Straße <=> Leuchtdichte: 1 / 4 / 4 cd/m²

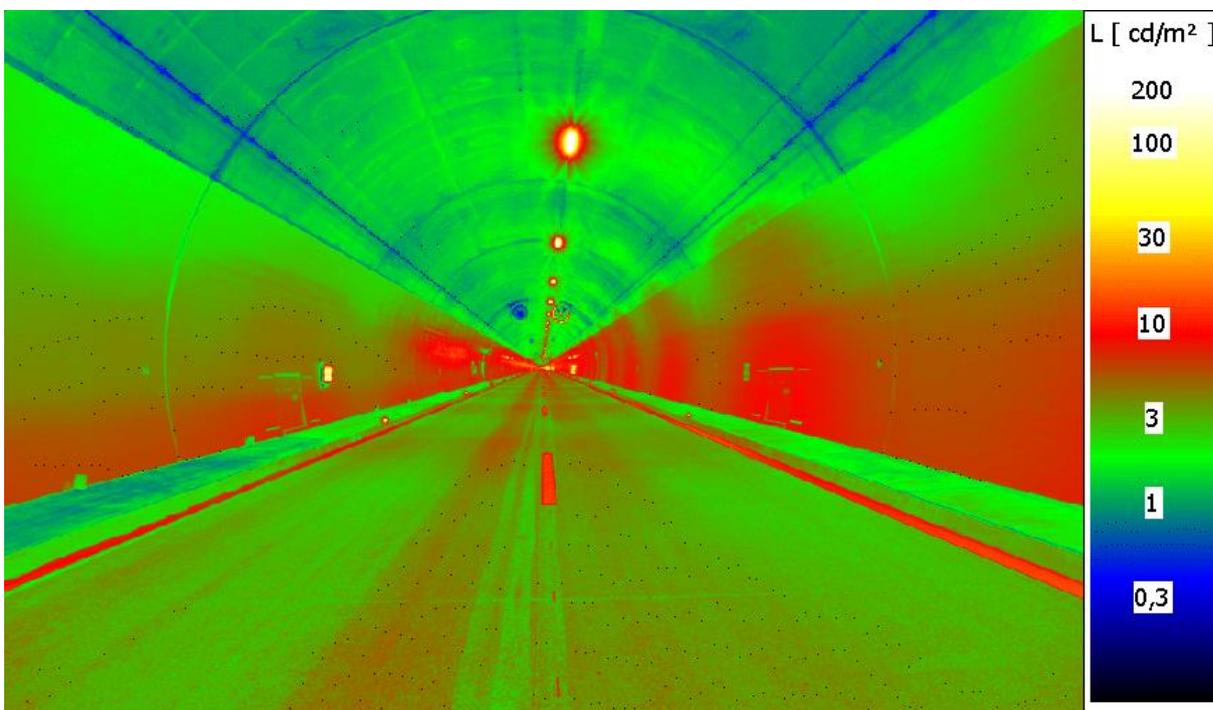


Abbildung 17: Perjen-Tunnel (gereinigt) - Leuchtdichtebild

Oberfläche: Decke / Wände / Straße <=> Leuchtdichte: 1 / 6 / 5 cd/m²



Abbildung 18: Plabutsch-Tunnel (verschmutzt)

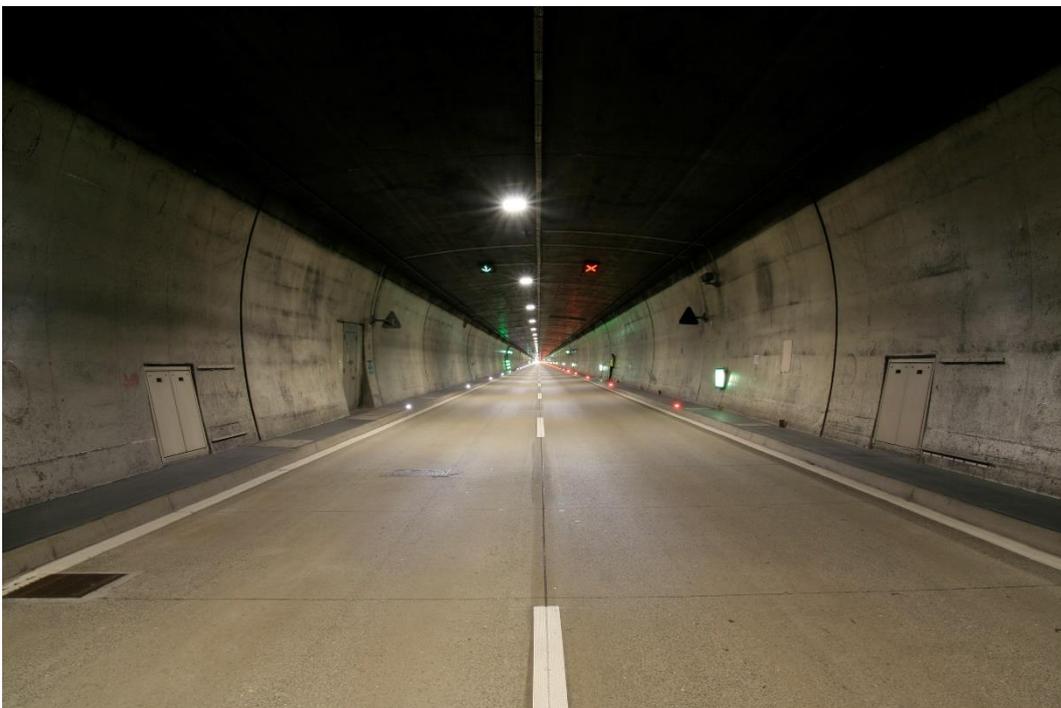


Abbildung 19: Plabutsch-Tunnel (gereinigt)

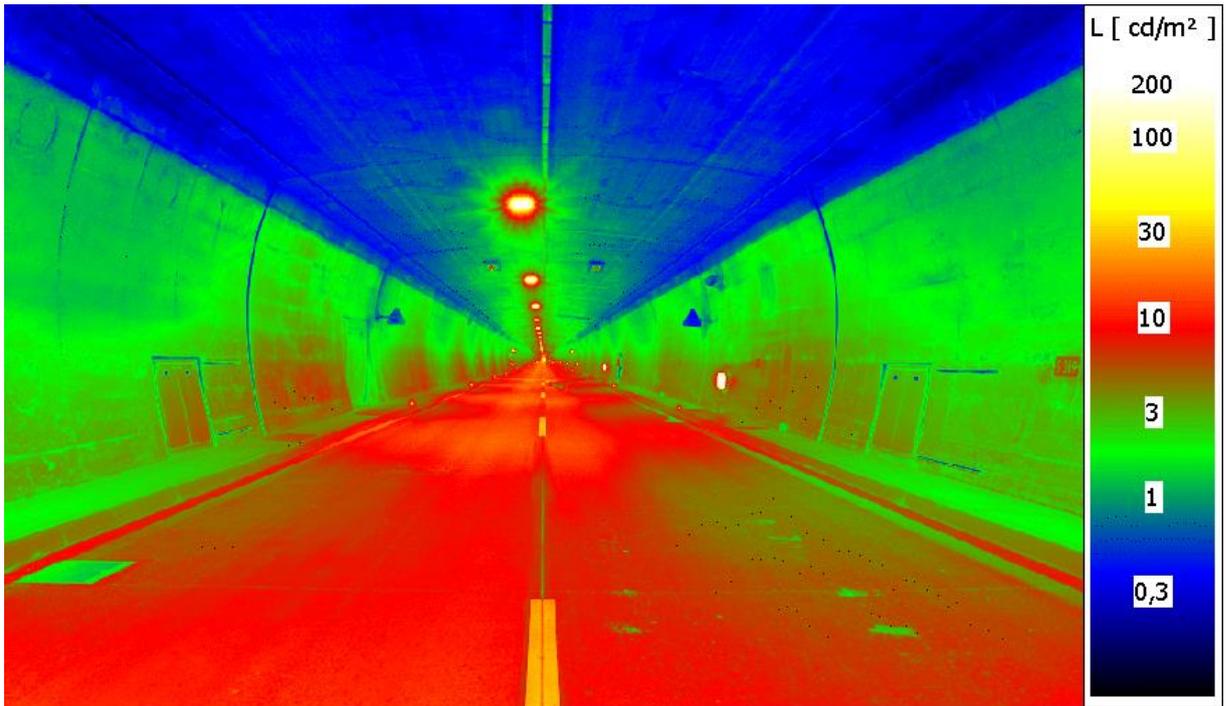


Abbildung 20: Plabutsch-Tunnel (verschmutzt) - Leuchtdichtebild

Oberfläche: Decke / Wände / Straße <=> Leuchtdichte: 1 / 4 / 8 cd/m²

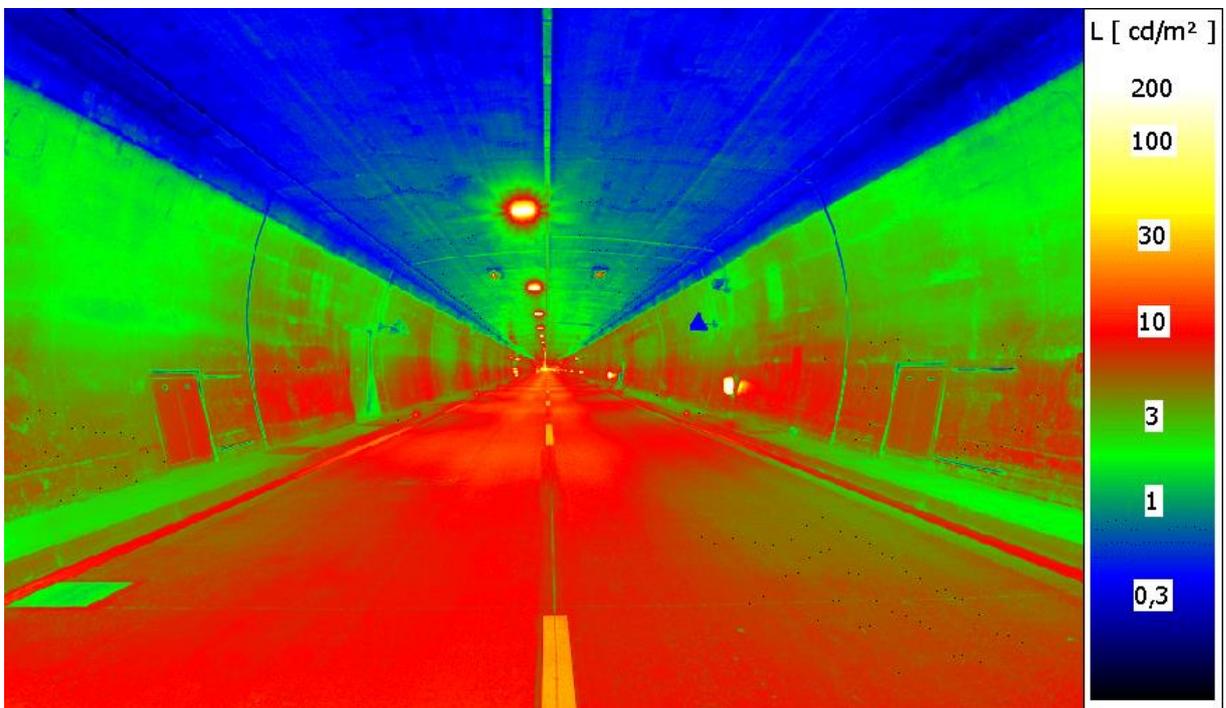


Abbildung 21: Plabutsch-Tunnel (gereinigt) - Leuchtdichtebild

Oberfläche: Decke / Wände / Straße <=> Leuchtdichte: 1 / 6 / 9 cd/m²

Tunnel-Deckenleuchten

Die in den 5 Tunnel-Anlagen eingesetzten Leuchten wurden vor Ort spektral gemessen und zeigen lichttechnische Daten gemäß der beiden folgenden Diagramme auf. Die Farbtemperatur der LEDs war im Pfänder-, Langen- und Perjen-Tunnel ungefähr 5.000K, im Quadratsch-Tunnel ungefähr 4.500K und im Plabutsch-Tunnel ungefähr 4.000K. Der Farbwiedergabeindex lag in etwa zwischen $R_a=70$ und $R_a=80$. All diese Werte entsprechen den Vorgaben lt. RVS.

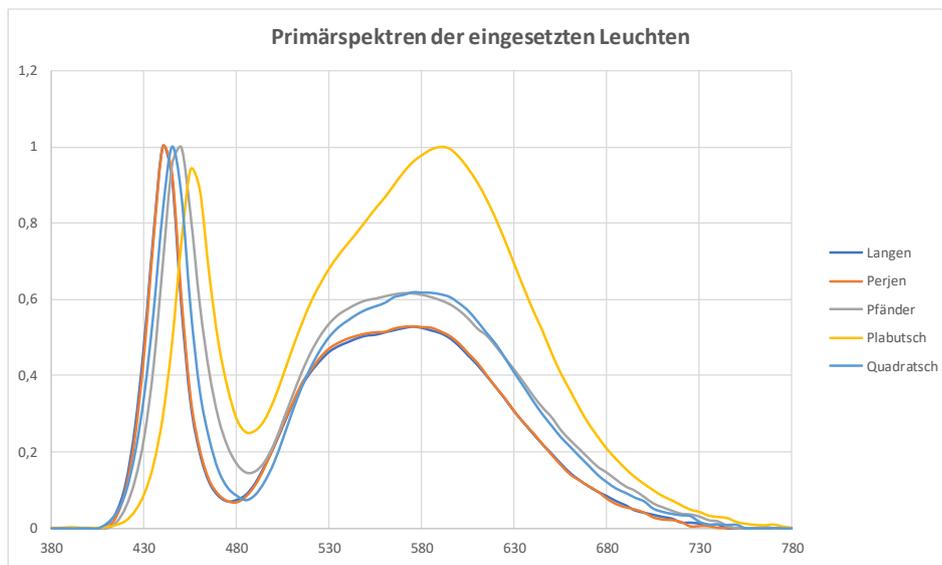


Abbildung 22: Spektrum der LEDs

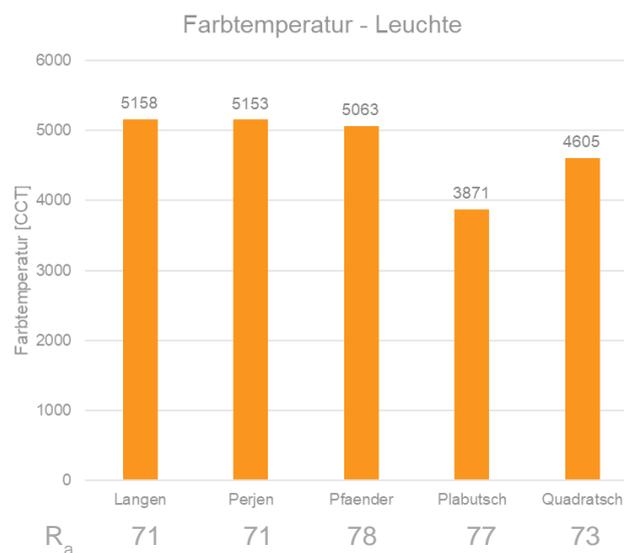


Abbildung 23: Farbtemperaturen und Farbwiedergaben

Gemäß Angaben der Hersteller der Leuchtmittel ist mit folgenden Lichtstromabnahmen der LEDs zu rechnen.

Betriebszeit:	1 Jahr (8.800h)	5 Jahre (44.000h)	10 Jahre (88.000h)
Lichtstromabnahme:	5%	25%	50%

Der durch die halbjährliche Verschmutzung hervorgerufene Abfall der Leuchten-Lichtströme betrug ungefähr 10% (siehe Messbericht). Seitens Bartenbach wird empfohlen, dass auch die Reinigung der Leuchten im Rhythmus von 6 Monaten durchgeführt werden sollte (so wie die Tunnel-Wände).

Tunnel-Wandbeschichtungen



Abbildung 25: Musterplatte im Bartenbach-Labor

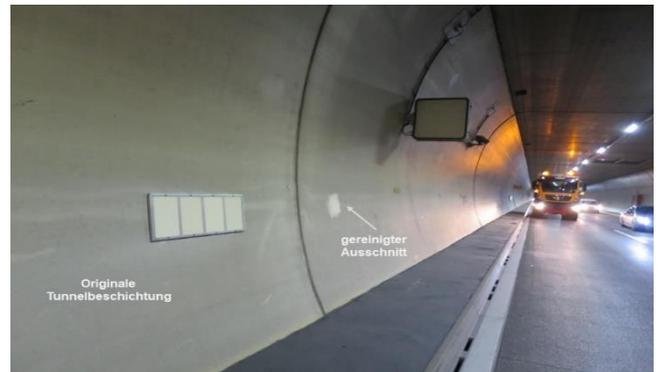


Abbildung 24: Musterplatte im Pfändertunnel

Anforderungen:

Folgende Anforderungen werden an Beschichtungen bzw. Anstrichen der Tunnel-Wände gestellt.

- Lichttechnische Anforderungen
 - Hohe diffuse Reflexionsgrade (Werte größer 60%)
 - Geringes Verhältnis von Glanz-Werten zu Diffus-Werten (kleiner 3)
 - Verbesserung des Wohlbefindens und des Sicherheitsgefühls (Stressreduktion)
- Reduktion von Schmutzablagerungen und Verbesserung der Reinigungsfähigkeit
 - Ziel sind möglichst lange Waschintervalle (wegen Kosten mindestens 6 Monate)
 - Oberflächenrauheit sollte kleiner als Schmutzpartikel sein (Lotuseffekt)
- Stabilität gegen äußere Einflüsse
 - Abgase, Salz, Wasser, UV-Strahlung, Temperatur, etc. führen zu Vergilbung der Material-Oberfläche (gelbliche Farbveränderung) und zum Verlust der Beständigkeit des Material-Bindemittels (Kreidung) => Soll-Lebensdauer mindestens 15 Jahre

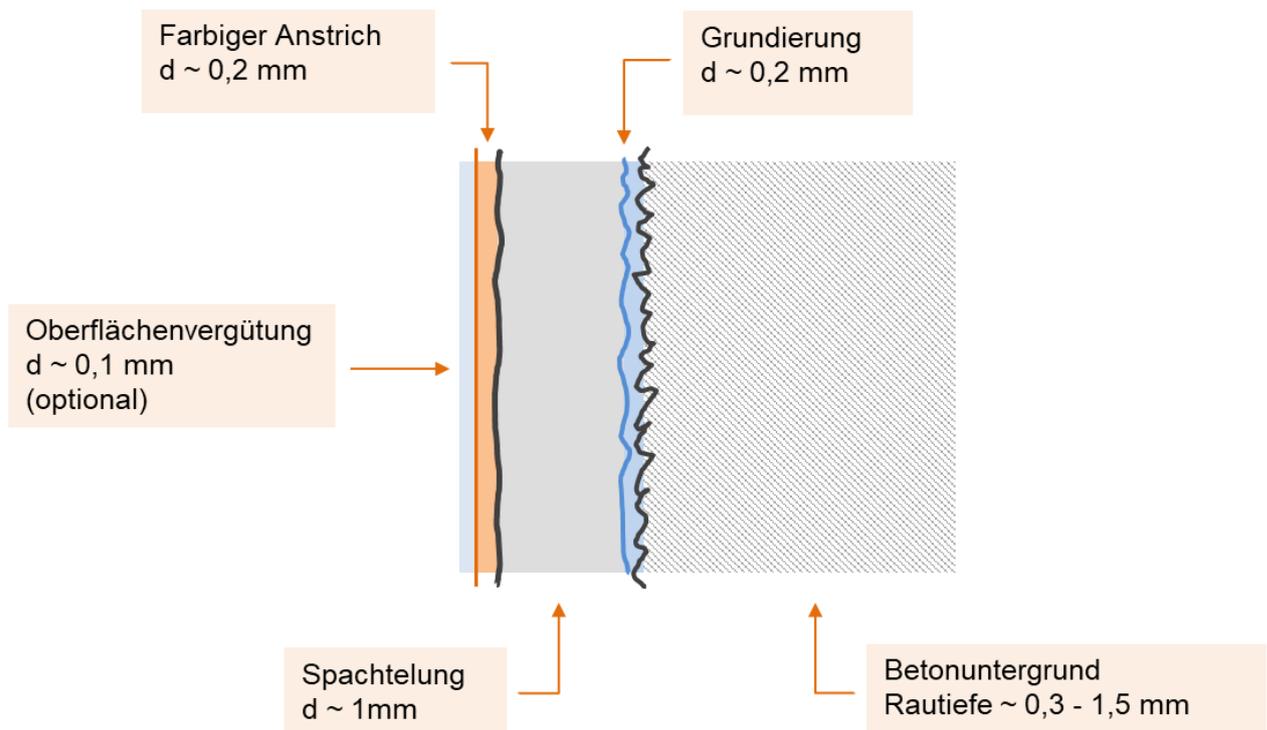


Abbildung 26: Aufbau von Tunnel-Beschichtungen bzw. Tunnel-Anstrichen gemäß dem ÖBV-Merkblatt „Tunnelbeschichtungen“

Richtpreise für eine Erst-Beschichtung bei einem neuen Tunnel (Tunnel-Beton-Oberfläche):

Untergrund-Vorbehandlung UG1:	3
Grundierung:	6
Anstrich 2K PU 0,4mm:	17
Gesamt:	26 €/m ²

Folgende Grundlagen müssen bei der Verschmutzung von Oberflächen berücksichtigt werden.

- Parameter:
 - Mikroskopische Rauheit
 - Oberflächenspannung
- Kontaktwinkel α :
 - Winkel ist primär abhängig von Festkörper und Flüssigkeit
 - Tropfen auf einer flachen, horizontalen Oberfläche als Beispiel
 - Ein großer Kontaktwinkel fördert das Abperlen von Flüssigkeiten
 - Selbstreinigung eines Lotusblattes (kleine Oberflächenspannung)
- Unterscheidung:
 - hydrophil (wasserliebend): $\alpha < 90^\circ$
 - hydrophob (wassermeidend): $\alpha > 90^\circ$
 - superhydrophob (Lotuseffekt): $\alpha > 150^\circ$
- Flüssigkeitsunabhängige Charakterisierung:
 - Oberflächenenergie bzw. Oberflächenspannung



Abbildung 27: Wassertropfen auf einem Lotusblatt

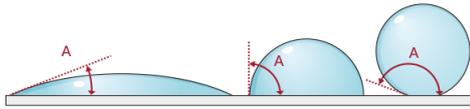


Abbildung 28: Kontaktwinkel

Kontaktwinkel:

- Mikroskopische Oberflächenrauheit:
 - Grobe Rauheit macht Oberfläche hydrophil (wasserliebend)
 - Feine Rauheit macht Oberfläche hydrophob (wassermeidend)
- Chemische Veränderung der Oberfläche:
 - UV-Strahlung
 - Temperatur
 - Wasser
 - Tausalz
 - Abgase

Verschmutzung und Reinigungsfähigkeit:

- Rauheit muss kleiner als Schmutzpartikel sein (siehe Skizze):
 - ansonsten Schmutzablagerungen
 - und schlechte Reinigungsfähigkeit

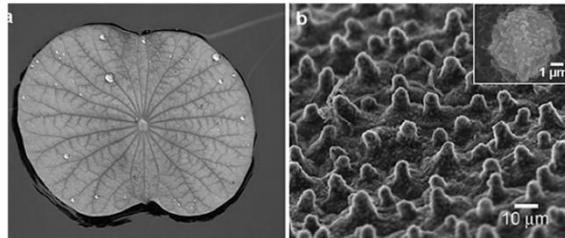


Abbildung 29: Mikroskopische Ansicht eines Lotusblattes

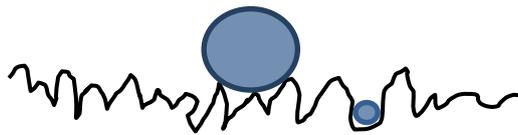


Abbildung 30: Ablagerung von kleinen Schmutzpartikeln

Folgende Punkte tragen zur sichtbaren Alterung der Beschichtungs-Materialien bei.

- Wichtige Einflüsse auf die Oberflächenalterung:
 - UV-Strahlung
 - Temperatur
 - Wasser
 - Tausalz
 - Abgase
- Alterungserscheinungen:
 - Vergilbung (gelbliche Farbveränderung)

- Verlust der Beständigkeit des Bindemittels (Kreidung)
- Absonderung von Farb-Pigmenten (vor allem bei der Reinigung)
- Veränderung der Oberflächenspannung (Erhöhung)
- Erhöhung der Rauheit (Schmutzablagerung)



Abbildung 31: Alter Lack mit Kreidung durch Abrieb; Farbpigmente lösen sich

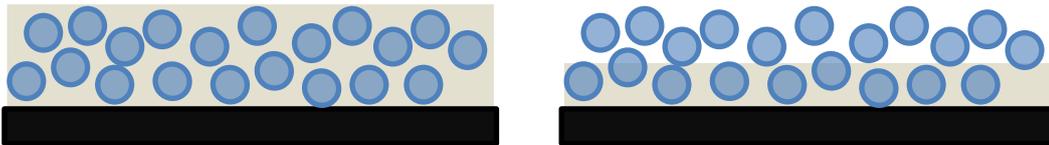


Abbildung 32: Vergleich zwischen neuem Lack (Farbpigmente von Bindemittel umgeben) und altem Lack (Farbpigmente teilweise gelöst)

Material-Studie

Im Kickoff-Meeting wurde seitens der ASFINAG (Hr. Michael Steiner) der Wunsch geäußert, die Tunnelwand-Anstriche hinsichtlich Struktur, Glattheit, Porigkeit, Körnung genauer zu prüfen. Mit Experten aus der Materialtechnik von der Universität Innsbruck und von der Universität Leoben wurde dieser Themenbereich behandelt.

Infinite Focus Mikroskopie

Mittels Mikroskopie (IFM: Mikroskop Alicona G4) können Oberflächen verschiedenster Materialien an der Universität Innsbruck wie folgt charakterisiert werden.

- Rauheit
- Topografie
- 3D-Form
- Abnutzung der Oberfläche

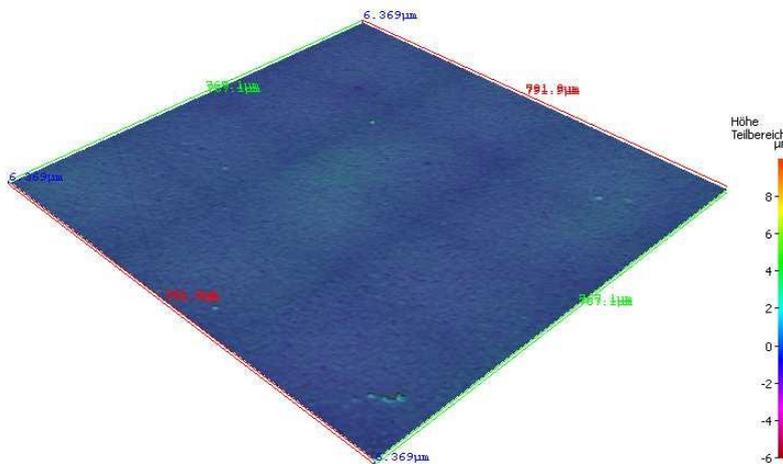


Abbildung 33: Mikroskop Alicona G4

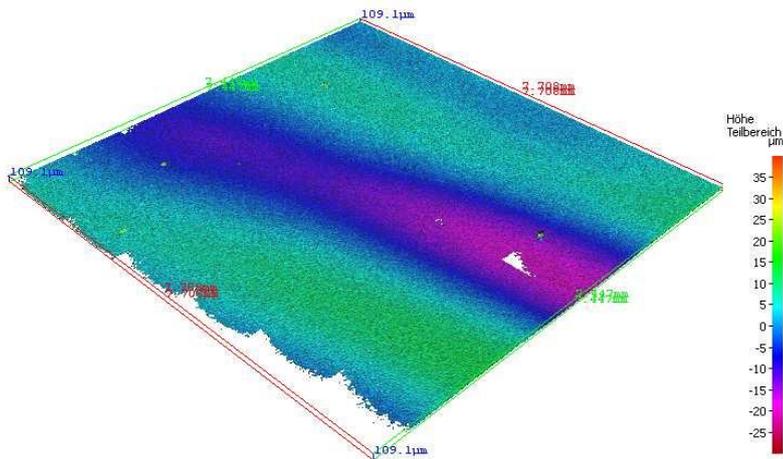
Mithilfe dieses Mess-Verfahrens wurden die z-Werte der Welligkeit bzw. Rauheit (vertikales Maß von „Berg bis Tal“) von vier unterschiedlichen Muster-Platten der Firma Avenarius Agro und Firma Mapei untersucht. Innerhalb von zwei Messfeld-Durchmessern ($d = 10 \text{ mm}$ und $d = 1 \text{ mm}$) wurden diese z-Werte lt. nachfolgenden Angaben erfasst. Detaillierte Informationen sind dem beigelegten Messbericht zu entnehmen.

Die folgenden 4 verschiedenen Beschichtungs-Materialien der Firma Avenarius Agro bzw. der Firma Mapei wurden für die Untersuchung herangezogen, wobei generell der identische Farbton RAL 1015 (Hellelfenbein) zum Einsatz kam.

- Probe 1:
 Agropur TU Coat Flex (Fa. Avenarius Agro) => Polyasparticharz (Schichtdicke 0,4 mm)
 Faserzementplatten-Rauigkeit ähnlich gespachtelter Tunnel-Wand
 Robuste Oberfläche (gespritzt und nachgerollt)
 Welligkeit (Rauheit) innerhalb $d = 10\text{ mm}$: $Z = 0,030\text{ mm}$ und innerhalb $d = 1\text{ mm}$: $Z = 0,002\text{ mm}$
 siehe Messbericht UIBK
 Sehr glänzend (Leuchtdichte-Verhältnissfaktor = Glanzwert zu Diffuswert = 8) lt. Detail-Info
 Diffuser Reflexionsgrad 72%



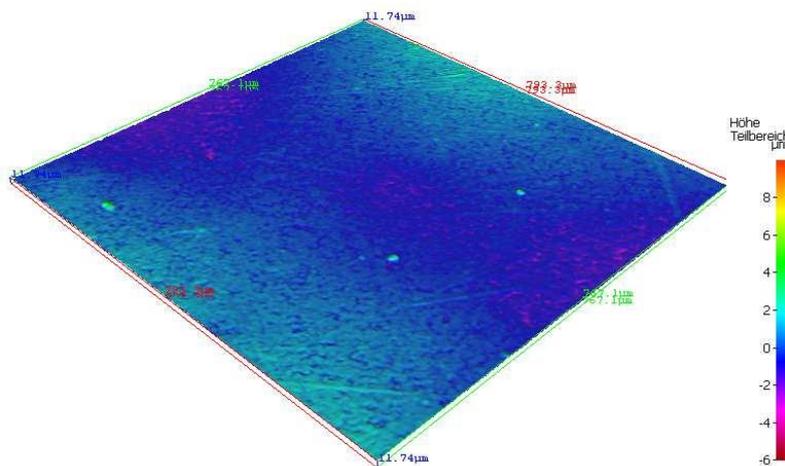
Feldgröße: 1 mm x 1 mm



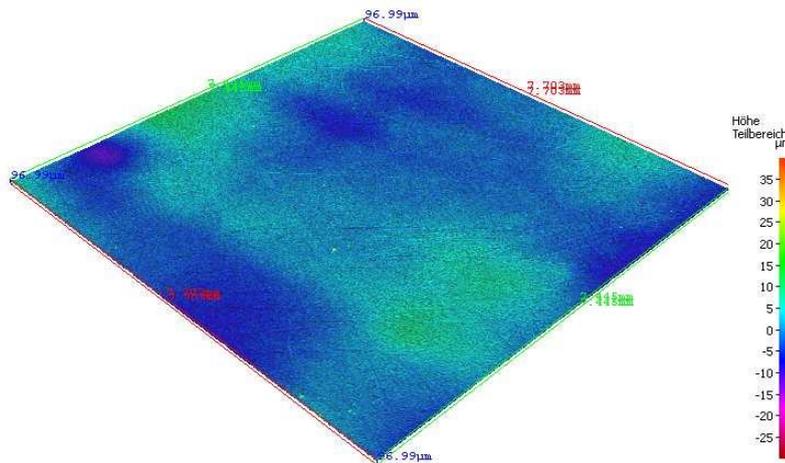
Feldgröße: 10 mm x 10 mm

- Probe 2:

Agropox TU Coat SF (Fa. Avenarius Agro) => Epoxidharz (Schichtdicke 0,3 mm)
 Faserzementplatten-Rauigkeit ähnlich gespachtelter Tunnel-Wand
 Oberfläche kreidet und vergilbt (gespritzt und nachgerollt)
 Welligkeit (Rauheit) innerhalb $d = 10\text{ mm}$: $Z = 0,030\text{ mm}$ und innerhalb $d = 1\text{ mm}$: $Z = 0,004\text{ mm}$
 siehe Messbericht UIBK
 Glänzend (Leuchtdichte-Verhältnisfaktor = Glanzwert zu Diffuswert = 5) lt. Detail-Info
 Diffuser Reflexionsgrad 71%



Feldgröße: 1 mm x 1 mm



Feldgröße: 10 mm x 10 mm

- Probe 3:

Mapecoat SF95 (Fa. Mapei) => Rein-Epoxidharz (Schichtdicke 0,15 mm)

Faserzementplatten-Rauigkeit ähnlich gespachtelter Tunnel-Wand

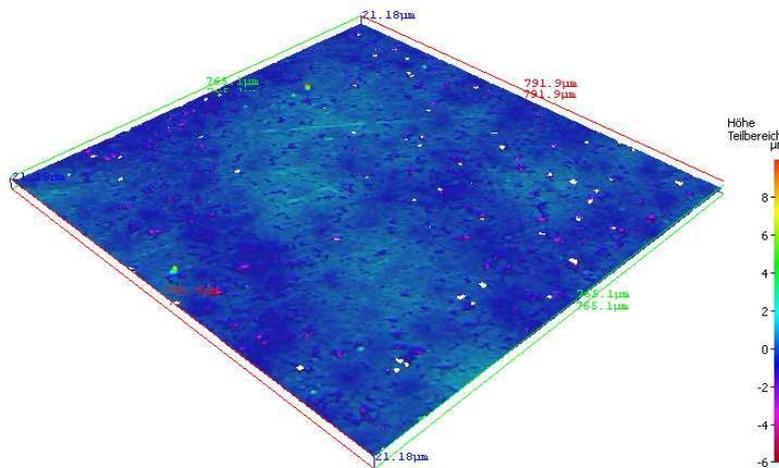
Oberfläche kreidet und vergilbt (gespritzt und nachgerollt)

Welligkeit (Rauheit) innerhalb $d = 10\text{ mm}$: $Z = 0,030\text{ mm}$ und innerhalb $d = 1\text{ mm}$: $Z = 0,003\text{ mm}$

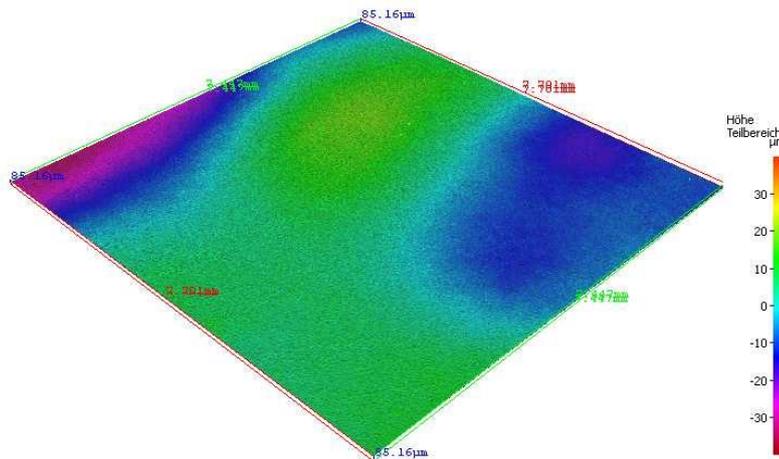
siehe Messbericht UIBK

Relativ matt (Leuchtdichte-Verhältnissfaktor = Glanzwert zu Diffuswert = 4) lt. Detail-Info

Diffuser Reflexionsgrad 72%



Feldgröße: 1 mm x 1 mm



Feldgröße: 10 mm x 10 mm

- Probe 4:

Mapecoat PU T1 (Fa. Mapei) => Polyurethan-Lack (Schichtdicke 0,15 mm)

Faserzementplatten-Rauigkeit ähnlich gespachtelter Tunnel-Wand

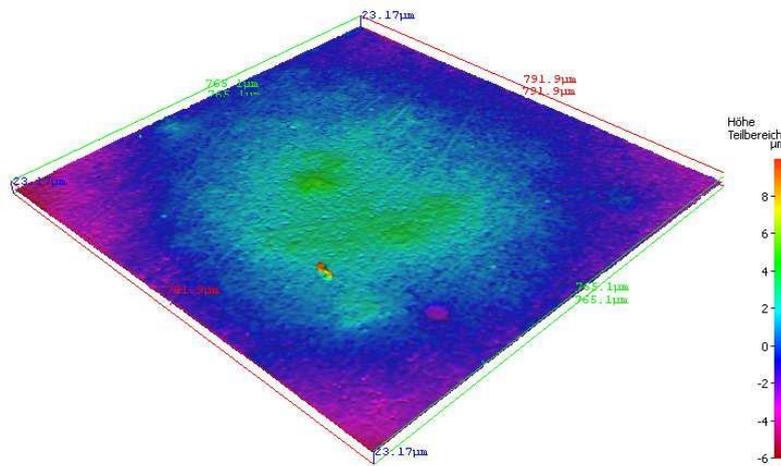
Robuste Oberfläche (gespritzt und nachgerollt)

Welligkeit (Rauheit) innerhalb $d = 10\text{ mm}$: $Z = 0,030\text{ mm}$ und innerhalb $d = 1\text{ mm}$: $Z = 0,006\text{ mm}$

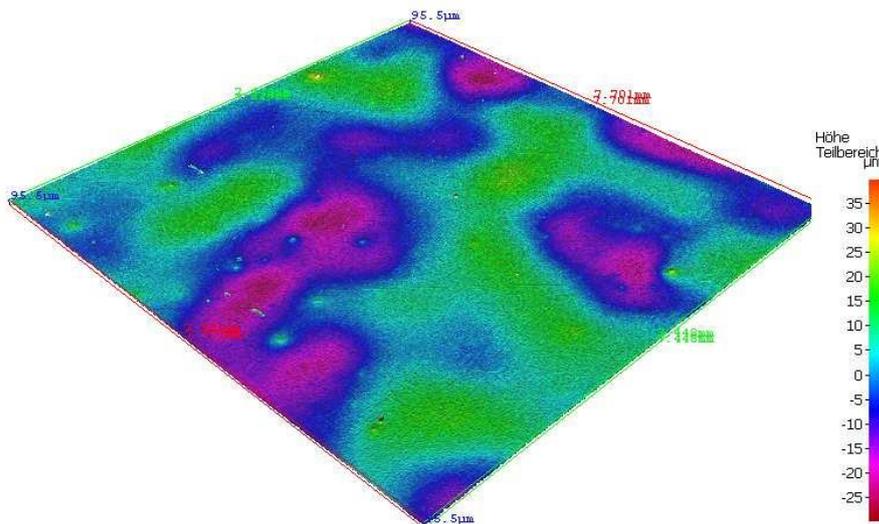
siehe Messbericht UIBK

Matt (Leuchtdichte-Verhältnissfaktor = Glanzwert zu Diffuswert = 3) lt. Detail-Info

Diffuser Reflexionsgrad 66%



Feldgröße: 1 mm x 1 mm



Feldgröße: 1 mm x 1 mm

Spiegelbild-Analyse:

Mit Hilfe von Leuchtdichtebildern wurden die Verhältnisse der mittleren Leuchtdichten zwischen Bereichen mit maximalem Glanz (direkte Reflexion im Material) und Bereichen ohne Glanz (außerhalb der Reflexion) ermittelt.

Faktoren mit Glanzgraden unter 3 sind anzustreben (siehe Probe 4 : Mapecoat PU T1 lt. oben angeführter Tabelle).

Bartenbach empfiehlt die Verwendung von möglichst gering spiegelnden Materialien (Leuchtdichte-Verhältnissfaktor = Glanzwert zu Diffuswert < 3), um eine Ablenkung der Autofahrer möglichst weitgehend zu vermeiden und um ein hohes Sicherheitsgefühl zu vermitteln.

Die durch die linienförmigen Tunnel-Leuchten hervorgerufenen Spiegelbilder in den Tunnel-Wänden bilden sich bei den Musterplatten der 4 verschiedenen Beschichtungs-Materialien der Firma Avenarius Agro bzw. der Firma Mapei wie folgt ab.

Agropur TU Coat Flex
Fa. Avenarius Agro

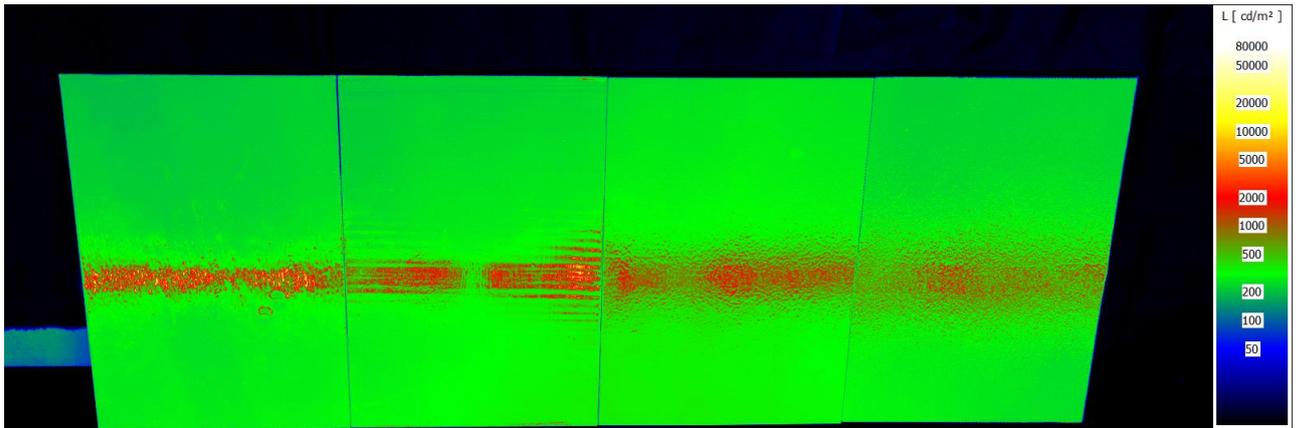
Agropox TU Coat SF
Fa. Avenarius Agro

Mapecoat SF 95
Fa. Mapei

Mapecoat PU T1
Fa. Mapei



**Abbildung 34: Reales Spiegelbild einer linienförmigen Tunnel-Leuchte (im Labor):
Linienbreite 2 cm, Linienabstand 100 cm**



**Abbildung 35: Falschfarben-Spiegelbild einer linienförmigen Tunnel-Leuchte (im Labor):
 Linienbreite 2 cm, Linienabstand 100 cm**

Remissionsverläufe der Messproben

Die folgenden Darstellungen zeigen wellenlängenabhängige Reflexionsgrade der 4 ausgewählten Muster (2 von der Firma Avenarius Agro und 2 von der Firma Mapei).

Dabei ist zu beachten, dass das menschliche Auge eine sehr geringe Hellempfindung für folgende Lichtfarben bzw. Wellenlängen hat:

Blaues Licht (in UV-Nähe unterhalb von 450nm) bzw. Rotes Licht (in IR-Nähe oberhalb von 650nm)

Die spektralen Verläufe dieser Materialien unterscheiden sich nur sehr geringfügig, da all diese Beschichtungen denselben Farbton aufweisen.

Das eingestrahelte Spektrum der Lichtquelle (Tageslicht D65, Temperaturstrahler A oder LED) hat sehr wenig Einfluss auf die erzielbaren Reflexionsgrade, da Hellelfenbein (RAL1015) relativ neutral reagiert.

Eine spektrale Optimierung der Lichtquellen (Tuning) bringt daher keine Vorteile.

Da die spektralen Verläufe und auch die effektiven Reflexionsgrade der gewählten Materialien sich nur sehr geringfügig unterscheiden, kann unter diesem Gesichtspunkt keine der gemessenen Beschichtungen bevorzugt empfohlen werden.

Auch die in den gewählten 5 Tunnel-Anlagen verwendeten Deckenleuchten mit LED-Lichtquellen (TF: 4.000K bis 5.000K bzw. CRI: 70 bis 80) können als gleichwertig angesehen und weiterhin empfohlen werden.

Agropur TU Coat Flex (Fa. Avenarius Agro) => Polyasparticharz (Schichtdicke 0,4 mm)

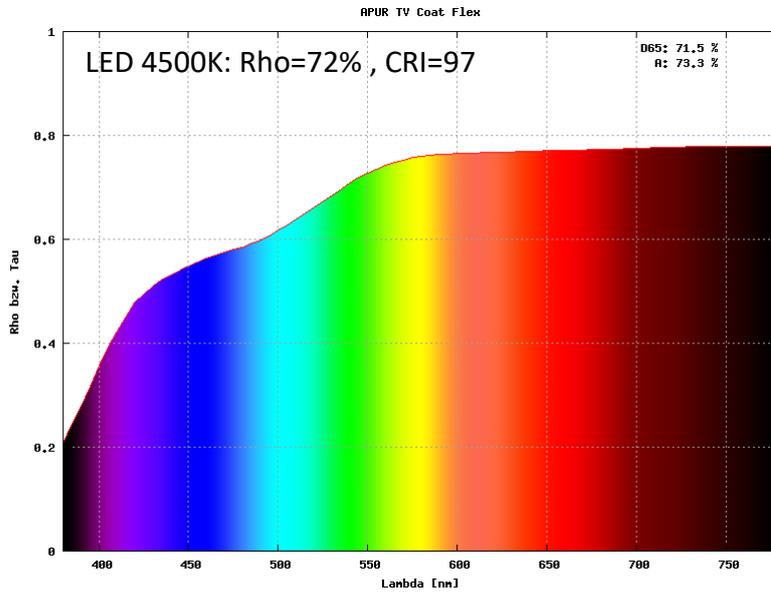


Abbildung 36: Remissionsverlauf Agropur TU Coat Flex

Agropox TU Coat SF (Fa. Avenarius Agro) => Epoxidharz (Schichtdicke 0,3 mm)

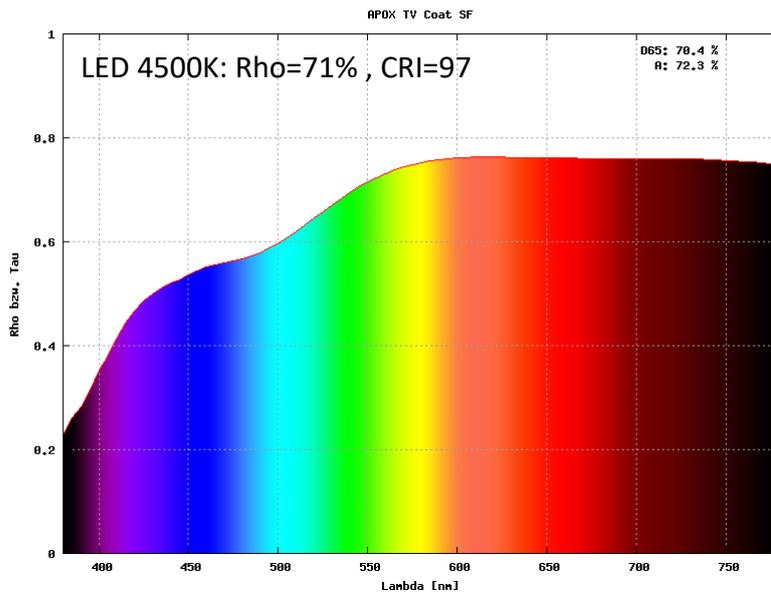


Abbildung 37: Remissionsverlauf Agropox TU Coat SF

Mapecoat SF95 (Fa. Mapei) => Rein-Epoxidharz (Schichtdicke 0,15 mm)

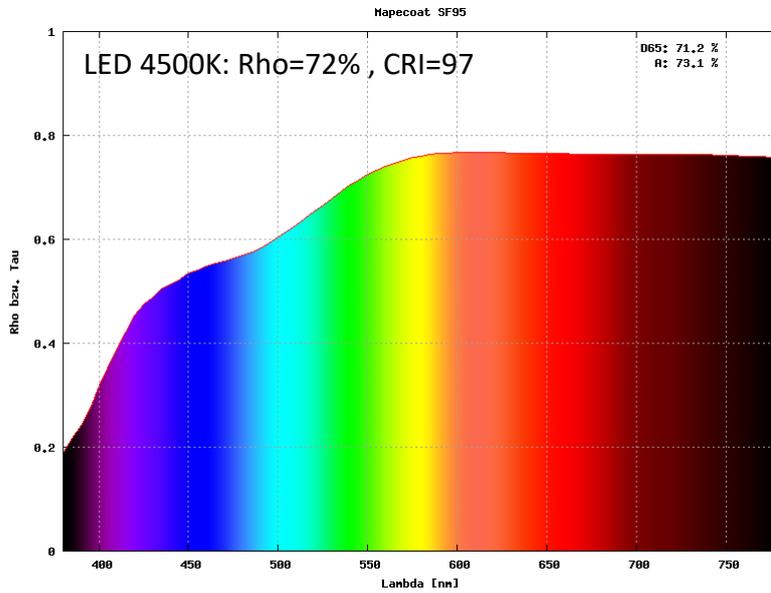


Abbildung 38: Remissionsverlauf Mapecoat SF95

Mapecoat PU T1 (Fa. Mapei) => Polyurethan-Lack (Schichtdicke 0,15 mm)

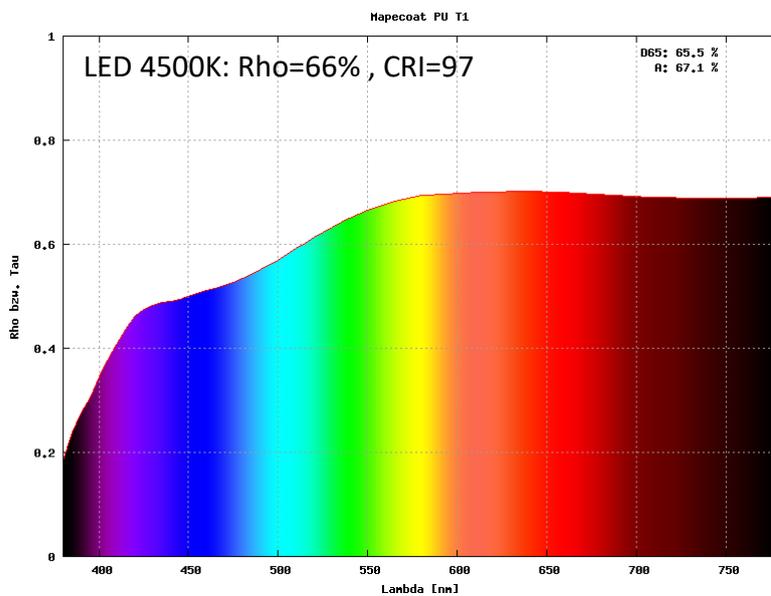


Abbildung 39: Remissionsverlauf Mapecoat PU T1

Empfohlenes Beschichtungs-Material:

Mapecoat PU T1 (Fa. Mapei) => Probe 4

- sehr geringer Glanz => geringe Ablenkung des Fahrers und hohes Sicherheitsgefühl
- ausreichend hoher Reflexionsgrad => relativ ähnlich zu anderen Produkten
- beständig bezüglich Reinigung => hohe Lebensdauer zu erwarten
- sehr robuste Oberfläche => vergilbt und kreidet nicht

AP3: VERSCHMUTZUNG

Einleitung

Die Abnahme des Reflexionsgrades der Wand-Beschichtung im Tunnel hängt von äußeren Einflüssen ab (UV-Strahlung, Temperatur, Wasser, Tausalze und Abgase).

Die vorhandene Menge an Abgasen wird in erster Linie durch die Anzahl und Art der Fahrzeuge bestimmt, welche den Tunnel passieren (hohes oder niedriges Verkehrsaufkommen mit LKW oder PKW). In zweiter Linie sind etwaige Steigungen bzw. Gefälle der Fahrbahn der jeweiligen Tunnel-Anlage entscheidend (hoher bzw. niedriger Schadstoffausstoß).

Messungen

Die 5 ausgewählten Tunnel-Anlagen wurden in halbjährlichen Abständen (Herbst 2019, Frühjahr 2020, Herbst 2020 und Frühjahr 2021) jeweils vor und nach der Reinigung in der Nacht lichttechnisch gemessen.

Dabei wurden nicht nur die Musterplatten, sondern auch die Original-Anstriche wie folgt erfasst.

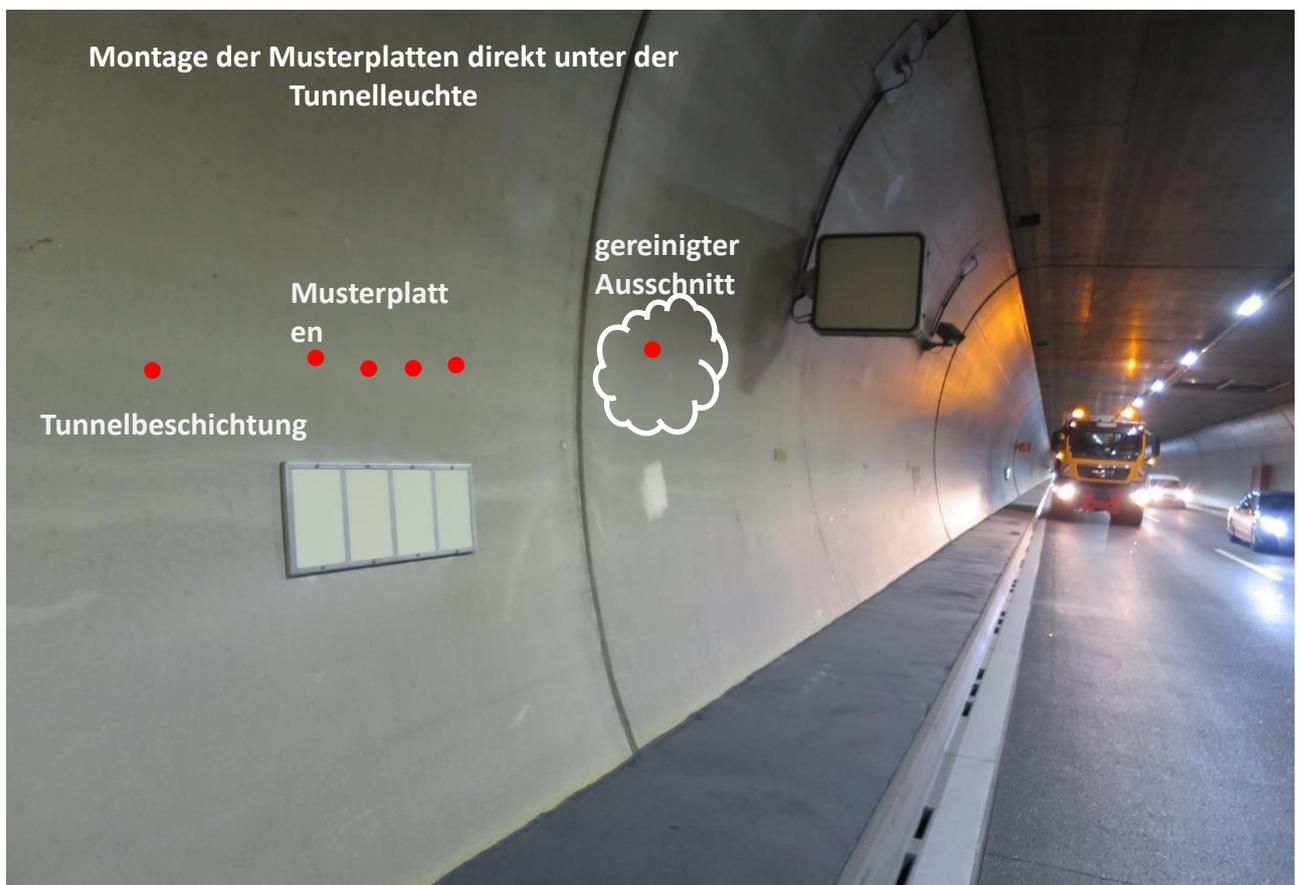


Abbildung 40: Verortung der wichtigsten Messpunkte

Mittels einer zusätzlichen, händischen Reinigung konnte der ursprüngliche Zustand der Tunnel-Wände (punktuell) genau erhoben werden. Folgende Tabelle zeigt die Reflexionsgrade jeweils vor und nach der manuellen Reinigung auf und lässt somit auf den Grad der Verschmutzung rückschließen.

Tunnel	Zustand	E_v	L	rho
Langen	gereinigt	47	10,41	0,70
	ungereinigt	47	7,31	0,49
Perjen	gereinigt	57	10,88	0,60
	ungereinigt	57	7,29	0,40
Pfänder	gereinigt	46	10,69	0,73
	ungereinigt	46	5,41	0,37
Plabutsch	gereinigt	56	8,91	0,50
	ungereinigt	56	6,46	0,36
Quadratsch	gereinigt	66	14,41	0,69
	ungereinigt	66	9,06	0,43

Tabelle 1: Beleuchtungsstärken (E_v in lx), Leuchtdichten (L in cd/m^2) und Reflexionsgrade (rho) der Original-Anstriche im zusätzlich manuell gereinigten und ungereinigten Zustand (10 Wochen nach den maschinellen Reinigungen)

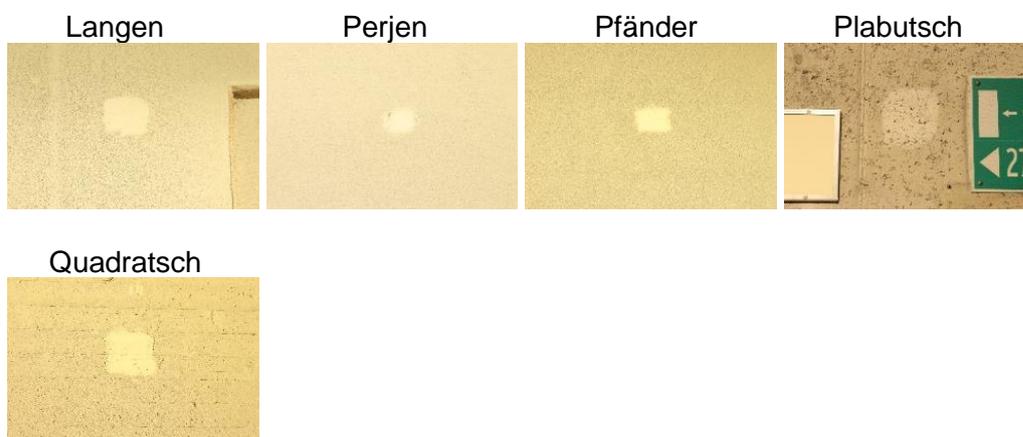


Abbildung 41: Original-Anstriche der Tunnel-Wände (kleine Flächen zusätzlich manuell mit Lappen geputzt, Rest maschinell gereinigt)

Beim Plabutsch-Tunnel sind die Reflexionsgrade aufgrund einer eher alten und sehr löchrigen Oberfläche deutlich niedriger als bei allen anderen Tunnel-Anlagen.

Beim Perjen-Tunnel liegen die Werte aufgrund des zusätzlichen Gegenverkehrs dazwischen.

Anmerkung:

Sowohl die Tunnel-Wände als auch die Tunnel-Decken sollten möglichst homogen und frei von Einschlüssen bzw. frei von Löchern sein, denn ansonsten ergibt sich eine deutlich niedrigere Licht-Reflexion (durch Absorption innerhalb der Poren) und eine deutlich höhere Schmutz-Ablagerung (aufgrund der erschwerten Reinigungsmöglichkeit der Löcher).

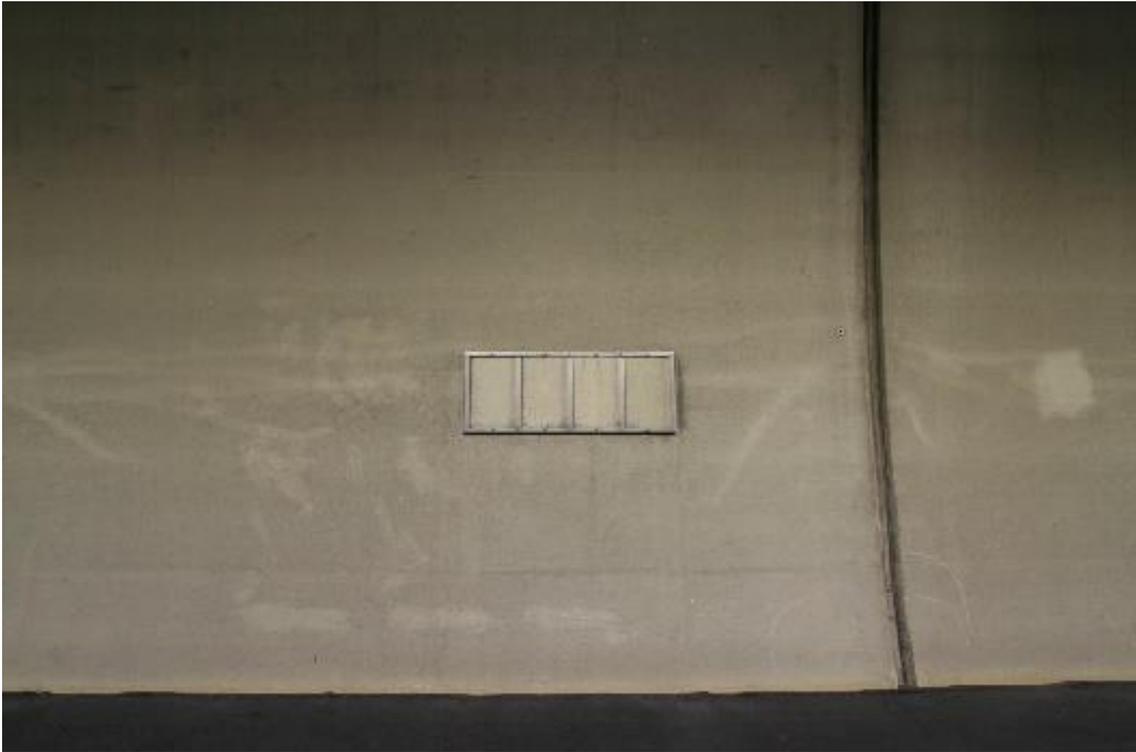


Abbildung 42: Musterplatten im Pfändertunnel (verschmutzt)

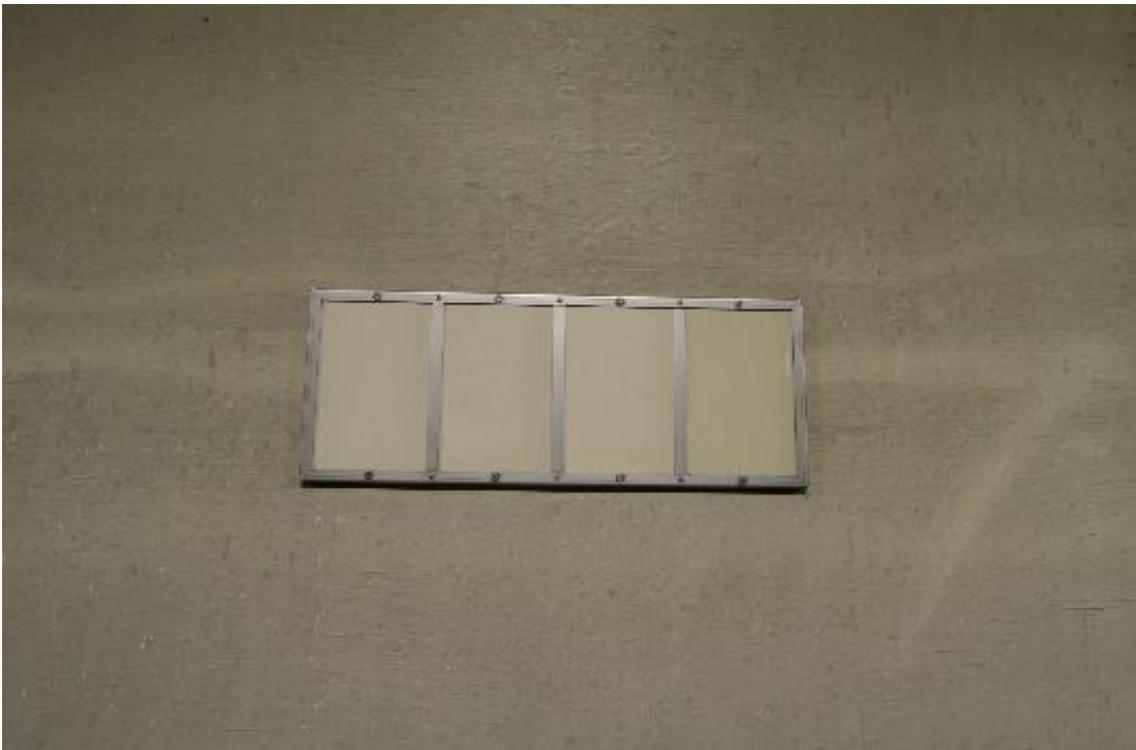


Abbildung 43: Musterplatten im Pfändertunnel (gereinigt)



Abbildung 44: Musterplatten im Langener Tunnel (verschmutzt)

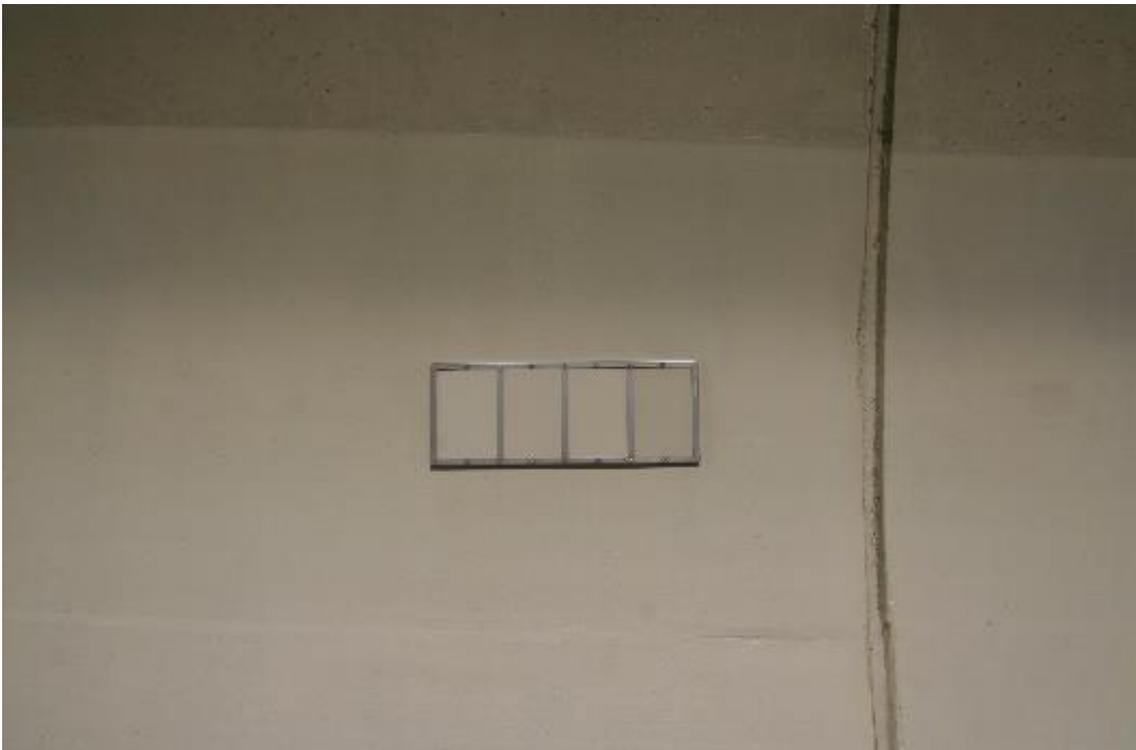


Abbildung 45: Musterplatten im Langener Tunnel (gereinigt)

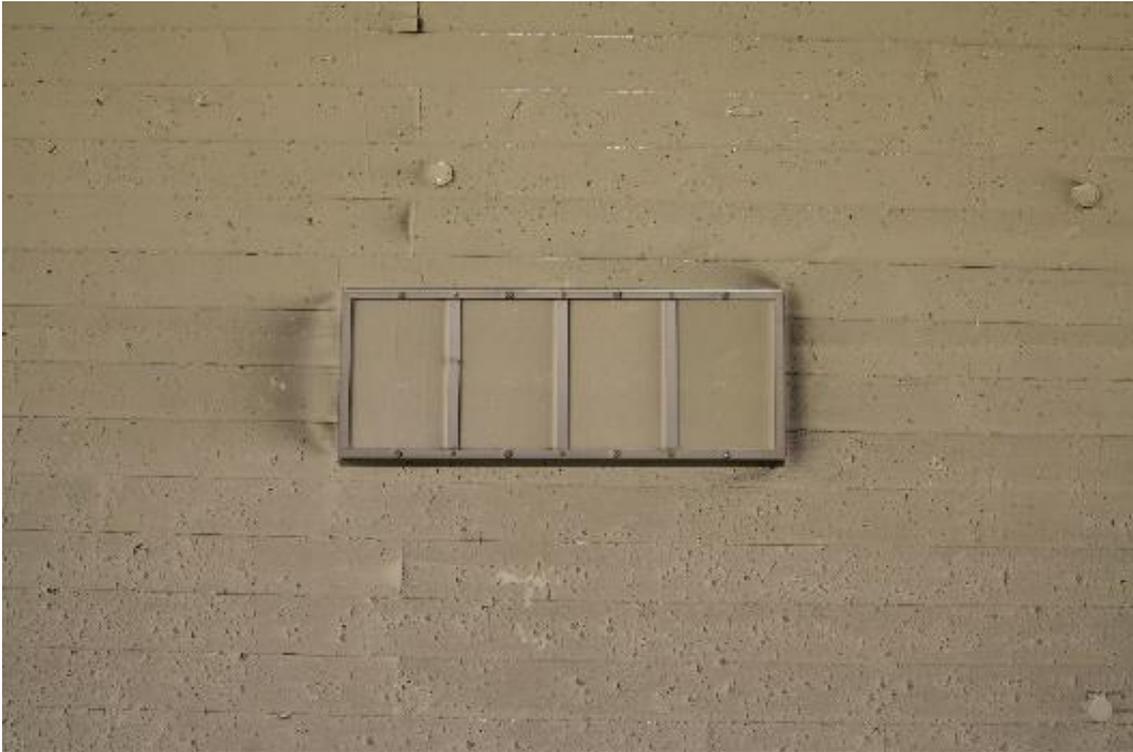


Abbildung 46: Musterplatten im Quadratsch-Tunnel (verschmutzt)

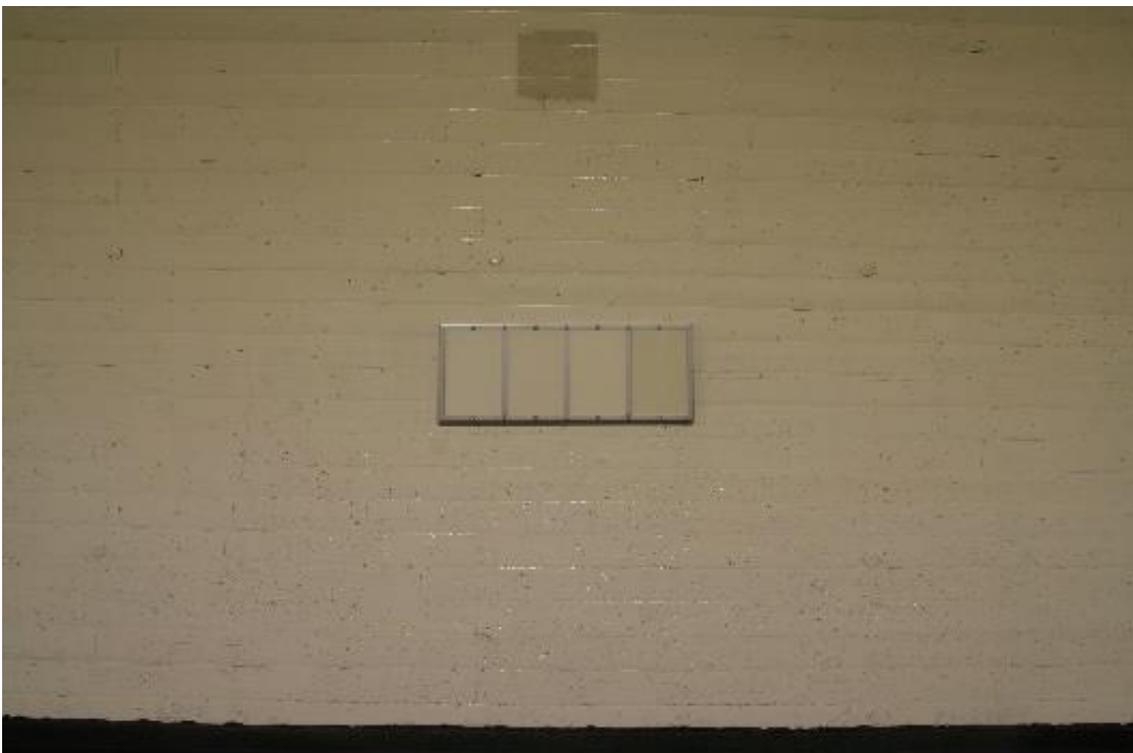


Abbildung 47: Musterplatten im Quadratsch-Tunnel (gereinigt)

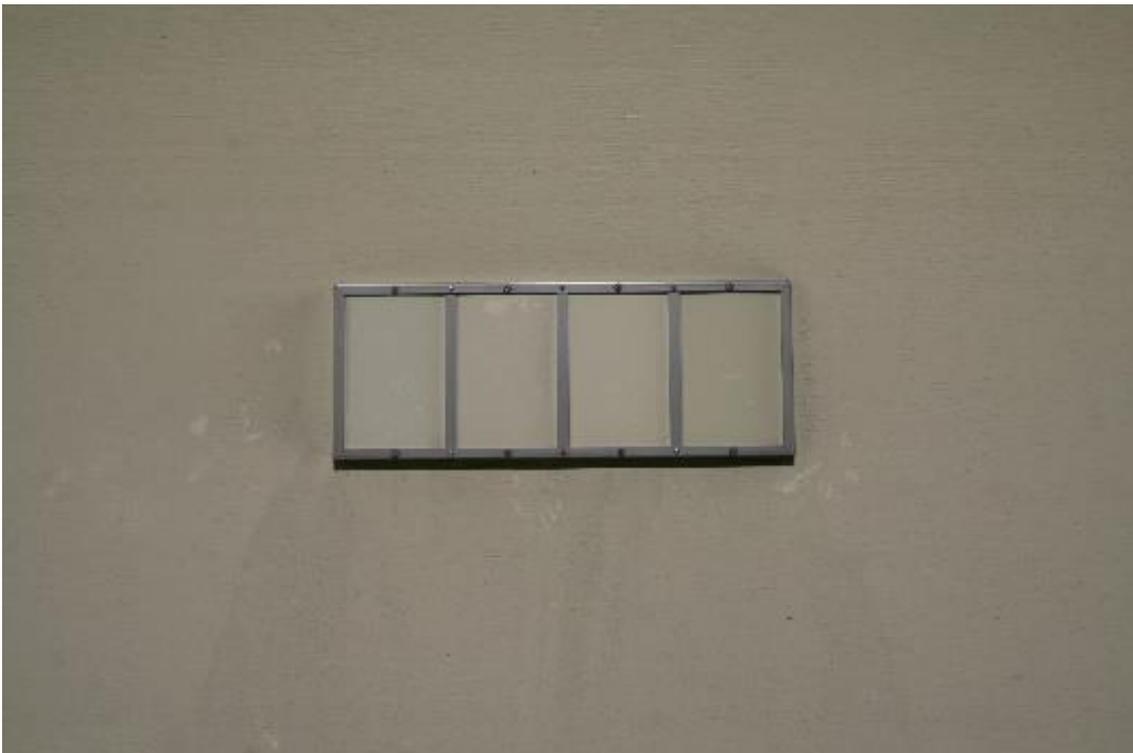


Abbildung 48: Musterplatten im Perjen-Tunnel (verschmutzt)



Abbildung 49: Musterplatten im Perjen-Tunnel (gereinigt)



Abbildung 50: Musterplatten im Plabutsch-Tunnel (verschmutzt)

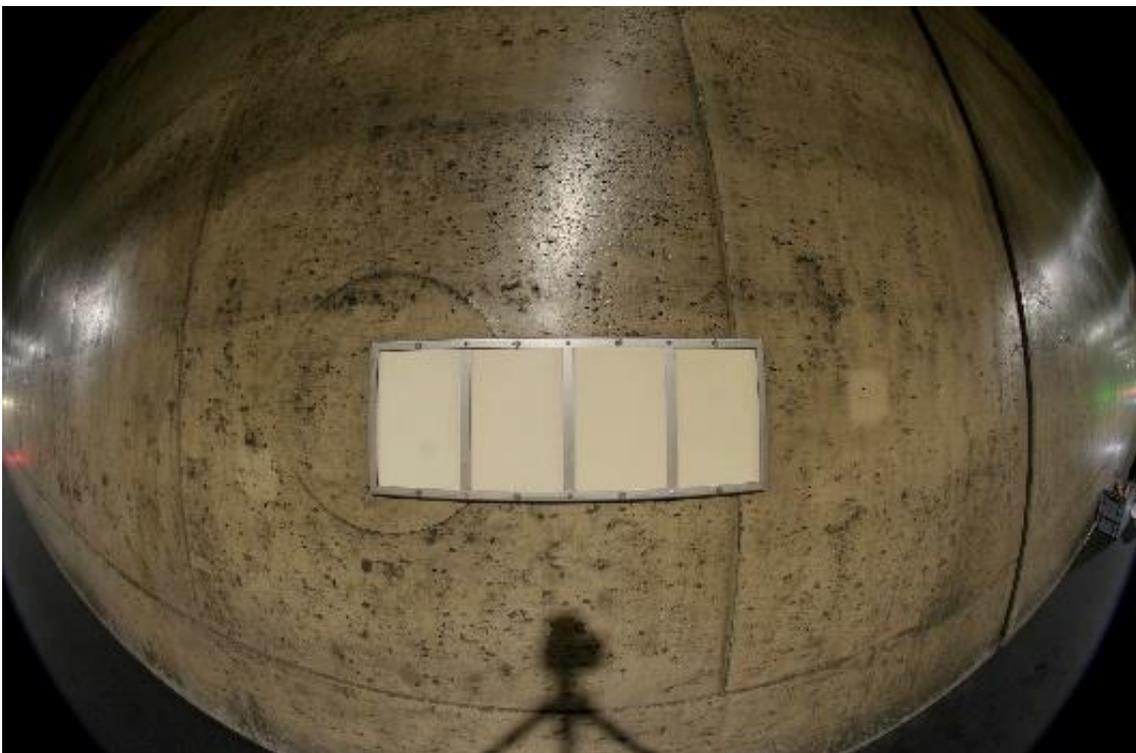
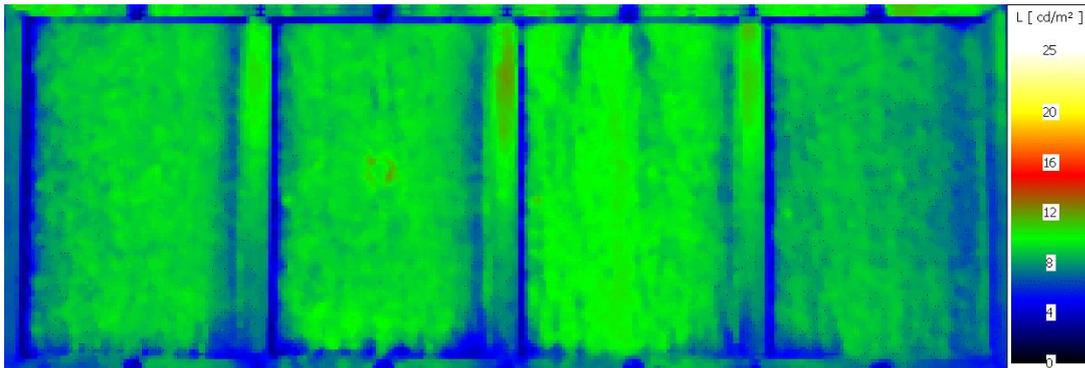


Abbildung 51: Musterplatten im Plabutsch-Tunnel (gereinigt)



Pfändertunnel (Musterplatten vor der Reinigung) => Reflexionsgrade 43% bis 52%

Pfändertunnel (Musterplatten nach der Reinigung) => Reflexionsgrade 54% bis 64%

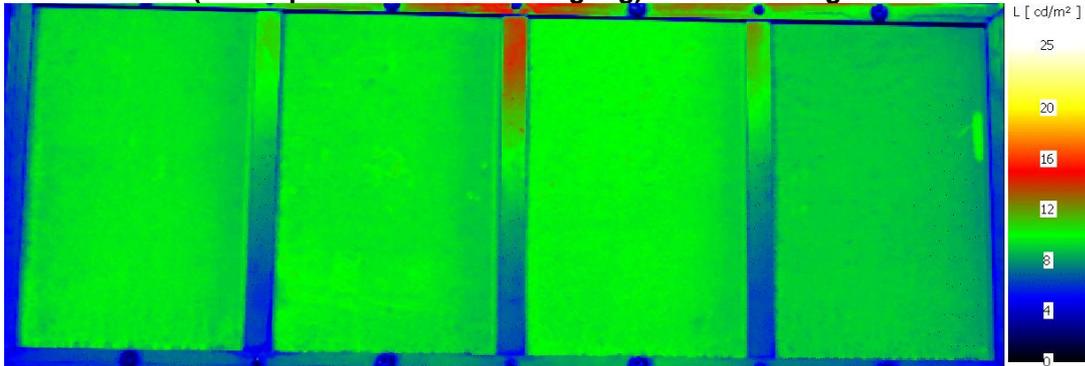
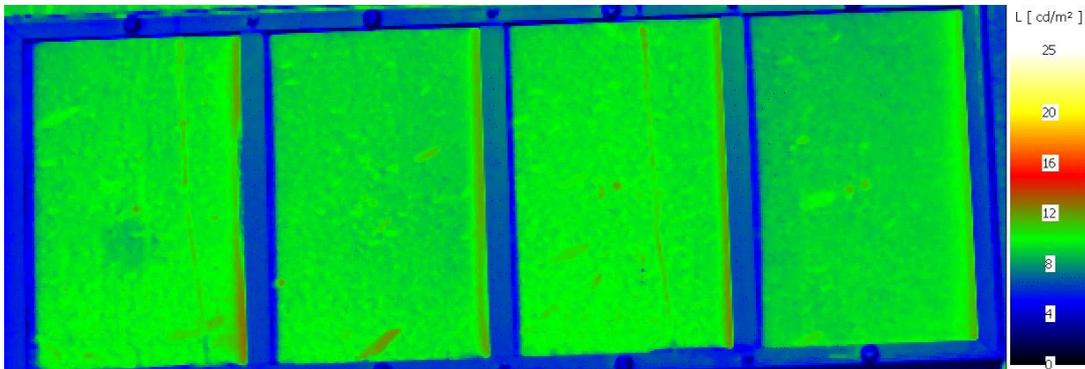


Abbildung 52: Leuchtdichtebilder der Musterplatten im Pfändertunnel



Langener Tunnel (Musterplatten vor der Reinigung) => Reflexionsgrade 51% bis 56%

Langener Tunnel (Musterplatten nach der Reinigung) => Reflexionsgrade 64% bis 71%

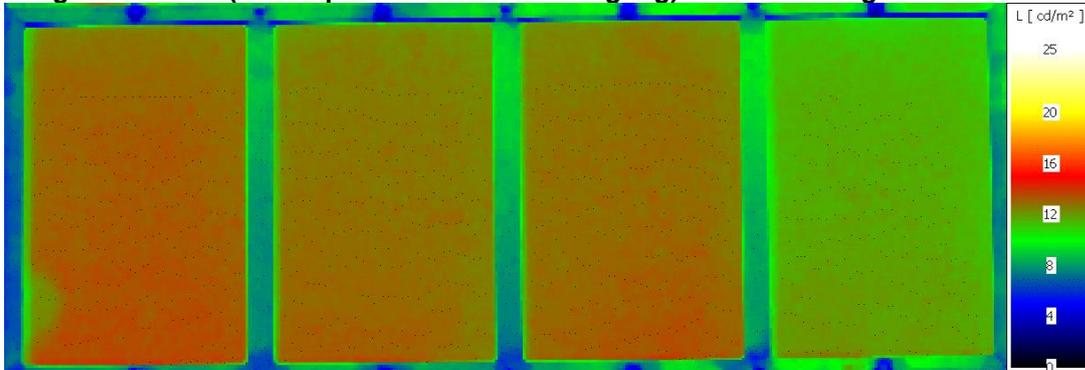
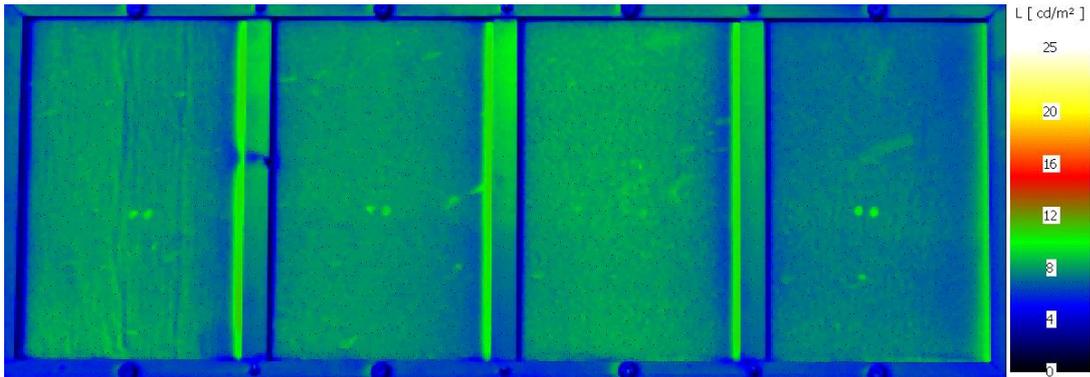


Abbildung 53: Leuchtdichtebilder der Musterplatten im Langener Tunnel



Quadratsch-Tunnel (Musterplatten vor der Reinigung) => Reflexionsgrade 40% bis 45%
 Quadratsch-Tunnel (Musterplatten nach der Reinigung) => Reflexionsgrade 64% bis 71%

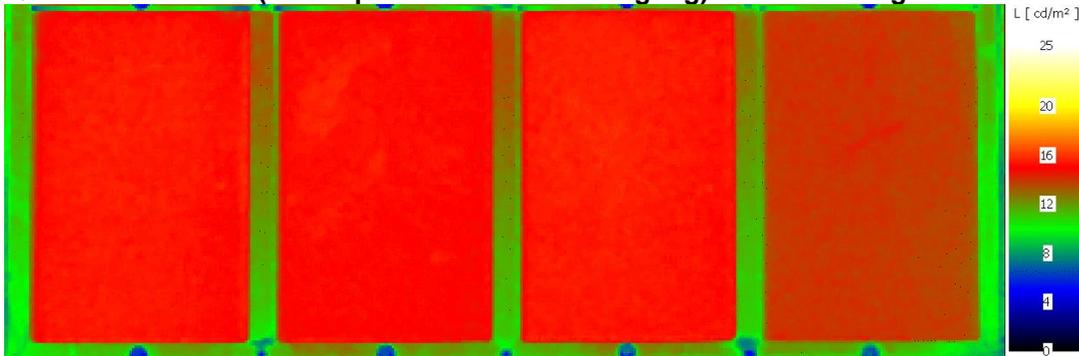
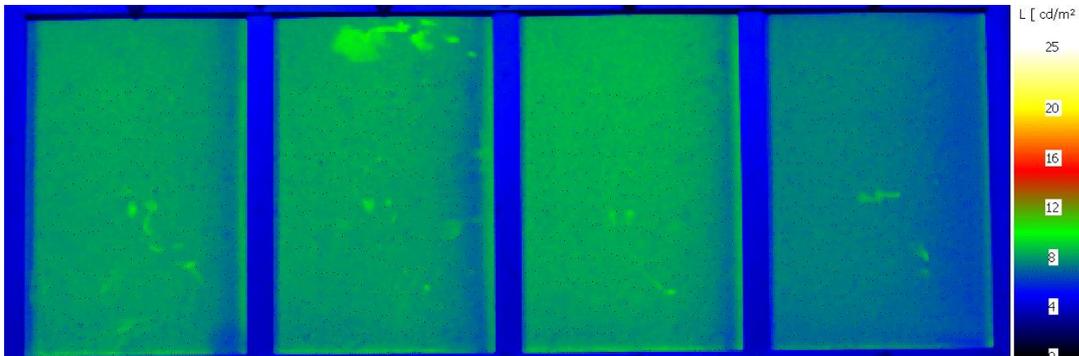


Abbildung 54: Leuchtdichtebilder der Musterplatten im Quadratsch-Tunnel



Perjen-Tunnel (Musterplatten vor der Reinigung) => Reflexionsgrade 46% bis 52%
 Perjen-Tunnel (Musterplatten nach der Reinigung) => Reflexionsgrade 59% bis 63%

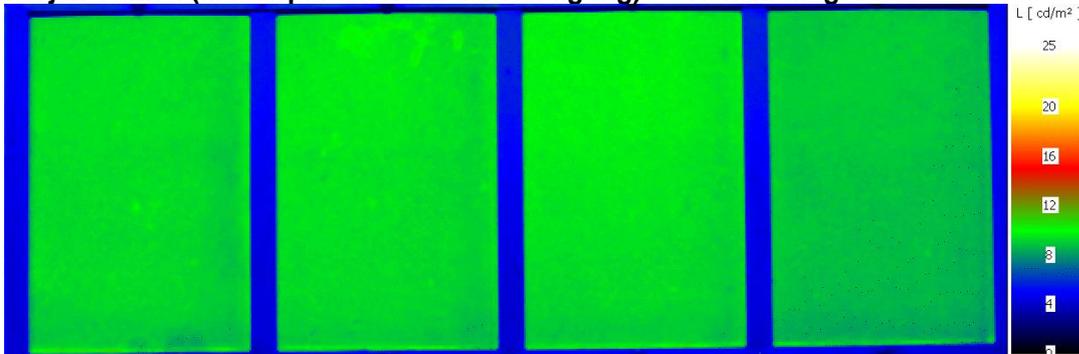
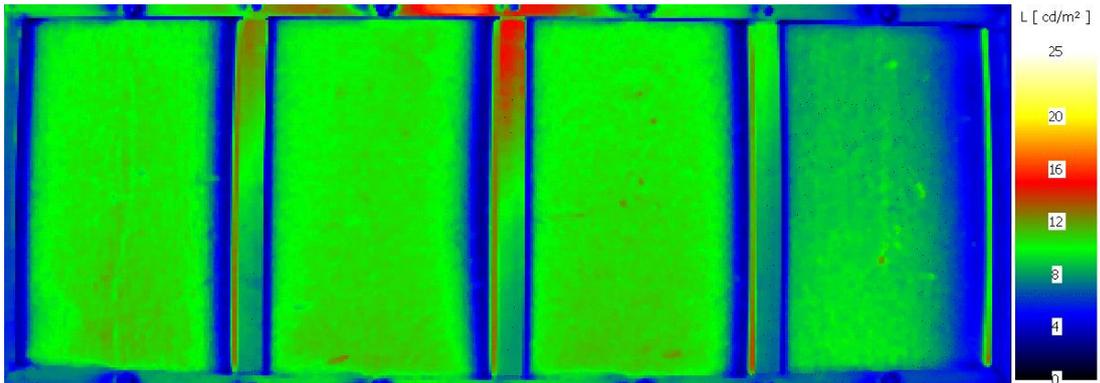


Abbildung 55: Leuchtdichtebilder der Musterplatten im Perjen-Tunnel



Plabutsch-Tunnel (Musterplatten vor der Reinigung) => Reflexionsgrade 40% bis 49%
 Plabutsch-Tunnel (Musterplatten nach der Reinigung) => Reflexionsgrade 66% bis 71%

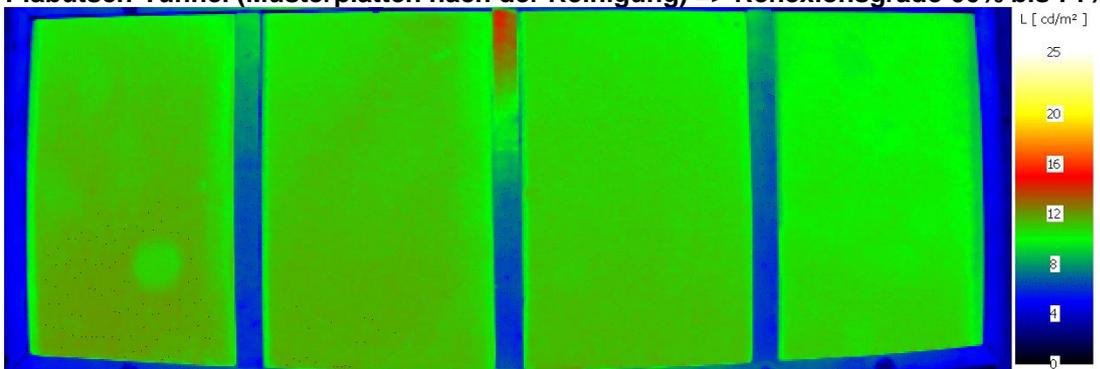


Abbildung 56: Leuchtdichtebilder der Musterplatten im Plabutsch-Tunnel

Zusammenfassung:

Mittelwerte über alle 5 Tunnel-Anlagen im gesamten Beobachtungs-Zeitraum lt. Messbericht

Keine systematische Streuung über Sommer und Winter

	Tunnelleuchten	Tunnelwände
Verschmutzung	Abnahme der Lichtstärke ca. 11% halbjährlich	Abnahme des Reflexionsgrads ca. 35% halbjährlich
Tunnelbeleuchtung	Verstärkte Tunnelbeleuchtung zur Kompensation der Verluste infolge der Verschmutzung + 11%	+ 35%
Tunnelreinigung	Leuchtenreinigung	Wandreinigung

Berechnungsformel:

Wie bereits beschrieben, ist das Reflexionsverhalten der Tunnelbeschichtung ein wichtiger Faktor für die Wahrnehmung des Tunnelraumes und für die Energieeffizienz der Beleuchtung.

Die nachfolgende, obere Grafik zeigt die qualitative Abnahme des Reflexionsgrades der Tunnel-Wände: der ursprüngliche Reflexionsgrad (Neuwert) der Beschichtung nimmt durch Verschmutzung exponentiell ab, und wird durch eine maschinelle Waschung wieder in die Nähe des Neuwertes angehoben. Die Differenz zum Neuwert ergibt sich durch eine Restverschmutzung, die noch nachträglich durch eine händische Reinigung entfernt werden kann. Überlagert wird dieser periodische Verschmutzungs- und Reinigungsvorgang von einer langfristigen Alterung der Beschichtung, hervorgerufen vor allem durch Vergilbung, Kreidung, Absonderung von Farb-Pigmenten bei der Reinigung, und Aufrauung der Oberfläche.

Ausgehend vom Reflexionsgrad der Tunnel-Wand-Beschichtung im neuen bzw. gewaschenen Zustand kann der Reflexionsgrad im verschmutzten und gealterten Zustand mithilfe folgender Exponential-Funktion näherungsweise berechnet werden:

$$\rho_{verschmutzt} = \rho_{gereinigt} \cdot v^m$$

$$\rho_{gereinigt} = \rho_{neu} \cdot v_{Restverschmutzung} \cdot v_{Alterung}$$

wobei

$\rho_{verschmutzt}$	Reflexionsgrad der Tunnelwandbeschichtung im verschmutzten Zustand
$\rho_{gereinigt}$	Reflexionsgrad nach maschineller Waschung
ρ_{neu}	Reflexionsgrad im vollkommen neuen Zustand
v	Verschmutzungsfaktor pro Monat (gemessen 0,89 – 0,94, im Mittel 0,93)
m	Anzahl Monate seit letzter maschineller Waschung
v^m	Verschmutzungsfaktor nach m Monaten
$v_{Restverschmutzung}$	Faktor für restliche Verschmutzung nach maschineller Waschung, die noch händisch entfernt werden kann (gemessen 0,42 – 0,95, im Mittel 0,85)
$v_{Alterung}$	Alterungsfaktor je Monat (Faktor 1, weil Messzeitraum zu kurz)

Mit diesen Größen lässt sich der Reflexionsgrad in Abhängigkeit von der Betriebszeit seit der letzten Waschung, der Restverschmutzung und der Alterung rechnerisch bestimmen:

$$\rho_{\text{verschmutzt}} = \rho_{\text{gereinigt}} \times v^m = \rho_{\text{gereinigt}} \times 0,93^6 = \rho_{\text{gereinigt}} \times \mathbf{0,65}$$

$$\rho_{\text{gereinigt}} = \rho_{\text{neu}} \times v_{\text{Restverschmutzung}} \times v_{\text{Alterung}} = 0,70 \times 0,85 \times 1,00 = \mathbf{0,60}$$

$$\rho_{\text{verschmutzt}} = 0,60 \times 0,65 = \mathbf{0,39}$$

Je nach Wasch- und Oberflächenqualität ergaben die Messungen in den verschiedenen Tunnel stark abweichende Werte. Die Messergebnisse zeigen, dass

- Die Verschmutzung der 4 Oberflächenmuster (Musterplatten) gleich stark erfolgte wie die der Tunnelwand.
- bei den Musterplatten nur geringe Unterschiede zwischen den verschiedenen Oberflächentypen auftraten.
- Beim Verschmutzungsgrad kein systematischer Zusammenhang mit dem Ort der Anbringung im Tunnel (Einfahrts-, Mittel- und Ausfahrtsbereich) gefunden werden konnte.
- Die monatlichen Reflexionsgradverluste durch Verschmutzung Werte zwischen 6% – 11% annehmen, d.h. die monatlichen Verschmutzungsfaktoren zwischen 0,89 – 0,94 liegen.
- Die verbleibende Restverschmutzung sehr stark von der Qualität der maschinellen Waschung abhängt, die gemessenen Faktoren schwanken zwischen 0,42 – 0,95.
- Aufgrund des kurzen Messzeitraums (2 Jahre) kein Alterungsprozess messbar.

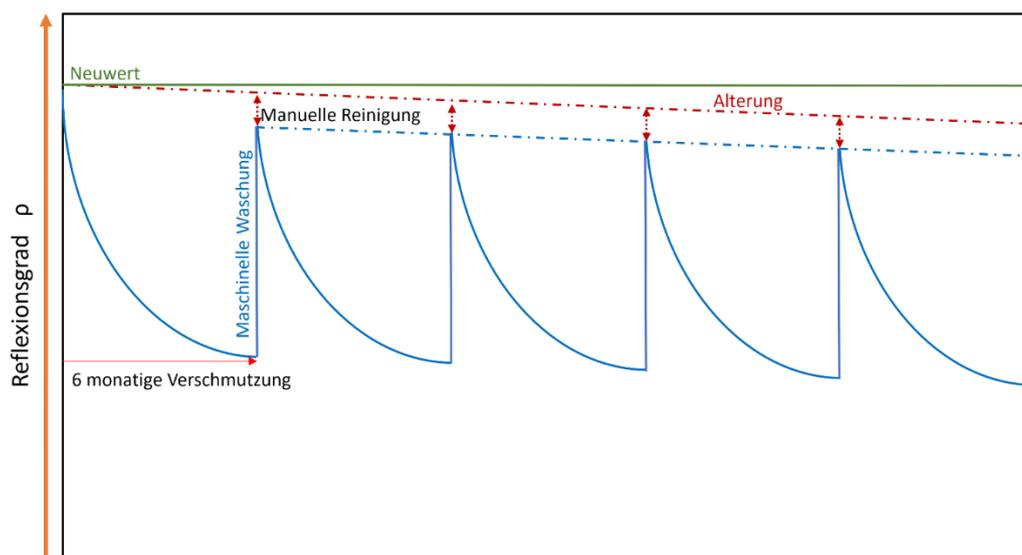


Abbildung 57: Reflexionsgrade ρ (Neuwert 70% => nach 6 Monaten 39%) der Tunnel-Wände mit Reinigungsintervallen

Im Vergleich dazu sieht man in der unteren Grafik das Verhalten ohne jegliche Reinigung im Gubrist-Tunnel (in der Nähe von Zürich in der Schweiz).

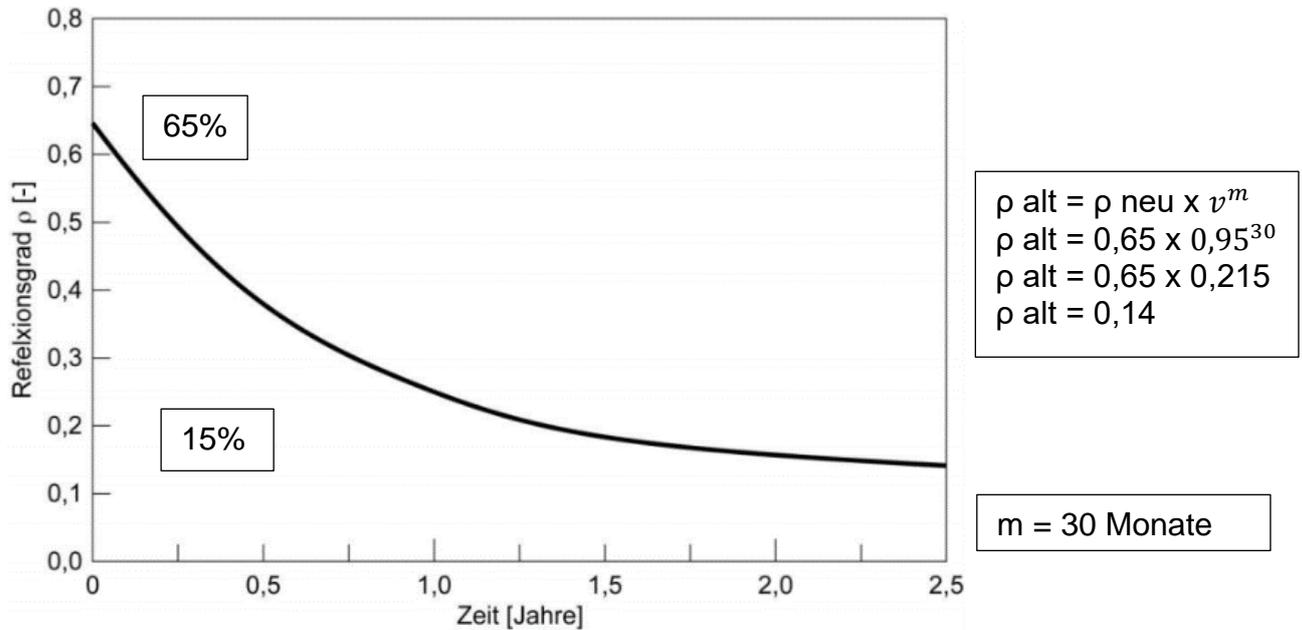


Abbildung 58: Reflexionsgrade ρ (Neuwert 65% => nach 30 Monaten 14%) der Tunnel-Wände ohne Reinigung

Der Verschmutzungsfaktor im Gubrist-Tunnel nach 30 Monaten beträgt $0,95^{30} = 0,215$ (zurückgerechnet aus $0,215 \times 0,65 = 0,14$ aus Grafik), d.h. ähnliche Größenordnung wie in österr. Tunnel - Anlagen (0,93). (Quelle: Daniel Tschudy 2012 „Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung vom Schweizerischen Verband der Straßen- und Verkehrsfachleute“)

Zusammen mit den Oberflächenmessungen wurden auch die Lichtstärken der Leuchten vor und nach den maschinellen Waschungen gemessen, die bei den Leuchten nur in Jahresabständen erfolgte. Die gemessenen Verminderungsfaktoren bezogen auf diesen Jahresabstand schwankten sehr stark zwischen den Werten 0,67 – 0,91 (entspricht 0,8% - 3% Abminderung pro Monat bzw. 5% - 17% pro Halbjahr), es lassen sich aber keine systematischen Zusammenhänge mit Jahreszeiten, Anbringungsorten, etc., daraus ableiten.

Alterungserscheinungen: gealterte Muster versus neue Muster

Es wurde ein kompletter Rahmen mit den vier integrierten Mustern beim Pfänder-Tunnel in Bregenz (in der Nähe des Südportals) Ende März 2021 entfernt, um die zu Beginn des Projektes vermuteten Alterungs-Erscheinungen durch Vergilbung (aufgrund von Einflüssen der Umwelt) und durch Abrieb (aufgrund der halbjährlichen Reinigung) feststellen zu können.

Diese gealterten Muster, welche Mitte Dezember 2019 im Tunnel montiert worden sind, wurden vorsichtig händisch gereinigt und mit den neuen Mustern, welche im Labor besonders geschützt gelagert waren, wie folgt verglichen. Die hier abgebildeten Fotos zeigen die gealterten Muster (15 Monate) und die neuen Muster (0 Monate) im direkten Vergleich.

Agropur TU Coat Flex
Fa. Avenarius Agro

Agropox TU Coat SF
Fa. Avenarius Agro

Mapecoat SF 95
Fa. Mapei

Mapecoat PU T1
Fa. Mapei



Abbildung 59: Gealterte Muster (oben) und neue Muster (unten)



Abbildung 60: Gealterte Muster (oben) und neue Muster (unten)



Abbildung 61: Gealterte Muster (oben) und neue Muster (unten)

Detail-Fotos:

Spiegelbild einer linienförmigen LED-Leuchte (2 cm breit und 200 cm entfernt)

Agropur TU Coat Flex
Fa. Avenarius Agro

Agropox TU Coat SF
Fa. Avenarius Agro

Mapecoat SF 95
Fa. Mapei

Mapecoat PU T1
Fa. Mapei



Abbildung 62: Gealterte Muster (oben) und neue Muster (unten)

Bei allen Mustern war nahezu keine Alterungserscheinung sichtbar, und es war fast derselbe Glanz wie vorher vorhanden. Ausgenommen davon sind Randstellen, wo der Schmutz an den Profilen hängen bleibt.

Der leicht unterschiedliche Farb-Eindruck der Fotos täuscht, denn die Musterplatten wurden vom Tageslicht nicht vollkommen gleichmäßig ausgeleuchtet. Die unter verschiedenen Blickrichtungen erstellten Bilder zeigen recht deutlich, dass sich unterschiedliche Bereiche der Umgebung in den Musterplatten spiegeln und somit den Farb-Eindruck verändern.

Bei den gealterten Mustern konnten keine nennenswerten Schmutzeinlagerungen festgestellt werden.

Der Alterungs-Zeitraum von 15 Monaten ist offensichtlich zu kurz, um solche Effekte nachweisen zu können.

Mithilfe eines neuen Forschungsprojektes könnten die Langzeitauswirkungen sämtlicher Einflüsse auf die Wand-Beschichtungen im Tunnel-Innenraum messtechnisch erfasst, ausgewertet, analysiert und dokumentiert werden.

Dabei könnten beispielsweise nützliche Erkenntnisse bzgl. des Abriebes durch Reinigung und Vergilbung durch Alterung der Wand-Beschichtungen über längere Zeiträume gewonnen werden.

Reinigungsverfahren der Tunnelanlagen

Pfänder-Tunnel

Aufgrund der vielen Sicherheitseinrichtungen, welche an den Decken und Wänden montiert sind, entschied man sich für die Beschaffung einer sehr effizienten Tunnel-Waschmaschine. Diese reinigt sämtliche Oberflächen mittels Wasser unter Hochdruck (Waschbalken mit Düsen). Früher wurden zusätzlich Bürsten verwendet, welche sogar eine noch bessere Reinigungswirkung erzielten. Seit dem Jahre 2013 wird folgendes Reinigungs-Verfahren angewandt.

Zuerst fährt ein Unimog mit Waschmittel vor der Tunnel-Waschmaschine und trägt dieses im ersten Durchgang an der Decke und an den Leuchten auf. Nach einer kurzen Einwirkzeit spritzt die Tunnel-Waschmaschine Wasser mit Hochdruck an die Decke und an die Leuchten und reinigt diese so gut wie möglich. In den weiteren Durchgängen werden dann die Wände im gleichen Schema gewaschen. Die Beleuchtung wird jedoch nur im Frühjahr mitgewaschen.

Langener Tunnel, Quadratsch-Tunnel und Perjen-Tunnel

Hier wird grundsätzlich dasselbe Reinigungs-Verfahren angewandt. Die Beleuchtung wird ebenfalls nur im Frühjahr mitgewaschen. Bartenbach empfiehlt die Reinigung auch im Herbst durchzuführen.

Plabutsch-Tunnel

Auch hier wird grundsätzlich dasselbe Reinigungs-Verfahren angewandt und die Beleuchtung nur im Frühjahr mitgewaschen. Bartenbach empfiehlt die Reinigung auch im Herbst durchzuführen.

Die Ulmen werden mit einem Bürstenwagen gereinigt. Die Nischen und die Fahrbahn werden mittels Waschbalken am Schlammsaugwagen gewaschen und die Reinigung der

Querschläge erfolgt händisch. Auch die Überwachungseinrichtungen werden manuell gewaschen.

Mehrfachreflexionen

Es wird empfohlen, möglichst hoch reflektierende Tunnelwand-Oberflächen mit geringem Glanzgrad zu verwenden. Optional wäre es zielführend, zusätzlich möglichst hoch reflektierende Tunneldecken-Oberflächen mit geringem Glanzgrad zu verwenden, denn dann könnte die Mehrfach-Reflexion des Lichtes im gesamten Tunnelraum von ca. 10% auf ca. 20% erhöht werden. Diese Maßnahme würde zusätzlich zu einem verbesserten Wohlbefinden (Sicherheitsgefühl) beitragen und eventuell Angstzuständen (Klaustrophobie) positiv entgegenwirken.

Die beiden nachfolgend angeführten Darstellungen zeigen die Unterschiede wie folgt auf.

Reflektiert die Decke wie derzeit nur 10% des auftreffenden Lichtes, so kommen nur 10 lx (entspricht 10% von 100 lx) bei der Beleuchtungsstärke an der Straße hinzu.

Reflektiert die Decke jedoch 60% des auftreffenden Lichtes, so kommen immerhin 20 lx (entspricht 20% von 100 lx) bei der Beleuchtungsstärke an der Straße hinzu.

Tunnel-Querschnitte

LED-Daten je Laufmeter:

2000 lm
20 W
175kWh jährlich
17,50 € jährlich

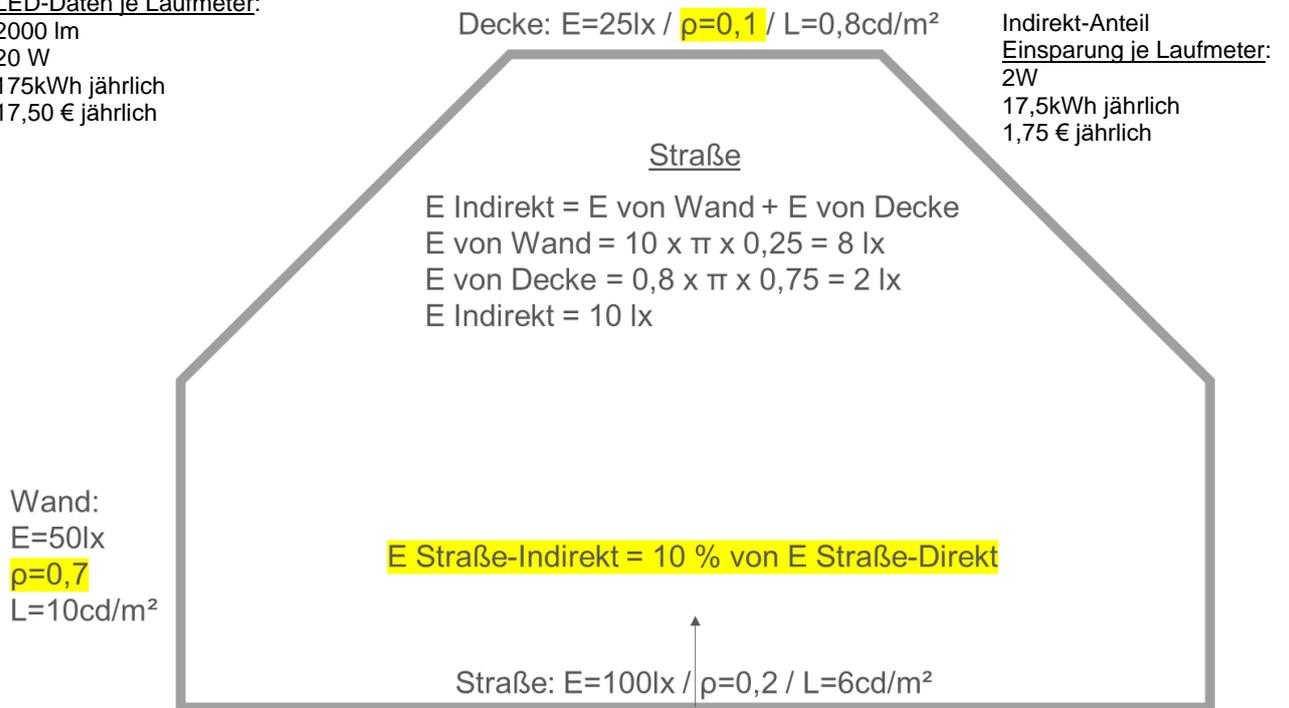


Abbildung 63: Derzeit erzielbarer Indirekt-Anteil mittels Mehrfach-Reflexionen (Wände Hellelfenbein und Decke Dunkelgrau)

LED-Daten je Laufmeter:

2000 lm
20 W
175kWh jährlich
17,50 € jährlich

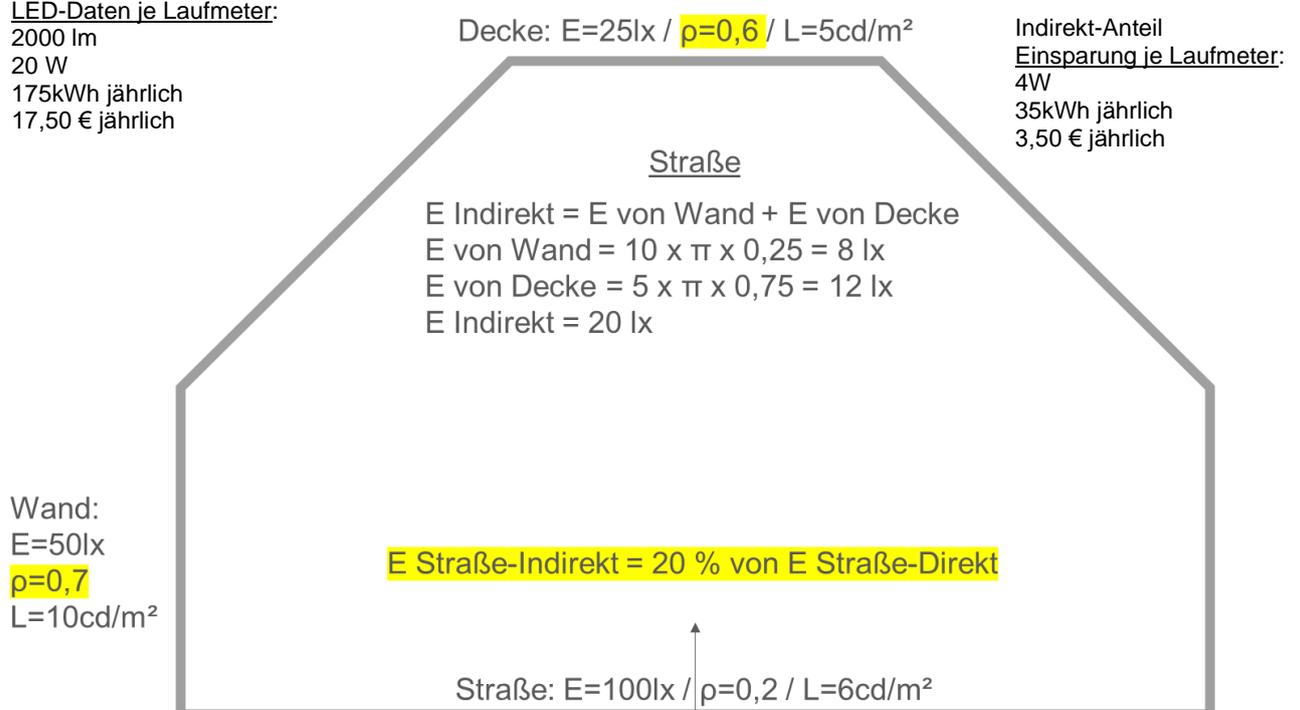


Abbildung 64: Zukünftig möglicher Indirekt-Anteil mittels Mehrfach-Reflexionen (Wände Hellelfenbein und Decke Hellelfenbein) Abschätzung durch Technik (Leuchten und Lüftung an der Decke) bereits berücksichtigt (geschätzter Faktor 0,85)

STAND DER WISSENSCHAFT BEZÜGLICH TUNNELGESTALTUNG

In den letzten Jahren erfolgte in der Lichttechnologie ein Wechsel von konventionellen Leuchtmitteln (Leuchtstofflampen, Metalldampf-, Natriumdampf-) auf Leuchtdioden (LEDs). Parallel dazu wächst auch das vorhandene Wissen, wie sich Licht auf den Menschen auswirken kann und wie man das Licht an situationsspezifische Bedürfnisse des Menschen optimal anpassen kann. Beide dieser Entwicklungen führen zu einem Umdenken in der Gestaltung von Beleuchtungsanlagen, was sich auch in der Veränderung der Tunnelbeleuchtungen in den letzten 10 Jahren zeigt.

Im alten Standard wurden Natrium-Hochdrucklampen (NAV) mit einem Leuchten-Abstand von ca. 13 m bis 18 m verwendet. Mittlerweile werden jedoch vorwiegend LED-Lichtquellen mit höherer Farbtemperatur (weißes Licht anstatt gelbliches/oranges Licht) als Standard verwendet. Zusätzlich zu dieser Erhöhung der spektralen Lichtqualität kann auch eine homogene Ausleuchtung der Fahrbahn (erzielt durch Reduktion des Leuchten-Abstandes) zur Steigerung der Verkehrssicherheit beitragen.

Weiters ist bekannt, dass eine bei der Durchfahrt „flimmernde“ Tunnelinnenstrecken-Beleuchtung (bedingt durch die Leuchten-Abstände) die Sehleistung und Aufmerksamkeit der AutofahrerInnen reduzieren kann. Diese Problematik ließe sich durch eine Beleuchtung mittels eines durchgängigen Lichtbandes lösen, wodurch alle bisherigen Vorteile vereint werden können (hohe spektrale Lichtqualität, ausreichend helle, homogene Fahrbahnausleuchtung, flimmerfreie Beleuchtung).

Bartenbach hat in Zusammenarbeit mit der ASFINAG zahlreiche wahrnehmungspsychologische Untersuchungen zu unterschiedlichen Tunnelgestaltungen in Modellen und an realen Tunnel durchgeführt (siehe Literaturhinweise). Es zeigte sich u.a., dass eine Fahrbahnhelligkeit von ca. 8 cd/m² ein optimaler Kompromiss zwischen Wahrnehmungsleistung und Wirtschaftlichkeit ist, da hier die Sehfunktionen bereits fast vollständig ausgeprägt sind. Weiters zeigte sich, dass das allgemein angewandte „Gegenstrahlprinzip“ (flache Strahlung entgegen der Fahrtrichtung) aus wahrnehmungspsychologischer Sicht schlechte Ergebnisse in Bezug auf Sicherheitsgefühl und Wahrnehmungsleistung liefert.

Als mögliche weitere Verbesserung wäre eine Deluxe-Variante mittels einer Mitstrahl-Beleuchtung denkbar. Dadurch kann sowohl die Blendung der AutofahrerInnen reduziert werden als auch eine Aufhellung von vorausfahrenden Fahrzeugen erzielt werden, was ein rascheres Erkennen von Geschwindigkeitsveränderungen ermöglicht.

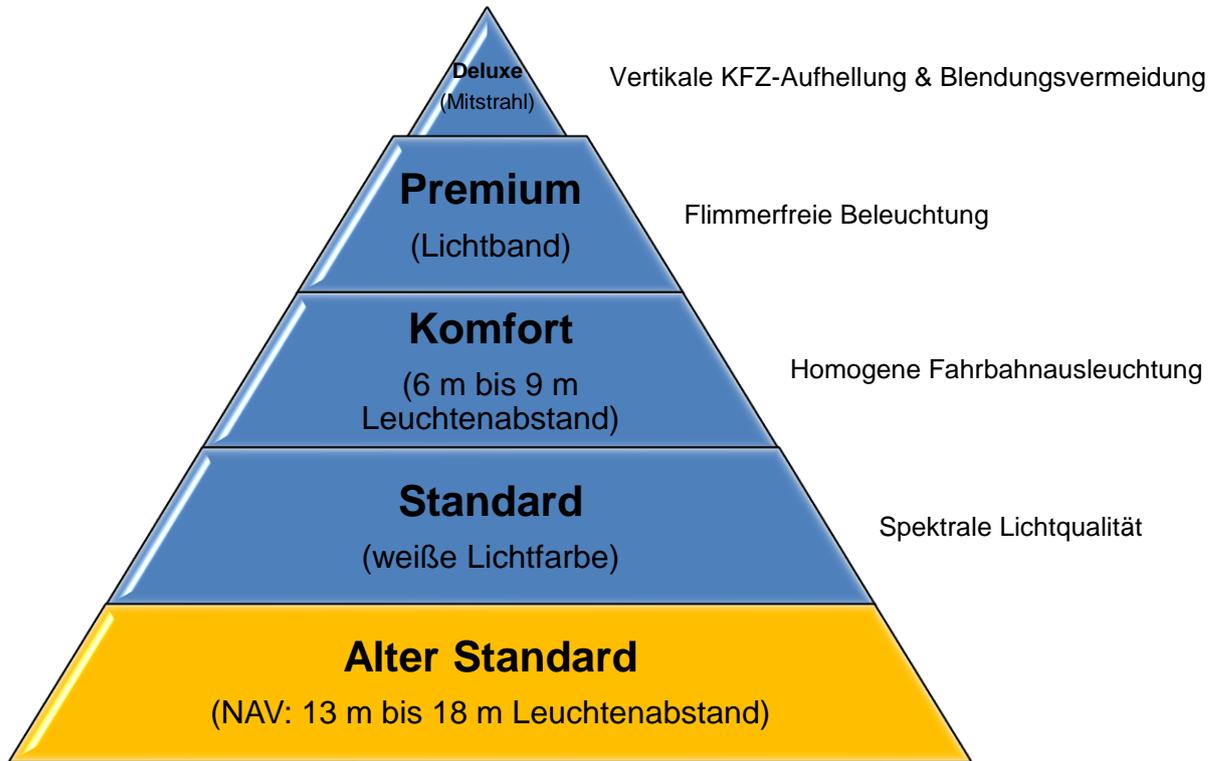


Abbildung 65: Lichtbedürfnispyramide

Menschliche Wahrnehmung

Die menschliche Wahrnehmung (und in Folge auch das menschliche Verhalten) setzt sich aus vielen kognitiven Informationsverarbeitungsprozessen zusammen und wird von vielen Faktoren beeinflusst (siehe Abb. 66). Umweltreize werden mittels der Sinnesorgane aufgenommen („Sensory Processing“). Dabei findet bereits ein Selektionsprozess statt, der die relevantesten Reize herausfiltert, sodass nur ein Teil der aufgenommenen Reize bewusst wahrgenommen wird („Perception“). Bei diesem Selektionsprozess kommen in großem Maße frühere Erfahrungen in ähnlichen Situationen aus dem Langzeitgedächtnis („Long-term Memory“) zum Einfluss. Die bewusst wahrgenommenen Eindrücke werden anschließend im Arbeitsgedächtnis („Working Memory“) gespeichert und im Austausch mit dem Langzeitgedächtnis weiter kognitiv verarbeitet („Cognition“). Auf Basis der Ergebnisse dieser Prozesse wird die Auswahl einer Reaktionshandlung getroffen („Response Selection“). Sobald eine geeignete Handlung ausgewählt wurde, wird diese ausgeführt („Response Execution“). Durch die getätigte Handlung wird anschließend die Situation verändert, wodurch neue Informationen eintreffen, die wiederum auf die gleiche Art und Weise verarbeitet werden. Diese Prozesse können sowohl innerhalb von

Sekundenbruchteilen (Reflexhandlungen) oder wenigen Sekunden (bewusste Handlungsentscheidungen) ablaufen.

All diese Teil-Prozesse werden maßgeblich von den zur Verfügung stehenden kognitiven Ressourcen („Attention Resources“) beeinflusst. Bei einem übermüdeten oder abgelenkten Lenker steigt die Gefahr für Fehler in diesen Prozessen. So könnte beispielsweise ein relevanter Reiz (z.B. entgegenkommendes Fahrzeug oder vorausliegende scharfe Kurve) fälschlicherweise als nicht relevant eingestuft und damit nicht bewusst wahrgenommen werden. Auch im Gedächtnis können Fehler auftreten, sodass sich der Fahrer nicht mehr an die korrekte Reaktionshandlung erinnern kann und daher eine falsche Entscheidung trifft. Die Verarbeitungsdauer von Reizen steigt ebenfalls, sodass eine richtige Entscheidung möglicherweise zu spät getroffen wird.

Auch Angstgefühle reduzieren die verfügbaren Aufmerksamkeitsressourcen. Laut einer DEKRA-Umfrage aus dem Jahr 2012 an 1200 AutofahrerInnen leiden ca. 36% aller Männer in Tunnelanlagen an Angstgefühlen, bei Frauen beträgt der Anteil sogar 67%.

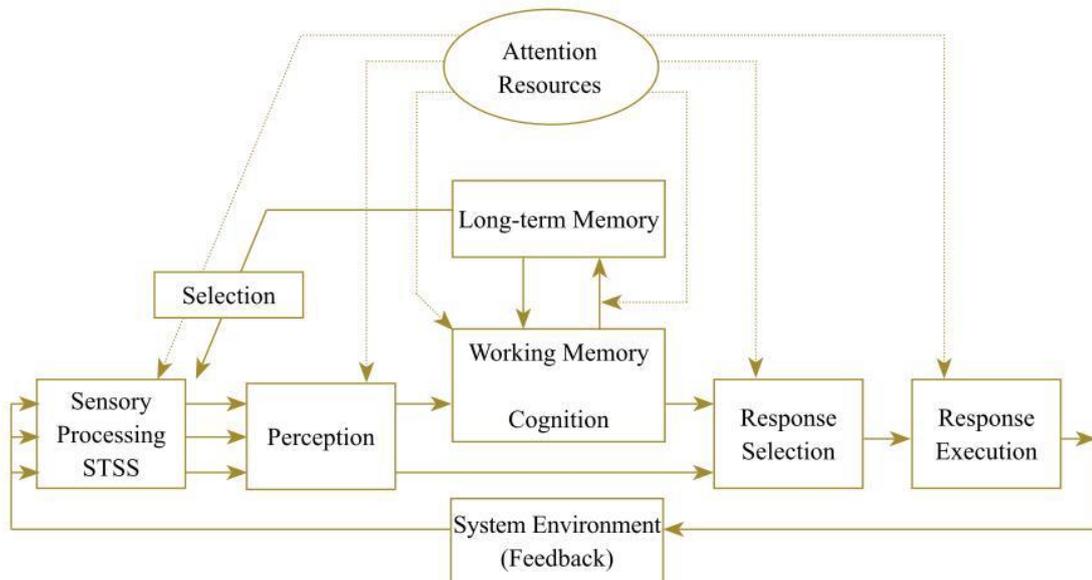


Abbildung 66: Grafische Darstellung der menschlichen Informationsverarbeitung (Tschudy et al., 2012)

Den Lichtverhältnissen kommt hierbei eine wichtige Rolle zu. Schlechte Lichtverhältnisse können die Informationsverarbeitungsprozesse negativ beeinflussen, während gute Lichtverhältnisse positive Effekte auf die Kognition des Menschen haben können. Je nach Tätigkeit müssen unterschiedliche Anforderungen an die Beleuchtung gestellt werden. Hier steht vor allem die Komplexität der Tätigkeit im Mittelpunkt: Je höher die Komplexität einer

Tätigkeit, desto höher auch die Anforderungen an die Beleuchtung. Es reicht also nicht aus, bei komplexen Tätigkeiten (z.B. dem Lenken von Kraftfahrzeugen) lediglich auf ausreichende Helligkeit und blendfreie Beleuchtung zu achten. Diese beiden Aspekte sind zwar die Grundpfeiler einer guten Tunnelbeleuchtung, das Beleuchtungssystem sollte in diesen Fällen aber zusätzlich die kognitiven Prozesse der menschlichen Wahrnehmung optimal unterstützen, um das Risiko für Fehlentscheidungen mit möglicherweise großem Personen- oder Sachschaden als Folge zu verringern. Gerade beim Autofahren, wo mehr als 90% der Informationen aus dem visuellen System stammen, kommt der Beleuchtung also eine äußerst wichtige Aufgabe zu. Schwankungen der Fahrbahnleuchtdichte beispielsweise erschweren die Verarbeitung von visuellen Reizen, wodurch es bei der Erkennung von Objekten auf der Fahrbahn zu Fehlern und Reaktionsverzögerungen kommen kann.

Eine große Gefahr vor allem bei längeren Tunnelanlagen ist die Monotonie. Durch lange, monotone Fahrten sinkt das Aufmerksamkeitsniveau, was wiederum zu den oben beschriebenen Problemen bei der Informationsverarbeitung führen kann. Weiters können sich in Tunnelsituationen vorhandene Stressgefühle mit steigender Durchfahrtslänge in starke Angstgefühle entwickeln, was ebenfalls zu einer erheblichen Reduktion der Aufmerksamkeit und Konzentrationsfähigkeit führen kann. Es ist also wichtig, auch emotionale Komponenten des menschlichen Verhaltens bei der Gestaltung von Tunnelanlagen zu berücksichtigen.

Ein weiteres Thema ist die optische Führung im Tunnel. Unfälle entstehen vermehrt dort, wo AutofahrerInnen durch eine unklare optische Führung getäuscht/verunsichert werden. Dies kann beispielsweise durch fehlerhafte oder unterbrochene Markierungen geschehen. Randmarkierungen beeinflussen das Seitenabstandsverhalten besonders bei dunklen Lichtverhältnissen nach rechts, was besonders in Gegenverkehrsabschnitten zur Unfallreduktion beitragen kann. Bei niedrigen Helligkeiten erfolgt die optische Führung vorwiegend durch die Orientierung an den Markierungslinien. Diese Wahrnehmung ist jedoch fehleranfällig. Erst ab einem gewissen Helligkeitseindruck findet ein Sprung zur Führung durch die gesamthafte räumliche Wahrnehmung statt. Diese Schwelle ist individuell verschieden, liegt jedoch bei ca. 3-5 cd/m².

Im weiteren Verlauf dieses Berichtes werden konkrete Möglichkeiten erörtert, die in den genannten Punkten zu einer Verbesserung beitragen können.

AP4: INNOVATIVE FARB- UND BELEUCHTUNGSKONZEPTE

Bei der Bearbeitung von AP4 wurden zunächst publizierte wissenschaftliche Studien recherchiert und diese anschließend auf Basis des wahrnehmungspsychologischen Erfahrungsschatzes von Bartenbach kritisch analysiert und bewertet. Im Anschluss werden daraus Empfehlungen abgeleitet.

In einer von Bartenbach im Auftrag der ASFINAG durchgeführten Laborstudie im Tunnelsimulator konnte bereits nachgewiesen werden, dass sich eine Erhöhung der Fahrbahnleuchtdichte positiv auf mehrere Aspekte des menschlichen Empfindens auswirkt. So reduziert sich das Monotonie-Gefühl während des Fahrens, das Sicherheitsgefühl erhöht sich und auch die subjektive Zufriedenheit mit der Tunnelbeleuchtung steigert sich. Bei einer linearen Tunnelbeleuchtung (Lichtband) erhöht sich das Sicherheitsgefühl und die subjektive Zufriedenheit mit der Tunnelbeleuchtung noch weiter im Vergleich zur punktförmigen Tunnelbeleuchtung.

Diese Anstiege sind insbesondere bis zu einem Leuchtdichtewert von 7 cd/m² bis 8 cd/m² sehr stark, anschließend flachen sie ab. Eine Fahrbahnleuchtdichte in dieser Höhe sollte daher als Ziel angesehen werden. Der mesopische Wahrnehmungsbereich (d.h. Übergangsbereich zwischen Tag- und Nachtsehen) reicht bis zu einer Leuchtdichte von ca. 3 cd/m². Insbesondere in diesem Bereich besteht eine große Gefahr von Relativblendung. Bereits geringe Helligkeitsschwankungen können hier zu Störungen der Sehfunktionen führen.

In den im Rahmen des Projektes evaluierten Tunnel-Anlagen wurden auf der Fahrbahn Leuchtdichten von ca. 6 cd/m² gemessen (mit Schwankungen abhängig von Verschmutzung, Alter der Beleuchtung, möglicher Restnässe nach der Waschung). Hier befindet sich das Auge klar im photopischen Wahrnehmungsbereich, wo eine wesentlich geringere Gefahr von Relativblendung vorliegt. Aus wahrnehmungspsychologischer Sicht ist damit die derzeit vorliegende Fahrbahnleuchtdichte ausreichend, könnte jedoch mit einer Erhöhung auf 7 cd/m² bis 8 cd/m² noch weiter optimiert werden.

Im Rahmen des Projektes wurde von Bartenbach eine umfassende Literaturrecherche zur Optimierung von Farb- und Beleuchtungskonzepten durchgeführt. Die relevantesten Beispiele werden im Folgenden vorgestellt:

Homogenität der Fahrbahnausleuchtung

In einer Studie von Kimura et al. (2014) wurde die Umrüstung der japanischen Shirotori-Tunnel-Anlage von herkömmlicher Beleuchtung auf eine neue LED-Beleuchtung wissenschaftlich begleitet. Während die bisherige Beleuchtung aufgrund großer Leuchten-Abstände Schwankungen der Fahrbahnleuchtdichte hervorrief, konnte durch die Reduktion der Leuchten-Abstände eine sehr gleichmäßige Fahrbahnausleuchtung erzielt werden.

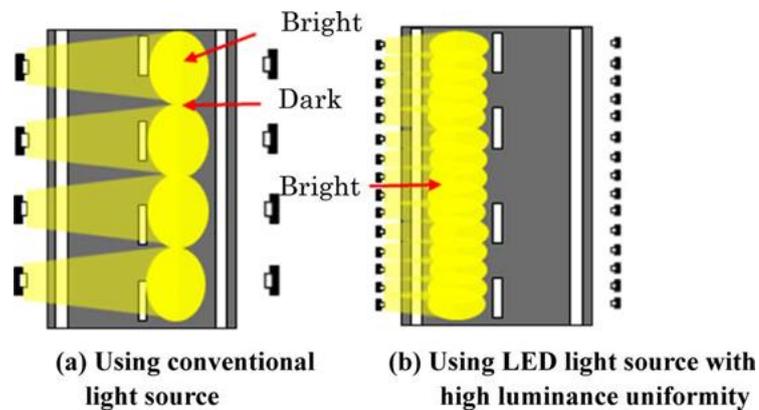


Abbildung 67: Visualisierung der Unterschiede zwischen den Beleuchtungen (Kimura et al., 2014)

Bei Schwankungen der Leuchtdichte entstehen dynamische Schatten im Fahrzeuginneren, dieses Flackern im Auto-Innenraum kann zu Irritationen und Ablenkung führen. Durch eine durchgängig helle, gleichmäßige Fahrbahnausleuchtung können diese unerwünschten Effekte vermieden werden.

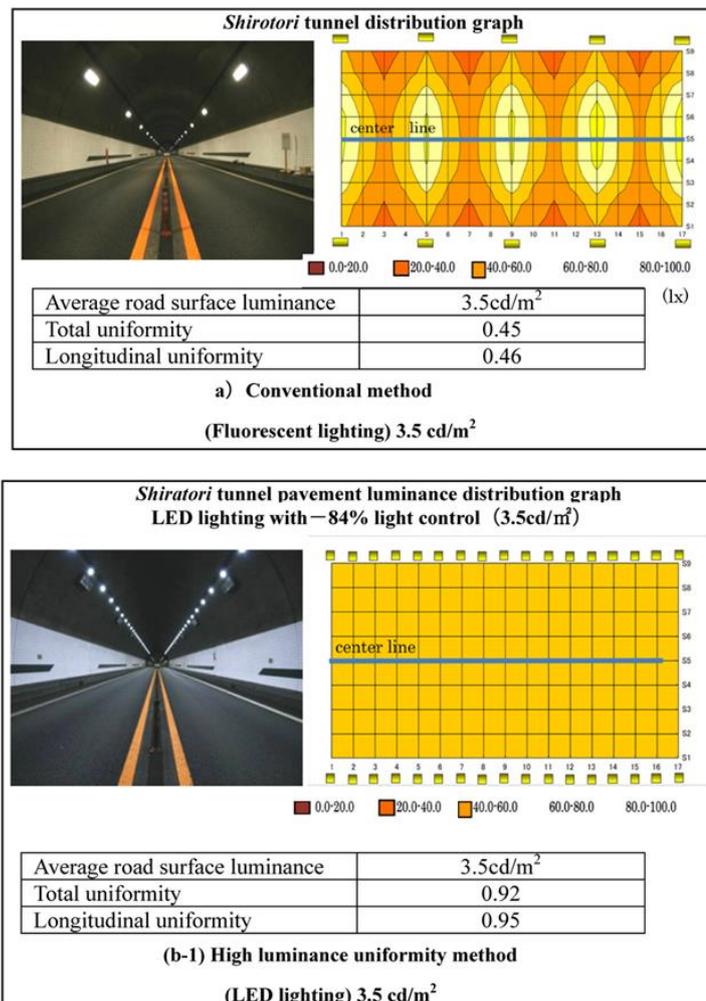


Abbildung 68: Fotos und Leuchtdichte-Darstellungen der Beleuchtung vor und nach dem Umbau (Kimura et al., 2014)

Die gleichmäßige Fahrbahnausleuchtung unter LED-Beleuchtung (3,5 cd/m²; 5000 K) wurde von den Probanden besser bewertet als die ungleichmäßige Ausleuchtung unter der herkömmlichen Leuchtstoffröhren-Beleuchtung (3,5 cd/m²; 4500 K). Auch die Sichtbarkeit von vorausfahrenden Fahrzeugen und Hindernissen auf der Fahrbahn wurde unter der gleichmäßigen LED-Beleuchtung besser bewertet als unter der ungleichmäßigen Leuchtstoffröhren-Beleuchtung. Niedrigere Fahrbahnhelligkeiten unter LED-Beleuchtung (2,3 cd/m² bzw. 0,7 cd/m²) wurden schlechter bewertet.

Bei dieser Studie handelt es sich jedoch um eine reine Fragebogenstudie, es wurden also keine objektiven physiologischen Messungen (z.B. Reaktionszeit) getätigt. Abhängig von der Gefährdungsklasse sind in österreichischen Autobahn-Tunnelanlagen meist ohnehin höhere Leuchtdichten vorgeschrieben als in der Studie untersucht wurden.

Das Bild, das diese Studie zeichnet, deckt sich jedoch mit Erfahrungen aus eigenen Studien von Bartenbach. So konnte beispielsweise 2012 in einer Studie im Auftrag der ASFINAG bereits nachgewiesen werden, dass sich mit zunehmender Gleichmäßigkeit der Beleuchtung die visuelle Leistungsfähigkeit, die Aufmerksamkeit, das subjektive Sicherheitsempfinden und die wahrgenommene Helligkeit bei der Tunneldurchfahrt verbessert. Eine gleichmäßige Fahrbahnausleuchtung ist Grundbestandteil einer sicheren Tunnelbeleuchtung, da eine ungleichmäßige Fahrbahnausleuchtung die visuelle Wahrnehmung von Objekten erschweren kann. Eine möglichst gleichmäßige, flimmerfreie Fahrbahnausleuchtung lässt sich durch geringere Leuchtenabstände realisieren. Ein durchgängiges Lichtband wäre die optimale Lösung.

Helligkeit der Tunnelwände

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, ist für das menschliche Auge eine gesamthafte räumliche Wahrnehmung nur im photopischen Wahrnehmungsbereich (ab ca. 3-5 cd/m², individuell unterschiedlich) möglich.

Eine helle Tunnelwand kann auch bei niedrigeren Helligkeiten als räumliche Begrenzung dienen und so bei der optischen Führung unterstützend wirken. Dieser Effekt kann durch Randmarkierungen nicht vollständig ersetzt werden. Helle Wände lassen den Raum außerdem größer erscheinen und reduzieren so mögliche klaustrophobische Zustände.

Das schwedische National Road and Transport Research Institute (VTI) hat dazu eine Studie durchgeführt, in der Effekte der Helligkeit der Wand auf das Blickverhalten der AutofahrerInnen untersucht. Hierbei konnte festgestellt werden, dass helle Wandfarben (Abb. 69, rechte Spalte) die Aufmerksamkeit der AutofahrerInnen auf der Fahrbahn halten, während bei dunklen Wänden die Blicke der AutofahrerInnen vermehrt zur Wand abgleiten.

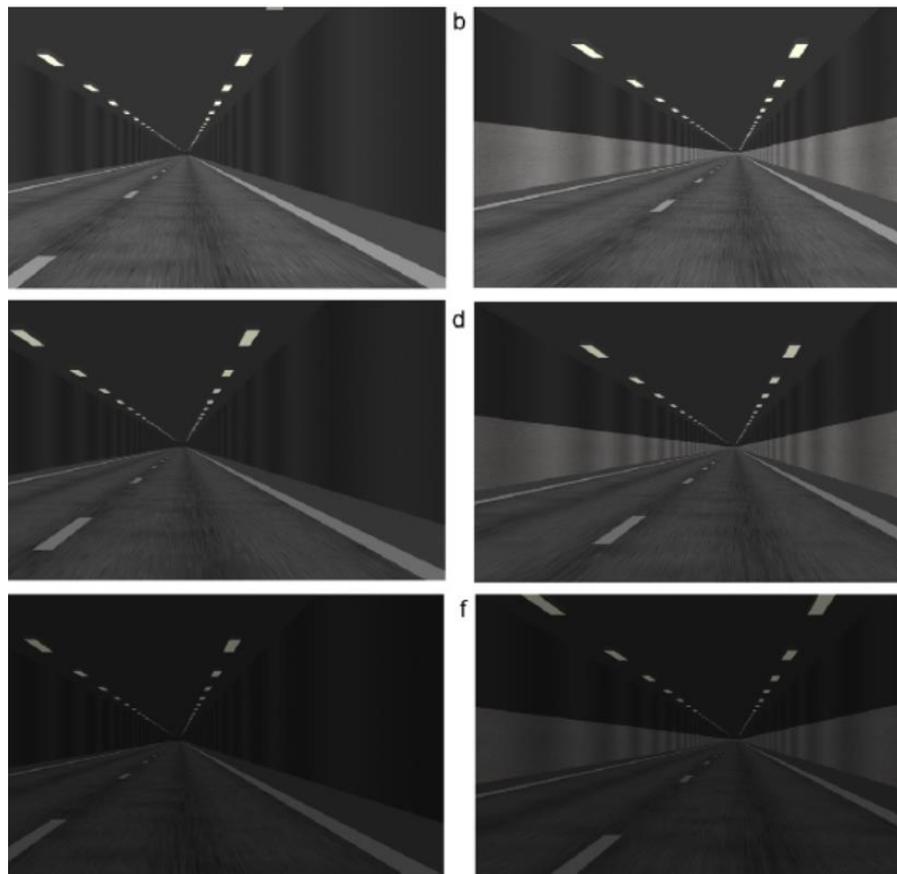


Abbildung 69: Unterschiede zwischen Helligkeiten von Tunnelwänden (Kircher & Ahlstrom, 2012)

Die untersuchten Wand- und Fahrbahnhelligkeiten sind zwar nicht direkt auf reale Situationen übertragbar, da die Studie in Virtueller Realität in einem Tunnelsimulator durchgeführt wurde, die grundlegende Aussage bleibt aber als Indiz gültig. In österreichischen Autobahn-Tunnelanlagen sind außerdem abhängig von der Gefährdungsklasse meist bereits höhere Leuchtdichten vorgeschrieben als in der Studie untersucht wurden.

Das periphere Sehen liefert nur einen Ersteindruck einer Situation und eignet sich nicht zur genauen Analyse. Bei dunklen Wänden wird die Wand durch das periphere Sehen nicht ausreichend wahrgenommen, der Mensch muss mit dem fovealen System zur Wand blicken, um diese klar zu erkennen. Eine helle Wand kann außerdem als optische Begrenzung dienen und so die räumliche Wahrnehmung unterstützen.

Farbe der Tunnelwände

In einer anderen aktuellen Studie wurde eine mögliche Farbgebung von Tunnelwänden untersucht. Auch hier kam ein Tunnelsimulator zur Anwendung. Probanden durchfuhren dabei im Simulator sechs verschiedene Tunnelanlagen mit Wandanstrichen in unterschiedlichen Farben (siehe Abb. 70). Währenddessen wurde die Herzfrequenz der Probanden als Stressindikator erfasst. Eine höhere Herzfrequenz deutet auf ein höheres Stressniveau hin. Zusätzlich konnten die Probanden im Tunnelsimulator eigenständig beschleunigen und bremsen, die Fahrgeschwindigkeit wurde ebenfalls laufend erfasst. Die vorgeschriebene Geschwindigkeit betrug 80 km/h.

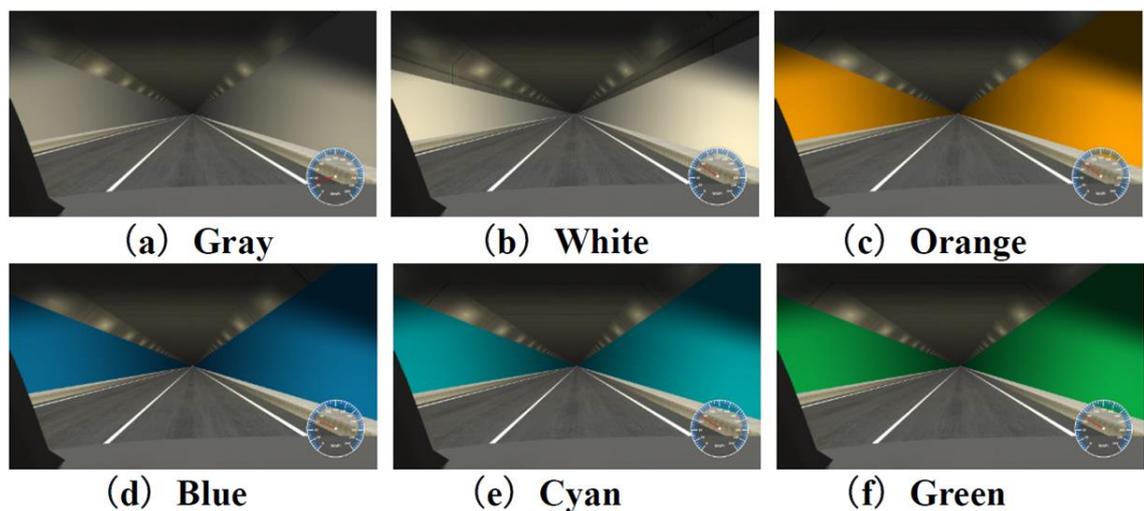


Abbildung 70: Untersuchte Tunnelwandfarben (Hu et al., 2019)

Es zeigte sich, dass es in den blauen, grünen und cyan-farbenen Tunnelanlagen zu einer signifikant niedrigeren Geschwindigkeitsüberschreitung (siehe Abb. 71) und einem signifikant niedrigeren Anstieg der Herzfrequenz (d.h. niedrigerem Stress; siehe Abb. 72) kam.

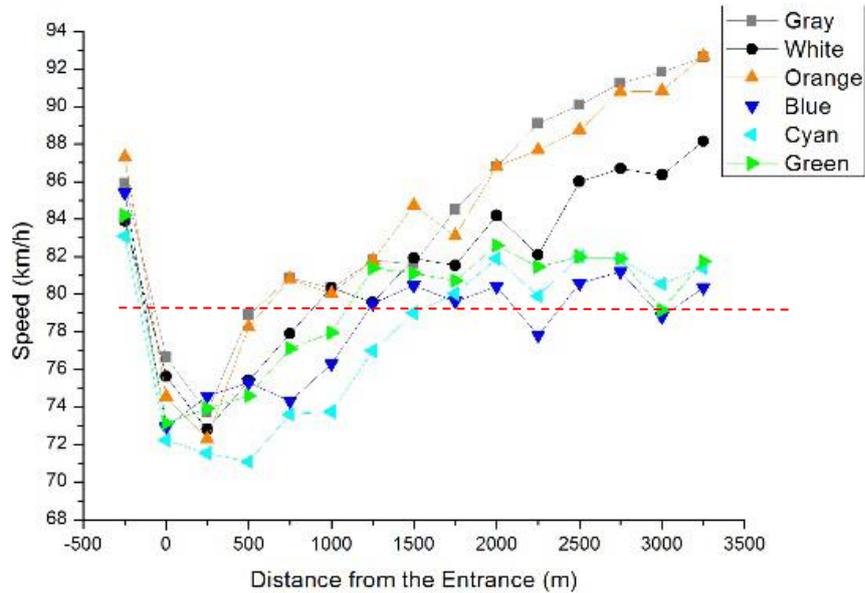


Abbildung 71: Anstieg der Geschwindigkeit in verschiedenfarbigen Tunnelanlagen (Hu et al., 2019)

Wie in Abb. 72 ersichtlich, kommt es zwar in allen Tunnelanlagen im Einfahrtsbereich zu einem Anstieg der Herzfrequenz, im blauen, cyan-farbigen und grünen Tunnel sinkt die Herzfrequenz jedoch anschließend wieder stark ab, während sie in den grauen, weißen und orangen Tunnelanlagen nur leicht sinkt und anschließend wieder stark steigt.

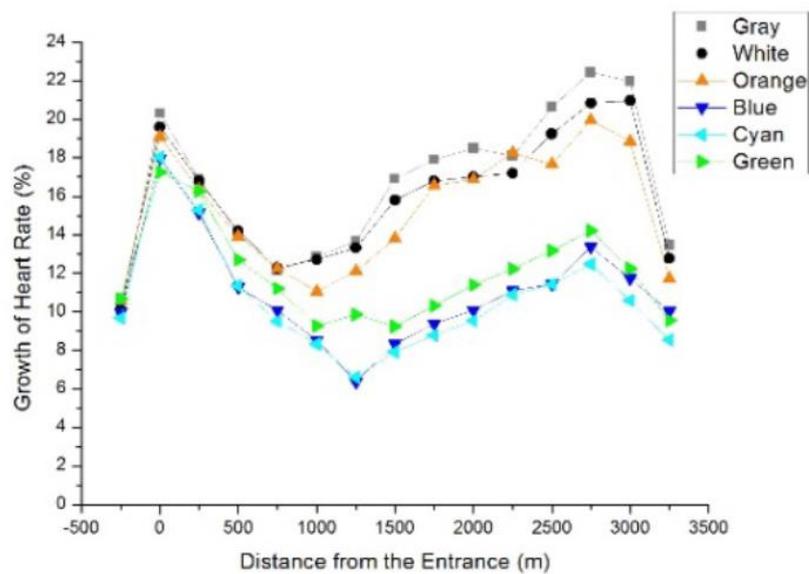


Abbildung 72: Anstieg der Herzfrequenz in verschiedenfarbigen Tunnelanlagen (Hu et al., 2019)

Allgemein ist das Stressniveau also unmittelbar nach der Einfahrt am höchsten, sinkt dann ca. 800m bis 1000 m lang ab, steigt jedoch anschließend wieder mit der Länge der Tunnelanlage. Unmittelbar vor der Tunnelausfahrt sinkt das Stressniveau stark ab. Dieser Effekt lässt sich auf das sprichwörtliche „Licht am Ende des Tunnels“ zurückführen: Durch das absehbare Ende der stressreichen Tunnelfahrt entspannt man sich bereits wieder. In einem zweiten Schritt wurden anschließend auch Farbkombinationen untersucht (siehe Abb. 73).



Abbildung 73: Untersuchte Tunnelwandfarbkombinationen (Hu et al., 2019)

Hier zeigten sich ähnliche Effekte. Während im grau-weißen und orange-weißen Tunnel sowohl Geschwindigkeit (Abb. 74) als auch Herzfrequenz (Abb. 75) stark anstiegen, waren beide Parameter im blau-weißen Tunnel signifikant niedriger.

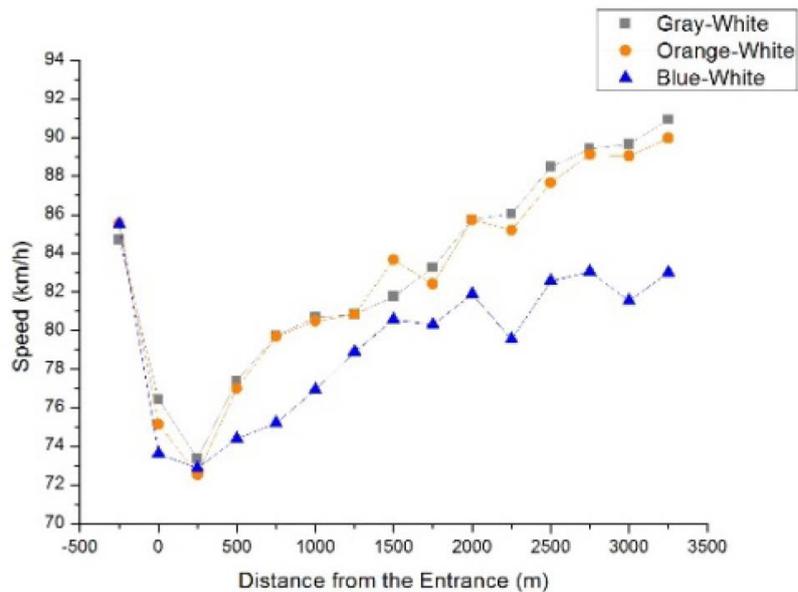


Abbildung 74: Anstieg der Geschwindigkeit in verschiedenfarbigen Tunnelanlagen bei Farbkombinationen (Hu et al., 2019)

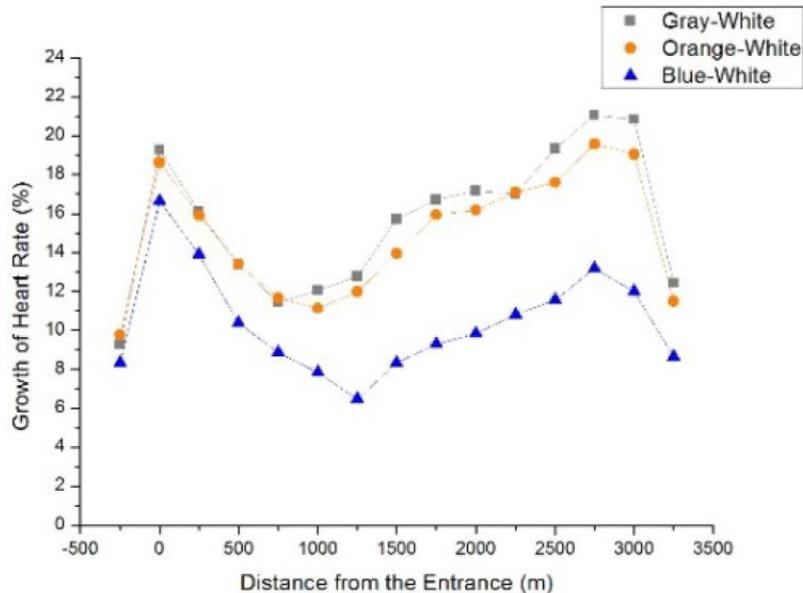


Abbildung 75: Anstieg der Herzfrequenz in verschiedenfarbigen Tunnelanlagen bei Farbkombinationen (Hu et al., 2019)

Unabhängig von der Farbgestaltung der Tunnelwände stiegen Herzfrequenz und Geschwindigkeit mit zunehmender Tunnellänge. Bei einer cyan-, blau- oder grünfarbiger Wandgestaltung ist dieser Anstieg sowohl bei der Herzfrequenz als auch bei der Geschwindigkeit signifikant geringer als bei weißer, grauer oder orange-farbiger Wandgestaltung. Bei Verwendung einer blau-weißen Farbkombination zeigen sich dieselben Effekte.

Beruhigende Effekte dieser Farben (v.a. Blau) sind allgemein in der Wahrnehmungspsychologie sehr gut belegt. In vergangenen Bartenbach-Studien am Tunnelmodell konnten ebenfalls stressreduzierende Effekte einer farblichen Tunnelwandgestaltung nachgewiesen werden, zusätzlich wurde auch eine erhöhte Aufmerksamkeit festgestellt.

Die Studie zeigt außerdem, dass es nicht notwendig ist, die gesamte Tunnelwand farblich zu gestalten. Auch eine teilweise Farbgebung (z.B. nur der oberen Hälfte oder evtl. der Tunneldecke) kann bereits positive Einflüsse haben. Auch die Verwendung von Licht (Effektbeleuchtung) anstelle eines farblichen Anstrichs ist hier eine Möglichkeit.

Markierungen an der Tunnelwand

In dieser Studie wurden in einem Tunnelsimulator die Effekte von farblichen Markierungen an den Tunnelwänden untersucht. Zunächst wurden verschiedene Farben hinsichtlich ihrer emotionalen Wirkung auf die AutofahrerInnen evaluiert. Hier fiel die Entscheidung auf blaue Markierungen auf grünem Hintergrund (siehe Abb. 76), da die beruhigende Wirkung dieser beiden Farben wahrnehmungspsychologisch gut belegt ist. Weiters wurden mittels einer Probandenstudie verschiedene Distanzen zwischen den Markierungen untersucht. Dabei wurde für das Pfeil-Design eine optimale Distanz von 20 m festgestellt, während für das Wellen-Design eine optimale Distanz von 10 m festgestellt wurde. Diese Distanzen sind jedoch abhängig von der Durchfahrtsgeschwindigkeit im Tunnel. Als Referenzgeschwindigkeit wurden in dieser Studie 60 km/h angenommen.

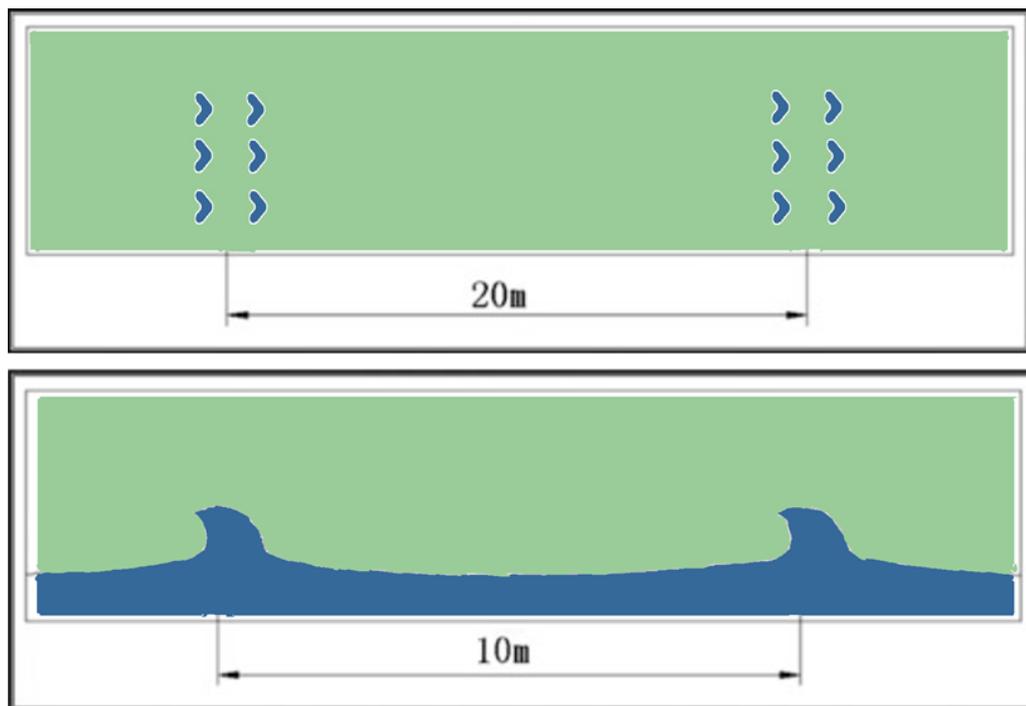


Abbildung 76: Schematische Darstellung des Tunnelwand-Designs (Xia et al., 2017)

Der Tunnel wurde anschließend mit diesen farbigen Markierungen in einem Tunnelsimulator dargestellt und mit einem realen, traditionell gestalteten Tunnel verglichen. Der farblich gestaltete Tunnel wurde hinsichtlich subjektivem Sicherheitsgefühl, Komfort und Schönheit wesentlich besser bewertet als der reale Tunnel.

Ein Nachteil dieser Studie ist, dass mittels Fragebögen nur rein subjektive Maße für Sicherheit, Komfort und Schönheit erhoben wurden. Auch ist der Vergleich zwischen einem realen Tunnel und einem Tunnel im Simulator eher problematisch. Dennoch kann diese Studie als weiteres Indiz für die positiven Effekte einer farbigen Tunnelwandgestaltung dienen. Durch das Anbringen von Mustern oder Symbolen an der Tunnelwand kann auch die Monotonie reduziert werden.

Es lassen sich also durch eine farbliche Tunnelwandgestaltung sowohl positive Einflüsse auf objektive Parameter (angepasste Fahrgeschwindigkeit, geringerer physiologischer Stress) als auch auf die subjektive Beurteilung der Tunnelanlage (höheres Sicherheitsgefühl, Komfort und Schönheit) erzielen. Bisher gibt es dazu allerdings nur Simulatorstudien, welche zwar als Indizien dienen können, aber um sichere Ergebnisse zu erhalten, wären Untersuchungen in realen Tunnelanlagen notwendig.

Aufhellung der Tunnelanschlusstrecke

Die Aufhellung der Tunneleinfahrtsstrecke am Tag ist bereits gängige Praxis in der Gestaltung von Tunnelanlagen. Hiermit wird vermieden, dass die AutofahrerInnen auf ein „schwarzes Loch“ zufahren, da dies zu erhöhtem Stress führen kann und sich dadurch auch die Unfallwahrscheinlichkeit steigert.



Abbildung 77: Helle Einfahrtsbeleuchtung bei Tageslicht (Quelle: ASFINAG)

Ein ähnlicher Effekt tritt jedoch auch nachts bei der Tunnelausfahrt auf (siehe Abb. 78). Analog dazu könnte in der Nacht auch der Bereich unmittelbar außerhalb der Tunnelanlage (Tunnelanschlusstrecke) verstärkt beleuchtet werden. Da das menschliche Auge nur

langsam von hohen Helligkeiten auf niedrige Helligkeiten adaptiert, kann dieser Effekt hier insbesondere z.B. bei Kurven nach dem Tunnel zu Beeinträchtigungen der visuellen Leistung führen und damit zu einem erhöhten Unfallrisiko beitragen. Insbesondere bei Tunnelanlagen mit schwierigen Streckenabschnitten nach der Tunnelausfahrt (z.B. scharfe Kurven) könnte hier eine Verbesserung der Lichtverhältnisse zur Unfallreduktion beitragen.



Abbildung 78: "Schwarzes Loch" bei der Tunnelausfahrt

Eine gesamthafte Zusammenfassung der Empfehlungen wird im Kapitel zu AP6 gegeben.

AP5: FARBGESTALTUNG VON FLUCHTWEGEN UND PANNENBUCHTEN

Auch bei der Bearbeitung von AP5 wurden zunächst publizierte wissenschaftliche Studien recherchiert und diese anschließend auf Basis des wahrnehmungspsychologischen Erfahrungsschatzes von Bartenbach kritisch analysiert und bewertet. Im Anschluss werden daraus Empfehlungen abgeleitet.

Farbgebung von Notausgängen in Tunnelanlagen

In mehreren zusammenhängenden schwedischen Studien wurden verschiedene Farbschemata zur Gestaltung von Notausgängen evaluiert. Dabei wurden der Farbkontrast zwischen Notausgangs-Tür und Portal, die Erkennbarkeit als Fluchtweg und die Farbe und Blinkfrequenz der Beleuchtung untersucht.

In einer ersten Studie wurde auf Basis sensorischer und kognitiver Parameter die optimale Farbgebung in der Theorie bestimmt. Dabei wurde das Farbschema 1 (siehe Abb. 79) als empfohlenes Farbschema ausgewählt, da hier in sensorischer Hinsicht der Farbkontrast zwischen Tür und Portal zu einer leichten Erkennbarkeit des Notausgangs führt. In kognitiver Hinsicht spricht für dieses Farbschema, dass die Farbe Grün traditionell mit Sicherheit assoziiert wird, was gerade in Notfallsituationen eine schnelle Erkennbarkeit als Notausgang gewährleisten kann.

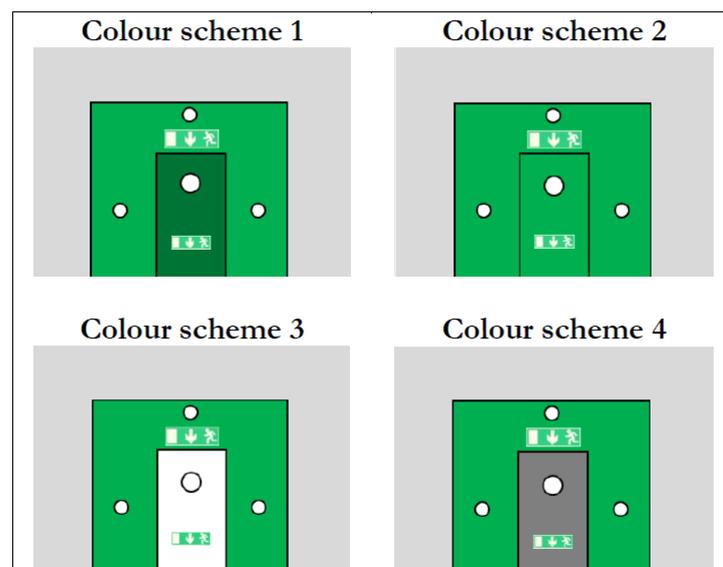


Abbildung 79: Darstellung der vier evaluierten Farbschemata (Ronchi & Nilsson, 2014)

Im nächsten Schritt wurde das ausgewählte Farbschema in einer VR-Umgebung dargestellt. Weiters wurde in dieser Studie untersucht, welchen Effekt verschiedene Farben und Blinkfrequenzen der Notausgangbeleuchtung in einer Notfallsituation haben. Hier konnte festgestellt werden, dass grüne oder weiße, im Ereignisfall mit einer Frequenz von 1-4 Hz blinkende Lichter am Notausgang von den Probanden in einer VR-Notfallsituation als leichter zu entdecken, leichter zu verstehen und als bessere Unterstützung beim Verlassen des Tunnels empfunden wurden. Niedrigere Blinkfrequenzen werden nicht empfohlen, höhere Frequenzen wurden nicht untersucht.

Anschließend wurde in einer dritten Studie dieses Konzept experimentell evaluiert. Dabei wurde ein realer Straßentunnel (Northern Link, Stockholm) mit künstlichem Rauch gefüllt. Die Probanden mussten anschließend diesen Rauch durchqueren und den Notausgang finden.

Von lichttechnischer Seite wurden hier von den Probanden insbesondere die blinkenden Lichter als große Hilfe beim Finden des Notausganges hervorgehoben.

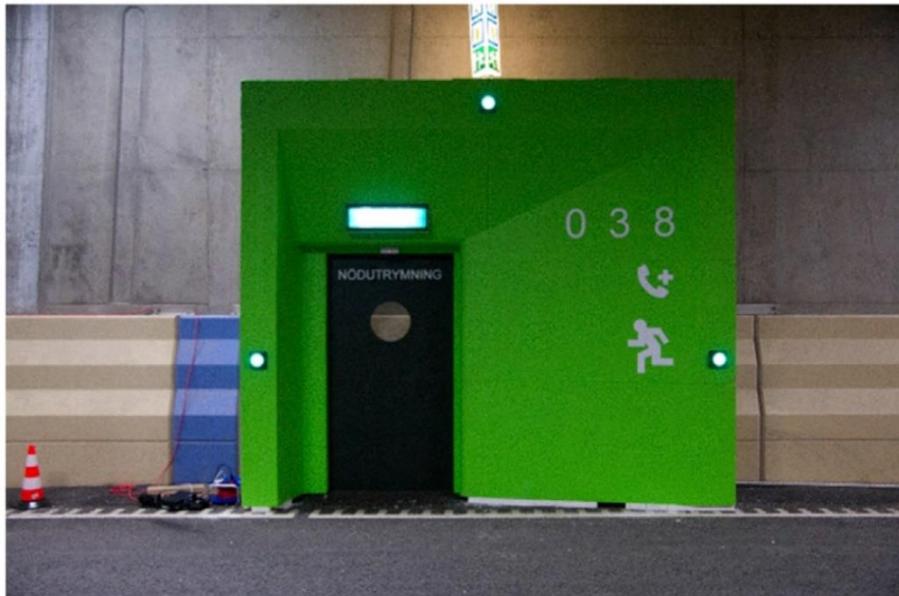


Abbildung 80: Mock-Up des Farbschemas (Ronchi et al., 2018)

Als bestes Farbschema stellte sich das grüne Notausgangsportal mit einer dunkelgrün gehaltenen Tür heraus. Eine zusätzliche, grünfarbige Beleuchtung des Notausgangs sollte im Ereignisfall mit einer Frequenz von 1-4 Hz blinken, die Positionierung der Leuchten sollte auf beiden Seiten der Tür und über der Tür sein. Ein Fenster in der Tür stellt außerdem den

Bezug zur Außenwelt her und soll dadurch die Hemmung reduzieren, den Fluchtweg zu benutzen. Den Personen wird ermöglicht, zu sehen, was hinter der Tür liegt.

Es handelt sich hier um eine Reihe von aufeinander aufbauenden Studien, die im Rahmen eines realen Tunnelbauprojekts durchgeführt wurden. Die Studien sind aufwändig geplant und detailliert beschrieben und daher als qualitativ hochwertig anzusehen.

Aus wahrnehmungspsychologischer Sicht kann Bartenbach diese Ergebnisse ebenfalls bestätigen. Die Farbe Grün wird mit Sicherheit assoziiert und eignet sich daher sehr gut für die Farbgebung von Fluchtwegen und Notausgängen. Aktuell werden Notausgänge aus diesem Grund auch bereits in Grün gehalten. Die besondere Hervorhebung der Tür durch ein dunkleres Grün erleichtert das schnelle Wahrnehmen und Erkennen des Fluchtwegs als solchen. Die Kontrastierung von Portal, Tür und Tunnelwand zueinander ist hier von großer Bedeutung! Durch eine zusätzliche, im Ereignisfall blinkende, grüne Beleuchtung wird das schnelle Wahrnehmen und Erkennen noch weiter unterstützt.

Großteils sind diese Empfehlungen auch bereits Stand der Technik in österreichischen Tunnelanlagen. Am Beispiel des Langener Tunnels (Vorarlberg) sieht man, dass die Notausgangstür und Notausgangsbeleuchtung bereits in grün gehalten sind, auch ein Fenster ist an der Notausgangstür angebracht (Abb. 81). Eine mögliche weitere Verbesserung wäre noch die grüne Farbgebung des Portals rund um die Notausgangstür.



Abbildung 81: Notausgang im Langener Tunnel (Vorarlberg)

Zonierung der Beleuchtung von Pannenbuchten

In vergangenen Bartenbach-Studien konnte bereits nachgewiesen werden, dass durch besonders hohe Beleuchtungsstärken und kontrastierende Lichtfarbe im Bereich der Pannenbucht die Sichtbarkeit und Erkennbarkeit ebenfalls stark erhöht werden. Diese Empfehlungen sind mittlerweile Stand der Technik!

In der aktuellen RVS (09.02.41, 2020) ist im Bereich von 30 m vor der Pannenbucht bis zum Ende der Pannenbucht eine Leuchtdichte mit dem dreifachen Wert der Innenstreckenbeleuchtung sowie eine zusätzliche Leuchtenachse oberhalb der Pannenbucht mit einer Lichtfarbe ≥ 5500 K vorgesehen.

BEISPIELE INNOVATIVER TUNNELDESIGNS

Eurasien-Tunnel

Der Eurasien-Tunnel verläuft mit 5,4 km Länge als Verbindungstunnel zwischen Europa und Asien am Bosphorus an der tiefsten Stelle ca. 100 m unter dem Meeresspiegel. Aus diesem Grunde wurde versucht, mittels einer blauen Deckenbeleuchtung mögliche Angstgefühle der AutofahrerInnen zu vermeiden. Durch die blaue Effektbeleuchtung wird der Tunnel nach oben „geöffnet“, Engegefühle werden dadurch reduziert. Durch die blaue Farbgebung können auch stressreduzierende, beruhigende Effekte erzielt werden. Außerdem läuft die Beleuchtung der Tunnelanlage mit dem Verkehr mit und hilft so bei der Geschwindigkeitsregulierung (siehe Video).

Eine Vorstellung des Beleuchtungssystems (in türkischer Sprache) ist verfügbar unter: <https://youtu.be/LOHdstPoipw>



Abbildung 82: Innovative Deckenbeleuchtung im Eurasien-Tunnel

Zu beachten ist hier jedoch, dass das menschliche Auge bei der visuellen Wahrnehmung im Blaubereich nur eine reduzierte Sehschärfe erreichen kann. Der primäre Bereich der Sehaufgabe (Fahrbahn) darf nicht blau beleuchtet sein. Eine blaue Beleuchtung eignet sich daher nur als Effektbeleuchtung und nicht als allgemeine Beleuchtung. Durch eine optimale lichttechnische Abstimmung von Effektbeleuchtung und normaler Beleuchtung können negative Effekte ausgeschlossen werden.

AP6: EMPFEHLUNGEN UND WISSENSVERBREITUNG

Oberflächen und Reinigung

Es wird empfohlen, Tunnelwand-Oberflächen mit möglichst hohen Reflexionsgraden (mindestens 60%) und mit möglichst geringen Leuchtdichte-Verhältnissfaktoren (Glanzwert zu Diffuswert maximal 3; siehe technischer Bericht zu AP3) zu verwenden (z.B. Mapecoat PU T1 der Fa. Mapei oder gleichwertig). Dabei handelt es sich um eine 2-Komponenten, aliphatische, eingefärbte sowie elastische Polyurethan-Beschichtung mit hoher Abrieb-Festigkeit und UV-Beständigkeit. Diese Oberfläche ist mechanisch sehr robust, sie kreidet nicht und hat daher eine sehr hohe Lebensdauer zu erwarten.

Es wäre auch zielführend, zusätzlich möglichst hoch reflektierende Tunneldecken mit geringem Glanzgrad zu verwenden, dadurch würde der gesamte Tunnelraum wesentlich angenehmer erscheinen. Diese Maßnahme würde zu einem verbesserten Wohlbefinden (Sicherheitsgefühl) beitragen und eventuell Angstzuständen (Klaustrophobie) positiv entgegenwirken. Auch eine farbliche Beleuchtung der Tunneldecke könnte diese Effekte erzielen.

Die spektralen Verläufe der untersuchten Materialien unterscheiden sich nur sehr geringfügig, da all diese Beschichtungen denselben Farbton aufweisen. Das eingestrahelte Spektrum der Lichtquelle (Tageslicht D65, Temperaturstrahler A oder LED) hat sehr wenig Einfluss auf die erzielbaren Reflexionsgrade, da Hellelfenbein (RAL1015) relativ neutral reagiert. Eine spektrale Optimierung der Lichtquellen (Tuning) bringt daher keine nennenswerten Vorteile.

Eine spektrale Analyse ergab weiters, dass durch die mittlerweile angehobenen Leuchtdichteniveaus in Tunnel auf ca. 6-8 cd/m² eine Anpassung der Oberflächen bzw. der Beleuchtungsspektren an das mesopische Sehen (veränderte Hellempfindlichkeit durch das niedere Leuchtdichteniveau) praktisch kein Einsparpotenzial mehr birgt (noch vor 10 Jahren mit bis zu 30% angegeben).

Sowohl die Tunnelwände als auch die Tunneldecken sollten möglichst homogen und frei von Einschlüssen bzw. frei von Löchern sein (z.B. sehr porige bzw. löchrige Oberfläche im Plabutsch-Tunnel), denn ansonsten ergibt sich eine deutlich niedrigere Licht-Reflexion

(durch Absorption innerhalb der Poren) und eine deutlich höhere Schmutz-Ablagerung (aufgrund der erschwerten Reinigungsmöglichkeit der Löcher).

Eine halbjährliche Reinigung der Tunneldecke sowie der Tunnelwände ist nach wie vor zu empfehlen, um die Lichtreflexion an allen Oberflächen möglichst hochzuhalten und um starken Schmutzablagerungen entgegenzuwirken. Die Reinigung der Deckenleuchten ist ebenfalls halbjährlich zu empfehlen, um den zur Verfügung stehenden Lichtstrom möglichst hochzuhalten. Mittels Hochdruckwasser und zusätzlichen Bürsten kann eine verbesserte Reinigung erzielt werden.

Beleuchtung und Spektrum

Es ist eine möglichst gleichmäßige Fahrbahn-Ausleuchtung anzustreben, da diese wesentlich angenehmer empfunden wird als eine Situation mit ungleichmäßiger Beleuchtung. Schwankungen der Fahrbahnleuchtdichte stören außerdem die visuelle Informationsverarbeitung, was in der Folge zu Schwierigkeiten und verlängerten Reaktionszeiten beim Erkennen von Objekten auf der Fahrbahn führen kann. Eine gleichmäßige Fahrbahn-Ausleuchtung ist Grundbestandteil einer guten Tunnelbeleuchtung.

Vollkommen durchlaufende Lichtbänder ohne jegliche Abstände in Längsrichtung der Tunnel-Anlage würden dynamische Schatten im Fahrzeuginneren gänzlich vermeiden und die Autofahrer somit nicht ablenken. Gleichzeitig lässt sich damit auch eine gleichmäßige Ausleuchtung der Fahrbahn erreichen. Leuchten mit Abständen zueinander hingegen erzeugen während der Fahrt ein Flackern im Auto-Innenraum und führen zu Irritationen, welche die Aufmerksamkeit und Sehleistung der AutofahrerInnen beeinträchtigen können.

Aus wahrnehmungspsychologischer Sicht wären daher durchlaufende Lichtbänder anzustreben. Als Kompromisslösung wäre auch jede weitere Reduktion des Leuchten-Abstandes ein Schritt in die richtige Richtung.

Tunnelwandgestaltung

In Studien zeigte sich, dass eine weiße Tunnelwandfarbe im Vergleich zu einer grauen oder schwarzen Tunnelwand positive Effekte haben kann (verstärkte Lenkung der

Aufmerksamkeit auf die Fahrbahn und geringere Geschwindigkeitsüberschreitung). Effekte einer dem aktuell verwendeten RAL-Farbtönen 1015 (Hellelfenbein) ähnlichen Farbe wurden jedoch nicht untersucht.

Die im Portalbereich des Plabutsch-Tunnels aufgetragenen Musterflächen im RAL-Farbtönen 9010 (Reinweiß) sind bzgl. einer sichtbaren Verschmutzung eher anfällig. Die positiven Effekte einer weißen Tunnelwand würden durch diese Verschmutzung jedenfalls reduziert werden. Auch eventuelle Farb-Abbildungen, welche im Randbereich der LEDs verursacht werden können, sind auf einer reinweißen Wand viel eher sichtbar. Der in den Tunnel-Anlagen sehr häufig verwendete RAL-Farbtönen 1015 (Hellelfenbein) kaschiert diese Effekte meist ausreichend.

Zwar zeigen sich Vorteile einer weißen Tunnelwandgestaltung im Vergleich zu einer grauen oder schwarzen Tunnelwand, es lässt sich jedoch nicht sagen, ob eine weiße Tunnelwand auch Vorteile gegenüber einer hellelfenbeinfarbenen Tunnelwand hätte. Dies müsste in einer eigenen Studie untersucht werden. Unbestritten ist jedoch, dass eine weiße Tunnelwand anfälliger für Verschmutzungen wäre. Es wird daher weiterhin die Verwendung des RAL-Farbtönen 1015 (Hellelfenbein) empfohlen.

Hinsichtlich einer möglichen Farbgebung der Tunnelwände häufen sich die Indizien, dass durch eine Verwendung von cyan-, blau-, oder grünfarbigen Tunnelwänden das Stressempfinden von AutofahrerInnen reduziert werden kann. Auch gibt es Hinweise auf positive Effekte auf die Aufmerksamkeit. Hierbei ist es nicht notwendig, die gesamte Tunnelwand farblich zu gestalten, auch mit einer teilweisen Farbgebung der Tunnelwand lassen sich diese Effekte bereits erzielen. Bei einer Farbgebung der Tunneldecke sind ähnliche Effekte denkbar, hierzu gibt es jedoch noch keine Studien. Weiters könnte anstelle eines farblichen Anstrichs der Tunnelwände/-decke auch eine farbliche Effektbeleuchtung verwendet werden.

Es gibt vielversprechende, wahrnehmungspsychologisch plausible Hinweise hinsichtlich positiver Effekte einer möglichen Farbgebung der Tunnelwände oder -decke.

Diese Ergebnisse basieren jedoch ausschließlich auf Tunnelsimulatorstudien. Um ein stichhaltiges, vollständiges Bild zu erhalten, wäre eine Feldstudie in einem realen Tunnelabschnitt notwendig.

Sicherheitsaspekte

Helle Tunnel-Einfahrtsbereiche am Tag verhindern, dass AutofahrerInnen auf ein „schwarzes Loch“ zufahren müssen. Um einen ähnlichen Effekt nachts bei der Ausfahrt aus dem Tunnel zu vermeiden, könnte die Tunnelanschlussstrecke unmittelbar nach dem Tunnel aufgehellert werden. Insbesondere schwierige Streckenabschnitte unmittelbar nach dem Ausfahrtsbereich (z.B. Kurven) sollten in der Nacht zusätzlich aufgehellert werden (z.B. Katschberg-Tunnel oder Tauern-Tunnel mit hoher Unfallhäufigkeit). Konkrete Maßnahmen müssen auf Basis lichttechnischer Messungen vor Ort individuell auf den jeweiligen Tunnel und die dortige Situation abgestimmt sein.

Bei der Gestaltung von Notausgängen wird auf Basis der analysierten Studien und wahrnehmungspsychologischen Bewertung eine farbliche Gestaltung mit einer dunkelgrünen Tür vor einem hellgrünen Portal empfohlen. Durch die Farbkontraste zwischen Tunnelwand, Notausgangsportal und Notausgangstür kann eine sehr gute Sichtbarkeit und Erkennbarkeit des Notausgangs auch im Ereignisfall gewährleistet werden. Ein Fenster in der Notausgangstür kann einen Bezug zur Außenwelt herstellen und die Nutzung der Tür intuitiver machen, da durch das Fenster die sichere Außenwelt erkennbar ist. Der Notausgang sollte außerdem mit zusätzlicher grüner LED-Beleuchtung markiert sein, welche im Ereignisfall blinkt. Als Blinkfrequenz wird eine Frequenz von 1-4 Hz empfohlen.

Die besondere Hervorhebung der Tür durch ein dunkleres Grün erleichtert das schnelle Wahrnehmen und Erkennen des Fluchtwegs als solchen. Die Kontrastierung von Portal, Tür und Tunnelwand zueinander ist hier von großer Bedeutung! Durch eine zusätzliche, im Ereignisfall blinkende, grüne Beleuchtung wird das schnelle Wahrnehmen und Erkennen noch weiter unterstützt.

WISSENSVERBREITUNG

Im Rahmen des Projektes wurden mehrere Artikel in der lichttechnischen Zeitschrift LICHT publiziert. In der Ausgabe 05 | 2021 wurde ein Kurzartikel als Teaser zum Projekt publiziert, darauffolgend ein Langartikel in der Ausgabe 06 | 2021 mit einem ersten Teil der Ergebnisvorstellung zum allgemeinen Stand, sowie in Ausgabe 09 | 2021 ein weiterer Langartikel mit dem zweiten Teil der Ergebnisvorstellung aus dem vorliegenden Projekt.

In der Zeitschrift LpR (LED professional Review) erscheint in der Ausgabe November/Dezember 2021 zusätzlich ein weiterer Artikel in englischer Sprache für eine weltweite Leserschaft.

LITERATURVERZEICHNIS

- Canazei, M., Pohl, W. (2014). Feldstudie: Der Einfluss der Tunnelbeleuchtung auf kognitive und visuelle Leistungsparameter; unveröffentlichter Bericht; Auftragsforschung ASFINAG GmbH. 2013
- Canazei et al. (2017). Neue Beleuchtungskonzepte und deren Einfluss auf die Tunnelsicherheit. JES Tagung, Stift Schlierbach, 18./19. Mai 2017.
- Hu, F., Chen, F., Zhu, J., & Wang, Z. A. (2019). Influence of Sidewall Color of Highway Long Tunnel on Driving Safety. In *CICTP 2019* (pp. 510-521).
- ILF Beratende Ingenieure; Bartenbach GmbH (2016): Einfluss der Tunnelinnenstrecken-Beleuchtung auf die Unfallrate. Unveröffentlichter Endbericht – Auftragsforschung ASFINAG GmbH, 2015-2016; in: 2H640/ILF-Li--0000/Rev.0 - Vorläufiger Endbericht
- Kimura, M., Hirakawa, S., Uchino, H., Motomura, H., & Jinno, M. (2014). Energy savings in tunnel lighting by improving the road surface luminance uniformity—A new approach to tunnel lighting. *Journal of Light & Visual Environment*, 38, 66-78.
- Kircher, K., & Ahlstrom, C. (2012). The impact of tunnel design and lighting on the performance of attentive and visually distracted drivers. *Accident Analysis & Prevention*, 47, 153-161.
- Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr.
RVS 09.02.41: Tunnel, Tunnelausrüstung, Lichttechnik, Tunnelbeleuchtung.
Wien : Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2020.
- Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2020. Pohl, W. (2015). Wahrnehmungspsychologische Aspekte bei der Tunneldurchfahrt; 1. JES Tunnelsymposium, Bad Leonfelden, 2015
- Ronchi, E., & Nilsson, D. (2014). Traffic Information Signs, colour scheme of emergency exit portals and acoustic systems for road tunnel emergency evacuations. *Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Lund, Sweden*, 3173.

Ronchi, E., & Nilsson, D. (2016). A Virtual Reality experiment on the design of flashing lights at emergency exit portals for road tunnel evacuations. *Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University*.

Ronchi, E., Fridolf, K., Frantzich, H., Nilsson, D., Walter, A. L., & Modig, H. (2018). A tunnel evacuation experiment on movement speed and exit choice in smoke. *Fire Safety Journal*, 97, 126-136.

Tschudy et al. (2012). Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung. Schweizerischer Verband der Straßen- und Verkehrsfachleute (VSS). Forschungsauftrag VSS_2008/204_OBF.

Xia, Z., Lv, Y., Pan, X., Chen, F., Xu, M., Wu, G., & Feng, D. (2017). Research on design pattern of city tunnel side wall based on the driver visual effect. In *Advances in Human Aspects of Transportation* (pp. 689-701). Springer, Cham.