Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 57 (1966)

Heft: 8

Artikel: Beitrag zur Frage der Eingangsbeleuchtung von Strassentunneln

Autor: Mäder, F. / Fuchs, O.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916585

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.10.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Beitrag zur Frage der Eingangsbeleuchtung von Strassentunneln

Von *F. Mäder* und *O. Fuchs*, Bern

628.971.6 : 624.19

1. Einleitung

Im Zusammenhang mit dem Ausbau des Strassennetzes befinden sich gegenwärtig einige längere, zum Teil sogar sehr lange Strassentunnel im Bau. Um einen möglichst ungefährlichen und flüssigen Verkehrsablauf zu gewährleisten, sollen alle diese Tunnelstrecken beleuchtet werden. Während die Anforderungen an eine ausreichende Nachtbeleuchtung bekannt sind und sich verhältnismässig leicht verwirklichen lassen, stösst man bei der Ausführung einer zweckmässigen Tagesbeleuchtung, insbesondere einer guten Beleuchtung der Tunneleingangsstrecken, auf schwer zu lösende Aufgaben.

Um einen schroffen Übergang von der hohen natürlichen Tagesbeleuchtung zur künstlichen wesentlich geringeren Tunnelbeleuchtung zu vermeiden, müssen die Ein- und Ausfahrzonen der Tunnel tagsüber stärker beleuchtet sein als das Tunnelinnere. Nach den neuesten Angaben gehen die Meinungen über die nötigen Horizontal-Beleuchtungsstärken in der Tunneleinfahrzone beträchtlich auseinander. Einige begnügen sich, vielleicht aus wirtschaftlichen, vielleicht aus anderen Gründen, mit Eingangs-Horizontal-Beleuchtungsstärken von einigen 100 lx und andere verwenden oder empfehlen 2000 lx oder mehr [1...10] [1]). Massgebend für die Beurteilung einer Tunneleingangsbeleuchtung ist der Grundsatz, dass der Motorfahrzeuglenker jederzeit imstande sein soll, alle Hindernisse auf seinem Anhalteweg zu überblicken.

Ein Automobilist, der auf einen Tunnel zufährt, muss somit Hindernisse im Tunnelinnern erkennen können, wenn er sich mit seinem Fahrzeug noch ausserhalb des Tunnels befindet und seine Augen an die Leuchtdichte im Freien adaptiert sind. Die hierzu im Tunnelinneren in der Nähe des Tunneleingangs nötige Mindestleuchtdichte sollte dem Beleuchtungstechniker bekannt sein. Ein Teil der ausgeführten Arbeiten diente dazu, mit Hilfe von Laboratoriumsversuchen einige Anhaltspunkte über die Höhe dieser Mindestleuchtdichte zu finden.

Fährt der Fahrzeugführer in den Tunnel hinein, wo die wirksame Leuchtdichte wesentlich geringer ist als im Freien, so kann er bald Hindernisse feststellen, die sich in einer Umgebung befinden, deren mittlere Leuchtdichte niedriger ist als die nötige Mindestleuchtdichte in der Tunneleinfahrzone. Von jener Stelle an, die sich eine Anhaltestrecke vom Tunneleingang entfernt im Tunnelinneren befindet, darf deshalb die mittlere Beleuchtungsstärke herabgesetzt werden. Diese Herabsetzung sollte nicht plötzlich, sondern allmählich erfolgen. Wie und auf welcher Strecke die Beleuchtungsstärke zu vermindern ist, hängt zur Hauptsache vom zeitlichen Ablauf der Adaptation der Augen, von der zugelassenen Fahrgeschwindigkeit sowie von der Leuchtdichte im Freien und in der Tunneleinfahrzone ab. Der zweite Teil dieser Arbeit ist der Untersuchung der Auswirkung des zeitlichen Ablaufes der Augenadaptation auf das Erkennen von Hindernissen gewidmet.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

2. Die Beleuchtung in der Tunneleinfahrzone

2.1 Adaptation und Kontraste

Beim Zustandekommen eines Adaptationszustandes des Auges ist das ganze Licht, das ins Auge fällt, beteiligt. Das Auge passt sich an eine mittlere Leuchtdichte an. An Gesichtsfeldstellen, deren Leuchtdichten wesentlich höher oder tiefer sind als diese mittlere Leuchtdichte, ist deshalb das Sehvermögen des Auges herabgesetzt. Sehr helle Stellen stören durch Blendung, und dunkle Felder können völlig schwarz erscheinen, so dass darin keine Gegenstände mehr zu erkennen sind. Der zweite Fall liegt vor, wenn ein Motorfahrzeugführer auf einer hell besonnten Strasse auf einen unbeleuchteten oder ungenügend beleuchteten Strassentunnel zufährt. Den Beleuchtungstechniker interessiert es nun, wie hoch die Leuchtdichte eines dunklen Feldes sein muss, damit ein an grosse Helligkeit adaptiertes Auge in diesem dunklen Felde einen angemessenen Kontrast, mit anderen Worten einen Gegenstand, gerade noch wahrnehmen kann. Ferner möchte man gerne wissen, wie diese minimale Leuchtdichte von jener Leuchtdichte abhängt, an die das Auge adaptiert ist und was für einen Einfluss die Sehaufgabe etwa haben mag.

2.2 Die Versuchsanordnung

Um den Verhältnissen bei einer Tunneleinfahrt einigermassen Rechnung zu tragen, wurde zur Untersuchung der in 2.1 aufgeworfenen Fragen die in Fig. 1 dargestellte Versuchsanordnung gewählt. Sie besteht aus einem Kasten mit einer Grundfläche von 0,9 × 1,1 m und einer Höhe von 1,1 m. Die Innenwände sind mit einem in der Photometrie üblichen mattweissen Anstrich versehen. Wie bei einer Ulbrichtschen Kugel lassen sich von oben her Lampen L_1 einsetzen. Um die Gleichmässigkeit der Lichtdurchflutung im Kasten zu verbessern, sind die Kastenecken mit dreieckförmigen Tafeln ausgelegt. Damit erhält man kleinere Leuchtdichten-Unterschiede an den Kastenwänden. Der Schatter *Sc* verhindert den direkten Einfall des Lampenlichts auf die Einblicköffnung *Eo*. Diese Öffnung gestattet eine einäugige Betrachtung der ihr gegenüberliegenden Kastenwand. Durch geeignete Wahl der Lampe L_1 lässt sich die mittlere Leuchtdichte der Kasten-

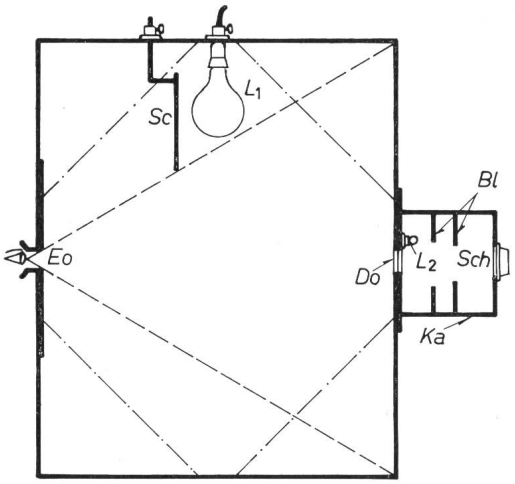


Fig. 1
Versuchsanordnung
L_1, L_2 Lampe; *Sc* Schatter; *Eo* Einblicköffnung; *Do* rundes Loch; *Ka* Dunkelkasten; *Sch* mattweisse Scheibe; *Bl* Blende

wände innerhalb weiter Grenzen verändern. Es ist insbesondere möglich, auf der Beobachtungswand Leuchtdichten zu erzeugen, wie sie im Freien bei einer Beleuchtungsstärke von über 100000 lx nicht selten vorkommen. Mitten in der Beobachtungswand, der Einblicköffnung direkt gegenüber, befindet sich ein rundes Loch *Do* mit einem Durchmesser von 62 mm. Entsprechende geometrische Verhältnisse ergeben sich bei einem runden «Tunneleingang» mit einem Durchmesser von 4,5 m, der aus einer Entfernung von 65 m gesehen wird. Durch das Loch *Do* hindurch sieht der Beobachter in einen 270 mm langen 250 mm breiten und 250 mm hohen Dunkelkasten *Ka*, der das Tunnelinnere darstellt. Dem Loch *Do* direkt gegenüber ist in der Mitte der Dunkelkasten-Rückwand eine von aussen drehbare, runde, mattweise Scheibe *Sch* angebracht, deren Durchmesser 60 mm beträgt. In der Mitte dieser Scheibe befindet sich ein 6 mm breites und 12 mm langes Rechteck, das einen 20 % höheren Reflexionsgrad besitzt als die übrige Scheibenfläche. Die Grösse dieses Rechtecks entspricht einem aus einer Entfernung von ca. 80 m betrachteten Hindernis mit einer Länge von 80 und einer Breite von 40 cm. Mit Ausnahme der Scheibenfläche sind alle Innenwandflächen des Dunkelkastens mattschwarz gestrichen. Die helle Scheibenfläche kann mit Hilfe der Lampe L_2 beleuchtet werden. Indem man mehr oder weniger starke Lampen einsetzt und den Lampenstrom verändert, lässt sich die Beleuchtungsstärke auf der Scheibe, die «Tunnelbeleuchtung», in weiten Grenzen passend wählen.

Für die Versuche und die Messungen wirkt das Licht, welches aus dem grossen Kasten zur hellen Scheibe gelangen kann, störend. Aus diesem Grunde sind die Blenden *Bl* eingebaut. Ferner wird durch das um die Einblicköffnung herum an der Innenwand des Kastens befestigte mattschwarze Papier der Reflexionsgrad dieses Wandteiles und damit die von ihm in den Dunkelkasten geworfene Lichtmenge wesentlich herabgesetzt.

Als Leuchtdichte *Bo*, an die sich das Auge des Beobachters zu adaptieren hatte, wurde die mittlere Leuchtdichte der dem Einblickloch *Eo* gegenüberliegenden Kastenwand angenommen [11]. Wie aus Fig. 1 und der Beschreibung des Kastens hervorgeht, war diese Wand nicht überall gleich hell. Deshalb mussten die Leuchtdichten an einigen Stellen der Beobachtungswand gemessen und die Messergebnisse gemittelt werden. Zur Messung der Leuchtdichten diente ein hochempfindliches objektives Leuchtdichtemessgerät der Photo-Research-Corporation, Hollywood, mit einem Öffnungswinkel von nur ½°. Das gleiche Gerät wurde verwendet, um für alle zur Beleuchtung der hellen Scheibe im Dunkelkasten eingesetzten Lampen L_2 die Abhängigkeit der mittleren Scheibenleuchtdichte vom Lampenstrom zu ermitteln.

2.3 Durchführung der Versuche

Sehleistungen sind immer irgendwie von der Vorgeschichte des Auges abhängig. Eine gewisse Vereinheitlichung dieser Vorgeschichte suchte man dadurch zu erreichen, dass die Beobachter ihre Augen vor Beginn der Versuche während 10 min an völlige Dunkelheit zu gewöhnen hatten. Darauf wurde die Kastenbeleuchtung eingeschaltet, und die Versuchsperson musste die der Einblicköffnung gegenüberliegende Kastenwand betrachten. Je nach der verwendeten Lampe L_1 betrug die mittlere Leuchtdichte *Bo* der Kastenwand 250, 1500, 12000 oder 26000 asb. Da während dieser Betrachtungszeit die Beleuchtung im Dunkelkasten ausgeschaltet war, erschien das Innere dieses Kastens schwarz, so dass der Versuchsleiter die helle Scheibe, vom Beobachter unbemerkt drehen konnte bis das Rechteck je nach Wunsch senkrecht, horizontal oder schräg stand. Nach einer Adaptationszeit von 5 min wurde die Lampe zur Beleuchtung der hellen Scheibe im Dunkelkasten eingeschaltet.

Die Versuchsperson hatte nun die Aufgabe, mit Hilfe eines Reguliertransformators den Strom der Lampe im Dunkelkasten und damit die Beleuchtung der hellen Scheibe so lange zu steigern, bis sie das kleine Rechteck auf der Scheibe sicher erkannte. Sobald die hierzu nötige Helligkeit erreicht war, musste der Beobachter dies unter Angabe der Stellung des kleinen Rechteckes melden. Ein in den Stromkreis der Dunkelkasten-Lampen L_2 eingeschaltetes Ampèremeter gestattete es, nicht nur den zum sicheren Erkennen des Rechteckes erforderlichen Lampenstrom abzulesen und schriftlich festzuhalten, sondern auch den Gang der Einstellung zu überprüfen. Mit Hilfe der erwähnten Eichungen liessen sich aus den abgelesenen Lampenströmen die zugehörigen Leuchtdichten B_T der Scheibe feststellen.

Für jede Kastenwand-Leuchtdichte *Bo* mussten die Beobachter die Einstellversuche dreimal wiederholen. An diesen Untersuchungen beteiligten sich 16 Personen mit folgender Altersverteilung:

1 Sa	26jährig	9 Mi	40jährig
2 D	26jährig	10 Sn	40jährig
3 Bu	27jährig	11 Ba	41jährig
4 HD	27jährig	12 P	42jährig
5 Su	32jährig	13 Z	46jährig
6 Sm	34jährig	14 M	47jährig
7 F	37jährig	15 S	50jährig
8 Be	40jährig	16 L	53jährig

Leider entspricht eine solche Verteilung insbesondere hinsichtlich der oberen Altersgrenze durchaus nicht der Altersverteilung der Motorfahrzeugführer.

Um eine wenn auch nur mangelhafte Auskunft über die Abhängigkeit der zum Erkennen nötigen Scheibenleuchtdichte von der Sehaufgabe zu erhalten, wurden alle Versuchsreihen wiederholt, wobei jedoch der Beobachter den Lampenstrom nur so hoch einstellen musste, dass er die Scheibe im Dunkelkasten eben gerade wahrnehmen konnte.

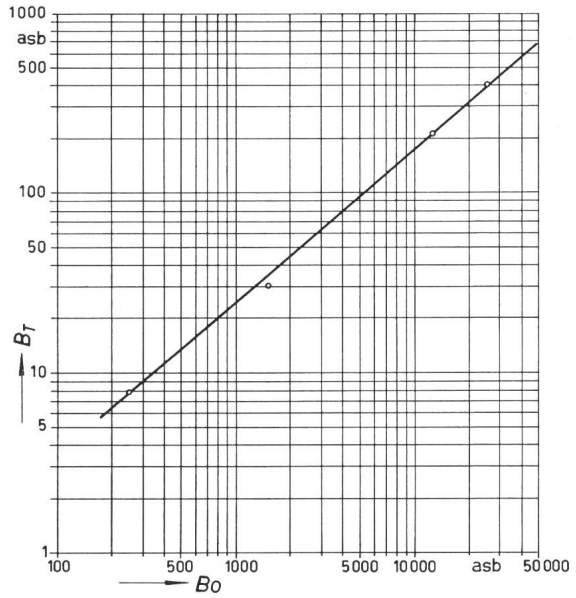


Fig. 2
Die zum Erkennen des kleinen Rechtecks nötige Leuchtdichte im Dunkelkasten in Abhängigkeit von der Leuchtdichte, an die das Auge adaptiert ist
B_T Leuchtdichte der Scheibe; *Bo* Leuchtdichte der Betrachtungswand

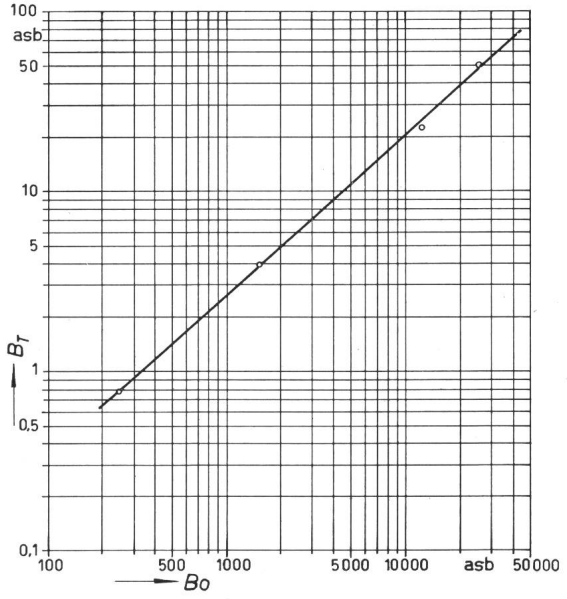


Fig. 3
Die zum Erkennen der ganzen Scheibe nötige Leuchtdichte im Dunkelkasten in Abhängigkeit von der Leuchtdichte, an die das Auge adaptiert ist
Bezeichnungen siehe Fig. 2

2.4 Versuchsergebnisse

Fig. 2 und 3 zeigen die gefundenen Abhängigkeiten der zum Erkennen nötigen Mindestleuchtdichten B_T von der Adaptationsleuchtdichte *Bo* in logarithmischer Darstellung. Daraus ist zu ersehen, dass die gefundenen Mittelwerte um eine Gerade streuen. Somit lässt sich die Abhängigkeit in der Form darstellen:

$$B_T = K\,Bo^n \qquad (1)$$

Für eine bestimmte Versuchsreihe, bei welcher nur die Adaptationsleuchtdichte *Bo* geändert wird, sind K und der Exponent n konstante Grössen.

Wie aus den in Fig. 2 und 3 dargestellten Messresultaten hervorgeht, hängt K stark von der Sehaufgabe ab. Um bei einer bestimmten Adaptationsleuchtdichte *Bo* die blosse Scheibe gerade noch erkennen zu können, wird von den Beobachtern eine Scheibenleuchtdichte eingestellt, die im Mittel nur ca. $1/8$ von jener beträgt, die sie zum Erkennen des kleinen Rechtecks benötigen. Daneben hängt K in hohem Masse vom Beobachter ab, wobei ältere Personen im allgemeinen ein stärkeres Lichtbedürfnis zeigen als jüngere. Die Versuche mit der schwereren Sehaufgabe ergeben für K einen Mittelwert von $0{,}06_3$.

Auch die Grösse des Exponenten n hängt vom Beobachter ab. Dagegen kann zwischen dem Wert bei schwerer und jener bei leichterer Sehaufgabe kein gesicherter Unterschied festgestellt werden. Für die schwerere Sehaufgabe erreicht der Exponent n einen mittleren Wert von $0{,}8_6$. Dies bedeutet, dass die zum Erkennen des kleinen Rechtecks erforderliche Leuchtdichte B_T im betrachteten Bereich nicht so stark ansteigt wie die Adaptationsleuchtdichte *Bo*, was ja auch aus Fig. 2 und 3 hervorgeht.

Die Streuungen der Messergebnisse sind recht gross. Sie wirken sich hauptsächlich auf die Grösse K aus. Sollen die mit Hilfe der Gl. (1) berechneten Scheiben-Leuchtdichten für 99 % der Versuchspersonen eine zum Erkennen des kleinen Rechtecks genügende Helligkeit ergeben, so muss K $0{,}17_0$ gesetzt werden. Ein K von $0{,}12_5$ reicht aus, wenn nur 95 % der Versuchspersonen das Rechteck zu erkennen brauchen. Der Exponent n weist etwas weniger starke Streuungen auf. Werte, die höher sind als 0,90 und unter 0,82 sinken, weichen nicht mehr nur zufällig vom Mittelwert des Exponenten ab.

2.5 Anwendung in der Beleuchtungspraxis

Jede direkte Übertragung von Laboratoriumsuntersuchungsergebnissen auf die Strassenbeleuchtungspraxis hat etwas Fragwürdiges an sich. Wenn die im Abschnitt 2.4 angegebene Formel und die zugehörigen Zahlenwerte zur Berechnung von Tunneleingangsbeleuchtungen angewendet werden sollen, ist deshalb grösste Vorsicht geboten. Dies gilt hier umso mehr, als 16 Versuchspersonen im Alter von 26 bis 53 Jahren sowohl hinsichtlich der Zahl als auch des Altersbereichs eine eher dürftige Grundlage darstellen. Daneben erfordert das Streben nach einem unfallfreien Verkehrsablauf ein Rechnen mit möglichst hoher Sicherheit. Aus all diesen Gründen ist es wohl ratsam, für $K = 0{,}170$ d. h. den Wert einzusetzen, mit welchem die nach Gl. (1) berechneten Scheibenleuchtdichten Helligkeiten ergeben, die 99 % der Versuchspersonen das Erkennen des kleinen Rechtecks ermöglichen. Ebenso wird man als Exponent n einen möglichst hohen Wert, nach Abschnitt 2.4 also 0,9, wählen müssen. Die Leuchtdichte im Tunnelinnern sollte deshalb mit Hilfe der Gl. (2):

$$B_T = 0{,}17\,Bo^{0{,}9} \qquad (2)$$

berechnet werden.

Für eine Adaptationsleuchtdichte *Bo*, mit anderen Worten für eine Leuchtdichte im Freien von 20000 asb, ein Wert, der wohl recht hoch, jedoch in unseren Gegenden nicht der höchstmögliche sein dürfte, ergibt die Gl. (2) eine Tunnelleuchtdichte von 1260 asb.

Rechnet man mit einem mittleren Reflexionsgrad von 0,25, so erfordert dies eine mittlere Beleuchtungsstärke von rund 5000 lx. Diese Beleuchtungsstärke ist so ausserordentlich hoch, dass es den Beleuchtungstechnikern kaum gelingen wird, sie mit den üblichen Mitteln zu verwirklichen.

Es stellt sich nun die Frage, ob nicht die Möglichkeit bestünde, ohne allzu starke Gefährdung der Verkehrssicherheit eine wesentlich niedrigere Beleuchtungsstärke zu wählen. Im

Freien ist ja nicht während des ganzen Tages eine Leuchtdichte von 20000 asb vorhanden, und an recht vielen Tagen bleibt die Leuchtdichte sogar beständig weit unter diesem hohen Wert. Dem muss entgegengehalten werden, dass im Freien zuweilen Leuchtdichten vorliegen, die weit über 20000 asb hinaus gehen (Schnee). Zudem ist das für die Versuche gewählte kleine Rechteck mit einem Reflexionsgrad, der sich von jenem der Umgebung um 20 % unterscheidet, nicht die schwerste im Strassenverkehr vorkommende Sehaufgabe. Immerhin darf wohl da, wo es nicht anders geht, ein K von $0{,}12_5$ und ein Exponent n von 0,9 gerade noch verantwortet werden. Diese Werte in die Gl. (1) eingesetzt, ergeben unter sonst gleichen Bedingungen wie oben eine Leuchtdichte von 930 asb und damit eine mittlere Beleuchtungsstärke von 3700 lx.

Bis zu welcher Stelle im Tunnelinneren diese sehr hohe Beleuchtungsstärke zu reichen hat, hängt von der höchsten zugelassenen Fahrgeschwindigkeit ab. Wie schon erwähnt, muss der Fahrzeugführer die Hindernisse, welche eine Anhaltestrecke vor ihm liegen, erkennen können. Deshalb sollte die hohe Beleuchtungsstärke bis zu jener Stelle im Tunnelinneren reichen, die eine Anhaltestrecke vom Tunneleingang entfernt liegt. In Tabelle I sind die Anhaltewege für einige in Frage kommende Höchsteinfahrtgeschwindigkeiten angegeben. Die Werte gelten für ebene trockene Strassen unter der Voraussetzung, dass sich sowohl Reifen wie Bremsen in gutem Zustande befinden. Eine gewisse Sicherheit ist dabei eingerechnet.

Anhaltewege für Höchsteinfahrtgeschwindigkeiten

Tabelle I

Geschwindigkeit km/h	Anhalteweg für Personen- und Lastwagen m	Anhalteweg für Motorräder m
60	42... 53	49... 84
80	67... 88	80...134
100	98...128	117...196

Auf nassen Strassen wird der Anhalteweg ungefähr doppelt so lang. Unter gewissen Umständen hat man im Tunneleinfahrtsgebiet mit wenigstens teilweise nassen Fahrbahnen zu rechnen.

Die hohe Beleuchtungsstärke von 5000 bzw. 3700 lx braucht nicht mit nur künstlicher Beleuchtung erreicht zu werden. Normalerweise ist es dem Lichttechniker auch gar nicht möglich, eine Beleuchtungsanlage so hoher Leistung zu installieren. Umso grössere Bedeutung kommt der Ausnutzung des Tageslichtes durch bauliche Massnahmen schon vor dem eigentlichen Tunneleingang, in der Einfahrzone, zu. In der Literatur ist an einer ganzen Anzahl von Beispielen die Dämpfung des Tageslichtes durch Blenden und Überdachungen in der Tunneleinfahrzone beschrieben worden [12]. Eine recht wesentlich verbesserte Ausnutzung des Tageslichts wie des künstlichen Lichtes erhält man durch die Wahl von Tunnelwand- und Fahrbahnmaterial sowie Tunnelwandanstrichfarben mit hohen Reflexionsgraden. Die günstige Wirkung der hohen Tunnelwandreflexionsgrade geht natürlich ohne öfters wiederholte gründliche Reinigung bald verloren. Es empfiehlt sich umsomehr, alle Möglichkeiten zur Heranziehung des Tageslichtes für die Beleuchtung der Tunneleinfahrzone auszuschöpfen, als damit nicht nur eine beträchtliche Senkung der laufenden Beleuchtungskosten verbunden ist, sondern auch eine ständige Anpassung der Tunneleingangsbeleuchtung an die Aussenbeleuchtung erfolgt.

3. Die Beleuchtungsabnahme im Tunnelinneren

3.1 Erkennen von Hindernissen bei der Einfahrt in einen Tunnel

Durchfährt ein Automobilist einen Tunnel in der Nähe des Tunneleinganges, so kann er Hindernisse erkennen, die sich im Innern an einer Tunnelstelle befinden, deren mittlere Leuchtdichte niedriger ist als die in der Tunneleinfahrzone. Mit den gleichen Begründungen und Vorbehalten, wie sie in Abschnitt 2.5 erwähnt werden, dürfte man auch hier zur Berechnung der nötigen Mindestleuchtdichte im Tunnelinneren die Formel:

$$B_T = 0{,}17\ Bo^{0,9}$$

bzw.

$$B_T = 0{,}125\ Bo^{0,9}$$

heranziehen, sofern die Augen des Fahrzeugführers in für die Anwendbarkeit der Formel gültiger Weise an die Leuchtdichte der Tunneleinfahrzone, d. h. an 1260 bzw. 930 asb, adaptiert wären. Nun brauchen aber die Augen einige Sekunden, bis sie sich bei der Einfahrt in den Tunnel von 20000 asb bis hinunter an eine Leuchtdichte von 1260 bzw. 930 asb adaptiert haben. Wohl liegt es nahe anzunehmen, dass während der Adaptationszeit für *Bo* jener Leuchtdichtewert zwischen der Leuchtdichte im Freien und der in der Einfahrzone eingesetzt werden muss, an den die Augen des Fahrzeugführers im betrachteten Moment gerade adaptiert sind. Diesen für die Formel massgebenden Leuchtdichtewert in Abhängigkeit von der nach dem Wegfall der Aussenleuchtdichte verflossenen Zeit zu bestimmen, dürfte aber nicht leicht sein. Nach allen bisherigen Ausführungen bedeutet das Erkennen des kleinen Rechtecks, dessen Reflexionsgrad nur 20 % höher ist als jener seiner Umgebung, noch nicht, dass die der Gl. (2) entsprechende Adaptation der Augen an die Leuchtdichte der Umgebung des Rechtecks, des «Hindernisses», bereits erfolgt ist. Ein deutliches Wahrnehmen dieser Hindernisse ist aber für den Beleuchtungstechniker ebenso wichtig wie die Kenntnis der besonderen Adaptation. Der Beleuchtungsfachmann möchte gerne wissen, wie hoch die Mindestleuchtdichte im Tunnelinneren sein muss, damit der Automobilist nach der Einfahrt in den Tunnel jederzeit sämtliche Hindernisse auf seinem ganzen Anhalteweg erkennen kann. Er sollte in Erfahrung bringen, wie diese vom zeitlichen Ablauf der Augenadaptation abhängige Beziehung zwischen der Mindestleuchtdichte und der Zeit nach der Tunneleinfahrt von der Leuchtdichte im Freien und der Sehaufgabe beeinflusst wird.

3.2 Versuchsanordnung

Zur Untersuchung der vom zeitlichen Ablauf der Augenadaptation abhängigen Erkennbarkeit von Hindernissen diente der gleiche Photometerkasten wie er im Abschnitt 2.2 beschrieben und in Fig. 1 dargestellt ist. Der Dunkelkasten *Ka* und das mattschwarze Papier um die Einblicköffnung *Eo* wurden jedoch entfernt. In der Öffnung *Do* befand sich als Abschluss die mattweisse, von aussen drehbare Scheibe mit dem kleinen Rechteck, das einen um 20 % höheren Reflexionsgrad aufwies als seine Umgebung. Zum Unterschied von den früheren Verhältnissen war das Rechteck nur 10 mm lang und 5 mm breit. Dies entspricht einem aus einer Entfernung von ca. 70 m betrachteten Hindernis mit einer Länge von 80 cm und einer Breite von 40 cm. Mit den Lampen L_1 wurden die hohen Kastenwand-Leuchtdichten (Leuchtdichten, wie sie tagsüber im Freien vorkommen) erzeugt. Für die viel schwächeren Beleuchtungen dienten einige Kleinlampen, die ober-

halb der Einblicksöffnung *Eo* an der Kastendecke befestigt waren. Durch einen Schalter, der von der Versuchsperson bedient werden musste, liess sich die schwache Beleuchtung stufenweise verändern. Jedes Umschalten auf eine andere Beleuchtungsstufe erzeugte auf einem Registrierstreifen mit Zeiteinteilung eine Marke. Ebenso wurde das Ausschalten der starken Lampen L_1 auf diesem Streifen markiert.

Die mit Hilfe des Photo-Research-Leuchtdichtemessgerätes durchgeführten Messungen erfolgten entsprechend der im Abschnitt 2.2 beschriebenen Art.

3.3 Durchführung der Versuche

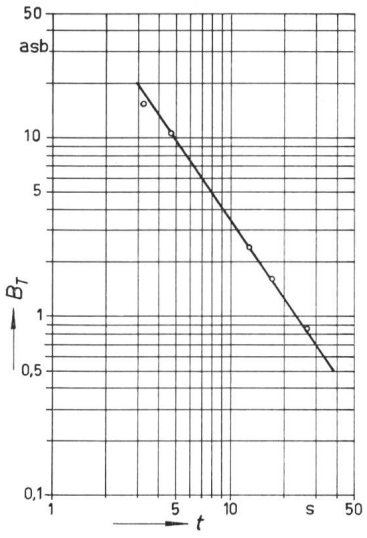
Vor Beginn der Messungen mussten die Versuchspersonen ihre Augen während 10 min an völlige Dunkelheit gewöhnen. Darauf schaltete der Versuchsleiter die Kastenbeleuchtung, d. h. die starke Lampe L_1, wie auch die stärkste Stufe der schwachen Beleuchtung ein, und der Beobachter hatte die der Einblicköffnung gegenüber liegende Kastenwand zu betrachten. Je nach Wahl der Lampe L_1 betrug die mittlere Ausgangs-Leuchtdichte dieser Wand ca. 250 bis 19000 asb. Für die Hauptversuche wählte man 2300 asb. Nach Ablauf einer Adaptationszeit von 5 min wurde das Registriergerät in Betrieb gesetzt, darauf die Lampe L_1 ausgeschaltet und damit der Beginn der Zeitmessung für den Adaptationsverlauf auf dem Registrierstreifen markiert.

Unmittelbar nach dem Ausschalten der Lampe L_1 war es dem Beobachter bei der stärksten Stufe der nun allein noch eingeschalteten schwachen Beleuchtung nicht möglich, das kleine Rechteck auf der hellen Scheibe zu erkennen. Diese kurze Zeit nutzte der Versuchsleiter aus, um das Rechteck von der Versuchsperson unbemerkt, senkrecht, waagrecht oder schräg einzustellen. Sobald der Beobachter das kleine Rechteck auf der hellen Scheibe sah, musste er dies unter Angabe der Rechteckstellung dadurch auf dem Registrierstreifen markieren, dass er den Schalter auf die nächst niedrigere Stufe der schwachen Beleuchtung drehte. In der ersten Zeit nach dem Umschalten, während der das Auge des Beobachters noch nicht genügend an die schwächere Beleuchtung adaptiert war, konnte der Versuchsleiter das kleine Rechteck wieder unbemerkt in eine neue Lage bringen. Das Wiedererkennen des Rechtecks markierte der Beobachter erneut unter Angabe der Rechtecklage, indem er auf die nächst schwächere Beleuchtung umschaltete. Im Verlaufe einer Versuchsreihe hatte die Versuchsperson zwei- bis dreimal eine schwächere Beleuchtungsstufe und damit eine geringere, vorher gemessene Leuchtdichte einzuschalten. Für eine gewählte Ausgangsleuchtdichte gelangten zwei derartige Versuchsreihen mit zusammen 5...8 verschiedenen niedrigen Leuchtdichten zur Durchführung.

Mit Hilfe der Marken und der Sekundenteilung auf dem Registrierstreifen liess sich für die 5...8 Leuchtdichten die Zeit feststellen, die nach dem Ausschalten der Lampe L_1 verstrich bis das kleine Rechteck erkannt werden konnte.

Entsprechende Versuche wurden auch mit einer wesentlich weniger schweren Sehaufgabe durchgeführt. Dazu ersetzte man die Scheibe mit dem kleinen Rechteck durch eine Platte mit einem quadratischen Fenster von 2 cm Seitenlänge. Das Fenster war mit einem weissen Opalglas abgeschlossen und wurde, im Gegensatz zum kleinen Rechteck, von aussen her während jeder Sekunde ⅓ s lang beleuchtet. Diese intermittierende Beleuchtung erleichterte dem Beobachter das Auffinden des Fensters im sonst dunklen Kasten.

Fig. 4
Die zum Erkennen des kleinen Rechtecks nötige Leuchtdichte B_T in Abhängigkeit von der nach dem Ausschalten der Adaptationsbeleuchtung verstrichenen Zeit t
Ausgangsleuchtdichte B_A = 2000 asb



Sobald die Versuchsperson nach dem Ausschalten der Lampe L_1 das Aufblinken des Fensters wahrnehmen konnte, markierte sie dies mit Hilfe eines Tasters auf dem Registrierstreifen, worauf der Versuchsleiter die Fensterleuchtdichte durch Verschieben eines Graufilters bekannter Durchlässigkeit herabsetzte. Alles übrige entsprach dem Vorgehen bei den Versuchen mit der schwereren Sehaufgabe.

An diesen Versuchen nahmen 3 bzw. 18, 20 oder 21 Personen im Alter von 27 bis 47 bzw. 20 bis 61 oder 20 bis 66 Jahren teil. Jede Versuchsperson hatte die Versuchsreihe dreimal zu wiederholen.

3.4 Versuchsergebnisse

Fig. 4...8 zeigen die Abhängigkeit der zum Erkennen des Rechtecks bzw. des Fensters nötigen Leuchtdichte B_t von der nach dem Ausschalten der Lampe L_1 verstrichenen Zeit t für bestimmte Ausgangsleuchtdichten B_A. In der logarithmischen Darstellung streuen die zur gleichen Versuchsreihe gehörenden Messpunkte um eine Gerade. Diese Geraden sind für alle durchgeführten Versuchsreihen nur innerhalb der zweiten und etwa dreissigsten Sekunde nach dem Wegfall der Ausgangsleuchtdichte B_A gesichert. Die zum Erkennen des Rechtecks bzw. des Fensters erforderliche Leuchtdichte genügt im erwähnten Zeitbereich der Formel:

$$B_t = K\, t^{-m} \qquad (3)$$

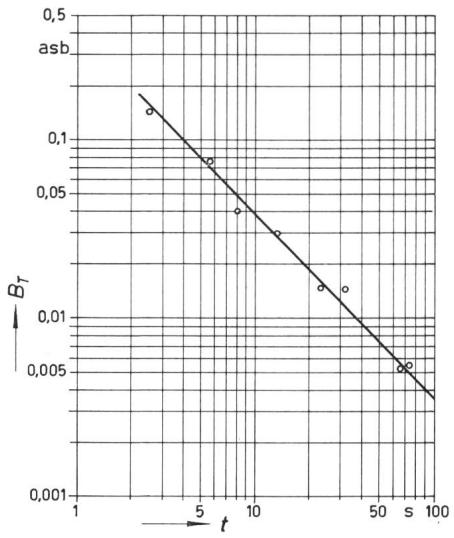


Fig. 5
Die zum Erkennen des leuchtenden Quadrates nötige Leuchtdichte B_T in Abhängigkeit von der nach dem Ausschalten der Adaptationsbeleuchtung verstrichenen Zeit t
Ausgangsleuchtdichte B_A = 250 asb

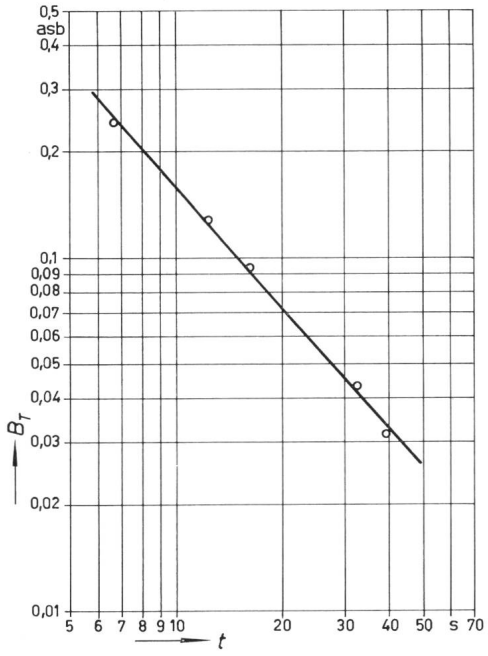


Fig. 6

Die zum Erkennen des Quadrates nötige Leuchtdichte B_T in Abhängigkeit von der nach dem Ausschalten der Adaptationsbeleuchtung verstrichenen Zeit t

Ausgangsleuchtdichte $B_A = 1900$ asb

In dieser Formel sind K und m nur dann konstante Grössen, wenn ausser der niedrigen Leuchtdichte der vom Beobachter betrachteten Kastenwand, bzw. ausser der Fensterleuchtdichte nichts geändert wird.

K ist stark von der Ausgangsleuchtdichte B_A abhängig (Fig. 5...8). Als erste Näherung darf wohl $K = B_A/K'$ gesetzt werden. Für K' ergeben die Versuche mit dem Rechteck einen Mittelwert von ca. 25. Ferner hängt K in hohem Masse von der Sehaufgabe ab. Aus den Untersuchungsergebnissen geht hervor, dass der Mittelwert von K' für die Versuche mit der leichteren Sehaufgabe etwa 16mal grösser ist als für die Versuche mit dem kleinen Rechteck.

Dazu kommt eine beträchtliche Abhängigkeit der Konstanten K von den Versuchspersonen. Wohl verlief die Adaptation bei den älteren Versuchsteilnehmern im allgemeinen etwas langsamer. Der Beobachter, der zum Erkennen des mit bestimmten Leuchtdichten intermittierend aufleuchtenden Fensters am meisten Zeit brauchte, war jedoch ein 20jähriger normalsichtiger Jüngling, während die für die gleichen Versuche benötigten Zeiten eines 66jährigen Brillenträgers in einer Versuchsreihe etwa den Gesamtmittelwerten entsprachen. Etwas schneller wurden im allgemeinen sowohl das Fenster wie das Rechteck von jüngeren Leuten erkannt (Fig. 7).

Zwischen der Durchführung der ersten und zweiten Versuchsreihe mit gleicher Ausgangsleuchtdichte liegen etwa 8 Tage. Wie aus Fig. 7 hervorgeht, befinden sich die vom oben erwähnten 20jährigen Jüngling ermittelten Messpunkte der beiden Versuchsreihen auf zwei verschiedenen Geraden. Der Unterschied zwischen den beiden Geraden ist statistisch gesichert. Dies weist darauf hin, dass der Adaptationsverlauf auch vom momentanen Zustand der Versuchsperson abhängt.

Nach den vorliegenden Versuchsergebnissen ist der Exponent m wahrscheinlich von der Ausgangsleuchtdichte B_A, von der Sehaufgabe und vom Beobachter abhängig. Es scheint, als ob bei einer bestimmten Sehaufgabe zwischen B_A und m der Zusammenhang bestünde:

$$m = C_1 \log B_A + C_2 \qquad (4)$$

Falls C_1 und C_2 positive konstante Grössen wären, was die Messergebnisse vermuten lassen, so würde dies bedeuten, dass für die zur Untersuchung verwendeten Ausgangsleuchtdichten B_A die Adaptation mit zunehmendem B_A schneller verläuft. Um diesen Zusammenhang sicherstellen zu können, müsste man die Vorgeschichte der Beobachteraugen in noch stärker vereinheitlichendem Sinne beeinflussen. Zudem wäre danach zu trachten, die Veränderungen der Einflüsse von Ermüdung, Unpässlichkeit, Wetter sowie von den Tageszeiten möglichst zu vermeiden. All das sind aber Bedingungen, die bei den herrschenden Strassenverkehrsverhältnissen ebensowenig erfüllt sind wie bei den durchgeführten Versuchen. Deshalb dürften die Ergebnisse derartiger Untersuchungen viel mehr den Wissenschaftler als den Beleuchtungstechniker interessieren.

Die Untersuchungen mit der schwierigeren Sehaufgabe, d. h. mit dem kleinen Rechteck, ergaben für m einen Mittelwert von 1,4.

Wie bei den früheren Versuchen sind auch hier die Streuungen der Messergebnisse sehr gross. Soll die mit Hilfe der Gl. (3) berechnete Leuchtdichte für 99 % der Versuchspersonen eine zum Erkennen des kleinen Rechtecks ausreichende Helligkeit ergeben, so ist für $K = B_A/7$ zu wählen. Begnügt man sich damit, dass die Leuchtdichte B_t nur 95 % der Versuchspersonen ein sicheres Erkennen des Rechtecks ermöglicht, so darf für $K = B_A/10$ eingesetzt werden, und für

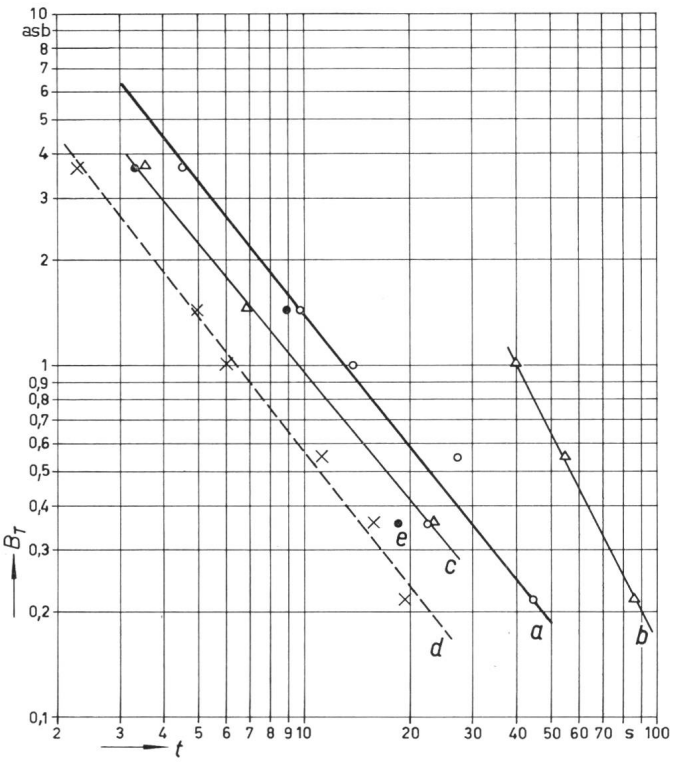


Fig. 7

Die zum Erkennen des Quadrates nötige Leuchtdichte B_T in Abhängigkeit von der nach dem Ausschalten der Adaptationsbeleuchtung verstrichenen Zeit t

Ausgangsleuchtdichte $B_A = 12\,000$ asb

a Mittel von 20 Personen 20...66jährig; *b* 1. Versuchsreihe eines 20jährigen Beobachters; *c* 2. Versuchsreihe des gleichen 20jährigen Beobachters; *d* beide Versuchsreihen eines 27jährigen Beobachters; *e* 2. Versuchsreihe eines 66jährigen Beobachters

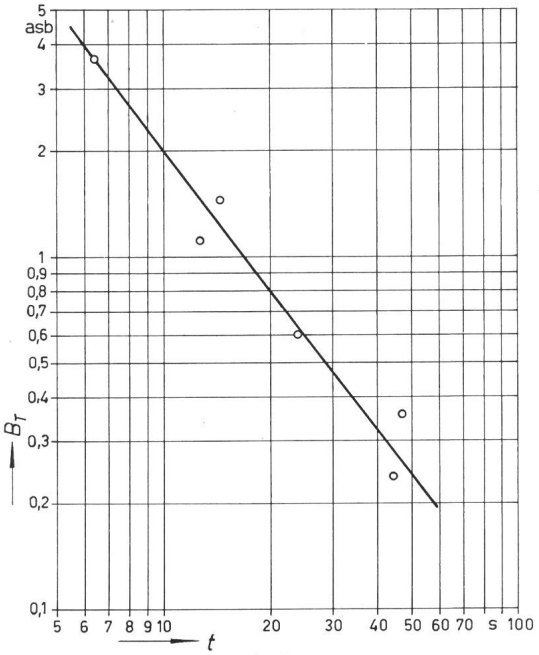


Fig. 8

Die zum Erkennen des Quadrates nötige Leuchtdichte B_T in Abhängigkeit von der nach dem Ausschalten der Adaptationsleuchtdichte verstrichenen Zeit t

Ausgangsleuchtdichte $B_A = 19\,000$ asb

75 % der Versuchspersonen reicht schon $K = B_A/17$ aus. Ein Exponent m, der kleiner ist als 1,3, weicht nicht mehr nur zufällig vom Mittelwert ab.

Die Versuche mit der weniger schweren Sehaufgabe führten zu durchweg wesentlich stärker streuenden Messergebnissen. Dies rührt wohl zum Teil von der höheren Konzentration her, die bei den Versuchen mit dem kleinen Rechteck erforderlich war. Zudem mag auch die strengere Kontrolle durch den Versuchsleiter, welche sich durch die verlangten Angaben über die Rechteckstellung ergaben, einen streuungsvermindernden Einfluss ausgeübt haben.

3.5 Anwendung in der Tunnelbeleuchtungspraxis

Alle im Abschnitt 2.5 dargelegten Bedenken hinsichtlich der Übertragung von Laboratoriumsmessergebnissen auf die Strassenbeleuchtungspraxis gelten auch für die vorliegenden Untersuchungen. Wenn man Gl. (3) zur Berechnung des Leuchtdichtenabfalls anwenden will, der an jener Tunnelstelle einsetzen darf, die sich um eine Anhaltestrecke vom Tunneleingang entfernt befindet, wird deshalb mit einer hohen Sicherheit gerechnet werden müssen. Aus diesem Grund ist in Gl. (3) $K = B_A/7$ mindestens aber $B_A/10$ einzusetzen. Ein $K = B_A/17$ lässt sich kaum mehr mit Überzeugung vertreten. Ebenso empfiehlt es sich aus Sicherheitsgründen, für den Exponenten m den kleinsten Wert, d. h. den Wert zu wählen, welcher der langsamsten Adaptation entspricht. Für die Versuche mit dem kleinen Rechteck hat m einen Wert von 1,3. Damit lauten die anzuwendenden Formeln:

$$B_t = \frac{B_A}{7}\, t^{-1,3} \qquad \text{bzw.} \qquad B_t = \frac{B_A}{10}\, t^{-1,3}$$

$$(\text{oder } B_t = \frac{B_A}{17}\, t^{-1,3})$$

Mit Hilfe dieser Gleichungen sind die in Tabelle II eingetragenen Leuchtdichten für einige Stellen im Tunnelinneren berechnet worden. Den Berechnungen liegt eine Ausgangsleuchtdichte B_A, mit anderen Worten eine «Leuchtdichte im Freien», von 20 000 asb zu Grunde. Der Verlauf der Helligkeitsabnahme gilt für die über den einzelnen Kolonnen stehenden Höchstgeschwindigkeiten von 60, 80 bzw. 100 km/h.

Für t muss gesetzt werden: Abstand vom Tunneleingang weniger Anhaltestrecke geteilt durch Geschwindigkeit.

Berechnungsergebnisse

Tabelle II

Abstand vom Tunneleingang m	$B_t = \frac{20\,000}{7}\, t^{-1,3}$ [asb] für km/h			$B_t = \frac{20\,000}{10}\, t^{-1,3}$ [asb] für km/h		
	60	80	100	60	80	100
0... 42[1])	1260[2])			930[2])		
0... 67[1])		1260			930	
0... 98[1])			1260			930
100	565			395		
150	250	515		175	360	
200	155	280	525	110	195	370
250	110	185	315	75	130	220
300	80	135	215	57	95	150

[1]) siehe Tabelle I
[2]) siehe Abschnitt 2.5

Aus der Tabelle II ist zu ersehen, dass es nach den vorliegenden Laboratoriumsversuchsresultaten nicht erlaubt werden darf, die Tunnel-Leuchtdichte 300 m vom Tunneleingang entfernt auf einen Wert sinken zu lassen, der für den Nachtbetrieb noch genügen würde. Offenbar erfolgt die Adaptation der Augen bei einem guten Teil der Versuchspersonen viel langsamer, als man es allgemein angenommen hat. Wie aus den Messresultaten hervorgeht, gilt das nicht etwa nur für ältere Leute. Bei den vorgesehenen erlaubten Fahrgeschwindigkeiten von 60, 80 oder gar 100 km/h sind die hohen Leuchtdichten bis tief in den Tunnel hinein beizubehalten, wenn ein Hindernis, das dem für die Versuche verwendeten kleinen Rechteck entspricht, vom Grossteil der Verkehrsteilnehmer überall rechtzeitig wahrgenommen werden soll. Die Verwirklichung einer Beleuchtungsanlage, die dieser Anforderung genügt, stösst auf ausserordentliche Schwierigkeiten. Man wird deshalb umsomehr alle Beleuchtungsmöglichkeiten, die sich in Form von baulichen Massnahmen und hohen Reflexionsgraden der Tunnelwände bieten, ausnützen müssen.

4. Zusammenfassung

Damit ein Fahrzeugführer bei der Einfahrt in einen Strassentunnel auf seinem ganzen Anhalteweg Hindernisse erkennen kann, deren Leuchtdichte um 20 % von jener der Umgebung abweicht, muss für den Tagesbetrieb die Helligkeit in der Tunneleinfahrzone sehr hoch sein. Die erforderliche Mindestleuchtdichte, der Ort des Beginns und die Art der Leuchtdichtenabnahme gegen das Tunnelinnere hängen im wesentlichen von der Leuchtdichte im Freien sowie vom zeitlichen Ablauf der Augenadaptation und damit von der zugelassenen höchsten Fahrgeschwindigkeit ab. Für eine Aussenleuchtdichte von 20 000 asb soll die Leuchtdichte in der Tunneleinfahrzone einen Wert von 1260 bzw. 930 asb aufweisen. Um derart hohe Leuchtdichten nur mit Hilfe künstlichen Lichts zu erhalten, ist ein ausserordentlicher Aufwand unumgänglich. Es sollte deshalb in der Tunneleinfahrzone auf einer genügend langen Strecke jede Möglichkeit ausgenutzt werden, die, sei es durch bauliche Massnahmen oder Bepflanzungen, das Tageslicht nach und nach abzuschwächen gestattet.

Die vorliegende Arbeit wurde von Prof. Dr. *H. Goldmann*, Direktor der Universitätsaugenklinik in Bern angeregt. Für sein grosses und förderndes Interesse sowie für seine vielen Ratschläge ist der Autor ihm zu grossem Dank verpflichtet.

Literatur

[1] *J. Guanter* und *G. Rieder:* Beleuchtung zweier Strassentunnel auf der Strecke Thusis–Rongellen. Bull. SEV 50(1959)6, S. 225...232.
[2] *J. Muth:* Beleuchtung einer Bahnunterführung. Lichttechnik 12(1960)2, S. 66...68.
[3] *F. Tomek:* Moderne Beleuchtungsanlage für Schnellstrassentunnel. WSW-techn. Berichte Siemens-Halske, Wiener Schwachstrom-Werke) 13(1961)1, S. 3...13.
[4] A Mountain Tunnel. how to Light it. Illum. Engng. 56(1961)12, S. 676...677.
[5a] *J. M. Waldram:* The Lighting of Tunnels. Light & Lighting 49(1956)2, S. 51...56.
[5b] *J. M. Waldram:* Lighting and Visibility in the Approaches to Underpasses. GEC J. Sci. Technol. 29(1962)3, S. 119...129.
[6] *J. B. de Boer:* Untersuchungen der Sehverhältnisse bei Tunneleinfahrten. Lichttechnik 15(1963)3, S. 124...127
[7] Aanbevelingen voor Tunnenverlichting. Electro-Techniek 41(1963)2, S. 23...32 und Nr. 3, S. 46.
[8] *H. Kabayama:* Study on Adaptive Illumination for Sudden Change of Brightness. J. Illum. Engng. Japan 47(1963)10, S. 488...496.
[9] *Dr. A. Schreuder:* The Lighting of Vehicular Traffic Tunnels. Dissertation T. H. Eindhoven 1964, Philips Technical Library.
[10] *Association Française de l'Eclairage* et *Comité National Français de l'Eclairage:* Recommandations relatives à l'éclairage extérieur, 2e édition. Paris 1965.
[11] *P. H. Crawford:* The Effect of Fieldsize and Pattern on the Change of Visual Sensitivity with Time. Proc. Royal Soc. London 129(1940)6, S. 94...106.
[12] *H. Zijl:* Autotunnel bei Velsen. Internat. Lichtrdsch. 9(1958)1. S. 26...29.

Adresse des Autors:

Dr. *F. Mäder,* Adjunkt des Eidg. Amtes für Mass und Gewicht, Lindenweg 24, 3084 Wabern.

Induktive Beeinflussung einer Rohrleitung und ihres Steuerkabels durch eine parallellaufende Hochspannungsleitung

Von *Ch. Menemenlis,* Athen

622.692.4 : 621.315.051.2 : 538.521

Eine lange Rohrleitung, die parallel zu einer Hochspannungsleitung verlegt ist, sowie auch das Steuerkabel, das parallel zu dieser Rohrleitung läuft, stehen im Falle eines Erdkurzschlusses unter der induktiven Beeinflussung des Stromes der Hochspannungsleitung. Die folgenden Grössen, die infolge dieser Beeinflussung entstehen, werden nachstehend berechnet und diskutiert:

a) Die Spannung gegen Erde der Rohrleitung und des Kabelmantels;
b) Der induzierte Strom, in der Rohrleitung;
c) Die Spannung zwischen den Kabeladern und dem Kabelmantel (Aderspannung).

Ein Beispiel mit konkreten Zahlenwerten wird in Kurvenform dargestellt und diskutiert.

En cas de défaut à la terre, une longue canalisation tubulaire posée parallèlement à une ligne à haute tension, ainsi que le câble de commande parallèle à cette canalisation, sont influencés inductivement par le courant de la ligne à haute tension. Les grandeurs suivantes, qui résultent de cette influence, sont calculées et discutées:

a) La tension, par rapport à la terre, de la canalisation tubulaire et de l'enveloppe du câble.
b) Le courant induit dans la canalisation tubulaire.
c) La tension entre les conducteurs du câble et l'enveloppe de celui-ci.

Un exemple numérique concret est représenté sous forme de courbes et discuté.

1. Allgemeines

Im Zuge einer Rohrleitung für Öltransport kann es vorkommen, dass Teilstrecken dieser Rohrleitung parallel zu einer elektrischen Hochspannungsleitung verlaufen. Parallel zur Rohrleitung läuft auch ein Kabel für die Steuerung der Schieberstationen. Die Rohrleitung und das Kabel liegen in einer Tiefe von ungefähr 1 m. Im Falle eines Erdkurzschlusses der Hochspannungsleitung fliesst ein Erdstrom I_k längs der elektrischen Leitung zum Erdschlussort und durch die Erde zurück. Dieser Strom induziert in den Schleifen, welche die Rohrleitung bzw. das Kabel mit der Erde als Rückleitung bilden, eine Spannung (Fig. 1). Diese Spannung pro km Hin- und Rückleitung soll als induzierte Spannung pro km definiert und mit U_i' bezeichnet werden. Auf Grund dieser Spannung fliesst in der beeinflussten Leitung ein Strom I_x, der von der Impedanz und der Querableitung dieser Leitung und von der Abschlussimpedanz der beeinflussten Strecke abhängt (Fig. 2).

Die Spannung zwischen einem Punkt der beeinflussten Leitung und einem weit weg liegenden Punkt in der Normalebene zur beeinflussten Leitung ist die Spannung gegen Erde des betreffenden Punktes U_x. Diese Spannung hängt von U_i'

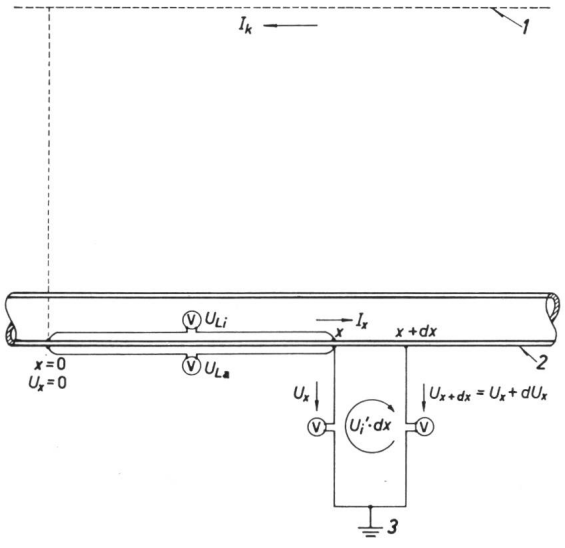


Fig. 1

Anordnung der induzierenden Hochspannungsleitung und der induzierten Leitung

1 Hochspannungsleitung; *2* beeinflusste Leitung; *3* Bezugserde; U_i' induzierte Spannung pro km; U_x Spannung gegen Erde; U_{Li}, U_{La} innere und äussere Längsspannung
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

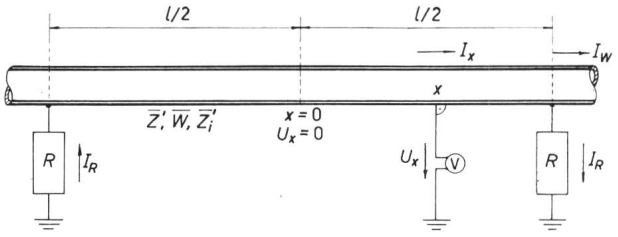


Fig. 2

Strom und Spannung der beeinflussten Leitung (Rohrleitung oder Kabel)

$\overline{Z}'$ Impedanz pro km der Schleife mit Erdrückleitung; $\overline{W}$ Wellenimpedanz; $\overline{Z}_i'$ innere Impedanz pro km
Weitere Bezeichnungen siehe im Text