

Die Gegenstrahlbeleuchtung in der Einfahrzone von Strassentunneln

Autor(en): **Blaser, P.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **72 (1981)**

Heft 17

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-905152>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Die Gegenstrahlbeleuchtung in der Einfahrzone von Strassentunneln

Von P. Blaser, Präsident der SLG

628.971.6:624.191.94;

Ausgehend von den gesicherten grundlegenden Gesetzmässigkeiten im Bezug auf die Sehaufgabe der Fahrzeuglenker und der Definition einer Kontrastgüte zur quantitativen Klassierung der Gegenstrahlbeleuchtung werden die notwendigen lichttechnischen Werte der Tunnelbeleuchtung nach dem Gegenstrahlprinzip abgeleitet. Zusätzlich wird die Beeinflussung der Sehbedingungen durch das in den Tunnel einfallende Tageslicht sowie durch die den Kontrast vermindernenden Streuleuchtdichten im Gesichtsfeld des Fahrers untersucht. Die Analyse zeigt, dass mit technisch realisierbaren Lichtverteilungen von Gegenstrahlleuchten im Vergleich zu einer konventionellen Tunnelbeleuchtung mit erheblich tieferen Fahrbahnleuchtdichten sogar grundsätzlich bessere Sehbedingungen gewährleistet werden können. Zudem kann auch die Leuchtdichteausbeute auf der Fahrbahn verbessert werden, so dass mit einer sorgfältig projektierten Gegenstrahlbeleuchtungsanlage wesentliche Einsparungen an elektrischer Energie bei mindestens gleichbleibender Beleuchtungsqualität möglich sind.

Les caractéristiques photométriques nécessaires à l'installation des éclairages de tunnels avec la technique à contre-jour sont données. Elles sont déduites des relations fondamentales établies et découlant des réactions de l'œil du conducteur d'un véhicule, ainsi que de la définition d'un paramètre de qualité du contraste destiné à la classification quantitative de l'éclairage à contre-jour. De plus, la modification des conditions de visibilité est étudiée: influence de la lumière du jour pénétrant dans le tunnel et diminution du contraste par la lumière diffusée dans le champ de vision du conducteur. Un éclairage à contre-jour utilisant des répartitions de lumière techniquement réalisables permet, comparé à un éclairage conventionnel, d'améliorer fondamentalement la visibilité même avec un éclairage notablement plus faible. De plus, le rendement lumineux sur la chaussée peut être amélioré, de sorte qu'une installation d'éclairage à contre-jour, bien conçue, permet de diminuer considérablement la consommation d'énergie tout en maintenant au moins égale la qualité de l'éclairage.

1. Einleitung

Das Gegenstrahlprinzip zur Beleuchtung der Einfahrzone von Strassentunneln ist seit längerer Zeit bekannt [1; 2; 3]. In der Schweiz sind bereits mehrere Strassentunnel – insbesondere Autobahntunnel – mit einer asymmetrischen bzw. Gegenstrahlbeleuchtung in Betrieb. Die Vorteile dieser Beleuchtungsart mit vorwiegend oder ausschliesslich gegen die Fahrtrichtung abstrahlenden Leuchten sind qualitativ bekannt:

– Infolge der geringen Vertikalbeleuchtungsstärke in Fahrtrichtung erscheinen auf der Fahrbahn liegende oder fahrende Objekte als Silhouetten mit hohem Kontrast im Gesichtsfeld des Fahrers. Damit lassen sich die minimal notwendigen Fahrbahnleuchtdichten erheblich vermindern.

– Mit der Lichtverteilung der Gegenstrahlleuchten ergibt sich besonders mit spiegelnden Fahrbahnbelägen der Klasse R2 bis R4 eine deutlich erhöhte Leuchtdichteausbeute auf der Fahrbahn.

Als mögliche Nachteile müssen die Gefahr einer erhöhten Blendung, der Einfluss des Tageslichts auf die Kontrastverhältnisse in der Zone direkt hinter dem Portal sowie die Veränderung der Sehbedingungen durch die Streuleuchtdichten im Gesichtsfeld des Fahrers diskutiert werden.

Für die quantitative Abschätzung der positiven und negativen Aspekte der Gegenstrahlbeleuchtung fehlte bis anhin eine klare Definition der Qualitätsmerkmale und eine mathematische Formulierung der Anforderungen an die lichttechnischen Parameter im Bezug auf die zugrunde liegende Sehaufgabe des Fahrzeuglenkers. Die Ausgangsbasis der vorliegenden Arbeit liefert der kürzlich fertiggestellte technische Bericht des Subkomitees Tunnelbeleuchtung des TC 4.6 der CIE [4]. Die wichtigste Aussage dieser Untersuchung ist, dass in den Experimenten zur Bestimmung der notwendigen Fahrbahnleuchtdichte in der Einfahrzone eines Tunnels [5], auf welche sich die zurzeit gültigen Empfehlungen der CIE [6] stützen, die Sehaufgabe des Fahrzeuglenkers für die Praxis repräsentativ definiert ist und die gewonnenen Gesetzmässigkeiten eine sichere Grundlage für die Projektierung und den Betrieb von Tunnelbeleuchtungsanlagen darstellen.

2. Theoretische Analyse der grundlegenden Beziehungen

Obwohl die in diesem Kapitel gewonnenen Gesetzmässigkeiten rein theoretisch abgeleitet werden, stützen sie sich ausschliesslich auf Grundlagen, die, wie in der Einleitung bereits erwähnt, mit genügender Sicherheit durch die bisherige Praxis und in mehreren experimentellen Untersuchungen bestätigt wurden. Es ist deshalb kaum zu befürchten, dass die hier erarbeiteten Zusammenhänge für die Gegenstrahlbeleuchtung in der praktischen Anwendung widerlegt werden. Erste Untersuchungen der Sichtweite von Hindernissen in bestehenden Tunneln mit Gegenstrahlbeleuchtung bestätigen diese Annahme.

2.1 Die Fahrbahnleuchtdichte in der Einfahrzone

Die notwendige Fahrbahnleuchtdichte in der Einfahrzone eines Strassentunnels wird durch die Definition der zu erfüllenden Sehaufgabe festgelegt. Der Fahrzeuglenker, der mit an die Aussenleuchtdichteverteilung adaptierten Augen auf das Tunnelportal zufährt, soll ihn gefährdende Hindernisse im Tunnel mindestens aus der Distanz der Anhaltstrecke und mit einer genügend grossen Wahrscheinlichkeit wahrnehmen können. Die fundamentalen Experimente zur Erfassung dieses Problemkreises wurden von Schreuder [5] durchgeführt. Die zusammengefassten Resultate sind in Fig. 1 dargestellt.

L_1 ist die Leuchtdichte des in den Versuchen benützten homogenen Standardfeldes, das den Adaptationszustand der Augen des Beobachters definiert. Die Frage der messtechnischen Erfassung der komplexen, zeitlich veränderlichen Leuchtdichteverteilung in einer bestehenden Geländesituation im Anfahrbereich eines Tunnelportals, welche den gleichen Adaptationszustand der Augen bewirkt wie im Versuch eine homogene Leuchtdichte des Standardfeldes, wird an dieser Stelle nicht diskutiert. Dazu siehe Lit. [4]. L_2 ist die Leuchtdichte des Objekthintergrundes, somit der Fahrbahnleuchtdichte gleichzusetzen, und L_3 die Leuchtdichte des wahrzunehmenden Objektes.

Der Objektkontrast C ergibt sich gemäss seiner Definition wie folgt:

$$C = (1 - L_3/L_2) \quad (1)$$

Aus dem Kurvenverlauf in Fig. 1 ist ersichtlich, dass die notwendige Fahrbahnleuchtdichte L_2 stark vom Objektkontrast abhängt und

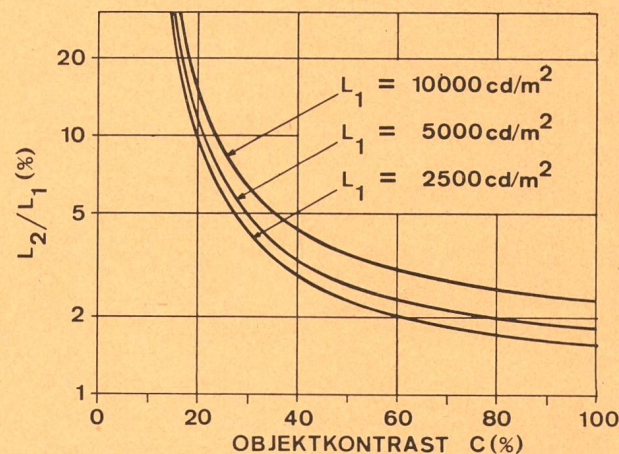


Fig. 1 Notwendige Fahrbahnleuchtdichte in der Tunnelleinfahrzone in Abhängigkeit vom Objektkontrast und der Aussenleuchtdichte

annähernd proportional zur Leuchtdichte des Standardfeldes L_1 ist. Mit einer für die praktische Anwendung genügenden Genauigkeit von ca. $\pm 20\%$ kann im weitem L_2/L_1 unabhängig von L_1 gesetzt werden (mit $L_1 = 5000 \text{ cd/m}^2$ der mittleren Kurve entsprechend). Der empirisch gefundene Zusammenhang lässt sich formelmässig wie folgt annähern:

$$L_2/L_1 = 1.36 \cdot 10^{-2} \exp(0.285 C^{-1.25}) \quad (2)$$

2.2 Der Kontrastgüteparameter

Die Leuchtdichte der sichtbaren Fläche eines Objektes kann unter der Annahme diffuser Reflexion aus der Vertikalbeleuchtungsstärke in der Blickrichtung E_v berechnet werden. Es ist:

$$L_3 = \beta \cdot E_v / \pi \quad (3)$$

β ist der Leuchtdichtefaktor der Oberfläche. Durch Einsetzen von Gl. 3 in Gl. 1 ergibt sich die Beziehung:

$$C = 1 - \frac{\beta}{\pi} (L_2/E_v)^{-1} \quad (4)$$

Der Objektkontrast C ist abhängig vom Leuchtdichtefaktor des Objektes und vom Verhältnis der Fahrbahnleuchtdichte zur Vertikalbeleuchtungsstärke in Fahrtrichtung, im folgenden als Kontrastgüteparameter bezeichnet. Diese Definitionsbezeichnung ergibt sich daraus, dass gemäss Gl. 4 der Objektkontrast (für positive Werte, also Silhouettensehen) mit wachsendem Kontrastgüteparameter grösser wird, andererseits L_2/E_v im Bezug auf die Beleuchtungsart eine messtechnisch leicht erfassbare summarische Beschreibung der Einstrahlungsgeometrie der Beleuchtung auf die Fahrbahn liefert. Je gegenstrahlender eine Beleuchtung ist, desto grösser wird wegen der abnehmenden Vertikalbeleuchtungsstärke auch der Kontrastgüteparameter. Im allgemeinen wird mit zunehmender Asymmetrie der Beleuchtung auch die Fahrbahnleuchtdichte grösser (siehe dazu Abschn. 3.1). Diese Bezeichnung wird noch durchsichtiger, wenn die notwendige Fahrbahnleuchtdichte gemäss Gl. 2 als Funktion des Leuchtdichtefaktors und des Kontrastgüteparameters dargestellt wird. (Einsetzen von Gl. 4 in Gl. 2.) Fig. 2 zeigt den Zusammenhang für symmetrische Beleuchtung. Die minimal notwendige Fahrbahnleuchtdichte, ausgedrückt durch das Verhältnis L_2/L_1 , ist dargestellt als Funktion des Leuchtdichtefaktors des Objektes. Parameter der Kurven ist L_2/E_v . Der Wert des Kontrastgüteparameters liegt in der Praxis je nach Fahrbahnbelag und Ausstrahlungsgeometrie der symmetrischen Leuchten zirka zwischen 0.1 und 0.25. Der linke Kurvenast beschreibt die Verhältnisse für Silhouettensehen ($L_3 < L_2$).

Mit zunehmendem Leuchtdichtefaktor des Seheobjektes steigt die notwendige Fahrbahnleuchtdichte an, der zugehörige Objektkontrast nimmt ab. Für ein von der Grösse des Kontrastgüteparameters abhängiges Gebiet von Leuchtdichtefaktoren wird der Objektkontrast so niedrig, dass auch eine Fahrbahnleuchtdichte, die gleich hoch wird wie die Leuchtdichte L_1 , nicht mehr genügt, das Objekt

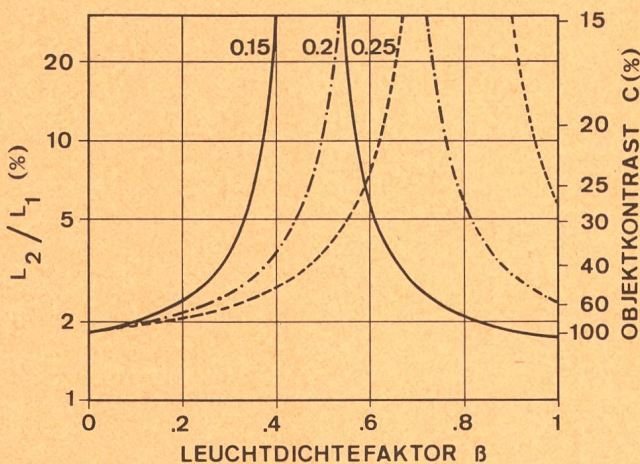


Fig. 2 Fahrbahnleuchtdichte und Objektkontrast in Abhängigkeit vom Leuchtdichtefaktor der Objekte für symmetrische Beleuchtungen mit verschiedenem Kontrastgüteparameter

wahrzunehmen. Mit weiter zunehmendem Leuchtdichtefaktor durchläuft der Objektkontrast den Wert Null und wird negativ (umgekehrtes Silhouettensehen). Auf dem rechten Kurvenast nimmt mit zunehmendem Leuchtdichtefaktor die notwendige Fahrbahnleuchtdichte monoton wieder ab, der Objektkontrast wird absolut grösser.

Der hier gezeigte Zusammenhang belegt deutlich einen grundsätzlichen Nachteil der symmetrischen Beleuchtung. Es existiert immer ein Bereich von Leuchtdichtefaktoren der Objektflächen, in dem die betreffenden Objekte wegen ihres zu geringen Kontrastes zur Fahrbahn nicht wahrgenommen werden können.

Ein grundsätzlich anderes Verhalten zeigt der Zusammenhang zwischen der Fahrbahnleuchtdichte und dem Leuchtdichtefaktor für grössere Werte des Kontrastgüteparameters, also bei asymmetrischer und Gegenstrahlbeleuchtung, dargestellt in Fig. 3. Die notwendige Fahrbahnleuchtdichte steigt auch hier mit zunehmendem Leuchtdichtefaktor an. Weil der Objektkontrast wegen der geringen Vertikalbeleuchtungsstärke gross genug bleibt, erreicht L_2/L_1 für Kontrastgüteparameter grösser als ca. 0.5 nie hohe Werte. Das heisst, dass alle Objekte unabhängig von ihrem Leuchtdichtefaktor mit Sicherheit wahrgenommen werden können.

2.3 Die Klassierung der Beleuchtung nach dem Kontrastgüteparameter

Mit der Definition des Kontrastgüteparameters ergibt sich eine einfache und zahlenmässig klare Möglichkeit, die bisher nicht näher erklärten Begriffe asymmetrische, bzw. Gegenstrahlbeleuchtung zu präzisieren und klare Grenzen im Bezug auf die notwendige Fahrbahnleuchtdichte zu setzen. Dazu wird der funktionale Zusammenhang zwischen Fahrbahnleuchtdichte und Kontrastgüteparameter bzw. Leuchtdichtekontrast in Abhängigkeit vom Kontrastgüteparameter mit dem Leuchtdichtefaktor als Bezugsgrösse in Fig. 4 dargestellt. Die Kurven zeigen die minimal notwendige Fahrbahnleuchtdichte (als Verhältnis L_2 zu L_1) als Funktion des Kontrastgüteparameters, welche die Sichtbarkeit der Objekte bis zu einem maximalen Leuchtdichtefaktor von 0.4 bzw. 0.7 bzw. 1 gewährleistet. Die Wahl des maximalen Leuchtdichtefaktors für noch sichtbare Hindernisse hängt ab von der statistischen Verteilung der auftretenden Leuchtdichtefaktoren von auf der Fahrbahn anzutreffenden Hindernissen und von der angestrebten Sicherheit. Fig. 5 zeigt eine mögliche Klassierung für einen maximalen Leuchtdichtefaktor von 0.7. Dieser Wert kann als recht sichere Grundlage betrachtet werden, da in der Praxis Objekte mit so hoher Reflexion ausserordentlich selten sind. Beleuchtungen mit einem Kontrastgüteparameter grösser als 0.5 erlauben eine minimal notwendige Fahrbahnleuchtdichte von 2.5% von L_1 und werden als Gegenstrahlbeleuchtungen bezeichnet. Beleuchtungen mit einem Kontrastgüteparameter zwischen ca. 0.3 und 0.5 verlangen einen Wert von L_2/L_1 von 5% und werden als asymmetrische Beleuchtungen bezeichnet. Für symmetrische Beleuchtung mit einem Kontrastgüteparameter kleiner als ca. 0.3 ist die Sichtbarkeit der Objekte je nach ihrem Leuchtdichtefaktor nicht

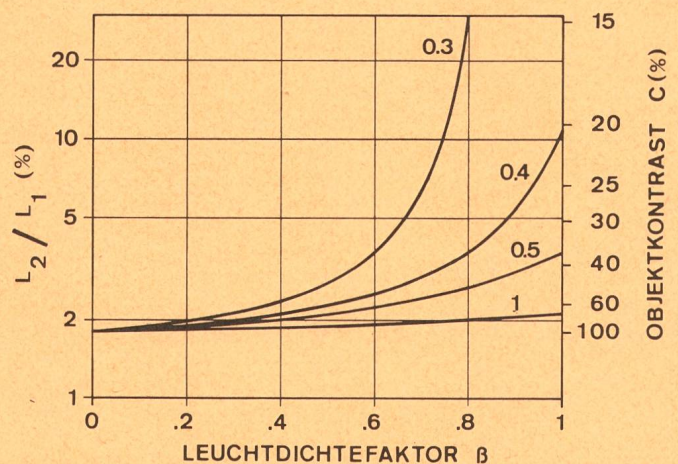


Fig. 3 Fahrbahnleuchtdichte und Objektkontrast in Abhängigkeit vom Leuchtdichtefaktor der Objekte für asymmetrische und gegenstrahlende Beleuchtungen mit verschiedenem Kontrastgüteparameter

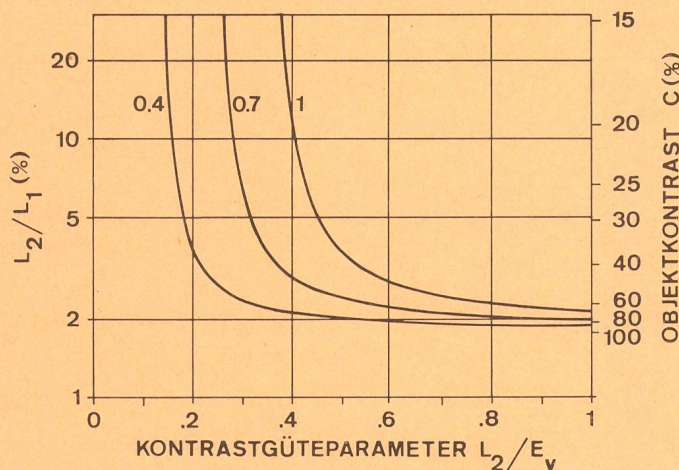


Fig. 4 Fahrbahnleuchtdichte und Objektcontrast in Abhängigkeit vom Kontrastgüteparameter für verschiedene Leuchtdichtefaktoren

mehr gesichert. Die notwendige Fahrbahnleuchtdichte muss nach den Empfehlungen der CIE für symmetrische Beleuchtung [6] gewählt werden ($L_2/L_1 = 10\%$).

3. Die Lichttechnischen Parameter einer Tunnelleinfahrzonenbeleuchtung in der Praxis

Die im Abschnitt 2 hergeleiteten Gesetzmässigkeiten beziehen sich auf die allgemeine Situation in der Einfahrzone eines Strassentunnels. Aus welchen Beiträgen sich im konkreten Anwendungsbeispiel die massgebenden lichttechnischen Grössen einer Tunnelbeleuchtungsanlage (Fahrbahnleuchtdichte, Kontrastgüteparameter usw.) zusammensetzen und welche zusätzlichen Einflüsse zu berücksichtigen sind, wird im folgenden diskutiert.

3.1 Die Leuchtdichteausbeute auf der Fahrbahn

Die von einer Beleuchtungsanlage erzeugte Fahrbahnleuchtdichte hängt ab von der Anordnung der Leuchten bezüglich der Strasse, der Lichtstärkenverteilung der Leuchten und den Reflexionseigenschaften des Fahrbahnbelags. Zur Erfassung der Wirkung der Ausstrahlungscharakteristik der Leuchten auf die Leuchtdichteausbeute auf der Fahrbahn wurden die lichttechnischen Parameter einer Tunnelbeleuchtungsanlage mit verschiedenen Leuchten unter konstanten übrigen Bedingungen mit dem CIE-Computerprogramm [7] berechnet. Die Resultate sind in Tab. I zusammengestellt. Die Werte beziehen sich für alle Leuchten auf denselben Gesamtlichtstrom einer 400-W-Natriumhochdrucklampe. Weil der Anteil des auf die Fahrbahn fallenden Lichtstroms für jede Leuchte leicht unterschiedlich ist, zeigen die Werte lediglich die allgemeine Tendenz auf, und der quantitative Vergleich der verschiedenen Beleuchtungsgeometrien (symmetrisch, asymmetrisch, gegenstrahlend) ist mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Das grundsätzliche Verhalten ist jedoch eindeutig ersichtlich. Mit dem diffusen Belag R 1 ist die Leuchtdichteausbeute mehr oder weniger von der Lichteinfallsgometrie unabhängig. Mit dem stärker spiegelnden Belag R 3 ergibt eine Gegenstrahlleuchte trotz des kleineren mittleren Leuchtdichtekoeffizienten ($q_0 = 0.07$ für R 3, $q_0 = 0.1$ für R 1) eine erheblich höhere Fahrbahnleuchtdichte.

3.2 Der Kontrastgüteparameter einer Tunnelbeleuchtungsanlage

In einer realen Tunnelbeleuchtungsanlage wird der Kontrastgüteparameter nicht allein von der Ausstrahlungsgeometrie der Leuchten bestimmt. Er hängt einerseits, wie bereits gezeigt, über die Fahrbahnleuchtdichte von den Eigenschaften des Belags ab. Andererseits setzt sich die Vertikalbeleuchtungsstärke als zweite Einflussgrösse aus einem direkten Anteil von den Leuchten und einem indirekten Anteil von an der Tunnelwand und der Fahrbahn reflektiertem Licht zusammen. Der Beitrag der Fahrbahn kann im allgemeinen vernachlässigt werden, nicht aber der Beitrag der Tunnelwände.

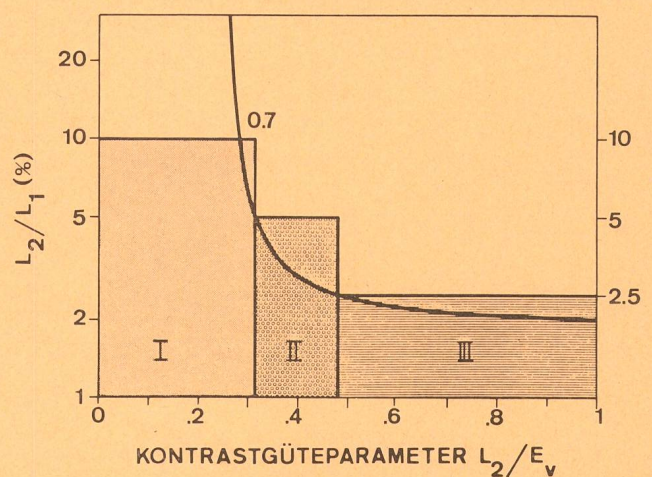


Fig. 5 Klassierung der Tunnelleinfahrzonenbeleuchtung nach dem Kontrastgüteparameter

I: symmetrisch, II: asymmetrisch, III: gegenstrahlend

Unter der vereinfachenden Annahme einer bis zu einer bestimmten Höhe ab Boden homogen und diffus leuchtenden Wand kann der Wandanteil der Vertikalbeleuchtungsstärke E_{vw} für ein gegebenes Tunnelprofil berechnet werden. Für eine typische Geometrie eines zweispurigen Nationalstrassentunnels ergibt die Rechnung für den Mittelwert auf der Fahrbahn:

$$E_{vw} \text{ (in lx)} \approx 0.5 L_w \text{ (in cd/m}^2\text{)} \quad (5)$$

Die Leuchtdichte der Tunnelwände L_w sollte nach den Leitsätzen für Tunnelbeleuchtung [8] etwa gleich gross sein wie die Fahrbahnleuchtdichte.

Mit der Setzung $L_2 \approx L_w$ ergibt sich für die Abschätzung des Wandeinflusses auf den Kontrastgüteparameter:

$$E_{vw} \text{ (in lx)} \approx 0.5 L_2 \text{ (in cd/m}^2\text{)} \quad (6)$$

und eingesetzt:

$$L_2/E_v = \frac{L_2}{E_{vd} + E_{vw}} \approx \frac{L_2}{E_{vd} + 0.5 L_2} \quad (7)$$

Für eine reine Gegenstrahlbeleuchtung (Direktanteil $E_{vd} = 0$) kann in der Praxis bei leitsatzgerechter Beleuchtung der Kontrastgüteparameter einen Wert von ca. 2 erreichen. Mit zunehmendem Anteil an Direktstrahlung nimmt dieser Wert ab.

Wegen der Abhängigkeit des Kontrastgüteparameters vom Fahrbahnbelag, von der Tunnelwand und vom Tunnelprofil dürfen verschiedene Leuchten nur bezüglich ein und derselben Anlage unter gleichen Voraussetzungen miteinander verglichen werden. (Siehe dazu Tabelle I.)

Lichttechnische Parameter einer Tunnelbeleuchtungsanlage mit Leuchten unterschiedlicher Lichtstärkenverteilung. (Mittelwerte von je drei Leuchten)

Tabelle I

	I	II	III
Horizontalbeleuchtungsstärke E_h	1450	1350	1200
Vertikalbeleuchtungsstärke E_{vd}	600	250	40
Fahrbahnleuchtdichte für Belag R 1 $L_2(R 1)$	85	90	90
Fahrbahnleuchtdichte für Belag R 3 $L_2(R 3)$	80	195	130
Kontrastgüteparameter für Belag R 1 $L_2/E_v(R 1)$	0.13	0.30	1.1
Kontrastgüteparameter für Belag R 3 $L_2/E_v(R 3)$	0.12	0.33	1.2

I: Symmetrische Leuchten
II: Asymmetrische Leuchten
III: Gegenstrahlleuchten

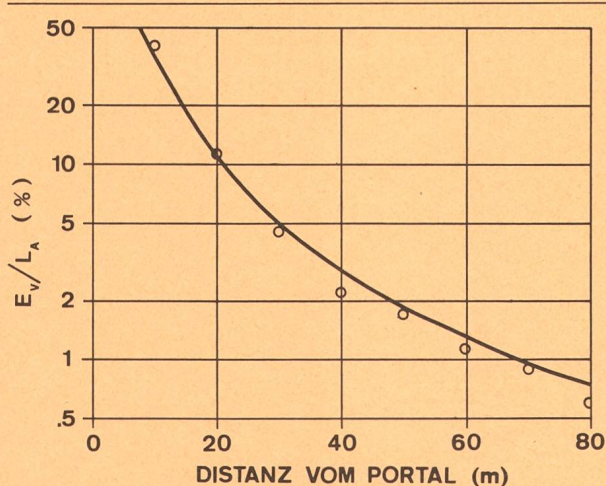


Fig. 6 Vertikalbeleuchtungsstärke durch den Tageslichteinfall in Abhängigkeit vom Abstand vom Portal

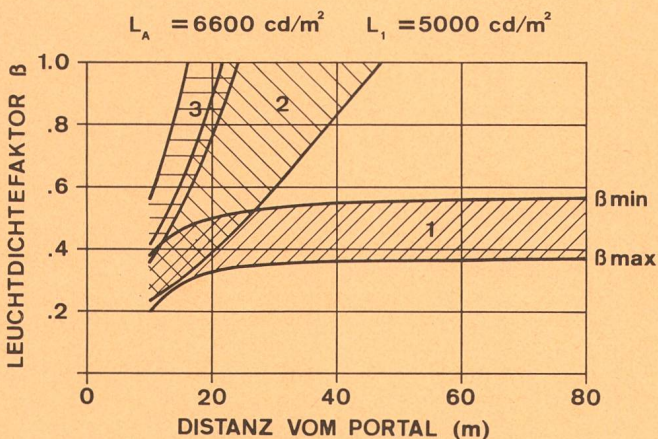


Fig. 7 Beeinflussung der Sehbedingungen durch den Tageslichteinfall in Abhängigkeit vom Portalabstand

- 1: symmetrisch, $L_2 = 500 \text{ cd/m}^2$, $L_{20}/E_{v0} = 0,15$
- 2: gegenstrahlend, $L_2 = 125 \text{ cd/m}^2$, $L_{20}/E_{v0} = 2,0$
- 3: gegenstrahlend, $L_2 = 250 \text{ cd/m}^2$, $L_{20}/E_{v0} = 2,0$

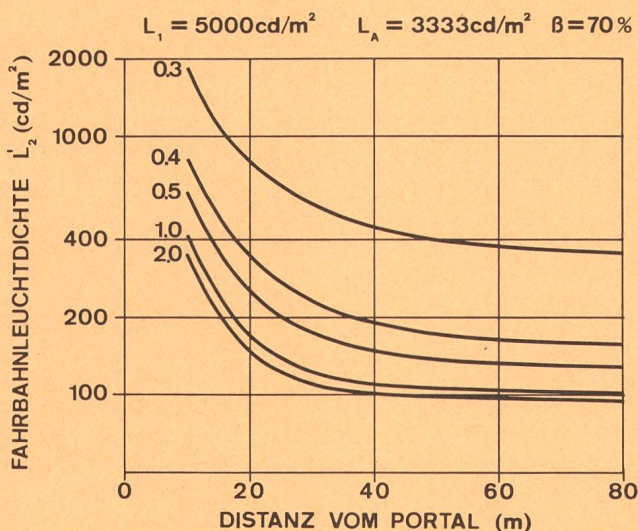


Fig. 8 Anpassung der Fahrbahnleuchtdichte für konstante Sehbedingungen unter dem Einfluss des Tageslichts für verschiedene Kontrastgüteparameter der Beleuchtungsanlage

3.3 Der Einfluss des Tageslichts auf die Qualität der Tunnelbeleuchtung

Die Beleuchtung der Einfahrzone eines Tunnels muss von den gestellten Anforderungen her für die Situation am Tag konzipiert werden. Daher muss der Einfluss des vom Portal her einfallenden Tageslichtes auf die Beleuchtungsverhältnisse und die Sehbedingungen untersucht werden. Unter der vereinfachenden Voraussetzung einer homogenen und diffusen Leuchtdichte in der Ebene des Tunnelportals – einer bei klarem oder bedecktem Himmel und nicht zu extremen Geländesituationen vor dem Portal recht gut zutreffenden Annahme – lassen sich die vom Tageslicht erzeugten Beleuchtungswerte nicht zu nahe am Portal näherungsweise berechnen. Für ein halbkreisförmiges Portal mit dem Radius r gilt für die Mittelwerte der Vertikalbeleuchtungsstärke und der Fahrbahnleuchtdichte:

$$E_v/L_A \approx \pi/2 [1 + (d/r)^2]^{-1} \quad (8)$$

$$L_2/L_A \approx q_m \cdot E_v \quad (9)$$

L_A ist die mittlere Leuchtdichte der vom Tunnelinnern sichtbaren Portalöffnung, d der Abstand vom Tunnelportal und q_m der mittlere Leuchtdichtekoeffizient des Fahrbelags für die betrachtete Einstrahlungsgeometrie. In Fig. 6 ist der Verlauf der Vertikalbeleuchtungsstärke für ein typisches Tunnelprofil dargestellt. Die eingezeichneten Punkte stammen aus Messungen in einem bestehenden Tunnel. Die Lage der Messpunkte bezüglich der mit Gl. 8 berechneten Kurve zeigt, dass die Näherung befriedigend ist. Somit kann in vielen Fällen der Tageslichteinfluss in einem zu beurteilenden Tunnel durch eine einfache Messung der Portalleuchtdichte vom Innern des Tunnels her abgeschätzt werden.

Mit Hilfe der allgemeinen Gesetzmässigkeiten (Gl. 2 und 4) und den vorstehenden Näherungsformeln (Gl. 8 und 9) kann der Einfluss des Tageslichts auf die Sichtverhältnisse für die verschiedenen Beleuchtungsgeometrien berechnet werden. In Fig. 7 sind die Resultate einer solchen Rechnung für eine typische Tunnelgeometrie, mit der Praxis entsprechenden Annahmen über die Werte der Leuchtdichten L_A und L_1 , für drei repräsentative Fälle der Beleuchtungsgeometrien dargestellt. Zur Beschreibung der Sehverhältnisse dient der maximale bzw. minimale Leuchtdichtefaktor von Objekten, welche unter den vorgegebenen Bedingungen noch wahrgenommen werden können. Für eine symmetrische Beleuchtung wird das Gebiet der wegen des zu geringen Kontrastes nicht sichtbaren Hindernisse in der Portalnähe zu kleineren Leuchtdichtefaktoren verschoben. Damit geraten Leuchtdichtefaktoren, welche statistisch bei realen Hindernissen häufig auftreten, in den unsichtbaren Bereich. Zudem bleibt der grundsätzliche Nachteil der symmetrischen Beleuchtung über die ganze Einfahrzone erhalten.

Für eine Gegenstrahlbeleuchtung gemäss den Anforderungen in Abschnitt 2.3 (Bereich 2 in Fig. 7) wird durch das Tageslicht der Kontrastgüteparameter so stark verkleinert, dass die Gesamtbeleuchtung in der Zone bis ca. 25 m hinter dem Portal symmetrisch wird und damit ebenfalls Hindernisse mit bestimmten Leuchtdichtefaktoren unsichtbar werden.

Für eine Gegenstrahlbeleuchtung mit doppelt so hoher wie erforderlicher Fahrbahnleuchtdichte (Bereich 3) ist der Tageslichteinfluss nur auf einer sehr kurzen Strecke wirksam. Durch eine gezielte Anpassung der Fahrbahnleuchtdichte in Abhängigkeit vom Abstand vom Tunnelportal lässt sich der Tageslichteinfall korrigieren. In den Fig. 8...10 sind die notwendigen von der Beleuchtungsanlage zu erzeugenden Fahrbahnleuchtdichten L_s' für eine derartige Korrektur dargestellt. Die Berechnung wurde mit der Forderung von über der ganzen Einfahrzone gleichbleibenden Sehbedingungen durchgeführt, mathematisch formuliert durch einen konstanten maximalen Leuchtdichtefaktor für noch wahrnehmbare Objekte. Zugrunde gelegt ist eine Beleuchtungsanlage mit vorgegebenen und längs der Tunnelachse konstantem Kontrastgüteparameter L_{20}/E_{v0} für die Anlage allein. Damit können in einer praktischen Ausführung über die ganze Einfahrzone die gleichen Leuchten in der gleichen Aufhängeposition bezüglich der Fahrbahnebene verwendet und die Anpassung der Fahrbahnleuchtdichte allein durch Verändern des Leuchtenabstandes bzw. der Zahl der Leuchtenreihen durchgeführt werden.

Fig. 8 zeigt den Verlauf der Fahrbahnleuchtdichte für verschiedene Kontrastgüteparameter der Beleuchtungsanlagen. Für eine asymmetrische Beleuchtung ($L_{20}/E_{v0} < 0.5$) werden die Leuchtdichte-

anforderungen in der Portalzone so hoch, dass sie mit einem vertretbaren Aufwand technisch kaum realisiert werden können. Dagegen verlangt eine gute Gegenstrahlbeleuchtung ($L_{20}/E_{v0} > 1$) für die Korrektur des Tageslichteinflusses nur auf den ersten ca. 20 Metern wesentlich erhöhte Fahrbahnleuchtdichten. Zudem lassen sich die erforderlichen Werte bis zu ca. 400 cd/m^2 mit einem recht geringen Mehraufwand erreichen.

In der Zone direkt hinter dem Portal ist der Tageslichteinfall so stark wirksam, dass er sich kaum über die beschriebene Korrektur kompensieren lässt. Im allgemeinen ist diese Zone aber durch den Einfall des Sonnenlichtes ausgeleuchtet und zudem sehr kurz. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, mittels querstrahlenden Leuchten in der Portalzone befindliche Objekte durch seitliche Schlagschatten sichtbar zu machen [10].

Fig. 9 zeigt die notwendige Anpassung der Fahrbahnleuchtdichte für drei verschiedene Aussenlichtverhältnisse mit einer sehr guten Gegenstrahlbeleuchtung ($L_{20}/L_{v0} = 2.0$) Kurve I entspricht einer extremen Situation eines Tunnelportals an einem offenen Berghang. In der Fahrtrichtung bestimmt vor allem das Gelände die Leuchtdichte L_1 , im Portal gegen aussen ist mehrheitlich der helle Himmel sichtbar. Kurve II repräsentiert die Situation eines Tunnels im offenen Gelände und Kurve III ein Tunnelportal im Berggebiet mit wenig sichtbarem Himmel.

In Fig. 10 ist der Einfluss der Wahl des maximal zulässigen Leuchtdichtefaktors für noch wahrnehmbare Objekte auf die Korrektur des Tageslichteinflusses dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass weniger scharfe Anforderungen an die Sichtbarkeit von Hindernissen keine wesentlichen Einsparungen in der Dimensionierung einer Anlage bringen.

3.4 Die Verminderung des Kontrastes durch die Streuleuchtdichten im Gesichtsfeld des Fahrers

Der Fahrzeuglenker, der auf ein Tunnelportal zufährt, wird ein Hindernis im allgemeinen nicht mit dem durch die Beleuchtung inklusiv Tageslichtanteil gegebenen Kontrast wahrnehmen. Die von der Streuung an Staubteilchen und Wasserdampf in der Luft sowie von Reflexions- und Streueffekten an der Windschutzscheibe herührenden Streuleuchtdichten addieren sich im Gesichtsfeld des Fahrers zur Fahrbahn- und zur Hindernisleuchtdichte und vermindern den Kontrast gemäss der Formel:

$$C' = \frac{L_2 - L_3}{L_2 + L_s} \quad \left(C = \frac{L_2 - L_3}{L_2} \right) \quad (10)$$

L_s ist die Summe der Streuleuchtdichten von der Luft und der Windschutzscheibe. (Die äquivalente Schleierleuchtdichte der Augen wird in der Ermittlung der die Aussenhelligkeit repräsentierenden Leuchtdichte L_1 berücksichtigt [4] und kann für die an dieser Stelle diskutierten Effekte weggelassen werden). Die infolge des reduzierten Kontrastes bewirkte Veränderung der Sehbedingungen kann analog zu den Ausführungen über den Tageslichteinfall in 3.3 durch den maximal zulässigen Leuchtdichtefaktor von noch wahrnehmbaren Objekten beschrieben werden. Dessen Abhängigkeit von der Streuleuchtdichte L_s zeigt Fig. 11 für drei Fälle von Gegenstrahlbeleuchtungen, Fig. 12 für eine symmetrische Beleuchtung. Die zugrunde gelegten Fahrbahnleuchtdichten entsprechen der Klassierung gemäss Abschnitt 2.3.

Bei einer symmetrischen Beleuchtung bewirkt die Streuleuchtdichte eine Vergrößerung des Bereichs der Leuchtdichtefaktoren nicht sichtbarer Objekte. Bei einer Gegenstrahlbeleuchtung tritt bis zu einer vom Kontrastgüteparameter abhängigen maximalen Streuleuchtdichte keine Verschlechterung der Sehbedingungen ein. Bei einem Vergleich des Streulichteinflusses zwischen einer symmetrischen und einer gegenstrahlenden Beleuchtung ist zu berücksichtigen, dass die symmetrische Beleuchtung eine vier mal höhere Fahrbahnleuchtdichte aufweisen muss. Damit ist der Einfluss für die gleiche Streuleuchtdichte naturgemäss geringer. Die in einer vorgegebenen Geländesituation auftretenden Streuleuchtdichtewerte hängen vom Aussenhelligkeitsniveau, von den Wetterverhältnissen, vom Zustand der Windschutzscheibe sowie vom Wagentyp ab und können daher kaum mit repräsentativer Sicherheit angegeben werden. Aus den Resultaten von einigen Messungen der Luftstreuleuchtdichte und mit einer Abschätzung des Beitrags der Frontscheibe lässt sich schliessen, dass unter normalen Verhältnissen mit Streuleuchtdichten zwischen ca. 50 und 250 cd/m^2 gerechnet werden muss.

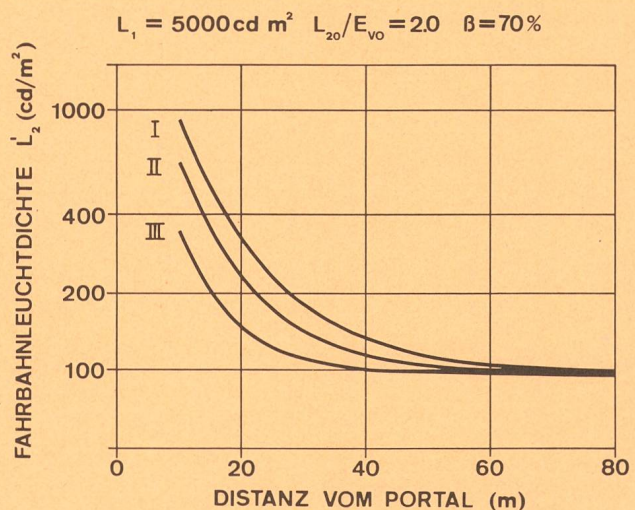


Fig. 9 Anpassung der Fahrbahnleuchtdichte für konstante Sehbedingungen unter dem Einfluss des Tageslichts für verschiedene Portalleuchtdichten

- I: $L_A = 10\,000 \text{ cd}/\text{m}^2$
- II: $L_A = 6\,670 \text{ cd}/\text{m}^2$
- III: $L_A = 3\,330 \text{ cd}/\text{m}^2$

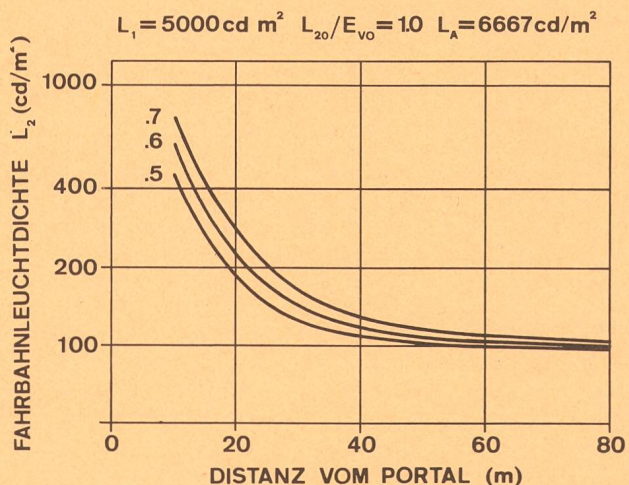


Fig. 10 Anpassung der Fahrbahnleuchtdichte für konstante Sehbedingungen unter dem Einfluss des Tageslichts für verschiedene maximale Leuchtdichtefaktoren

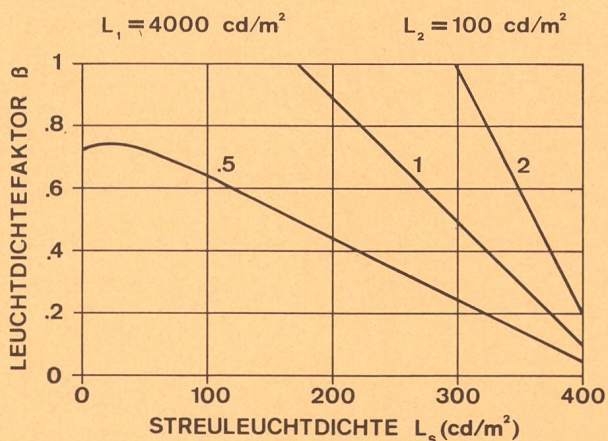


Fig. 11 Beeinflussung der Sehbedingungen durch Streuleuchtdichten für gegenstrahlende Beleuchtung mit verschiedenem Kontrastgüteparameter

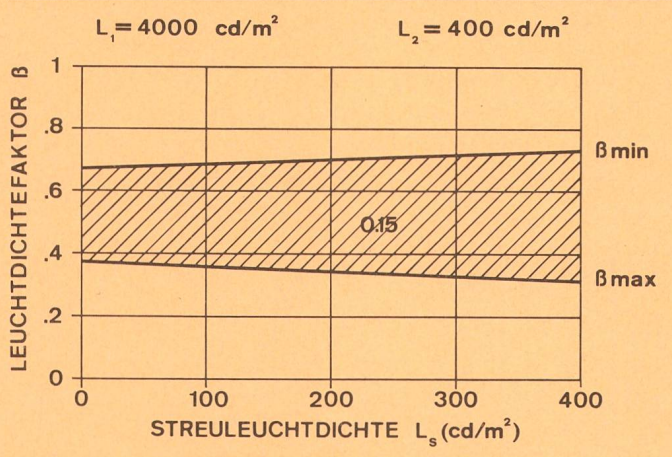


Fig. 12 Beeinflussung der Sehbedingungen durch Streuleuchtdichten für symmetrische Beleuchtung

3.5 Blendung

Die zurzeit gültigen Empfehlungen für die Blendungsbewertung in der Strassenbeleuchtung [9] lassen sich auf die Beleuchtung der Einfahrzone von Strassentunneln nicht anwenden. Für die physiologische wie für die psychologische Blendung liegen die Leuchtdichteniveaus weit über dem Anwendungsbereich der entsprechenden Bewertungsformel. Die von den Leuchten erzeugte Schleierleuchtdichte als Mass zur Bewertung der physiologischen Blendung fällt zudem gegenüber der von der Aussenleuchtdichteverteilung herrührenden im allgemeinen nicht ins Gewicht. Die Frage der Blendungsbewertung in der Tunnelbeleuchtung muss daher von den experimentellen Grundlagen her zuerst erarbeitet werden.

Immerhin lassen sich mit dem heutigen Stand des Wissens mindestens einige qualitative Anforderungen ableiten. Beispielsweise sollten die vom Fahrer aus sichtbaren Leuchten keine extremen Leuchtdichten aufweisen, insbesondere sollten unter diesem Winkelbereich die Lampen in den Leuchten nicht direkt sichtbar sein.

Die zur Vermeidung der Blendung gestellten Anforderungen an eine Tunnelleuchte können die technische Realisierung einer Gegenstrahlleuchte schwieriger gestalten, weil der Spielraum in der Konstruktion schon durch die Randbedingungen der angestrebten Lichtverteilung mehr eingeschränkt wird als bei einer symmetrischen Leuchte.

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

1. Bei entsprechender Wahl der lichttechnischen Parameter gewährleistet eine Gegenstrahlbeleuchtung grundsätzlich bessere Sehbedingungen als eine konventionelle symmetrische Tunnelbeleuchtung. Deren fundamentaler Nachteil, dass die Kontraste je nach dem Leuchtdichtefaktor der Objekte von positiven zu negativen Werten wechseln können, und damit immer eine bestimmte Klasse von Hindernissen unsichtbar werden kann, tritt bei einer Gegenstrahlbeleuchtung prinzipiell nicht auf.

2. Die Definition des Kontrastgüteparameters ermöglicht eine klare quantitative Klassierung der Beleuchtungsgeometrie im Bezug auf die Anforderungen an die Fahrbahnleuchtdichte sowie bezüglich der durch den Tageslichteinfall und durch Streuleuchtdichten verursachten Veränderung der Sehbedingungen. Dabei ist zu beach-

ten, dass der Wert des Kontrastgüteparameters einer Anlage nicht nur durch die Ausstrahlungsgeometrie der Leuchten gegeben ist, sondern im wesentlichen Mass von den Reflexionseigenschaften des Fahrbahnbelags und der Tunnelwände abhängig ist.

3. Eine Gegenstrahlbeleuchtung in einer Tunnelleinfahrzone ermöglicht wegen der viermal geringeren notwendigen Fahrbahnleuchtdichte und der besseren Leuchtdichteausbeute gegenüber einer nach den CIE-Empfehlungen konzipierten symmetrischen Beleuchtung eine Energieeinsparung um den Faktor vier bis sechs und entsprechend geringere Installationskosten.

Zudem ist es damit möglich, hohe Aussenleuchtdichten von 8000 cd/m² und mehr, wie sie bei Tunnelleinfahrten im offenen Gelände auftreten können, mit einem vertretbaren Aufwand abzudecken.

4. Der Einfluss des vom Portal her in den Tunnel einfallenden Tageslichtes, der im übrigen bis anhin bei der Planung von Tunnelbeleuchtungen kaum berücksichtigt wurde, wirkt sich in einer Gegenstrahlbeleuchtungsanlage weniger stark und nur für einen kurzen Teil der Einfahrzone aus. Zudem ist es in der Mehrzahl der in der Praxis auftretenden Fälle möglich, die Wirkung des Tageslichtes mit einem akzeptablen Mehraufwand zu korrigieren und konstante Sehbedingungen über praktisch der ganzen Einfahrzone zu schaffen.

5. Die Kontrastverminderung durch die im Gesichtsfeld des Fahrers überlagerten Streuleuchtdichten wirkt sich bei einer Gegenstrahlbeleuchtung mit entsprechend gewähltem Kontrastgüteparameter erst bei Streuleuchtdichten aus, welche in der Praxis nicht sehr häufig auftreten.

6. Die Berücksichtigung aller hier diskutierten Effekte zeigt deutlich, dass für die Konzeption einer Beleuchtungsanlage für eine Tunnelleinfahrzone eine Gegenstrahlbeleuchtung mit möglichst hohem Kontrastgüteparameter unter Verwendung von praktisch rein gegenstrahlenden Leuchten vorzuziehen ist. Diese Wahl gewährt zusätzlich eine sichere Reserve bezüglich der Unsicherheit, mit der in der Planung die Reflexionseigenschaften des Fahrbahnbelags und der Einfluss der Tunnelwände behaftet sind. Damit kann vermieden werden, dass eine als Gegenstrahlbeleuchtung projektierte Anlage durch nicht vorhersehbare veränderte Randbedingungen – insbesondere einen dunklen Fahrbahnbelag – aus dem gewünschten Klassierungsbereich herausfallen kann und danach die Anforderungen nicht mehr erfüllt.

Literatur

- [1] F. Mäder: Verwendung von besonderen asymmetrischen Leuchten (Schrägstrahlern) zur Beleuchtung von Tunneln. Bull. SEV 60(1969)25, S. 1177...1181.
- [2] E. Freiburghaus: Beleuchtung von Autobahnen und Expreßstrassen, Strasse und Verkehr 59(1973)8, S. 468...475.
- [3] E. Freiburghaus: Neuzzeitliche Lösungen in der Strassenbeleuchtungstechnik, 1. Kongress über das Sehen und die Strassensicherheit, Tagungsbericht (1976), S. 317...325. Prévention Routière Internationale 91310 Linas-Montlhéry (France).
- [4] Technischer Bericht «Tunnel entrance lighting, a survey of fundamentals for determining the luminance in the threshold zone, CIE (TC-4.6) 10th draft (1981), erscheint demnächst.
- [5] D.A. Schreuder: The lighting of vehicular traffic tunnels (1964), N.V. Philips Gloeilampenfabrieken Eindhoven.
- [6] Internationale Empfehlungen für Tunnelbeleuchtung Publ. CIE No. 26 (TC-4.6) 1973.
- [7] Calculation and measurement of luminance and illuminance in road lighting Publ. CIE No 30 (TC-4.6) 1976.
- [8] Leitsätze für öffentliche Beleuchtung 2. Teil: Strassentunnel und -unterführungen. SEV 4024.1968.
- [9] Glare and uniformity in road lighting installations Publ. CIE No 31 (TC-4.6) 1976.
- [10] E. Freiburghaus: Bernische Kraftwerke AG, persönliche Mitteilung.

Adresse des Autors

Dr. Peter Blaser, Eidg. Amt für Messwesen, Lindenweg 50, 3084 Wabern.

Redaktor der Mitteilungen der SLG:

A. O. Wüllemelin, Sekretär der Schweizerischen Lichttechnischen Gesellschaft (gegründet 1922), Postfach, 8034 Zürich, Telefon 01/65 86 37

Rédacteur des Informations de l'USL:

A. O. Wüllemelin, secrétaire de l'Union Suisse pour la Lumière (fondée en 1922), case postale, 8034 Zurich, téléphone 01/65 86 37