



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# Vereinheitlichung der Tunnel- beleuchtung

**D'uniformisation de l'éclairage dans les tunnels**

**Standardization of Tunnel Lighting**

**Amstein + Walthert AG**  
Daniel Tschudy, Dipl. Architekt ETH

**Amstein + Walthert Progress AG**  
Urs Welte, Dipl. Ing. ETH  
Lars Mellert, MSc./Geogr. UZH

**bbs Ingenieure AG**  
Peter Bürkel, Dipl. Ing. ETH  
Daniel Schuler, Dipl. Ing. FH

**Heinz Dudli, Dipl. Ing. FH**

**Forschungsauftrag "VSS 2008/204\_OBF" auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) commissioned by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



# Vereinheitlichung der Tunnel- beleuchtung

**D'uniformisation de l'éclairage dans les tunnels**

**Standardization of Tunnel Lighting**

**Amstein + Walthert AG**  
Daniel Tschudy, Dipl. Architekt ETH

**Amstein + Walthert Progress AG**  
Urs Welte, Dipl. Ing. ETH  
Lars Mellert, MSc./Geogr. UZH

**bbs Ingenieure AG**  
Peter Bürkel, Dipl. Ing. ETH  
Daniel Schuler, Dipl. Ing. FH

Heinz Dudli, Dipl. Ing. FH

**Forschungsauftrag "VSS 2008/204\_OBF" auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

# Impressum

## Forschungsstelle und Projektteam

### Projektleitung

Daniel Tschudy, Amstein + Walthert AG

### Mitglieder

Urs Welte, Amstein + Walthert Progress AG  
Lars Mellert, Amstein + Walthert Progress AG  
Peter Bürkel, bbs Ingenieure AG  
Daniel Schuler, bbs Ingenieure AG  
Heinz Dudli, Bern

## Federführende Fachkommission

Fachkommission EK 2.11

## Begleitkommission

### Präsident

Peter Köhli, Strassenverwaltung Horgen

### Mitglieder

Peter Bürkel, Bürkel Baumann Schuler (bbs) Ingenieure + Planer AG Winterthur  
Heinz Dudli, Bern  
Christian Gammeter, ASTRA Bundesamt für Strassen, Bern  
Christoph Lehmann, HDZ Elektroingenieure AG Urdorf  
Dr. Arnd Rogner, METAPHYSICS Ste-Croix  
Christian Scholer, TBA BL Liestal  
Walter Steiner, Altdorf  
Benoît Stempfel, PERSS Ingénieurs-Conseils SA Fribourg

## Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

## Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>7</b>
	<b>Résumé</b> .....	<b>8</b>
	<b>Summary</b> .....	<b>9</b>
1	Einleitung.....	11
1.1	Programm zur Berechnung .....	11
1.2	Grundlagen.....	11
1.3	Ziele.....	11
1.4	Abgrenzung .....	12
2	Stand der Forschung.....	14
3	Analyse.....	16
3.1	Optische Führung.....	16
3.1.1	Korrektur der Spurhaltung bei der Tunneleinfahrt .....	16
3.1.2	Optimierung der optischen Linienführung .....	16
3.1.3	Optische Gestaltung von Überfahrten.....	17
3.1.4	Fortschritte der Verkehrspsychologie.....	17
3.1.5	Zusammenfassung.....	17
3.2	Sicherheit.....	18
3.2.1	Verkehrssicherheit und Tunnelbeleuchtung .....	18
3.2.2	Verkehrssicherheit im Nationalstrassennetz .....	18
3.2.3	Bericht des österreichischen Bundesamtes für Verkehrssicherheit.....	18
3.2.4	Übersicht zur Kostenoptimierung.....	18
3.3	Variierende Lichtverhältnisse.....	19
3.4	Wahrnehmung, Risiko und Sicherheit.....	19
3.4.1	Allgemeine Auswirkungen .....	19
3.4.2	Tunnelspezifische Auswirkungen.....	20
4	Leuchtmittel .....	23
4.1	Gesamtsystem Leuchte.....	23
4.2	Lebensdauer eines Leuchtmittels .....	23
4.3	Leuchtstofflampen.....	24
4.4	Natriumdampfhochdruck-Entladungslampen .....	26
4.5	LED .....	28
4.6	Allgemeine Reinigung .....	30
4.7	Schlussbemerkung.....	31
5	Berechnungen und Messungen.....	32
5.1	Annahmen .....	32
5.2	Typische Anordnung .....	35
5.2.1	2-streifig.....	35
5.2.2	3-streifig.....	37
5.2.3	Leuchtenwahl.....	38
5.2.4	Adaptationsleuchten.....	39
5.2.5	Durchfahrtsleuchten .....	40
5.3	Nutzwertanalyse .....	47
5.3.1	Kriterienwahl .....	47
5.3.2	Nutzwert .....	49
5.3.3	Kritik .....	51
5.4	Wirtschaftlichkeitsanalyse für 2 km Tunnellänge.....	52
5.4.1	2-streifig Adaptation .....	52
5.4.2	2-streifig Durchfahrt.....	52
5.4.3	3-streifig Adaptation .....	53
5.4.4	3-streifig Durchfahrt.....	53
5.4.5	Einfluss $q_0$ des Reflexionsverhaltens auf die Durchfahrtsbeleuchtung .....	54
5.4.6	Einsparmöglichkeiten im 2-streifigen Tunnel.....	54
5.5	Resultate .....	54
6	Empfehlungen.....	56

<b>Anhänge .....</b>	<b>58</b>
<b>Abkürzungen .....</b>	<b>101</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>103</b>
<b>Projektabschluss.....</b>	<b>107</b>
<b>Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen .....</b>	<b>110</b>

## Zusammenfassung

Die Untersuchung zur "Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung" hat zahlreiche Erkenntnisse geliefert, allen voran die Überzeugung vom wirtschaftlichen und ökologischen Nutzen bzw. den Mehrwert geeigneter Leuchten. Leuchten, die vordergründig keinen Unterschied zulassen und trotzdem, basierend auf der Lichtverteilung, der Lichtmenge und ihrer Grösse und Verarbeitung bis hin zur Montage, grosse Unterschiede aufzeigen.

Eine eigentliche Vereinfachung der Planung ist nicht auszumachen. Durch die Möglichkeiten der Berechnungstools und Wahl der Randbedingungen ist das Optimierungspotenzial gewachsen. Leuchten können präziser unterschieden und richtig platziert eingesetzt werden. Die Umgebung wird präziser erfasst und kann dadurch besser beurteilt werden. Steuerungsmöglichkeiten und neue Technologien der Leuchtmittel erhöhen Sparpotenzial und Lebensdauer. Diese Vorgehensweise lässt den Schluss zu, dass die Optimierung einer Anlage durch das Wissen neuer Technologien und vieler gebauter Tunnelanlagen in der Schweiz viel präziser bearbeitet werden kann.

Interessant sind die Resultate der Nutzwertanalyse wie auch der Wirtschaftlichkeitsüberlegung. Sie zeigen kurz- und langfristigen Nutzen auf. Dabei kann die Dichtungslänge einer Leuchte wichtig sein oder auch die richtige Lichtverteilung. Trotzdem bleibt die Planung einer Tunnelanlage eine Fachplanung, da die Variablen und Möglichkeiten der Einflussnahme ein präzises Fachwissen voraussetzen.

## Résumé

La recherche d'uniformisation de l'éclairage dans les tunnels a fourni de nombreux éléments de réponse, tous mettant en avant les avantages économiques et écologiques de l'emploi de luminaires adaptés.

Bien que les différences ne soient pas forcément visibles au premier abord, il existe de grandes différences entre les luminaires, du point de vue de leur homogénéité d'éclairage, leur puissance, leur niveau de finition, et leurs techniques de montage. Une simplification de la planification n'est pas possible. Grâce aux outils de calcul, et au choix des conditions d'entrée, le potentiel d'optimisation est cependant accru. Les luminaires peuvent être mis en œuvre de manière plus correcte et précise. L'environnement est mieux pris en compte, et peut de ce fait être mieux apprécié.

Les possibilités de commande et les nouvelles technologies des luminaires augmentent leur potentiel d'économie et leur durée de vie. Cette démarche permet de conclure que l'optimisation d'une installation peut être traitée de manière beaucoup plus précise grâce aux connaissances sur les nouvelles technologies et à l'expérience d'installations de tunnels construites en Suisse.

L'analyse de la valeur et les considérations économiques sont intéressants. Ils montrent des avantages à court et long terme. De ce point de vue, la longueur d'un joint, ou une bonne répartition de la lumière peuvent avoir leur importance.

La planification d'une installation de tunnel reste cependant une spécialité "métier": seule une connaissance précise permet la mise en œuvre des variables et des possibilités d'influencer l'installation.



## Summary

The study on "Standardization of Tunnel Lighting" has provided numerous insight view in the area of tunnel lighting engineering and consulting. The added value regarding the economic and environmental benefits could clearly be outlined, if appropriate luminaires are evaluated and selected. Many luminaires do not show benefits at first glance, however, if lighting distribution, lighting volume, size and installation properties are considered, big differences are recognized.

The study shows further that the engineering process cannot be simplified, but there are more possibilities to optimize. The new software tools make the optimization easier – the boundary conditions can be defined more precisely. The differences between different products may clearer be recognized and therefore better on-site positioning is available. Further, the energy conservation potential and the life span are known more precisely. The conclusion is: Lighting systems can be better optimized, if the technology of the luminaires is known and brought into modern calculation tools.

The results of the cost/benefit analysis are interesting: short-term vs. long-term considerations can be compared. Important parameters may be the lighting distribution in one case, or even the length of a seal in of luminaire housing on the other hand. However, the engineering of a tunnel lighting system still requires special skills; too many possibilities, parameters or system variations have to be considered.



# 1 Einleitung

Die Tunnelbeleuchtung ist jahrelang in ähnlicher Weise angewandt und ausgeführt worden. Verschiedene Ereignisse, neue Technologien und nicht zuletzt überarbeitete Normen [7] haben zu einem neuen Verständnis für die Tunnelsicherheit, die Tunnelwartung und -planung geführt. Dabei soll die prototypische Tunneleinrichtung einer modularen und vereinfachten Tunnelplanung folgen. Dass dieser Anspruch nicht so einfach ist, versteht sich aus den unzähligen Parametern, die ebenfalls in die Planung einfließen und immer wieder neu berücksichtigt werden müssen. Die Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung ist trotzdem ein Anspruch, der im Ansatz richtig und in der angewandten Planung richtungsweisend sein soll.

Aufgrund der Nutzwertanalyse und den Wirtschaftlichkeitsberechnungen ergeben sich Forderungen, diese in Korrelation zu bringen. Demzufolge soll ein hoher Nutzwert mit einer guten Wirtschaftlichkeit übereinstimmen. Das mögliche Einsparpotenzial durch optimierte Beleuchtungen soll ausgewiesen werden. Ebenso die Einflussfaktoren, die aufgrund der Berechnungen zusätzliche Erkenntnisse liefern.

Es zeigt sich bereits im Vorfeld der Berechnungen, dass die Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung nicht zwingend mit der Vereinfachung in Einklang zu bringen ist. Ausstrahlcharakteristik und Positionierung sowie Gestaltung des Umfeldes haben wesentliche Einflüsse auf die Parameter.

## 1.1 Programm zur Berechnung

- tunlight 2: Java Applikation
- Relux Tunnel

## 1.2 Grundlagen

- Evaluation von hocheffizienten Beleuchtungstypen für symmetrische und asymmetrische Lichtverteilung (Einfahrt- / Durchgangsbeleuchtung)
- Evaluation mittels Literatur und Erfahrungsberichten für LED Beleuchtung im Durchfahrtsbereich (es sind keine Adaptationsleuchten in LED erhältlich (Stand 2011))

## 1.3 Ziele

Basierend auf den Zielen der Neugestaltung des Finanzausgleiches und der Aufgabenteilung zwischen Bund und Kantonen ist der Bund heute Eigentümer und Bauherr der Nationalstrassen. Aus dieser Situation ergibt sich die Notwendigkeit, die Ausführung aller zur realisierenden und zu erneuernden Beleuchtungen von Tunneln des Nationalstrassennetzes zu vereinheitlichen und auf das Erhaltungsmanagement abzustimmen, auf Basis der bestehenden VSS-Norm SN 640 551 [7]. Aufgrund des vorliegenden Entwurfs der überarbeiteten VSS Norm [7] werden bereits korrigierte Werte übernommen.

Die VSS-Norm definiert die Anforderungen an die Leuchtdichten, ohne auf Art und Weise der Realisierung, der Art der Leuchten, der Technologie und Energieeffizienz einzugehen. Die Forschungsarbeit konzentriert sich insbesondere auf diese Aspekte. Mit der Vereinheitlichung sind die folgenden Ziele zu erreichen:

- Vereinheitlichung der Beleuchtungs-Technologie
- Optimierung der Beleuchtung bezüglich der Energie-Effizienz, insbesondere im Hinblick auf die Einführung neuer Technologien
- Optimierung der Beleuchtungstechnik im Hinblick auf die Lebenszykluskosten, die Erneuerung und den Ersatz, inkl. Betrachtung der Montage-Technik
- Vorschläge zum Beleuchtungskonzept und der Systemwahl für alle Bereiche eines Tunnels inkl. der Tunnelzufahrt

- Effizienzsteigerung der Projektierung
- Beurteilung der Beleuchtungstechnologien unter dem Aspekt der optischen Führung

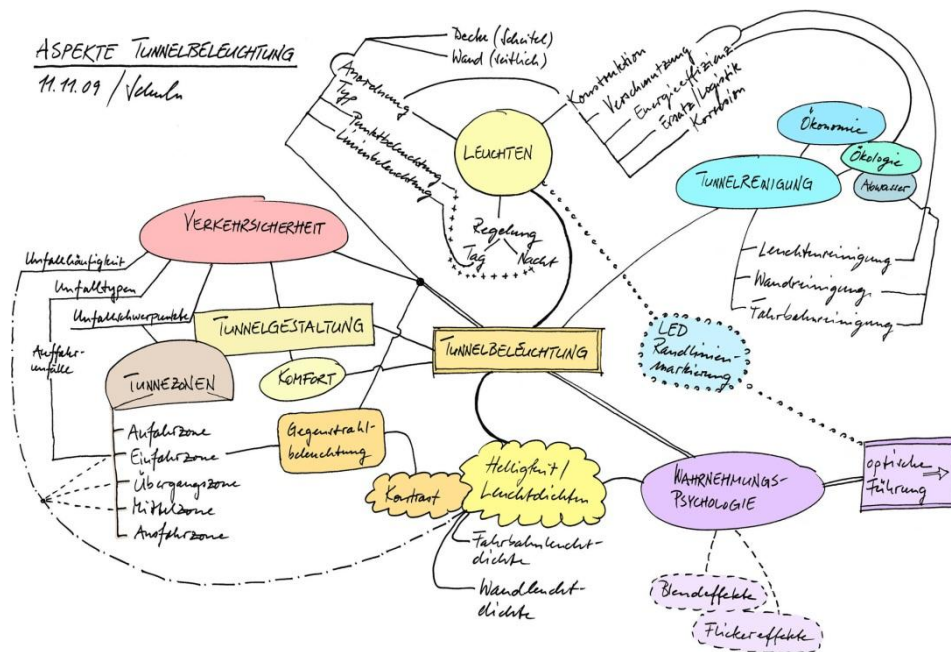


Abb. 1.1 Aspekte der Tunnelbeleuchtung, Ausgangslage

### Hypothese

Durch die geeignete Wahl des optimalen Leuchtmittels wie auch der Leuchte inkl. Montagevorrichtung und den erforderlichen und tünneleigenen Vorgaben können Kosten in der Beschaffung, in der Montage, im Unterhalt und auch in Stromverbrauch eingespart werden.

Der Tunnel bildet dabei ein Gesamtsystem, in welches auch weitere Bedingungen wie Reflexionsgrade der Tunnelwände, Belagsreflexionsgrade, Lichtverteilung und Lampenlebensdauer einfließen.

Alle Parameter wie Oberflächengestaltung, Profil, Geschwindigkeit, L20 Messung [39], Leuchtenwahl etc. spielen zusammen und ergeben ein System. Welche Parameter im jeweiligen Projekt geändert und optimiert werden können, kann in der vorliegenden Forschungsarbeit aufgezeigt werden. Allerdings sind viele Faktoren Gegenstand der Projektvorgaben, sodass die verbleibenden Faktoren den gegebenen Randbedingungen angepasst werden können.

## 1.4 Abgrenzung

Die Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung zeigt auch ihre Grenzen auf. Bei der Änderung einzelner Faktoren wie z.B. dem Reflexionsgrad der Wände, ergibt sich aufgrund der Berechnung der normierten Randbedingungen eine völlig neue Situation. Allerdings zeigt der Gebrauch von modernen Berechnungsprogrammen wie Relux Tunnel oder Tunlight2 auch, dass sich ändernde Bedingungen sehr schnell einbringen und Berechnungen relativ einfach korrigieren lassen.

Aufgrund der Umschichtung des Beleuchtungsmarktes unter dem Einfluss der LED Technik werden diese neuen Leuchtentypen ebenfalls betrachtet und in der Durchgangsbeleuchtung den Leuchtstofflampenleuchten gegenübergestellt. Verschiedene Tunnelberechnungen zeigen Vor- und Nachteile der jeweiligen Beleuchtungsart und Leuchtenwahl unter dem Aspekt einer gleichbleibenden Umgebung. Die normativen Randbedingungen müssen dabei integrativ eingehalten werden.

In der Nutzwertanalyse und der Wirtschaftlichkeitsberechnung werden die Lichtsysteme bzgl. Lebenszykluskosten soweit wie möglich unter verschiedenen Aspekten (Montage, Leuchten- und Lampenlebensdauer etc.) beurteilt.

Ausgehend von der Flickerfrequenz zwischen 4 Hz und 15 Hz sind die Leuchtenabstände bzgl. Geschwindigkeit entsprechend angepasst. Das führt mancherorts dazu, dass Pakete von 2 oder 3 Leuchten hintereinander platziert werden müssen. Aus wirtschaftlichen Gründen wird auf die Bandanordnung verzichtet. Diese Anordnung ist zwar absolut unproblematisch, hat aber zur Folge, dass vielmehr Leuchten als normativ notwendig eingesetzt werden müssten. Die Bandanordnung ist optisch interessant, würde aber neue Leuchtentypen mit geringerem Lichtstrom bedingen, die so nicht erhältlich sind. Hier wären weitergehende Untersuchungen anzustellen.

Zur Ausbildung des Portals gibt es bereits Studien und Untersuchungen, die alle zum Zweck haben, den Kontrast beim Einfahren zu optimieren. Dieser Sachverhalt ist nachvollziehbar und wird dementsprechend erwähnt, aber nicht näher untersucht.

Aufgrund der Vielzahl der Parameter im Tunnelbereich kann eine Effizienzsteigerung der Projektierung von Tunnelbeleuchtungsanlagen nicht proklamiert werden. Die vorhandenen Softwarehilfen sind übersichtlich gestaltet und können bei entsprechendem Fachwissen und Schulung zur Unterstützung benutzt werden. Trotzdem bleibt die Planung weitgehend eine Ingenieurleistung und kann kaum zu einer Lichtgestaltungsdisziplin generiert werden. Insbesondere die komplexen Zusammenhänge zwischen Oberflächen und Lichtverteilung, Gleichmässigkeiten, Flicker, Anzahl Fahrstreifen, Geschwindigkeit, Fahrzeugaufkommen, Kontrastgütekoeffizient, Wandleuchtdichte zu Fahrbahnleuchtdichte etc. lassen keine vereinfachte Berechnung zu, ausgenommen der Zuhilfenahme von Programmen. Zusätzlich bilden die Einstellmöglichkeiten der Programme mit ihrer programmeigenen Logik eine weitere Hürde.

Das Thema der optischen Führung ist vielseitig und kann entsprechend komplex diskutiert werden. Gemäss Kap. 3.1 "Optische Führung" hängt die optische Führung klar von der Anordnung der Leuchten und deren Lichtstärke in Richtung des Fahrerauges, der Leuchtdichteverteilung auf der Fahrbahn und den Wänden, der baulichen Gestaltung des Portals sowie des Tunnelinneren und der Sichtbarkeit der Fahrbahnmarkierungen sowie evtl. optischer Leiteinrichtungen ab. Dieser Sachverhalt um die Diskussion der optischen Führung wird auch in den umliegenden Ländern ähnlich gehandhabt.

Subjektive Meinungen vermischen sich mit objektiven Untersuchungen, die in einem bestimmten Umfeld gemacht wurden. Es zeigt sich, dass bei ändernden Umgebungsbedingungen subjektiv und objektiv andere Gesetze gelten. Bei dunklem Helligkeitseindruck beispielsweise (ausgelöst durch dunkle Oberflächen) werden Leuchten sowie Mittel- oder Fahrstreifen zum unmittelbaren Führungsinstrument. Dagegen kann bei heller Raumgestaltung und explizit hellen Wänden der ganze Raum und vor allem die Wände selber zur optischen Führung werden. Wann der Wechsel geschieht, ist nicht Gegenstand dieser Untersuchung. Tatsache ist, dass das Auge, um das Fahrzeug in der Spur zu halten, eine optische Führung braucht und sucht, um sich entsprechend richtig einzuordnen. Leuchten und Mittelstreifen bieten sich bei tiefen Helligkeitswerten durch optimalen Kontrast am besten an. Bei hellem Umfeld kann dies der gesamte Raum oder auch die Wand neben dem Mittelstreifen übernehmen.

## 2 Stand der Forschung

Der Stand der Forschung zeigt auf, dass viele Gedanken und Prozesse seit Jahrzehnten zu ähnlichen aber kaum neuen Resultaten führen. Trotzdem laufen nebenher immer wieder Forschungsarbeiten in verwandten Gebieten, die das Vermögen haben, durch neue Theorien zu neuen Resultaten zu führen.

Im Folgenden werden Gedanken, Theorien und Absichten aufgezeigt, die nicht Bestandteil dieses Projekts waren, aber trotzdem dringende Tendenzen beschreiben, die so interessant und weitreichend sein können, dass man ihnen unbedingt auf den Grund gehen möchte. Sie werden als Einzelschicksale aufgezählt, bilden aber innerhalb der Tunnelproblematik eine zusammenhängende Beziehung.

Die **Auswertung der L20 Messungen** aller bekannten und gemessenen Schweizer Tunnel zeigt grosse Unterschiede im Einfahrtskontrast (Himmelsanteil im Ausschnitt). Um dieses Kontrastverhältnis zu optimieren, wurden verschiedene Strategien beschrieben und teilweise auch untersucht [60]. Eine möglichst dunkle Ansicht und eine sehr helle Tunneleinfahrt vereinfachen die Hürde des Eintritts.

Verschiedene neue Anordnungen der Beleuchtungskörper im Einfahrts- und Durchfahrtsbereich (Adaptation, Gegenstrahl) sind untersucht und zumindest lichttechnisch für interessant befunden worden. Das hat damit zu tun, dass bzgl. räumlicher Lichtverteilung einiges verbessert werden könnte. In der Praxis sind diese Vorschläge jedoch aus unterhaltstechnischen Gründen untauglich.

Immer wieder wird die **Punkt- und Linienthematik** der Beleuchtungskörper im Durchfahrtsbereich erwähnt. Seitens optischer Führung und Gleichmässigkeit ist die Linie klar vorzuziehen. Aus Unterhalts- und energetischen Gesichtspunkten schneidet die Punktleuchte besser ab. Prüfwert wäre ein einfaches vergossenes LED-Band, direkt auf die Trasse montiert und IP geschützt. Es würde die richtige Beleuchtungsstärke abgeben können und wäre auch beliebig regulier- und schaltbar. Zudem könnte die Wärme direkt an die Trasse abgegeben werden.

Die optische Führung hat als Thema immer wieder zu Diskussionen geführt. Einerseits ist sie normativ umschrieben (siehe 3.1), lässt aber subjektiv Interpretationen zu. Diese Interpretationen scheinen altersabhängig und kulturell bedingt zu sein. Die subjektive Umschreibung ist im vorliegenden Projektbericht erwähnt, allerdings dürften weitergehende Untersuchungen zu besseren Resultaten führen. Vereinfacht gesagt wird die optische Führung irrelevanter, je heller ein Tunnel erscheint. Ab welchem Helligkeitseindruck der Sprung von der Mittellinie zur räumlichen Führung passiert, ist nicht Gegenstand der Untersuchung und müsste in weiteren Arbeiten genauer untersucht werden.

Ein wichtiger Zusammenhang wurde bzgl. Wandhelligkeit entdeckt. Sie verhält sich praktisch linear zum Reflexionsgrad. Damit kann theoretisch eine berechnete Tunnelbeleuchtung, die an und für sich brauchbare Resultate liefert, jedoch die Wandleuchtdichte (80% der angrenzenden Fahrbahnleuchtdichte) nicht erreicht, durch einfache Korrektur des Reflexionsgrades der Wand korrigiert werden (siehe I.1.2).

Es konnte aufgezeigt werden, dass die Belagswahl bzgl. Helligkeit des Belages ebenfalls Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit hat, indem hellere Beläge durch einen besseren  $q_0$  Faktor deutlich Energie sparen (siehe 5.4.6).

Eine Untersuchung, die grosses Einsparpotenzial birgt, betrifft das Gebiet des mesopischen Sehens. Das mesopische Sehen beschreibt die Augenempfindlichkeit zwischen skotopischem und photopischem Sehen (Nacht- und Tagessehen). Dabei liegt die höchste Augenempfindlichkeit im Grünbereich, sodass mit entsprechender Ausrichtung der Beleuchtung bei gleichbleibendem Helligkeitsempfinden 30% Energie eingespart werden könnte. Der Nachteil der Lichtstrahlung im Grünbereich kann durch Zumischen von weissem Licht verbessert werden. Trotzdem ist die Hautfarbe dadurch schlechter wiederge-

geben. Die sogenannte Gesichtserkennung leidet spürbar darunter. Im Tunnelbereich jedoch ist die Gesichtserkennung vernachlässigbar, sodass eine grüne Lichtfarbe nicht unbedingt störend wirkt. Dieser Sachverhalt wäre interessant für eine genauere Untersuchung und deren Einsparungen.

Weitere interessante, die Verkehrssicherheit betreffende Untersuchungen betreffen Fahrassistenten und fahrzeugabhängige Steuerungen. Damit kann Einfluss auf Verkehrsaufkommen, Abstandsverhalten, Geschwindigkeit und damit direkt auf die Verkehrssicherheit genommen werden.

Die altersabhängige visuelle Beurteilung ist ebenfalls ein Thema, welches aufgrund verschiedener Altersgruppen mit unterschiedlicher Sehkraft aufeinander treffen. Ein 18-jähriger hat ein anderes Reaktionsvermögen aufgrund intakten peripheren Sehens. Ein 90-jähriger wird immer noch wie ein 30-jähriger eingestuft, obwohl die meisten Faktoren im Sehbereich stark davon abweichen.

## 3 Analyse

Die Verkehrspsychologie hat in den letzten Jahren an Bedeutung zugenommen. Die Literatur, im Zusammenhang mit dem Betrieb und der Planung von Strassen, ist umfassend. Eine Ausbreitung des Wissens ist vor allem auch mit der Entwicklung der Fahrerassistenzsysteme und den Komfortansprüchen der Autokäufer weiter gewachsen. Gefördert wurde auch die Forschung zum Verhalten der Autofahrer dank der Bereitstellung von Simulatoren sowie der Geräte zur Aufnahme und Auswertung von Messdaten. Im Folgenden werden Erkenntnisse aus der Literatur vorgestellt.

### 3.1 Optische Führung

Zitat aus der Norm: *"Die Leuchtenanordnung und die Leuchtdichteverteilung auf Fahrbahn und Wänden müssen den Fahrbahnverlauf und den Tunnelraum aus genügender Entfernung sichtbar machen. Der Fahrer muss im Tunnel jederzeit die Position seines Fahrzeuges auf dem Fahrstreifen erkennen können.*

*Die optische Führung hängt ab von der Anordnung der Leuchten und deren Lichtstärke in Richtung des Fahrerauges, der Leuchtdichteverteilung auf der Fahrbahn und den Wänden, der baulichen Gestaltung des Portals und des Tunnelinnern und der Sichtbarkeit der Fahrbahnmarkierungen sowie eventueller optischer Leiteinrichtung (⇒ A.1.3). Eine gute optische Führung wird in der Regel vorausgesetzt."*

#### 3.1.1 Korrektur der Spurhaltung bei der Tunneleinfahrt

Im Bericht [28] wird auf die Spurhaltung hingewiesen, die insbesondere bei der Einfahrt in den Tunnel eine grosse Bedeutung hat. Es wurden Tests durchgeführt und dabei festgestellt, dass vor der Tunneleinfahrt ein grösserer Abstand vom Randabschluss als von der Fahrbahnmitte eingehalten wird. Es wird davon ausgegangen, dass die Fahrbahnmarkierung am Rand als Orientierungshilfe verwendet wird. Bei der Tunneleinfahrt wird eine Verschiebung des Verkehrs nach links festgestellt. Dabei wird vermutet, dass eine Orientierung auf die Mittelmarkierung ausgerichtet wird. Nach der Tunneleinfahrt geht der Fahrer dazu über, wieder auf die rechte Randmarkierung zurück zu kehren. Bei Überholvorgängen im Tunnel fahren insbesondere Personenwagen näher an den Fahrbahnrand als auf der freien Strecke.

#### 3.1.2 Optimierung der optischen Linienführung

Das Forschungsprojekt 19/86 des VSS [85] wurde von einem grossen Team unter Leitung des Instituts für angewandte Psychologie der Universität Zürich durchgeführt. Auslöser des Projekts war die Erkenntnis, dass Unfälle vielfach dort entstehen, wo der Motorfahrzeuglenker durch eine stellenweise unklare optische Führung verunsichert oder getäuscht wird. Dieser Zustand tritt bei zahlreichen Situationen auf. Im Vordergrund stehen Unterbrüche oder andere Unstetigkeiten von Markierungen, nicht einsehbare Strassenabschnitte oder Veränderungen der Beleuchtung.

Das Forschungsprojekt hatte das Ziel, Grundlagen zum Einsatz von Leiteinrichtungen an Gefahrenstellen zu schaffen. Der Begriff Leiteinrichtungen bezieht sich ausschliesslich auf optische Führungshilfen und nicht auf Schutzeinrichtungen wie beispielsweise Leit-schranken. Der Bericht behandelt vor allem grundsätzliche Aspekte der optischen Linienführung, die auch für die Verkehrssicherheit in Tunneln von massgeblicher Bedeutung sind.

In einer Untersuchungsphase wurde ein interessanter, wenig aufwändiger Versuch zur Erfassung der optischen Führung in Kurven durchgeführt. Dabei wurde 110m vor dem Beginn der Kurve ein Beobachter eingesetzt, der feststellte, in welcher Entfernung vor der Kurve die Bremslichter der vorbeifahrenden Personenwagen erstmals aufleuchteten. Ein analoger Versuch mit einer etwas anderen Zielsetzung könnte vor Tunnelvorfahrten mit unterschiedlichen Lichtverhältnissen durchgeführt werden. Ein zu prüfender Standort



wäre die Zufahrt aus Richtung St. Gallen zum Gubristtunnel bei normaler Beleuchtung und bei Sonnenlicht von Westen sowie bei unterschiedlicher Verkehrsdichte. Die Auswertung des Versuchs kann Angaben über den Anteil der Fahrzeuglenker liefern, welche einen Verlust der optischen Linienführung im Tunnel erwarten. Es ist davon auszugehen, dass Bremsmanöver vor der Einfahrt oder in der Einfahrtstrecke Auffahrunfälle auslösen.

### 3.1.3 Optische Gestaltung von Überfahrten

Der Bericht [27] der verkehrstechnischen Abteilung der Kantonspolizei Zürich behandelt die Gestaltung von Überfahrten von Mittelstreifen im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit und die Verkehrssicherheit. Dabei geht es wie bei den Tunneleinfahrten um die optische Linienführung. Die Untersuchung zur optischen Gestaltung von Überfahrten basiert auf Studien über den Einsatz von Leiteinrichtungen an kurvigen Strassen und für den Fahrzeuglenker nicht einsehbaren Abschnitten. Bei Autobahnüberfahrten finden sich ähnliche Verhältnisse. Wegen der grossen Geschwindigkeit des Verkehrs auf den Autobahnen und den eher kleinen Radien der Überfahrten sind spezielle Massnahmen zur Gewährleistung der optischen Linienführung bei unterschiedlichen Bedingungen vorzusehen. Analoge Verhältnisse finden sich bei der Einfahrt in einen Tunnel, wo ohne die Erhaltung der optischen Linienführung mit unerwarteten Bremsmanöver zu rechnen ist (siehe Studie von A. Cohen [30]). Diese beschreibt, dass der Blick bei Kurven nicht mehr dem innenseitigen Rand folgt, sondern auf den rechten Rand wechselt und dabei vom Nahbereich in die Ferne und zurück pendelt.

Ein ähnliches Blickverhalten wurde auch beim Einfahren in Tunnel festgestellt. Für die Festlegung von Führungshilfen bei Autobahnüberfahrten wurden umfangreiche Versuche am Tag und bei Nacht mit unterschiedlichen Arten durchgeführt. Am besten wurden Reflektoren am Innen- und am Aussenrand beurteilt.

### 3.1.4 Fortschritte der Verkehrspsychologie

Es ist bekannt, dass der Fahrer die grösste Fehlerquelle bei der Entstehung von Unfällen ist. Eine Möglichkeit, menschliche Fehler auszugleichen, besteht darin, mittels technischer Systeme (Fahrerassistenzsysteme) Fehlverhalten entgegen zu wirken. Im Fall von Auffahrunfällen vor einem Tunnel oder in der Einfahrtstrecke kann bei ungünstigen Lichtverhältnissen ein Warnsystem ein solches Ereignis verhüten. Gerade in diesem Fall ist die Einführung eines Gerätes zu erwarten. Dabei ist davon auszugehen, dass die Wirkung im Vergleich zum Anti-Blockiersystem (ABS) und zur Fahrdynamikregelung (ESP) grösser ist. Der Bericht [27] liefert umfassende Informationen über Fehlerarten beim Steuern, Assistenzsystemstrategien sowie Sicherheitsmassnahmen.

### 3.1.5 Zusammenfassung

Die beigezogenen Forschungsberichte und Studien aus dem Schnittbereich Verkehrspsychologie und Strassenverkehrstechnik liefern, im Hinblick auf das Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer bei sich verändernden Situationen, die folgenden massgebenden Erkenntnisse:

- Die Informationsbeschaffung erfolgt für das Spurhalten im Fall von Kurven sowie Hochleistungsstrassen mit dem zentralen Sehen (Blickfixierung auf optische Führungen). Dabei werden Blicke in die Ferne sowie eine Verschiebung der Blickrichtung vom rechten Rand zu Mittellinie ausgelöst.
- Veränderungen der Situation bewirken Verschiebungen der Fahrspuren in den Fahrstreifen (Spurverhalten).
- Veränderung der optischen Führung wie Unterbrüche und Inhomogenitäten verursachen eine Herabsetzung der Geschwindigkeit, die je nach einer Risikobeurteilung des Fahrers unterschiedlich ist. Möglich ist auch eine ausgelöste Bremsung.
- Bei Strassen mit nahen Hindernissen und insbesondere bei einer fehlenden optischen Führung erfolgt die Informationsbeschaffung über das periphere Sehen.
- Der Sicherheitsabstand und die Fahrungenauigkeiten sind geschwindigkeitsabhängig. Es wird darauf hingewiesen, dass Hindernisse am Fahrbahnrand ein seitliches Abweichen von der idealen Fahrlinie bewirken. Markierungen des rechten Fahrbahnrandes

wirken sich in einer deutlichen Verschiebung des Verkehrs nach rechts aus. In Fällen mit nur einer Mittelmarkierung bewirkt diese bei übersichtlichen Strecken und Tageslicht eine Konzentration des Verkehrs auf die linke Hälfte des rechten Fahrstreifens.

- Randmarkierungen beeinflussen das Seitenabstandsverhalten besonders bei Dunkelheit so, dass ein Rechtsfahren auftritt.
- Neben umfassenden Informationen über das Spurverhalten enthält der Bericht [27] Angaben über das Fahrverhalten in unterschiedlichen Situationen mit dem Schwerpunkt Geschwindigkeit.

## **3.2 Sicherheit**

### **3.2.1 Verkehrssicherheit und Tunnelbeleuchtung**

Die schweren Brandunfälle in einigen Strassentunneln lösten Sicherheitsmassnahmen mit grossen Kostenfolgen aus. Zur Anhebung des Sicherheitsniveaus standen primär konzeptionelle Änderungen der Lüftungsanlagen sowie Verbesserungen hinsichtlich der Erkennbarkeit der Fluchtwege im Vordergrund. In der Zwischenzeit sind auch technische Grundlagen zu Risikoanalysen sowie zur Bewertung der Strassentunnel publiziert worden. Diese enthalten jedoch keine Angaben zur verkehrssicherheitsbezogenen Beurteilung verschiedener Konzepte von Tunnelbeleuchtungen. Im Folgenden finden sich Informationen aus Literaturrecherchen, die sich auf die Verkehrssicherheit und die Tunnelbeleuchtung beziehen (siehe Anhang).

### **3.2.2 Verkehrssicherheit im Nationalstrassennetz**

Das bfu liefert in seinem Bericht [16], [17] Aussagen über die Gesamtheit aller Tunnelanlagen im schweizerischen Nationalstrassennetz. Es wird festgestellt, dass die Unfallraten in den Tunneln geringer sind als auf offenen Strecken. Demgegenüber haben sich die Raten der Verunfallten und die Unfallschwere dem Niveau der Strassen angenähert. Die Ursachen von Tunnelunfällen sind nur beschränkt identisch mit denjenigen der Strasse. Sie sind jedoch kaum bekannt. Dies behindert die Beurteilung der Angemessenheit von Sicherheitsmassnahmen. Charakteristiken der einzelnen Tunnel, wie z.B. die Länge, haben massgebende Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit. Sie sind jedoch nicht beeinflussbar.

### **3.2.3 Bericht des österreichischen Bundesamtes für Verkehrssicherheit**

Im Gegensatz zum Bericht des bfu [16], [17] enthält diese Forschungsarbeit [18] keine umfassende Übersicht über die Verkehrssicherheit in Tunneln. Sie ist ausschliesslich auf die Beziehungen zwischen der Verkehrssicherheit und der Tunnelbeleuchtung ausgerichtet. Von besonderer Bedeutung sind im Bericht die wegweisenden Informationen im Zusammenhang mit der Optimierung von Tunnelbeleuchtungen sowie der Vereinfachung der Projektierung (siehe Anhang).

### **3.2.4 Übersicht zur Kostenoptimierung**

Die Projektierung der Tunnelbeleuchtung basiert im Wesentlichen auf nationalen Normen. Vorschläge zu Kosteneinsparungen finden sich in den folgenden Dokumenten:

- Einfluss der Tunnelbeleuchtung auf die Verkehrssicherheit, Forschungsbericht des österreichischen Bundesamtes für Verkehrssicherheit
- Auf diesen Bericht der Verfasser G. Aureich, H. Lukaschek, J. Schrefel und W. Hopperwieser [18] ist hingewiesen worden. Der Bericht liefert detaillierte Vorschläge zur Kostenoptimierung. Es betrifft die Massnahmen auf allen Strecken von der Annäherung- bis zur Ausfahrtstrecke. Die Vorschläge umfassen im Wesentlichen alle Bereich mit einem Bezug zur Tunnelbeleuchtung und zur Verkehrssicherheit.
- Optimierung von Beleuchtungen für Strassentunnel hinsichtlich der Betriebskosten, Diplomarbeit an der Fachhochschule Aachen
- Der umfassende Bericht von B. Janssen [6] behandelt die physikalischen Grundlagen der Optik, den Stand der Technik basierend auf Normen und Richtlinien sowie in einem besonderen Teil den Problemkreis Optimierung und Kosteneinsparungen.

- Ziffer 1.2 Verkehrssicherheit und Tunnelbeleuchtung
- Dieser Teil des Berichts liefert Informationen zum Unfallgeschehen im Tunnel. Es wird festgestellt, dass gemäss verschiedenen Forschungsberichten zumindest, in den schweizerischen Tunneln zwischen der Verkehrssicherheit und der Tunnelbeleuchtung keine massgebliche Beziehung erkennbar ist. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass basierend auf wahrnehmungspsychologischen Betrachtungen die Verkehrssicherheit erhöht werden kann.
- Ziffer 3.2.4, Grundlagen zur Kostenoptimierung basierend auf Erkenntnissen der Verkehrspsychologie
- Die Erkenntnisse sind in einer Zusammenfassung dargestellt. Sie liefern einen Beitrag zum wichtigen Problemkreis der Spurüberschreitung des Verkehrs und der Wirkung der optischen Verkehrsführung vor und im Tunnel.

### 3.3 Variierende Lichtverhältnisse

Es liegt ein Gutachten, Menozzi M. 2009, Expertengutachten zu den Lichtverhältnissen an Tunnelportalen der Westumfahrung und der A4 Knonauer Amt zuhanden der Baudirektion des Kantons Zürich (Hr. Meili), Expertengutachten Westumfahrung A4 2009, vor.

Als Resultat dieses Gutachtens kann geschlossen werden, dass bei aufgehellten Tunnelportalen der Kontrast zur Einfahrt beliebig gross werden kann, zum Teil noch unterstützt durch Witterungseinflüsse, die sich in der Art der Reflexion bemerkbar machen. Klar muss der umgekehrte Fall angestrebt werden, indem die Tunnelröhre im Verhältnis zum Portal möglichst hell erscheint, und das Portal möglichst wenig gerichtete Reflexion aufweist. Damit kann man schlussfolgern, dass ein Portal möglichst dunkel sein soll, um das Innere des Tunnels hell erscheinen zu lassen. Eine dunkle Portalumgebung führt zudem zu einem geringeren Wert der Anfahstreckenleuchtdichte, was wiederum eine geringere Fahrbahnleuchtdichte in der Einfahrstrecke erfordert.

Genannte Aussage kann durch Erfahrungen validiert werden, wobei Tunnelbauten neueren Datums (Bsp. Zürich Nordumfahrung; Üetlibergtunnel etc.) genau den umgekehrten Weg verfolgen, indem die Tunnelwände über das Portal nach aussen gezogen werden und damit der erzielte Kontrast nicht verstärkt, sondern gemindert wird. Das Ergebnis widerspricht dem Expertengutachten und zeigt augenscheinlich die daraus entstehende Kontrastminderung.

### 3.4 Wahrnehmung, Risiko und Sicherheit

Die Tunnelbeleuchtung trägt anerkanntermassen wesentlich zur Verkehrssicherheit im Tunnel bei, sowohl im Normalbetrieb wie auch im Ereignisfall. Aus diesem Grund sollen in diesem Projekt auch die bisher weniger behandelten Themen wie optische Führung durch geeignete Wahl der Leuchttypen, Vereinheitlichung der Installation etc. behandelt werden.

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen der lichttechnischen Verhältnisse auf die menschliche Wahrnehmung besprochen und in einen grösseren Rahmen der Risikobeurteilung gestellt. Damit die Frage nach der Risikorelevanz der Beleuchtung geklärt werden kann, wird der Fokus zuerst auf allgemeine und später auf tunnelspezifische Auswirkungen der Beleuchtung auf das Verhalten der Verkehrsteilnehmer gerichtet. Ein Verständnis der menschlichen Wahrnehmung im Strassenverkehr, ist essentiell für eine erfolgreiche Entwicklung von Beleuchtungssystemen.

#### 3.4.1 Allgemeine Auswirkungen

Das menschliche Verhalten, insbesondere die menschliche Wahrnehmung im Strassenverkehr, wird von vielen, sich überlagernden Faktoren beeinflusst und gesteuert. Gefühle, Erwartungen, Motivationen und Denken, sowie die momentan herrschenden Umwelteinflüsse wirken sich stark auf das Verhalten einer Person aus und entscheiden darüber, ob eine geplante Aufgabe erfolgreich ausgeführt wird oder nicht. Die Wahrnehmung seiner Umwelt, also die Interpretation und Prognose von Zuständen, steuert massgebend den

Informationsverarbeitungsprozess und die daraus folgenden Handlungen des Menschen.

Die Lichtverhältnisse spielen dabei insofern eine wichtige Rolle, als dass die sichere Ausführung einer Tätigkeit, je nach Aufgabe, ganz unterschiedliche Anforderungen an die Beleuchtung stellt. Allgemein kann behauptet werden, dass die Ansprüche an die Beleuchtung mit der Komplexität des eigentlichen Zwecks wachsen: für die Beleuchtung eines Gehsteiges bedarf es einer geringeren Beleuchtungsstärke als für eine optimale Ausleuchtung eines komplexen Kontrollraumes. Hierbei wird klar, dass nicht einfach eine maximale Beleuchtung anzustreben ist, sondern dass ein auf den Zweck angepasstes Beleuchtungssystem wesentlich wirtschaftlicher und sicherer arbeitet und die Konzentrationsfähigkeit der betroffenen Personen stärkt. Durch einen gezielten Einsatz von Leuchten wird somit das Risiko für menschliche Fehlhandlungen deutlich verringert und die allgemeine Systemsicherheit erhöht.

Beleuchtungen können aber auch direkte und indirekte Spiegelungen hervorrufen die sich störend auf das menschliche Auge auswirken. Geeignete Gegenmassnahmen, wie z.B. korrekt eingesetzte Blenden, vermögen diese Reflexionen zu dämpfen, sodass die betroffenen Personen in ihren beabsichtigten Handlungen nicht negativ beeinflusst werden.

Es wird somit klar, dass besonders in Hochrisikobereichen sicherheitstechnische Betrachtungen, welche den menschlichen Faktor integrieren, nicht nur zusätzliche und mühsame Sicherheitsaufwendungen darstellen, sondern dass sie auch ein Erfolgsfaktor für ökonomische Wettbewerbsvorteile sein können. Die Norm DIN EN ISO 6385 "Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen" verlangt beim Design von Mensch-Technik Systemen ebenfalls einen integrierten Ansatz, wobei technische, menschliche und soziale Anforderungen ausgewogen zu beachten sind. Für eine Optimierung der Systemsicherheit ist deshalb nicht nur auf die Förderung technischer Systeme zu achten, sondern auch der Faktor Mensch zu berücksichtigen [60]. Werden die Schwachstellen eines soziotechnischen Systems an den Schnittpunkten von Mensch und Maschine gesehen, kann die Sicherheit durch eine auf den Menschen abgestimmte Verbesserung der Technik (z.B. Beleuchtung) in das System "eingebaut" werden.

Dementsprechend definiert die "International Ergonomics Association" Ergonomie (oder Human Factors) als "...die wissenschaftliche Disziplin, welche sich mit dem Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Menschen und anderen Elementen eines Systems beschäftigt, sowie die berufliche Tätigkeit, welche die Theorie, Prinzipien, Daten und Methoden zur Gestaltung anwendet, um das menschliche Wohlbefinden und die gesamte Systemleistung zu verbessern." [61].

### 3.4.2 Tunnelspezifische Auswirkungen

Der Autofahrer muss während der Einfahrt und der anschliessenden Tunneldurchfahrt genügend Sicht haben, damit die sichere Fahrt gewährleistet ist. Das Hauptziel einer Tunnelbeleuchtung ist somit einerseits Unfälle zu verhindern und andererseits die Auswirkungen eines Ereignisfalles zu vermindern.

Dabei soll der Fahrzeugführer die Fahrbahn und seine eigene Position sowie andere Fahrzeuge und Hindernisse auf der Fahrbahn mindestens über die Hälfte der Haltsichtweite erkennen können. Die Verminderung von Unfallrisiken ist in Tunnelsituationen ungleich wichtiger als auf offenen Strecken, da ein Ereignisfall wesentlich stärkere Auswirkungen auf die Tunnelbenutzer und die Infrastruktur und somit auch auf das Schadensausmass hat. Besondere Anforderungen an eine Tunnelbeleuchtung stellen die Situationen am Tage.

Aus diesem Grund hat die Beleuchtung eine objektive Sicherheit zu gewährleisten, damit Autofahrer Objekte auf der Fahrbahn aus einer sicheren Distanz erkennen können.

Auch ist es notwendig, dass sich der Fahrer während der Tunnelfahrt subjektiv sicher fühlt und keine unerwarteten Reaktionen hervorgerufen werden die erhöhte Unfallrisiken darstellen. Viele Unfallereignisse, die durch menschliche Fehler verursacht wurden, kön-

nen auf mangelndes Situations- und Sicherheitsbewusstsein zurückgeführt werden.

Ungefähr 90% der gesamten Information die einem Autofahrer zugetragen wird ist visuell, der Rest wird hauptsächlich über das auditive System aufgenommen. Aus diesem Grund spielen die Lichtverhältnisse im Strassenverkehr besonders dort eine wichtige Rolle, wo auf künstliche Beleuchtung zurückgegriffen wird. Aufgabe einer optimalen Beleuchtung im Tunnel ist es, die Wahrnehmung, Aufmerksamkeit und dadurch auch die Reaktionsfähigkeit der Autofahrer gezielt zu lenken. Um Wahrnehmungsstörungen möglichst zu vermeiden, sollte Unwesentliches ausgeblendet werden, sodass das Wichtige stärker hervorgehoben wird. Dadurch ist es möglich, die Konzentration der Autolenker auf den Verkehr zu stärken und somit das Unfallrisiko während des Normalbetriebs zu senken. Tritt ein Ereignisfall ein, dann hat ein auf die Situation abgestimmter Einsatz der Tunnelbeleuchtung (z.B. maximale Beleuchtung) zudem die Möglichkeit, das Schadensausmass zu begrenzen sowie die Tunnelbenutzer in der Orientierung und Evakuierung zu unterstützen.

Um die menschliche Leistungsfähigkeit in einem komplexen Mensch-Maschine System aufrecht zu erhalten, ist es wichtig, dass negative Einflussfaktoren reduziert und wenn möglich eliminiert werden. Die Tatsache, dass die optische Wahrnehmung im Strassentunnel ausschliesslich durch eine künstliche Beleuchtung gesteuert wird, verlangt eine effiziente Art und Weise mit welcher die Leuchten den jeweiligen Bedingungen angepasst werden. Kritische Situationen gilt es zu vermeiden. Um diesen Anforderungen zu genügen, werden je nach Tunnelstrecke unterschiedliche Arten von Leuchtmitteln verwendet.

Die Tunnelbeleuchtung ist dabei an die physiologischen Möglichkeiten der Verkehrsteilnehmer (Akkommodation, Adaption, Kontrasterkennen, Aufnahmevermögen etc.) anzupassen. So muss zum Beispiel die Leuchtdichte auf den Tunnelinnenstrecken gleichmässig verteilt sein, da sich dadurch die Erkennbarkeit von Objekten auf der Fahrbahn erhöht.

Weiterhin sollten die Innenstrecken längerer Tunnel durch regelmässige visuelle Änderungen des Bildes (Ausstellnischen mit sichtbaren Wänden) gestaltet sein, damit sich kein Gefühl von Monotonie bei den Verkehrsteilnehmern einstellen kann. Ein geplanter Einsatz von solchen Reizmerkmalen vermag die Aufmerksamkeit und somit auch die Reaktionsbereitschaft der Automobilisten erhöhen. Die Integration von psychologischen Verhaltensmustern spielt somit eine wesentliche Rolle bei der Planung der Tunnelbeleuchtung.

Ein generelles durch die Tunnelsituation bedingtes Unwohlsein oder Stressempfinden kann sich während einer längeren Tunneldurchfahrt leicht in Angst- oder Engegefühle und fehlenden Bezug zur Aussenwelt entwickeln ("Black-Hole Effekt"). Die daraus folgende Unachtsamkeit und mangelnde Konzentration auf die Kerntätigkeit – das Fahren – werden schnell zu relevanten Sicherheitsrisiken. Es ist daher notwendig, solche menschlichen Verhaltensmuster durch eine angemessene Planung der Infrastruktur – in diesem Falle die Beleuchtung – so gut als möglich vorzubeugen und zu limitieren.

Von diesem Standpunkt aus betrachtet, ist eine optimal eingesetzte Beleuchtung eine Unterstützungshilfe für das System Mensch-Maschine und eröffnet somit eine unverzichtbare Möglichkeit zur Fehlervermeidung.

Die Frage stellt sich nun, ob eine Standardisierung der Tunnelbeleuchtung dazu beiträgt, das Risiko menschlicher Fehlleistungen zu mindern oder nicht. Gerade auf Strecken mit mehreren aufeinanderfolgender Tunnel ist diese Hinterfragung berechtigt. Die Gefahr besteht darin, dass sich Autolenker an die immer gleiche Ausstattung gewöhnen und sich deshalb ein Gefühl der Monotonie einstellen kann, was aus Sicht der Verminderung des Unfallrisikos zu verhindern wäre. Hingegen kann hier erwidert werden, dass gerade im Ereignisfall eine Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung dazu beiträgt, dass sich die Tunnelbenutzer schneller orientieren können, da sie die Situation bereits aus anderen Tunneln kennen und sich nicht zuerst neu daran gewöhnen müssen.

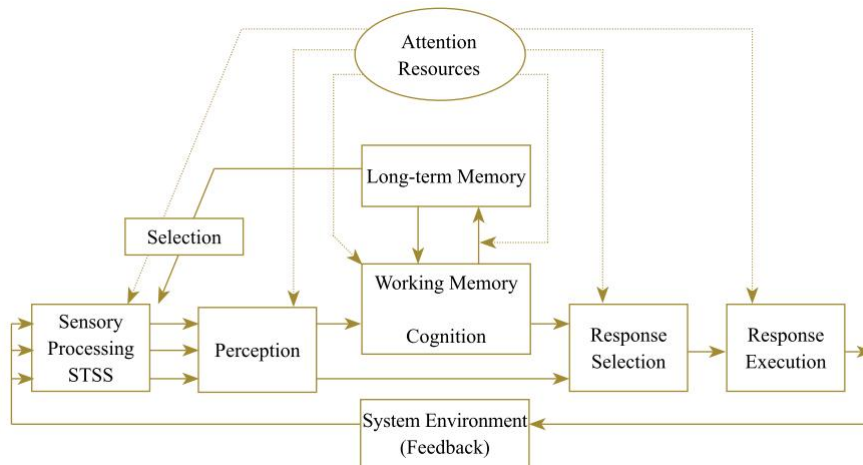


Abb. 3.2 Human Factors and Road Tunnel Safety Regarding Users

Eine Möglichkeit den Prozess der menschlichen Informationsverarbeitung grafisch darzustellen ist oben zu sehen [62].

Ganz links werden durch die menschlichen Sinne Umweltreize aufgenommen, die so-gleich in Empfindungen umgewandelt ("Sensory Processing") werden. Aufgrund der Fülle an Informationen werden jedoch nicht alle Reize wahrgenommen werden, da bereits ein erster Selektionsprozess die relevanten Stimuli herausfiltert und in Empfindungen ver-wandelt ("Perception"). Dieser Selektionsprozess wird maßgeblich durch das Langzeit-gedächtnis gesteuert ("Long-Term Memory").

Als nächstes werden die Eindrücke bewusst wahrgenommen, verarbeitet und gespeichert ("Working Memory", "Cognition"). Als Folge dieses menschlichen Denkens und der Ent-scheidungsfindung findet ein weiterer Selektionsprozess statt ("Response Selection"). Verschiedene mögliche Handlungen werden gegeneinander abgewogen, mit dem Resul-tat, dass eine geeignete Reaktion gewählt und am Schluss ausgeführt wird ("Response Execution"). Die tatsächliche Handlung – z.B. das Drehen des Lenkrades – führt zu einer Veränderung der Situation die wiederum neue Informationen mit sich bringt, sodass der ganze Prozess von vorne beginnt.

Sämtliche Schritte im ganzen Prozess sind stark davon abhängig, in welcher Situation sich der Mensch befindet und auf was er achtet. Am Beispiel des Autofahrers im Tunnel kann dies verdeutlicht werden. Wenn der Lenker übermüdet oder emotional belastet ist, dann hat dies Auswirkungen auf einen oder mehrere Prozessschritte: die menschliche Fähigkeit, die richtigen Reize zu selektieren wird geschwächt. Für den Autofahrer wird es zunehmend schwieriger, die wahrgenommen Informationen im Tunnel zu verarbeiten und zu verstehen. Das Risiko entsteht, dass sich der Fahrer nicht mehr erinnern kann, wie er richtig zu reagieren hat ("Long-Term Memory" und "Working Memory"). Wenn eine unge-eignete Beleuchtungssituation im Tunnel den Informationsverarbeitungsprozess zusätz-lich erschwert, kann eine Verkettung von unangemessenen menschlichen Handlungen das Unfallrisiko stark erhöhen.

## 4 Leuchtmittel

Die Beleuchtung hat eine bedeutende Funktion zur Verhinderung von Unfällen. Nach dem Eintreten von Ereignissen erfüllt sie wesentliche Orientierungs- und Sicherheitsaufgaben. Es ist deshalb entscheidend zu wissen, wie sich der Lichtstrom des Leuchtmittels mit dem Alter der Anlage verändert und zu welchem Zeitpunkt ein Ersatz nötig ist. In diesem Kapitel werden allgemeine Anforderungen an ein Erhaltungsmanagement von Beleuchtungssystemen erörtert und die wesentlichen Begriffe diskutiert.

### 4.1 Gesamtsystem Leuchte

Das Leuchtmittel [38] ist Bestandteil (eine Teilkomponente) eines Gesamtsystems, bestehend aus Betriebsgerät, Leuchtgehäuse und Leuchtmittel. Die Aussagen von Herstellern über die Lebensdauer von Leuchtmitteln in Tunnelanlagen beruhen darauf, dass optimale Betriebsbedingungen für das Leuchtmittel herrschen. Nur Leuchten und Betriebsgeräte, die für die besonderen Einflüsse, die in einem Tunnel herrschen, ausgelegt sind, können für das Leuchtmittel die geforderten Betriebsbedingungen einhalten. Daher muss die Leuchte für thermische, mechanische, elektronische Einflüsse sowie Umwelteinflüsse, wie Feuchte oder Schadstoffe, konzipiert sein.

#### **Thermische Einflüsse**

Wärmehaushalt / Wärmeentwicklung innerhalb der Leuchte und innerhalb des Tunnels kann zu einem Wärmestau führen.

Lufttemperatur  $-25^{\circ}\text{C}$  bis  $+40^{\circ}\text{C}$

Luftfeuchtigkeit 20 % bis 100 % kondensierend

#### **Mechanische Einflüsse**

Erschütterungen durch von LKWs verursachte Windstöße sowie der Reinigung (Vibration durch Verkehr und Reinigungsarbeiten).

#### **Elektronische Einflüsse**

Störungen innerhalb des Netzes und Störungen, die von aussen indiziert werden.

#### **Elektrische Einflüsse**

Netzschwankungen

#### **Umwelteinflüsse**

Feuchtigkeit, Schadstoffe

Korrosion in Verbindung mit Beton (alkalisches Wasser)

Salzwasser (Salzsprühnebel mit Natrium (NaCl) und Kalziumchlorid (CaCl))

Öle und Fett

Strassenstaub, Staub mit Ferritpartikeln

Sulfathaltiges Bergwasser, Tropfwasser, Vereisung

### 4.2 Lebensdauer eines Leuchtmittels

Bezüglich der Lebensdauer von Leuchtmitteln existieren unterschiedliche Begriffe, die im Markt je nach Lampentyp und Hersteller zur Anwendung kommen. Aus diesem Grund sind im folgenden Abschnitt die wichtigsten Definitionen aufgeführt. Die Lebensdauer einer Lampe ist ein wesentliches Gütekriterium bezüglich Lampenqualität und Wirtschaftlichkeit einer Beleuchtungsanlage. Es ist zwischen mittlerer Lebensdauer und der Nutzlebensdauer zu unterscheiden.

Die mittlere Lebensdauer ist der Mittelwert der elektrischen Lebensdauer (Überlebensrate) einer Anzahl Lampen, die unter genormten Bedingungen betrieben werden. Sie ist erreicht, wenn mindestens 50% aller Lampen noch funktionstüchtig sind (50% Ausfall).

Die Nutzlebensdauer ist dann erreicht, wenn der verbleibende Anlagenlichtstrom 70%

bzw. 80% des anfänglichen Lichtstroms (neue Lampen, 100 Stunden eingebrannt) beträgt. Die Nutzlebensdauer berücksichtigt Frühausfälle und den Lichtstromrückgang der Lampe. Der Nutzlebensdauer bei Leuchtstofflampen liegt ein Schaltzyklus von 3 Stunden (165 Minuten ein und 15 Minuten aus) zugrunde. Bei Hochdrucklampen ist der Schaltzyklus auf 12 Stunden (11 Stunden ein und 1 Stunde aus) festgelegt. Die Nutzlebensdauer hängt von einer Reihe von Einflussgrößen ab, z.B. von der Schalzhäufigkeit, von dem verwendeten Betriebsgerät, der Fertigungscharge etc. Die Messungen der Nutzlebensdauer erfolgen nach den Vorgaben der IEC-Publ. 60081.

Um eine genauere Aussage über die Nutzlebensdauer zu erhalten, müssen die beiden Einflussgrößen Ausfall von Leuchtmitteln und Lichtstromrückgang näher betrachtet werden.

### 4.3 Leuchtstofflampen

Leuchtstofflampen zeichnen sich durch eine gute Lichtstromausbeute aus. Auf Grund des im Vergleich zu den Hochdruck-Natriumdampfanlagen niedrigeren Lichtstroms sind die auftretenden Leuchtdichten an der Lampe gering. Die Farbwiedergabe ist gut; somit lassen sich Farben, die zur Kennzeichnung von Bereichen und Sicherheitseinrichtungen verwendet werden, gut erkennen und vereinfachen die Orientierung im Tunnel. Die Temperaturabhängigkeit der Leuchtstofflampen lässt sich durch die Wahl von optimierten Lampen weitgehend ausschliessen. Durch den geringen Lichtstrom pro Lampe ist eine hohe Anzahl von Leuchten notwendig, um die geforderten Leuchtdichten im Tunnel zu gewährleisten. Die Leuchten werden in der Regel als Lichtband montiert. Durch diese Anordnung kann eine sehr gleichmässige Ausleuchtung erfolgen.

Von den Herstellern wird in den Produktunterlagen die Nutzlebensdauer der Lampe angegeben und bezieht sich auf die oben genannten Messbedingungen. Diese Angabe allein lässt nur wenig Aufschluss über das Verhalten der Lampe und über die Betriebsstunden zu. Daher müssen Informationen über die "Lebenserwartung in Abhängigkeit zu den Betriebsstunden" und "Lichtstromverhalten in Abhängigkeit zu den Betriebsstunden" von den Herstellern angefragt werden. Durch die Verrechnung beider Werte erhält man die Nutzlebensdauer der Lampe.

Im Tunnel wird die Beleuchtung wenig geschaltet, dies hat positive Auswirkungen auf die zu erwartende Lebenserwartung der Lampen. Bei immer geringeren Schaltzyklen bzw. keiner Schaltung nähert sich die mittlere Lebensdauer immer mehr der maximal zu erwartenden Lebensdauer. Aus diesem Grund geben die Hersteller für den speziellen Einsatz im Tunnel eine Nutzlebensdauer von 30'000 Stunden an. Diese Werte beruhen auf Erfahrungen der Lampenhersteller. Nach Angaben von Betreibern werden bis zu 40'000 Stunden erreicht.

#### **Spezielle Leuchtstofflampen mit langer Lebensdauer**

Von einigen Herstellern wurden spezielle Leuchtstofflampen entwickelt, die eine besonders hohe Nutzlebensdauer aufweisen. Das Erreichen dieser hohen Lebensdauer ist auf eine besondere Kathodenkopf-Konstruktion und einer speziellen Schutzschicht zwischen Leuchtstoffpulver und Glaskolben zurückzuführen. Die unter Normbedingungen betriebenen Leuchtstofflampen weisen eine Nutzlebensdauer von 70'000 Std. auf (80% Lichtstrom). Im Tunneleinsatz (keine Schaltung) zeigt die Erfahrung, dass 80'000 Stunden realistisch sind. Diese Lampen haben sich bei Tunnelanwendungen durchgesetzt. Neue Entwicklungen verschiedener Hersteller gehen bei Dauerbetrieb auf 80'000 Stunden Lebensdauer, bei 20% Lichtstromrückgang und einer Farbwiedergabestufe 1B (Ra 85).



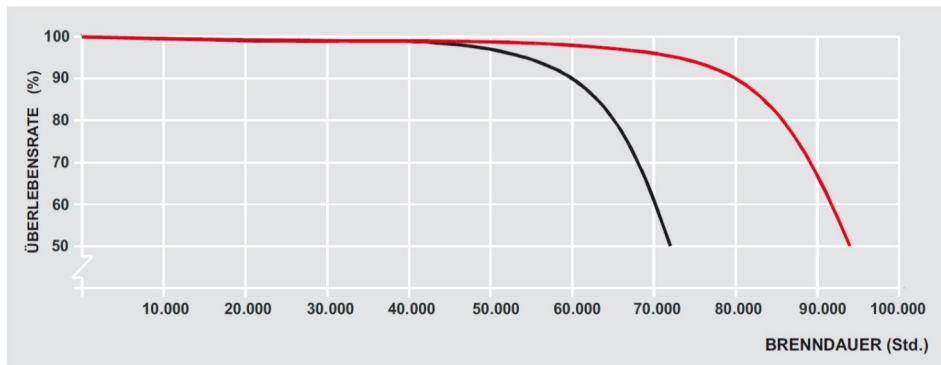


Abb. 4.3 Lebensdauer: Leuchtstofflampe basierend auf einem 12-Stunden-Schaltrhythmus (11h an, 1h aus), Betrieb an EVG (Warmstart), Betrieb an VVG ind.; Quelle Aura

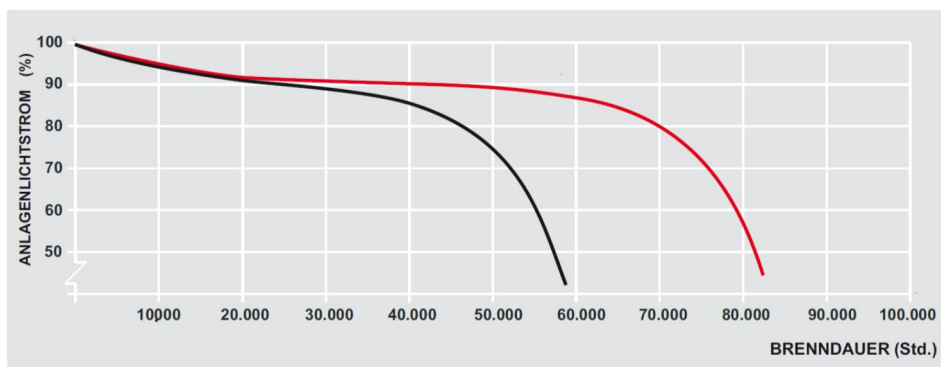


Abb. 4.4 Lichtstromverhalten; Quelle Aura

### Wahl des Betriebsgerätes

Wird die Beleuchtungsanlage geschaltet, ist die Wahl des Betriebsgerätes von grosser Bedeutung. Die Lampe wird je nach Betriebsgerät beim Zünden unterschiedlich stark beansprucht, was sich in der Lebenserwartung widerspiegelt. Aus diesem Grund sollten Leuchten die häufig geschaltet werden, mit einem Elektronischen Vorschaltgerät (EVG) mit Warmstart ausgestattet sein.

### Dimmverhalten

Das Dimmen von Leuchtstofflampen ist ohne Probleme in einem Bereich von 3-100% möglich. Das Dimmen oder das Schalten in vorbestimmten Stufen hat in den meisten Fällen keine negativen Auswirkungen auf die Lebensdauer der Leuchtmittel. Die Einbrennphase von 100 Stunden muss bei 100% Lichtstrom stattfinden.

### Unterhalt

Bei Unterhaltsarbeiten kann die gesamte Leuchte ausgetauscht werden oder je nach Bauart der Leuchte die Lampe. Im Fall der langlebigen Leuchtstofflampen macht es Sinn, sowohl Gruppenersatz wie auch Ersatz von Leuchtmittel und EVG zusammenzulegen. Der Lampenwechsel ist in den häufigsten Anwendungen einfach. Im Tunnel ist das Kriterium der Dichtigkeit nicht zu unterschätzen. Das Vorschaltgerät ist aufgrund der Verkabelung schwieriger auszutauschen. Erfahrungen im Tunnelbereich haben gezeigt, dass in den häufigsten Fällen gesamte Leuchten getauscht werden.

### Zuverlässigkeit

Die auf dem Markt erhältlichen Leuchtstofflampen mit langer Lebensdauer zeichnen sich durch eine hohe Zuverlässigkeit aus. Dies auch, da es sich bei den Leuchtstofflampen um eine bewährte Technik mit hohem Erfahrungsschatz handelt. Um die Zuverlässigkeit der Lampen weiter zu erhöhen, werden diese bei den Herstellern diversen Ausgangskontrollen unterzogen.

### Energie

Leuchtstofflampen, die im Tunnel zum Einsatz kommen (T8, 58W / 36W), zeichnen sich durch einen hohen Lumenstrom aus (ca. 100 lm/W). Diesbezüglich bilden sie nach wie vor die effizienteste Beleuchtung im Innenbereich, sofern die Lichttechnik qualitativ gut ist. Bei ungenügender Lichttechnik kann sich die Effizienz und Wirtschaftlichkeit zugunsten der LED-Technik drehen (siehe jährliche Kosteneinsparung in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung).

## 4.4 Natriumdampfhochdruck-Entladungslampen

Im Wesentlichen werden Natriumdampfhochdrucklampen im Tunnel verwendet. Diese gibt es in unterschiedlichen Wattagen (400/250/150/100W). Je nach Leistungsklasse haben die Lampen eine gute bis sehr gute Lichtausbeute. Der Gesamtlichtstrom liegt je nach Wattage zwischen 10'000-55'000lm pro Lampe. Durch die breite Auswahl an Lampen bzw. Lichtströmen ist es möglich, auf die unterschiedlichen Zonen zu reagieren. Im Bereich der Tunneleinfahrt, wo hohe Leuchtdichten notwendig sind, werden Natriumdampf Hochdrucklampen eingesetzt. Als Nachteil kann die schlechte Farbwiedergabe dieser Leuchtmittel sowie die Eigenschaft genannt werden, dass nach Einschalten der Lampe erst nach einer Anlaufzeit von ca. 4 min der volle Lichtstrom zur Verfügung steht. Nach Abschaltung ist eine Wiederezündung erst nach kurzer Abkühlung möglich. Bei Defekt einer Lampe wird zudem die Gleichmässigkeit durch grosse Lichtpunktabstände stark beeinträchtigt. Deswegen wird diese Technologie nur noch im Adaptationsbereich, nicht aber auf der Innenstrecke angewendet.

Bei den Natriumdampfhochdrucklampen hat in den letzten Jahren ein Generationenwechsel stattgefunden. Die heutzutage eingesetzten Leuchtmittel weisen folgende Charakteristika auf:

- Ein optimierter Gestellaufbau absorbiert Erschütterungen und sorgt für eine sichere Lagerung des Brenners. Ausfälle in Folge von Erschütterungen werden vermieden.
- Gasverluste werden vermieden
- Exaktere Positionierung der Elektroden
- Höherer Lichtstrom im Vergleich zur Standardlampe

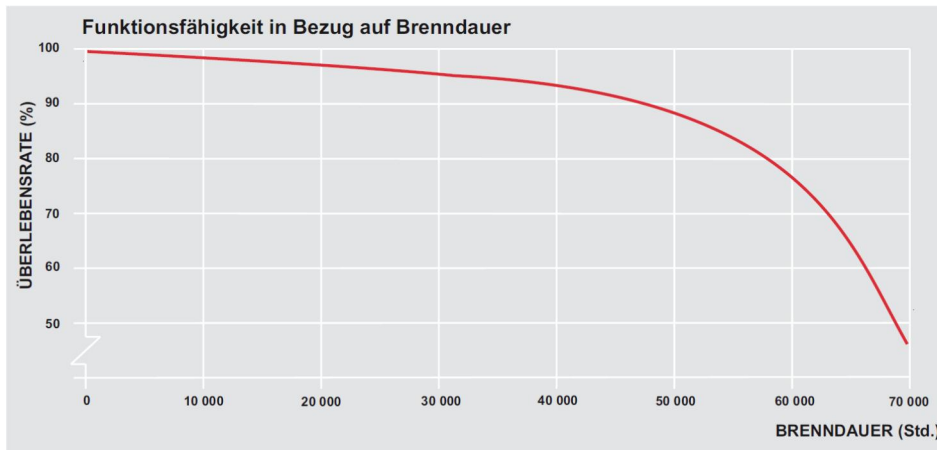


Abb. 4.5 Lebensdauer: Basierend auf einem 12-Stunden-Schaltrhythmus (11h an, 1h aus) Betrieb an VVG mit externem Zündgerät; 100W - 400W tubular, transparent; Quelle Aura

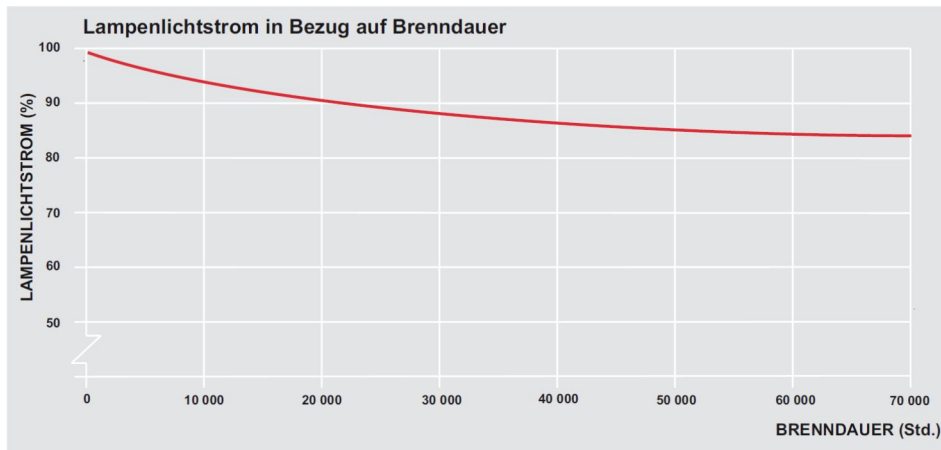


Abb. 4.6 Lichtstromverhalten; Quelle Aura

Optimierungen der normalen Lampen wurden in Hinblick auf die Vorschriften im europäischen Raum, die eine Kontrolle der Leuchten alle vier Jahre vorschreibt, vorgenommen. Bei dieser Kontrolle kann gleichzeitig auch ein Leuchtmittelwechsel erfolgen. Die Leuchtmittel sind somit auf eine Nutzlebensdauer von vier Jahren ausgelegt (entspricht ca. 16'000 Brennstunden im Einfahrtsbereich). Die Standard-Lampen weisen eine Nutzlebensdauer von 12'000 Brennstunden auf. Lampen von GE geben eine Nutzlebensdauer von 22'000 Brennstunden und Lampen von Aura sogar 50'000 Brennstunden an.

Die Hersteller von Standard Lampen geben für den speziellen Einsatz im Tunnel, wie bei den Leuchtstofflampen, eine Nutzlebensdauer von 30'000 Std. an. Die höhere Nutzlebensdauer ist wieder darauf zurückzuführen, dass keine Schaltung der Lampe erfolgt. Diese Werte gelten nur für die Innenstrecke. Im Bereich der Einfahrtsbeleuchtung, wo durch gezieltes Schalten von Leuchtengruppen die Leuchtdichte im Tunnel an die äusseren Leuchtdichten angepasst wird, gelten diese Werte für die Lebensdauer nicht.

#### **Wahl des Betriebsgerätes**

Das Betriebsgerät muss auf die jeweilige Lampe abgestimmt und auf den besonderen Einsatz im Tunnel ausgelegt sein. Elektronische Vorschaltgeräte sind für Natriumdampflampen nur für Wattagen von 100W bis 150W erhältlich.

#### **Dimmverhalten**

Das Dimmen von Natriumdampfhochdrucklampen ist unter Beachtung gewisser Einschränkungen in einem Bereich von 50-100% möglich. Das Dimmen hat keine negative Auswirkung auf die Lebensdauer der Leuchtmittel. Grundsätzlich muss die Lampe mindestens 3 Minuten auf 100% betrieben werden, um anschliessend auf einen Wert von 50% herabgedimmt werden zu können.

#### **Unterhalt**

Auf Grund der hohen Lichtströme können weite Leuchtenabstände realisiert werden, was wiederum zu geringen Leuchtenstückzahlen führt. Die Anzahl an zu wartenden Lichtpunkten reduziert sich somit erheblich im Vergleich zu Leuchten mit Leuchtstofflampen. Die hohen Leuchtenabstände haben bei Ausfall einer einzelnen Leuchte den grossen Nachteil, dass auch ein grosser Streckenbereich unzureichend ausgeleuchtet ist.

Da ein Einzlersatz in der Praxis nicht durchgeführt wird, bleibt der Zustand bis zum nächsten Gruppenersatz erhalten. Die Leuchten sind zu schwer, um ausgetauscht zu werden; deshalb ist ein Lampenersatz sinnvoller, als ein Leuchtentausch.

#### **Zuverlässigkeit**

Die auf dem Markt erhältlichen Natriumdampfhochdrucklampen zeichnen sich durch eine hohe Zuverlässigkeit aus. Langlebige Leuchtmittel erhöhen den Grad an Zuverlässigkeit zusätzlich. Dies auch, da es sich bei den Natriumdampfhochdrucklampen um eine be-

währte Technik mit hohem Erfahrungsschatz handelt. Um die Zuverlässigkeit der Lampen weiter zu erhöhen, werden diese bei den Herstellern diversen Ausgangskontrollen unterzogen.

### Energie

Vor allem die Lampen mit hoher Leistung zeichnen sich durch eine ungeschlagene hohe Lichtausbeute aus. Das betrifft die 400W und 250W Lampen. Die 100W und 150W Lampen sind moderat aber in der Lichtausbeute nicht herausragend.

Abb. 4.7 Lichtausbeute von Natriumdampfhochdrucklampen

TYP	FARB-TEMPERATUR (K)	LICHT-STROM (lm)	LICHT-AUSBEUTE (lm/W)
<i>Tubular, transparent</i>			
ST 50 W	2100	4200	84
ST 70 W	2100	6400	91
ST 100 W	2100	10000	100
ST 150 W	2100	16500	110
ST 250 W	2100	32000	128
ST 400 W	2100	55000	138
ST 600 W	2100	88000	147
ST 1000 W	2100	134000	134

## 4.5 LED

Licht emittierende Dioden oder kurz LED haben in den letzten Jahren Einzug in die Allgemein- und Aussenbeleuchtung gehalten. Für die Beleuchtung von Tunnelanlagen sind die ersten Produkte auf dem Markt erhältlich. LED's unterscheiden sich im Vergleich zu konventionellen Lampen durch ihre besonderen Eigenschaften. Für den Einsatz im Tunnel sind die hohe Schaltfestigkeit, das fehlende Anlaufverhalten (sofort 100% Licht), die beliebige Dimmbarkeit und die Resistenz gegen Vibrationen zu nennen.

Die Effizienz der LED's ist im Unterschied zu konventionellen Lampen von der Farbtemperatur abhängig. Je höher die Farbtemperatur der LED, desto effizienter sind diese. Da es bezüglich der Farbtemperatur bei Tunnelanwendungen keine Einschränkung gibt, können LED's mit einer hohen Farbtemperatur eingesetzt werden. Die minimale Vorgabe für die Farbwiedergabe ist obsolet, zumal sie von den heutigen LED's immer eingehalten bzw. übertroffen wird. Die Effizienz von Leuchten mit LED's als Leuchtmittel liegt heute immer noch unter dem Niveau von Leuchtstofflampen. Daher ist aus energetischen Überlegungen noch keine Einsparung bei gleicher Leuchtdichteverteilung und bei gleichem Lichtstrom möglich. Berechnungen haben jedoch gezeigt, dass bei ungenügender lichttechnischer Qualität von Standardleuchten LED Leuchten besser abschneiden können.

Da die Entwicklung der LED's noch nicht abgeschlossen ist, kann in den nächsten Jahren davon ausgegangen werden, dass die Effizienz der Leuchtstofflampen erreicht bzw. übertroffen wird.

Die Lebensdauer von LED-Leuchten wird heute mit 50'000h bei 70% des Anfangslichtstromes angegeben. Speziell in der Tunnelindustrie werden diese Angaben nach oben korrigiert. Die Angaben von 80'000-100'000h für Leuchtmittel und Treiber sind normal, zumal einzelne Leuchten den Lichtstromrückgang mittels eingebauter Korrekturmassnahmen (Software/Hardwareseitig) nach oben korrigieren.

Die Lebensdauer ist entscheidend von dem Temperaturmanagement der Leuchte abhängig und ist somit die kritische Grösse. Bei zu hohen Temperaturen direkt auf dem

LED-Chip (Junction Temperature) sinkt die Lichtausbeute und die LED kann geschädigt bzw. zerstört werden. Beim Thermomanagement muss sowohl die Umgebungstemperatur im Tunnel als auch die Verschmutzung des Kühlkörpers berücksichtigt werden.

Eine typische LED besitzt eine Leistung von ein bis drei Watt. Der Lichtstrom pro LED beträgt 60 bis 90 lm/W. Werden höhere Lichtströme benötigt, werden einzelne LED's im Verbund auf eine Leiterplatte zusammengeschaltet, dies geschieht in Form von Streifen oder Platten, welche nicht standardisiert und somit vom jeweiligen Hersteller abhängig sind. Bestrebungen zu einer Standardisierung sind bei der Industrie vorhanden.

### **Wahl des Betriebsgerätes**

Das Betriebsgerät kann bei einer LED-Leuchte nicht frei gewählt werden, sondern muss direkt auf die LED's abgestimmt sein. Auch hier erfolgt die Ersatzteillieferung durch den Leuchtenhersteller. Die Geräte müssen für den speziellen Einsatz im Tunnel und den dort auftretenden Einflüssen geeignet sein. Dies erfordert, dass die in den Geräten verbauten Halbleiter aufeinander abgestimmt und speziell auf der Leiterplatte befestigt sind (vergossen bzw. verlötet).

### **Dimmverhalten**

Das Dimmen von LED's ist ohne Probleme in einem Bereich von 0-100% möglich. Das Dimmen oder das Schalten in vorbestimmten Stufen hat keine negativen Auswirkungen auf die Lebensdauer. Durch das Dimmen wird der LED-Chip sogar thermisch entlastet.

Bei der CCR Dimmung (constant current reduction) kann die LED praktisch linear gedimmt werden. Dabei sind leichte Abweichungen des Farbortes wie auch der Farbwiedergabe möglich.

Bei der PWM Dimmung (pulse width modulation) wird die LED ebenfalls linear gedimmt, allerdings nicht in derselben Steigung. Das heisst, dass die Effizienz der CCR Dimmung besser ist, als die PWM Dimmung.

### **Unterhalt**

Die LED-Einheiten sind bislang noch nicht standardisiert. Weiterhin muss beachtet werden, dass die Leuchte modular aufgebaut ist, damit die LED-Einheiten getauscht werden können. Die Beschaffung von Ersatz erfolgt somit über den Leuchten- und nicht mehr durch einen Lampenhersteller.

Die heutigen LED-Leuchten zeichnen sich durch einen massiven Kühlkörper aus. Aus diesem Grund liegt das Gewicht solcher Leuchten massiv höher (ca. 20 kg), was den Unterhalt erschwert.

Tunnelleuchten auf LED-Basis sind grösstenteils bereits heute modular aufgebaut. Somit können die LED-Platinen einzeln, meist steckbar, ausgewechselt werden.

### **Zuverlässigkeit**

Die Zuverlässigkeit ist im Wesentlichen von den verwendeten Komponenten und dem Thermomanagement der Leuchte abhängig. Erfahrungen mit LED-Leuchten in Tunnelanlagen liegen bislang noch in ungenügender Masse vor.

### **Energie**

Ausgehend von der gesamten Wirtschaftlichkeitsüberlegung (Energiekosten, Unterhalt, Lebensdauer etc.) können LED-Leuchten bereits im geschalteten Zustand wirtschaftlich sein. Durch die Einflüsse bzgl. Steuerung kann diese Wirtschaftlichkeit zusätzlich positiv strapaziert werden. Absenkungen bei Abwesenheit von Verkehrsteilnehmern, Nachtabsenkung etc. sind denkbar.

Eine weitere Massnahme zur Leistungssteigerung wäre die Annäherung der Lampenlichtfarbe an die Augenempfindlichkeit. Die maximale Augadaptation (Empfindlichkeit für photopisches Sehen – Tagsehen) liegt bei 555nm, also im grün-gelblichen Bereich. Eine LED, die vorwiegend in diesem Spektralbereich abstrahlen würde, hätte eine verschlechterte Farbwiedergabe, könnte aber bei gleichem Helligkeitsempfinden ca. 30% Energie

einsparen. Diese Überlegung ist sowohl mit LED Lampen wie auch im Tunnelbereich gut möglich, zumal die Farbwiedergabe nicht wesentlich ist.

## 4.6 Allgemeine Reinigung

Die Tunnelreinigung und deren Reinigungsverfahren wurde bereits ausgiebig untersucht. Der daraus entstandene Bericht kann wie folgt zusammengefasst werden:

### Ausgangslage

Die Reinigung von Tunnels steht im Schnittbereich der Beleuchtungstechnik, der Verkehrssicherheit, der Waschwasserentsorgung sowie der baulichen Gestaltung des Tunnelraums. Dabei kommt den in den einzelnen Bereichen verursachten Kosten eine zentrale Bedeutung zu. Die Tunnelreinigung hat in den letzten Jahrzehnten im Hinblick auf kurze Betriebsunterbrüche und eine rationelle Ausführung ein sehr hohes Niveau erreicht. Offen geblieben sind jedoch Fragen über Reinigungsmethoden, die Häufigkeit von Reinigungen, den Wasserverbrauch sowie den Einsatz von Reinigungsmitteln. Die Forschungsarbeit behandelt diese Aspekte sowie die reinigungstechnisch orientierte Ausführung des Tunnelraums.

### Randbedingungen

Die Forschungsarbeit basiert im Wesentlichen auf Untersuchungen im Tunnel eines Autobahnabschnitts mit einem durchschnittlich grossen täglichen Verkehr, einem geringen Längsgefälle und einer Beleuchtung gemäss den Leitsätzen der Schweizerischen Lichttechnischen Gesellschaft.

### Untersuchungen

Die im Rahmen der Forschungsarbeit durchgeführten Untersuchungen umfassten verfahrens- und einwirkungsorientierte Versuche. Es wurden zahlreiche Testreinigungen durchgeführt und ihre Auswirkungen auf die Helligkeit festgestellt. Die Forschungsarbeit umfasste auch die Erhebung des Wasserverbrauchs sowie Analysen des Abwassers. An Tunnelwänden aus Beton mit unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen wurde ausserdem der Chlorid Gehalt und die Karbonatisierung untersucht.

### Folgerungen für bauliche Massnahmen

Die Forschungsarbeit zeigt, dass bauliche Massnahmen zur Erhöhung des Reflexionsgrades der Tunnelwände allgemein nicht wirtschaftlich sind, können jedoch aus Gründen der minimalen Wandreflexion (80% der Fahrbahnleuchtdichte) notwendig sein. Der Einsatz von Wandanstrichen und Tunnelwandverkleidung ist vor allem nach Grundsätzen der Bauwerkserhaltung vorzusehen. Zum Schutz von Tunnelwänden stehen neben den allgemein funktionstüchtigen Anstrichen vor allem Tunnelwandverkleidungen aus Aluminium-Verbundplatten im Vordergrund. Diese haben sich allgemein als reinigungsfreundlich erwiesen. Für die Deckschicht der Fahrbahn sind allgemein helle Beläge zu verwenden. Der Tunnelraum und die Ausrüstung sind im Hinblick auf eine rationelle Reinigung ohne vorstehende oder rückspringende Einbauten zu projektieren.

### Folgerungen für die Reinigung der Tunnelwände

Aus den Untersuchungen haben sich die folgenden Grundsätze ergeben:

- Zur Erhaltung der Helligkeit des Wandanstriches ist jährlich eine Wandreinigung mit einer nachhaltigen Reinigungswirkung notwendig.
- Häufigere Wandreinigungen sind unwirtschaftlich und vermindern den Aufwand für elektrische Energie für die Beleuchtung nur unerheblich.
- Als Reinigungsmethode für die Tunnelwände steht das Bürstenverfahren (rotierende Bürste) mit reduziertem Tensideinsatz oder die noch wenig erprobte Reinigung mit dem Bürsten-Verfahren und einer Vorbehandlung mit Kohlehydraten im Vordergrund.
- Eine zwei- bis dreimalige Reinigung der Leuchten pro Jahr mit dem Bürstenverfahren wird als optimal beurteilt.

## 4.7 Schlussbemerkung

Abschliessend kann gesagt werden, dass die optimale Nutzungsdauer wie folgt festgelegt werden kann:

- Messung der Brenndauer, wobei die Verschmutzung der massgebende Faktor bildet.
- Berücksichtigung der Schaltzyklen in der Einfahrt
- Generell sollten die Leuchten so wenig wie möglich geöffnet werden, da jede Öffnung Einfluss auf die Dichtigkeit hat, sofern sie nicht sorgfältig gewartet wird (Zeitfaktor).

## 5 Berechnungen und Messungen

Die Auswahl der berechneten Leuchten erfolgte aufgrund verschiedenster Auswahlkriterien. Es hat sich schnell gezeigt, dass der Erfolg einzelner Hersteller eng mit der Qualität der Leuchten und ihren Entwicklungszyklen zusammenhängt. Auch die Qualität der Beratung und des fachtechnischen Wissens korrelieren mit der Qualität der Produkte.

Bei der Auswahl wurde auf die lichttechnische Verteilung, wie auch auf die Qualität der Leuchte für den Tunneleinsatz, Wert gelegt. Validierung, Erhältlichkeit, Zuverlässigkeit der elektronischen Lichtverteilungskurven, Effizienz und Support wurden ebenfalls als Kriterium genommen.

Einzelne Hersteller waren bereit, Muster zur Beurteilung der Nutzwert-Analyse zur Verfügung zu stellen.

Im Adaptationsbereich konnten lediglich 2 qualitative Produkte begutachtet werden.

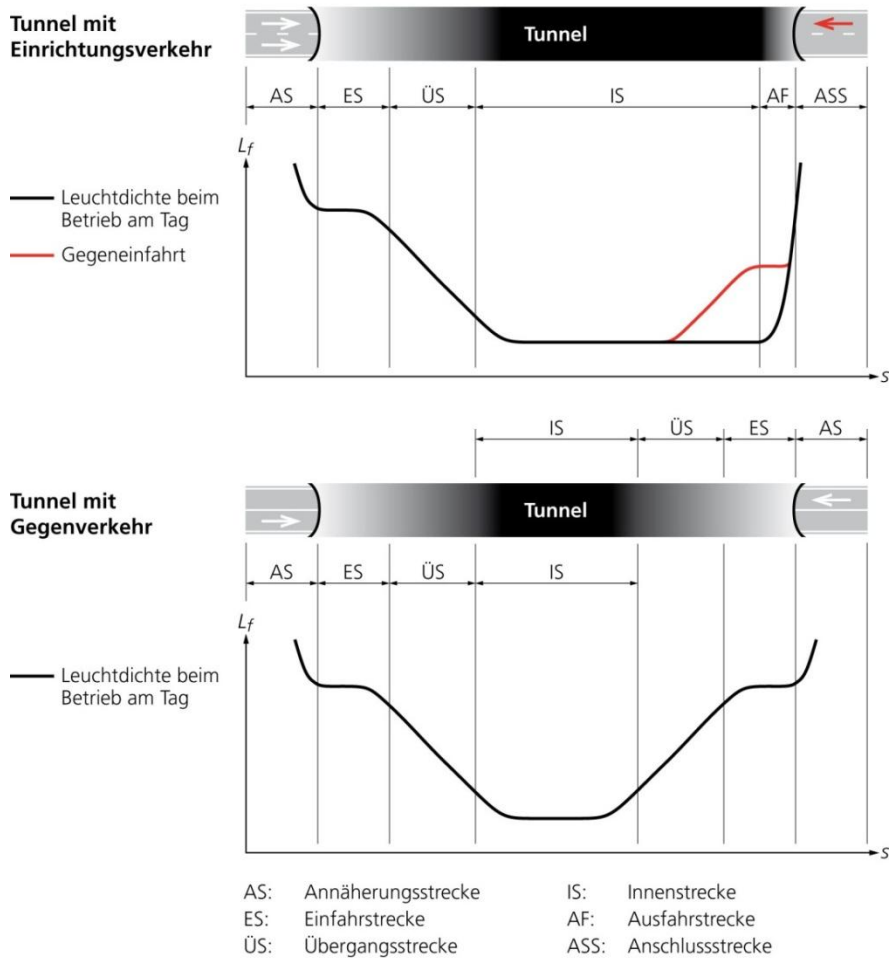
Im Innenbereich wurden zwei komplett verschiedene Bauweisen mit Leuchtstofflampen mit 5 LED Leuchten verglichen.

Um Aussagen über die Verschmutzung von Oberflächen und Leuchten zu machen, wurden Messungen an bestehenden Tunnelwänden vor und nach der Reinigung gemacht. Zusätzlich wurde der Einfluss der Oberflächenreflexion der Wände bzgl. angrenzender Fahrbahnleuchtdichte und bzgl. Wandleuchtdichte zur Erfüllung der normativen Anforderungen untersucht.

### 5.1 Annahmen

Um die Beleuchtungsgüte hinsichtlich Anzahl der Leuchten und Lichtverteilung optimal auszuwerten ist es notwendig, entsprechende Annahmen zu treffen. Diese Annahmen wurden aufgrund der Normung oder aufgrund von Schweizer Durchschnittswerten festgelegt. Die Erläuterung findet sich im folgenden Text wieder.





Länge total [m]:	2000
Geschwindigkeit [km/h]:	100
L20 [cd/m <sup>2</sup> ]	2800 (gemittelt über eine Vielzahl Schweizer Tunneln siehe Anhang)
Art der Adaptation:	Gegenstrahl
Fahrspuren:	2 und 3
Verkehrsart:	Einrichtungsverkehr
Verkehrsstärke:	mittleres Verkehrsaufkommen 1200-2800 Fahrzeuge/h
Verkehrsteilnehmer:	Motorfahrzeugverkehr
Leuchtdichte der Wände:	>= 80% der angrenzenden Fahrbahnleuchtdichte
Tunnelprofil:	für die Berechnung vernachlässigbar
Steigung, Krümmung:	wird für die Berechnung vernachlässigt; hat in der Relativbe- trachtung keinen Einfluss
Flicker:	Frequenzen zwischen 4-15hz werden ausgeklammert
Wandreflexion:	60%
Adaptation:	Gesamtgleichmässigkeit U0 > 0.2 Längsgleichmässigkeit UI > 0.4 Schwellwerterhöhung TI < 15%
Innenstrecke:	Tunnelklasse 2 Gesamtgleichmässigkeit U0 > 0.4 Längsgleichmässigkeit UI > 0.6 Tunnelklasse 2

Abb. 5.8 Leuchtdichtenniveau im Einrichtungs- und Gegenverkehrstunnel (qualitative Darstellung)

### Art der Tunnelqualifikation

Die lichttechnische Berechnung des 2-streifigen oder 3-streifigen Tunnelprofils wird für den Einrichtungsverkehr ausgelegt. In der Wirtschaftlichkeit werden jedoch beide Portale als mögliche Adaptationsstrecken identifiziert.

Die Anordnung der Leuchten wird gemäss ihrer spezifischen Lichtverteilung optimal angepasst, sodass sämtliche Normwerte eingehalten werden.

Der 3-streifige Tunnel ist eigentlich ein 2-streifiger Tunnel mit zusätzlichem Pannenstreifen, wurde jedoch als vollständiger 3-streifiger Tunnel berechnet.

SLG 201		Einfahrtsstrecke	Innenstrecke
<b>Allgemeine Bedingungen</b>			
Länge total [m]	2000.000		
Geschwindigkeit [km/h]	100.000		
L20 [cd/m <sup>2</sup> ]	2800.000		
Art der Beleuchtungsanlage	Gegenstrahl (qc >= 0.5)		
Fahrspuren	2		
<b>Verkehrsbedingungen</b>			
Verkehrsart	Einrichtungsverkehr		
Verkehrsstärke	1200-2800		
Verkehrsteilnehmer	Nur Motorfahrzeugverkehr		
Leuchtdichte der Wände	>= 80% Lfsp		
		Aktuelle Tunnelklasse (SLG 201)	
		<b>2</b>	<b>2</b>
		Mittlere Leuchtdichten [cd/m <sup>2</sup> ]	
		<b>56</b>	<b>2</b>
		k Factor = 20	
		Gesamtgleichmässigkeit:	U0 > 0.2
		Längsgleichmässigkeit:	UI > 0.4
		Schwellwerterhöhung:	TI < 15%

Abb. 5.9 Auszug der Tunnelklasse aus Relux Tunnel

### Planungsfaktor

Der Planungsfaktor wird für Leuchtstofflampenleuchten auf 0.6 gelegt, so dass Alterung und Lichtstromrückgang sowie Verschmutzung entsprechend berücksichtigt sind.

LED-Leuchten wurden bereits im Lichtstrom reduziert (Faktor 20%) und der Planungsfaktor auf 0.8 gesetzt, so dass sich ein rechnerischer Faktor von 0.64 ergibt. Der Grund dafür liegt in der automatischen Lichtstromregulierung, die LED-Leuchten vielfach eingebaut haben. Somit ist die Lichtstromkonstanz über die Lebensdauer gegeben. Die exakten Faktoren müssen jeweils hinterfragt und angepasst werden, da sie herstellerabhängig sind.

Der Raumfaktor bleibt indes in etwa gleich und variiert lediglich in der Oberflächenbeschaffenheit und im Reflexionsverhalten der Oberflächen.

Der Neuwert kann dabei extrem abweichen, da mit tiefem Planungsfaktor (Wartungsfaktor) die Verschmutzung vorweggenommen wird.

### Belagsklasse

R3; Aufgrund der Evaluation des Mittelwertes, aller im Betrieb zwischen 1995 und 2008 gemessenen Tunnel in der Schweiz, ergibt sich ein Belag der Klasse R3 (ein Belag der Klasse R2 entspricht einer diffuseren, ein Belag der Klasse R4 einer spiegelnderen Reflexionscharakteristik, immer gemessen unter einem Winkel von 1°). Tatsächlich verhält sich die wahrgenommene Helligkeit der Belagsklassen genau umgekehrt, d. h. ein Belag der Klasse R2 wirkt heller als ein Belag der Klasse R4.

### Mittlerer Leuchtdichtekoeffizient

$q_0=0.08$  (Werte  $<0.08$  sind dunkler,  $>0.08$  heller), der Mittelwert lag bei 0.086 für Beläge in Betrieb. Der angenommene Wert liegt leicht darunter, um die sichere Seite abzudecken.

### L20 Messung

Die L20 Messung wird auf 2800 cd/m<sup>2</sup> festgelegt. Das gilt lediglich für die relative Ausleuchtung. Die L20 Messung ist stark vom Ort, der Ausrichtung des Portals und des Himmelsanteils im 20°-Feld abhängig und variiert entsprechend. Dieser Wert basiert auf einem langjährigen Mittel aller gemessenen Tunnel in der Schweiz.

### Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die Leuchtenkosten sind Mittelwerte, die auf dem Markt bei Tunnel dieser Grössenordnung erhältlich sind. Sie wurden uns teilweise direkt angegeben.

## 5.2 Typische Anordnung

### 5.2.1 2-streifig



Abb. 5.10 Lichtraumprofil 2-streifiger Tunnel



Abb. 5.11 Abmessung des Lichtraumprofils

### Einfahrt (Adaptation)

Die Beurteilung dieser zwei Produkte ist eindeutig, da die Leuchte AHME1 im 2-streifigen Tunnel in jeder Beziehung besser abschneidet, als die Leuchte AHME2 (siehe Abb. 12). Nur aufgrund der Herstellerangaben ist eine Beurteilung unmöglich. Weitere Kriterien wie die Nutzwertanalyse bestätigen die Aussage.

Abb. 5.12 Auswertung der Adaptationsstrecke

Auswertung der 2-streifigen Tunnelbeleuchtung in der Adaptationsstrecke

Geometrie des Tunnels:	2000.00 m
Höhe des Tunnels:	5.00 m
Randstreifen rechts/links	1.00 m
Breite Fahrbahn:	7.50 m
Anzahl Fahrspuren:	2
Belag/Material:	R3, q0 = 0.08
Wandhöhe:	4.00 m
Belag/Material:	diffus 60%
Geschwindigkeit:	100 km/h
Länge der Einfahrtsstr.	148 m
Leuchtdichte Einfahrt:	56 cd/m <sup>2</sup>
Leuchtdichte Durchfahrt:	2 cd/m <sup>2</sup>

Leuchte	AHME1	AHME2
Position	<b>mittig</b>	<b>mittig</b>
Anzahl	<b>43</b>	<b>49</b>
Abweichung vom Minimum	100%	114%
Leistungsaufnahme gesamt (kW)	<b>14.9</b>	<b>17.8</b>
Abweichung vom Minimum	100%	119%
Kosten (CHF)	CHF 750	CHF 750
Total Tunnel (CHF)	<b>CHF 32'250</b>	<b>CHF 36'750</b>
Abweichung vom Minimum	100%	114%

Abb. 5.13 Auswertung der Innenstrecke

Auswertung der 2-streifigen Tunnelbeleuchtung in der Durchfahrt

Geometrie des Tunnels:	2000.00 m
Höhe des Tunnels:	5.00 m
Randstreifen rechts/links	1.00 m
Breite Fahrbahn:	7.50 m
Anzahl Fahrspuren:	2
Belag/Material:	R3, q0 = 0.08
Wandhöhe:	4.00 m
Belag/Material:	diffus 60%
Geschwindigkeit:	100 km/h
Länge der Einfahrtsstr.	148 m
Leuchtdichte Einfahrt:	56 cd/m <sup>2</sup>
Leuchtdichte Durchfahrt:	2 cd/m <sup>2</sup>

Leuchte	Siteco Travalux R	Siteco Travalux LS	Siteco LED kurz	Siteco LED lang	SE Lightm. LED	Broll LED kurz	Broll LED lang
Position	<b>2er Gruppe</b>	<b>2er Gruppe</b>	<b>2er Gruppe</b>	<b>einzel</b>	<b>einzel</b>	<b>einzel</b>	<b>einzel</b>
Anzahl	<b>342</b>	<b>476</b>	<b>342</b>	<b>177</b>	<b>235</b>	<b>230</b>	<b>148</b>
Abweichung	231%	322%	231%	120%	159%	155%	100%
Leistungsaufnahme gesamt (kW)	<b>18</b>	<b>25.2</b>	<b>24.6</b>	<b>20.2</b>	<b>23.5</b>	<b>30.1</b>	<b>28</b>
Abweichung	100%	140%	137%	112%	131%	167%	156%
Kosten (CHF)	CHF 450	CHF 700	CHF 1'350	CHF 1'950	CHF 1'000	CHF 1'350	CHF 1'950
Total Tunnel (CHF)	<b>CHF 153'900</b>	<b>CHF 333'200</b>	<b>CHF 461'700</b>	<b>CHF 345'150</b>	<b>CHF 235'000</b>	<b>CHF 310'500</b>	<b>CHF 288'600</b>
Abweichung	100%	217%	300%	224%	153%	202%	188%

### 5.2.2 3-streifig

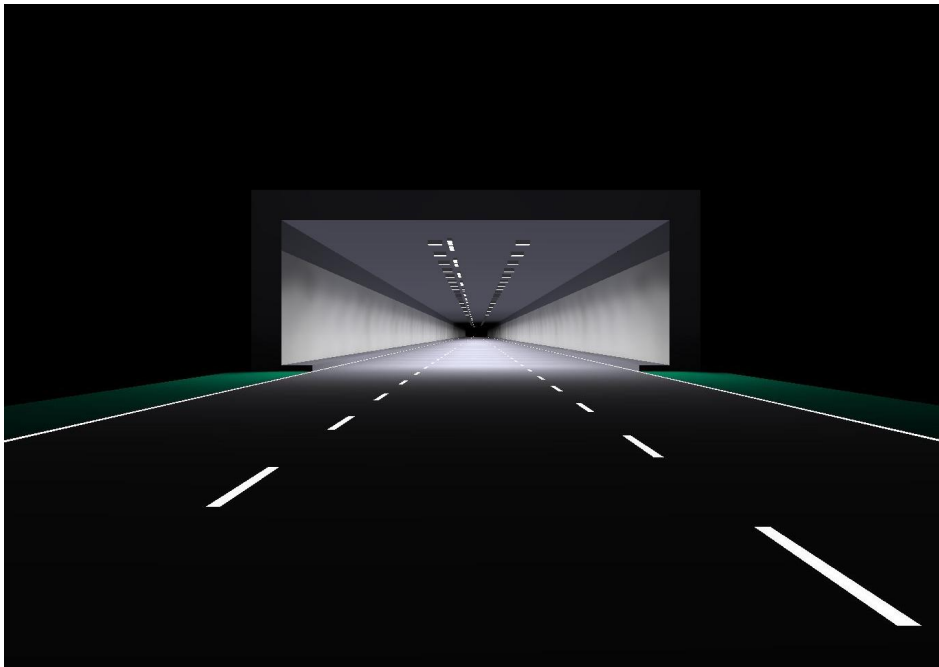


Abb. 5.14 Lichtraumprofil 3-streifiger Tunnel

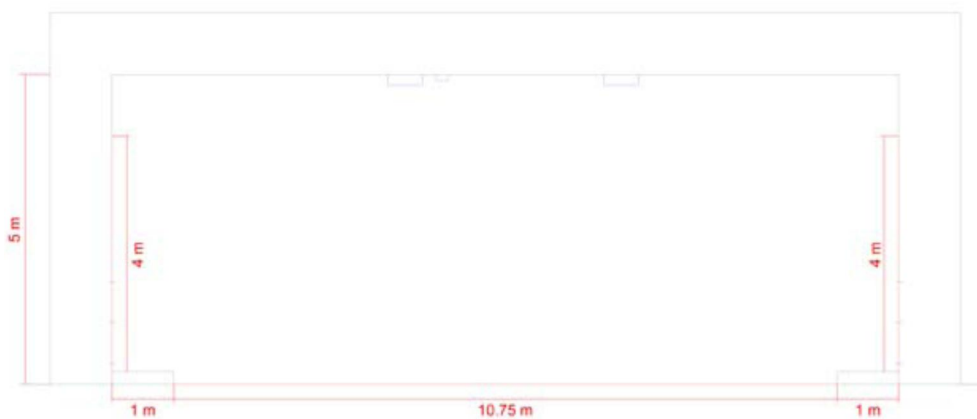


Abb. 5.15 Abmessungen des Lichtraumprofils

#### **Einfahrt (Adaptation)**

Die Beurteilung der Adaptationsstrecke im 3-streifigen Tunnel scheint nun gekehrt zu sein. Tatsächlich ist die Leuchte AHME2 dadurch günstiger in der Anschaffung, weil weniger Leuchten eingesetzt werden. Dafür zeigt sich in der Leistungsaufnahme, dass durch die Zusammensetzung der verschiedenen Leistungsstufen ein erhöhter Energieverbrauch resultiert. Unter Zuhilfenahme der Gesamtwirtschaftlichkeitsbetrachtung und der Nutzwertanalyse lässt sich eine eindeutige Aussage machen.

**Abb. 5.16 Auswertung der Adaptationsstrecke**

Auswertung der 3-streifigen Tunnelbeleuchtung in der Adaptationsstrecke

Geometrie des Tunnels:	2000.00 m
Höhe des Tunnels:	5.00 m
Randstreifen rechts/links	1.00 m
Breite Fahrbahn:	10.75
Anzahl Fahrspuren:	3
Belag/Material:	R3, q0 = 0.08
Wandhöhe:	4.00 m
Belag/Material:	diffus 60%
Geschwindigkeit:	100 km/h
Länge der Einfahrtsstr.	148 m
Leuchtdichte Einfahrt:	56 cd/m <sup>2</sup>
Leuchtdichte Durchfahrt:	2 cd/m <sup>2</sup>

Leuchte	AHME1	AHME2
Position	2 reihig	2 reihig
Anzahl	92	82
Abweichung	112%	100%
Leistungsaufnahme gesamt (kW)	21.2	25.2
Abweichung	100%	119%
Kosten (CHF)	CHF 750	CHF 750
Total Tunnel (CHF)	CHF 69'000	CHF 61'500
Abweichung	112%	100%

**Abb. 5.17 Auswertung der Durchfahrtstrecke****Durchfahrt (Innenbereich)**

Auswertung der 3-streifigen Tunnelbeleuchtung in der Durchfahrt

Geometrie des Tunnels:	2000.00 m
Höhe des Tunnels:	5.00 m
Randstreifen rechts/links	1.00 m
Breite Fahrbahn:	10.75
Anzahl Fahrspuren:	3
Belag/Material:	R3, q0 = 0.08
Wandhöhe:	4.00 m
Belag/Material:	diffus 60%
Geschwindigkeit:	100 km/h
Länge der Einfahrtsstr.	148 m
Leuchtdichte Einfahrt:	56 cd/m <sup>2</sup>
Leuchtdichte Durchfahrt:	2 cd/m <sup>2</sup>

Leuchte	DFL2	DFL1	DLED1	DLED4	DLED5	DLED2	DLED3
Position	2er Gruppe	2er Gruppe	2er Gruppe	mittig	2 reihig	2 reihig	2 reihig
Anzahl	440	600	396	200	460	392	388
Abweichung	220%	300%	198%	100%	230%	196%	194%
Leistungsaufnahme gesamt (kW)	23.2	31.8	28.6	22.8	46	51.2	73.6
Abweichung	102%	139%	125%	100%	202%	225%	323%
Kosten (CHF)	CHF 450	CHF 700	CHF 1'350	CHF 1'950	CHF 1'000	CHF 1'350	CHF 1'950
Total Tunnel (CHF)	CHF 198'000	CHF 420'000	CHF 534'600	CHF 390'000	CHF 460'000	CHF 529'200	CHF 756'600
Abweichung	100%	212%	270%	197%	232%	267%	382%

**5.2.3 Leuchtenwahl**

Die Leuchtenwahl wurde durch validierte Produkte für den Adaptationsbereich und die Durchfahrt vorgenommen. Einzelne Produkte sehen sich äusserlich absolut ähnlich, zeigen aber aufgrund ihrer Lichtcharakteristik unterschiedliche Resultate. Je nach Lichtverteilung und Wirkungsgrad zeigen sie ihre Vorteile erst in der Wirtschaftlichkeitsanalyse bzw. in der Nutzwertanalyse. Jede Berechnung wurde aufgrund der leuchteneigenen Lichtverteilung optimiert.

## 5.2.4 Adaptationsleuchten

Abb. 5.18 Auszug der Spezifikation der Adaptationsleuchte

AHME1

Tunnelleuchte 400W asymmetrisch

**Leuchtendaten**

Leuchten-Wirkungsgrad : 80.6%  
 Leuchten-Lichtausbeute : 101.9 lm/W  
 Klassifikation : A30 ↓100.0% ↑0.0%  
 CIE Flux Codes : 42 80 99 100 80  
 Betriebsmittel :  
 tot. Systemleistung : 446.9 W  
 Länge : 562 mm  
 Breite : 445 mm  
 Höhe : 168 mm

**Bestückung mit**

Anzahl : 1  
 Bezeichnung : LUCALOX  
 LU400/XO/T/40  
 Leistung : 400 W  
 Farbe :  
 Lichtstrom : 56500 lm

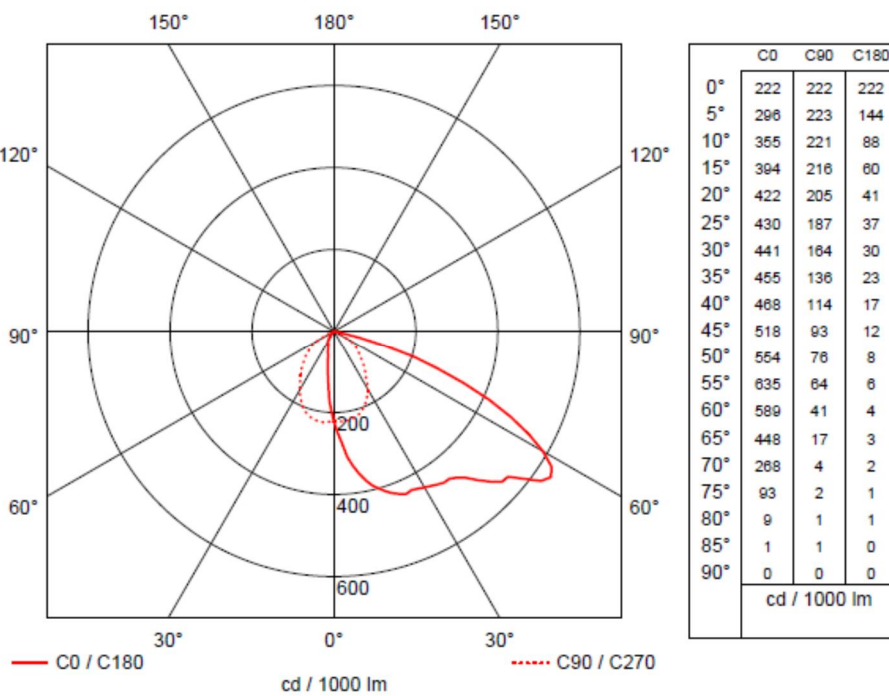


Abb. 5.19 Lichtverteilungskurve (LVK) der Adaptationsleuchte

Abb. 5.20 Auszug der Spezifikation der alternativen Adaptationsleuchte

AHME2

HME 400W

**Leuchtendaten**

Leuchten-Wirkungsgrad : 61.7%  
 Leuchten-Lichtausbeute : 78.34 lm/W  
 Klassifikation : A10 ↓99.9% ↑0.1%  
 CIE Flux Codes : 38 80 97 100 61  
 Betriebsmittel :  
 tot. Systemleistung : 445 W  
 Länge : 550 mm  
 Breite : 450 mm  
 Höhe : 170 mm

**Bestückung mit**

Anzahl : 1  
 Bezeichnung : Philips SON-T  
 Plus  
 Farbe :  
 Lichtstrom : 56500 lm

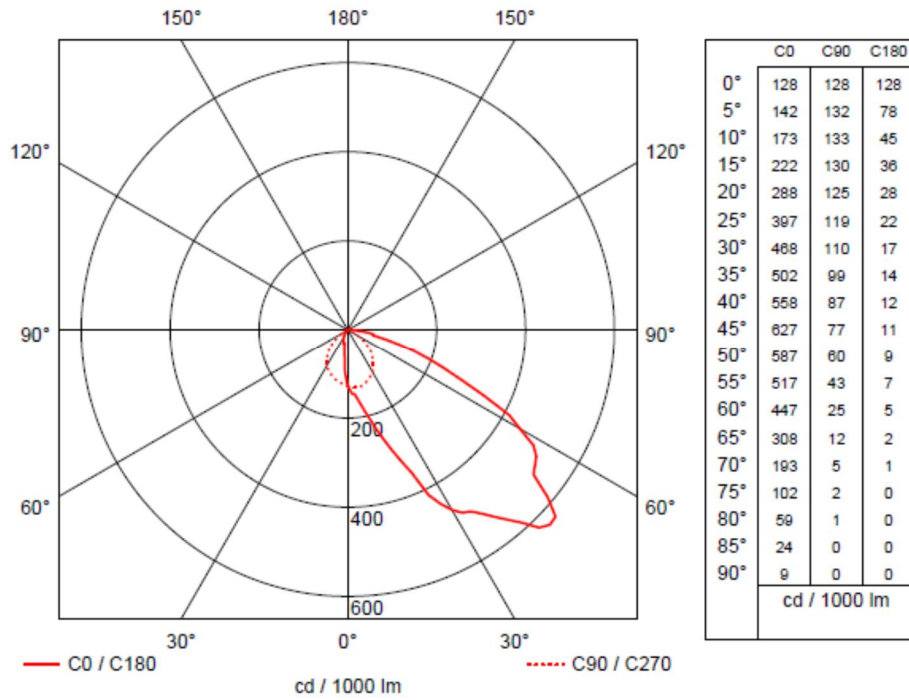


Abb. 5.21 Lichtverteilungskurve (LVK) der alternativen Adaptationsleuchte

### 5.2.5 Durchfahrtsleuchten

Abb. 5.22 Auszug der Spezifikation der Durchfahrtsleuchte

DFL1

1x58W

**Leuchtendaten**

Leuchten-Wirkungsgrad : 68.98%  
 Leuchten-Lichtausbeute : 67.93 lm/W  
 Klassifikation : A50 ↓100.0% ↑0.0%  
 CIE Flux Codes : 60 89 99 100 69  
 Betriebsmittel :  
 tot. Systemleistung : 52.8 W  
 Länge : 1584 mm  
 Breite : 190 mm  
 Höhe : 106 mm

**Bestückung mit**

Anzahl : 1  
 Bezeichnung : Aura 58W 840  
 Farbe :  
 Lichtstrom : 5200 lm



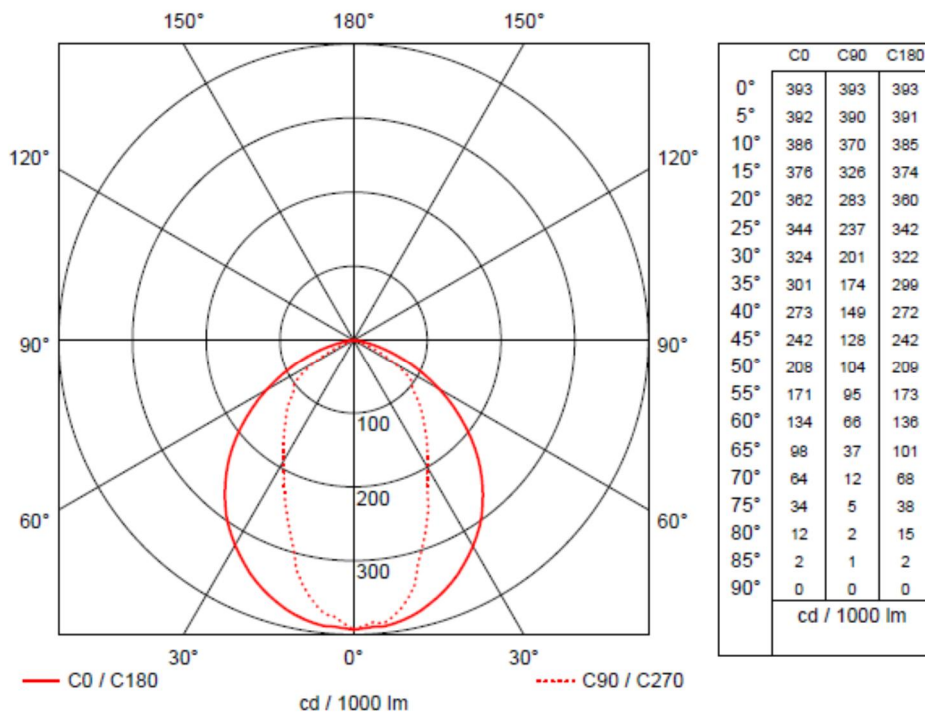


Abb. 5.23 Lichtverteilungskurve (LVK) der Durchfahrtsleuchte

Abb. 5.24 Rohrleuchte (Durchfahrt)

DFL2

58W T8 mit Auralonglife

**Leuchtendaten**

Leuchten-Wirkungsgrad : 84%  
 Leuchten-Lichtausbeute : 82.73 lm/W  
 Klassifikation : A40 ↓98.1% ↑1.9%  
 CIE Flux Codes : 47 75 92 98 84  
 Betriebsmittel :  
 tot. Systemleistung : 52.8 W  
 Länge : 1710 mm  
 Breite : 120 mm  
 Höhe : 140 mm

**Bestückung mit**

Anzahl : 1  
 Bezeichnung : AURA  
 ULTIMATE  
 LL58/840  
 Leistung : 58 W  
 Farbe :  
 Lichtstrom : 5200 lm

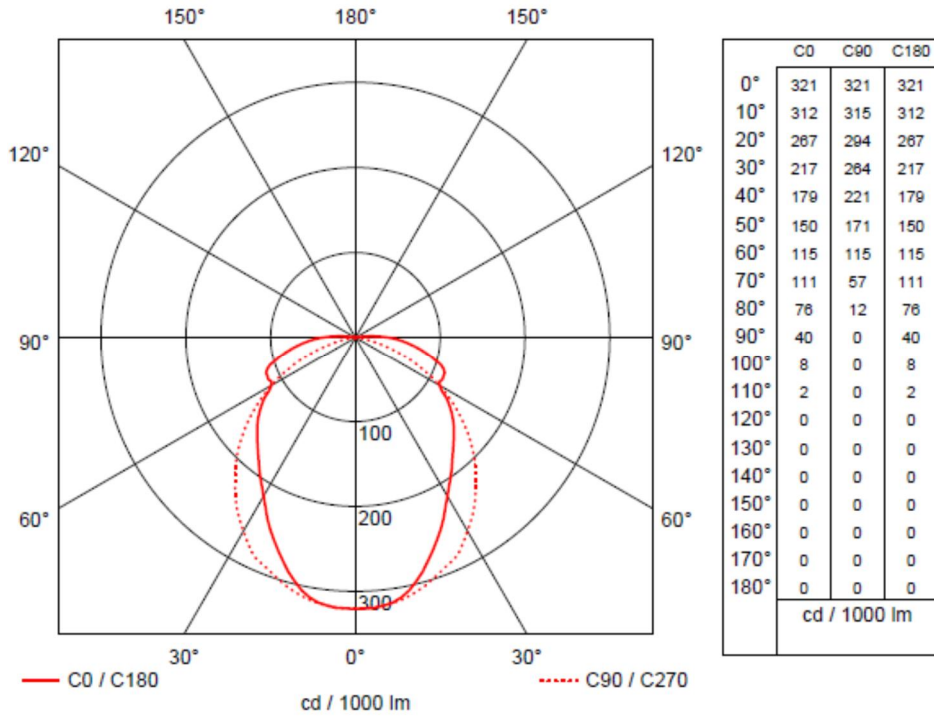


Abb. 5.25 Rohrleuchte (Durchfahrt)

Abb. 5.26 Spezifikation LED Durchfahrtsleuchte 1-längig

DLED1

**LED MIT 80% NENNLICHTSTROM!**

**Leuchtendaten**

Leuchten-Wirkungsgrad : 100%  
 Leuchten-Lichtausbeute : 58.33 lm/W  
 Klassifikation : A30 ↓100.0% ↑0.0%  
 CIE Flux Codes : 43 80 97 100 100  
 Betriebsmittel :  
 tot. Systemleistung : 72 W  
 Länge : 900 mm  
 Breite : 250 mm  
 Höhe : 95 mm

**Bestückung mit**

Anzahl : 1  
 Bezeichnung : 56 \* LWW  
 5PM-KY-7L /  
 420  
 Leistung : 72 W  
 Farbe :  
 Lichtstrom : 4200 lm

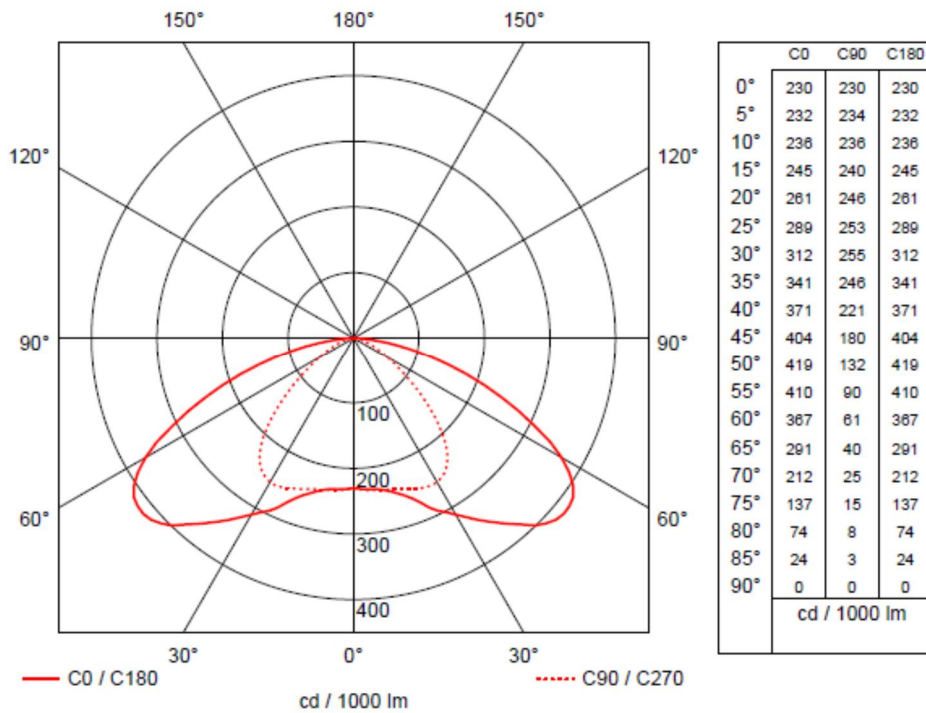


Abb. 5.27 LED Leuchte 1-längig

Abb. 5.28 Spezifikation alternativer LED Durchfahrtsleuchte

DLED2

**LED MIT 80% NENNLICHTSTROM**

**Leuchtendaten**

Leuchten-Wirkungsgrad : 100%  
 Leuchten-Lichtausbeute : 32.92 lm/W  
 Klassifikation : A50 ↓100.0% ↑0.0%  
 CIE Flux Codes : 61 94 100 100 100  
 Betriebsmittel :  
 tot. Systemleistung : 130.7 W  
 Länge : 1200 mm  
 Breite : 152 mm  
 Höhe : 110 mm

**Bestückung mit**

Anzahl : 1  
 Bezeichnung : Measured  
 luminous flux  
 of  
 Leistung : 130.7 W  
 Farbe :  
 Lichtstrom : 4302 lm

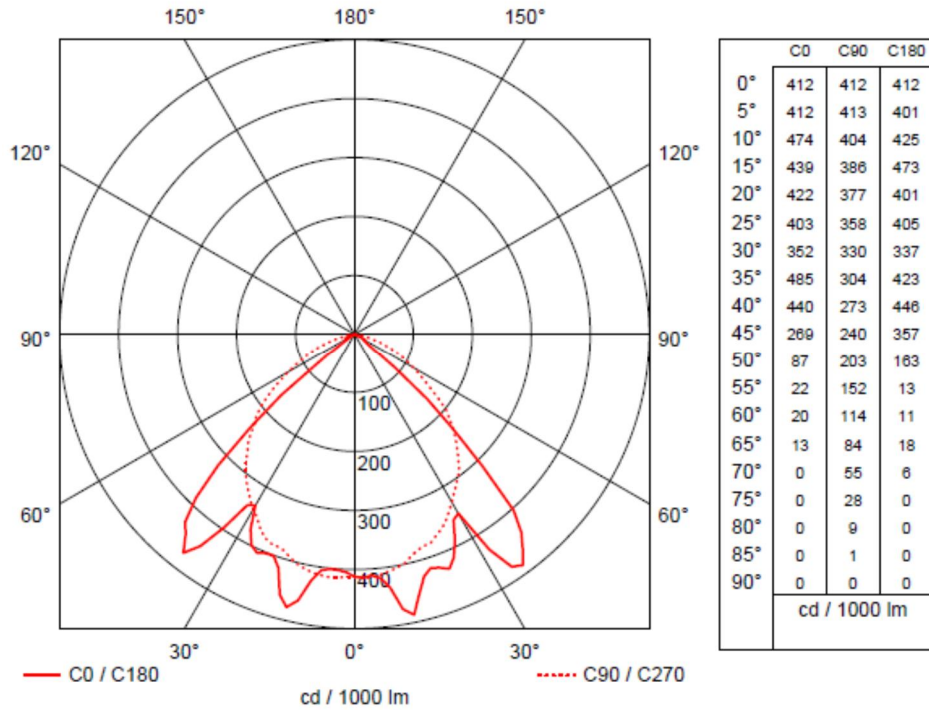


Abb. 5.29 Lichtverteilung alternativer LED Leuchte

Abb. 5.30 LED Durchfahrtsleuchte

DLED3

**LED-Tunnelleuchte**

**Leuchtdaten**

Leuchten-Wirkungsgrad : 100%  
 Leuchten-Lichtausbeute : 34.09 lm/W  
 Klassifikation : A50 ↓99.6% ↑0.4%  
 CIE Flux Codes : 58 92 99 100 100  
 Betriebsmittel :  
 tot. Systemleistung : 189.5 W  
 Länge : 1690 mm  
 Breite : 150 mm  
 Höhe : 110 mm

**Bestückung mit**

Anzahl : 1  
 Bezeichnung : LED 700 mA  
 Leistung : 189.5 W  
 Farbe :  
 Lichtstrom : 6461 lm

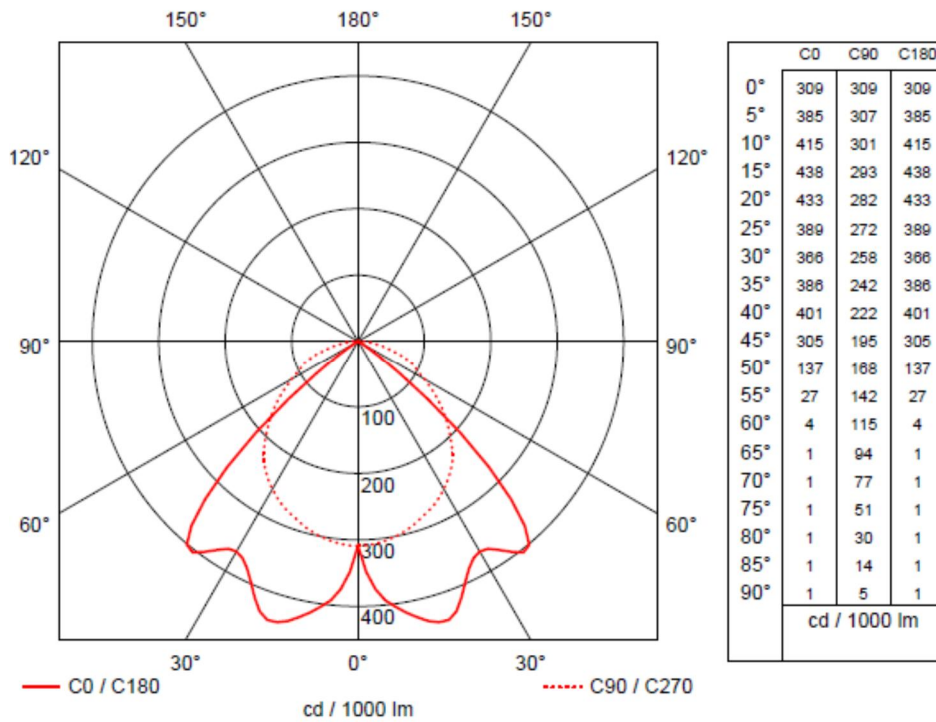


Abb. 5.31 LED Durchfahrtsleuchte

Abb. 5.32 LED Durchfahrtsleuchte

DLED4

LED

**Leuchtendaten**

Leuchten-Wirkungsgrad : 100%  
 Leuchten-Lichtausbeute : 73.68 lm/W  
 Klassifikation : A30 ↓100.0% ↑0.0%  
 CIE Flux Codes : 43 80 97 100 100  
 Betriebsmittel :  
 tot. Systemleistung : 114 W  
 Länge : 1400 mm  
 Breite : 250 mm  
 Höhe : 90 mm

**Bestückung mit**

Anzahl : 1  
 Bezeichnung : 56 \* LWW  
 5PM-KY-7L /  
 420  
 Leistung : 114 W  
 Farbe :  
 Lichtstrom : 8400 lm

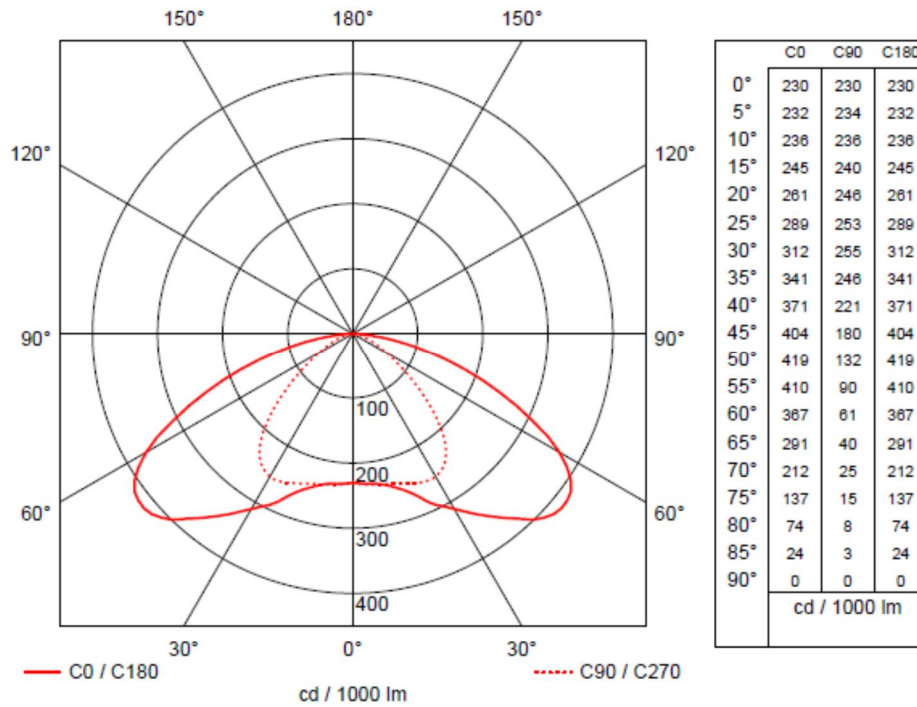


Abb. 5.33 LED Durchfahrtsleuchte

Abb. 5.34 Spezifikation LED Durchfahrtsleuchte

DLED5

**LED 5ER-PRINT**

**Leuchtendaten**

Leuchten-Wirkungsgrad : 81.5%  
 Leuchten-Lichtausbeute : 32.93 lm/W  
 Klassifikation : A50 ↓100.0% ↑0.0%  
 CIE Flux Codes : 50 92 100 100 81  
 Betriebsmittel :  
 tot. Systemleistung : 100 W  
 Länge : 1400 mm  
 Breite : 250 mm  
 Höhe : 75 mm

**Bestückung mit**

Anzahl : 1  
 Bezeichnung : Dragon 702 ma  
 Leistung : 100 W  
 Farbe :  
 Lichtstrom : 4040 lm

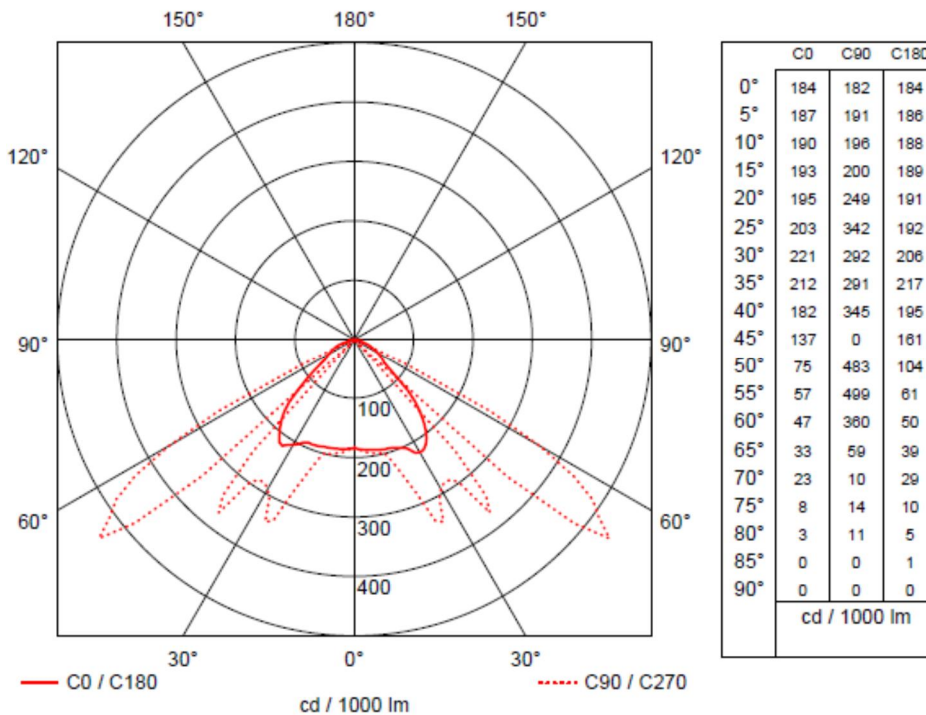


Abb. 5.35 LVK LED Durchfahrtsleuchte

## 5.3 Nutzwertanalyse

Eine bewährte quantitative Analyseverfahren, um verschiedene Alternativen anhand einheitlicher Kriterien zu bewerten, ist die Nutzwertanalyse. Sie soll in der vorliegenden Studie für die Auswahl einer geeigneten Tunnelleuchte zur Anwendung kommen. Dafür werden in einem ersten Schritt Bewertungskriterien für die Leuchten definiert und relativ zueinander gewichtet. In einem zweiten Schritt werden die einzelnen Leuchten im Bezug auf die hergeleiteten Kriterien bewertet und deren Nutzwert berechnet. Während der Nutzwertanalyse wird darauf geachtet, dass die Kriterien und die Beurteilung des Nutzwertes nicht monetarisiert werden.

Diese Vorgehensweise soll aufzeigen, welche Leuchte sich für die Erfüllung der spezifischen Anforderungen in einem Tunnel am besten eignet und deshalb als typische Tunnelleuchte vorgeschlagen werden kann.

### 5.3.1 Kriterienwahl

Damit die unterschiedlichen Leuchten einheitlich miteinander verglichen werden können, müssen zuerst Kriterien definiert werden, anhand derer die Leuchten untersucht werden sollen. In der vorliegenden Studie wurde darauf geachtet, dass der Kriterienkatalog möglichst wenige Kriterien umfasst, welche aber möglichst alle wesentlichen Anforderungen an Tunnelleuchten abdecken.

Aus einer anfänglich umfangreichen Liste an Unterscheidungsmerkmalen wurden all jene weggelassen die sich entweder zu einem übergreifenden Kriterium kombinieren liessen oder solche, bei denen eine Abhängigkeit festgestellt werden konnte.

Zum Schluss liessen sich 5 Kriterien definieren die einerseits in messtechnische und andererseits mechanische Kriterien gruppiert werden können. Sie sollen in den folgenden Abschnitten eingeführt und kurz diskutiert werden.

#### Lichtverteilungskurve

Mit der Darstellung der Lichtverteilungskurve können die unterschiedlichen Lichtstärken einer Leuchte grafisch dargestellt werden. Aus der Lichtverteilungskurve lassen sich der

Abblendwinkel sowie der Ausstrahlungswinkel einer Leuchte ablesen, wobei die Lichtverteilung durch die Grösse und die Richtung des Ausstrahlungswinkels bestimmt werden [70].

### **Lichtausbeute**

Mit der Lichtausbeute soll der jeweilige Wirkungsgrad der Leuchten beschrieben werden, wobei die abgegebene Leistung im Verhältnis zur zugeführten Leistung gestellt wird. Je höher der Wirkungsgrad einer Leuchte, desto effizienter lässt sich die betrachtete Leuchte betreiben. Leuchten mit einer starken Lichtausbeute werden hoch bewertet.

### **Lebensdauer**

Die Lebensdauer kann als Kriterium hinzugezogen werden, um die Zeit zu beschreiben, in der eine technische Anlage ohne Austauschen ihrer Kernkomponenten oder ohne komplettes Versagen betrieben werden kann. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass sich in Tunneln eine lange Lebensdauer der Leuchten vorteilhaft auf den Betrieb der gesamten Beleuchtungsanlage auswirkt und deshalb anzustreben ist.

### **Dichtigkeit**

Die Dichtigkeit einer Leuchte trägt massgebend dazu bei, die Widerstandsfähigkeit gegenüber aggressiven Umwelteinflüssen zu erhöhen. Dabei ist nicht nur die Qualität und die Einbauweise, sondern auch die Länge der Abdichtungen entscheidend. Anhand dieses Kriteriums werden die zu untersuchenden Leuchten auf ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber innerer Verschmutzung und folglich Beschädigungen durch äussere Einflüsse überprüft. Eine hohe Dichtigkeit ist deshalb wünschenswert bei einer Tunnelleuchte.

### **Wartungsaufwand**

Mit dem Wartungsaufwand soll der zeitliche Aufwand untersucht werden, der benötigt wird um die verschiedenen Leuchten in einem betriebsfähigen und sicheren Zustand halten zu können. Der Wartungsaufwand für eine Tunnelleuchte ist möglichst klein zu halten.

Weil die Nutzwertanalyse eine nicht-monetäre Analysemethode ist, soll darauf geachtet werden, dass der Wartungsaufwand nicht monetarisiert wird und nur zur Beurteilung des zeitlichen Aufwandes benützt wird.

### **State-of-the-art**

Dieses Kriterium unterscheidet die Leuchten in Bezug auf ihren Entwicklungsstand. In der vorliegenden Untersuchung wird jedoch nicht nur nach dem technologischen Entwicklungsstand sondern auch danach gefragt, ob sich die betrachtete Leuchte im Betrieb bewährt hat. Dies führt zum Umstand, dass zum Beispiel eine Leuchte mit dem höchstverfügbaren technologischen Entwicklungsstand bezüglich dem Kriterium "State-of-the-art" dennoch tief bewertet wird, weil sie sich im Betrieb noch nicht bewähren konnte. Die optimale Tunnelleuchte hat den höchstverfügbaren technologischen Entwicklungsstand und konnte sich bereits im Betrieb bewähren.



Abb. 5.36 Kriterien zur Bewertung von Tunnelleuchten

	Kriterium	Bemerkung
Messtechnische Kriterien	Lichtverteilungskurve	vgl. Berechnungen in Kapitel Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.
	Lichtausbeute	$\frac{lm}{W} \left( = \frac{\text{abgegebener Lichtstrom}}{\text{zugeführte Leistung}} \right)$
	Lebensdauer	
Mechanische Kriterien	Dichtigkeit	Beschreibt u.a. die Widerstandsfähigkeit gegenüber Verschmutzung und Umwelteinflüssen
	Wartungsaufwand	Nicht-monetärer Aufwand um die Leuchte in einem betriebsgerechten Zustand zu halten
	State-of-the-art	Höchst verfügbarer Entwicklungsstand; Bewährung der Leuchte im Betrieb

### 5.3.2 Nutzwert

#### Gewichtung der Kriterien

Wie bereits weiter oben erwähnt, werden die verschiedenen Kriterien relativ zueinander gewichtet. Damit kann die jeweilige Relevanz der Unterscheidungsmerkmale berücksichtigt werden.

Abb. 5.37 Gewichtung der Kriterien

Kriterien / Kriterien	Lichtverteilungskurve	Lichtausbeute	Dichtigkeit	Wartungsaufwand	State-of-the-art	Lebensdauer	Gewicht	Faktor
1 Lichtverteilungskurve		1	0	0	2	2	5	1.17
2 Lichtausbeute	1		1	1	0	1	4	1.13
3 Dichtigkeit	2	1		2	2	1	8	1.27
4 Wartungsaufwand	2	1	0		1	2	6	1.20
5 State-of-the-art	0	2	0	1		0	3	1.10
6 Lebensdauer	0	1	1	0	2		4	1.13
							30	7

Bemerkung zur Vorgehensweise

Frage: Ist das Kriterium (Zeile) wichtiger als das Kriterium (Spalte) ?

Antwort: Nein, Gleichwertig, Ja

In die grünen Felder ist die Antwort wie folgt einzutragen:

0 Punkte für ein "Nein"

1 Punkt für ein „Gleichwertig“

2 Punkte für ein „Ja“

Die Abbildung zeigt auf, wie die Kriterien in einer Matrix paarweise beurteilt werden. Dabei muss entschieden werden, ob das Kriterium (Zeilen) wichtiger, gleich wichtig oder weniger wichtig als das Kriterium (Spalten) ist. Es wird somit möglich, die Kriterien entlang ihrer Wichtigkeit zu ordnen und mit einem Gewichtungsfaktor zu versehen.

Die auf Expertenmeinungen basierte Herleitung der Kriteriengewichtung zeigt, dass die

Dichtigkeit einer Leuchte als wichtigstes Unterscheidungsmerkmal eingeschätzt wird.

Auf der anderen Seite wird die Tatsache, dass sich eine Leuchte im Betrieb bewährt hat und sich auf dem neusten technischen Entwicklungsstand befindet, bei der Leuchtenbewertung am schwächsten ins Gewicht fallen: state-of-the-art wird mit dem kleinsten Gewichtungsfaktor versehen.

**Berechnung des Nutzwertes**

Im nächsten Schritt werden anschliessend die verschiedenen Leuchten mit den oben hergeleiteten Kriterien bewertet. Es wird danach gefragt, wie die jeweilige Leuchte in Bezug auf die Unterscheidungsmerkmale einzuschätzen ist. Erfüllt die Leuchte eine bestimmte Anforderung in hohem Masse, so erreicht sie diesbezüglich eine hohe Note (vgl. Spalte "Zielerfüllung"). Die Multiplikation der Zielerfüllungsnote mit dem Gewichtungsfaktor ergibt den Nutzwert der Leuchte bezüglich des betrachteten Kriteriums.

Die Summe aller Nutzwerte (vgl. Spalte "Nutzwert") ergibt schlussendlich den Gesamtnutzwert einer Leuchte.

In den folgenden Abschnitten werden die Nutzwertanalysen für Adaptationsleuchten und Durchgangsleuchten getrennt voneinander vorgestellt.

Abb. 5.38 Berechnung des Nutzwertes von Adaptationsleuchten

Kriterien Adaptation	AHME2		AHME1		
	Rang	2	1		
	Faktor	Zielerfüllung	Nutzwert	Zielerfüllung	Nutzwert
1 Lichtverteilungskurve	1.17	5	5.83	7	8.17
2 Lichtausbeute	1.13	6	6.80	8	9.07
3 Dichtigkeit	1.27	4	5.07	4	5.07
4 Wartungsaufwand	1.20	4	4.80	4	4.80
5 State-of-the-art	1.10	6	6.60	6	6.60
6 Lebensdauer	1.13	2	2.27	2	2.27
			31.37		35.97

Obwohl die Adaptationsleuchten praktisch baugleich waren, ist die Unterscheidung im Spiegel wesentlich. Der Spiegel definiert schlussendlich die Lichtverteilungskurve wie auch die Lichtausbeute.

Abb. 5.39 Berechnung des Nutzwertes von Durchfahrtsleuchten

Kriterien Durchfahrt	Rang	DFL2		DFL1		DLED1		DLED2		DLED3		DLED4		DLED5	
		1	7	3	5	4	2	6							
		Faktor	Zielerfüllung	Nutzwert	Zielerfüllung	Nutzwert	Zielerfüllung	Nutzwert	Zielerfüllung	Nutzwert	Zielerfüllung	Nutzwert	Zielerfüllung	Nutzwert	
1 Lichtverteilungskurve	1.17	8	9.33	8	9.33	7	8.17	5	5.83	6	7.00	7	8.17	4	4.67
2 Lichtausbeute	1.13	8	9.07	6	6.80	5	5.67	5	5.67	5	5.67	5	5.67	6	6.80
3 Dichtigkeit	1.27	8	10.13	4	5.07	8	10.13	8	10.13	8	10.13	8	10.13	8	10.13
4 Wartungsaufwand	1.20	6	7.20	6	7.20	7	8.40	7	8.40	7	8.40	8	9.60	7	8.40
5 State-of-the-art	1.10	7	7.70	5	5.50	5	5.50	4	4.40	4	4.40	4	4.40	4	4.40
6 Lebensdauer	1.13	8	9.07	6	6.80	8	9.07	8	9.07	8	9.07	8	9.07	8	9.07
			52.50		40.70		46.93		43.50		44.67		47.03		43.47

Bemerkung zur Vorgehensweise => Bei jeder Leuchte wird die Zielerfüllung der verschiedenen Kriterien (Feld mit grünem Hintergrund) benotet. Die Benotung der Zielerfüllung erfolgt nach folgender Skala:  
 => 0 - 2 Punkte = klein  
 3 - 5 Punkte = mittel  
 6 - 8 Punkte = hoch

Die Nutzwertanalyse zeigt auf, dass an erster Stelle eine Leuchtstofflampenleuchte steht, dann aber erst an siebter Stelle wieder. Dazwischen drängen sich die LED-Leuchten. Daraus ergibt sich der zwingende Schluss, dass die LED-Leuchten bzgl. Nutzwert bereits so

gut abschneiden, dass sie die beste FL-Leuchte zwar noch nicht ersetzen, dafür aber klar in ihre Nähe rücken und schlechtere FL-Leuchten verdrängen. Zudem hat die LED-Leuchte klare Vorteile bzgl. Lichtverteilung, da die Lichtverteilung nicht aufwendig über einen Reflektor gerechnet werden muss, sondern mittels Lichtpunktichtung erstellt werden kann.

### 5.3.3 Kritik

Für eine aussagekräftige Quantifizierung des Nutzwertes von Leuchten sind grundsätzlich unabhängige Kriterien gefordert. Sie müssen so definiert sein, dass jedes Kriterium einen spezifischen Unterscheidungspunkt beschreibt, der von keinem anderen Kriterium abgedeckt wird.

Die in der vorliegenden Studie definierten Unterscheidungsmerkmale wurden miteinander verglichen, in einer Expertenrunde validiert und als voneinander unabhängig betrachtet. Es ist aber klar, dass die Auswahl und Gewichtung der Kriterien abhängig von der Zusammensetzung der Expertengruppe und damit von subjektiven Haltungen geprägt ist. Es ist deshalb nicht vorausgesetzt, dass die Nutzwertanalyse bei anderer Zusammensetzung der Expertengruppe die gleichen Resultate hervorbringen würde.

Ebenso ist die Bewertung der Zielerfüllung der verschiedenen Leuchten von subjektiven Einschätzungen abhängig. Um diesem Umstand entgegenzutreten, wurden die Ergebnisse der Diskussionen festgehalten und die darauf basierenden Einschätzungen der Experten durch eine Mittelwertbildung zusammengefasst. Auf diese Weise wurde versucht, eine einsetzende Gruppendynamik die zu einer allmählichen Angleichung der Einschätzungen führen kann, zu unterbinden. Die Diskussionen haben nämlich gezeigt, dass eine Einigung der verschiedenen Experten schwierig sein kann.

Die Berechnung des gesamten Nutzwertes einer Leuchte ergibt sich aus der Summe der einzelnen Nutzwerte bezüglich der Kriterien. Diese Vorgehensweise ist sehr leicht verständlich und ermöglicht eine einfache Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Leuchten. Es ist jedoch zu betonen, dass sich die Rangliste der ausgewählten Leuchten nur auf die Kriterien bezieht und zum Beispiel noch keine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einbezieht. Für eine definitive Leuchtauswahl müssen daher noch weitere, harte Entscheidungskriterien hinzugezogen werden (vgl. Kap. 5.4).

## 5.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse für 2 km Tunnellänge

### 5.4.1 2-streifig Adaptation

Abb. 5.40 Wirtschaftlichkeitsanalyse von 2 typischen Adaptationsleuchten

	Adaptation AHME2	Adaptation AHME1
<b>Energieverbrauch</b>		
Anschlusswert [kW]	18	15
Jahresstromverbrauch [kWh]	156'243	130'331
<b>Erstellungskosten</b>		
Leuchtenkosten [Fr]	73'500.-	64'500.-
Lampenkosten [Fr]	0.-	0.-
Installationskosten [Fr]	29'400.-	25'800.-
Malerarbeiten	0.-	0.-
<b>Total</b>	<b>102'900.-</b>	<b>90'300.-</b>
<b>Jährliche Betriebskosten</b>		
Lampenkosten [Fr]	1'628.-	1'428.-
Wartungskosten [Fr]	1'789.-	1'570.-
Energiekosten [Fr]	45'538.-	37'986.-
<b>Total</b>	<b>48'954.-</b>	<b>40'983.-</b>
<b>Jahresbeleuchtungskosten</b>		
jährliche Betriebskosten [Fr]	48'954.-	40'983.-
jährliche Kapitalkosten [Fr]	5'271.-	4'625.-
<b>Total</b>	<b>54'224.-</b>	<b>45'608.-</b>
<b>Return on Investment [Jahren]</b>		<b>-2</b>
<b>jährliche Kosteneinsparung</b>	<b>0.-</b>	<b>7'970.-</b>

### 5.4.2 2-streifig Durchfahrt

Abb. 5.41 Wirtschaftlichkeitsanalyse von Leuchtstofflampen und LED-Leuchten

	Durchfahrt DFL2	Durchfahrt DFL1	Durchfahrt DLED1	Durchfahrt DLED4	Durchfahrt DLED5	Durchfahrt DLED2	Durchfahrt DLED3
<b>Energieverbrauch</b>							
Anschlusswert [kW]	18	25	25	20	24	30	28
Jahresstromverbrauch [kWh]	155'788	220'997	215'706	176'759	205'860	263'939	245'035
<b>Erstellungskosten</b>							
Leuchtenkosten [Fr]	153'900.-	333'200.-	461'700.-	345'150.-	235'000.-	310'500.-	288'600.-
Lampenkosten [Fr]	0.-	0.-	0.-	0.-	0.-	0.-	0.-
Installationskosten [Fr]	102'600.-	142'800.-	102'600.-	53'100.-	70'500.-	69'000.-	44'400.-
Malerarbeiten	0.-	0.-	0.-	0.-	0.-	0.-	0.-
<b>Total</b>	<b>256'500.-</b>	<b>476'000.-</b>	<b>564'300.-</b>	<b>398'250.-</b>	<b>305'500.-</b>	<b>379'500.-</b>	<b>333'000.-</b>
<b>Jährliche Betriebskosten</b>							
Lampenkosten [Fr]	786.-	1'095.-	9'018.-	9'334.-	6'196.-	6'065.-	7'805.-
Wartungskosten [Fr]	3'745.-	5'212.-	2'996.-	2'326.-	2'059.-	2'015.-	1'945.-
Energiekosten [Fr]	45'405.-	64'410.-	62'868.-	51'517.-	59'999.-	76'926.-	71'416.-
<b>Total</b>	<b>49'936.-</b>	<b>70'717.-</b>	<b>74'882.-</b>	<b>63'177.-</b>	<b>68'254.-</b>	<b>85'005.-</b>	<b>81'166.-</b>
<b>Jahresbeleuchtungskosten</b>							
jährliche Betriebskosten [Fr]	49'936.-	70'717.-	74'882.-	63'177.-	68'254.-	85'005.-	81'166.-
jährliche Kapitalkosten [Fr]	13'138.-	24'381.-	28'904.-	20'399.-	15'648.-	19'438.-	17'056.-
<b>Total</b>	<b>63'074.-</b>	<b>95'098.-</b>	<b>103'786.-</b>	<b>83'576.-</b>	<b>83'901.-</b>	<b>104'443.-</b>	<b>98'222.-</b>
<b>Return on Investment [Jahren]</b>		**	**	**	**	**	**
** lässt sich nicht berechnen da keine Einsparung gegenüber Referenzanlage möglich (1. Spalte)							
<b>jährliche Mehrkosten</b>	<b>0.-</b>	<b>20'781.-</b>	<b>24'946.-</b>	<b>13'241.-</b>	<b>18'317.-</b>	<b>35'069.-</b>	<b>31'230.-</b>

### 5.4.3 3-streifig Adaptation

Abb. 5.42 Wirtschaftlichkeitsanalyse von 2 typischen Adaptationsleuchten

	Adaptation AHME2	Adaptation AHME1
<b>Energieverbrauch</b>		
Anschlusswert [kW]	25	21
Jahresstromverbrauch [kWh]	221'243	185'362
<b>Erstellungskosten</b>		
Leuchtenkosten [Fr]	123'000.-	138'000.-
Lampenkosten [Fr]	0.-	0.-
Installationskosten [Fr]	49'200.-	55'200.-
Malerarbeiten	0.-	0.-
<b>Total</b>	<b>172'200.-</b>	<b>193'200.-</b>
<b>Jährliche Betriebskosten</b>		
Lampenkosten [Fr]	2'724.-	3'056.-
Wartungskosten [Fr]	2'993.-	3'358.-
Energiekosten [Fr]	64'482.-	54'024.-
<b>Total</b>	<b>70'199.-</b>	<b>60'438.-</b>
<b>Jahresbeleuchtungskosten</b>		
jährliche Betriebskosten [Fr]	70'199.-	60'438.-
jährliche Kapitalkosten [Fr]	8'820.-	9'896.-
<b>Total</b>	<b>79'019.-</b>	<b>70'334.-</b>
<b>Return on Investment [Jahren]</b>		<b>2</b>
<b>jährliche Kosteneinsparung</b>	<b>0.-</b>	<b>9'760.-</b>

### 5.4.4 3-streifig Durchfahrt

Abb. 5.43 Wirtschaftlichkeitsanalyse von Leuchtstofflampen und LED-Leuchten

	Durchfahrt DFL2	Durchfahrt DFL1	Durchfahrt DLED1	Durchfahrt DLED4	Durchfahrt DLED5	Durchfahrt DLED2	Durchfahrt DLED3
<b>Energieverbrauch</b>							
Anschlusswert [kW]	23	32	29	23	46	51	73
Jahresstromverbrauch [kWh]	200'429	278'568	249'765	199'728	402'960	449'844	642'388
<b>Erstellungskosten</b>							
Leuchtenkosten [Fr]	198'000.-	420'000.-	534'600.-	390'000.-	460'000.-	529'200.-	756'600.-
Lampenkosten [Fr]	0.-	0.-	0.-	0.-	0.-	0.-	0.-
Installationskosten [Fr]	132'000.-	180'000.-	118'800.-	60'000.-	138'000.-	117'600.-	116'400.-
Malerarbeiten	0.-	0.-	0.-	0.-	0.-	0.-	0.-
<b>Total</b>	<b>330'000.-</b>	<b>600'000.-</b>	<b>653'400.-</b>	<b>450'000.-</b>	<b>598'000.-</b>	<b>646'800.-</b>	<b>873'000.-</b>
<b>Jährliche Betriebskosten</b>							
Lampenkosten [Fr]	1'012.-	1'380.-	10'442.-	10'547.-	12'129.-	10'336.-	20'461.-
Wartungskosten [Fr]	4'818.-	6'570.-	3'469.-	2'628.-	4'030.-	3'434.-	5'098.-
Energiekosten [Fr]	58'416.-	81'190.-	72'795.-	58'211.-	117'444.-	131'108.-	187'226.-
<b>Total</b>	<b>64'245.-</b>	<b>89'139.-</b>	<b>86'705.-</b>	<b>71'386.-</b>	<b>133'603.-</b>	<b>144'878.-</b>	<b>212'786.-</b>
<b>Jahresbeleuchtungskosten</b>							
jährliche Betriebskosten [Fr]	64'245.-	89'139.-	86'705.-	71'386.-	133'603.-	144'878.-	212'786.-
jährliche Kapitalkosten [Fr]	16'903.-	30'732.-	33'467.-	23'049.-	30'630.-	33'129.-	44'715.-
<b>Total</b>	<b>81'148.-</b>	<b>119'872.-</b>	<b>120'173.-</b>	<b>94'436.-</b>	<b>164'233.-</b>	<b>178'008.-</b>	<b>257'501.-</b>
<b>Return on Investment [Jahren]</b>		**	**	**	**	**	**
** lässt sich nicht berechnen da keine Einsparung gegenüber Referenzanlage möglich (1. Spalte)							
<b>jährliche Mehrkosten</b>	<b>0.-</b>	<b>24'894.-</b>	<b>22'460.-</b>	<b>7'141.-</b>	<b>69'357.-</b>	<b>80'633.-</b>	<b>148'540.-</b>

### 5.4.5 Einfluss $q_0$ des Reflexionsverhaltens auf die Durchfahrtsbeleuchtung

Abb. 5.44 Einsparmöglichkeiten durch reduzierte Beleuchtung bei gleichbleibender Beleuchtungsstärke durch Belagsaufhellung

	Durchfahrt DFL2 $q_0=0.06$	Durchfahrt DFL2 $q_0=0.08$	Durchfahrt DFL2 $q_0=0.10$
<b>Energieverbrauch</b>			
Anschlusswert [kW]	24	18	16
Jahresstromverbrauch [kWh]	209'539	155'788	139'389
<b>Erstellungskosten</b>			
Leuchtenkosten [Fr]	207'000.-	153'900.-	137'700.-
Lampenkosten [Fr]	0.-	0.-	0.-
Installationskosten [Fr]	138'000.-	102'600.-	91'800.-
Malerarbeiten	0.-	0.-	0.-
<b>Total</b>	<b>345'000.-</b>	<b>256'500.-</b>	<b>229'500.-</b>
<b>Jährliche Betriebskosten</b>			
Lampenkosten [Fr]	1'058.-	786.-	704.-
Wartungskosten [Fr]	5'037.-	3'745.-	3'351.-
Energiekosten [Fr]	61'071.-	45'405.-	40'625.-
<b>Total</b>	<b>67'166.-</b>	<b>49'936.-</b>	<b>44'680.-</b>
<b>Jahresbeleuchtungskosten</b>			
jährliche Betriebskosten [Fr]	67'166.-	49'936.-	44'680.-
jährliche Kapitalkosten [Fr]	17'671.-	13'138.-	11'755.-
<b>Total</b>	<b>84'837.-</b>	<b>63'074.-</b>	<b>56'435.-</b>
<b>Return on Investment [Jahren]</b>		-5	-5
<b>jährliche Kosteneinsparung</b>	<b>0.-</b>	<b>17'229.-</b>	<b>22'486.-</b>

### 5.4.6 Einsparmöglichkeiten im 2-streifigen Tunnel

Einsparmöglichkeiten im 2-streifigen Tunnel (2km) unter Berücksichtigung des Belags, der Adaptations- und Durchfahrtsbeleuchtung

Abb. 5.45 Faktoren mit direkter Einsparmöglichkeit

Belagswahl	Einsparung pro Jahr	Gegenwartswert bei 25 Jahren 2% Verzinsung	Endwert bei 25 Jahren 2% Verzinsung
$q_0=0.10$ gegenüber $q_0=0.06$	<b>CHF 22'486</b>	<b>CHF 439'015</b>	<b>CHF 720'224</b>
$q_0=0.08$ gegenüber $q_0=0.06$	<b>CHF 17'229</b>	<b>CHF 336'388</b>	<b>CHF 551'860</b>
<b>Adaptationsbeleuchtung</b>			
mögliche Einsparung gegenüber der Variante	<b>CHF 7'970</b>	<b>CHF 155'615</b>	<b>CHF 255'294</b>
<b>Durchfahrt</b>			
günstigster Fall	<b>CHF 13'241</b>	<b>CHF 258'513</b>	<b>CHF 424'102</b>
ungünstigster Fall	<b>CHF 35'069</b>	<b>CHF 684'687</b>	<b>CHF 1'123'260</b>
<i>beste zu zweitbesten bzw. beste zu schlechtesten Lösung</i>			

## 5.5 Resultate

Der Endwert der möglichen Einsparungen unter Abb. 5.45 kumuliert sich für einen 2 km langen 2-streifigen Tunnel auf Beträge zwischen CHF 1.2 Mio und 2.1 Mio (optimale, minimale Variante). Dabei zeigt sich, dass die präzise Planung unter Berücksichtigung von Kostenfaktoren wie Unterhalt, Energie, aber auch Erstellung zwingend sind, um die richtige Entscheidung zu treffen. Eine seriöse Tunnelplanung setzt heutzutage eine Nutzwert-Analyse und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung voraus.

Die grössten Einsparungen ergeben sich innerhalb dieser Untersuchung durch die richtige Wahl der Leuchten. Sowohl Kosten, Nutzwert und Wirtschaftlichkeit bilden dabei wichtige und entscheidungskräftige Grundlagen. Momentan liegt der grösste Nutzen immer noch auf Leuchtstofflampen, kann sich aber durch die fortschreitende LED-Entwicklung in

Zukunft ändern. Die Durchfahrtsbeleuchtung wirkt sich dabei bei längeren Tunnels und durch die permanente Einschaltung massgebender aus als die Adaptationsbeleuchtung.

Monetär unberücksichtigt bleibt in der Betrachtung die Wandhelligkeit, welche wiederum positiven Einfluss sowohl auf Lichtcharakteristik der eingesetzten Leuchten wie auch auf die Wahl der Tunnelklasse hat. Mehrere Effekte können sich kumulieren. Durch hellere Tunnelwände ist die angrenzende Fahrbahnleuchtdichte einfacher einzuhalten oder zu erreichen. Damit können Leuchten, die ihre Effizienz in Fahrbahnrichtung entfalten, einfacher eingesetzt werden. Diese Leuchten können in grösseren Abständen vorkommen, was wiederum zu Einsparungen führt. Durch die Wahl tieferer Tunnelklassen sind die Anforderungen tiefer. Alle diese Faktoren können zusätzlich aktiviert werden.

Ein interessantes Resultat zeigt sich durch die Berücksichtigung der Fahrbahnelligkeit. Der Anstieg von  $q_0$  von 0.06 auf 0.08 bringt eine enorme Einsparung (Abb. 30). Der Anstieg auf 0.10 bringt zusätzliche Einsparung, jedoch nicht im gleichen Masse. Gegeben durch die Nichtlinearität ist eine tiefere Untersuchung der Einsparungen gegenüber den Aufwendungen notwendig. Mögliche Strategien wären Belagswechsel von aussen nach innen durch Zementüberzüge, helleres Gestein oder optische Aufheller.

Das Einsparpotenzial im Tunnel bei der Wahl der Materialien oder Leuchten ist gross. Trotzdem sind eingehende Untersuchungen der verschiedenen Disziplinen zwingend, um gesicherte Aussagen zu machen. Zudem können örtlich verschiedene Einflüsse zusätzliche Abweichungen zur Folge haben (L20 Messung, Zusammensetzung von Beton oder Asphalt, Zulieferung etc.). Kostenintensive Faktoren sind dabei zu berücksichtigen. Die Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung kann nur unter dem Aspekt der Vorgehensstrategie erfolgreich sein. Lokale und zeitliche (Entwicklung) Unterschiede sowohl von der Lage wie auch von Zulieferanten werden zu gross sein, um eine eineindeutige Vorgehensweise zu propagieren. Trotzdem kristallisieren sich Aspekte wie die Leuchtenwahl zum jetzigen Zeitpunkt klar heraus und jede Alternative zahlt für einen tieferen Nutzwert einen höheren Preis (Abb. 5.40 bis Abb. 5.44).

## 6 Empfehlungen

Ausgehend von der Nutzwertanalyse und der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung gibt es verschiedene Faktoren, die bei einer Planung der Tunnelbeleuchtung relevant sein können. Wichtige Faktoren bilden hierbei neben technisch konstruktiven Faktoren die Lichtverteilung und der Wirkungsgrad. Dazu kommen die äusseren Umgebungseinflüsse wie Unterhaltsintervall, Oberflächenbeschaffenheit und Reflexionsverhalten. Viele Faktoren sind exakt planbar, andere wiederum werden vorgegeben. Je mehr Faktoren ohne grossen finanziellen Aufwand durch den Planer bestimmt werden können, desto grösser kann die Einsparung sein.

Nebst klaren und auch einschränkenden Vorgaben gibt es aber auch die Diskussion um die Anordnung von Leuchten. Entsprechende Vorgaben verlangen lineare Lichtanordnungen. Berechnungen auch unter dem Aspekt der energetischen Optimierung sprechen sich klar dagegen aus, da punktuelle Anordnungen der Leuchten genügen. Aus visuellen Gründen wie auch aus Gründen der optischen Führung ist wiederum eine lineare Anordnung zu bevorzugen. Damit entsteht eine Pattsituation, die an und für sich unlösbar ist. Neue technische Möglichkeiten führen zumindest theoretisch zu neuen, viel günstigeren und praktisch wartungsfreien Lösungen, die vielversprechend und zukunftsgerichtet sind. Daher kann folgende Aussage zu neuen Forschungsarbeiten führen:

Das Prinzip der linearen Beleuchtung gepaart mit Grünentladung (mesopisches Sehen) und einfachen LED-Bändern sollte unbedingt weiterverfolgt werden. Ein VSS Forschungsprojekt wäre dazu denkbar.





# Anhänge

<b>I</b>	<b>Messungen</b> .....	<b>59</b>
I.1	L20 Ermittlung .....	59
I.2	Wandleuchtdichte .....	60
I.3	Beläge .....	62
<b>II</b>	<b>Verkehrssicherheit</b> .....	<b>64</b>
II.1	Übersicht über Unfallereignisse .....	64
II.2	Auswertung des Berichts des bfu, Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes .....	64
II.3	Auswertung des Berichts der Tunnelbeleuchtung auf die Verkehrssicherheit des österreichischen Bundesamtes für Verkehrssicherheit .....	66
II.4	Forschungsbericht Fahrverhaltensbeobachtungen auf Landstrassen am Beispiel von Bäumen .....	66
<b>III</b>	<b>Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf der Annäherungsstrecke</b> .....	<b>68</b>
III.1	Verkehrsbezogene Gestaltung .....	68
III.2	Optische Linienführung .....	68
<b>IV</b>	<b>Beleuchtungs- und lichttechnische Massnahmen auf der Annäherungs- und Einfahrtstrecke</b> .....	<b>69</b>
IV.1	"Black-Hole Effekt" .....	69
IV.2	Beleuchtung der Einfahrtstrecke .....	69
<b>V</b>	<b>Gestaltung der Annäherungsstrecke</b> .....	<b>71</b>
V.1	Übersicht und Zielsetzungen .....	71
V.2	Fahrbahnbelag (Deckschicht) .....	72
V.3	Gelände, Portal .....	72
V.4	Rasterdecken .....	73
V.5	Seitliche Wände .....	73
<b>VI</b>	<b>Gesichtsfeld auf der Annäherungsstrecke</b> .....	<b>74</b>
VI.1	Definition des Gesichtsfelds .....	74
VI.2	Flächenanteile im Gesichtsfeld .....	75
VI.3	Abdeckung mit seitlichen Wänden .....	76
VI.4	Zusammenfassung .....	80
<b>VII</b>	<b>Einfahr- und Übergangsstrecke</b> .....	<b>82</b>
VII.1	Übersicht .....	82
VII.2	Kollisionen mit Objekten .....	82
VII.3	Optische Linienführung .....	82
VII.4	Tunnelverkleidung und -anstriche .....	83
<b>VIII</b>	<b>Innenstrecke</b> .....	<b>84</b>
VIII.1	Tunnelwände .....	84
<b>IX</b>	<b>Tunnelreinigung</b> .....	<b>86</b>
IX.1	Übersicht .....	86
IX.2	Einfluss der Verschmutzung auf die Tunnelbeleuchtung .....	86
IX.3	Wirtschaftliche Reinigungsintervalle .....	88
<b>X</b>	<b>L20 Messungen</b> .....	<b>89</b>
<b>XI</b>	<b>Fotodokumentation Tunnelbeleuchtung</b> .....	<b>90</b>
XI.1	Einsatz und Optimierung von hellen Belägen .....	96

# I Messungen

## I.1 L20 Ermittlung

Abb. I.1 Mittelwert der L20 Messungen für Schweizer Tunnel

Querschnitt durch Schweizertunnels vom 90%-Wert von L20 in cd/m<sup>2</sup>

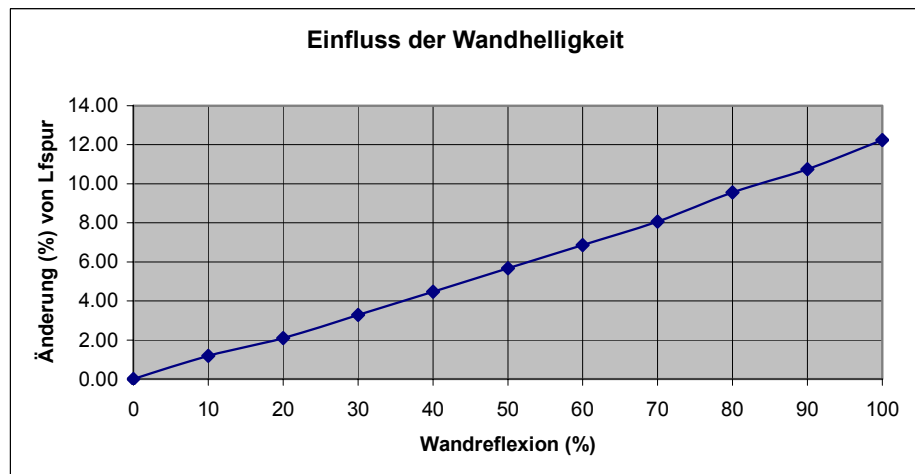
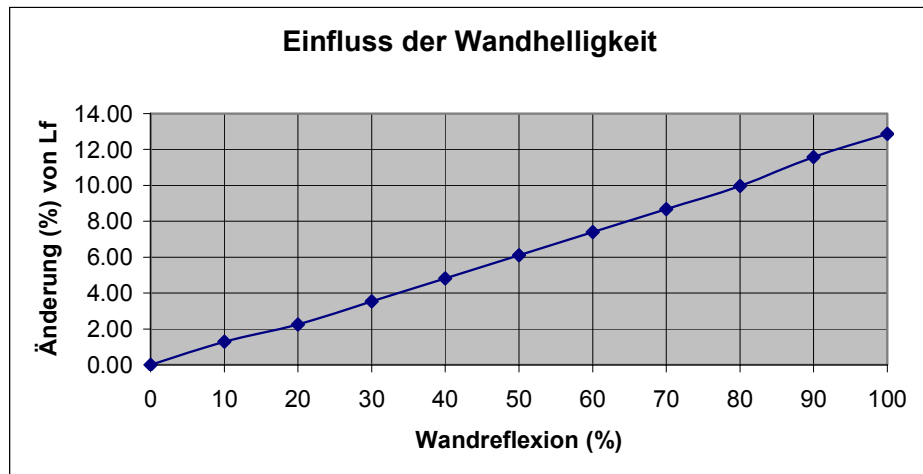
Portal	Nord	Süd	West	Ost	Mittel
	2400	1700	3700	3700	
	2500	2700	2500	2500	
	3200	2400	2500	2500	
	3100	2900	4400	2000	
	2000	2000	2000	1700	
	2200	2200	2700	3600	
	2900	2100	2500	2700	
	2600	2700	3800	2700	
	2100	2900	3300	2500	
	3300	2300	2500	5000	
	3600	2900	3900	2300	
	2900	3200	5100	2700	
	4200	2700	2900	3000	
	3600	2300	3600	3700	
	3100	2200	1900	2800	
	2900	3100	3300	2700	
	3100	3000	4300	2500	
	2700	2300	2500	1800	
	3300	2400	3000	2300	
	4400	2000	3300	2400	
	4600	2000	2400	2200	
	2900	2000	2100	2000	
	4400	2200	2100	2400	
	4400	2100	3100	4500	
	2400	2600	3300	3600	
	3900		3900	2400	
	2600		2900	2200	
	2200		2500	2700	
	3300		4100	2300	
			2600	2600	
			2400	4800	
			2600	2600	
			2100	2800	
			2600		
			2500		
<b>max-Wert</b>	<b>4600</b>	<b>3200</b>	<b>5100</b>	<b>5000</b>	
<b>min-Wert</b>	<b>2000</b>	<b>1700</b>	<b>1900</b>	<b>1700</b>	
<b>mittel-Wert</b>	<b>3131</b>	<b>2436</b>	<b>2997</b>	<b>2794</b>	<b>2840</b>
<b>Streuung</b>	<b>737</b>	<b>399</b>	<b>764</b>	<b>790</b>	
<b>%-Wert(S)</b>	<b>24</b>	<b>16</b>	<b>26</b>	<b>28</b>	

## I.2 Wandleuchtdichte

### Berechnung vom Einfluss der Wandreflexion bezüglich der Fahrbahnleuchtdichte

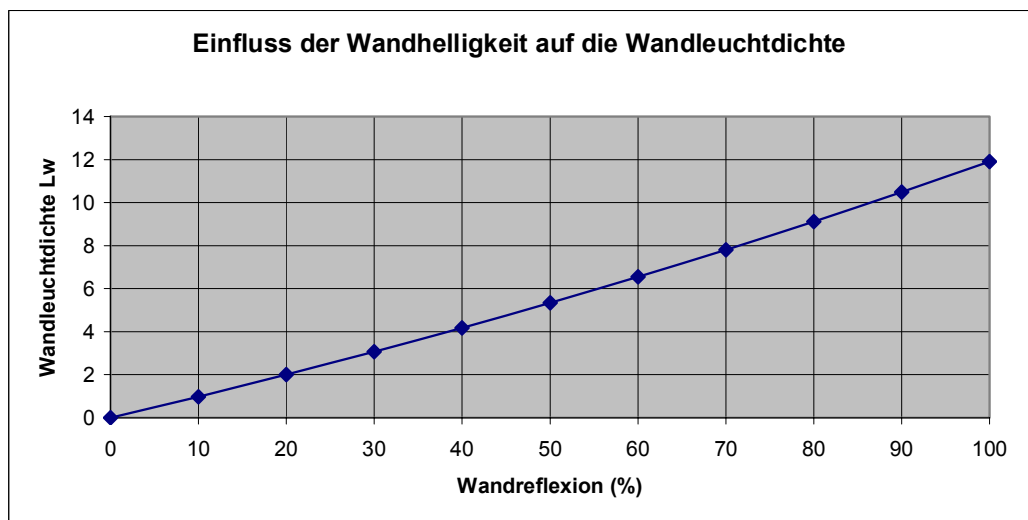
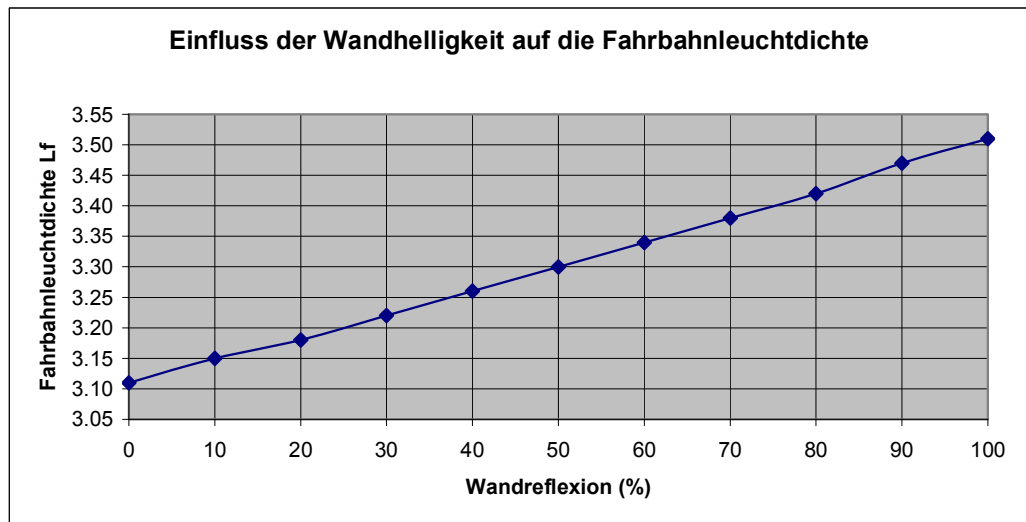
Tunnelspezifikationen: 2-streifig / 2 x 3.5m / Banket je 1m /  
 Leuchte DFL2 in der Tunnelmitte auf 5m Höhe

Wandref.(%)	Lf	Lf(%)	Lf-Normalsp	Lwrel	Lw
0	3.11	0.00	3.35	0.00	0
10	3.15	1.29	3.39	1.19	0.98
20	3.18	2.25	3.42	2.09	2.01
30	3.22	3.54	3.46	3.28	3.07
40	3.26	4.82	3.50	4.48	4.18
50	3.30	6.11	3.54	5.67	5.34
60	3.34	7.40	3.58	6.87	6.55
70	3.38	8.68	3.62	8.06	7.81
80	3.42	9.97	3.67	9.55	9.12
90	3.47	11.58	3.71	10.75	10.49
100	3.51	12.86	3.76	12.24	11.91



Man beachte, dass die Wandhelligkeit natürlich direkt proportional zur Wandreflexion ist

Abb. I.2 Lineare Abhängigkeit Fahrbahnleuchtdichte bzgl. Wandhelligkeit



Die Wandhelligkeit ändert im Prozentbereich die Fahrbahnleuchtdichte linear.  
 Die Wandhelligkeit verändert aber bei diffuser Reflexion die Wandleuchtdichte auch direkt proportional.  
 Eine zu geringe Wandleuchtdichte kann mit einem entsprechenden Anstrich korrigiert werden, ohne dass gemessen werden muss!

Beispiel:	$\rho_{\text{Wand}}$ :	20%	Lw Ist:	2
			Lw Soll	5
	somit $\rho_{\text{WandNeu}}$ :	50%	Lw Ist Neu	5

Abb. I.3 Einfluss Wandhelligkeit auf Fahrbahn- und Wandleuchtdichte

## I.3 Beläge

Die folgenden Tabellen geben eine Übersicht über alle von der METAS gemessenen Belagklassen.

Abb. I.4 Belagklassen, gemessen vom METAS; Quelle: H. Dudli, METAS

Beläge 1995 - 2008 gemessen vom METAS mit Strassenreflektometer LTL200

Belag-95	1	2	3	4	5	6
Klasse R	4	2	4	4	4	1
q0	0.094	0.050	0.120	0.117	0.086	0.107
s1	1.651	0.585	2.216	2.258	2.627	0.324
s2	2.909	1.708	3.800	3.888	3.713	1.544
qp	0.032	0.029	0.032	0.030	0.023	0.069

Belag-96	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Klasse R	1	4	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4
q0	0.079	0.111	0.109	0.041	0.093	0.093	0.120	0.084	0.093	0.093	0.156	0.103
s1	0.233	5.805	2.539	0.499	2.152	2.152	3.393	1.517	2.152	2.152	5.000	2.872
s2	1.465	7.570	3.403	1.805	3.941	3.941	6.909	3.430	3.941	3.941	9.497	3.717
qp	0.054	0.015	0.032	0.023	0.024	0.024	0.017	0.024	0.024	0.024	0.016	0.028

Belag-97	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Klasse R	4	2	4	2	4	3	4	4	2	2	2	2
q0	0.110	0.053	0.102	0.055	0.079	0.090	0.077	0.089	0.107	0.109	0.106	0.086
s1	4.551	0.638	1.367	0.422	1.942	0.877	1.729	1.545	0.510	0.531	0.548	0.729
s2	6.387	1.774	2.442	1.582	2.792	1.836	2.996	2.711	1.568	1.571	1.622	1.869
qp	0.017	0.030	0.042	0.035	0.028	0.049	0.026	0.033	0.068	0.065	0.069	0.046

Belag-98	31	32	33	34	35
Klasse R	4	4	4	4	4
q0	0.067	0.080	0.081	0.106	0.108
s1	1.400	2.401	1.583	2.370	2.422
s2	2.383	3.558	2.659	3.196	4.030
qp	0.028	0.023	0.031	0.033	0.027

Belag-99	36	37	38	39	40
Klasse R	2	4	2	3	4
q0	0.075	0.095	0.057	0.096	0.109
s1	0.651	2.576	0.570	1.071	1.552
s2	1.811	4.359	1.621	2.417	2.837
qp	0.045	0.022	0.035	0.040	0.038

Belag-00	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Klasse R	4	3	3	4	3	4	4	2	3	3	3	3	3	4
q0	0.112	0.088	0.095	0.133	0.073	0.142	0.107	0.086	0.076	0.102	0.099	0.102	0.077	0.115
s1	2.597	1.427	1.252	2.570	0.886	2.647	2.304	0.526	0.960	1.320	1.240	1.320	1.861	2.850
s2	5.070	2.438	2.450	6.056	2.284	4.233	3.658	1.823	2.164	2.287	2.493	2.287	2.667	4.687
qp	0.022	0.036	0.039	0.022	0.032	0.034	0.029	0.047	0.035	0.045	0.040	0.045	0.029	0.025

Belag-01	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68
Klasse R	3	4	4	3	4	4	4	3	4	4	2	1	1	4
q0	0.080	0.102	0.122	0.058	0.098	0.078	0.098	0.079	0.123	0.089	0.088	0.056	0.076	0.106
s1	1.578	3.486	3.362	1.255	1.961	2.831	1.961	1.477	6.493	3.312	0.766	0.446	0.438	2.902
s2	2.531	4.257	5.544	2.378	3.401	3.396	3.401	2.483	8.189	3.973	1.950	1.617	1.554	3.787
qp	0.032	0.024	0.022	0.024	0.029	0.023	0.029	0.032	0.015	0.022	0.045	0.034	0.049	0.028

Belag-02	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
Klasse R	4	4	1	4	4	2	3	4	3	4	4
q0	0.067	0.120	0.049	0.099	0.129	0.075	0.067	0.087	0.092	0.095	0.096
s1	1.591	3.487	0.297	2.882	4.377	1.224	1.235	1.674	1.194	1.911	2.457
s2	2.877	6.299	1.502	3.404	7.669	2.038	2.321	2.772	2.331	3.584	3.362
qp	0.023	0.019	0.033	0.029	0.017	0.037	0.029	0.031	0.039	0.027	0.028

Belag-03	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
Klasse R	3	4	1	1	3	1	4	4	4	4	4
q0	0.090	0.082	0.064	0.048	0.084	0.052	0.081	0.099	0.099	0.124	0.093
s1	1.445	1.795	0.343	0.266	1.437	0.287	1.430	2.875	1.382	2.670	2.078
s2	2.437	2.827	1.570	1.577	2.510	1.534	2.830	4.247	2.946	3.123	3.147
qp	0.037	0.029	0.041	0.030	0.034	0.034	0.028	0.023	0.034	0.040	0.030

Belag-04	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
Klasse R	3	3	4	4	4	4	3	4	4	3
q0	0.079	0.094	0.156	0.110	0.099	0.094	0.095	0.103	0.094	0.068
s1	0.952	1.461	4.069	2.262	2.418	3.299	1.149	1.788	4.042	0.888
s2	2.312	2.604	9.551	5.051	3.465	4.116	2.493	2.830	4.518	2.264
qp	0.034	0.036	0.016	0.022	0.028	0.023	0.038	0.036	0.021	0.030

Belag-05	101	102
Klasse R	3	4
q0	0.070	0.098
s1	0.953	1.618
s2	2.352	3.522
qp	0.030	0.028

Belag-06	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113
Klasse R	4	1	4	1	1	3	2	4	4	4	4
q0	0.087	0.152	0.083	0.130	0.133	0.077	0.084	0.134	0.102	0.083	0.134
s1	2.592	0.160	1.951	0.110	0.113	1.544	0.586	5.458	2.642	1.716	5.458
s2	3.588	1.566	2.939	1.643	1.637	2.698	1.778	8.473	3.474	3.217	8.473
qp	0.024	0.097	0.028	0.079	0.081	0.028	0.047	0.016	0.029	0.026	0.016

Belag-07	114	115	116	117	118	119	120	121	122
Klasse R	4	4	1	1	4	2	4	4	3
q0	0.083	0.083	0.053	0.120	0.136	0.058	0.160	0.068	0.085
s1	2.029	2.071	0.353	0.133	4.661	0.880	3.933	2.336	0.838
s2	3.039	3.086	1.553	1.405	7.926	2.059	7.696	2.821	2.288
qp	0.027	0.027	0.034	0.086	0.017	0.028	0.021	0.024	0.037

Belag-08	123	124
Klasse R	3	2
q0	0.074	0.069
s1	1.353	0.579
s2	2.631	1.786
qp	0.028	0.039

**Bemerkung:** Ab 2000 wurde festgestellt, dass sich der Belag bei der Messung im Betriebszustand befand (*kursiv*)

Zustand	Alle	Betrieb
R <sub>mittel</sub> :	3	3
q0 <sub>mittel</sub> :	0.093	0.086
s1 <sub>mittel</sub> :	1.878	1.527
s2 <sub>mittel</sub> :	3.306	2.702
qp <sub>mittel</sub> :	0.033	0.034

## II Verkehrssicherheit

### II.1 Übersicht über Unfallereignisse

Eine Übersicht über die Unfallereignisse vor und in Tunneln findet sich in der Abb. 3. Spezifisch für Tunnel sind Unfälle mit lediglich zwei Auslösern, der Spurüberschreitung und der Geschwindigkeitsveränderung. Die Beschränkung auf zwei Auslöser vereinfacht die Wahl und Gestaltung von Massnahmen zur Unfallverhütung.

Abb. II.5 Übersicht über Unfallereignisse vor und im Tunnel

Auslöser	Unfallereignis	Bereich der Gefahr	Gefährdung mit Bezug auf die Insassen
Spurüberschreitung	Anprall an Bankett	Unfall ohne Auswirkung auf Dritte	gering
		Unfall mit Auswirkung auf Dritte	gering bis gross
	Anprall an Tunnelwand	Unfall ohne Auswirkung auf Dritte	gering bis mittel
		Unfall mit Auswirkung auf Dritte	gering bis gross
Havarie beim Kreuzen	Vielfalt des Unfallgeschehens	gross	
Geschwindigkeitsveränderung	Auffahren auf vorderes fahrendes Fahrzeug	Unterschiedliche Gefahr wegen Unterschied der Geschwindigkeit	gering bis mittel
	Auffahren auf abgestelltes Fahrzeug		mittel
	Auffahren auf Objekt	Schweres hartes Objekt	mittel bis gross
		Weiches Objekt	gering

Im Gegensatz zur Beschränktheit der Auslöser von Unfällen besteht eine grosse Vielfalt von Arten von Unfallereignissen. Dieser Umstand verhindert weitgehend eine Bestimmung der Risiken der einzelnen Unfallereignisse. Besonders unklar sind die Verhältnisse beim Auffahren auf Objekte mit den unterschiedlichsten Eigenschaften. Eine Optimierung von Massnahmen ist lediglich basierend auf generellen Angaben zum Unfallgeschehen bei der Einfahrt und im Tunnel sowie basierend auf einer Kalibrierung der Massnahmen möglich. Die Letztere bezieht sich im Wesentlichen auf die Beleuchtung und die optische Linienführung. Beide Elemente haben eine enge Beziehung zu Geschwindigkeitsänderungen.

Gemäss vorhandenen Publikationen hat die Bankettbreite rechts, neben den nicht beeinflussbaren Merkmalen wie Tunnellänge und Verkehrsdichte, den grössten Einfluss auf die Verkehrssicherheit. Details zu dieser Aussage fehlen jedoch.

### II.2 Auswertung des Berichts des bfu, Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes

#### Hinweise auf die Verkehrsteilnehmer

Im Zusammenhang mit der Tunnelbeleuchtung sind die Aussagen im Schnittbereich Verkehrssicherheit, Verhalten der Verkehrsteilnehmer und Tunnelbeleuchtung von Interesse. Es wird darauf hingewiesen, dass das Befahren von Tunneln keine grossen Fähigkeiten hinsichtlich der Aufnahme von Informationen und deren Umsetzung erfordert, weil kaum komplexe Situationen vorliegen, die zu bewältigen sind. Jedenfalls werden an die Wahrnehmung andere Anforderungen als auf der freien Strecke gestellt. Beim Einfahren in den Tunnel mit der Veränderungen hell - dunkel sind Adaptionsvorgänge nötig. Bei der Einfahrt wird je nach Beleuchtung die Sehfähigkeit reduziert und die optische Führung erschwert. Dies wirkt sich auf das Spurverhalten und die Reaktion bei ausserordentlichen Ereignissen aus.



### Infrastruktur

Für den Normalbetrieb sind die Ausrüstungselemente aufeinander abzustimmen. Im Zusammenhang mit der Beleuchtung sind es die Geometrie des Tunnels, das Leuchtdichteniveau insbesondere im Einfahrtsbereich sowie die optische Führung durch Licht- und Leiteinrichtungen, die von grosser Bedeutung sind. Sämtliche Signalisierungen und Markierungen müssen gut erkennbar sein, damit sich der Automobilist in den beengten Verhältnissen eines Tunnels orientieren kann. Vermutlich spielen auch andere Elemente wie u.a. die Kurvigkeit eine erhebliche Rolle.

### Unfallanalysen

Beim Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung wurden die Werte des Leuchtdichteniveaus möglichst vieler Tunnelanlagen erfragt. Die gelieferten Daten beziehen sich jedoch meist auf den Neuzustand des Tunnels. Werte zu Zeiten der Unfälle sind nicht bekannt. Für die Datenerhebung zur Unfallanalyse wurden alle massgebenden anlagenspezifischen Merkmale der Tunnel und die Unfalldaten soweit möglich ausgewertet.

### Befragung kantonaler Fachstellen

Das bu führte eine Befragung bei kantonalen Fachstellen hinsichtlich Informationsbedürfnissen im Zusammenhang mit der Verkehrssicherheit von Tunnel durch. Diese behandeln die Mängel seitens der Verkehrsteilnehmer und der Tunnel. Es stellte sich heraus, dass bei den Tunnelbereichen die Beleuchtung mit einem grossen Abstand am häufigsten genannt wurde. Es ist zu vermuten, dass dies auf die laufenden Betriebskosten zurückzuführen ist.

### Zusammenfassung des Berichts des bfu

- Autobahnen und Autostrassen gehören zu den sichersten Abschnitten von Strassen. Bezogen auf die Fehlleistungen der Autofahrer ereignen sich weniger Unfälle als auf Ausserorts- und Innerortsstrassen.
- Basierend auf der Studie sind Massnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit im Tunnel zu analysieren. Dazu sollten insbesondere Aspekte des Betriebs und der Infrastruktur untersucht und mit wahrnehmungspsychologischen Betrachtungen ergänzt werden.
- Die verkehrssicherheitsbezogenen Beziehungen zwischen den Unfällen und den Merkmalen der Tunnel sind in der Abb. 4 dargestellt.

Abb. II.6 Zusammenfassende Darstellung der Risikoänderung in Prozent bei einer Verdoppelung des Merkmals

Merkmal	Bereich	Unfallrisiko	Verunfalltenrisiko
Tunnellänge <sup>1)</sup>	120 - 17'000 m	-32%	-20%
DTV <sup>1)</sup>	2'000 - 100'000	+77%	+38%
Röhren <sup>2)</sup>	1 bzw. 2	-45%	-53%
Schwerer Güterverkehr, %-Anteil am DTV	2,5 - 34%	n.s.	+31%
Bankettbreite	0,5 - 2,8 m	-43%	n.s.

Legende:

- 1) Die Prozentangaben beziffern den Einfluss.
  - 2) Die Prozentangaben beziehen sich auf zweiröhrige Tunnelanlagen (im Vergleich zu einröhrigen Anlagen).
- n.s. Auswirkungen sind statistisch nicht signifikant.

- Beziehungen zwischen der Verkehrssicherheit und den Merkmalen der Tunnelanlagen konnte ausser bei den Bankettbreiten nur bei den nicht beeinflussbaren Merkmalen festgestellt werden. Dabei handelt es sich um die Länge des Tunnels, den DTV, den Anteil des Güterverkehrs am Gesamtverkehr sowie die Anzahl der Röhren.
- Die Leuchtdichte hat sich mit Bezug zur Unfall- und damit auch zur Verunfalltenrate als nicht relevant erwiesen. In Anbetracht der erheblichen Helligkeitsunterschiede,

insbesondere bei der Einfahrtsbeleuchtung, ist es jedoch sinnvoll das Leuchtdichtenniveau hinsichtlich seiner Wirkung zu analysieren.

- Die signalisierte Höchstgeschwindigkeit wurde mit Bezug zur Verkehrssicherheit ebenfalls als nicht massgebend beurteilt. In Anbetracht der grossen Differenz der Haltesichtweite und der Spurüberschreitung bei Geschwindigkeiten von 80 oder 100 km/h ist die Feststellung eher unerwartet. Die Aussage ist auch der Anlass für eine Beurteilung der Haltesichtweiten im Zusammenhang mit der Beleuchtung in den Einfahrstrecken.

## II.3 Auswertung des Berichts der Tunnelbeleuchtung auf die Verkehrssicherheit des österreichischen Bundesamtes für Verkehrssicherheit

### Leuchtdichteverhältnisse bei Unverhältnissen bei Unfallereignissen

Die Verfasser G. Hanreich, H. Lukaschek, J. Schrefel und W. Hopferwieser [18] stellen fest, dass keine gesicherten Unterlagen über die Leuchtdichteverhältnisse bei Unfallereignissen als Folge der Veränderung von Beleuchtungs-Schaltständen in Strassentunneln zur Verfügung stehen. Basierend auf dieser Ausgangslage sind im Rahmen des Forschungsprojekts Untersuchungen zur Beschaffung von Informationen zu den Zusammenhängen zwischen den Beleuchtungsniveaus, der Ausstattung und der Verkehrssicherheit durchgeführt worden. Dies wenigstens insofern, als dass Einflüsse auf den Risikograd des Verkehrs qualitativ nachgewiesen werden konnten. Im Bericht des bfu [17] wird im Übrigen dargelegt, dass das Niveau der Verkehrssicherheit kleiner ist als auf der offenen Strecke. Im Weiteren wird darauf hingewiesen, dass die schweizerische Forschungsarbeit von Graf und Ghielmetti [85] die Erforschung der Zusammenhänge zwischen der Tunnelbeleuchtung und der Unfallhäufigkeit zum Ziel hatte. Trotz einer umfangreichen internationalen Umfrage konnte jedoch, mangels erhältlichen Datenmaterials, das Ziel nicht erreicht werden. Immerhin zeigte sich, dass eine Herabsetzung der Beleuchtung in den Innenstrecken von Tunneln in der Schweiz und der Einsatz von asymmetrischen Leuchten in der Einfahrtsstrecke keine negative Wirkung auf das Unfallgeschehen hatte. Die zahlreichen weiteren Verweise auf Untersuchungen in allen Bereichen der Tunnelbeleuchtung basieren auf älteren Unterlagen. Sie sind deshalb nur beschränkt verwertbar. Sie liefern jedoch wichtige und interessante Hinweise, die einen Anstoss für eine Optimierung von Tunnelbeleuchtungen auslösen. Abschliessend wird in der Zusammenfassung des Berichts Folgendes festgestellt (Zitat):

*Die Literatursichtung zeigt also, dass es bis heute nicht gelungen ist, objektive Kriterien für die Tunnelbeleuchtung zu erarbeiten, die bei einem ökonomischen Einsatz der aufgewendeten Mittel eine maximale Verkehrssicherheit gewährleisten. Ansätze scheitern zumeist am Unfalldatenmaterial bzw. an der betrachteten Grundgesamtheit. Fundierte Erfahrungen über die aus den Beleuchtungsverhältnissen resultierenden Fahrerverhaltensweisen liegen nicht vor. Im Allgemeinen ist aber bei der Beleuchtungsausstattung von Strassentunneln international ein Rückgang der Anforderungen an das Leuchtdichtenniveau der Fahrbahn und dessen Gleichmässigkeit zu bemerken, ohne dass dabei im Konkreten ein Nachteil für die Verkehrssicherheit festgestellt werden konnte.*

Das Zitat von 1986 ist gemäss Literaturrecherchen in vielen Punkten auch heute noch zutreffend.

## II.4 Forschungsbericht Fahrverhaltensbeobachtungen auf Landstrassen am Beispiel von Bäumen

Der Bericht der deutschen Bundesanstalt für Strassenwesen behandelt die verkehrspsychologische Wirkung von Strassengestaltungselementen im Hinblick auf das Spur- und Seitenabstandsverhalten. Dabei wurden vor allem die Beziehungen der Gestaltungselemente der Strasse zur Veränderung der gefahrenen Geschwindigkeit untersucht.

Im Gegensatz zu anderen Studien im Bereich Verkehrspsychologie und Strasse wurden Versuche sowohl mit dem peripheren als auch mit dem zentralen Sehen (Blickfixierung) durchgeführt. Dabei wird festgestellt, dass vor allem Fahranfänger ihre Informationen weitgehend über die Blickfixierung aufnehmen. Es besteht jedoch gegenüber Versuchen bei der Einfahrt in Tunnel der Unterschied, dass ausschliesslich Bäume als Gestaltungselemente an Hauptverkehrsstrassen ein Element der Forschung waren. Eine Erkenntnis ist jedenfalls der Umstand, dass auf der Strasse bis zum Tunnelportal gut sichtbare Randmarkierungen wichtig sind.

## III Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf der Annäherungsstrecke

### III.1 Verkehrsbezogene Gestaltung

Gemäss den Erkenntnissen der Verkehrspsychologie kommt bei der Annäherungsstrecke der Beziehung Verkehrssicherheit und deren Gestaltung eine grosse Bedeutung zu. Dies betrifft primär die optische Linienführung. Daneben können weitere Massnahmen wie u.a. lichttechnische Vorkehrungen einen Beitrag zur Verkehrssicherheit und zur Kostenoptimierung beitragen. Der Verkehr auf der Annäherungsstrecke ist häufig mit einer Herabsetzung der Geschwindigkeit aller oder einzelner Fahrzeuge verbunden. Diese können Unfälle sowohl auf der Annäherungsstrecke als auch im Tunnel bewirken. Massnahmen zur Beruhigung des Verkehrsgeschehens sind vor allem in der Annäherungsstrecke wirksam. Die Auswirkungen von Massnahmen sind nachfolgend aufgeführt:

- Eine für die Verkehrsteilnehmer kaum erkennbare und damit nicht irritierende Verkleinerung des geometrischen Normalprofils der Strasse auf dasjenige des Tunnels
- Eine ungestörte bzw. homogene optische Linienführung von der Strasse in den Tunnel
- Die Verhütung von störenden Ausrüstungselementen im Strassenperimeter wie beispielsweise seitliche Zugänge
- Eine "Verschiebung der Tunneleinfahrt" vom Portal weg in den Strassenbereich mittels einer Leitmauer
- Die Verhinderung eines Fahrzeuganpralls an die Portalwand.

### III.2 Optische Linienführung

Gemäss den unter Kap. 3 zusammengestellten Informationen im Schnittbereich Verkehrspsychologie und Verkehrssicherheit hat eine homogene optische Linienführung in der Annäherungsstrecke bzw. im Übergang Strasse - Tunnel eine sehr grosse Bedeutung hinsichtlich des Verhaltens der Verkehrsteilnehmer. Massgebend ist die Verhütung von Bremsmanövern. In der erwähnten Literatur zum Bereich Verkehrspsychologie wird darauf hingewiesen, dass insbesondere wenig geübte Fahrer auf eine gut erkennbare optische Linienführung angewiesen sind. Die optische Linienführung auf der Annäherungsstrecke muss identisch mit derjenigen in der Einfahrstrecke sein.

## IV Beleuchtungs- und lichttechnische Massnahmen auf der Annäherungs- und Einfahrtstrecke

### IV.1 "Black-Hole Effekt"

Herrschen zwischen der Annäherungsstrecke und der Einfahrtstrecke sehr grosse Leuchtdichtunterschiede, kann die ungenügende Adaptationsfähigkeit des Auges das Gefühl vermitteln, in ein "schwarzes Loch" zu fahren. Dieser "Black-Hole Effekt" kann zu einer Reduktion der Fahrgeschwindigkeit oder sogar zu Bremsmanövern und damit zu Staubbildung und einer erhöhten Gefährdung infolge von Auffahrkollisionen führen. Der "Black-Hole Effekt" tritt vor allem bei positivem Kontrast, also heller Umgebungsgestaltung und dunkler Tunneleinfahrt, auf. Bei negativem Kontrastverhältnis und somit dunkler Umgebung (wenig Himmelsanteil etc.) und gut beleuchteter und hell gestalteter Tunneleinfahrt hingegen ist keine Beeinträchtigung vorhanden. Im Gegenteil, der Zustand des negativen Kontrasts ist anzustreben.

Zur Vermeidung, oder zumindest Minderung des "Black-Hole Effekts", darf der Leuchtdichtesprung zwischen der Annäherungsstrecke und der Einfahrtstrecke nicht zu extrem sein. Diesbezüglich ist zu erwähnen, dass zwischen der Annäherungsstrecke und der Einfahrtstrecke Leuchtdichtunterschiede mit Faktor 1'000 oder sogar 10'000 möglich sind. Gemäss den im folgenden Abschnitt I.4.2 angegebenen Anforderungen an die Beleuchtung der Einfahrtstrecke muss die Leuchtdichte der Einfahrtstrecke  $L_{fe}$  mindestens 1% (=minimaler  $k$ -Wert) der Leuchtdichte der Annäherungsstrecke  $L_{20}$  betragen.

### IV.2 Beleuchtung der Einfahrtstrecke

Gemäss der Norm SN 640 551 [7] muss die Leuchtdichte der Einfahrtstrecke  $L_{fe}$  mindestens der Leuchtdichte der Annäherungsstrecke  $L_{20}$  multipliziert mit dem  $k$ -Wert entsprechen, wobei der  $k$ -Wert von der Tunnelklasse, der Beleuchtungsart (symmetrisch/Gegenstrahl) und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit abhängig ist und Werte von ca. 0,01 (10‰) bis 0,06 (60‰) hat.

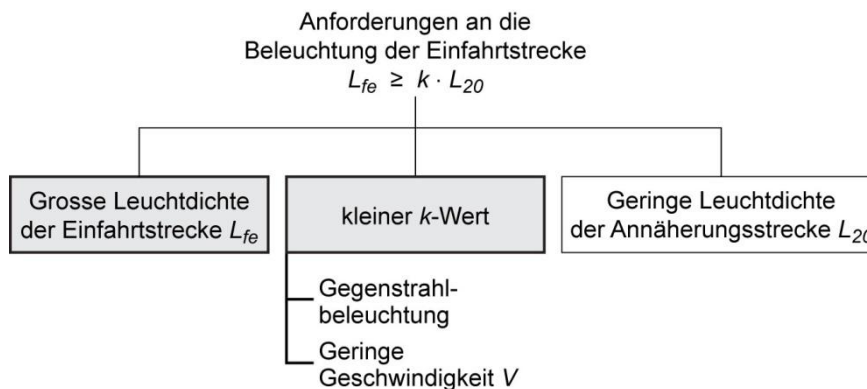


Abb. IV.7 Massnahmen zur Erfüllung der Anforderungen an die Beleuchtung der Einfahrtstrecke

Beleuchtungs- und verkehrstechnische Massnahmen, um die Anforderungen an die Beleuchtung der Einfahrtstrecke zu erfüllen, sind eine möglichst hohe Leuchtdichte der Einfahrtstrecke  $L_{fe}$  sowie die Erreichung eines kleinen  $k$ -Wertes, was wiederum mit einer Gegenstrahlbeleuchtung und mit einer geringen Verkehrsgeschwindigkeit erzielt werden kann. Die Tunnelklasse wird diesbezüglich indirekt über die Geschwindigkeit beeinflusst.

Der "Black-Hole Effekt" und die beleuchtungstechnischen Massnahmen, d.h. die Installation einer Gegenstrahlbeleuchtung mit entsprechend hoher Leuchtdichte  $L_{fe}$  sowie Re-

duktion der Verkehrsgeschwindigkeit zur Verminderung des  $k$ -Wertes als verkehrstechnische Massnahme sind in der folgenden Abbildung synoptisch dargestellt.

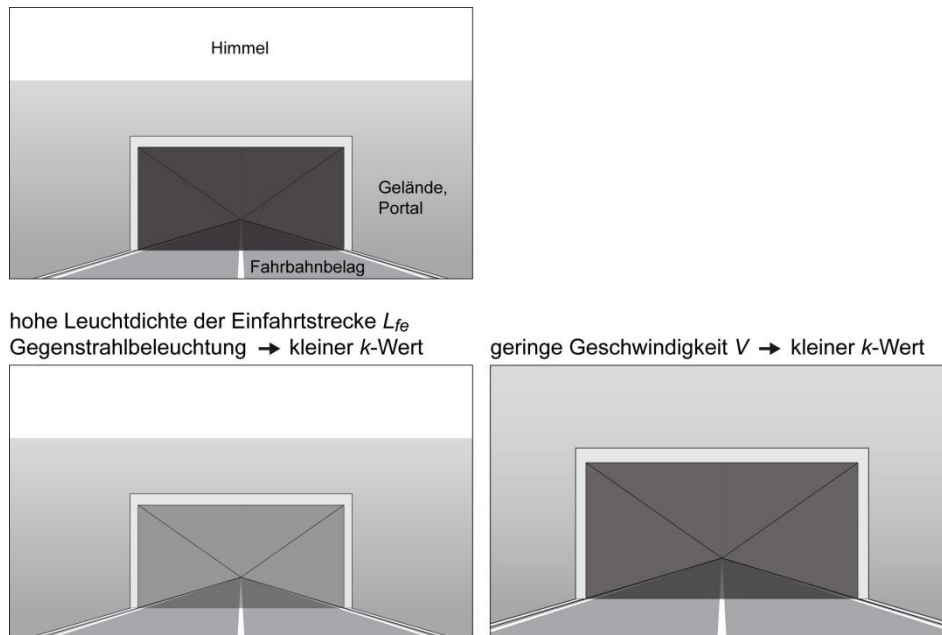


Abb. IV.8 "Back-Hole Effekt" und Wirkung beleuchtungstechnischer Massnahmen (Hohe Lichtdichte  $L_{fe}$ , Gegenstrahlbeleuchtung) und verkehrstechnischer Massnahmen (geringe Geschwindigkeit  $V$ )

## V Gestaltung der Annäherungsstrecke

### V.1 Übersicht und Zielsetzungen

Die Leuchtdichte auf der Annäherungsstrecke wird massgeblich durch das Gesichtsfeld und die Helligkeit der im Gesichtsfeld befindlichen Flächen beeinflusst. Die folgende Abbildung (Abb. I.9) zeigt eine Annäherungsstrecke, in deren Gesichtsfeld sich neben dem Portal und der Fahrbahn auch seitliche Wände (Schallschutzwände), Bepflanzungen und der Himmel befinden. In Bezug auf die Verminderung des "Black-Hole Effekts" ist die Bepflanzung als günstig zu beurteilen. Dies vor allem deshalb, weil damit der Himmel teilweise abgedeckt wird. Die Schallschutzwände sind demgegenüber vergleichsweise hell. Eine dunklere Gestaltung dieser Wände wäre günstiger.



Abb. V.9 Beispiel einer Annäherungsstrecke mit einer Portalumgebung mit Schallschutzwänden, Bepflanzung, Bepflanzung und Himmel

Massnahmen in Bezug auf die lichttechnische Gestaltung auf der Annäherungsstrecke haben zum Ziel, die Leuchtdichte im Gesichtsfeld des Fahrzeuglenkers auf der Annäherungsstrecke möglichst gering zu halten. Bei einer geringen Leuchtdichte der Annäherungsstrecke  $L_{20}$  kann auch die erforderliche Leuchtdichte der Einfahrtstrecke  $L_{fe}$  reduziert und damit die Tunnelbeleuchtung kostengünstiger gestaltet werden.

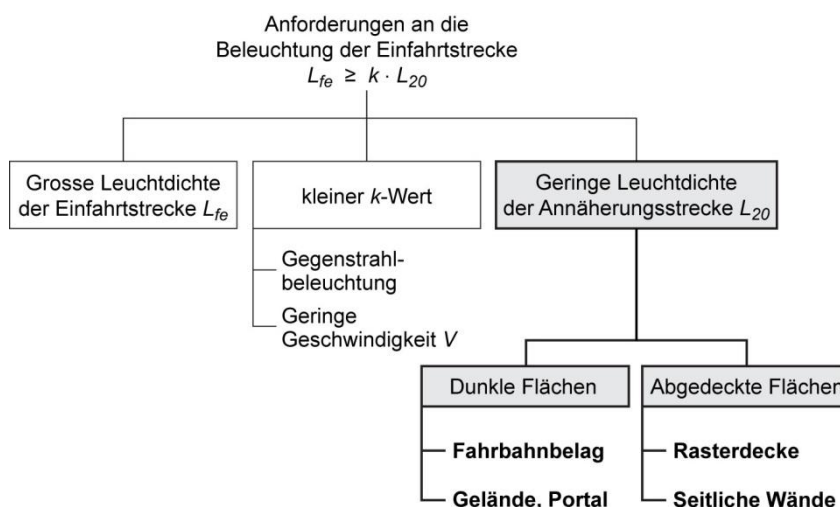


Abb. V.10 Massnahmen zur Reduktion der Leuchtdichte der Annäherungsstrecke  $L_{20}$

Grundsätzlich kann die Leuchtdichte der Annäherungsstrecke  $L_{20}$  durch die dunkle und reflexionsarme Gestaltung der im Gesichtsfeld befindlichen Flächen und/oder das Abdecken heller Flächen durch dunkle erreicht werden. Die dunkle Gestaltung von Flächen im Gesichtsfeld kann beim Fahrbelag sowie dem Tunnelportal und der Umgebung des Portals relevant sein. Mit Rasterdecken lassen sich helle Flächen über dem Portal – im Speziellen auch der Himmel – abdecken. Mit seitlichen Wänden kann das Gelände neben der Fahrbahn und neben dem Portal abgedeckt werden.

Der "Black-Hole Effekt" und die Wirkung von lichttechnischen Gestaltungsmassnahmen ist in der folgenden Abbildung synoptisch dargestellt.

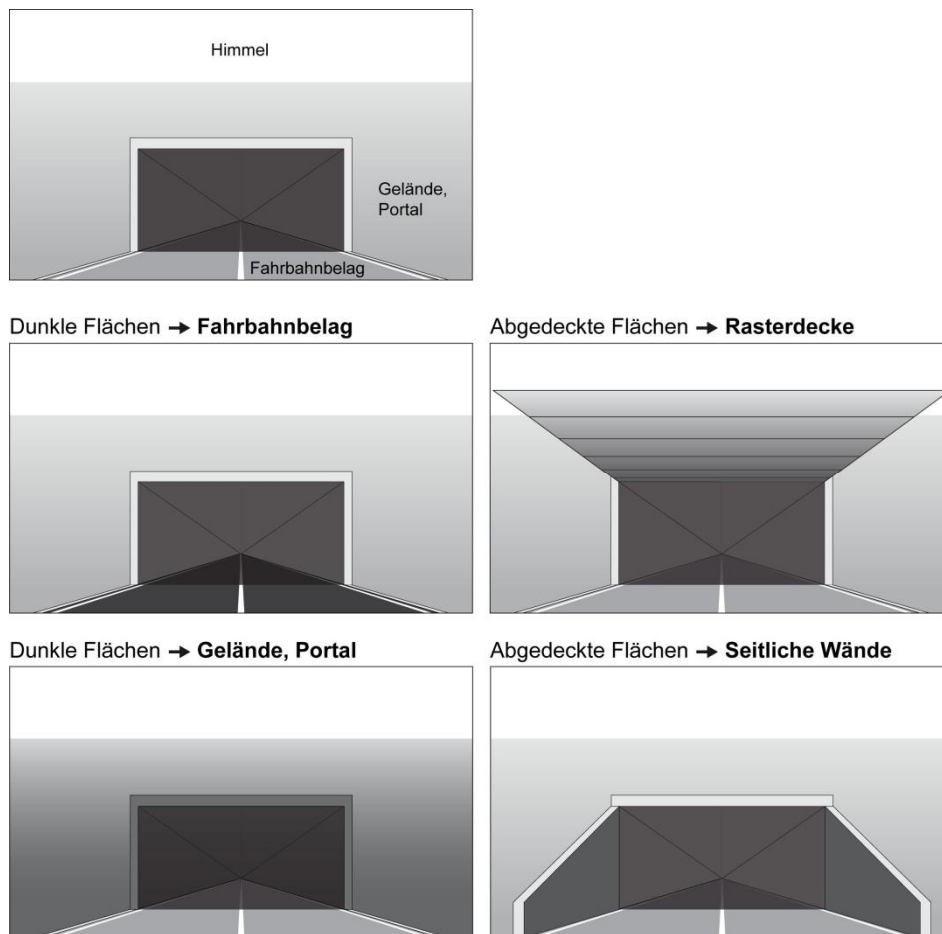


Abb. V.11 "Black-Hole Effekt" und Wirkung von lichttechnischen Gestaltungsmassnahmen auf der Annäherungsstrecke

## V.2 Fahrbelag (Deckschicht)

Allgemein werden in der Schweiz bituminöse Deckschichten auf der Strasse und im Tunnel eingebaut. Beim Einsatz von hellen Deckschichten im Tunnel ist es jedoch schon vorgekommen, dass eine helle Deckschicht in der Annäherungsstrecke eingebaut wurde. Dies ist lichttechnisch grundsätzlich ungünstig, wegen des geringen Flächenanteils, welchen der Fahrbelag im Sichtfeld des Fahrers ausmacht, jedoch kaum erheblich.

## V.3 Gelände, Portal

Im Bericht der Diplomarbeit [6] wird auf gestalterische Massnahmen im Tunnelvorbereich hingewiesen, welche einen Beitrag zur Unterstützung der Beleuchtungsverhältnisse leisten. Die Umgebung des Tunnelportals ist möglichst dunkel und reflexionsarm zu gestalten.



ten. Im Weiteren soll der Anteil des Himmels möglichst klein sein. Dies kann durch eine Gestaltung des Tunneleinfahrtsbauwerks oder die Topografie erreicht werden. Im Weiteren wird soweit möglich eine Bepflanzung vorgeschlagen.

Im Bericht Einfluss der Tunnelbeleuchtung auf die Verkehrssicherheit [18] wird erstmals darauf hingewiesen, dass die Ausführungsart des Portals einen erheblichen Einfluss auf die Verkehrssicherheit ausübt. Es wird dabei auf die "optische Enge" der Portale hingewiesen. Im Hinblick auf die Adaption der Sehorgane ist die Portalfront möglichst dunkel zu gestalten.



Abb. V.12 Hell und dunkel gestaltete Portalfront (Fotomontage)

## V.4 Rasterdecken

Eine Rasterdecke ist ein Bauwerk über der Fahrbahn, mit welchem der Leuchtdichteanteil des Himmels und damit der Leuchtdichtesprung massgeblich reduziert werden kann. Ähnlich wie Galerien, stellen Rasterdecken prinzipiell eine Verlängerung des Tunnels dar. Im Bericht der erwähnten Diplomarbeit [6] werden die Rasterdecken behandelt. Die Kosten sind je nach den örtlichen Verhältnissen sehr unterschiedlich. In lichttechnischer Hinsicht sind Rasterdecken generell günstig aber auch heikel. Dies betrifft u.a. Schnee, der die Öffnungen verschliessen kann. Zudem können Eiszapfen den Verkehr gefährden.

## V.5 Seitliche Wände

Mit Wänden seitlich der Fahrbahn, kann - wenn sie dunkel ausgeführt sind - die Leuchtdichte im Gesichtsfeld des Fahrers auf der Annäherungstrecke reduziert werden. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn mit den Wänden helle Umgebungsflächen abgedeckt werden. Der Anteil von seitlichen Wänden im Gesichtsfeld ist generell jedoch vergleichsweise klein, weshalb die Wirkung dunkler Wände auf die Gesichtsfeldleuchtdichte der Annäherungstrecke nicht überschätzt werden darf. Insbesondere der bei Tunnelportalen oftmals im Gesichtsfeld befindliche Himmel, lässt sich durch Wände mit einer üblichen Höhe kaum abdecken.

## VI Gesichtsfeld auf der Annäherungsstrecke

Die Wirksamkeit von Massnahmen der Gestaltung auf der Annäherungsstrecke ist vom Gesichtsfeld des Fahrzeuglenkers mit den im Gesichtsfeld befindlichen Flächen und ihren Leuchtdichten abhängig. Die Wirksamkeit von gestalterischen Massnahmen hängt deshalb massgeblich von den Anteilen der Flächen im Gesichtsfeld ab. Massnahmen, wie die dunkle Gestaltung oder das Abdecken von Flächen mit einem sehr geringen Flächenanteil können aus diesem Grund wenig effektiv sein. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn solche Massnahmen mit einem grossen Aufwand verbunden sind. Als Grundlage für die Beurteilung und die Evaluation von lichttechnischen Gestaltungsmassnahmen auf der Annäherungsstrecke werden diese Flächenanteile im Folgenden angegeben.

### VI.1 Definition des Gesichtsfelds

Für die Planung der Beleuchtung, speziell der Einfahrstrecke, ist die Leuchtdichte der Annäherungsstrecke  $L_{20}$  massgebend. Beim  $L_{20}$ -Wert handelt sich um die Leuchtdichte im  $20^\circ$ -Gesichtsfeld (Gesichtsfeldleuchtdichte) auf der Annäherungsstrecke AS, wobei die Annäherungsstrecke die Strecke vor dem Portal ist, welche im Abstand der Anhaltstrecke  $S_A$  beginnt ( $AS = S_A$ ).

Die Gesichtsfeldleuchtdichte, welche mittels der Summenhäufigkeitsmethode gemäss der Norm SN 640 551 [7] bestimmt wird, ist von den Leuchtdichteanteilen der Fahrbahn, des Geländes, der Umgebung und des Himmels abhängig, wobei diese Leuchtdichteanteile sehr stark von den meteorologischen Bedingungen und vom Sonnenstand abhängig sind.

Im  $20^\circ$ -Gesichtsfeld befinden sich alle Flächen, welche bei einer Augenhöhe von 1,0 m in einem Raumwinkel von  $20^\circ$  gesehen werden. In der Abb. I.13 ist der massgebende Gesichtsfeldwinkel im Abstand der Anhaltstrecke  $S_A$  zum Tunnelportal schematisch dargestellt. Im Gesichtsfeld befinden sich das Portal, der Fahrbahnbelag sowie die Umgebung, welche sowohl das Gelände neben der Fahrbahn und neben dem Portal auch den Himmel über dem Portal einschliessen kann.

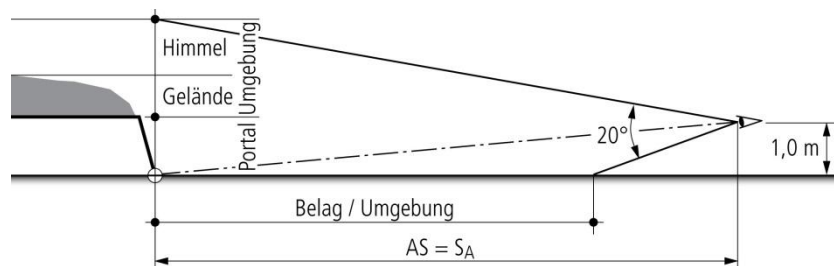


Abb. VI.13 Definition des  $20^\circ$ -Gesichtsfelds

Die folgende Abbildung zeigt eine dreidimensionale Darstellung des Gesichtsfelds und der darin befindlichen Flächen  $A$ . Die Flächenanteile sind von der Anhaltedistanz  $S_A$  abhängig. Obwohl die Darstellung nicht massstabgetreu ist, erkennt man, dass die Umgebungsflächen  $A_U$  allgemein den grössten Flächenanteil ausmachen. Die Anteile der Portalfläche  $A_P$  und der Belagsfläche  $A_B$  sind auch bei kleinen Anhaltedistanzen  $S_A$  wesentlich kleiner. Die berechneten Flächenanteile werden im nachfolgenden Abschnitt I.6.2 angegeben.

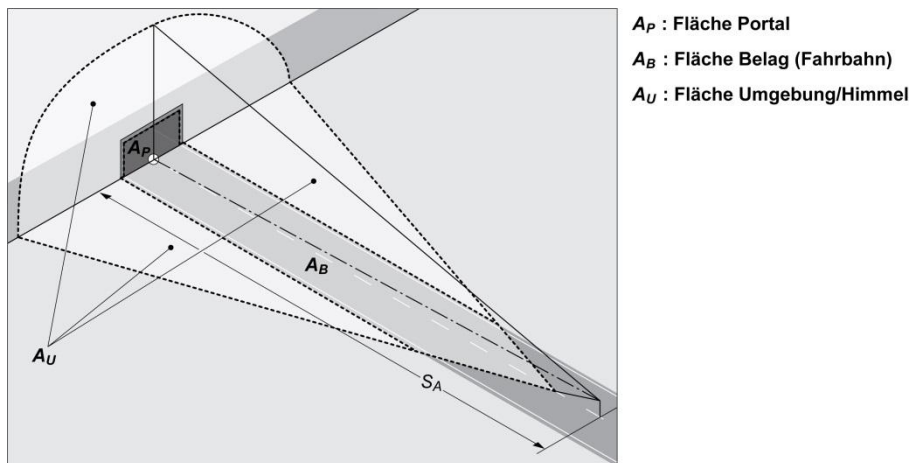


Abb. VI.14 Flächen im Gesichtsfeld

## VI.2 Flächenanteile im Gesichtsfeld

In der folgenden Abb. I.15 ist das 20°-Gesichtsfeld jeweils für die Projektionsgeschwindigkeit ( $V_P$ ) 60 km/h, 80 km/h und 100 km/h, bzw. die entsprechenden Anhaltedistanzen  $S_A$  massstäblich dargestellt. Im Weiteren sind die im Gesichtsfeld befindlichen Flächenanteile des Portals  $A_P$ , des Fahrbahnbelags  $A_B$  und der Umgebung (Gelände, Himmel)  $A_U$  angegeben. Aus der Abbildung geht hervor, dass die Umgebungsflächen  $A_U$  auch bei einer kleinen Anhaltedistanz ( $S_A = 59$  m) bzw. einer geringen Geschwindigkeit von  $V_P = 60$  km/h mit zwei Drittel der Gesamtfläche den weitaus grössten Flächenanteil ausmacht. Bei einer Geschwindigkeit von  $V_P = 100$  km/h ( $S_A = 136$  m) ist dieser Anteil mehr als 90%. Der Anteil der Fahrbahnfläche im Gesichtsfeld ist allgemein sehr gering. Daraus folgt, dass der Einfluss von dunklen Belägen auf die Leuchtdichte der Annäherungsstrecke  $L_{20}$  gering ist.

Abb. VI.15 Massstäbliche Darstellung des 20°-Gesichtsfelds bei unterschiedlichen Anhaltedistanzen  $S_A$  bzw. Projektionsgeschwindigkeiten  $V_P$  und Flächenanteile im Gesichtsfeld.

20°-Gesichtsfeld bei Anhaltedistanz $S_A$ ( $V_P$ )	Fläche A	Flächenanteil
$V_P = 60$ km/h 	Portal $A_P$	27,2 %
	Fahrbahnbelag $A_B$	6,0 %
	Umgebung $A_U$ (Gelände, Himmel)	66,8 %
	Total $A_{tot}$	100,0 %
$V_P = 80$ km/h 	Portal $A_P$	11,2 %
	Fahrbahnbelag $A_B$	3,2 %
	Umgebung $A_U$ (Gelände, Himmel)	85,6 %
	Total $A_{tot}$	100,0 %
$V_P = 100$ km/h 	Portal $A_P$	5,3 %
	Fahrbahnbelag $A_B$	1,7 %
	Umgebung $A_U$ (Gelände, Himmel)	93,0 %
	Total $A_{tot}$	100,0 %

### VI.3 Abdeckung mit seitlichen Wänden

Die Leuchtdichte  $L_{20}$  im 20°-Gesichtsfeld auf der Annäherungsstrecke lässt sich allenfalls reduzieren, wenn helle Flächen der Umgebung durch dunkle Wände seitlich vom Fahrbahnrand abgedeckt werden. Die Abdeckung heller Umgebungsflächen ist grundsätzlich deshalb sinnvoll, weil die Umgebungsflächen den weitaus grössten Flächenanteil im Gesichtsfeld ausmachen (vgl. Abb. I.16). Im Übrigen kann die Helligkeit der Umgebung in vielen Fällen kaum beeinflusst werden.

Die Flächenanteile, welche sich durch seitliche Wände abdecken lassen, wurden für vier Wandanordnungen berechnet. Die Berechnungen wurden für

- Leuchtdichte der Einfahrtstrecke  $L_{fe}$  reduziert Wände mit einer bis auf die Portalhöhe ( $H \approx 5,0$  m) ansteigenden Höhe
- halbhohle Wände mit  $H \approx 2,5$  m (Wände mit halber Portalhöhe)
- hohe Wände mit  $H \approx 5,0$  m (Wände mit halber Portalhöhe)

durchgeführt. Die den Berechnungen des Abdeckungsgrads zu Grunde gelegten Wandanordnungen sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

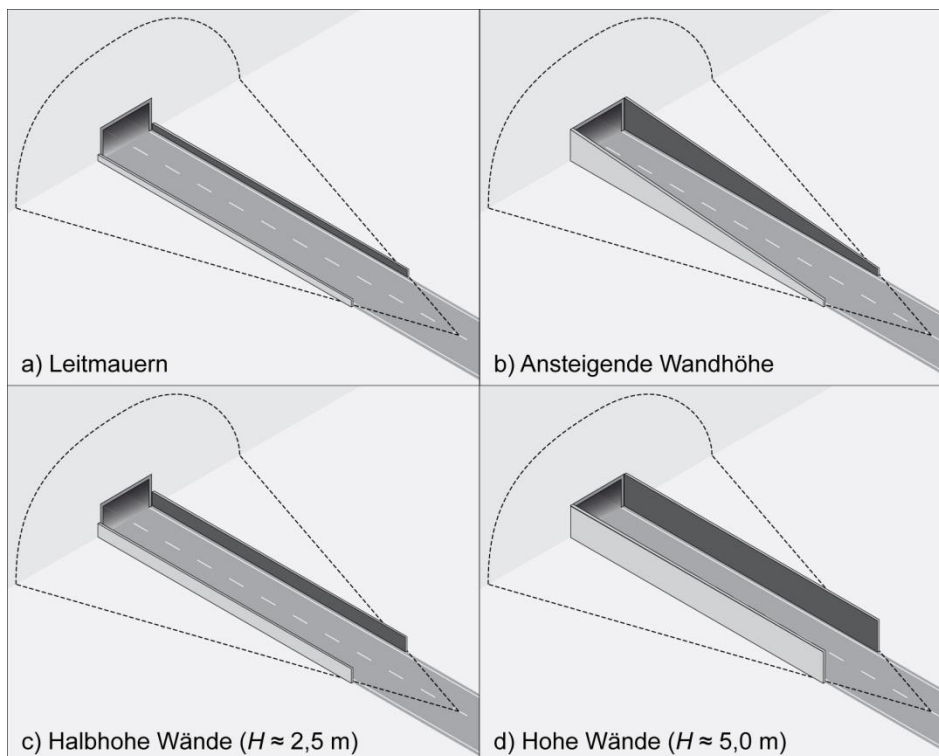


Abb. VI.16 Seitliche Wände

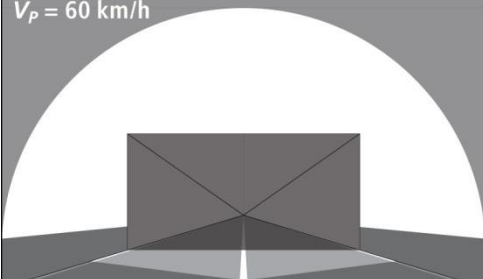
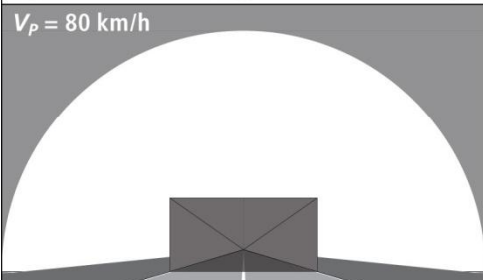
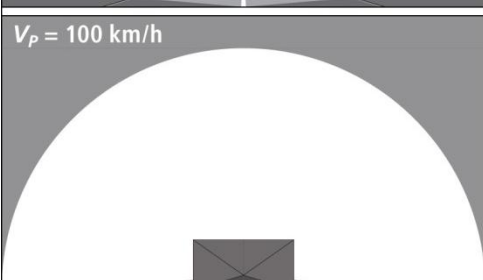
Die Berechnungen der Abdeckung wurden beispielhaft für an beiden Fahrbahnrändern angeordnete Wände und für Annäherungsstrecken mit Projektierungsgeschwindigkeiten ( $V_P$ ) von 60 km/h, 80 km/h und 100 km/h durchgeführt.

Die Gesichtsfelder und die Flächenanteile, welche mit den unterschiedlichen Wandanordnungen abgedeckt werden können, sind in den folgenden Abbildungen I.17 bis I.20 dargestellt. Die Berechnungen wurden jeweils für eine Strasse mit einer Breite von 10 m durchgeführt.

### a) Leitmauern

Mit an beiden Fahrhahnrändern angeordneten Leitmauern ( $H \approx 1,1$  m) lässt sich je nach Anhaltedistanz  $S_A$  ( $V_p$ ) eine Fläche von ca. 3% - 6% im Gesichtsfeld abdecken. Bei der abgedeckten Fläche handelt es sich fast ausschliesslich um die (horizontalen) Umgebungflächen neben der Fahrbahn. Aufgrund des geringen Wandanteils  $A_W$  im Gesichtsfeld, muss der Einfluss von dunkel gestalteten Leitmauern auf die Leuchtdichte der An-näherungsstrecke  $L_{20}$  als sehr gering beurteilt werden.

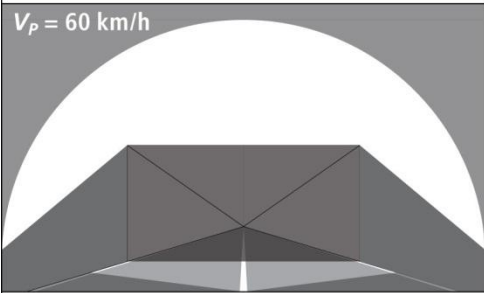
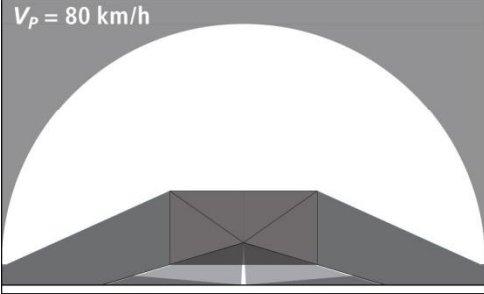
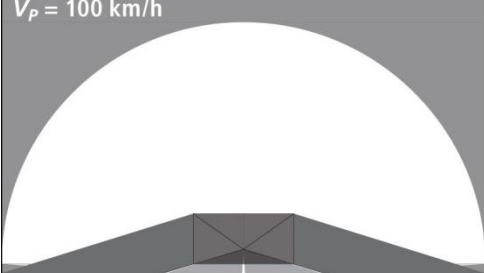
Abb. VI.17 Gesichtsfeld und Abdeckung durch Leitmauern

20°-Gesichtsfeld bei Anhaltedistanz $S_A$ ( $V_p$ )	Fläche $A$		Flächenanteil
$V_p = 60$ km/h 	Portal	$A_P$	27,2 %
	Fahrbahnbelag	$A_B$	6,0 %
	Umgebung	$A_U$	61,0 %
	<b>Wände</b>	<b><math>A_W</math></b>	<b>5,8 %</b>
	Total	$A_{tot}$	100,0 %
$V_p = 80$ km/h 	Portal	$A_P$	11,2 %
	Fahrbahnbelag	$A_B$	3,2 %
	Umgebung	$A_U$	81,3 %
	<b>Wände</b>	<b><math>A_W</math></b>	<b>4,3 %</b>
	Total	$A_{tot}$	100,0 %
$V_p = 100$ km/h 	Portal	$A_P$	5,3 %
	Fahrbahnbelag	$A_B$	1,7 %
	Umgebung	$A_U$	90,4 %
	<b>Wände</b>	<b><math>A_W</math></b>	<b>2,6 %</b>
	Total	$A_{tot}$	100,0 %

### b) Wände mit ansteigender Höhe

Mit an beiden Fahrbahnrändern angeordneten Wänden, welche mit einer ansteigenden Höhe so gestaltet sind, dass sie beim Tunnelportal die Portalhöhe  $H \approx 5,0$  m aufweisen, kann je nach Anhaltedistanz  $S_A$  ( $V_P$ ) eine Fläche von ca. 10% - 18% im Gesichtsfeld abgedeckt werden. Neben den (horizontalen) Umgebungsflächen neben der Fahrbahn, können mit so gestalteten Wänden die (vertikalen) Flächen direkt neben dem Tunnelportal abgedeckt werden. Aufgrund des Wandanteils  $A_W$  im Gesichtsfeld, ist der Einfluss von dunkel gestalteten Wänden mit ansteigender Höhe auf die Leuchtdichte der Annäherungsstrecke  $L_{20}$  begrenzt. Im Speziellen bei Autobahnen, mit einer Geschwindigkeit  $V_P = 100$  km/h und einer dementsprechend grossen Anhaltedistanz ist der Wandanteil  $A_W$  und damit auch der abgedeckte Flächenanteil nicht sehr gross ( $A_W \approx 10\%$ ). Die Anrampfung von seitlich der Fahrbahn angeordneten Wänden wird jedoch insbesondere auch in Bezug auf die optische Linienführung als günstig beurteilt (vgl. I.3).

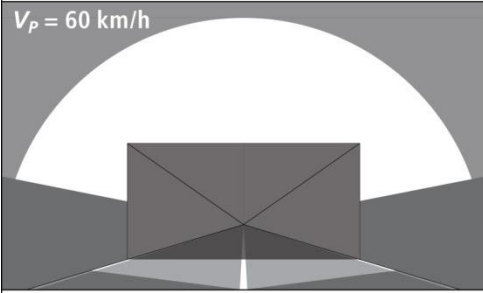
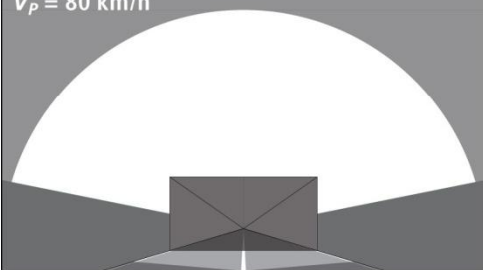
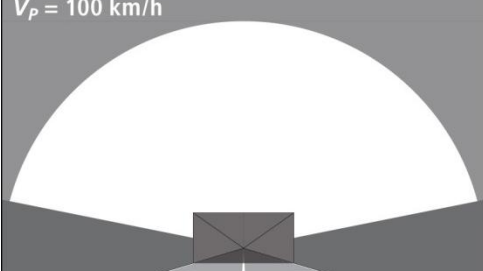
Abb. VI.18 Gesichtsfeld und Abdeckung durch Wände mit ansteigender Höhe

20°-Gesichtsfeld bei Anhaltedistanz $S_A$ ( $V_P$ )	Fläche $A$		Flächenanteil
$V_P = 60$ km/h 	Portal	$A_P$	27,2 %
	Fahrbahnbelag	$A_B$	6,0 %
	Umgebung	$A_U$	49,2 %
	<b>Wände</b>	<b><math>A_W</math></b>	<b>17,6 %</b>
	Total	$A_{tot}$	100,0 %
$V_P = 80$ km/h 	Portal	$A_P$	11,2 %
	Fahrbahnbelag	$A_B$	3,2 %
	Umgebung	$A_U$	71,2 %
	<b>Wände</b>	<b><math>A_W</math></b>	<b>14,4 %</b>
	Total	$A_{tot}$	100,0 %
$V_P = 100$ km/h 	Portal	$A_P$	5,3 %
	Fahrbahnbelag	$A_B$	1,7 %
	Umgebung	$A_U$	82,6 %
	<b>Wände</b>	<b><math>A_W</math></b>	<b>10,4 %</b>
	Total	$A_{tot}$	100,0 %

### c) Halbhohe Wände

Mit Wänden, welche etwa die halbe Portalhöhe ( $H \approx 2,5$  m) aufweisen, lassen sich ungefähr 20% der Umgebungsflächen im Gesichtsfeld abdecken, wenn beidseitig der Fahrbahn Wände angeordnet sind. Dieser Abdeckungsgrad ist nur unwesentlich von der Anhaltedistanz  $S_A$  ( $V_p$ ) abhängig. Im Vergleich mit ansteigenden Wänden (vgl. Abb. I.18) ist insbesondere bei einer Geschwindigkeit  $V_p = 100$  km/h und einer dementsprechend grossen Anhaltedistanz der Wandanteil  $A_W$  im Gesichtsfeld jedoch wesentlich grösser ( $A_W \approx 20\%$ ). Die optische Linienführung sowie der Kontrast zwischen dem Tunnelportal und der Portalumgebung, müssen demgegenüber als ungünstiger beurteilt werden.

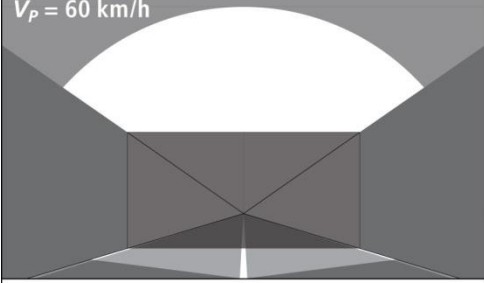
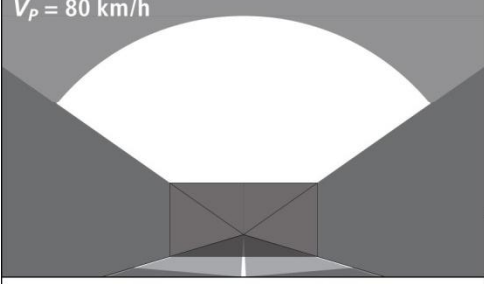
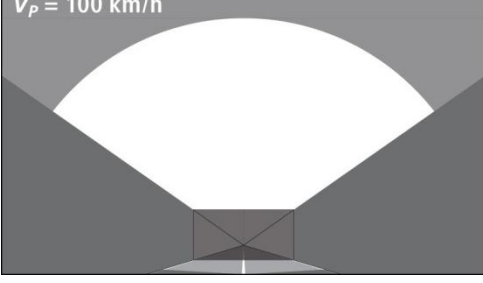
Abb. VI.19 Gesichtsfeld und Abdeckung durch halbhohe Wände ( $H \approx 2,5$  m)

20°-Gesichtsfeld bei Anhaltedistanz $S_A$ ( $V_p$ )	Fläche $A$		Flächenanteil
$V_p = 60$ km/h 	Portal	$A_P$	27,2 %
	Fahrbahnbelag	$A_B$	6,0 %
	Umgebung	$A_U$	48,4 %
	<b>Wände</b>	<b><math>A_W</math></b>	<b>18,4 %</b>
	Total	$A_{tot}$	100,0 %
$V_p = 80$ km/h 	Portal	$A_P$	11,2 %
	Fahrbahnbelag	$A_B$	3,2 %
	Umgebung	$A_U$	65,5 %
	<b>Wände</b>	<b><math>A_W</math></b>	<b>20,1 %</b>
	Total	$A_{tot}$	100,0 %
$V_p = 100$ km/h 	Portal	$A_P$	5,3 %
	Fahrbahnbelag	$A_B$	1,7 %
	Umgebung	$A_U$	73,6 %
	<b>Wände</b>	<b><math>A_W</math></b>	<b>19,4 %</b>
	Total	$A_{tot}$	100,0 %

**d) Hohe Wände**

Werden seitlich der Fahrbahn hohe Wände angeordnet, lassen sich damit vergleichsweise grosse Anteile der Umgebung abdecken. In der folgenden Abbildung sind die Gesichtsfelder und die abgedeckten Flächenanteile für Wände mit Portalhöhe ( $H \approx 5,0$  m) dargestellt. Die Anordnung von hohen Wänden ist die einzige Konfiguration, welche es allenfalls ermöglicht, auch einen kleinen Teil des Himmels abzudecken. Der Bau von Wänden mit grosser Höhe ist grundsätzlich jedoch sehr aufwändig und nur aus lichttechnischen Gründen kaum zu rechtfertigen.

Abb. VI.20 Beteiligte Organisationen und deren Beziehungen.

20°-Gesichtsfeld bei Anhaltedistanz $S_A$ ( $V_P$ )	Fläche A		Flächenanteil
$V_P = 60$ km/h 	Portal	$A_P$	27,2 %
	Fahrbahnbelag	$A_B$	6,0 %
	Umgebung	$A_U$	33,8 %
	<b>Wände</b>	<b><math>A_W</math></b>	<b>33,0 %</b>
	Total	$A_{tot}$	100,0 %
$V_P = 80$ km/h 	Portal	$A_P$	11,2 %
	Fahrbahnbelag	$A_B$	3,2 %
	Umgebung	$A_U$	45,2 %
	<b>Wände</b>	<b><math>A_W</math></b>	<b>40,4 %</b>
	Total	$A_{tot}$	100,0 %
$V_P = 100$ km/h 	Portal	$A_P$	5,3 %
	Fahrbahnbelag	$A_B$	1,7 %
	Umgebung	$A_U$	50,9 %
	<b>Wände</b>	<b><math>A_W</math></b>	<b>42,1 %</b>
	Total	$A_{tot}$	100,0 %

## VI.4 Zusammenfassung

Massnahmen zur lichttechnischen Gestaltung der Annäherungsstrecke haben grundsätzlich eine Reduktion der Leuchtdichte im Gesichtsfeld des Fahrzeuglenkers (20°-Gesichtsfeldleuchtdichte  $L_{20}$ ) zum Ziel. Damit lässt sich der "Black-Hole Effekt" vermindern und die Einfahrtsbeleuchtung bzw. die Leuchtdichte der Einfahrtsstrecke  $L_{fe}$  kann reduziert werden.

Da die Leuchtdichte auf der Annäherungsstrecke  $L_{20}$  von den Grössen und den Helligkeiten bzw. den Leuchtdichten der Flächen im Gesichtsfeld abhängt, verfolgt die lichttechnische Gestaltung auf der Annäherungsstrecke generell die folgenden Strategien:

- dunkle Gestaltung der Flächen im Gesichtsfeld
- Abdeckung von hellen Flächen im Gesichtsfeld

Da die Fahrbahn im 20°-Gesichtsfeld nur einen sehr geringen Anteil ausmacht, kann auch der Einsatz dunkler Fahrbahnbeläge nur als beschränkt wirksam beurteilt werden. Wesentlich effektiver ist die dunkle Gestaltung des Tunnelportals und dessen Umgebung.



Bei einer Projektierungsgeschwindigkeit  $V_P = 100$  km/h (Anhaltedistanz  $S_A = 136$  m) ist die Portalumgebung nach Möglichkeit in einem Umkreis von knapp 25 m - beispielsweise mit Bepflanzungen - dunkel zu gestalten.

In Bezug auf Massnahmen, welche das Abdecken heller Flächen im Gesichtsfeld zum Ziel haben, sind Rasterdecken lichttechnisch als äusserst effektiv zu beurteilen. Dies vor allem deshalb, weil damit der oftmals sehr helle Gesichtsfeldbereich oberhalb des Tunnelportals und im Speziellen auch der Himmel abgedeckt werden kann. Die Wirksamkeit von dunklen Wänden neben der Fahrbahn ist demgegenüber vergleichsweise beschränkt, da der Gesichtsfeldanteil der Wände eher gering ist. Mit dem Einsatz dunkler Wände mit einer ansteigenden Höhe zum Portal kann der "Black-Hole Effekt" (Kontrast) jedoch vermindert und die optische Führung verbessert werden.

## VII Einfahr- und Übergangsstrecke

### VII.1 Übersicht

Die Anforderungen an die Beleuchtung sind bei der Einfahr- und der Übergangsstrecke im Wesentlichen identisch. Die Beleuchtung ist bei beiden Strecken auf die Verhütung eines Anpralls eines Fahrzeugs an ein Hindernis ausgerichtet. Basierend auf aktuellen Untersuchungen in den Bereichen Tunnelsicherheit und Verkehrspsychologie stellt sich die Frage, ob die Zielsetzung die Verhinderung einer Kollision mit einem Hindernis ist oder eine Optimierung der optischen Linienführung im Hinblick auf eine Verminderung von Spurüberschreitungen des Verkehrs. Mit einer optimierten optischen Linienführung kann diesbezüglich viel erreicht werden. Mit einem Wechsel des Ziels kann das Beleuchtungsniveau in der Einfahr- und der Übergangsstrecke auf einen Bruchteil herabgesetzt werden.

### VII.2 Kollisionen mit Objekten

Im Forschungsbericht Einfluss der Tunnelbeleuchtung auf die Verkehrssicherheit [18] findet sich ein Hinweis, dass die Anforderungen an die Beleuchtung nicht derjenigen beim Einsatz von Abblendlicht auf Autobahnen entspricht. Dazu ist festzustellen, dass die Verkehrsgeschwindigkeit auf Autobahnen grösser ist als in Tunneln. Es muss dabei berücksichtigt werden, dass die Sichtweite bei Abblendlicht je nach Helligkeit und Grösse des Hindernisses zwischen 1 und 10 liegt. Es ist damit kaum möglich, die Beleuchtung auf die Verhinderung einer Kollision mit einem Objekt abzustimmen.

Zu Kollisionen mit Objekten im Tunnel ist weiterhin festzustellen, dass es kaum je wie auf der Strasse Personen betrifft. So wurden beispielsweise im Forschungsbericht Sichtabstände bei Fahrten in der Dunkelheit [21] ausschliesslich Versuche mit Fussgänger-Dummies sowie Mitarbeitern der Forschungsstelle beschrieben. Grundsätzlich sind Kollisionen von Fahrzeugen mit Objekten im Tunnel nicht zu erwarten. Angaben mit einer feinen Aufgliederung unterschiedlicher Unfalltypen fehlen weitgehend. Bekannt ist eine Zusammenstellung im Forschungsbericht Einfluss der Tunnelbeleuchtung auf die Verkehrssicherheit [18]. Diese enthält die folgenden Angaben mit Bezug zu Unfällen mit Personwagen:

• Auffahren auf Objekt	37
• Auffahren auf Fahrzeuge	934
• Unfälle gesamt	1458

Die Zusammenstellung zeigt generell, dass der Anteil der Unfallart Auffahren auf Objekt eher gering ist. Es ist anzunehmen, dass der Anteil in Tunneln noch geringer ist, als beim gesamten Strassenverkehr. Die Daten sind jedoch insofern ungenau, als dass der Bericht im Jahre 1986 publiziert wurde.

Auf Hochleistungsstrassen sind Kollisionen mit festen Objekten selten. Dies gilt auch für Strecken im Tunnel. Die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls und insbesondere eines mit schwerwiegenden Folgen ist gering. Etwas grösser ist das Risiko bei Tunnelstrecken in Hauptverkehrsstrassen. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Geschwindigkeit auf 80 km/h beschränkt ist.

### VII.3 Optische Linienführung

#### Grundlagen

Der Bereich optische Linienführung wird basierend auf Erkenntnissen der Verkehrspsychologie behandelt. Im Vordergrund steht dabei die Spurhaltung, die durch eine wirksame optische Linienführung am ehesten gewährleistet ist. Sie ist insbesondere in der Einfahr- und der Übergangsstrecke das massgebende Element zur Verhütung einer Verun-

sicherung der Fahrer.

### **Übergang von der Annäherungs- zur Einfahrstrecke**

Die Ziffer behandelt die Problematik der optischen Linienführung im Übergang von der Annäherungs- zur Einfahrstrecke. Eine perfektionierte Führung verhütet für den Verkehr störende Bremsmanöver einzelner Fahrer. Die optische Führung muss bezüglich der Ausführung identisch mit derjenigen in der Einfahrstrecke sein.

### **Ziel der optischen Linienführung**

Das primäre Ziel einer optimierten optischen Linienführung ist eine Erhöhung der Verkehrssicherheit. Ein weiteres wichtiges Ziel ist jedoch auch die Möglichkeit zur Herabsetzung der Beleuchtung in der Einfahr- und der Übergangsstrecke. Dies betrifft sowohl die Vereinfachung der Ausstattung als auch den Energieeinsatz.

### **Anforderung**

Die Informationsbeschaffung der Lenker zur Verhütung von Spurüberschreitungen erfolgt mit dem zentralen Sehen (foveales Sehen, Blickfixierung) auf die optische Linienführung. Dazu wird in der Einfahrt und in der Übergangsstrecke eine Leiteinrichtung benötigt, die auch ohne eine (beschränkte) Adaption der Sehorgane wahrgenommen wird.

### **Ausführung**

Es sind mehrere Ausführungen zu beurteilen. Nachfolgend werden zwei Varianten beschrieben und zur Prüfung vorgeschlagen:

- Längsmarkierung beziehungsweise doppelte Sicherheitslinie gemäss der Norm SN 640 850a, Markierungen, Ausgestaltung und Anwendungsbereiche [87] mit auf die Markierung fokussierte Beleuchtung.
- Längsmarkierung wie oben mit Unterflurleuchten gemäss der Norm SN 640 853, Markierungen, Unterflurleuchten [8] mit einem Abstand von 8 bis 15 m.
- Erprobte Systeme von Unterflurleuchten stehen heute zur Verfügung. Sie sind insbesondere auf Mittelstreifen vor Tunneln eingesetzt worden.
- Lichtbänder am Fahrstreifenrand.

Lichtbänder sind eine noch wirksamere optische Linienführung als Unterflurleuchten. Eine solche könnte mit am Fahrspurrand eingelassenen Lichtbändern geschaffen werden. Der Blick "springt" beim Fahren auf dem Band von einem Punkt zum nächsten. Dies ist auf einer Linie wirksamer als bei einer Fixation auf einen Leuchtpunkt. Am Fahrspurrand eingelassene Lichtbänder sind noch nicht entwickelt worden oder sind mindestens noch nicht bekannt. Es wäre auch zu prüfen, ob kostengünstigere Lichtbänder auf den Banketten eine Alternative wären.

## **VII.4 Tunnelverkleidung und -anstriche**

Die Optimierung der Tunnelbeleuchtung mit hellen Tunnelverkleidungen und Anstrichen ist bei der Einfahr- und der Übergangsstrecke grundsätzlich die Gleiche wie im Fall der Innenstrecke. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Optimierung im Fall der Tunnelverkleidung und der -anstriche sehr viel wirksamer ist als bei der Innenstrecke. Die Optimierung wird unter Kap. I.8 bei der Innenstrecke behandelt.

## VIII Innenstrecke

### Übersicht

Das Durchfahren der Innenstrecke wird durch den Flickereffekt beeinflusst. Der Flickereffekt ist direkt abhängig von der Frequenz und der Modulationstiefe. Die Modulationstiefe ist wiederum direkt abhängig von der Helligkeit des Hintergrundes. Dies bedeutet, dass der Helligkeitseindruck bzw. das Reflexionsverhalten der verwendeten Materialien bzw. der Leuchten klar zur Verbesserung der Sicherheit beitragen.

### Leuchtdichte der Fahrbahn

Der Forschungsbericht des österreichischen Bundesministeriums für Bauten und Technik [18] hat sich basierend auf Versuchen mit den Beziehungen zwischen der Leuchtdichte und der Verkehrssicherheit befasst. Eine Zusammenfassung der Erkenntnisse findet sich im Bericht des bfu, Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln [17]. Nachfolgend wird der betreffende Abschnitt zitiert.

*Die detaillierte österreichische Untersuchung von Hopferwieser & Lukaschek konnte im Bereich der in der Praxis üblichen Leuchtdichteunterschiede keine Abhängigkeiten zur Unfallbelastung feststellen. Für Durchfahrtsbeleuchtungen erscheinen bei normalen Verkehrsbedingungen Absenkungen der Leuchtdichte bis in den Bereich von 1 bis 1,5 cd/m<sup>2</sup> ohne Sicherheitseinbusse möglich. Nationale und internationale Fachgremien gehen heute allerdings von einem Bereich von 0,5 bis 0,6 cd/m<sup>2</sup> aus. Die erforderlichen Leuchtdichteniveaus werden in Abhängigkeit diverser Parameter wie Geschwindigkeit, Verkehrsmenge etc. bestimmt.*

### Optische Linienführung

Die optische Linienführung hat auch in der Innenstrecke eine grosse Bedeutung. Sie bedingt kein so hohes Niveau. Es ist jedoch, wie in der Einfahr- und der Übergangsstrecke, eine wirksame Markierung in der Fahrbahnmitte notwendig. Der Einsatz von Unterflurleuchten kann jedoch notwendig sein.

Helle Deckschichten der Fahrbahn

## VIII.1 Tunnelwände

### Wandgestaltung

In der Diplomarbeit der Fachhochschule Aachen [6] finden sich umfassende Angaben zur Wandgestaltung. Detaillierte Informationen zur Beleuchtung der Wände und das von der Wand auf die Fahrbahn fallende Licht findet sich im Forschungsbericht Evaluation von Tunnelreinigungsmethoden [12]. Die Auffassungen hinsichtlich der Helligkeit der Tunnelwände sind unterschiedlich. Es wird angenommen, dass ein tiefes Beleuchtungsniveau klaustrophobische Zustände bei den Insassen von Fahrzeugen bewirken können. Wissenschaftliche Untersuchungen dazu sind nicht bekannt. Im Weiteren ist festzustellen, dass zahlreiche Tunnel in der Schweiz weder einen Anstrich, noch eine Tunnelverkleidung aufweisen. Ernsthafte Reklamationen sind nicht bekannt. Es ist jedoch eine Tatsache, dass helle Tunnelwände sehr positiv von den Verkehrsteilnehmern beurteilt wurden. Helle Wände sind jedoch als Komfortelement zu beurteilen.

Helle Tunnelwände leisten je nach Reflexionsgrad einen allgemein eher geringen Beitrag zur Fahrbahnbeleuchtung. Angaben dazu finden sich auch im Kap. I.9 Tunnelreinigung.

### Aufhellung mit hellem Beton

Es besteht nur eine beschränkte Praxis hinsichtlich aufgehellten Betons. In der eingangs erwähnten Diplomarbeit wird darauf hingewiesen, dass heller Beton in kurzer Zeit abdunkelt und die Reflexion herabgesetzt wird. Demgegenüber hat sich bei Reinigungstests gezeigt, dass ein etwas rauer Beton mit Hochdruckwasserstrahlen ohne Tenside gereinigt werden kann. Der Einsatz von hellem Beton wird nicht empfohlen. In der Schweiz

sind keine Tunnelwände mit aufgehelltem Beton bekannt.

### **Tunnelverkleidungen**

Ausführungen von Verkleidungen sind keramische Platten, Stahlblech- und Aluminium-Verbund sowie Faserzementplatten. In der Schweiz sind Tunnelverkleidungen wegen der Kosten kaum verbreitet. Spezielle Tunnelverkleidungen werden im Portalbereich aus Gründen des Lärmschutzes eingesetzt.

Anstriche werden nicht nur aus lichttechnischen Gründen, sondern auch zum Schutz des Betons vor Einwirkungen von Streusalz und im Hinblick auf die Karbonatisierung angebracht.

## IX Tunnelreinigung

### IX.1 Übersicht

Die Reinigung von Tunneln steht im Schnittbereich der Beleuchtungstechnik, sowie von ökonomischen und ökologischen Aspekten. Im Hinblick auf kurze Betriebsunterbrüche, die Kosten für die Tunnelreinigung und die Energiekosten für die Tunnelbeleuchtung muss die Reinigung optimiert werden.

Die folgende Grafik zeigt die Zusammenhänge der Verschmutzung der Tunnelleuchten und der Tunnelwände, der daraus folgenden Notwendigkeit einer verstärkten Tunnelbeleuchtung und der Leuchten- und Wandreinigung.

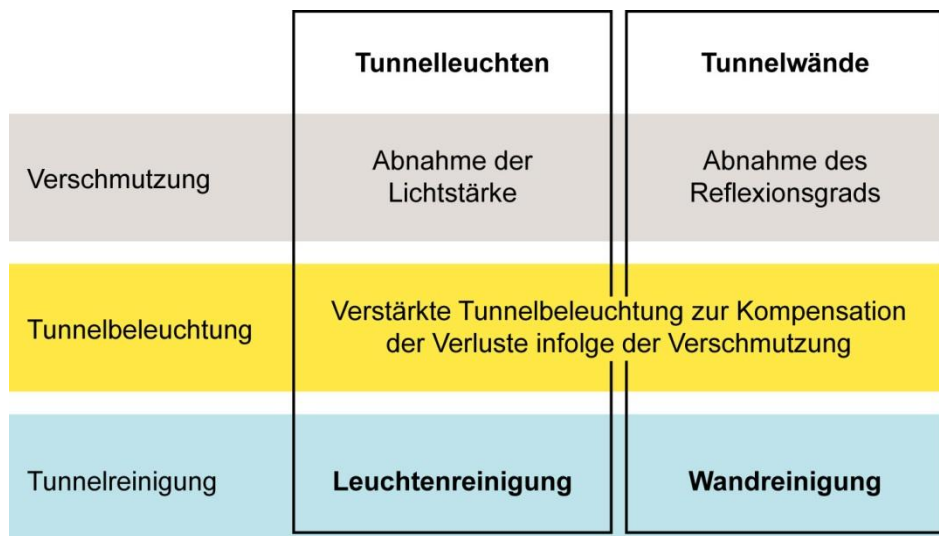


Abb. IX.21 Zusammenhang Tunnelreinigung und Tunnelbeleuchtung

### IX.2 Einfluss der Verschmutzung auf die Tunnelbeleuchtung

Mit zunehmender Verschmutzung der Tunnelleuchten und der Tunnelwände nimmt die Fahrbahnleuchtdichte bei gleich bleibender Tunnelbeleuchtung ab. Im Rahmen des VSS Forschungsauftrags 18/90 [12] wurden diese Verhältnisse mit umfangreichen Versuchen ermittelt. In diesem Zusammenhang wurden im Gubristunnel zahlreiche Messungen durchgeführt. Diese zeigten, dass der verschmutzungsbedingte Abfall der Fahrbahnleuchtdichte ein Jahr nach der Tunnelreinigung ca. 40% betrug. Um diese Verlust zu kompensieren, muss die Tunnelbeleuchtung verstärkt werden, was mit einem erhöhten Energieeinsatz verbunden ist. Die Länge der Reinigungsintervalle ist deshalb so zu optimieren, dass sich die durch die Tunnelreinigung entstehenden Kosten durch den Mehrverbrauch an elektrischer Energie der Tunnelbeleuchtung rechtfertigen lassen.

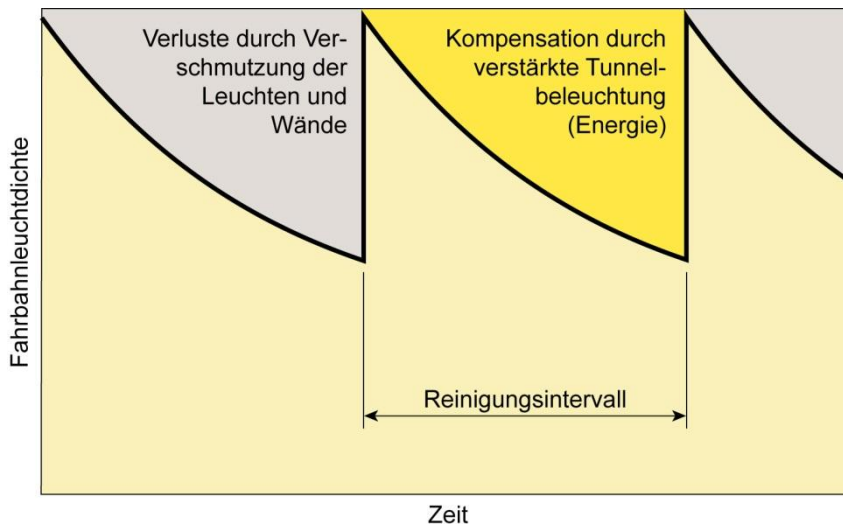


Abb. IX.22 Zeitlicher Verlauf der Fahrbahnleuchtdichte (qualitative Darstellung)

### IX.2.1 Verschmutzung der Tunnelleuchten

Bei den in den Jahren 1991 bis 1993 im Gubristtunnel durchgeführten Feldversuchen wurde der Einfluss der Leuchtenreinigung gemessen [12]. Die Lichtstärke der Leuchten sowie die Leuchtdichten der Tunnelwände wurden bei sieben Reinigungen, jeweils vor und nach der Leuchtenreinigung gemessen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Der Abfall der Leuchtenhelligkeit infolge der Verschmutzung verläuft dabei proportional zur Zeit. Messtechnisch begründet und aufgrund anderer Einflussfaktoren, weist er aber einen grossen Streubereich auf. Im Mittel hat die Leuchtenhelligkeit 100 Tage nach der Reinigung um durchschnittlich 10% abgenommen.

Im Gotthardtunnel durchgeführte Messungen ergaben wesentlich höhere Verluste durch die Verschmutzung (ca. 20% pro 100 Tage). Da in diesem Tunnel nur eine Messung durchgeführt wurde, muss dieses Ergebnis jedoch als begrenzt relevant beurteilt werden. Der grössere Lichtstärkenabfall könnte durch die flachen Glasabdeckungen der Leuchten und eine daraus resultierende, vermehrte Totalreflexion begründet sein.

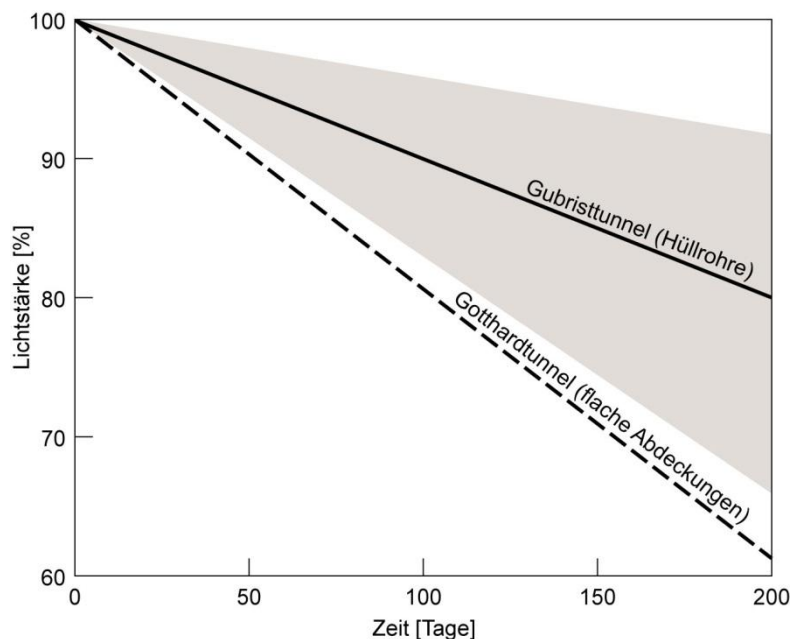


Abb. IX.23 Abnahme der Lichtstärke infolge Verschmutzung der Leuchten

## IX.2.2 Verschmutzung der Tunnelwände

Die durch die Verschmutzung bedingte Abnahme des Reflexionsgrades der Tunnelwände wurde bei den erwähnten, im Gubristunnel durchgeführten Feldversuchen ebenfalls gemessen [12]. Dabei wurde der Reflexionsgrad der mit einem Epoxidharzanstrich beschichteten Tunnelwand während zwei Jahren in regelmässigen Abständen gemessen, ohne dass die Tunnelwand zwischenzeitlich gereinigt wurde. Die Resultate dieser Messungen, welche in der folgenden Abbildung dargestellt sind, zeigen einen anfänglich grossen, sich allmählich verlangsamen den Abfall des Reflexionsgrades. Nach etwa 200 Tagen war der Reflexionsgrad nur noch halb so gross, wie die Anfangswerte der frisch gereinigten Wand.

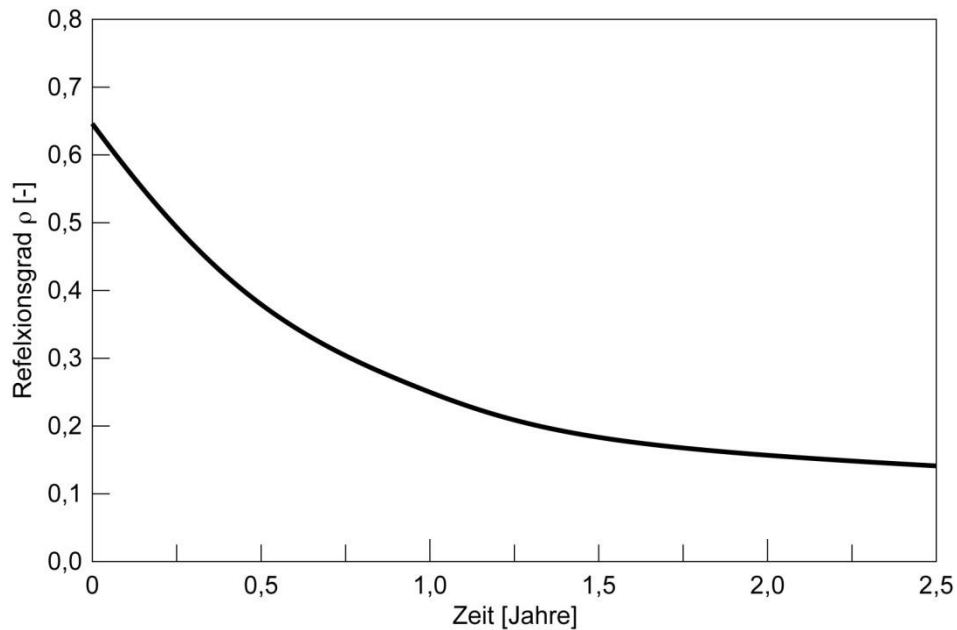


Abb. IX.24 Abnahme des Reflexionsgrades der Tunnelwände infolge der Verschmutzung

## IX.3 Wirtschaftliche Reinigungsintervalle

Auf der Grundlage der erwähnten Messungen wurden in der Forschungsarbeit [12] Wirtschaftlichkeitsberechnungen durchgeführt, bei denen die Kosten für die Tunnelreinigung den Energiekosten für die Tunnelbeleuchtung gegenübergestellt wurden. Der optimale Zeitpunkt für die Tunnelreinigung ist dann erreicht, wenn diese Kosten gleich gross sind. Dies ist bei einem Reinigungsintervall von ungefähr einem Jahr der Fall.



## X L20 Messungen

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über alle in der Schweiz bekannten L20 Messungen.

Abb. X.25 L20 Messungen

### Querschnitt durch Schweizertunnels vom 90%-Wert von L20 in cd/m<sup>2</sup>

Portal	Nord	Süd	West	Ost	Mittel
	2400	1700	3700	3700	
	2500	2700	2500	2500	
	3200	2400	2500	2500	
	3100	2900	4400	2000	
	2000	2000	2000	1700	
	2200	2200	2700	3600	
	2900	2100	2500	2700	
	2600	2700	3800	2700	
	2100	2900	3300	2500	
	3300	2300	2500	5000	
	3600	2900	3900	2300	
	2900	3200	5100	2700	
	4200	2700	2900	3000	
	3600	2300	3600	3700	
	3100	2200	1900	2800	
	2900	3100	3300	2700	
	3100	3000	4300	2500	
	2700	2300	2500	1800	
	3300	2400	3000	2300	
	4400	2000	3300	2400	
	4600	2000	2400	2200	
	2900	2000	2100	2000	
	4400	2200	2100	2400	
	4400	2100	3100	4500	
	2400	2600	3300	3600	
	3900		3900	2400	
	2600		2900	2200	
	2200		2500	2700	
	3300		4100	2300	
			2600	2600	
			2400	4800	
			2600	2600	
			2100	2800	
			2600		
			2500		
<b>max-Wert</b>	<b>4600</b>	<b>3200</b>	<b>5100</b>	<b>5000</b>	
<b>min-Wert</b>	<b>2000</b>	<b>1700</b>	<b>1900</b>	<b>1700</b>	
<b>mittel-Wert</b>	<b>3131</b>	<b>2436</b>	<b>2997</b>	<b>2794</b>	<b>2840</b>
<b>Streuung</b>	<b>737</b>	<b>399</b>	<b>764</b>	<b>790</b>	
<b>%-Wert(S)</b>	<b>24</b>	<b>16</b>	<b>26</b>	<b>28</b>	

## XI Fotodokumentation Tunnelbeleuchtung



Abb. XI.26 Ermittlung der Reflexion der Fahrbahn, Westumfahrung Zürich



Abb. XI.27 Messapparatur zur Bestimmung der Reflexion der Fahrbahn



Abb. XI.28 Randmarkierungen, Westumfahrung Zürich



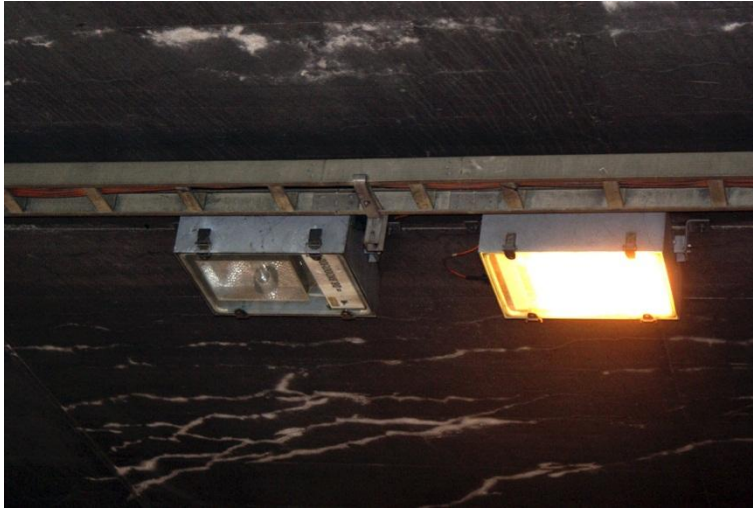
*Abb. XI.29 Linienbeleuchtung, Westumfahrung Zürich*



*Abb. XI.30 Linienbeleuchtung in Tunnel mit Gegenverkehr*



*Abb. XI.31 Punktbeleuchtung in Tunnel mit Gegenverkehr*



*Abb. XI.32 Leuchten in der Einfahrstrecke, Tunnel Eggfue*



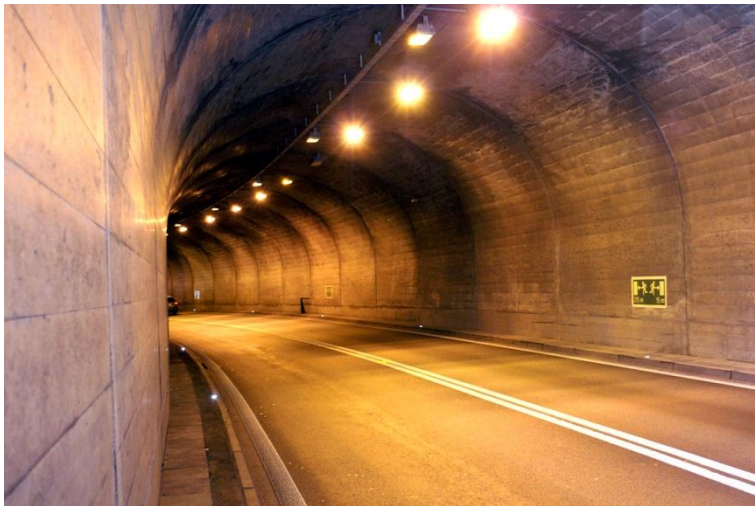
*Abb. XI.33 Seitliche Punktleuchten, Aarau*



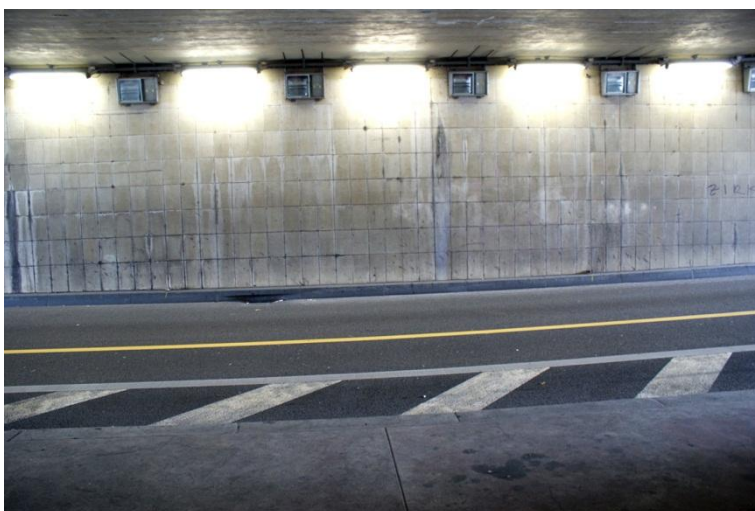
*Abb. XI.34 Dunkles Tunnelportal, Aarau*



*Abb. XI.35 Ausfahrstrecke mit Tunnelwand- und Deckenverkleidung*



*Abb. XI.36 Gegenstrahlbeleuchtung, Axenstrasse*



*Abb. XI.37 Seitliche Beleuchtung im kurzen Stadttunnel, Zürich*



*Abb. XI.38 Helle Fahrbahn, Olten Aarburg*



*Abb. XI.39 Punktbeleuchtung im Tunnel mit Gegenverkehr, Brünigpass*



*Abb. XI.40 Tunnel mit Leitschranke, Brünigpass*



*Abb. XI.41 Gegenstrahlbeleuchtung, Frutigen-Adelboden*



*Abb. XI.42 Gegenstrahlbeleuchtung*



*Abb. XI.43 Ausfahrt, Frutigen-Adelboden*

## XI.1 Einsatz und Optimierung von hellen Belägen

### Ausgangslage

Es ist bekannt, dass mit hellen Fahrbahnen im Tunnel Kosteneinsparungen im Hinblick auf die Beleuchtung grundsätzlich möglich sind. Wegen Bedenken hinsichtlich der Eignung heller Steinkörnungen in bituminösen Deckschichten und der Bevorzugung von bituminösen Deckschichten anstelle von Betonbelägen wurden nur wenige Tunnel mit hellen Fahrbahnen ausgerüstet. Im Weiteren fehlen in der Schweiz auch technische Grundlagen zur Aufhellung von bituminösen Deckschichten. Dagegen liegen ältere Berichte der Betonstrassen AG Wildegg [66], [67], [68] zum Thema Betriebskosten der Beleuchtung vor. Diese beschränken sich jedoch auf den Einsatz von Betonbelägen. Nunmehr steht ein umfassendes Gutachten von Dr. Hans Meseberg [69] zum Schnittbereich helle Fahrbahnoberfläche und Energieeinsparung zur Verfügung. Das Gutachten ist primär auf Strassen ausgerichtet. Es liefert jedoch auch massgebliche Entscheidungsgrundlagen für den Einsatz von hellen Deckschichten im Tunnel. Im Weiteren stehen der Forschungsstelle ein Bericht zum Einfluss der Helligkeit von nassen Fahrbahnoberflächen auf das Wahrnehmungsvermögen bei Nacht [71] sowie die Technische Grundlagen zur Ausführung aufgehellter Asphaltdeckschichten der Freien und Hansestadt Hamburg [72] zur Verfügung.

Der Bau von Betonbelägen, sowohl auf Strassen als auch auf Brücken, wird heute auf Spezialfälle beschränkt und deshalb im Folgenden nur kurz behandelt. Im Fall der Fahrbahnen im Tunnel sind die schweizerischen Strassenverwaltungen daran interessiert, die Tunnel mit der Belagsart der angrenzenden Strassenabschnitte auszuführen. Dies gilt auch für die Mischgutgruppe. Im Vordergrund steht aus Gründen des Lärmschutzes die Gruppe SMA (Stone Mastic Asphalt). Nicht erwünscht ist grundsätzlich auch ein Mischgut mit einem speziellen Gesteinskorn wie im Fall der hellen Mineralstoffe.

Unter Berücksichtigung der oben angegebenen Voraussetzungen werden im Folgenden alle Aussagen zu hellen Belägen auf Deckschichten mit Walzasphalt ausgerichtet. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Aussagen bei Gussasphaltdeckschichten im Hinblick auf Mischgut mit Aufheller ebenfalls zutreffend sind.

Die Mehrzahl der hellen Fahrbahndeckschichten in Deutschland befinden sich auf offenen Strecken und nicht im Tunnel. Aus Grundlagen aus Deutschland kann abgeleitet werden, dass sich helle Fahrbahndeckschichten bezüglich aller massgebenden Anforderungen bewährt haben. Mit Bezug zum Tunnel kann zudem festgestellt werden, dass die Einwirkungen auf bituminöse Deckschichten auf Strassen viel schwerwiegender sind als in Tunneln. Dies betrifft die grösseren Temperaturänderungen sowie die Einwirkung des Regenwassers auf die Struktur des Belages.

### Lichttechnische Aspekte

Es zeigt sich klar ein lichttechnisch besseres, aber nichtlineares Verhalten von hellen gegenüber dunklen Belägen. Berechnet über die Durchgangsbeleuchtung lassen sich aufgrund der helleren Fahrbahn bei gleichbleibender Leuchtdichte Beleuchtungskörper einsparen bzw. weiter auseinander setzen.

### Lichttechnische Eigenschaften bei nassen Belägen

Nasse Fahrbahnen sind hinsichtlich der Helligkeit im Fall von Strassen ungünstig. Im Tunnel ist bei Regenwetter das Gegenteil der Fall. Wegen der mit dem Regen verbundenen Bewölkung ist der Helligkeitsunterschied der Fahrbahn auf der Anfahrtstrecke gegenüber der Einfahrtstrecke im Tunnel deutlich geringer als bei klarem Wetter. Ein weiterer positiver Effekt bildet der Umstand, dass der Leuchtdichtekoeffizient  $q_0$  der nassen Fahrbahn vor dem Tunnel kleiner bzw. die Deckschicht dunkler ist.



## Ausführungen von Aufhellungen von Fahrbahnen

Eine Übersicht über die verschiedenen Varianten von Aufhellungen von Fahrbahnen findet sich in Abb. I.44.

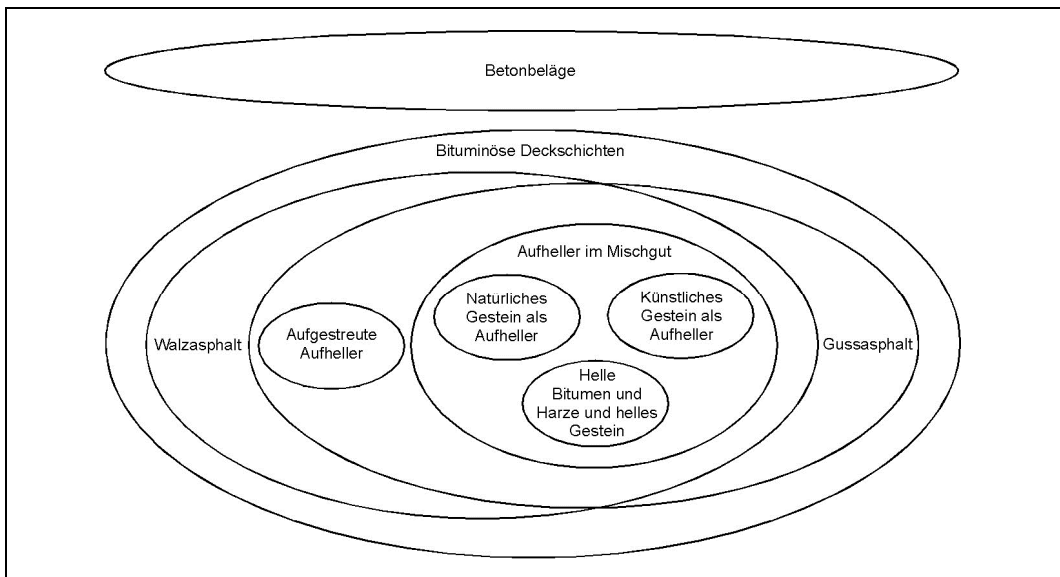


Abb. XI.44 Übersicht Variante von Arten heller Fahrbahnbelägen

### Betonbeläge

Auf dem schweizerischen Strassennetz werden Betonbeläge selten eingesetzt. Ein Einsatz erfolgt lediglich in Spezialfällen wie beispielsweise in Kreiseln. Es ist ein Grundsatz, dass die Deckschicht der Strasse durch die Tunnel geführt wird. Obwohl Betonbeläge bezüglich der Helligkeit günstig sind, steht ein Einsatz nicht zur Diskussion.

### Walz- oder Gussasphalt als Deckschicht

Grundsätzlich können Aufheller in allen Arten von bituminösen Deckschichten eingesetzt werden. Der Einsatz von Gussasphalt steht mindestens im Bereich der Hochleistungsstrassen kaum zur Diskussion, da auf den Strassen Walzasphaltbeläge bzw. Splittmastixasphalt gemäss der Norm SN 640 430b, Walzasphalt, Konzeption, Ausführung und Anforderungen [64], eingesetzt werden.

### Aufgestreute Aufheller

Gemäss dem Gutachten [69] haben sich auf Deckschichten aufgestreute aufhellende Zuschlagstoffe nicht bewährt. Sie werden deshalb nicht behandelt.

### Natürliches Gestein als Aufheller im Mischgut

Natürliches Gestein als Aufheller hat sich bewährt. Gemäss dem Gutachten [69] wird Basalt, Diabas, Granodiorit, Grauwacke, Labradorit, Quarzit und Porphyrt verwendet. Kalkstein und Dolomit sind generell ungeeignet. Bei natürlichem Gestein wird ein Anteil von 20 bis 40% des Gewichts des Gesteinsmaterials des Mischgutes verwendet.

### Künstliches Gestein als Aufheller im Mischgut

Als künstliches Aufhellgestein gelten bei hohen Temperaturen gebrannte Flinte wie u.a. Granusil, Luxovit und Rousil. Der Anteil des Aufhellgesteins am Gesteinsmaterial beträgt 15 bis 25%.

### Helle Bitumen und Harze zusammen mit hellem Gestein als Aufheller

Der Einsatz von hellem Bitumen oder Harzen ohne helles Gestein hat eine beschränkte Wirkung als Aufheller. Die Verwendung von hellem Bitumen oder Harzen mit hellem Gestein ist nicht verbreitet. Es stehen nur wenige Informationen mit Bezug zu Belägen mit hellem Bitumen oder Harzen zur Verfügung.

## **XI.1.1 Angaben zur Ausführung von bituminösen Deckschichten mit Aufheller im Mischgut**

### **Körnung des Aufhellmaterials**

Es werden die Korngruppen 0/2, 2/4, 4/8 und 8/11 und in speziellen Fällen auch 11/16 gemäss dem Nationalen Anhang SN 640 431-16-NA [65] zur Verwendung empfohlen.

### **Aufstreumaterial**

Neue Deckschichten weisen an der Oberfläche einen dunklen Bitumenfilm auf. Gemäss dem Gutachten [69] wird empfohlen, diese mit aufgehelltem Splitt abzustreuen. Die zu erzielende Wirkung der Aufhellung wird durch Befahren erst nach über einem Jahr erreicht.

### **Qualität von aufgehellten bituminösen Deckschichten**

Die Herstellung des Mischgutes und der Belagseinbau sind bei den aufgehellten Deckschichten gleich wie bei konventionellen Belägen. Beläge erfüllen auch alle Anforderungen wie beispielsweise die Griffigkeit, Spurrinnenbildung oder Schäden als Folge der Einwirkungen von Wasser. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Beläge im Tunnel wesentlich weniger beansprucht werden, da die thermischen Einwirkungen sehr viel geringer sind als im Fall von Strassen. Insbesondere in Norddeutschland sind aufgehellte Deckschichten verbreitet. Die Erfahrungen sind positiv. Der Forschungsstelle steht eine umfassende Sammlung von Laborprüfungsprotokollen zur Verfügung. Für die Ausführung und das Controlling aufgehellter Deckschichten steht damit eine praxisorientierte technische Grundlage [69] zur Verfügung.

### **Problematik des Einsatzes von aufgehellten Belägen in der Schweiz**

Die folgenden Umstände behindern den Einsatz von aufgehellten Belägen in der Schweiz:

- Für die Aufbereitung des Mischgutes muss ein zusätzliches Silo zur Verfügung stehen, das jedoch nur sporadisch verwendet werden kann. In Deutschland ist die Situation diesbezüglich günstiger. Der Einsatz von aufgehellten Belägen beschränkt sich nicht auf Tunnel.
- Im Hinblick auf eine massgebliche Wirkung wird beim Tunnel empfohlen, wegen des höheren Wirkungsgrades, künstliches Gesteinsmaterial zu verwenden. Die Transportdistanzen zu den Herstellern im Ausland sind gross.
- Die Anzahl der Hersteller ist klein. Eine Konkurrenz besteht kaum. Dies gilt im Übrigen auch für die Steinbrüche, die helle Gesteine liefern.
- In der Schweiz fehlen technische Grundlagen, die für die Ausführung notwendig sind.

## **XI.1.2 Kostenoptimierung der Tunnelbeleuchtung durch aufgehellte Deckschichten**

### **Aufgehellte Deckschichten als Element der Kostenoptimierung**

Bei den zahlreichen Tunneln mit einer eher geringen Länge ist für die Kostenoptimierung vor allem die Einfahrtsstrecke von Bedeutung. Mit der Herabsetzung der Leuchtdichte mittels aufgehellten Deckschichten ist lediglich eine Herabsetzung der Leuchtdichte auf die Hälfte möglich. Es ist jedoch davon auszugehen, dass Massnahmen im Zufahrtsbereich und am Tunnelportal eine erhebliche Herabsetzung der notwendigen Helligkeit ermöglichen.

### **Vorgehen zur Beurteilung der Kosten der Tunnelbeleuchtung unter Berücksichtigung aufgehellter Deckschichten**

Der Kostenvergleich der Beleuchtung mit aufgehellter und nicht aufgehellter Deckschicht basiert auf den Lebenszykluskosten inkl. Betrieb der beiden Varianten.

Hinsichtlich der Tunnelbeleuchtung kann bezüglich der Helligkeit angenommen werden, dass im Wesentlichen der visuell empfundene Helligkeitseindruck der Fahrbahn massgebend ist. Im Weiteren kann davon ausgegangen werden, dass das Leuchtdichteniveau linear mit dem Leuchtdichtekoeffizienten  $q_0$  ansteigt [69]. Damit ist aus der Sicht der Lichttechnik ein Kostenvergleich einfach.

### Klassifizierung der Fahrbahnoberfläche - Grundlage für den Kostenvergleich

Für die Aufhellung wird seitens des Bauherrn ein Mindestwert des Leuchtdichtekoeffizienten  $q_0$  angegeben, welcher vom Unternehmer einzuhalten ist. Allgemein wird eine stark aufgehellte Deckschicht bzw. die Kategorie D I gemäss der Klassifizierung der Helligkeit gemäss der Technischen Grundlage der norddeutschen Expertengruppe für aufgehellte Asphaltdeckschichten [73] gewählt. Die Kategorie D I umfasst den Bereich  $q_0 [\text{cd}/\text{m}^2 \cdot \text{lx}] > 0,11$ , stark aufgehellte Deckschichten. Deckschichten ohne Aufheller fallen unter die Kategorie D IV, Dunkle Deckschichten  $q_0 < 0,07$ . Basierend auf den beiden Werten ist ein Vergleich des finanziellen Aufwandes möglich. Eine Zusammenstellung der Kategorien findet sich in der Abb. I.45, Klassifizierung der Helligkeit von Fahrbahnoberflächen nach [69].

Abb. XI.45 Klassifizierung der Helligkeit von Fahrbahnoberflächen nach [69]

Kategorie	$q_0 [\text{cd}/\text{m}^2 \cdot \text{lx}]$	Beschreibung der Deckschichtoberfläche
D I	$> 0,11$	Stark aufgehellte Deckschichten
D II	$\geq 0,09$	Aufgehellte Deckschichten
D III	$\geq 0,07$	Helle Deckschichten
D IV	$< 0,07$	Dunkle Deckschichten

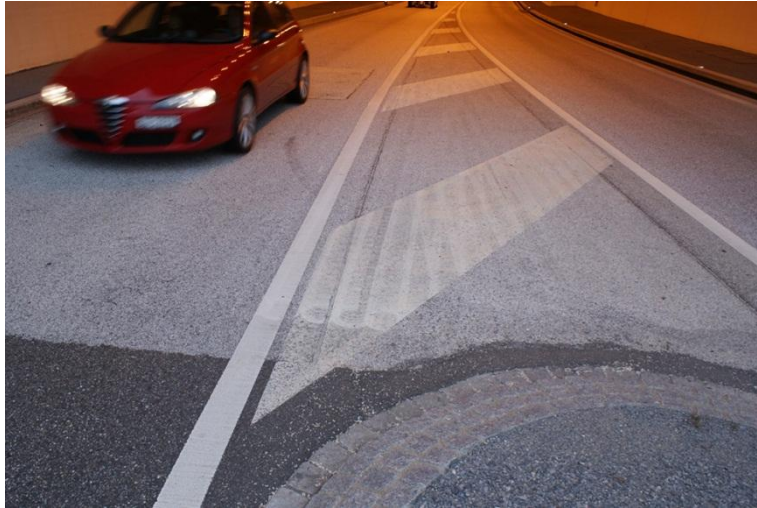
### XI.1.3 Markierungen auf hellen Belägen

#### Allgemeines

Wie im Folgenden dargestellt wird, ergeben sich hinsichtlich der Markierung Probleme. Grundsätzlich ist eine gut erkennbare Markierung das massgebende Element der optischen Linienführung. Auch bei konventionellen Deckschichten ergeben sich insofern Schwierigkeiten, als dass die Markierung mangels einer Reinigung durch den Verkehr und eines fehlenden Abflusses längs des Banketts rasch verschmutzt und als Leitlinie unwirksam wird. Das Schmutzproblem besteht nicht bei den Markierungen zwischen den Verkehrsstreifen.

#### Farbe der Markierung

Gemäss den Vorschriften der Strassensignalisationsverordnung (SSV) müssen Strassenmarkierungen weiss sein. Für temporäre Verkehrsführungen werden gelb/orange Markierungen verwendet. Diese Farbe wird für Markierungen im Tunnel in den Niederlanden, Belgien und Frankreich verwendet. Eine Variante wäre auch eine grüne Markierung. Abklärungen haben ergeben, dass das Bundesamt für Strassen eine Alternative zu weissen Markierungen nicht zulässt; dies um die Einheitlichkeit auf allen Strassen zu gewährleisten. Die Bilder (Abb. I.46 bis Abb. I.48) zeigen weisse Markierungen auf einem hellen Belag im Tunnel der Umfahrung Olten - Aarburg.



*Abb. XI.46 Markierung*



*Abb. XI.47 Markierung*



*Abb. XI.48 Vergleich Markierung auf hellen und konventionellen Deck*

# Abkürzungen

<b>Begriff</b>	<b>Bedeutung</b>
A	Fläche
A <sub>B</sub>	Flächenanteil Fahrbahnbelag
A <sub>P</sub>	Flächenanteil Portal
A <sub>U</sub>	Flächenanteil Umgebung
A <sub>W</sub>	Flächenanteil Wand
ABS	Anti-Blockiersystem
AF	Ausfahrtstrecke
AS	Annäherungstrecke
ASS	Anschlussstrecke
ASTRA	Bundesamt für Strassen
bfu	Beratungsstelle für Unfallverhütung
BSA	Betriebs- und Sicherheitsanlagen
CCR	Constant Current Reduction
CIE	International Commission on Illumination
DIN	Deutsches Institut für Normung
DTV	Durchschnittlicher täglicher Verkehr
EN	Europäische Norm
ES	Einfahrtstrecke
ESP	Fahrdynamikregelung
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
EVG	Elektronisches Vorschaltgerät
FGSV	Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen
FL-Leuchte	Fluoreszenz Leuchte
GE	General Electric
H	Höhe
IEA	International Ergonomics Association
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission
IS	Innenstrecke
ISO	Internationale Organisation für Normung
LED	Lichtemittierende Diode
LITG	Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V.
L <sub>f</sub>	Leuchtdichte
L <sub>fe</sub>	Leuchtdichte Einfahrtstrecke
L <sub>20</sub>	Leuchtdichtebewertung der Einfahrtstrecke
L <sub>w</sub>	Leuchtdichte Wand
LVK	Lichtverteilungskurve
lm	Lumenmeter
nm	Nanometer
NSvV	Nederlandse Stichting voor Verlichtingskunde
PIARC	Welt-Strassenverband, „Permanent International Association of Road Congresses“
PWM	Pulse Width Modulation
q <sub>0</sub>	Leuchtdichtekoeffizient
R1...R4	Belagsklassen
SA	Anhaltedistanz
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SLG	Schweizer Licht Gesellschaft
SN	Schweizer Norm

<b>Begriff</b>	<b>Bedeutung</b>
SSV	Strassensignalisationsverordnung
TI	Schwellwerterhöhung
U0	Gesamtgleichmässigkeit
UI	Längsgleichmässigkeit
ÜS	Übergangsstrecke
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
V <sub>P</sub>	Projektierungsgeschwindigkeit
VSS	Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute
VVG	Versicherungsvertragsgesetz

## Literaturverzeichnis

---

### Allgemein

- 
- [1] SN 531 197/2, Projektierung Tunnel, Strassentunnel, SIA, Zürich, 2005
- 
- [2] Richtlinie Tunnel und Elektromechnik, Signalisation der Sicherheitseinrichtungen in den Tunnels (in Vorbereitung), Bundesamt für Strassen, Bern
- 
- [3] Bundesamt für Strassen, Tunnel Task Force, Schlussbericht, Bern, 2000
- 

### Beleuchtung

- 
- [4] Richtlinie SLG 201:11-2005, Leitsätze der Schweizerischen Licht Gesellschaft, Öffentliche Beleuchtung
- 
- [5] Verkehrsprojekte Deutsche Einheit Nr. 13, A 38 Göttingen-Halle, Tunnel Höllberg, LED-Durchfahrtsbeleuchtung, DEGES 2009
- 
- [6] B. Janssen et al., Optimierung von Beleuchtungen für Strassentunnel hinsichtlich der Betriebskosten, Fachhochschule Aachen 2007
- 
- [7] VSS SN 640 551 Beleuchtung in Strassentunnel, -galerien und -unterführungen Teile 1, 1 Anhang und Teil 2
- 

### Strassentunnels, -galerien und Unterführungen

- 
- [8] SN 640 853 Markierungen; Unterflurleuchten
- 
- [9] SN 671 973 Automatische Verkehrszustandserfassung im Strassenverkehr mit digitaler Bildtechnik; Qualitätsanforderungen und Testkriterien
- 
- [10] prEN ISO 15007-1 Strassenfahrzeuge - Messung des Blickverhaltens von Fahrern bei Fahrzeugen mit Fahrerinformations- und Assistenzsystemen - Teil 1: Begriffe und Parameter
- 
- [11] EN ISO 15008 Strassenfahrzeuge - Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen - Anforderungen und Bewertungsmethoden der visuellen Informationsdarstellung im Fahrzeug
- 
- [12] Bundesamt für Strassenbau, Evaluation von Tunnelreinigungsmethoden, Bern, 1995
- 
- [13] Bundesamt für Strassenbau, Hilfsmittel zur Verdeutlichung der optischen Linienführung, Teil I/Kurven, Bern, 1990
- 
- [14] Bundesamt für Strassenbau, Hilfsmittel zur Verdeutlichung der optischen Linienführung, Teilabschnitt Kurvenschranken, Teil II, Bern, 1993
- 
- [15] P. Bürkel et al., Vorbereiche vor Tunneln auf Autobahnen, VSS, 2005
- 
- [16] J. Thoma, Verkehrssicherheit in Autobahntunnels, Unfallkennzahlenvergleich Freie Strecke/Tunnel, Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung bfu, Bern, 1989
- 
- [17] U. Salvisberg, R. Allenbach, et al., Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln des Nationalstrassennetzes, bfu-Report 51, Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung, Bern, 2004
- 
- [18] G. Hanreich, H. Lukaschek, J. Schrefel, W. Hopferwieser, Einfluss der Tunnelbeleuchtung auf die Verkehrssicherheit, Heft 304, Bundesministerium für Bauten und Technik, Strassenforschung, Wien, 1986
- 
- [19] C. Sistenich, Quantitative Risikoanalysen für Strassentunnel, Heft B 58, Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen, Bergisch Gladbach, 2007
- 
- [20] Ch. Zulauf, P. Locher et al., Bewertung der Sicherheit von Strassentunneln, Heft B 66, Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen, Bergisch Gladbach, 2009
- 
- [21] A. Bartmann, D. Reiffenrath et al., Sichtabstand bei Fahrten in der Dunkelheit, Heft M 4, Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen, Bergisch Gladbach, 1993
- 
- [22] F. Zwieli, K. Reker, J. Flach, Fahrerhaltensbeobachtungen auf Landstrassen am Beispiel von Baumalleen, Heft M 124, Bundesanstalt für Strassenwesen, Bergisch Gladbach, 2007
- 
- [23] Anforderungen an die Oberflächen von Strassentunnelwänden, Bundesanstalt für Strassenwesen
- 
- [24] K. Robatsch, C. Nussbaumer, Verkehrssicherheitsvergleich von Tunneln mit Gegenverkehr und Richtungsverkehr in Österreich, Strasse + Autobahn, 2004
-

[25]	K. Robatsch , C. Nussbaumer, Tunnels mit Gegenverkehr und Richtungsverkehr, Verkehrssicherheitsvergleich von Tunneln mit anderen Strassenarten, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Heft 539, Strassenforschung, Wien, 2004
[26]	W. Brilon, K. Lemke, Verfahren für die Auswahl von Strassenquerschnitten in Tunneln, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswesen, 2000
[27]	R. Weber, M. Weissert, Autobahnen, Ausnahmebetrieb, Optische Gestaltung von Überfahrten, VTA No. 29, Kantonspolizei Zürich, 1998
[28]	J. Schade, A. Engeln (Hrsg.), Fortschritte der Verkehrspsychologie, Beiträge vom 45. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie, 2008
[29]	U. Carraro, Lichttechnische Begriffe "Helligkeit", TU Dresden
[30]	A. Cohen, Psychisch bedingte Strassenbreite, Universität Zürich
[31]	A. Cohen, Verkehrszeichen, Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Köln, 1994
[32]	J. Day, Sicherheit in kurzen Tunneln, Elektrowatt Infra, Zürich, 2005
[33]	Tunnel Entrance Lighting: A Survey of Fundamentals for Determining the Luminance in the Threshold
[34]	Zone, CIE-Publikation Nr.61(1984), SLG Bern
[35]	Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses, CIE-Publikation Nr. 88-2004
[36]	ISBN 3 901 906 312, SLG Bern
[37]	Richtlinien der SLG: Öffentliche Beleuchtung, Strassen und Plätze sowie Expressstrassen und Autobahnen, Eclairage public. Rues, routes et places ainsi que routes express et autoroutes, SN 150907:1997, SLG Bern
[38]	Handbuch für Beleuchtung, 5. Auflage, LiTG, LTAG, NSvV, SLG/Ecomed Verlag (1992), SLG Bern
[39]	H. Dudli, P Blaser, Tunnel lighting: Method of calculating luminance of access zone L20, Light. Res. Tech. (25) No 1 (1993) Deutsche Übersetzung: Eine Methode zur Bestimmung des Richthöchstwertes der Leucht-dichte der Annäherungsstrecke L20 von Tunnelportalen, SLG Bern
[40]	SN 640 201 Geometrisches Normalprofil
[41]	SN 640 200a Geometrisches Normalprofil
[42]	ASTRA Richtlinie Normalprofile, Rastplätze und Raststätten der Nationalstrassen
[43]	SLG 201 Richtlinien öffentliche Beleuchtung - Strassentunnels, -galerien und -unterführungen
[44]	SIA 505 197/2 Projektierung Tunnel - Strassentunnel
[45]	SIA 505 197 Projektierung Tunnel - Grundlagen
[46]	CEN Bericht CR 14380 Lichtenwendung - Tunnelbeleuchtung
[47]	CIE Technical Report Calculation of Tunnel - Lighting Quality Criteria
[48]	SLG- Richtlinien: Messen und Bewerten von Beleuchtungsanlagen, (SN 418910)
[49]	SN 640 016a Massgebender Verkehr
[50]	SN 640 017a Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit
[51]	SN 640 900a Projektierung, Grundlagen, Sichtweiten
[52]	SN 640 005a Ganglinientypen und durchschnittlicher täglicher Verkehr (DTV)
[53]	P. Blaser, Die Gegenstrahlbeleuchtung in der Einfahrzone von Strassentunnels Bulletin 5EV72 (1981), Nr.17, SLG Bern
[54]	Evaluation von Tunnelreinigungsmethoden, VSS Forschungsauftrag 18/90, Bundesamt für Strassenbau, Bern, 1995
[55]	H.J. Hentschel, Licht und Beleuchtung, Hüthig Verlag, Heidelberg, 1982
[56]	United Nations, Economic and Social Council, Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee, Recommendations of the group of experts on safety in road tunnels, final report, Genf, 2001
[57]	Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Mindestanforderungen für die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Strassennetz, Brüssel, 2002



- [58] K. Robatsch, C. Nussbaumer, Tunnels mit Gegenverkehr und Richtungsverkehr, Verkehrssicherheitsvergleich von Tunnels mit anderen Strassenarten, Heft 539, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

#### Optische Linienführung, Tunnelzufahrt

- [59] Hilfsmittel zur Verdeutlichung der optischen Linienführung, Teil I / Kurven, Forschungsbericht 200, Bundesamt für Strassenbau, Bern, 1990
- [60] Menozzi M. 2009, Expertengutachten ZU den Lichtverhältnissen an Tunnelportalen der Westumfahrung und der A4 Knonauer Amt zuhanden der Baudirektion des Kantons Zürich (Hr. Meili), Expertengutachten Westumfahrung A4 2009
- [61] M. Weissert, Reduzierte Tunnelbeleuchtung, Auswirkungen auf das Unfallgeschehen, Kantonspolizei Zürich, Zürich, 1994
- [62] R. Weber, M. Weissert, Verkehrstechnische Untersuchungen im Nordportal des Gubristtunnels, Kantonspolizei Zürich, Zürich, 2001
- [63] R. Weber, M. Weissert, Ausnahmebetrieb/Optische Gestaltung von Überfahrten, Kantonspolizei Zürich, Zürich, 1998

#### Einsatz und Optimierung von hellen Belägen

- [64] SN 640 430b, Walzasphalt, Konzeption, Ausführung und Anforderungen an die eingebauten Schichten
- [65] SN 640 431-1b-NA, Nationales Vorwort, Asphaltmischgut, Mischgutanforderungen - Teil 1: Asphaltbeton
- [66] Vergleichende Untersuchung der Betriebskosten für die Beleuchtung in den Strassentunnels, St. Gotthard, Seelisberg, Bericht Nr. 5247/B, Betonstrassen AG, Wildegg, 1984
- [67] Nationalstrasse N2, Kantone Uri und Tessin, Gotthard-Strassentunnel, Arbeitsgruppe für die Beläge, Technischer Bericht Nr. 5013/B, Betonstrassen AG, Wildegg, 1977
- [68] Die Beleuchtung von Strassentunnels, Vergleichende Untersuchungen über die Investitions- und jährlich wiederkehrenden Betriebskosten für die Beleuchtung von Strassentunnels in Abhängigkeit vom Fahrbahnbelagstyp, Betonstrassen AG, Wildegg, 1974
- [69] H. Meseberg, Gutachten zur Ermittlung des optimalen Leuchtdichtekoeffizienten  $q_0$  von Fahrbahnoberflächen hinsichtlich Energieeinsparung ortsfest beleuchteter Strassen, Standfestigkeit von Fahrbahndecken und Kontrastverhältnissen nicht ortsfest beleuchteter Strassen, Berlin 2009
- [70] U. Carraro, Lichttechnische Begriffe "Helligkeit", FGSV, Köln, 1986
- [71] H.-J. Schmidt-Clausen, L. Schwenkschuster, Einfluss der Helligkeit und des Reflexionsverhaltens von nassen Fahrbahnoberflächen auf die Seh- und Wahrnehmungsbedingungen von Kraftfahrern bei Nacht, Forschungsbericht, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Strassenbau, Strassenverkehr, Bonn, 2001
- [72] Aufgehellte Asphaltdeckschichten, Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Bau und Verkehr, Landesbauverwaltung TM 12, Hamburg, 2002
- [73] Praktische Hinweise für den Bau von hellen Asphaltdeckschichten, Norddeutsche Expertengruppe für aufgehellte Asphaltdeckschichten, Hamburg, 2004

#### Betriebs- und Sicherheitsanlagen (BS) inkl. Erhaltung

- [74] Brand- und Störfalldetektion in Strassentunneln - Vergleichende Untersuchungen, Heft 925, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, D 2005
- [75] Bundesamt für Konjunkturfragen, Impulsprogramm BAU, Erhaltung von Tunnelbauwerken, Bern, 1993
- [76] B. Steinhauer, G. Mayer, M. Brake, Videobasierte Störfalldetektion in Tunnels, Strasse + Autobahn, Köln, 2003
- [77] Richtlinie Tunnel und Elektromechanik, Signalisation der Sicherheitseinrichtungen in den Tunnels (in Vorbereitung), Bundesamt für Strassen, Bern
- [78] Richtlinie Tunnel und Elektromechanik, Verkehrsfernsehen (in Vorbereitung), Bundesamt für Strassen, Bern
- [79] Absichtserklärung EMS-CH, Dokumentation, Bundesamt für Strassen, Bern, 2007
- [80] B. Steinauer, G. Mayer, M. Brake, Videobasierte Störfalldetektion in Tunnels, Fachartikel, Strassen + Autobahn Nr. 4, 2003

- 
- [81] U. Welte, G. Friedrich, Zerfallszyklen von elektromechanischen Anlagen: Beispiel Leittechnik, Fachartikel, Strasse und Verkehr Nr. 5, VSS, Zürich, 2006
- 

**Übrige**

---

- [82] P. Badke-Schaub, G. Hofinger, K. Lauche (Hrsg.), Human Factors, Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen, Springer Medizin Verlag, Heidelberg, 2008
- 

- [83] IEA, International Ergonomics Association, 2000  
[http://www.iea.cc/01\\_what/What%20is%20Ergonomics.html](http://www.iea.cc/01_what/What%20is%20Ergonomics.html) Zugriff, 6.5.2011
- 

- [84] PIARC, Human factors and road tunnel safety regarding users, 2008  
[http://publications.piarc.org/ressources/publications\\_files/5/3251,2008R17WEB.pdf](http://publications.piarc.org/ressources/publications_files/5/3251,2008R17WEB.pdf) Zugriff, 6.5.2011
- 

- [85] U. Graf, M. Ghielmetti, Beleuchtung und Unfallhäufigkeit in Strassentunneln, Institut für Strassen-, Eisenbahn- und Felsbau, Mitteilung Nr. 40, Zürich, 1978
- 

- [86] SN 640 561, Passive Sicherheit im Stassenraum
- 

- [87] SN 640 850a, Markierungen, Ausgestaltung und Anwendungsbereiche mit auf die Markierung fokussierte Beleuchtung
-

# Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

ARAMIS SBT

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 10.09.2011

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2008/204

Projektitel: Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung

Enddatum: 31. August 2011

#### Projektleiter

Name:  Vorname:

Amt, Firma, Institut:

Strasse, Nr.:

PLZ:  Email:

Ort:  Telefon:

Kanton, Land:  Fax:

#### Texte:

Zusammenfassung der  
Projektresultate:

Die Untersuchung zur "Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung" hat zahlreiche Erkenntnisse geliefert, allen voran die Überzeugung vom wirtschaftlichen und ökologischen Nutzen bzw. den Mehrwert geeigneter Leuchten. Leuchten, die vordergründig keinen Unterschied zulassen und trotzdem, basierend auf der Lichtverteilung, der Lichtmenge und ihrer Grösse und Verarbeitung bis hin zur Montage, grosse Unterschiede aufzeigen.

Eine eigentliche Vereinfachung der Planung ist nicht auszumachen. Durch die Möglichkeiten der Berechnungstools und Wahl der Randbedingungen ist das Optimierungspotenzial gewachsen. Leuchten können präziser unterschieden und richtig platziert eingesetzt werden. Die Umgebung wird präziser erfasst und kann dadurch besser beurteilt werden. Steuerungsmöglichkeiten und neue Technologien der Leuchtmittel erhöhen Sparpotenzial und Lebensdauer. Diese Vorgehensweise lässt den Schluss zu, dass die Optimierung einer Anlage durch das Wissen neuer Technologien und vieler gebauter Tunnelanlagen in der Schweiz viel präziser bearbeitet werden kann.

Interessant sind die Resultate der Nutzwertanalyse wie auch der Wirtschaftlichkeitsüberlegung. Sie zeigen kurz- und langfristigen Nutzen auf. Dabei kann die Länge einer Dichtung wichtig sein oder eben auch die richtige Lichtverteilung. Trotzdem bleibt die Planung einer Tunnelanlage eine Fachplanung, da die Variablen und Möglichkeiten der Einflussnahme ein präzises Fachwissen voraussetzen.

Zielerreichung:	Das für das Forschungsvorhaben gesteckte Ziel wurde erreicht. Eine absolute „Einheitlichkeit“ konnte nicht erreicht werden, allerdings kann die Planung dank präziser Projektierung, Vergleichbarkeit der Leuchten, Einbezug der Umgebung und der neuen Technologien optimiert werden.
Folgerungen und Empfehlungen:	Es sind ergänzende Forschungen bez. LED-Leuchten zu empfehlen, da sich die Produkte rasch entwickeln und laufend neue Leuchten vorgestellt werden. Zudem ist die Lebensdauer unter den speziellen Verhältnissen im Tunnel zu erforschen.
Publikationen:	Forschungsbericht

**Beurteilung der Begleitkommission:**

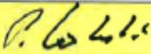
*Diese Beurteilung der Begleitkommission ersetzt die bisherige separate fachliche Auswertung.*

Beurteilung:	Die Begleitkommission hat die Ergebnisse beurteilt und als zielführend und wichtig für die künftige Planung beurteilt. Das Optimierungspotenzial wurde aufgezeigt; mittels der Kosten-/Nutzenanalyse wurde der kurz- und langfristige Nutzen verschiedener Lösungen dargestellt.
Umsetzung:	Die Ergebnisse der Forschungsarbeit können direkt in Projektierungen von Tunnelbeleuchtungen einbezogen werden.
weitergehender Forschungsbedarf:	Es sind ergänzende Forschungen bez. LED-Leuchten und mesopischem Sehen (grünes Licht) zu empfehlen, da sich die Produkte rasch entwickeln und laufend neue Leuchten vorgestellt werden. Zudem ist die Lebensdauer unter den speziellen Verhältnissen im Tunnel zu erforschen.
Einfluss auf Normenwerk:	Die Art der Leuchten hat keinen Einfluss auf die neue Beleuchtungsnorm. Diese Norm behandelt die Anforderungen und Planungsmethodik.

**Präsident Begleitkommission:**

Name:	Köhli	Vorname:	Peter
Amt, Firma, Institut:	Präsident FK 2, Strassenverwaltung		
Strasse, Nr.:	Birkenstrasse 25		
PLZ:	8810	Email:	peter.koehli@vtxmail.ch
Ort:	Horgen	Telefon:	079 414 59 15
Kanton, Land:	Zürich / Schweiz	Fax:	044 725 42 24

**Unterschrift Präsident Begleitkommission:**





## Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
617	AGB 2005/100	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Synthesebericht <i>Rapport de synthèse</i> <i>Synthesis report</i>	2010
619	AGB 2005/103	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Ermittlung des Netzrisikos <i>Estimation du risque pour le réseau</i> <i>Estimation of the network risk</i>	2010
624	AGB 2005/108	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Risikobeurteilung für Kunstbauten <i>Appréciation des risques pour les ouvrages d'art</i> <i>Risk assessment for highway structures</i>	2010
630	AGB 2002/016	Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung chloridverseuchter Stahlbetonbauten <i>Inhibiteurs de corrosion pour la remise en état des ouvrages en béton armé, contaminés par des chlorures</i> <i>Corrosion inhibitors for the rehabilitation of chloride contaminated reinforced concrete structures</i>	2010
632	AGB 2008/201	Sicherheit des Verkehrssystem Strasse und dessen Kunstbauten Testregion - Methoden zur Risikobeurteilung Schlussbericht <i>Région test - Méthodes pour l'appréciation des risques</i> <i>Rapport final</i> <i>Test region - Methods of risk assessment</i> <i>Final report</i>	2010
640	AGB 2003/011	Nouvelle méthode de vérification des ponts mixtes à âme pleine <i>Neue Bemessungsmethode für Stahlbetonverbundbrücken mit Vollwandträger</i> <i>New method for design of steel-concrete composite plate girder bridges</i>	2010
645	AGB 2005/021	Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat <i>Bases pour l'utilisation du béton de recyclage en granulats de béton</i> <i>Fundamentals for the use of recycled concrete comprised of concrete material</i>	2010
1272	VSS 2007/304	Verkehrsregelungssysteme - behinderte und ältere Menschen an Lichtsignalanlagen <i>Aménagement des feux de signalisation pour les personnes a mobilité réduite ou âgées</i> <i>Traffic control systems - Handicapped and older people at signalized intersections</i>	2010
1277	SVI 2007/005	Multimodale Verkehrsqualitätsstufen für den Strassenverkehr - Vorstudie <i>Niveaux de service multimodales de la circulation routière - études préliminaires</i> <i>Multimodal level of service of road traffic - preliminary study</i>	2010

1282	VSS 2004/715	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschieben von Erhaltungsmaßnahmen <i>Coûts supplémentaires engendrés par l'exécution anticipée ou retardée des mesures d'entretien</i> <i>Additional costs caused by bringing forward or delaying of standard interventions for road maintenance</i>	2010
1284	VSS 2004/203	Evacuation des eaux de chaussée par les bas-cotés <i>Entwässerung über das Bankett</i> <i>Road runoff on road sides</i>	2010
1288	ASTRA 2006/020	Footprint II- Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1 <i>Footprint II- Langzeit Belag Performance und Umwelt Monitoring an der A1</i> <i>Footprint II- Long terme performance des chaussées et à la surveillance de l'environnement A1</i>	2010
1289	VSS 2005/505	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung der EN <i>Affinité entre granulats et bitume, mise en application nationale de la EN</i> <i>Affinity between aggregate and bitumen, national implementation of the EN</i>	2010
1291	ASTRA 2009/005	Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen <i>Modèles de conduite sur autoroutes surchargées</i> <i>Speed patterns on congested highways</i>	2010
1293	VSS 2005/402	Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux <i>Bestimmung der Anwesenheit und Wirksamkeit von Haftmittel im Asphaltbeton</i> <i>Determination of the presence and efficiency of adhesion agent in asphalt concrete</i>	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und Vergleichspräzision der Druckfestigkeit von Gesteinkörnungen am Haufwerk <i>Répétabilité et reproductibilité de la résistance à la compression des granulats en vrac</i> <i>Repeatability and Reproducibility of the compressive Strength on the Stack</i>	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfsgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden <i>Base de projet pour installations de feux de circulation et guide</i> <i>Design basics for traffic light systems and guidelines</i>	2010
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen <i>Adhérence sur les chaussées hivernales</i> <i>Skid resistance of winter road surfaces</i>	2010
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung <i>Speed on upgrades and downgrades; revision</i> <i>Les vitesses dans les rampes et les pentes; vérification</i>	2010
622	AGB 2005/106	Rechtliche Aspekte eines risiko- und effizienzbasierten Sicherheitskonzepts <i>Aspects juridiques d'un concept de sécurité basé sur les risques et l'efficience</i> <i>Legal aspects of a risk and efficiency based safety approach</i>	2009

1245	VSS 2004/701	Verfahren zur Bestimmung des Erhaltungsbedarfs in kommunalen Strassennetzen <i>Procédure de détermination du besoin d'entretien dans les réseaux routiers communaux</i> <i>Procedure for determining the maintenance requirements of municipal road networks</i>	2009
1281	SVI 2004/002	Systematische Wirkungsanalysen von kleinen und mittleren Verkehrsvorhaben <i>Systematical impact assessment of small and medium transport projects</i> <i>Analyses des impacts systématiques pour projets de transport petits et moyens</i>	2009
1297	VSS 2007/702	Einsatz von Asphaltbewehrungen (Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement <i>Application de couches intercalaires de géosynthétiques pour la gestion de l'entretien des chaussées</i> <i>Application of asphalt interlayers for road maintenance management</i>	2009
1300	VSS 2003/903	SATELROU Perspectives et applications des méthodes de navigation pour la télématique des transports routiers et pour le système d'information de la route <i>Perspektiven und Anwendungen der Navigationsmethoden für die Strassenverkehrstelematik und für das Strasseninformationssystem</i> <i>Perspectives and applications of the navigation systems for the intelligent transportation systems and for the road information system</i>	2010
639	AGB 2008/003	RiskNow-Falling Rocks Excel-basiertes Werkzeug zur Risikoermittlung bei Steinschlagschutzgalerien <i>Risk Now-Falling Rocks</i> <i>Outil intégré Excel pour le calcul de risques sur les galeries de protection contre les chutes de pierre</i> <i>Risk Now-Falling Rocks</i> <i>Excel-based tool for the risk analysis of rockfall protection galleries</i>	2010
642	AGB 2002/006	Verbund von Spanngliedern <i>Comportement d'adhérence des unités de précontrainte à torons</i> <i>Bond behaviour of strand tendons for post-tensioning</i>	2009
644	AGB 2005/004	Hochleistungsfähiger Faserfeinkornbeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton <i>Béton filtré ultra-performant pour augmenter l'efficacité de la maintenance des ouvrages d'art en béton armé</i> <i>Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete for increasing efficiency of the maintenance of reinforced concrete road structures</i>	2010
1292	ASTRA 2006/004	Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes mit eigener Ölmühle <i>Développement d'une centrale de cogénération à base d'huile végétale avec propre moulin à huile</i> <i>Development of a vegetable oil block heat and power plant with own oil mill</i>	2010



1296	ASTRA 2007/008	Swis contribution to the Heavy-Duty Particle Measurement Programme (HD-PMP) <i>Schweizer-Beitrag zum Russpartikel-Messprogramm für schwere Motorwagen (HD-PMP)</i> <i>Contribution de la Suisse au Programme de Mesure des Particules pour voitures automobiles lourdes (HD-PMP)</i>	2010
1302	VSS 1999/131	Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages? -(Performance-orientierte Methoden) <i>Relation between binder properties and damage characteristics of pavements ?</i> <i>(Performance orientated methods)</i>	2010
1304	VSS 2004/716	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen Schadensprozesse und Zustandsverläufe <i>Processus de dégradation et lois d'évolution</i> <i>Pavement damage processes and performance curves</i>	2008
1305	VSS 2000/457	Verkehrserzeugung durch Parkieranlagen <i>Génération de trafic par des installations de stationnement</i> <i>Trafic generation of parking facilities</i>	2009
1306	ASTRA 2008/002	Strassenglätte-Prognosesyste (SGPS) <i>Système de prévision de chaussées glissantes</i> <i>Forecasting Expert System for Road Slipperiness</i>	2010
1308	VSS 2008/201	Hindernisfreier Verkehrsraum- Anforderungen aus Sicht von Menschen mit Behinderung <i>Espace de rues sans obstacles-</i> <i>Exigences des personnes avec handicap</i> <i>Obstacle free traffic areas-</i> <i>Demands of people with disabilities</i>	2010
1309	VSS 2008/303	Verkehrsregelungssysteme - Modernisierung von Lichtsignalanlagen <i>Modernisation des feux de signalisation</i> <i>Modernisation of traffic control systems</i>	2010
1310	ASTRA 2007/002	Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall <i>Influence du courant d'air longitudinal dans les tunnels routiers en cas d'incendie</i> <i>Influencing the longitudinal airflow in road tunnels in case of fire</i>	2010
643	AGB 2005/014	Akustische Überwachung einer stark geschädigten Spannbetonbrücke und Zustandserfassung beim Abbruch <i>Surveillance acoustique d'un pont de béton précontraint et évaluation de l'état pendant sa démolition</i> <i>Acoustic monitoring of a prestressed concrete bridge and its condition survey during demolition</i>	2010
621	AGB 2005/105	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Szenarien der Gefahrenentwicklung <i>Scénarios de l'évolution des dangers</i> <i>Scenarios of hazard development</i>	2009

1280	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit Verkehrspsychologischer Teilbericht <i>Influence of In-Vehicle Information Systems on Driver Behaviour and Road Safety</i> <i>Report part of traffic psychology</i> <i>Influence des systèmes d'information embarqués sur le comportement de conduite et la sécurité routière</i> <i>Rapport partiel de la psychologie de circulation</i>	2010
1290	VSS 1999/209	Conception et aménagement de passages inférieurs et supérieurs pour piétons et deux-roues légers <i>Entwurf und Gestaltung von Unter- und Überführungen für Fussgänger und leichte Zweiräder</i> <i>Conception and disposition of lower and upper crossings for pedestrians and cyclists</i>	2008
1307	ASTRA 2006/002	Entwicklung optimaler Mischgüter und Auswahl geeigneter Bindemittel; D-A-CH - Initialprojekt <i>Développement des mélanges bitumineux optimaux et sélection des liants appropriés;</i> <i>D-A-CH - projet initial</i> <i>Development of Optimal Bituminous Mixtures and Selection of Appropriate Binders;</i> <i>D-A-CH - Initiation Project</i>	2008
1313	VSS 2001/201	Kosten-/Nutzenbetrachtung von Strassenentwässerungssystemen, Ökobilanzierung <i>Profit et coûts, bilans écologiques des systèmes d'évacuation de l'eau de ruissellement des routes</i> <i>Cost and Benefits, ecological balances of different concepts of management and treatment of road run-off</i>	2010
1314	VSS 2005/203	Datenbank für Verkehrsaufkommensraten <i>Banque de données pour taux de génération de trafic</i> <i>Database for trip generation rates</i>	2008
1316	VSS 2001/701	Objektorientierte Modellierung von Strasseninformationen <i>Modélisation d'objets et de processus pour le système d'information routier</i> <i>Modeling of objects and processes for the road information system</i>	2010
1319	VSS 2000/467	Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmimmissionen <i>Impact of traffic calming measures on noise immissions</i> <i>Impacts des mesures de modération du trafic sur les immissions sonores</i>	2010

1320	VSS 2007/303	Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen <i>Functional requirements for traffic collection systems relating to traffic lights</i> <i>Exigences fonctionelles en matière de systèmes de détection du trafic en rapport avec les installations de feux de circulation</i>	2010
1317	VSS 2000/469	Geometrisches Normalprofil für alle Fahrzeugtypen <i>Profil géométrique type pour tous les types de véhicules</i> <i>Standard profile of cross sections for all vehicle types</i>	2010
1321	VSS 2008/501	Validation de l'oedomètre CRS sur des échantillons intacts <i>Validierung des CRS-Oedometers mittels intakter Proben</i> <i>Validation of Constant Rate of Strain oedometer on intact samples</i>	2010
1322	SVI 2005/007	Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit <i>Coûts horaires du trafic des personnes: Dépendance de la perception et de la distance</i> <i>Willingness to pay in passenger transportation: Perception and distance dependence</i>	2008
1286	VSS 2000/338	Verkehrssqualität und Leistungsfähigkeit auf Strassen ohne Richtungstrennung <i>Niveau de service et capacité pour les routes à deux voies sans séparation des sens de circulation</i> <i>Level of Service and capacity for undivided two-lane streets</i>	2010
646	AGB 2005/018	Interactin sol-structure: ponts à culées intégrales <i>Tragwerk-Baugrund Interaktion: Brücken mit Integralen Widerlagern</i> <i>Soil-Structure interaction: bridges with integral abutments</i>	2010
1312	SVI 2004/006	Der Verkehr aus Sicht der Kinder: Schulwege von Primarschulkindern in der Schweiz <i>La circulation du point de vue des enfants: Les trajets scolaires des élèves du primaire en Suisse</i> <i>Traffic and children: Primary school children's routes to school in Switzerland</i>	2010
1315	VSS 2006/904	Abstimmung zwischen individueller Verkehrsinformation und Verkehrsmanagement <i>Coordination entre information de trafic individuelle et gestion de trafic</i> <i>Coordination between individual traffic information and traffic management</i>	2010
1318	FGU 2006/001	Langzeitquellversuche an anhydritführenden Gesteinen <i>Essais de gonflement de longue durée sur roches anhydrites</i> <i>Long-term swelling tests on anhydritic rock</i>	2010

1324	VSS 2004/702	Eigenheiten und Konsequenzen für die Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen im überbauten Gebiet <i>Entretien des infrastructures routières dans les zones bâties: caractéristiques et conséquences</i> <i>Special features and consequences of road facility maintenance in built-over areas</i>	2009
1326	VSS 2006/207	Erfolgskontrolle Fahrzeugrückhaltesysteme <i>Control of effectiveness of road restraint systems</i> <i>Contrôle de l'efficacité des dispositifs de retenue de véhicules</i>	2011
1323	VSS 2008/205	Ereignisdetektion im Strassentunnel <i>Détection d'incidents dans les tunnels routiers</i> <i>Incident Detection in Road Tunnels</i>	2011
1327	VSS 2006/601	Vorhersage von Frost und Nebel für Strassen <i>Prévision de gel et de brouillard pour les routes</i> <i>Prediction of frost and fog for roads</i>	2010
1328	VSS 2005/302	Grundlagen zur Quantifizierung der Auswirkungen von Sicherheitsdefiziten <i>Principes pour la quantification des effets des déficits de la sécurité</i> <i>Basis for the quantification of the effects of safety deficits</i>	2011
1329	SVI 2004/073	Alternativen zu Fussgängerstreifen in Tempo-30-Zonen <i>Alternatives aux passages pour piétons dans les zones 30</i> <i>Alternatives to zebra crossings in 30km/h zones</i>	2010
1330	FGU 2008/006	Energiegewinnung aus städtischen Tunneln; Systemevaluation <i>Energy extraction from urban tunnels, evaluation of systems</i> <i>Extraction d'énergie géothermique de tunnels urbains; évaluation de systèmes</i>	2010
1331	VSS 2005/501	Rückrechnung im Strassenbau <i>Analyse inverse pour la construction routière</i> <i>Inverse analysis in Road Geotechnics</i>	2011
1311	VSS 2000/543	Viabilite des projets et des Installations annexes <i>Kontrolle der Befahrbarkeit von Strassen und Nebenanlagen</i> <i>Viability of road projects and secondary facilities</i>	2010
1332	VSS 2006/905	Standardisierte Verkehrsdaten für das verkehrsträgerübergreifende Verkehrsmanagement <i>Standadisation des données de trafic pour gestion intermodale du trafic</i> <i>Standardised traffic data for intermodal trafic management</i>	2011
1333	SVI 2007/001	Standards für die Mobilitätsversorgung im peripheren Raum <i>Standards for mobility supply in peripheral regions</i> <i>Standards pour l'offre de mobilité dans l'espace</i>	2011

1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an ? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen <i>Transports de l'avenir ?</i> <i>Moteurs et carburants pour la mobilité de demain</i> <i>What drives us on ?</i> <i>Drives and fuels for the mobility of tomorrow</i>	2011
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im labormasstab <i>Désenrobage des enrobés peu bruyants des couches de roulement sous sollicitation de roulement en laboratoire</i> <i>Stripping of Low Noise Surface Courses during Laboratory Scaled Wheel Tracking</i>	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors <i>SPIN-ALP: Abschätzung des Potentials des Intermodalen Verkehrs auf Alpenkorridoren</i> <i>SPIN-ALP: Estimation du potentiel du transport intermodal sur les axes transalpins</i>	2010
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts-Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten <i>Fonctions de résistance pour des tronçons routiers urbains en dehors de la zone d'influence de carrefours</i> <i>Capacity restraint functions for urban road sections not affected by intersection delays</i>	2010
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-Vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes. <i>Die charakteristischen Indikatoren einer Velostadt. Evaluationsmethode der Velopolitiken anhand von 8 Indikatorgruppen für kleine und mittlere Gemeinden</i> <i>Characteristic indices of a Bike City. Method of evaluation of cycling policies in 8 indices for small and medium-sized communes</i>	2010
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology <i>Temps de parcours en réseau urbain</i> <i>Methodologie für Fahrzeitbewertung in städtischen Strassennetz</i>	2011
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit <i>Modèles d'impact d'équipements de véhicules pour améliorer la sécurité routière</i> <i>Modelling of the impact of in-vehicle equipment for the enhancement of traffic safety</i>	2009
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground <i>Entscheidungsgrundlagen und Hilfsmittel für die Planung von TBM-Vortrieben in druckhaftem Gebirge</i> <i>Critères de décision et outils pour la planification de l'avancement au tunnelier dans des conditions de roches poussantes</i>	2011

1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr <i>Basic technologies for detecting intermodal traveling passengers</i> <i>Les technologies de base pour l'enregistrement automatique des usagers de moyens de transports</i>	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr <i>L'agressivité au volant</i> <i>Aggressive Driving</i>	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS" <i>Projet initial pour le paquet de recherche "Augmentation de l'utilité pour les usagers du système d'information de la route"</i> <i>Initial project for the research package "Increasing benefits for the users of the road and transport information system"</i>	2011
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen <i>Application areas of various means of transportation in agglomerations</i> <i>Domaine d'application de different moyen de transport dans les agglomérations</i>	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren <i>Investigations of the ice-wall grow and frost heave in artificial ground freezing</i> <i>Recherches sur la formation corps gelés et du soulèvement au gel pendant la procédure de congélation</i>	2010
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges <i>Qualitätsprüfung und Überwachung elektrisch isolierter Spannglieder in Brücken</i> <i>Contrôle de la qualité et surveillance des câbles de précontrainte isolés électriquement dans les ponts</i>	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene <i>Sécurité en cas de tracés rail-route parallèles ou rapprochés</i> <i>Safety measures to manage risk of roads meeting or running close to railways</i>	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen <i>On-site runoff experiments on roads</i> <i>Essai d'écoulements pour l'évacuation des eaux des autoroutes</i>	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik <i>IT-Security pour la télématique des transports</i> <i>IT-Security for Transport and Telematics</i>	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen) <i>Passage pour piétons (les bases)</i> <i>Pedestrian crossing (basics)</i>	2011

1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung <i>Quantification of the leakages into exhaust ducts in road tunnels with concentrated exhaust systems</i> <i>Quantification des fuites des canaux d'extraction dans des tunnels routiers à extraction concentrée de fumée</i>	2010
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels <i>Entwicklung einer besten Praxis-Methode zur Risikomodellierung für Strassentunnelanlagen</i> <i>Développement d'une méthode de meilleures pratiques pour l'analyse des risques dans les tunnels routiers</i>	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhand D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis <i>Essai de résistance aux sulfates selon la norme SIA 262/1, Annexe D: Applicabilité et importance pour la pratique</i> <i>Testing sulfate resistance of concrete according to SIA 262/1, appendix D: applicability and relevance for use in practice</i>	2011
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen <i>Coopération dans les gares et arrêts</i> <i>Coopération at railway stations and stops</i>	2011