Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 57 (1966)

Heft: 18

Artikel: Die Leuchtdichte der Strassenoberfläche an hellen Tagen : ein Beitrag zur Planung von Tunneleingangsbeleuchtungen

Autor: Mäder, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916628

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: 15.12.2025

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

repräsentativsten Bau stellt das spätgotische Rathaus in der Altstadt dar. Ein Bau origineller Prägung ist die ehemalige zugerische Münzstätte, die Münz. Hier prägten die Zuger Münzmeister aus dem Geschlecht der Weissenbach die goldenen und silbernen Münzen, die teils die Stadtpatrone St. Michael und St. Oswald, oder aber auch das Bild des heiligen Bischofs Wolfgang trugen.

Ausserhalb der alten Stadtmauern, die sich teilweise noch mit einigen Türmen in die Gegenwart gerettet haben, ragt hinter dem dichten Laub breiter Obstbäume der hochragende Giebel des Herrenhauses der Barone von Zurlauben, Freiherren von Thurn und Gestelenburg, Herren zu Hembrunn und Anglikon hervor. Mit diesem Hause der mächtigen Zurlauben verbindet sich ein gutes Stück zugerischer Geschichte, waren doch die Zurlauben das bedeutendste Geschlecht, das uns in der Zuger Historie entgegen tritt. Aus dieser Zuger Familie stammen die baufreudigen Äbte des Benediktinerordens, die Muri und Rheinau neu bauten, die besorgten Äbtissinen von Wurmbach am oberen Zürichsee und dem thurgauischen Lilienthal, die Landschreiber der Freien Ämter zu Bremgarten, die ungezählten Hauptleute in französischen Diensten, die bei La Rochelle, Meaux und andere Kampfstätten französischer Kriegsgeschichte kämpften, die einflussreichen Ammänner der zugerischen Politik, und auch die Wissenschaft darf einen Zurlauben als wortgewandten und fleissigen Gelehrten nennen: Generallieutenant Zurlauben, Verfasser der Tableaux topographiques de la Suisse, dessen Büchersammlung den Grundstock der aargauischen Kantonsbibliothek bildet.

Auf dem Kolinplatz, der den Namen des Zuger Bannerherrengeschlechtes in Erinnerung ruft, vor der ältesten Innerschweizer Gaststätte, dem «Ochsen», steht auf einem Brunnenstock Wolfgang Kolin. In der Nähe hat der aus Zürich stammende Zuger Ammann Hans Schwarzmurer, der einstens im Namen der Eidgenossen dem Mailänderherzog die Schlüssel seiner Vaterstadt übergeben durfte, seinen Ehrenplatz gefunden, während in der Sichtweite von St. Oswald der Kirchenpatron des nahen Heiligtums seinen Brunnen besitzt.

Einst pries ein fremder Gast, Wilhelm Heinse, die Stadt Zug mit den Worten: «Ich bin für himmlische Freude fast vergangen. So etwas Schönes habe ich meiner Lebtag nicht gesehen». Und wenn er erst die Kostproben des gastlichen Zugs auf seiner Zungenspitze hätte fühlen können, dann wäre sein Lob ein Hymnus seltener Art geworden. Die edelste Frucht des Zugerlandes ist die Kirsche; aus ihr fliesst das Zuger Chriesiwasser, von dem man im Zugerliedli hört:

«Zugerbuebe, Zugerkirsch / sind en Extraklasse, / wenn sie ächt und unverfälscht / händ sie beidi Rasse.»

Dass aus dem See nicht nur Unheil für die Stadt entstehen kann, wissen die Fischliebhaber, denn der Zuger Rötel gehört zu den begehrten Spezialitäten der zugerischen Gastronomie. Und wer gar für die Süssigkeiten des irdischen Lebens etwas übrig hat, wird nicht an der zarten Zugerkirschtorte vorbeigehen.

Neben dem alten Zug hat sich nun ein neues, industrielles Zug entwickelt; moderne Industriebauten, Hochhäuser und Bausiedlungen künden von dem ungestümen Wachsen des städtischen Gemeinwesens. Und das Signet «Zuger Produkt» ist ein untrügliches Kennzeichen von solider Qualität, sowie exakter Arbeit und trägt daher stolz den zugerischen Namen in alle Richtungen der Windrose. Aber das alte Zug nimmt die neuen Einwohner ebenso gastlich auf, wie es die Bürger seit Jahrhunderten beherbergte, und nach kurzer Zeit fühlt man sich im alten und neuen Zug daheim, als wäre man immer hier gewesen. *H. Koch*

Die Leuchtdichte der Strassenoberfläche an hellen Tagen

Ein Beitrag zur Planung von Tunneleingangsbeleuchtungen

Von *F. Mäder*, Bern

535.241.16 : 628.971.6 : 624.19

1. Einleitung

Mit der Tageslichtbeleuchtungstechnik befassten sich bis anhin fast nur jene Lichttechniker und Architekten, welche die Beleuchtungsverhältnisse in Innenräumen zu untersuchen hatten. Bei den steigenden Ansprüchen an die Güte der Beleuchtung sind die Lichttechniker und Architekten insbesondere an jenen Tageslichtbeleuchtungsverhältnissen interessiert, bei welchen eine zusätzliche künstliche Beleuchtung eingesetzt werden muss. Die kritischen gerade noch ohne künstliches Zusatzlicht tragbaren Tageslichtbeleuchtungen treten am Tage normalerweise bei bedecktem Himmel auf. Demzufolge beziehen sich die Methoden zur Ermittlung von Tageslichtbeleuchtungsstärken, d. h. von Tageslichtquotienten, in Innenräumen wenigstens heute im allgemeinen auf bedeckten Himmel [1][1]). Es ist jedoch durchaus denkbar, dass sich die Minimalbeleuchtungsverhältnisse auch bei klarem blauem Himmel einstellen können.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

In jüngster Zeit wurde denn auch die Untersuchung der Beleuchtungsverhältnisse bei klarem Himmel vorangetrieben. Wenn die Arbeitsgruppe «Tageslicht» an der Tagung der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) in Wien 1963 einerseits mitteilen durfte, es seien in der Berichtsperiode technisch brauchbare Verfahren zur Vorausbestimmung der Tagesbeleuchtung in Innenräumen bei vollständig und gleichmässig bedecktem Himmel entwickelt worden, so klagte sie anderseits, die entsprechenden Arbeiten für klaren blauen Himmel hätten wesentlich geringere Fortschritte erzielt [2].

Zudem berichtete die Arbeitsgruppe, die Tageslichtforschung werde weiterhin durch das Fehlen ausreichender Messungen der Tagesbeleuchtung im Freien und der Himmelsleuchtdichte aufgehalten. Selbstverständlich bemüht sich die CIE, diese Messungen möglichst zu fördern. An den Untersuchungsergebnissen sind neben den Architekten und Innenraumbeleuchtungsfachleuten auch jene interessiert, welche die Projekte für die Eingangsbeleuchtung von Tunneln auszuarbeiten haben.

Dank mehrerer Untersuchungen weiss man ungefähr, wie gross das Verhältnis der Leuchtdichte in der Tunneleinfahrzone zur Leuchtdichte vor dem Tunnel sein muss, damit ein Automobilist, der sich mit seinem Wagen noch ausserhalb des Tunnels befindet, bereits Hindernisse in der Tunneleinfahrzone erkennen kann [3; 4; 5]. In den neueren Leitsätzen und im schweizerischen Leitsatzentwurf für die Beleuchtung von Strassentunneln und Unterführungen sind diese Leuchtdichtenverhältnisse angegeben [6; 7]. Im Entwurf für die schweizerischen Leitsätze steht z. B. die Minimalleuchtdichte L_T (in cd/m²) auf der Fahrbahn der Tunneleinfahrzone sei nach der Formel zu berechnen:

$$L_T = 0{,}15\, L_A^{0,9} \qquad (1)$$

Darin bedeutet L_A die für die Adaptation der Augen massgebende Leuchtdichte (cd/m²) vor dem Tunnel.

Es ist nun möglich, dass die Leuchtdichte der Fahrbahn ausserhalb des Tunnels einen Wert von 8000 cd/m² erreicht. Nach Gl. (1) hat man in diesem Falle in der Tunneleinfahrzone für eine Fahrbahnleuchtdichte von ca. 500 cd/m² zu sorgen. Um einen so hohen Leuchtdichtewert zu erreichen, ist ein ganz ausserordentlicher und kostspieliger Aufwand erforderlich. Auf diesen Sachverhalt wird in den Leitsätzen hingewiesen und empfohlen, alle sich bietenden Möglichkeiten (z. B. bauliche Massnahmen) zur wirtschaftlicheren Ausführung der Tunneleingangsbeleuchtung wahrzunehmen und auszunutzen. Ganz unsinnig wäre es, in der Tunneleinfahrzone eine Beleuchtung für eine Fahrbahnleuchtdichte von 500 cd/m² zu installieren, wenn bei den örtlichen Verhältnissen L_A nie einen höheren Wert als beispielsweise 1000 cd/m² erreicht. Im Gegensatz zum Architekten und Innenraumbeleuchtungstechniker ist also der Tunnelbeleuchtungsfachmann am Maximalwert der Tagesbeleuchtung interessiert. Für die Tunneleingangsbeleuchtung entsteht bei der maximalen Leuchtdichte herrührend von der Sonne und vom blauen Himmel die wirtschaftlich ungünstigste Situation.

Im Folgenden wird versucht, eine praktisch gangbare Methode zur ungefähren Vorausbestimmung der auf der Fahrbahn vor dem Tunnelportal auftretenden höchsten Leuchtdichte zu beschreiben. Als Nebenergebnis soll aus den Betrachtungen hervorgehen, wo die Sonne bei der lichttechnisch ungünstigsten Situation steht, damit der Strassenbauer allenfalls die einfachste Lösung erkennt, um durch bauliche Massnahmen den Wert der maximalen Leuchtdichte vor dem Tunneleingang möglichst niedrig zu halten.

2. Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke

2.1 Allgemeines

Der Adaptationszustand und die Veränderung der Adaptation der Augen werden im wesentlichen durch die Helligkeit und die Helligkeitsänderung im Blickfeld des Beobachters bestimmt. Helligkeit ist angenähert das empfindungsmässige Korrelat zur photometrischen Grösse: Leuchtdichte. Alle Licht- und Adaptationsverlauf-Untersuchungen, welche im Zusammenhang mit den Fragen der Tunneleingangsbeleuchtungen durchgeführt wurden, stützen sich deshalb auf Leuchtdichtemessungen. Wenn dem ungeachtet die Lichttechniker auch für die Tunnelbeleuchtung Angaben über die Beleuchtungsstärkenverhältnisse haben möchten, so liegt das in der grösseren Einfachheit der Beleuchtungsstärkentechnik begründet und darin, dass einfach zu handhabende Luxmeter überall zur Verfügung stehen. Trotzdem die Formel

$$\text{Leuchtdichte}\,(L) = \text{Leuchtdichtefaktor}\,(E/L) \times \text{Horizontalbeleuchtungsstärke}\,(E) \qquad (2)$$

recht einfach aussieht, so besteht doch zwischen der relativ einfach messbaren Horizontalbeleuchtungsstärke und der gesuchten Leuchtdichte ein sehr verwickelter Zusammenhang. Der Leuchtdichtefaktor (E/L) hängt vom Reflexionsverhalten der betrachteten Fläche und damit von der Strahlungsrichtung, vom Einfallwinkel des auffallenden Lichtes sowie von der Beobachtungsrichtung ab. Bei der Vielfalt von Beobachtungs- und Lichteinstrahlungsmöglichkeiten ist es dringend notwendig, vereinfachende Normen einzuführen, falls die Vorausberechnungsmethode in der Praxis Eingang finden soll.

2.2 Vereinfachungen

In der Strassenbeleuchtungstechnik konnten verhältnismässig leicht sinnvolle Vereinfachungen gefunden werden [8]. Gemäss den Empfehlungen der CIE und den Vorschlägen von *Bauer* beschränken sich die nachfolgenden Ausführungen auf die Ermittlung der Leuchtdichte der trockenen Fahrbahn. Die Frage, ob diese Einschränkung statthaft sei, ist natürlich begründet. Es scheint doch naheliegend, dass hell beschienene Felswände und insbesondere ein hell beschienenes Tunnelportal die Adaptation der Augen beeinträchtigen. Diesem Bedenken lässt sich folgendes entgegenhalten: Kein Strassenbenützer muss so wie der Motorfahrzeuglenker seine ganze Aufmerksamkeit der vor ihm liegenden Fahrbahn zuwenden. Nach *Crawford* [9] und anderen Autoren wird bei fovealer Betrachtung[2]) der Adaptationszustand durch die Leuchtdichte eines Gesichtsfeldausschnittes bestimmt, der nur einen kleinen Bruchteil des gesamten Blickfeldes einnimmt. Die Fovea soll über 90 % zur Adaptation beitragen. Obwohl dieses Ergebnis nicht unwidersprochen blieb, so scheint es doch erlaubt, die Adaptationsleuchtdichte näherungsweise gleich jener Leuchtdichte der Strassenoberfläche zu setzen, die der Automobilist foveal sieht. Dies rechtfertigt sich um so mehr, als alle Leitsätze die dringende Aufforderung enthalten, durch Anstriche und Bepflanzungen die Umgebung der Fahrbahn vor dem Tunnelportal möglichst dunkel zu gestalten.

Als weitere Vereinfachung wird den Betrachtungen nur die von der CIE für die Strassenleuchtdichtetechnik empfohlene Neigung der Beobachtungsrichtung zugrunde gelegt. Diese beträgt gegenüber der Horizontalen 1° nach unten und stellt damit die für den Automobilisten im schnellen Strassenverkehr üblichste und wichtigste Neigung der Blickrichtung dar.

Unter Anlehnung an die von *Bauer* in seiner Arbeit über «Ein technisches System der Leuchtdichte in der Strassenbeleuchtung» vorgeschlagene und begründete Normung befassen sich die nachfolgenden Ausführungen zudem nur mit strassenachsenparallelen Beobachtungsspuren, die den Beobachtungsstandort und die beobachtete Fahrbahnstelle enthalten.

Die bereits angegebenen Vereinfachungen gelten allgemein. Im Einzelnen werden noch weitere Vereinfachungen eingeführt oder vorgeschlagen, die man je nach Umständen anwenden darf und die eine Herabsetzung des Aufwandes für die Planung ermöglichen.

[2]) Foveale Betrachtung liegt dann vor, wenn der Beobachter den betrachteten Gegenstand aufmerksam, d. h. streng fixiert.

3. Die Leuchtdichte, herrührend vom direkten Sonnenlicht

3.1 Der «Leuchtdichtekörper»

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, eine möglichst einfache graphische Darstellung zu finden, aus welcher sich die Fahrbahnleuchtdichte der Beobachtungsstelle für klares Wetter und trockenen Strassenbelag sowie für die beschriebenen Einschränkungen hinsichtlich der Beobachtungsrichtung in Abhängigkeit vom Stand der Sonne herauslesen lässt. Dies kann beispielsweise dadurch geschehen, dass die bei einer bestimmten Einstrahlungsrichtung erzeugte Fahrbahnleuchtdichte als Vektor vom Beobachtungspunkt aus in der Einstrahlungsrichtung aufgetragen wird. Alle möglichen Vektoren enden in der Oberfläche eines «Leuchtdichtekörpers». Der längste dieser Vektoren weist nach jenem Stand der Sonne hin, der die lichttechnisch ungünstigsten Verhältnisse schafft und daher den Beleuchtungstechniker wie den Strassenbauingenieur im Hinblick auf die Beurteilung möglicher Sparmassnahmen besonders interessiert (Fig. 1).

Nach Gl. (2) muss man zur Konstruktion des «Leuchtdichtekörpers» die Horizontalbeleuchtungsstärke der Sonne bei klarem Wetter in Abhängigkeit vom Stand der Sonne sowie die zur genormten Blickrichtung gehörenden Leuchtdichtefaktoren für alle vorkommenden Einstrahlungsrichtungen kennen.

3.2 Die Horizontalbeleuchtungsstärke der Sonne

Wie eingangs erwähnt, liegen gegenwärtig noch nicht genügend Messergebnisse von Untersuchungen über die Tagesbeleuchtung im Freien vor. Immerhin wurden schon seit geraumer Zeit und an verschiedenen Orten Beleuchtungsstärkenmessungen durchgeführt, um die Beleuchtungsstärke, herrührend vom direkten Sonnenlicht in Abhängigkeit vom Sonnenstand zu ermitteln.

Es fehlte auch nicht an Versuchen, diese Abhängigkeit mathematisch zu erfassen. Um das auf einfache Weise zu erreichen, muss einmal die extraterrestrische Beleuchtungsstärke der Sonne E_0 bekannt sein. Nach sorgfältiger Beurteilung verschiedenartiger photometrischer Messungen kommt *Siedentopf* [10] für E_0 zu einem Wert von 140000 lx. Zur Berechnung der Horizontalbeleuchtungsstärke der Sonne $E_\odot$ an der Erdoberfläche ist ferner die Kenntnis des Transmissionsgrades τ der Atmosphäre erforderlich. Für die bei völlig klarem Wetter senkrecht zur Erdoberfläche durchstrahlte gesamte Atmosphäre schlägt *Linke* vor mit einem $\tau_{555\ \mathrm{nm}}$ von 0,914 zu rechnen. Hat die Sonne irgend eine Zenitdistanz $z_\odot$, so muss überdies der für die Absorption massgebende Weg des Lichtes $M(z_\odot)$ in Einheiten des gesamten Atmosphärenweges bei senkrechtem Lichteinfall ermittelt werden. $M(z_\odot)$ ist keine einfache Funktion. Die zu ihrer Berechnung allgemein verwendete Formel stammt von *Bemporad*. In einigen Werken finden sich die Werte von $M(z_\odot)$ in Abhängigkeit von der Zenitdistanz der Sonne tabelliert. Dabei stehen auch Angaben über die Berücksichtigung des mittleren Barometerstandes [11].

Unter Zuhilfenahme all dieser Werte lässt sich die Horizontalbeleuchtungsstärke auf der Erdoberfläche herrührend vom direkten Sonnenlicht $E_\odot$ mit der einfachen und bekannten Formel berechnen:

$$E_\odot = E_0\, \tau^{M(z_\odot)} \cdot \cos z_\odot \qquad (3)$$

Diese Formel gilt für völlig klares Wetter d. h. für die Rayleigh-Atmosphäre. Mit der Rayleigh-Atmosphäre darf man aber kaum jemals rechnen; denn auch bei wolkenlosem Himmel ist meist eine gewisse Trübung vorhanden. Trübungen haben immer eine Abschwächung der Beleuchtungsstärke $E_\odot$ zur Folge. Sie wirken sich damit so aus, als ob der Strahlenweg durch die Atmosphäre $M(z_\odot)$ verlängert würde. *Linke* hat daher empfohlen, die Trübung dadurch zu berücksichtigen, dass $M(z_\odot)$ mit einem passenden Trübungsfaktor T_v multipliziert wird. Damit lautet die Formel für die gesuchte Beleuchtungsstärke:

$$E_\odot = E_0\, \tau^{T_v \cdot M(z_\odot)} \cdot \cos z_\odot \qquad (4)$$

Aus der nachfolgenden Tabelle ist zu ersehen, wie sich nach dieser Formel die Trübungsfaktoren auf die Beleuchtungsstärke auswirken. Trübungsfaktoren von 6 und grössere werden erst bei Vorhandensein einer Wolkenschicht erreicht und sind deshalb in der Tabelle nicht berücksichtigt.

288-294

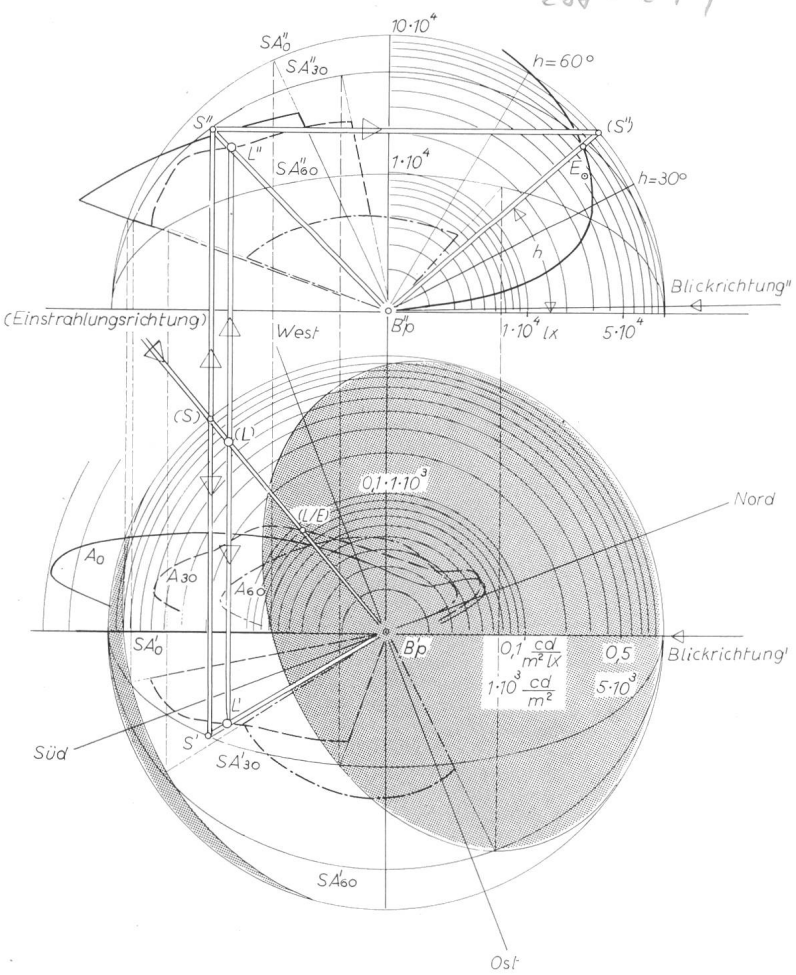

Fig. 1
Konstruktion des «Leuchtdichtekörpers»

——— Schnitt des «Leuchtdichtekörpers» mit der A_0-Ebene sowie zugehörige Leuchtdichtefaktorkurve in der umgeklappten A_0-Ebene;

— — — Schnitt des «Leuchtdichtekörpers» mit der A_{30}-Ebene sowie zugehörige Leuchtdichtefaktorkurve in der umgeklappten A_{30}-Ebene;

·—·—· Schnitt des «Leuchtdichtekörpers» mit der A_{60}-Ebene sowie zugehörige Leuchtdichtefaktorkurve in der umgeklappten A_{60}-Ebene;

E Beleuchtungsstärke bei *Bp*; *L* Leuchtdichte bei *Bp*; *S* Schnittpunkt eines Einfallstrahls mit der Himmelshalbkugel; *Bp* Beobachtungspunkt

Horizontalbeleuchtungsstärke herrührend vom direkten Sonnenlicht in 10^3 lx bei einigen Sonnen-Zenitdistanzen und für die Trübungsfaktoren 1, 2 und 4 (Barometerstand 760 mm Hg)

Tabelle I

$z_\odot$	Trübungsfaktor T_V		
	1	2	4
10 °	126,0	114,9	95,7
30 °	109,2	98,5	80,0
45 °	87,2	76,8	59,5
60 °	58,5	48,9	34,2
75 °	25,7	18,2	9,2
85 °	4,8	1,9	0,3

Nach photometrischen Messungen nehmen die Beleuchtungsstärken mit zunehmender Zenitdistanz etwas weniger ab als die Werte in der Tabelle I. Im übrigen stimmen die Mittelwerte der Potsdamer-Beleuchtungsstärkenregistrierungen recht gut mit den Werten der Gl. (4) überein, falls man darin den Trübungsfaktor 4 setzt [12]. Die Trübungsfaktoren hängen ausser von den örtlichen Verhältnissen auch von den Jahreszeiten ab. Messungen, die in Österreich durchgeführt wurden, haben ergeben, dass der Trübungsfaktor in der Stadtluft im allgemeinen rund um eine Einheit grösser ist als in reiner Landluft. Er beträgt also z. B. im Winter in der Stadt 3,1 statt 2,1 auf dem Lande und im Sommer 4,2 statt 3,4 [13].

Selbstverständlich sollte sich der Tunnelbeleuchtungsfachmann bei der Planung auf Beleuchtungsstärkenmessungen aus der Gegend des zu bauenden Tunnels stützen können. Leider liegen aus der Schweiz noch keine Resultate von derartigen Messungen vor. Die rechts im Aufriss der Fig. 1 in einer Kurve dargestellte Abhängigkeit der Horizontalbeleuchtungsstärke $E_\odot$ von der Sonnenhöhe h ($h = 90 - z_\odot$) ist daher unter Anlehnung an Wienermessungen für einen mittleren Barometerstand von 710 mm Hg angenommen worden.

3.3 Die Leuchtdichtefaktoren

Man kann die oberflächentypischen Leuchtdichtefaktoren L/E in Abhängigkeit von der Lichteinfallsrichtung in irgend einem der üblichen Ebenensysteme darstellen. Für die Vorausbestimmung der Leuchtdichten auf künstlich beleuchteten Strassen scheint die gleichartige Darstellung der Lichtstärkenverteilungskurven der Leuchten und der Leuchtdichtefaktorkurven in den sog. A-Ebenen am zweckmässigsten zu sein. Daher werden die Leuchtdichtefaktoren von Strassenbelägen hauptsächlich als Kurven in den A-Ebenen angegeben (Fig. 2). Das ist auch der Grund, weshalb sich die nachfolgenden Ausführungen auf die Kenntnis der Leuchtdichtefaktorkurven in den A-Ebenen stützen. Damit soll jedoch nicht gesagt sein, dass es keine geeignetere Darstellung für die Ermittlung der Fahrbahnleuchtdichte vor dem Tunnelportal gebe.

Wie aus Fig. 2 ersichtlich, steht die A_0-Ebene senkrecht zur Strassenoberfläche und geht durch den Beobachtungspunkt *Bp*, wobei ihre Spur gemäss den vorgesehenen Vereinfachungen parallel zur Strassenachse verläuft. Die Spur der A_0-Ebene in der Strassenoberfläche ist zugleich die Drehachse der *A*-Ebenen.

Für die Praxis muss der Lichttechniker die Leuchtdichtefaktorkurven des verwendeten Strassenbelages vorweg bestimmen lassen, da gegenwärtig noch nicht genügend Messungen vorliegen, um die Werte der Leuchtdichtefaktoren beispielsweise in Tabellenform für alle üblichen Strassenbeläge anzugeben. Den nachfolgenden Betrachtungen liegen daher nur angenommene Leuchtdichtefaktoren zugrunde.

Einer besseren Übersichtlichkeit zuliebe beschränken sich die Darlegungen auf die Verwendung der A_0-, der *A 30*- und der *A 60*-Ebene. In Fig. 1 sind die Leuchtdichtefaktoren als Funktion des Strahlungswinkels α nur in der Umklappung der drei *A*-Ebenen in die Grundrissebene eingezeichnet. Diese Darstellung gestattet die tatsächliche Grösse der Leuchtdichtefaktoren dank des mit angegebenen logarithmischen Massstabes abzulesen.

3.4 Begrenzung der Einstrahlung des direkten Sonnenlichtes

Leuchtdichtefaktormessungen werden für möglichst viele Einfallwinkel durchgeführt, da der Lichttechniker an allen Winkeln α in den *A*-Ebenen und für besondere Aufgaben auch an allen Neigungswinkeln β der *A*-Ebenen interessiert ist. Demgegenüber fällt direktes Sonnenlicht natürlich nicht aus allen Richtungen auf die Beobachtungsstelle *Bp* ein. Vorab sind aus den Gebieten oberhalb der Sonnenbahn am längsten und unterhalb der Sonnenbahn am kürzesten Tage keine Einstrahlungsrichtungen vorhanden. Ferner können Gebirgszüge, Waldungen und auch Bebauungen die Einstrahlung von direktem Sonnenlicht verhindern.

Der Einfachheit halber sind in Fig. 1 nur die Begrenzungen durch die Sonnenbahnen am längsten und am kürzesten Tage eingezeichnet, wobei es selbstverständlich unsinnig wäre, wenn man bei einer Tunneleinfahrstrasse in gebirgiger Gegend, die vor 12.00 h und nach 17.00 h immer im Schatten liegt, die vorhandenen Begrenzungen nicht berücksichtigen würde. Im Grundriss der in Fig. 1 dargestellten Halbkugel über dem Beobachtungspunkt *Bp* liegt ein Raster auf den Gebieten, welche den Richtungen entsprechen, aus denen kein direktes Sonnenlicht zu *Bp* gelangt.

3.5 Vorschlag für die Konstruktion des «Leuchtdichtekörpers»

Fig. 1 zeigt einen möglichen Weg zum Auffinden einiger Punkte und Schnittkurven des «Leuchtdichtekörpers». Der Beobachter befindet sich rechts, und die Spur seiner Blickrichtung verläuft parallel zur Hauptachse. Aus den eingezeichneten Himmelsrichtungen lässt sich die Blickrichtung selbst und damit auch die Lage der Strasse erkennen. Für die Konstruktion benötigt man ferner:

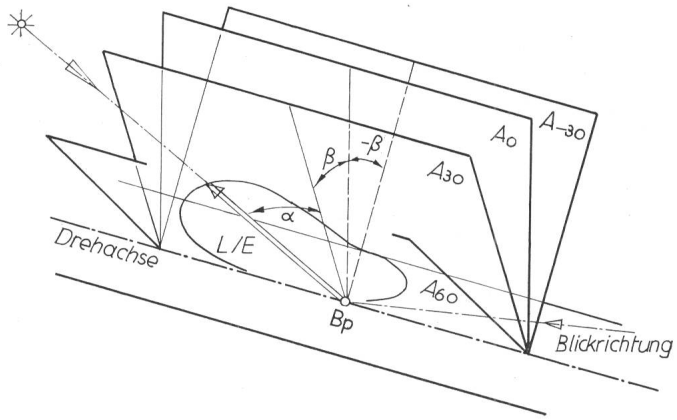

Fig. 2
A-Ebenen mit Drehachse in der Fahrtrichtung an der Strassenoberfläche
Leuchtdichtefaktorkurve in der A_{30}-Ebene
L/E Leuchtdichtefaktor; *Bp* Beobachtungspunkt; α Winkel den die Einstrahlungsrichtung mit der Fallinie der *A*-Ebene bildet; β Neigungswinkel der *A*-Ebene oder Winkel der Fallinie der *A*-Ebene mit der Senkrechten

1. Aufriss und Grundriss der Schnittkreise SA_0, SA_{30} und SA_{60} der A-Ebenen mit der Halbkugel über dem Beobachtungspunkt Bp;
2. In der Umklappung der A-Ebenen in die Grundrissebene dargestellte Leuchtdichtefaktoren;
3. Rechts oben im Aufriss als Kurve eingetragene Horizontalbeleuchtungsstärke der Sonne $E_{\odot}$ in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe h.

Als Beispiel soll ein Punkt des «Leuchtdichtekörpers» in der *A 30*-Ebene für eine in der Umklappung dieser Ebene gewählte Einstrahlungsrichtung des Sonnenlichtes gesucht werden.

In Fig. 1 ist der Gang der Konstruktion durch Doppellinien angedeutet. Der Schnitt des gewählten Strahles mit der Leuchtdichtefaktorkurve in *A 30* ergibt den zur Richtung gehörenden Leuchtdichtefaktor E/L. Sein Wert lässt sich mit Hilfe des logarithmischen Maßstabes ablesen. Er beträgt im vorliegenden Beispiel $0{,}09 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2\,\text{lx}}$.

Senkrecht unter und senkrecht über dem Schnittpunkt (S) des Strahles mit dem Schnittkreis (*SA 30*) der *A 30*-Ebene befindet sich auf den Schnittkreisen *SA 30'* bzw. *SA 30''* der Grundriss S' bzw. der Aufriss S'' des «Durchstosspunktes» des Strahls durch die Halbkugel über dem Beobachtungspunkt Bp. Wird die Ebene durch die Normale auf Bp und den Strahl $S''-Bp$ nach rechts in die Aufrissebene umgeklappt, so findet man neben dem richtigen Einstrahlungswinkel h (der Sonnenhöhe) auch als Schnitt der umgeklappten Geraden $(S'')-Bp$ mit der Beleuchtungsstärkenkurve die bei der Sonnenhöhe h vorhandene horizontale Beleuchtungsstärke $E_{\odot}$ herrührend vom direkten Sonnenlicht. Für die gewählte Einstrahlungsrichtung erreicht $E_{\odot}$ nach dem eingezeichneten logarithmischen Maßstab einen Wert von $7 \cdot 10^4$ lx.

Diese Beleuchtungsstärke mit $0{,}09 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2\,\text{lx}}$ (dem zur gleichen Einstrahlungsrichtung gehörenden Leuchtdichtefaktor) multipliziert ergibt eine Leuchtdichte von $6{,}3 \cdot 10^3$ cd/m² d. h. den Leuchtdichtewert L des gesuchten Punktes auf der Oberfläche des «Leuchtdichtekörpers». Der Wert L wird in der umgeklappten *A 30*-Ebene auf dem Strahl $(S)-Bp$ gemäss dem für die Leuchtdichte geltenden logarithmischen Maßstab eingetragen. Senkrecht unter bzw. senkrecht über (L) befindet sich auf der Projektion des Strahles $S-Bp$ der Grundriss L' bzw. der Aufriss L'' des Punktes.

Das gleiche für einige weitere Einstrahlungsrichtungen in der *A 30*-Ebene wiederholt führt zur Schnittkurve des «Leuchtdichtekörpers» mit der *A 30*-Ebene. Fällt S' eines gewählten Einfallstrahls in das mit dem Punktraster belegte Gebiet, so bedeutet dies, dass direktes Sonnenlicht nie die entsprechende Einstrahlungsrichtung haben kann und somit der «Leuchtdichtekörper» nach dieser Richtung hin den Wert 0 aufweist.

Auf die gleiche Art sucht man die Schnittkurven des «Leuchtdichtekörpers» mit beliebig vielen weiteren A-Ebenen.

3.6 Auswertung der vorgeschlagenen Darstellung des «Leuchtdichtekörpers»

In den umgeklappten A-Ebenen können, wie aus dem Gang der Konstruktion hervorgeht, die vom direkten Sonnenlicht herrührenden Fahrbahnleuchtdichten herausgelesen werden, welche ein Beobachter für einen bestimmten Sonnenstand bei klarem Wetter zu erwarten hat. Den Tunnelbeleuchtungsfachmann interessiert dabei insbesondere die grösste mögliche Leuchtdichte. Obwohl in Fig. 1 nur die Schnittkurven des «Leuchtdichtekörpers» mit der A_0-, der *A 30*- und der *A 60*-Ebene dargestellt sind, so ist doch aus Aufriss und Grundriss bereits zu erkennen, dass die höchste Leuchtdichte dann auftritt, wenn die Sonne am Nachmittag des kürzesten Tages für den Beobachter ungefähr über der Fahrbahn steht. Diese kritische Leuchtdichte braucht also durchaus nicht bei der maximalen Horizontalbeleuchtungsstärke der Sonne vorhanden zu sein. Im dargestellten Beispiel erreicht die höchste Leuchtdichte einen Wert von $24 \cdot 10^3$ cd/m². Nun hat ein Automobilist, der in unseren Gegenden auf ein Tunnelportal zufährt, kaum jemals einen freien Horizont vor sich, wie dies im behandelten Beispiel der Einfachheit halber angenommen wurde. Zudem sind ja die Leuchtdichtefaktorkurven, auf die sich die vorliegenden Ausführungen stützen, Annahmen. Ein Leuchtdichtewert von $24 \cdot 10^3$ cd/m² dürfte daher in der Wirklichkeit eher unwahrscheinlich sein.

Auf eines sei hier noch deutlich aufmerksam gemacht. Wie Fig. 1 zum Ausdruck bringt, braucht ein zur Steuerung der Tunneleingangsbeleuchtung angebrachter photoelektrischer Empfänger, der die Horizontalbeleuchtungsstärke oder die Vertikalbeleuchtungsstärke am Tunneleingang misst, nicht die richtige Schaltung zu bewirken.

Der aus der Darstellung des «Leuchtdichtekörpers» ersichtliche Stand der Sonne, bei dem die höchste Fahrbahnleuchtdichte entsteht, muss auch den Bauingenieur interessieren, welcher sich mit den Lichtdämpfungsbauten zu befassen hat. Erst die Kenntnis der Form des «Leuchtdichtekörpers» ermöglicht ihm die Planung von wirksamen und wirtschaftlich günstigen Lichtschutzbauten. Es ist wohl denkbar, dass in einem besonderen Fall eine einfache Wand vielleicht verbunden mit einer Bepflanzung mit Nadelhölzern genügt, um dem «Leuchtdichtekörper die Spitze zu brechen».

Ein rauher und dunkler Strassenbelag bricht die Spitze des «Leuchtdichtekörpers» ebenfalls. Er setzt jedoch die Fahrbahnleuchtdichte nicht für alle Einstrahlungsrichtungen herab. Der Entscheid, ob ein rauher Strassenbelag angewendet werden soll oder nicht, hängt von den örtlichen Verhältnissen, von der geographischen Lage und den vorhandenen Schattenspendern ab. Zur Beurteilung dieser Beleuchtungsverhältnisse leistet ebenfalls eine der Fig. 1 entsprechende Darstellung des «Leuchtdichtekörpers», besonders das mit Raster belegte Gebiet des Grundrisses, wertvolle Dienste.

4. Leuchtdichte, herrührend vom klaren blauen Himmel

4.1 Allgemeine Berechnungsgrundlagen

Ein gewisser Betrag der Leuchtdichte an der Beobachtungsstelle stammt vom blauen Himmelslicht. Selbstverständlich sollte der Lichttechniker die gesamte Fahrbahnleuchtdichte kennen. Würde der Leuchtdichtenanteil vom blauen Himmel 10...20% der Gesamtleuchtdichte nie überschreiten, so brauchte er bei der Planung kaum berücksichtigt zu werden.

Zur Berechnung der Leuchtdichte, die ein bestimmter Teil des blauen Himmel beisteuert, muss vorerst die Beleuchtungsstärke ΔE_{Bp} (a,z) bekannt sein, welche dieser Himmelsteil an der Beobachtungsstelle erzeugt (a = azimutaler Winkel, z = Zenitdistanz des Himmelsteils). Den entsprechenden Leuchtdichtebetrag ΔL_{Bp} (a,z) erhält man durch Multiplikation von ΔE_{Bp} (a,z) mit dem zur Strahleneinfallsrichtung gehörenden Leuchtdichtefaktor L/E (a,z).

Für die Ermittlung der Beleuchtungsstärkenanteile ΔE_{Bp} (a,z) dient das Raumwinkelprojektionsgesetz (Fig. 3). Danach ist ΔE_{Bp} (a,z) an der Beobachtungsstelle Bp gleich der mittleren Leuchtdichte (Himmelsleuchtdichte) L_H (a,z) eines Flächen-

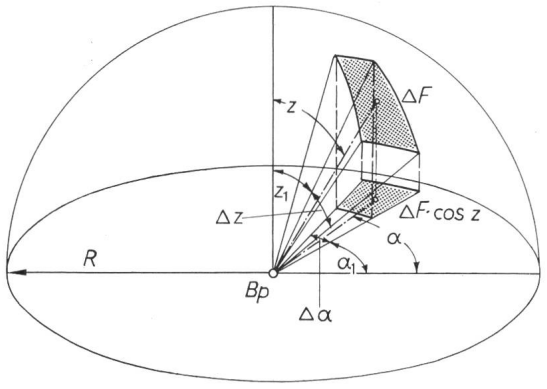

Fig. 3
Raumwinkelprojektion
R Radius der Himmelshalbkugel; ΔF Flächenstück der Himmelshalbkugel; *Bp* Beobachtungspunkt; *z* mittlere Zenitdistanz von ΔF; *a* mittlerer azimutaler Winkel von ΔF

stückes $\Delta F(a,z)$ einer gedachten Halbkugeloberfläche über *Bp* multipliziert mit $\Delta F(a,z) \cdot \cos z$ geteilt durch das Quadrat des Abstandes vom Flächenstück zu *Bp* d. h. dem Kugelradius R^2.

$$\Delta E_{\mathrm{Bp}}(a,z) = \frac{L_{\mathrm{H}}(a,z)}{R^2} \Delta F(a,z) \cdot \cos z \qquad (5)$$

$\Delta F(a,z) \cdot \cos z$ bedeutet die Normalprojektion $\Delta F'(a,z)$ des Flächenstückes auf die Horizontalebene.

Den Beleuchtungsstärkenanteil $\Delta E_{\mathrm{Bp}}(a,z)$ mit dem zugehörigen Leuchtdichtefaktor $L/E(a,z)$ multipliziert ergibt den gesuchten Leuchtdichteanteil $\Delta L_{\mathrm{Bp}}(a,z)$:

$$\Delta L_{\mathrm{Bp}}(a,z) = L/E(a,z) \frac{L_{\mathrm{H}}(a,z)}{R^2} \Delta F(a,z) \cdot \cos z \qquad (6)$$

Die gesamte Leuchtdichte herrührend vom klaren blauen Himmel ist die Summe der Teilleuchtdichten $\Delta L_{\mathrm{Bp}}(a,z)$ von allen Oberflächenstücken $\Delta F(a,z)$ der ganzen Halbkugel über *Bp*. Diese Summe wird genauer durch Verkleinerung der betrachteten Flächenstücke:

$$\Delta F(a,z) = R^2 \cdot \Delta a \sin z \cdot \Delta z$$

d. h. am genausten beim Übergang auf:

$$L_{\mathrm{Bp}} = \int_{a=0}^{2\pi} \int_{z=0}^{\frac{\pi}{2}} L/E(a,z) \cdot L_{\mathrm{H}}(a,z) \cdot da \cos z \cdot \sin z \, dz \qquad (7)$$

Um die Fahrbahnleuchtdichte herrührend vom blauen Himmelslicht berechnen zu können, müssen somit nach Gl. (6) bzw. (7) die Leuchtdichtefaktoren E/L in Abhängigkeit vom azimutalen Winkel *a* und der Zenitdistanz *z* sowie die Himmelsleuchtdichten L_{H} ebenfalls in Abhängigkeit von *a* und *z* bekannt sein.

4.2 Die Leuchtdichtefaktoren

Als Leuchtdichtefaktoren sollen nur jene berücksichtigt werden, welche für die unter den Vereinfachungen (2.2) angegebene Normblickrichtung gelten. Die in den folgenden Ausführungen verwendeten Leuchtdichtefaktoren entsprechen ungefähr den in Fig. 1 als Kurven in den *A*-Ebenen dargestellten Werten.

4.3 Die Himmelsleuchtdichte

4.3.1 Allgemeines

Die Leuchtdichte $L_{\mathrm{H}}(a,z)$ eines Flächenstückes $\Delta F(a,z)$ hängt im wesentlichen von seiner Lage zur Sonne, von der Zenitdistanz der Sonne und vom Trübungsfaktor ab. Gleichwertig wie die absoluten Leuchtdichten $L_{\mathrm{H}}(a,z)$ ist die Kenntnis der gesamten Horizontalbeleuchtungsstärke des klaren blauen Himmels beim Beobachtungspunkt zusammen mit der relativen Leuchtdichteverteilung am Himmelsgewölbe. Nach Gl. (5) lässt sich aus der relativen Verteilung berechnen, wie viel Prozente ein bestimmtes Flächenstück $\Delta F(a,z)$ zur Gesamtbeleuchtungsstärke beim Beobachtungspunkt beiträgt. Während die Messungen der Leuchtdichteverteilungen am Himmelsgewölbe vorwiegend aus jüngster Zeit stammen, sind Gesamtbeleuchtungsstärkenwerte schon seit vielen Jahren bekannt.

4.3.2 Die gesamte Horizontalbeleuchtungsstärke, herrührend vom klaren blauen Himmel

Von den vielen Beleuchtungsstärkenmessungen seien nur jene erwähnt, welche in Potsdam [12] und in Wien [13] durchgeführt wurden. Die Messergebnisse stimmen recht gut mit den Werten überein, die man durch Berechnung mit Hilfe der von *Linke* angegebenen Formel:

$$E_{\Delta\mathrm{H}} = \frac{3}{16} E_0 \frac{M_{(z)}}{M_{(z_\odot)} - M_{(z)}} [\tau^{\mathrm{TvM}(z)} - \tau^{\mathrm{TvM}(z_\odot)}] \cdot$$
$$\cdot [2 + 2\cos^2 z \cdot \cos^2 z_\odot + \sin^2 z \cdot \sin^2 z_\odot] \sin z \cos z \, \Delta z \qquad (8)$$

erhält.

In der Gleichung bedeutet $E_{\Delta\mathrm{H}}$ den Horizontalbeleuchtungsstärkenbeitrag der Himmelzone ΔH an der Beobachtungsstelle und *z* die mittlere Zenitdistanz der Himmelszone von der Breite Δz. Alle anderen Bezeichnungen entsprechen jenen der Gl. (4). Die gesamte Horizontalbeleuchtungsstärke ergibt sich durch numerische Integration über die einzelnen Himmelszonen. Es wird dazu noch vermerkt, die berechneten Summen E_{Bp} seien wegen der Mehrfachstreuung um 12 % zu erhöhen. In Tabelle II sind einige berechnete Horizontalbeleuchtungsstärken des blauen Himmels in Abhängigkeit von der Zenitdistanz der Sonne für die Trübungsfaktoren 1,2 und 4 eingetragen.

Horizontalbeleuchtungsstärke, herrührend vom blauen Himmel in 10^3 lx in Abhängigkeit von der Zenitdistanz der Sonne und für die Trübungsfaktoren 1,2 und 4 (Barometerstand 760 mm Hg)

Tabelle II

$z_\odot$	Trübungsfaktor T_{V}		
	1	2	4
10 °	5,8	9,9	14,8
30 °	5,7	9,7	14,2
45 °	5,6	9,1	13,3
60 °	5,4	8,6	11,6
75 °	4,9	7,2	8,3
85 °	3,7	4,5	3,6

Ein Vergleich von Tabelle II mit Tabelle I zeigt, dass der relative Anteil der Beleuchtungsstärke, herrührend vom blauen Himmel, zum Anteil der Beleuchtungsstärke von der Sonne, mit zunehmender Zenitdistanz der Sonne und zunehmendem Trübungsfaktor ganz beträchtlich ansteigt.

4.3.3 Die relative Leuchtdichteverteilung am Himmelsgewölbe

Gegenwärtig arbeitet die Internationale Beleuchtungskommission (CIE) an der Herausgabe einer Norm für die Leuchtdichteverteilung des klaren blauen Himmels, entsprechend jener, die für den vollständig und gleichmässig bedeckten Himmel bereits vorliegt. Gestützt auf Messungen und theoretische Überlegungen hat *Kittler* [14] der CIE eine Formel als Normungsvorschlag unterbreitet. Danach wird das

Verhältnis der Leuchtdichte der betrachteten Stelle am Himmelsgewölbe Lp zur Leuchtdichte im Zenit L_z wie folgt berechnet:

$$\frac{Lp}{L_z} = \frac{[1-e^{-0,32 \sec z}]\,[0{,}91 + 10\,e^{-3\gamma} + 0{,}45 \cos^2 \gamma]}{0{,}27385\,[0{,}91 + 10\,e^{-3 z_\odot} + 0{,}45 \cos^2 z_\odot]} \qquad (9)$$

z ist die Zenitdistanz der betrachteten Stelle, $z_\odot$ die Zenitdistanz der Sonne und γ der Winkelabstand der betrachteten Stelle von der Sonne, definiert durch die Gleichung:

$$\cos \gamma = \cos z_\odot \cdot \cos z + \sin z_\odot \cdot \sin z \cdot \cos A \qquad (10)$$

wobei A den azimutalen Winkel zwischen dem Meridian durch die betrachtete Stelle und dem Meridian durch die Sonne bedeutet.

Gerade dieses γ wegen stiess die Formel von *Kittler* nicht überall auf grosses Verständnis. Unter Hinweis auf verschiedene praktische Vorteile empfiehlt *Dogniaux* einen Ausdruck mit 9 Parametern in der Form:

$$Lp = L_z + L_1 z + L_2 \cos A + L_3 z \cdot \cos A + L_4 z^2 + L_5 \cdot \cos^2 A + \\ + L_6 z \cdot \cos^2 A + L_7 z^2 \cdot \cos A + L_8 z^3 + L_9 \cdot \cos^3 A \qquad (11)$$

Die Werte von L_1 bis L_9 gibt *Dogniaux* für einige Zenitdistanzen der Sonne an [15].

4.4 Vorschläge für die praktische Ermittlung der gesamten Leuchtdichte, herrührend vom klaren blauen Himmel

4.4.1 Allgemeines

Bei der Beschaffenheit der Himmelsleuchtdichte und der Leuchtdichtefaktoren kommt für die Praxis als gangbare Methode zur Bestimmung der Gesamtleuchtdichte vom blauen Himmel kaum etwas anderes in Frage, als eine stark vereinfachte graphische oder numerische Integration. Es seien hier zwei Lösungsmöglichkeiten angedeutet.

4.4.2 Vereinfachte graphische Integration

Falls man den azimutalen Winkel vom Meridian durch die Sonne aus rechnet, ist nach Gl. (7) die Leuchtdichte an der Beobachtungsstelle:

$$L_{Bp} = \int_{A=0}^{2\pi} \int_{z=0}^{\frac{\pi}{2}} L/E\,(A,z) \cdot L_H\,(A,z)\, dA \cdot \cos z \cdot \sin z\, dz$$

Wären L/E und L_H in Bezug auf die Normale durch den Betrachtungspunkt als Drehachse rotationssymmetrisch, so würde:

$$L_{Bp} = 2\,\pi \int_{z=0}^{\frac{\pi}{2}} L/E\,(z) \cdot L_H\,(z) \cdot \cos z \cdot \sin z\, dz$$

Dieses Integral lässt sich leicht nach dem in der Photometrie bekannten Rousseauverfahren auswerten. Dazu werden die Werte $L/E(z) \cdot L_H(z) \cdot \cos z$ in Abhängigkeit von der Zenitdistanz z des betrachteten Flächenelements im Polardiagramm mit der Beobachtungsstelle als Mittelpunkt eingezeichnet (Fig. 4). Um diesen Mittelpunkt schlägt man einen Viertelskreis mit beliebigem Radius R und legt daran die vertikale Tangente $T-T$. Die Geraden des Polardiagrammes mit den eingetragenen Werten $L/E\ (z) \cdot L_H\,(z) \cdot \cos z$ sind bis zur Kreislinie zu verlängern. Durch die Schnittpunkte der Verlängerungen mit dem Kreis werden horizontale Geraden gezogen, darauf die korrespondierenden $L/E\,(z) \cdot L_H\,(z) \cdot \cos z$

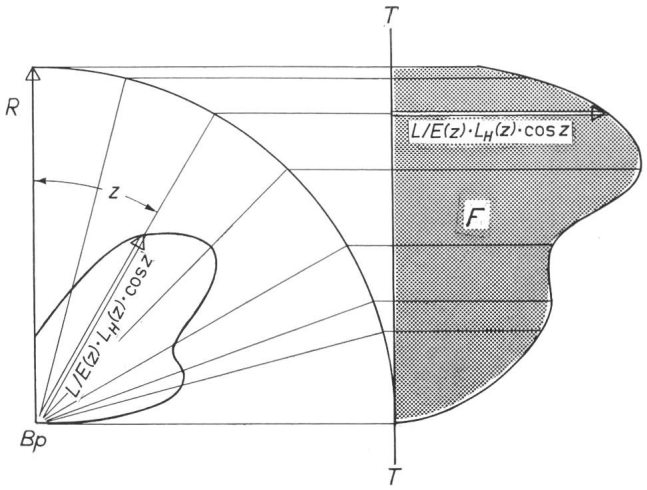

Fig. 4
Vorausbestimmung der vom blauen Himmelslicht herrührenden Fahrbahnleuchtdichte mit Hilfe der graphischen Integration
Bezeichnungen siehe Fig. 3

von der Tangente $T-T$ aus abgetragen und deren Endpunkte mit einem Kurvenzug verbunden. Die vom Kurvenzug und der Tangente umschlossene Fläche F stellt ein Mass für die gesuchte Gesamtleuchtdichte L_{Bp} dar und zwar ist:

$$L_{Bp} = \frac{2\,\pi}{R}\, M\, F \left[\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}\right]$$

wenn F in cm², R der Radius des Viertelkreises um den Beobachtungspunkt in cm und M der Maßstab des Polardiagrammes in $\frac{\text{cd}}{\text{m}^2\,\text{lx}} \cdot \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ pro cm eingesetzt sind.

Nun weist jedoch das Produkt $L/E\,(A,z) \cdot L_H\,(A,z)$ nichts weniger als die obigen Betrachtungen zu Grunde liegende Rotationssymmetrie auf. Deshalb muss für einige (n) gleichmässig verteilte azimutale Winkel A der Mittelwert der $F(A)$ gebildet werden

$$L_{Bp} = \frac{2\,\pi}{R}\, M \frac{1}{n} \sum_n F(A_n) \qquad (12)$$

Für die Praxis dürfte im allgemeinen die Wahl von 8 oder vielleicht gar nur 4 Werten von A genügen. Bei Berücksichtigung einer grösseren Zahl von A-Winkeln lässt sich in gewissem Rahmen die Leuchtdichteveränderung durch Horizontbegrenzungen wie Berghänge und Verbauungen erfassen.

4.4.3 Vereinfachte numerische Integration mit zwei Diagrammen

Mit Hilfe von Gl. (5):

$$\Delta E_{Bp}(A,z) = \frac{L_H(A,z)}{R^2}\, \Delta F(A,z) \cdot \cos z$$

kann man die Horizontalbeleuchtungsstärke berechnen, welche vom Oberflächenstück $\Delta F\,(A,z)$ der Himmelshalbkugel mit dem Radius R, d. h. von dem durch die Winkel A_1 und $A_1 + \Delta A$ sowie z_1 und $z_1 + \Delta z$ begrenzten Himmelsgewölbeausschnitt an der Beobachtungsstelle erzeugt wird. Unter der Annahme einer überall gleichen Himmelsleuchtdichte L_H würde der Beleuchtungsstärkenanteil $\Delta E_{Bp}(A,z)$ vom Flächenstück $\Delta F\,(A,z)$ proportional der Normalprojektion $\Delta F'\,(A,z)$ dieses Flächenstückes auf die Grundfläche der Himmelshalbkugel. Wäre in diesem Falle die gesamte Horizontalbeleuchtungsstärke an der Beobachtungsstelle 100 lx und der Himmelshalbkugelradius 5.64 cm d. h. die Normalprojektion der Halbkugel 100 cm², so trüge jedes Kugelflächenstück $\Delta F\,(A,z)$ mit

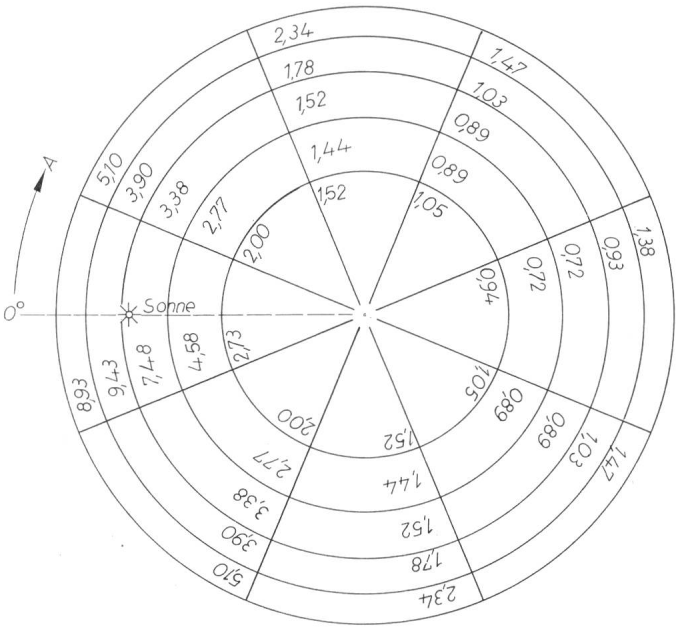

Fig. 5
Beleuchtungsstärkendiagramm für eine Sonnenhöhe von 40°

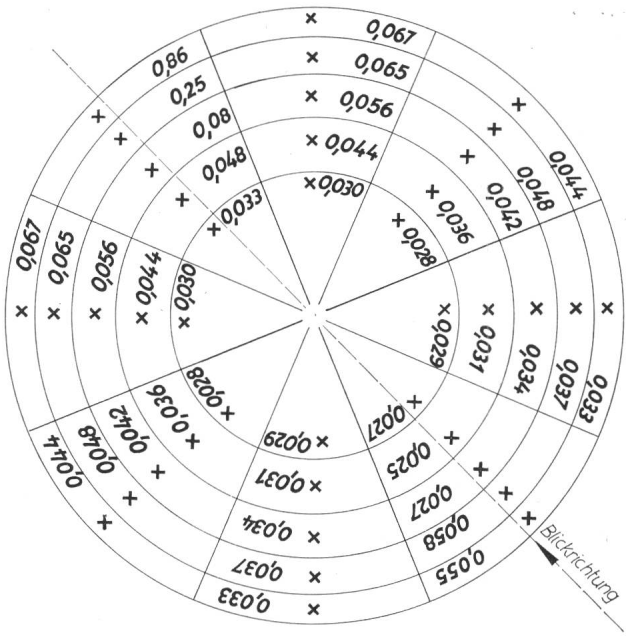

Fig. 6
Leuchtdichtefaktordiagramm

einer Normalprojektion $\Delta F'(A,z)$ von 1 cm² zur Horizontalbeleuchtungsstärke 1 lx bei (Raumwinkelprojektionsgesetz).

Nun ist aber die Himmelsleuchtdichte $L_H(A,z)$ nicht überall gleich gross. Die Einheitsflächenelemente $\Delta F'(A,z)$ (z. B. 1 cm²) sind daher mit einem einer Normleuchtdichtenverteilung entsprechenden Gewicht zu multiplizieren, und zwar so, dass die Summe aller Gewichte wieder 100 (lx) ergibt. In dieser Darstellung sind die Gewichte nichts anderes, als die prozentualen Anteile, welche die einzelnen Himmelskugelflächenstücke $\Delta F(A,z)$ zur Gesamtbeleuchtungsstärke beitragen.

Auf diese Art sind im Prinzip die Diagramme entstanden, die *Kojic* [16] berechnet und für die Technik der Innenraumbeleuchtung mit Tageslicht zur Anwendung empfohlen hat. Dabei gründete *Kojic* seine Rechnungen auf die Leuchtdichteverteilungen nach *Dogniaux*. Fig. 5 stellt ein Kojic-Diagramm für eine Sonnenhöhe von 40° in stark vereinfachter Form dar.

Um aus diesen Gewichten die Leuchtdichte an der Beobachtungsstelle *Bp* zu erhalten, müssen nach Gl. (6) alle Gewichtswerte mit dem Leuchtdichtefaktor multipliziert werden, welcher zur mittleren Strahleneinfallsrichtung $\Delta F(A,z)$—*Bp* gehört und für die gewählte Normblickrichtung gilt. Als Hilfsmittel zur Durchführung der Multiplikationen dient ein gleiches Diagramm, wie es in Fig. 5 dargestellt ist, auf durchsichtiger Folie. In den Feldern der Projektionen $\Delta F'(A,z)$ sind jedoch an Stelle der Gewichts-Werte die zur Lage der Flächenstücke und zur Blickrichtung passenden Leuchtdichtefaktoren eingetragen. Fig. 6 zeigt ein derartiges Diagramm. Die darin enthaltenen Leuchtdichtefaktoren wurden unter Anlehnung an die Leuchtdichtefaktorkurven der Fig. 1 ermittelt und stellen wie jene eine Annahme dar.

Zur Bestimmung der vom blauen Himmel herrührenden Leuchtdichte legt man das durchsichtige Leuchtdichtefaktordiagramm so auf das Beleuchtungsstärkendiagramm, dass sich die beiden Kreisflächen decken und die Blickrichtung mit der Richtung, in der die Sonne steht, den gewünschten Winkel z. B. einen Winkel von 45° bildet (Fig. 7). Nun werden die untereinander im gleichen $\Delta F'(A,z)$-Felde liegenden Zahlen miteinander multipliziert und alle Produkte addiert. Die Summe ist die gesuchte Leuchtdichte, wie sie dem Beobachter bei Normblickrichtung sowie einer Gesamtbeleuchtungsstärke von 100 lx erscheint. Liegt eine Gesamtbeleuchtungsstärke von E_{Bp} lx vor, so erhöht sich die mit Hilfe der Diagramme ermittelte Leuchtdichte um den Faktor $E_{Bp}/100$. Gleich wie bei den Bewertungsmethoden der Innenraumbeleuchtung durch Tageslicht lassen sich die Einflüsse von Berghängen oder Verbauungen durch entsprechende Herabsetzung der Werte im Beleuchtungsstärkendiagramm berücksichtigen.

Die Berechnungsergebnisse zur Leuchtdichte herrührend vom direkten Sonnenlicht addiert ergeben die Gesamtleuchtdichte, in der die Strassenoberfläche letzten Endes dem Beobachter mit Normblickrichtung erscheint.

4.5 Einige zahlenmässige Auswertungen und Vergleiche

Ein Vergleich der unter 4.4.2 und 4.4.3 angegebenen vereinfachten Bewertungsmethoden führt für 8 in gleichmässigen Winkelabständen von 45° verteilten *A* zu Resultaten mit einer besseren Übereinstimmung als ±5 %.

Mit Hilfe der beiden Diagramme ist es recht einfach herauszufinden, welchen Anteil das Licht des blauen Himmels zur Gesamtleuchtdichte von Sonne und Himmel beiträgt. Solche Rechnungen wurden für eine Sonnenhöhe von 40° und verschiedene Winkel zwischen der Blickrichtung und der Sonnenrichtung durchgeführt. Aus den Resultaten geht hervor, dass je nach der Blickrichtung bezogen auf den Sonnenstand der Beitrag des blauen Himmels zur gesamten Fahrbahnleuchtdichte die eingangs erwähnte 20 %-Grenze nicht ganz erreicht oder nur unwesentlich überschreitet. Diese Verhältnisse brauchen aber bei anderen insbesondere geringeren Sonnenhöhen nicht mehr zu gelten.

5. Schlussbemerkung

Vorläufig fehlt noch allerhand an Grundlagen, um eine Vorausberechnung der Fahrbahnleuchtdichte an sonnigen klaren Tagen mit einiger Zuverlässigkeit ausführen zu können. Ebenso fehlt fast vollständig die praktische Überprüfung der Resultate, welche aus den beschriebenen Vorausbestimmungen hervorgehen. Einzig für das Südportal des Mositunnels liegen

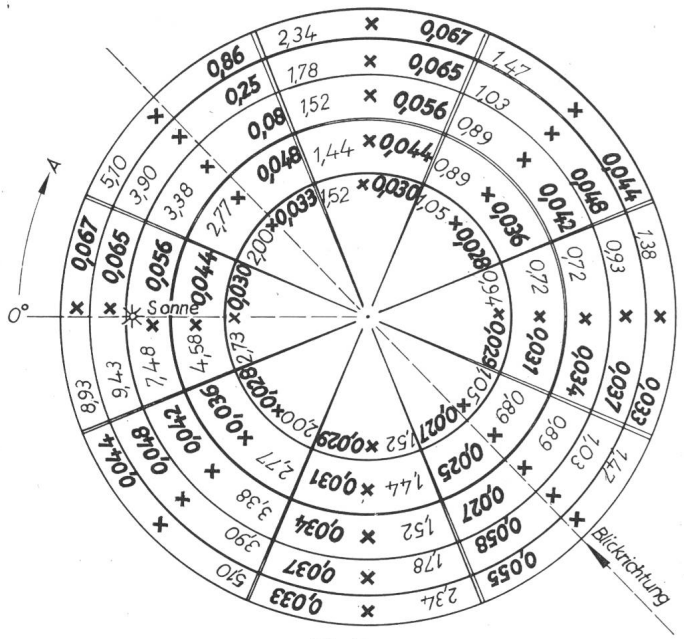

Fig. 7
Vorausbestimmung der Fahrbahnleuchtdichte mit Hilfe des Beleuchtungsstärken- und des Leuchtdichtefaktordiagrammes

einige Messergebnisse vor. Die Messungen wurden zur Mittagszeit bei einigermassen klarem Wetter durchgeführt. Für den vorhandenen Sonnenstand zeigen die erhaltenen Messresultate eine leidliche Übereinstimmung mit den auf Grund der beschriebenen Methode zu erwartenden Werten.

Unter Voraussetzung der Kenntnis der wirklichen Leuchtdichtefaktoren bewahrt die Anwendung der beschriebenen Bewertungsmethoden den Verfasser von Tunneleingangsbeleuchtungsprojekten bereits vor groben Fehlern und damit möglicherweise auch vor unnötigen Ausgaben. Bei solchen Vorausberechnungen wird es ja kaum je darum gehen, eine Genauigkeit von $\pm 5\,\%$ zu erreichen.

Literatur

[1] Leitsätze für Innenraumbeleuchtung mit Tageslicht. DIN-Normblatt No. 5034.

[2] *Commission internationale de l'éclairage:* Compte rendu de la quinzième session Vienne juin 1963. Volume B: Technique de l'éclairage. Comité E-3.2 Lumière du jour. S. 349...362.

[3] *D. A. Schreuder:* The Lighting of Vehicular Traffic Tunnels. Philips Technical Library, Eindhoven 1964.

[4] *H. Kabayama:* Study on Adaptive Illumination for Sudden Change of Brightness. J. Illum. Engng. Inst. Japan 47(1963)10, S. 488...496.

[5] *F. Mäder* und *O. Fuchs:* Beitrag zur Frage der Eingangsbeleuchtung von Strassentunneln. Bull. SEV 57(1966)8, S. 359...366.

[6] *Nederlandse Stichting voor Verlichtsingskunde:* Aanbevelingen voor Tunnelverlichting. Moormans Periodieke pers. S'Gravenhage 1961.

[7] *Association Française de l'Eclairage et Comité National Français de l'Eclairage.* Recommandations relatives à l'éclairage extérieur. 2e édition, Paris 1965.

[8] *C. Bauer:* Ein technisches System der Leuchtdichte in der Strassenbeleuchtung. Lichttechnik 17(1965)7, S. 83 A...86 A.

[9] *B. H. Crawford:* The Effect of Field Size and Pattern on the Change of Visual Sensitivity with Time. Proc. Royal Soc. London, Series B 129(1940)6, S. 94...106.

[10] *H. Siedentopf* und *E. Reeger:* Die Beleuchtung durch die Sonne. Meteorologische Ztschr. 61(1944)–, S. 114...117.

[11] *F. Baur:* Franz Linkes meteorologisches Taschenbuch. Neue Ausgabe, Bd. 2, Leipzig 1953.

[12] *H. Wörner:* Die Vorhersage der Ortshelligkeit. Abhandlungen des meteorologischen und hydrologischen Dienstes des DDR 5(1954)33, S. 1...54.

[13] *F. Steinhauser, O. Eckel* und *F. Sauberer:* Klima und Bioklima von Wien. 1. Teil. 3. Sonderheft Wetter und Leben 1955.

[14] *R. Kittler:* Luminance Distribution on Cloudless Sky after Measurements and Theoretical Relations. Meteorologicke Zpravy 15(1962)2, S. 34.

[15] *R. Dogniaux:* Données météorologiques concernant l'ensoleillement et l'éclairage naturel. Contributions de l'Institut royal météorologique de Belgique No. 60, Uccle-Bruxelles 1960.

[16] *B. Kojic:* The Graphical Method for Determination of Interiors Daylighting and Clear Sky Conditions. Bull. acad. serbe sciences, Classes des sciences techniques –(1963)6, S. 29...33.

Adresse des Autors:

Dr. *F. Mäder,* Adjunkt, Eidg. Amt für Mass und Gewicht, 3084 Wabern.

Tieftemperaturanlagen

Aufwand für Kälteerzeugung, Isolationsprobleme

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 18. Mai 1966 in Zürich,

von *Ch. Trepp,* Winterthur

621.56

1. Einleitung

In nächster Zeit ist eine verbreitete Anwendung der Supraleitung zu erwarten. Soweit heute bekannt, tritt aber die Supraleitung nur bei sehr tiefen Temperaturen auf. Deshalb werden sich die Erbauer von Magneten auch mit den Problemen der Tieftemperaturtechnik, insbesondere der Erzeugung und Aufrechterhaltung tiefer Temperaturen, befassen müssen.

Bisher sind keine Legierungen bekannt geworden, welche oberhalb von 20 °K supraleitend sind. Mit abnehmender Temperatur nimmt ganz allgemein das kritische Feld zu und es ist wünschenswert, Supraleiter möglichst in der Nähe des absoluten Nullpunktes zu betreiben. Von den Temperaturen, die nahe dem absoluten Nullpunkt liegen, d. h. möglichst nahe bei 0 °K = −273,15 °C, sind diejenigen um 4 °, d. h. −269 °C, technisch am leichtesten zu realisieren. 4,215 °K ist nämlich der Siedepunkt von Helium bei Atmosphärendruck. Man kann sich also für Tieftemperaturexperimente oder auch für industrielle Anwendungen flüssiges Helium kaufen und so eine Verdampfungswärme zur Deckung der Wärmeeinfälle benutzen, oder, was man für industrielle Anwendungen eher tun wird, man schafft sich eine Helium-Kälteanlage an, mit welcher diese tiefen Temperaturen erzeugt werden können. Aus betrieblichen Gründen wird man als tiefste Temperatur meist 4,3...4,5 °K erzeugen, entsprechend der Siedetemperatur von flüssigem Helium bei etwas erhöhtem Druck.

Bevor hier auf einige Besonderheiten der Helium-Kälteanlagen hingewiesen wird, seien — ausgehend von der Kältemaschine des Haushaltskühlschrankes — anhand einiger Beispiele ein paar Möglichkeiten für den Bau von Tieftemperaturanlagen erörtert.

2. Kälteerzeugung

Die heute üblichen Verfahren zur Erreichung tiefer Temperaturen machen ausnahmslos Gebrauch von den thermo-