

TUNNELEINFAHRTBELEUCHTUNG: DIE DRITTE GENERATION

Vortrag für die Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften LTAG, NSVV, SLG, LiTG: Licht '80, Berlin, 27.- 29. Oktober 1980, Tagungsband 1, S.162-167. Lichttechnische Gesellschaft e.V., Berlin, 1980

R-80-27

Dr. D.A. Schreuder

Voorburg, 1980

Forschungsgesellschaft für Verkehrssicherheit SWOV, die Niederlande

1. EINLEITUNG

Tunnel für den Strassenverkehr werden normalerweise gebaut aus verkehrstechnischen Gründen. Es gibt irgendein Hindernis, das verhindert dass der Verkehr nach Wunsch fliesst; der Bau eines Tunnels kann in vielen Fällen das Hindernis vermeiden. Hindernisse dieser Art sind zum Beispiel lebhaft befahrene Flüsse und Kanäle; Startbahnen von Flughäfen, Eisenbahnanlagen u.s.w. aber auch Berge und Hügel.

Es versteht sich dass, weil der Tunnel dazu dient ein Hindernis zu vermeiden, der Tunnel selbst nicht wieder zu ein Hindernis werden soll. Dazu muss der Verkehr im Tunnel in wenigstens gleichem Mass der Sicherheit und Geläufigkeit abgehandelt werden können wie auf den anliegenden offenen Strassenteilen. Aus der Praxis hat sich ergeben dass die Geläufigkeit und wahrscheinlich auch die Sicherheit gerade bei dem Tunneleingang am Tage in erheblichem Mass herabgesetzt werden kann, und dass eine gute Einfahrtbeleuchtung, gerade am Tage, eine beträchtliche Verbesserung geben kann. Es versteht sich dass dieses vor allen gilt für diejenige Verkehrsweisen wobei die visuellen Faktoren eine durchschlaggebende Rolle spielen; die folgenden Betrachtungen gelten daher ins besondere für Tunnel für den Kraftverkehr.

Die schwierigsten Probleme bei der Tunnelbeleuchtung stellen sich tagsüber ein, und zwar ins besondere bei der Tunneleinfahrt, weil es mit den heutigen Mitteln technisch und wirtschaftlich unmöglich ist, ein Tunnelinneres in befriedigender Weise ebenso hell zu beleuchten wie eine von der Sonne beschienene Strasse im Freien. Die zur Gewährleistung der Verkehrssicherheit notwendige Erkennbarkeit von Einzelheiten wird durch zwei Eigenschaften des menschlichen Sehorgans begrenzt. Die erste Beschränkung wird gebildet durch die Unmöglichkeit kritische Details in einem dunklen Teil des Gesichtfeldes wahrnehmen zu können, wenn die Empfindlichkeit des Auges auf die hohe Leuchtdichte im Freien eingestellt ist. Diese Erscheinung, als "Induktion" bezeichnet, hat zur Folge dass auch eine gut beleuchtete Tunneleinfahrt sich manchmal dem herannahenden Kraftfahrer als ein "schwarzes Loch" darbietet.

Die zweite Beschränkung besteht darin, dass oft erhebliche Zeit verstreicht, bevor die Empfindlichkeit des Sehorgans sich einem niedrigeren Leuchtdichteniveau angepasst hat (Problem der Adaptation).

2. DIE ERSTE GENERATION

Die ersten Tunnel, speziell für den Kraftverkehr geplant, sind in den zwanziger Jahren gebaut worden. Die noch älteren Tunnel wurden nur von Langsamverkehr benutzt, so dass keine Sichtprobleme bestanden. Wir wissen übrigens wenig von der Beleuchtung dieser alten Tunnel. Der Kraftverkehr aber stellte erhebliche Forderungen an die Beleuchtung.

Im Anfang achtete man dabei in erster Linie auf eine gute Beleuchtung des Tunnelinnern, obwohl auch die Eingang schon betrachtet wurde: man baute auf ein paar Dutzend Meter eine Beleuchtungsinstallation womit man eine Beleuchtungsstärke von etwa 1000 Lux zu erreichen versuchte. Auch sind in Einzelfällen Tageslichttraster beim Tunneleingang installiert worden.

Es wurde keine allgemein anwendbaren, wissenschaftlichen Untersuchungen durchgeführt. Man lernte in erster Linie aus der Praxis. Diese Praxis wurde von einigen Studien, die hinwiesen auf spezielle Probleme wie die sich bei einzelnen Tunneln zeigten, ergänzt. Man lese hierzu zum Beispiel die Veröffentlichungen von Myers (1939) und von Van Bruggen (1941). Diese Studien führten dann wieder manchmal zu Lösungen für diese Einzelfällen. Die Anlagen für Tunnel-einfahrtbeleuchtung aus der ersten Generation sind gegründet auf die Auffassung dass man eine gewisse Zeit braucht für die Adaptation von der hellen Umgebung aussen zum Tunnelinnern, und dass diese Adaptation bestimmt wird von den Veränderungen im Durchmesser der Augenpupille. Hierzu wurden meistens die Messungen von Nutting (1920) gebraucht, die zu einer Adaptationszeit von etwa 5 bis 10 Sekunden führten. Die an und für sich bekannten Tatsachen über die eigentliche Augeadaptation wurden überhaupt nicht in Betracht genommen, auch nicht dass durch Erscheinungen der Induktion die Wahrnehmung im dunkelen Tunnelinnern erheblich beschränkt werden kann wenn die Umgebung direkt um das Tunnelportal eine hohe Leuchtdichte aufweist.

Es hat sich ergeben dass diese Art Beleuchtung wie sie zum Beispiel angewandt worden ist in Hamburg, New York (Hollandtunnel und Lincolntunnel), Antwerpen und Rotterdam bei höherer Verkehrs-

belastung weniger geeignet ist. Daher hat man bei dem Entwurf für den Velsertunnel, in den fünfziger Jahren, eine viel längere Einfahrtsstrecke gewählt mit einem erheblich höheren Lichtniveau. Statt 1000 Lux sind Leuchtdichten von 800 cd/m^2 gemessen worden (Siehe Schreuder, 1964). Man hat aber bei diesem Tunnel den zeitabhängigen Erscheinungen wenig Aufmerksamkeit gewidmet. Man hat eine Beleuchtungsanlage gewählt die oft zu erheblicher Störung durch Flimmererscheinungen Anlass gibt.

Schliesslich sind die Tunnel aus dieser Periode gekennzeichnet durch die Tatsache dass die Gestaltung und auch die Wahl der Materialien der Eingangspartie nicht basiert ist auf Nützlichkeitsgründen aber auf ästhetischen Gründen. Dieses hat in vielen Fällen dazu geführt dass die direkte Umgebung des Tunnelleingangs sehr hell ist.

3. DIE ZWEITE GENERATION

Die Massamotorisierung, welche während der sechziger Jahre stattfand in den meisten Industrieländern, förderte der Bau von vielen Tunneln in verkehrsreichen Strassen. Während dieser Zeit entstand eine neue Technik für die Beleuchtung von Tunneleinfahrten, die so stark von denen aus der Vergangenheit abwichen, dass man ruhig von einer neuen Generation reden darf. Diese zweite Generation ist folgenderweise gekennzeichnet:

- auf Grund der grossen Anzahl Tunnel in Bau war eine wissenschaftlich gegründete Theorie benötigt;
- wegen der hohen Fahrgeschwindigkeit und der grossen Verkehrsdichte bekam der Tunneleingang verhältnismässig mehr Bedeutung als das Tunnelinnere;
- auf Grund der sehr günstigen wirtschaftlichen Lage in den meisten Ländern widmete man den Fragen des Fahrkomforts eine grosse Aufmerksamkeit.

Diese Periode wird gekennzeichnet durch einen grossen Aufschwung der wissenschaftlichen Untersuchungen auf dem Gebiet der Tunnelbeleuchtung. Ein Vorbote dafür war das Studium von Kruithof (1948). Dabei ist zum ersten Mal eine systematische experimentelle Untersuchung durchgeführt worden über die Sichtverhältnisse bei Tunneleinfahrten. Es folgten die Untersuchungen von Brass et al (1957), Jainski (1959), Kabayama (1963), Mäder & Fuchs (1966), Lossagk (1955), Waldram (1962) und vielen anderen.

Diese Periode kam zum Abschluss mit den Untersuchungen von Schreuder (1964) worin die meisten Aspekte der Tunnelbeleuchtung betrachtet worden sind. Diese Untersuchung hat in erheblichem Masse beigetragen zur Gestaltung und Ausarbeitung der internationalen Empfehlungen für Tunnelbeleuchtung der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE, 1973) weil die wieder zum grössten Teil gegründet sind auf die holländischen Empfehlungen (NSVV, 1963). Die CIE-Empfehlungen sind die Basis worauf ganz viele nationale Richtlinien und Empfehlungen gegründet sind. Sie sind benutzt beim Entwurf von sehr vielen Tunneln in vielen Ländern, obwohl es wahrscheinlich kein einziger Tunnel gibt, der in allen Hinsichten genau den Empfehlungen entspricht.

Die CIE-Empfehlungen sind auf einige Annahmen gegründet. Die meisten Annahmen sind wieder abgeleitet worden von den Ergebnissen der obenerwähnten Untersuchungen.

Die wichtigsten Annahmen sind:

- Die Adaptation des visuellen Systems ist tagsüber bei einer Fahrt im Freien als konstant zu betrachten. Die Adaptationsleuchtdichte ist mit L_1 anzudeuten.
- Im Freien kommen Werten von L_1 von über 8000 cd/m^2 häufig vor.
- Die Adaptation bleibt gleich L_1 bis auf geringe Entfernung vor dem Tunneleingang. Anders gesagt: der Adaptationspunkt liegt in geringer Entfernung vom Tunneleingang.
- In einem sehr breiten Gebiet von L_1 -werten gibt es ein festes Verhältnis $L_2/L_1 = 0,1$ wobei L_2 die minimale Leuchtdichte in der Schwellenzone ist.
- In der Schwellenzone, die eine Länge von 50 bis 100 m haben soll, ist die Leuchtdichte konstant.
- Tageslichttraster - wenn sie bei der Beleuchtung einer Tunneleingangs benutzt werden - sollen derartig gestaltet sein dass die Sonne niemals direkt die unterliegende Strasse treffen kann (Sie sollen "sonnendicht" sein).
- Die Übergangszone folgt auf die Schwellenzone. In der Übergangszone kann nach innen die Leuchtdichte vermindert werden mit ein Faktor 10 in 2 bis 3 Sekunden.
- Wenn konzentrierte Lichtquellen benutzt werden, soll deren Abstand so sein dass bei normaler Geschwindigkeit Flimmerfrequenten von 4 bis 10 Hz so wieso nicht und von 2,5 bis 14 Hz vorzugsweise nicht zutreffen können.

Es soll noch erwähnt werden dass in der Schweiz und in Österreich die von Mäder bestimmten Relation $L_2 = 0,19 L_1^{0,9}$ benutzt wird, statt der von Schreuder gefundenen und von Narisada bestätigten Relation $L_2/L_1 = 0,1$. Siehe auch CIE (1980). Nur bei hohen L_1 -Werten sind die zwei Beziehungen wesentlich verschieden (Schreuder, 1968).

Auf Grund einer Reihe von unabhängigen, aber gleichzeitig zutreffenden Faktoren ist es notwendig geworden sich aufs neue auf die Empfehlungen zu besinnen. Zuerst zeigt es sich dass die meisten

neuen Tunnel, obwohl sie nicht in allen Hinsichten der CIE-Empfehlungen gemäss ausgeführt worden sind, eine recht befriedigende Beleuchtung aufweisen. Man dürfte also vermuten dass die CIE-Empfehlungen strenger sind als unbedingt notwendig ist. Weiterhin sind die CIE-Empfehlungen aufgestellt worden in einer Zeit dass fast alle wichtige Tunnel im Flachland gebaut wurden und rund etwa 1 km Länge aufwiesen. Sehr lange Tunnel, und Tunnel im Gebirge wurden kaum erwähnt, und die sehr häufig gebauten langen Unterführungen auch nicht. Aber der wichtigste Punkt ist, dass man sich überall in der Welt seit der Aufstellung der CIE-Empfehlungen ganz andere Gedanken gemacht hat über Energiegebrauch und dass dabei die wirtschaftliche Lage sich fast überall sehr stark verschlimmert hat.

Diese neue Besinnung aber hat so wichtige Folgen aufgewiesen, dass dem Anschein nach sich eine ganz neue Technik der Beleuchtung von Tunneleinfahrten anmeldet - die dritte Generation.

4. DIE DRITTE GENERATION

Wie schon gesagt, wurden die Tunnel der ersten Generation dadurch gekennzeichnet dass beim Entwurf der Eingangspartie in erster Linie geachtet wurde auf ästhetische Gründe. Dieses hatte oft zur Folge dass die Umgebung direkt bei der Tunnelöffnung oft sehr hell war. Dieser Trend setzte sich auch in der Periode der zweiten Generation fort. Auch jetzt waren Tunnel, ausser Verkehrsanlagen, auch gewissermassen ein Statussymbol für die Stadt oder die Gegend. Immerhin ist es doch in verschiedenen Fällen gelungen beim Entwurf einer Eingangspartie den funktionellen Forderungen grössere Bedeutung zu geben. Die Untersuchungen machten klar was dieses bedeutete: die Tunnelöffnung sollte so gross wie möglich (so hoch wie möglich) sein, und die direkte Umgebung so dunkel wie möglich. Bei Tunneln bei denen die Einsichtzone mittels Tageslichttraster beleuchtet wird, kann man dieses verhältnismässig einfach realisieren, wie zum Beispiel zu sehen ist bei dem Coentunnel bei Amsterdam und bei dem Beneluxtunnel bei Rotterdam. Es hat sich also gezeigt dass es überhaupt sehr gut möglich ist mit Hilfe von an und für sich ziemlich einfachen und billigen Massnahmen die Aussenleuchtdichte bis auf die Hälfte zurückzubringen im Verhältnis zu der Leuchtdichte im Freien. Dabei ist es wichtig dass der freie Himmel möglichst früh abgeschirmt wird, zum Beispiel durch hoch ausgebaute Tageslichttraster. Aber schon rasch hat es sich ergeben dass diese kleinen und in erster Hinsicht unwichtigen Massnahmen zu grossen Folgen führten.

Sowohl die praktische Erfahrung als die Ergebnisse von Laboratoriumuntersuchungen ergeben dass bei der Adaptationszustand von 4000 cd/m^2 - statt der 8000 cd/m^2 die früher als Kriterium benutzt ist - zeitabhängige Adaptationseffekte nur eine kleine Bedeutung haben. Dieses hat zur Folge dass die langsam verlaufende photochemische Netzhautadaptation vernachlässigbar ist, und dass die Beschränkungen bei der Wahrnehmung bei Tunneleinfahrten noch nur - hauptsächlich - die Folgen sind der Blendung (Lichtverstreuerung im Auge), verursacht durch die helle Umgebung der Tunnelöffnung. Diese Erscheinungen sind aber nicht sehr naheliegend; in den meisten Fällen in der

Beleuchtungstechnik hat eine Erhöhung oder Erniedrigung um ein Faktor zwei nicht derartig grosse und grundsätzliche Folgen. Hier aber handelt es nicht um ein Beginn-niveau von 8000 cd/m^2 , und es ist bekannt dass bei derartig hohen Niveaus das visuelle System nicht mehr ausreichend funktionieren kann; bei derartigen Niveaus bricht die visuelle Wahrnehmung sozusagen zusammen. Und daher kann es passieren dass man bei einem an und für sich nicht sehr grossen Unterschied - eine Halbierung der Adaptationsleuchtdichte - in der Tat mit physiologisch ganz anderen Erscheinungen zu tun hat. Der Adaptationszustand kann, weil zeitabhängige Effekte vernachlässigt werden können, auf einfache Weise beschrieben werden als $L_a = L_f + L_{seq}$ wobei L_a die Adaptationsleuchtdichte ist, L_f die Leuchtdichte des Gesichtsfeldteils der auf die Fovea abgebildet wird, und L_{seq} die durch die Blendung verursachte äquivalente Schleuerleuchtdichte. Die direkte Konsequenz ist dass es nicht mehr gerechtfertigt ist zu behaupten dass die Aussenleuchtdichte konstant ist. Auch der Adaptationspunkt und dessen Lage verlieren ihre Bedeutung.

Auf jeden Moment kann also die Adaptation auf diese Weise beschrieben werden. Das heisst dass es nicht mehr nötig ist einen Unterschied zu machen zwischen der Schwellenzone und der Übergangszone, denn die Schwellenzone ist ja eingeführt um mit dem Umstand zu rechnen dass der Kraftfahrer den Tunnel hereinsehen muss weil seine Augen noch an L_1 adaptiert sind. Nur bei viel niedrigeren Adaptationsleuchtdichten, wie sie im Inneren von langen Tunneln vorkommen, muss man mit zeitabhängigen Adaptationserscheinungen rechnen.

Bleibt übrig die Frage welche Leuchtdichte vorhanden sein muss im ersten Tunnelteil. Unter der Voraussetzung dass der Kraftfahrer auf eine derartig grosse Entfernung den Tunnel hereinsehen muss, dass er, nach der Wahrnehmung eines Hindernisses, noch anhalten kann, muss vom Stopp-Entscheidungspunkt (der Punkt auf der Strasse auf eine Entfernung vor dem Tunneleingang gleich an der Anhalteweg unter Berücksichtigung der Tatsache dass die Entscheidung zum Anhalten am wichtigsten ist) den ersten Tunnelteil zu übersehen sein. Die dortige Adaptationsleuchtdichte ist $L_{sdp} = L_2 + L_{seq}$ mit

L_2 die Leuchtdichte im ersten Tunnelteil. In einem anderen Vortrag werden einige Methoden gegeben womit man die L_2 bestimmen kann (Van den Bijllaardt & Narisada, 1980).

Wir werden hier zwei Bemerkungen hinzufügen. Erstens zeigt es sich dass das konstante Verhältnis zwischen L_a und L_2 (L_a hier also statt L_1) ganz sicherlich gültig ist (Schreuder, 1978; CIE, 1980). Tatsächlich ist die Gültigkeit wahrscheinlich eben noch stärker als ursprünglich von Schreuder (1964) behauptet.

Bei sehr hohen Werten von L_a muss man ja der Tatsache Rechnung tragen dass die Adaptation der Erniedrigung der Lichtniveaus nicht direkt folgen kann. Es entsteht also ein Adaptationsdefekt der in Leuchtdichtetermen ausgedrückt werden kann mit L_{ad} .

Die Adaptationsleuchtdichte in sehr allgemeiner Gestaltung ist also

$$L_a = L_f + L_{seq} + L_{ad}$$

Wenn aber die Untersuchungen womit L_2 bestimmt wird, durchgeführt werden mit längerer Expositionszeit, nimmt L_{ad} ab. Das führt zu niedrigeren L_2 -Werten; daher sind die von Schreuder (1964) gegebenen L_2 -Werten für sehr hohe Werten von L_1 zu gross. Möglich sind die von Mäder & Fuchs (1966) gegebenen Werten in besserem Einklang mit der Praxis. Dieses ist aber nicht von grosser Bedeutung weil, wie schon angedeutet, derartig hohe L_1 -Werte immerhin nicht vorkommen - zumindest nicht in richtig geplanten Tunneln. Die Schlussfolgerung scheint also gerechtfertigt dass für alle praktikabele Leuchtdichtewerte das Verhältnis zwischen L_a und der Minimumwert von L_2 konstant ist. Diese Schlussfolgerung ist von Bedeutung für die Beleuchtung von Tunnelleinfahrten; sie ermöglicht ja auf jeder Stelle im Tunnel die benötigte Leuchtdichte zu bestimmen, direkt aus dem Verlauf der Adaptationsleuchtdichte ausserhalb der Tunnel. Die zweite Bemerkung betrifft die Anwendung von Tageslichtrastern. In der Vergangenheit hat man immer gefordert dass derartige Raster "sommendicht" sind. Die Lichtdurchlässigkeit von Rastern die dieser Anforderung genügt ist aber üblicherweise nach Verlauf der Zeit viel zu niedrig; daher hat man meistens auf die Anwendung von Rastern verzichtet. Wenn man aber die Bedingung der Sommendichte freilässt - und neue Untersuchungen geben die Suggestion dass solches erlaubt ist - dann ist es selbstverständlich durchaus

möglich die Durchlässigkeit sehr gross zu machen und das auch
beizubehalten. Damit werden Tageslichttraster wieder eine ganz
interessante Proposition für die Beleuchtung von Tunneleinfahrten.

LITERATUR

Brass, J.R. et al. A new approach to highway tunnel lighting. Illum. Engng. 52 (1957) 137-143.

CIE. International recommendations for tunnel lighting. Paris (1973) Commission Internationale de l'Eclairage. Publication CIE No. 26.

CIE. The luminance in the thresholds zone. 9th draft. Paris (1980) Commission Internationale de l'Eclairage.

Jainski, P. Tunnelbeleuchtung zur Verkehrssicherung. Lichttechnik 11 (1959) 67-69.

Kabayama, H. Study on adaptive illumination for sudden change of brightness. J. Illum. Engng. Inst. Japan 47 (1963) 488-496.

Kruithof, A.M. Enige beschouwingen in verband met het verlichten van verkeerstunnels (Einige Betrachtungen über die Beleuchtung von Verkehrstunneln). Philips Techn. Tijdschr. 10 (1948) 299-306.

Lossagk, H. Sehsicherheit bei Tageslicht in Unterführungen. Lichttechnik 7 (1955) 49-53.

Mäder, F. & Fuchs, O. Beitrag zur Frage der Eingangsbeleuchtung von Strassentunneln. Bulletin SEV 57 (1966) 359-366.

Myers, R. Light transmitting louvres for high speed vehicular tunnels. Trans. Illum. Engng. Soc. (Amer.) 34 (1939) 621-626.

NSVV. Aanbevelingen voor tunnelverlichting (Empfehlungen für Tunnelbeleuchtung). Electrotechniek 41 (1963) 23-32; 46-53.

Nutting, P.G. (1920). The optical principles of illuminating engineering. Ill. Engng. 15 (1920) 529.

Schreuder, D.A. The lighting of vehicular traffic tunnels. Eindhoven (1964) Centrex.

Schreuder, D.A. Ein Vergleich von Empfehlungen für Tunneleinfahrtbeleuchtung. Lichttechnik 20 (1968) 20A-21A.

Schreuder, D.A. Optische Probleme bei Tunneleinfahrtbeleuchtung. Berlin (1978) T.U. (Nicht veröffentlicht).

Van Bruggen, J.P. De Maastunnel te Rotterdam; Proefnemingen en onderzoekingen (Der Maastunnel in Rotterdam. Experimente und Untersuchungen). De Ingenieur 56 (1941) B24.

Van den Bijllaardt, D. & Narisada, K. Die Leuchtdichte in der Einsichtstrecke eines Strassentunnels. Berlin (1980) LiTG.

Waldram, J.M. Lighting and visibility in the approaches to underpasses. GEC Journal 29 (1962) 119-129.