

ÜBER DIE NOTWENDIGKEIT DER EINFÜHRUNG VON NEUEN LICHTTECHNISCHEN PARAMETERN

Von

T. LANTOS

Lehrstuhl für Elektrotechnik, Technische Universität Budapest
(Eingegangen am 23. Juli 1968)

Vorgelegt von Prof. Dr. P. K. Kovács

In den Empfehlungen und Normen über Errichtung von Beleuchtungsanlagen für die künstliche Beleuchtung von Freigeländen werden im allgemeinen zwei quantitative Kennwerte vorgeschrieben. Das sind die Beleuchtungsstärke (E) und die Gleichmäßigkeit (g). Obwohl die Erhöhung der Beleuchtungsstärke im allgemeinen zur Verbesserung der Sichtverhältnisse führt, stellt jedoch die Beleuchtungsstärke für die Sichtbarkeit nur einen indirekten und nicht eindeutigen Parameter dar. Eine etwas bessere Annäherung der Wirklichkeit kann nach Verfahren aus der Literatur erreicht werden, die anstatt der Beleuchtungsstärke als Meßzahl die Leuchtdichte der Straßenoberfläche berücksichtigen. Das Grundprinzip für die Bewertung hat sich aber damit nicht viel geändert.

Die Wahrnehmbarkeit von Hindernissen auf der Straße, die sogenannte Sichtbarkeit, kann nur durch eine Meßzahl charakterisiert werden, die außer der Leuchtdichte der Straßenoberfläche in der Blickrichtung auch noch die Leuchtdichte des Sehobjektes (Hindernis) infolge des in die Blickrichtung reflektierten Lichtanteiles in Betracht zieht, die also die Sichtbarkeit auf Grund des von der Straßenoberfläche und vom Hindernis reflektierten Lichtes bewertet.

Es soll in dieser kurzen Abhandlung darauf hingewiesen werden, daß kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsstärke und der Lichtwahrnehmung besteht und daher Beleuchtungsstärke und Gleichmäßigkeit für die Charakterisierung der Sichtbarkeit nicht geeignet sind. Es kann nämlich nachgewiesen werden, daß die Sichtverhältnisse bei gleicher Beleuchtungsstärke und Gleichmäßigkeit ganz beträchtliche Abweichungen aufweisen können.

Um das Problem klarer zu sehen, sind zuerst die Rolle der Leuchtdichte im Sehvorgang sowie die die Sichtbarkeit beeinflussenden Faktoren zu untersuchen.

Es kann bei gewissen, nicht zu kurz anhaltenden Lichtwirkungen angenommen werden, daß die Lichtempfindung (»das weiter nicht mehr analysierbare Element des Bewußtseinsinhaltes, das infolge der auf die Sinnesorgane

ausgeübten Wirkung entstanden ist« [1]) mit der in der Zeiteinheit in das menschliche Auge gelangenden Lichtenergie: dem Lichtstrom in unmittelbarem Zusammenhang steht. Bei der Charakterisierung der Lichtempfindung durch lichttechnische Kennwerte kann der von einer im Gesichtsfeld befindlichen Fläche homogener Beleuchtungsstärke ins menschliche Auge einfallende Lichtstrom nach der Formel

$$\Phi = \frac{A_P A_R}{c^2} L \quad (1)$$

ermittelt werden (A_P = Pupillenoberfläche, A_R = Retinaoberfläche, c = = Abstand zwischen der Retina und der Pupille, L = Leuchtdichte im Gesichtsfeld). Nach Formel (1) hängt also die Lichtempfindung unmittelbar von der Leuchtdichte ab.

Das Sehen (»das Erkennen der Außenwelt mit Hilfe von Empfindungen, die durch das in das menschliche Auge gelangte Licht geweckt wurden« [1]) entsteht als Resultat einer mit dem Begriff Sehen verknüpften und auf der Lichtempfindung beruhenden, verwickelten Augen-, Nerven- und Gehirntätigkeit. Es handelt sich dabei um einen in der Zeit ablaufenden Vorgang, wenn wir ein in Gedächtnis-Einheiten ausgebildetes Urteil von zeitlich nacheinander auftretenden »Hell- und Dunkelempfindungen« sehen. Wenn jedoch ein Vergleichsurteil in Verbindung mit den einzelnen Teilen des inhomogen (ungleichmäßig) ausgeleuchteten Raumes entsteht, liegt ein räumlicher Vorgang vor. In der Wirklichkeit laufen die zeitlichen und räumlichen Vorgänge beim Sehen gleichzeitig und zusammen. Bei dem gewählten Thema spielen die gleichzeitigen Wahrnehmungen, also das sich räumlich abspielende Sehen, die entscheidende Rolle, da hierbei das Sehen auf der Wahrnehmung von Leuchtdichtenunterschieden beruht.

In der Lichttechnik dient zur Beschreibung der Leuchtdichtenunterschiede der Kontrast. Für die zahlenmäßige Charakterisierung des Kontrastes wurde in der Literatur der Leuchtdichtenkontrast, und für die Charakterisierung des noch wahrnehmbaren Minimalkontrastes (Grenzkontrast) die Kontrastempfindlichkeit eingeführt. Obwohl die mathematischen Definitionen dieser Begriffe nicht genau miteinander übereinstimmen, besitzen sie doch einen gemeinsamen Zug: das Verhältnis zwischen den Leuchtdichten zweier benachbarter Flächen stellt die unabhängige Veränderliche dar. Der Grad der Sichtbarkeit kann durch die zahlenmäßig gewonnenen Kontrastwerte nicht unmittelbar charakterisiert werden. Es wäre sehr schwer zu entscheiden, wann und unter welchen Beleuchtungsverhältnissen sowie Kontrastwerten eine beleuchtete Fläche zwei- oder dreimal so hell erscheint, als die andere. Für die Fragestellung ist es auch von keiner Bedeutung. Bezüglich der Zahlenwerte für Kontrastverhältnisse ist in erster Linie von Interesse, wie groß der Grenzkontrast ist (jenes Verhältnis der Leuchtdichten zweier benachbarter Flächen

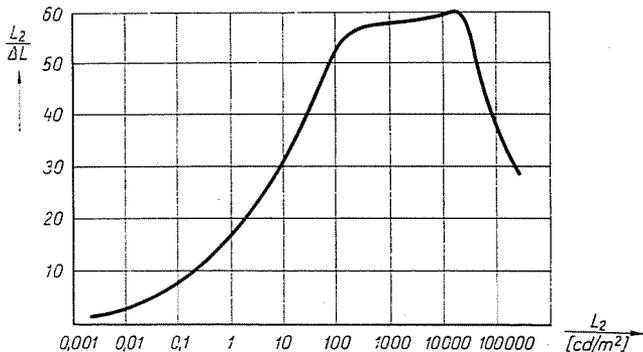


Abb. 1. Die Kontrastempfindlichkeit des menschlichen Auges in Abhängigkeit von der Umfeldleuchtdichte (nach KÖNIG und BRODHUN)

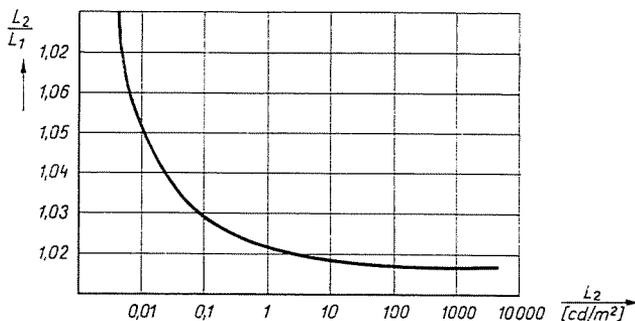


Abb. 2. Die Reizschwelle in Abhängigkeit des Reizniveaus (auf Grund von Abb. 1 aufgetragen)

zueinander, wobei eine Unterscheidung mit einer ausreichenden Sicherheit noch gewährleistet ist).

Für eine derartige Bewertung der Kontrastverhältnisse sind bereits eine große Anzahl von Untersuchungen und Versuchsreihen durchgeführt worden. Es sollen an dieser Stelle nur die bahnbrechenden und grundlegenden Messungen von KÖNIG und BRODHUN [3] erwähnt werden, wobei die Kontrastempfindlichkeit in Abhängigkeit von der Umfeldleuchtdichte ermittelt wurde. Die resultierende Kennlinie ist aus Abb. 1 ersichtlich. Daraus kann mit einfachen Mitteln die Kennlinie ermittelt werden, die die Reizschwelle (die mit der notwendigen Sicherheit wahrnehmbare Minimalabweichung der Leuchtdichte des Sehobjektes von der Umfeldleuchtdichte) in Abhängigkeit vom Reizniveau darstellt (Abb. 2).

Im Laufe der weiteren Erörterungen werden die Kontrastverhältnisse einfach durch einen Quotienten zweier Leuchtdichten charakterisiert, mit der üblichen Beschränkung, daß der Wert des Quotienten über +1 liegt. Das Deuten des Kontrastes erfolgt im allgemeinen, wie auch bei Versuchen von

KÖNIG und BRODHUN, auf Grund der Leuchtdichte des Umfeldes L_1 und des in der Umfeldebene befindlichen Infeldes (Sehobjekt) L_2 . Die Sichtbarkeit auf der Straße stellt jedoch ein Raumproblem dar. Bei der vereinfachten, die Sichtbedingungen jedoch ausreichend annähernden Versuchsanordnung soll für die zahlenmäßige Charakterisierung der Sichtbarkeit ein Parameter eingeführt werden, der sich, dem Kontrast ähnlich, auf das Verhältnis der Leuchtdichten aufbaut, wobei jedoch berücksichtigt wird, daß die für die Sichtbarkeit maßgebenden Leuchtdichten, infolge des Aufbaues des Versuchsmodells, auf der Straße und auf dem Hindernis mit zu der Straße senkrechter Oberfläche wahrgenommen werden.

Für die Charakterisierung der Kontrastverhältnisse dienen: bei $L_h > L_v$ (L_h = Leuchtdichte der Straßenoberfläche um das Hindernis; Leuchtdichte der waagerechten Fläche, L_v = Leuchtdichte des Hindernisses; Leuchtdichte der lotrechten Fläche):

$$S' = \frac{L_h}{L_v} \quad (2)$$

und bei $L_v > L_h$

$$S'' = \frac{L_v}{L_h} \quad (3)$$

Diese Zusammenhänge sollen Sichtfunktionen genannt werden.

Im Laufe der Ausführungen werden sowohl die Straßenoberfläche wie auch die sich auf der Straße befindenden Hindernisse, mindestens in einem Teil der Fälle, mit einer ausreichenden Annäherung als Lambertsche Strahler betrachtet. Für diesen Fall gelten für (2) und (3), wenn die Leuchtdichten L_h und L_v aus den Beleuchtungsstärken E_h und E_v bzw. den Reflexionskoeffizienten ρ_v und ρ_h ermittelt werden:

$$S' = \frac{\rho_h E_h}{\rho_v E_v} \quad (4)$$

$$S'' = \frac{\rho_v E_v}{\rho_h E_h} \quad (5)$$

In jedem Fall, wenn für E_h bzw. E_v die Zusammenhänge

$$E_h = \frac{I_x}{h^2} \cos^3 \alpha \quad (6)$$

$$E_v = \frac{I_x}{h^2} \cos^2 \alpha \sin \alpha \quad (7)$$

gelten, ergeben sich, wenn (6) und (7) in Formel (4) bzw. (5) eingesetzt werden:

$$S' = \frac{\varrho_h}{\varrho_v} \cot \alpha \quad (8)$$

$$S'' = \frac{\varrho_v}{\varrho_h} \tan \alpha \quad (9)$$

Die Formeln (8) und (9) beschreiben die Kontrastverhältnisse der von je einer Leuchte beleuchteten Abschnitte, bzw. sie ergeben die Sichtfunktionen für diese Raumteile. Um diese Funktionen darzustellen, wurde der Nullpunkt des

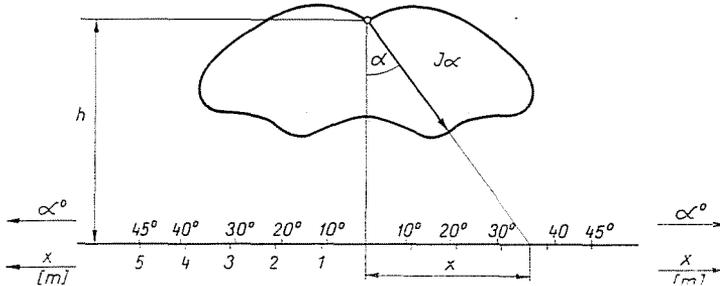


Abb. 3. Lichtverteilungskurve einer Leuchte in der Lichtpunkthöhe h

Polarkoordinatensystems der Lichtverteilungskurve $J_a = J(x)$ der Leuchte auf der Ordinate eines Kartesischen Koordinatensystems in Höhe h aufgetragen (Abb. 3). In den Schnittpunkten der verschiedenen Polargeraden der Polarkoordinaten mit der die Straßenoberfläche representierenden X-Achse werden jeweils zwei Werte angegeben. Der eine ist der Winkel α des Schnittpunktes im Polarkoordinatensystem, der andere die von der Y-Achse gemessene Entfernung x , also die von der Leuchte gemessene Horizontalentfernung.

In Abb. 4 wurden in diesem System einige Sichtfunktionen aufgezeichnet. Die Kurve 1 stellt den Fall $\varrho_h/\varrho_v = 1$ dar. Die am Anfang eine Kotangentencharakteristik aufweisende Kurve geht über $\alpha = 45^\circ$ in eine mit Tangentencharakteristik über. Der Wert der Sichtfunktion bei $\alpha = 45^\circ$ beträgt 1. Die Kurve 2 gilt für $\varrho_h/\varrho_v = 2$; die Kurve 3 für $\varrho_h/\varrho_v = 0,5$. Die Kurven 2 und 3 sind Grenzkurven, die — nach Meinung des Verfassers — die bei den Untersuchungen noch zu berücksichtigenden realen extremen Werte darstellen.

Die Kennlinien in Abb. 4 geben die bei den hervorgerufenen Lichtwirkungen entstandenen Kontraste an. In deren Besitz kann die Bewertung der Sichtbarkeit durch einen Vergleich der Meßergebnisse erfolgen, die zu der Leuchtdichte der Straßenoberfläche, dem Reizniveau L_h alle diejenigen Werte für S' bzw. S'' angeben, bei denen ein Sichtbarwerden mit ausreichender Sicherheit, also eine Wahrnehmung erfolgt.

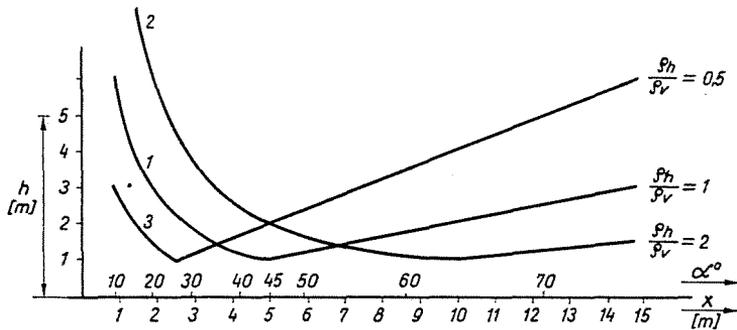


Abb. 4. Übergangsfunktionen für $\text{ctg } \alpha$ bzw. $\tan \alpha$ in Abhängigkeit von der Entfernung vom Leuchtenfußpunkt bzw. vom Winkel α bei verschiedenen Kontrastverhältnissen

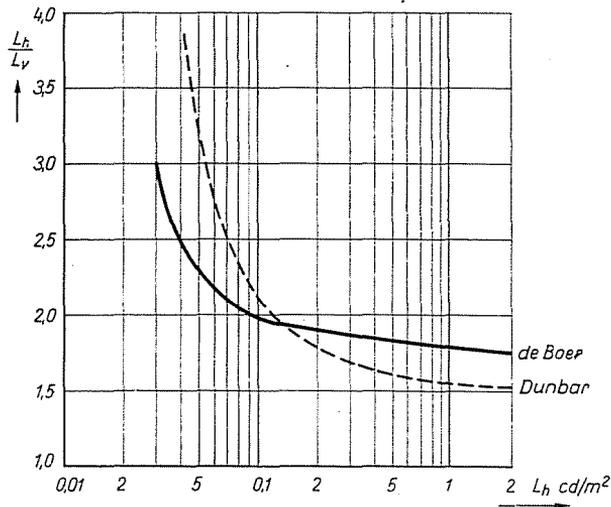


Abb. 5. Leuchtdichteunterschied in Abhängigkeit von der Leuchtdichte des Hintergrunds

Diese Frage könnte auch auf Grund der Untersuchungen von KÖNIG und BRODHUN bewertet werden, in besonders einfacher Weise nach Abb. 2. Es würden sich jedoch infolge des vom vorliegenden Fall abweichenden Charakters der Messungen und der räumlichen Natur des behandelten Sichtmodells Fehler ergeben. Somit sind die Messungen, auf die Bezug genommen wurde nur grundsätzlich und ihrem Charakter nach maßgebend. Ihre zahlenmäßigen Werte können im vorliegenden Falle nicht zu befriedigenden Ergebnissen führen. Zur experimentellen Untersuchung dieses Fragenkomplexes wurden, von den erwähnten Autoren ausgehend, wertvolle Untersuchungen angestellt. Darunter soll nur auf Arbeiten von DUNBAR [4] und DE BOER [5] hingewiesen werden.

Bei den neuerdings veröffentlichten Untersuchungen auf der Versuchsstraße in Eindhoven wurden von DE BOER Hindernisse mit einer quadratischen Oberfläche von $28 \text{ cm} \times 28 \text{ cm}$ verwendet. Die Leuchtdichte der Hindernisse konnte variiert werden. Die Ergebnisse der statistisch ausgewerteten Untersuchungen sind — verglichen mit denen von DUNBAR — in Abb. 5 aufgezeichnet. Auf der Ordinate ist die Leuchtdichte der Straßenoberfläche aufgetragen. Die Kurven stellen die Kontrastverhältnisse der Leuchtdichte des Hindernisses dar, bei der eine Wahrnehmung mit ausreichender Sicherheit erfolgt.

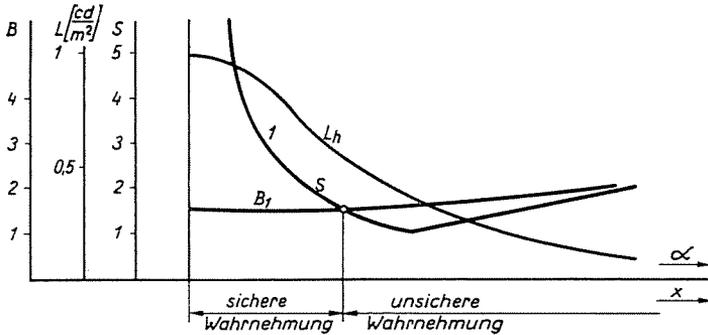


Abb. 6. Ermittlung der Sichtbarkeitsgrenze

Auf Grund der Meßergebnisse in Abb. 5 werden die mit erforderlicher Sicherheit erkennbaren, also wahrnehmbaren Abschnitte des ausgeleuchteten Raumes ermittelt. Die Kurve 1 aus Abb. 4 wurde, um das Verfahren zu demonstrieren, in Abb. 6 eingezeichnet. Es wird natürlich angenommen, daß der untersuchte Raumteil durch eine punktförmige und in jeder Richtung gleichförmig strahlende Leuchte ausgeleuchtet ist. Damit kann der Verlauf der Leuchtdichte auf der Straßenoberfläche durch die Formel

$$L_n = k \cos^3 \alpha$$

angegeben werden (s. Kurve L). Die dritte Kurve in Abb. 6, die B_1 -Kurve, wurde aus Abb. 5 derart ermittelt, daß zu den entsprechenden L_n -Werten jeweils die bei $k = 1 \text{ cd/m}^2$ geltenden $L_n/L_v = B$ Werte angegeben wurden. Um das zu veranschaulichen, wurde bei der Bezeichnung der Kurve B_1 der Index 1 verwendet.

Die mit der notwendigen Sicherheit erkennbaren, also wahrnehmbaren Raumteile können einfach ermittelt werden. Überall, wo das Kriterium $S > B$ verwirklicht ist, besteht eine ausreichende Sichtbarkeit, wogegen bei $S < B$ die Beleuchtungsanlage eine notwendige Sicherheit des Erkennens von Hindernissen, also eine ausreichende Sichtbarkeit nicht gewährleistet.

Um das bisher gesagte zusammenzufassen und auf gewisse Grössenordnungen zu schließen, wurden in Abb. 7 zu den bereits erläuterten Kurven S für den angenommenen Fall auch die Kurven B_1 und $B_{0,1}$ aufgezeichnet. Die Kurve B_1 gilt für $k = 1 \text{ cd/m}^2$, die Kurve $B_{0,1}$ für $k = 0,1 \text{ cd/m}^2$. Das sind dem Ermessen des Verfassers nach die reellen Grenzwerte, womit gerechnet werden kann oder muß. Das aus den Schnittpunkten der Kurven gebildete Polygon $ABFE$ stellt also, laut der Untersuchungsbedingungen, sowohl bezüglich der Leuchtdichten, wie auch bezüglich der Reflexionsverhältnisse, die reell vorkommenden Grenzfälle dar. Somit liegen alle reellen Fälle inner-

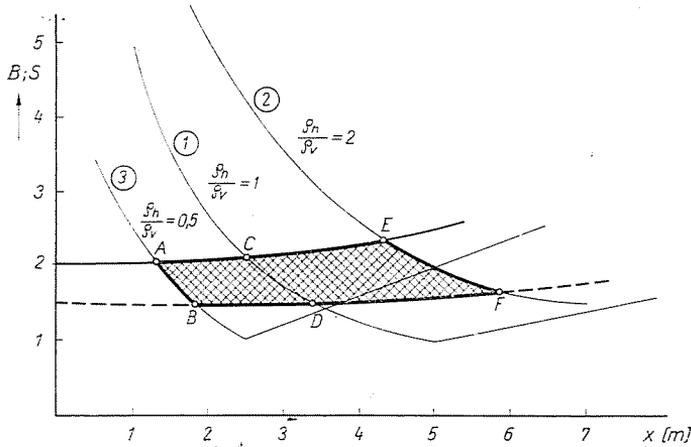


Abb. 7. Grenzkurven für ein gutes Kontrastsehen

halb des Polygons. Jeder Punkt der Polygonfläche kann als Schnittpunkt je einer Kurve B bzw. S aufgefaßt werden. Die Ordinaten dieser Schnittpunkte sind den von den Leuchten gemessenen Entfernungen proportional und sind damit für die Wirksamkeit der Beleuchtung charakteristisch.

Auf Grund einer Auswertung der Abbildung kann festgestellt werden, daß unter den die Güte der Beleuchtung bestimmenden Faktoren der Reflexionsfaktor die wichtigste Rolle spielt. Bezüglich der Sichtbarkeit übt eine Verdoppelung der Reflexionsverhältnisse eine günstigere Wirkung aus, als die Verzehnfachung der Leuchtdichte der Straßenoberfläche.

Im Laufe der bisherigen Untersuchungen wurde, der Einfachheit halber, die Entstehung der Sichtbarkeitsverhältnisse in Verbindung mit der durch eine einzige Leuchte hervorgerufenen Wirkung untersucht. Die tatsächlichen Lichteffekte auf Straßenzügen werden jedoch durch die Gesamtheit der angelegten Lichtpunkte hervorgerufen. So ist auch das Bewertungssystem auf diese aufzubauen bzw. auch die Sichtbarkeitsfunktionen sind aus deren Gesamtheit zu ermitteln. Die Ermittlung der resultierenden Lichtwirkungen kann mit Hilfe der Superposition erfolgen. Für die richtige Anwendung dieses Satzes

ist zu berücksichtigen, daß die Werte von E_h bzw. L_h im untersuchten Punkt durch die Gesamtheit der Leuchten hervorgerufen werden. Die Werte von E_v bzw. L_v hingegen werden an der gleichen Stelle allein von den in der zur Verkehrsrichtung entgegengesetzten Richtung angebrachten Leuchten (in symmetrischen Fällen im allgemeinen die Hälfte der bei Ermittlung von E_h zu berücksichtigenden Leuchten) hervorgerufen.

Zu der Untersuchung, auf Grund des vorhergesagten, sind als erster Schritt die resultierenden Werte von L_h bzw. L_v für zwei Lichtpunktabschnitte zu ermitteln. Dann sind, auf Grund der Reflexionsverhältnisse die entspre-

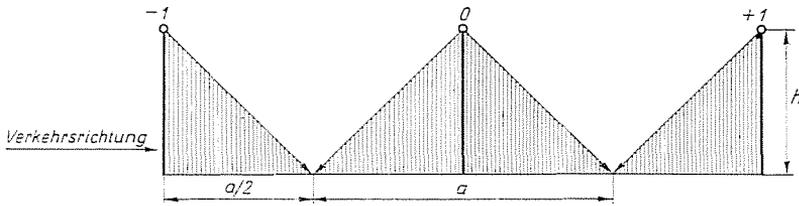


Abb. 8. Der Fall $E_h = \text{konst.}$, wo durch die Leuchte nur die Hälfte des Lichtpunktabstandes bestrahlt wird (Abschirmung bei $\pm a/2$)

chenden S-Kurven, schließlich aus Ergebnissen der DE BOERSCHEN Messungen die den L -Werten der Straßenoberfläche zugeordnete B -Kurve aufzutragen. Die Bestimmung der sichtbaren Abschnitte kann im Einklang mit den vorherigen Erörterungen auf Grund der Bedingung $S > B$ erfolgen.

Im folgenden werden, im Interesse der ursprünglichen Zielsetzung, zwei verschiedene Fälle untersucht. In beiden Fällen sind die Entfernungen der Leuchten von der Straßenoberfläche (h), als auch ihr Abstand von einander (a) gleich. Der Wert von (a) soll das Zweifache von h betragen: $a = 2h$. Ferner ist die Beleuchtungsstärke für den gesamten Straßenabschnitt in beiden Fällen gleich, d. h. $E_h = \text{const.}$, womit die Gleichmäßigkeit $g = E_{\text{max}}/E_{\text{min}} = 1$ beträgt. Ein Unterschied besteht nur in bezug auf die Lichtverteilung der Leuchten, die nur eins gemeinsam haben: die Lichtverteilung in Längsrichtung der Straße ist symmetrisch.

Im ersten Fall wird durch die Leuchte nur die Hälfte des Lichtpunktabstandes bestrahlt (Abb. 8). Durch die Beschränkung, daß jede Leuchte in ihrem Ausstrahlungsbereich eine konstante Beleuchtungsstärke hervorruft, wird nach der Formel (6) auch die Lichtverteilungskurve bestimmt, die die Bedingung

$$J_z = J_0 \frac{1}{\cos^3 \alpha} \quad (10)$$

zu erfüllen hat.

Die Verwirklichung der Lichtverteilung nach Formel (10) ist wie Abb. 9 zeigt, theoretisch möglich.

Tatsächlich ist die Beleuchtungsstärke auf der horizontalen Straßenoberfläche konstant:

$$E_h = \frac{J_0}{\cos^3 \alpha} \frac{1}{h^2} \cos^3 \alpha = \frac{J_0}{h^2} \quad (11)$$

Die Beleuchtungsstärke am vertikalen Flächenelement beträgt, wenn der Ausdruck für J_x aus Formel (10) eingesetzt wird, nach Formel (7):

$$E_v = \frac{J_x}{h^2} \frac{1}{\cos^3 \alpha} \cos^2 \alpha \sin \alpha = \frac{J_0}{h^2} \tan \alpha = E_h \tan \alpha \quad (12)$$

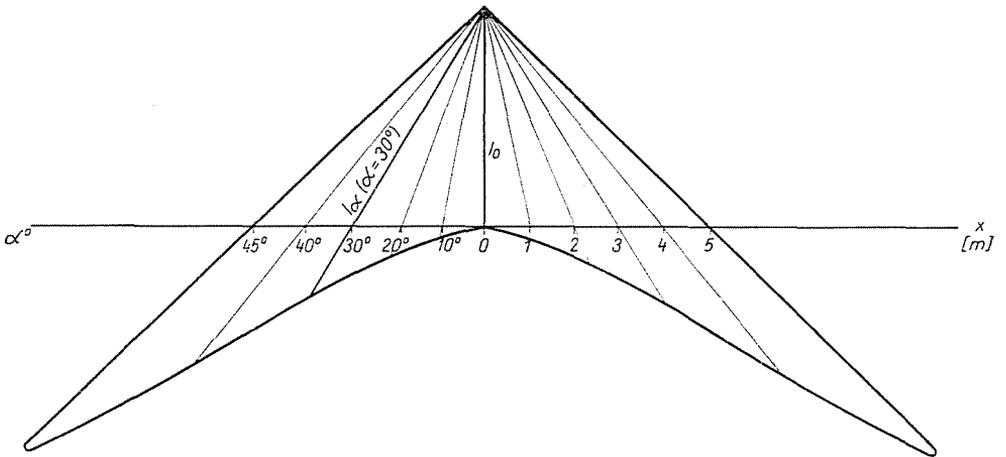


Abb. 9. Lichtverteilungskurve für den in Abb. 8 dargestellten Fall

Der Verlauf der Kennwerte im behandelten Fall ist aus Abb. 10 ersichtlich. Dabei ist der Wert für E_h auf der gesamten Strecke konstant, wogegen E_v unter der Leuchte gleich 0 ist und von dort an in Richtung des Verkehrs nach einer Tangentenfunktion zunimmt. Bei $x = h$ wird der Wert $E_h = E_v$ erreicht, der gleichzeitig das Maximum darstellt. Dann sinkt er wieder bis 0 und bleibt in der zweiten Hälfte des Leuchtenabstandes gleich 0. Der Verlauf von E_v wird durch die mit einer fetten Linie bezeichnete diskontinuierliche Tangentialfunktion angegeben. Die Sichtbarkeitsfunktion stimmt in der Deutung nach Formel (4), nach Substitution von (11) und (12) mit der Formel (8) überein:

$$S' = \frac{\varrho_h \frac{J_0}{h^2}}{\varrho_v \frac{J_0}{h^2} \tan \alpha} = \frac{\varrho_h}{\varrho_v} \cot \alpha \quad (13)$$

Die Werte auf der Straßenoberfläche verändern sich vom Leuchtenfußpunkt bis zu $+a/2$ nach einer Kotangentenfunktion. Von hier bis zu $x = a$ ist der Wert der Sichtbarkeitsfunktion gleich ∞ , da der Nenner in Formel (13) gleich 0 ist (Abb. 10).

Für das Minimum der Sichtbarkeitsfunktion gilt:

$$S'_{\min} = \frac{\varrho_h}{\varrho_v} \frac{h}{a} = 2 \frac{\varrho_h}{\varrho_v} \frac{h}{a} \quad (14)$$

Wenn im betrachteten Fall die Leuchtdichte der horizontalen Straßenoberfläche $L_h = 1 \text{ cd/m}^2$ beträgt, so ist die Sichtbarkeit auf etwa 22% des Leuchtenabstandes nicht ausreichend. Wenn die Beleuchtungsstärke auf der Straße

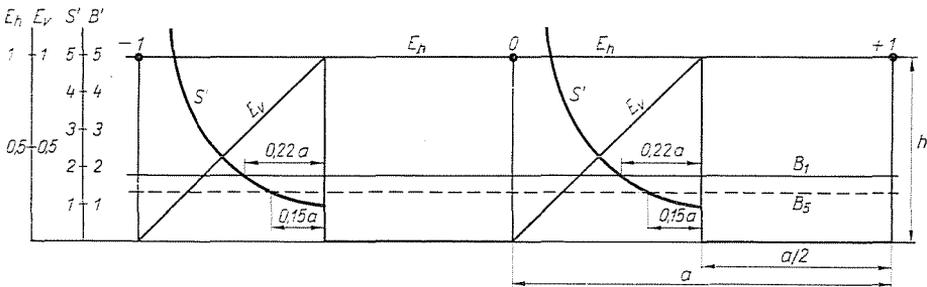


Abb. 10. Beleuchtungs- und Kontrastverhältnisse für den in Abb. 8 veranschaulichten Fall

erhöht wird, so nimmt der Anteil der nichtausreichenden Sichtbarkeit ab. Diese Abnahme ist jedoch gering. So beträgt z. B. auch bei einer Leuchtdichte von $L_h = 5 \text{ cd/m}^2$, die als sehr hoch gelten kann, der Streckenabschnitt, wo die Sichtbarkeit ungenügend ist, wenn das reflektierte Licht nicht berücksichtigt wird, immer noch etwa 15%.

Betrachten wir jetzt einen anderen Fall. Die Beleuchtungsstärke und die Gleichmäßigkeit stimmt mit dem vorigen Fall überein, die Ausleuchtung des Streckenabschnittes erfolgt jedoch mit Leuchten, die symmetrisch, in beiden Richtungen je einen Leuchtenabstand beleuchten (Abb. 11). In diesem Fall stellt die Beleuchtungsstärke an jeder beliebigen Stelle der Straße die Summe aus zwei Beleuchtungsstärken dar, die von den zwei Leuchten hervorgerufen werden. Wenn jede Leuchte eine Beleuchtungsstärke von

$$E_h = b(a - x) \quad (15)$$

hervorrufen ($b =$ eine von den Daten des Systems abhängige Konstante), bleibt die resultierende Beleuchtungsstärke an jeder beliebigen Stelle konstant:

$$E_h = E_h^0 + E_h^{+1} = b(a - x) + b(a - a + x) = ba \quad (16)$$

Im vorigen Fall wurde die Beleuchtungsstärke durch eine Lichtverteilung nach Formel (10) hervorgerufen.

Jetzt hat eine Leuchte eine linear abnehmende Beleuchtungsstärke hervorzurufen: daher muß die Lichtverteilungskurve die Formel

$$J_x = J_0 \left(\frac{1}{\cos^3 z} - \frac{x}{a} \frac{1}{\cos^3 z} \right) \quad (17)$$

befriedigen.

Diese Bedingung mit einer guten Annäherung zu erfüllen, scheint wie auch aus Abb. 12 ersichtlich, in der Praxis leicht zu sein. Die vertikale Kompo-

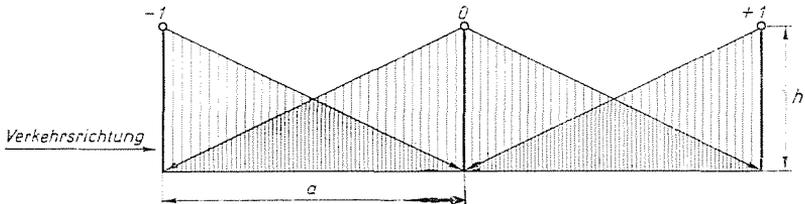


Abb. 11. Der Fall $E_h = \text{konst.}$, wo die Leuchten in beiden Richtungen je einen Leuchtenabstand beleuchten (Abschirmung bei $\pm a$)

nente verändert sich bei einer konstant bleibenden horizontalen Beleuchtungsstärke nach der Formel

$$E_v = E_v^0 = b(a - x) \tan z \quad (18)$$

Der Wert der Funktion ist bei $x = 0$ gleich 0; er weist bei $x = a/2$ ein Maximum auf; und bis $x = a$ sinkt er wieder auf 0. Das Maximum beträgt:

$$E_{v \max} = b \frac{a}{2} \frac{a}{2h} = \frac{E_h}{4} \frac{a}{h} \quad (19)$$

Auf Grund des vorher gesagten gilt für die Sichtbarkeitsfunktion:

$$S' = \frac{\varrho_h b \cdot a}{\varrho_v b(a - x) \tan z} = \frac{\varrho_h}{\varrho_v} \frac{a}{(a - x) \tan z} \quad (20)$$

Der Wert am Fußpunkt der Leuchte ($x = 0$) beträgt ∞ , hat bei $x = a/2$ ein Minimum, nimmt dann wieder zu um bei $x = a$ wieder ∞ zu erreichen. Bei dieser Anordnung kann für eine Auswertung bei $L_h = 1 \text{ cd/m}^2$ Straßenleuchtdichte festgestellt werden, daß die Sichtbarkeit auf der Gesamtlänge des Streckenabschnittes ausreichend ist, d. h. daß dem Kriterium $S > B$ an jeder Stelle genügt wird. Der Kurvenverlauf ist aus Abb. 13 ersichtlich.

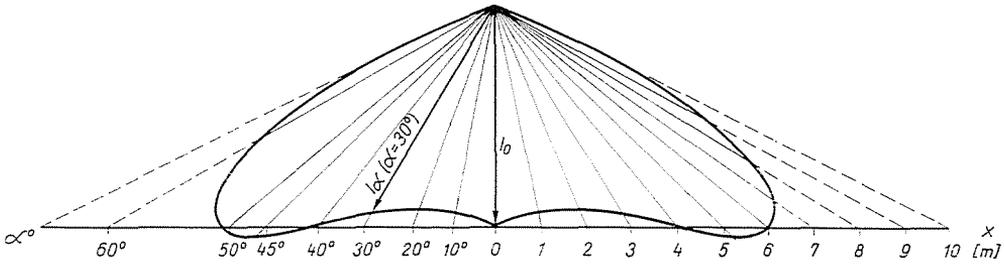


Abb. 12. Lichtverteilungskurve für den in Abb. 11 behandelten Fall

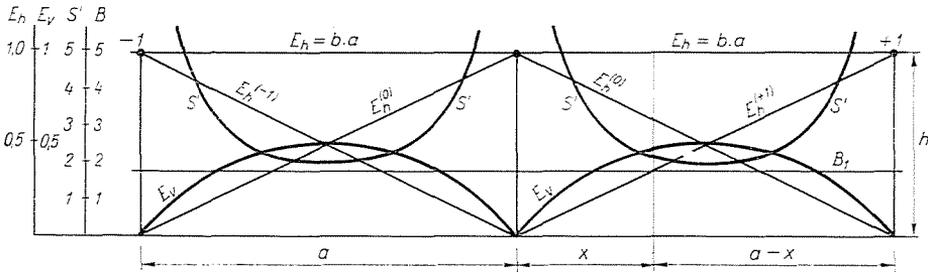


Abb. 13. Beleuchtungs- und Kontrastverhältnisse für den in Abb. 11 behandelten Fall

Zum Schluß soll noch, als Bestätigung der am Anfang aufgestellten Behauptungen, das Minimum der Sichtbarkeitsfunktion ermittelt werden:

$$S_{\min} = \frac{q_h E_h}{q_v \frac{E_h}{4} \frac{a}{h}} = 4 \frac{q_s}{q_v} \frac{a}{h} \quad (21)$$

Das ist im Vergleich zu Formel (14) genau das Doppelte des Wertes im ersten betrachteten Fall. Bei gleicher Beleuchtungsstärke, Gleichmäßigkeit und Untersuchungsmethode zeigen sich bezüglich der Sichtbarkeitsverhältnisse beträchtliche Abweichungen, demzufolge können die Verhältnisse durch die Beleuchtungsstärke und die Gleichmäßigkeit auch zusammen nicht charakterisiert werden.

Zusammenfassung

Da die Sichtbarkeit durch die Kontrastverhältnisse bestimmt wird, genügen — der Ansicht des Verfassers nach — die Beleuchtungsstärke oder die Leuchtdichte und deren Gleichmäßigkeit nicht um die Güte einer Beleuchtungsanlage zu charakterisieren.

Zur Kennzeichnung des Kontrastes im Bereich der Straßenbeleuchtung wird die Fahrbahnleuchtdichte (L_h) zur Vertikalleuchtdichte (L_v) in Beziehung gesetzt. Im weiteren wird die Gleichung $S = L_h/L_v$ als Grundlage für quantitative Bewertung von Messungen auf Versuchstraßen verwendet. Von den DE BOERSCHEN Versuchen ausgehend werden die Sichtbarkeitsverhältnisse analysiert, und die Wirkungen der Fahrbahnleuchtdichte bzw. die des Reflexionsgrades geprüft.

An Hand dieser Prüfungsmethode wird bewiesen, daß die Sichtbarkeit — falls z. B. zwei Leuchtentypen mit verschiedenen Lichtverteilungskurven verwendet werden — selbst bei gleicher Beleuchtungsstärke (Leuchtdichte) und Gleichmäßigkeit sehr verschieden sein kann. Daraus zieht Verfasser den Schluß, daß neue, die derzeitigen Vorschriften ergänzende lichttechnische Parameter einzuführen sind, um die Sichtbarkeit eindeutig zu charakterisieren.

Literatur

1. MSz 9620—60. Fénytechnika és határterületeinek fogalom-meghatározásai és jelölései. Magyar Népköztársaság Országos Szabvány.
2. PAPALESKI, N. D.: Kurs fiziki II. XIV. Moskau, Leningrad 1947.
3. KÖNIG u. BRODHUN: Sitzsber. Akad. Wiss. Berlin 1888, 917.
4. DUNBAR, E.: Necessary values of brightness contrasts in artificially lighted streets. Trans. Illum. Engng. Soc. London **3**, 187—195 (1938).
5. DE BOER, J. B.: Beleuchtung wichtiger Verkehrsstraßen. Philips Technische Rundschau **23**, 249 (1961—62).
6. BAUER, C.: Leuchtdichtetechnik der Straßenbeleuchtung. Lichttechnik **3**, 218 (1961).
7. DE BOER, J. B.: Straßenleuchtdichte und Blendungsfreiheit. Lichttechnik **10**, 359 (1958).
8. BOUMA, P. J.: Die Wahrnehmung von Helligkeitskontrasten bei der Straßenbeleuchtung und Photometrie. Philips Technische Rundschau **1**, 142 (1936).
9. JANSEN, J.: Beleuchtungstechnik. Philips Technische Bibliothek, Eindhoven 1954.
10. GOLDMANN, H.: Physiologische Sehvorgänge. Schweizerische Technische Zeitschrift **11**, 1—2 (1962).
11. PAHL, A.—CHODURA, R.: Neue Untersuchungen über die Reflexionseigenschaften von Oberflächen auf Straßenbeleuchtung. Lichttechnik **7**, 422 (1955).
12. PFEFFER, K.: Maßstäbe für die Güte der Straßenbeleuchtung. AEG Mitteilungen **53**, 324—364 (1963).
13. REEB, O.—SCHLEISS, R.: Weitere Untersuchungen über die Kontrastverhältnisse bei Straßenbeleuchtung. Lichttechnik **8**, 382 (1956).
14. SEWIG, R.: Handbuch der Lichttechnik. Springer Verlag. Berlin 1938.
15. KEITZ, H. A. E.: Lichtberechnungen und Lichtmessungen. Philips Technische Bibliothek, Eindhoven 1951.

Dr. Tibor LANTOS, Budapest XI., Budafoki u. 8, Ungarn