

ERICH MEYER

BELEUCHTUNGSTECHNIK

Beleuchtungstechnik

Planung und Entwurf von Beleuchtungsanlagen

Von

Dr. Erich Meyer

Bremen



Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 1938

140 Abbildungen

ISBN 978-3-663-00437-0 ISBN 978-3-663-02350-0 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-663-02350-0

Alle Rechte vorbehalten
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1938

Vorwort

Die Entwicklung der Lichttechnik einschließlich der Beleuchtungstechnik in den Nachkriegsjahren ist in der Hauptsache durch dreierlei bestimmt. Erstens durch die Betonung der physiologischen, psychologischen und ästhetischen Voraussetzungen der Lichttechnik in Erweiterung der bis dahin im wesentlichen nur gepflegten messungsbezogenen („objektiven“) Grundlagen; zweitens durch die neuartige, geradezu umwälzende Entfaltung der Leuchttechnik; drittens durch das Bestreben, licht- und beleuchtungstechnische Kenntnisse weitesten Kreisen zu vermitteln.

Dies hat, wenn man von den Bereicherungen durch die Arndtsche „Raumhelligkeit“ und die Schattentechnik sowie von den grundlegenden Festsetzungen in den DIN-Blättern absieht, zur Folge gehabt, daß dem noch recht notwendigen Ausbau der messungsbezogenen Beleuchtungstechnik verhältnismäßig geringe Förderung zuteil wurde. Erfahrungsgemäß können aber die an sich entscheidenden empfindungsbezogenen („subjektiven“) Forderungen der Beleuchtungstechnik nur erfüllt werden, wenn die messungsbezogenen Gesetzmäßigkeiten, die einem jeden Beleuchtungsvorgang zugrunde liegen, voll beherrscht werden. Schon durch die Beherrschung allein der Stärke, Gleichmäßigkeit und Schattigkeit der Beleuchtung einer Anlage ist man weitgehend imstande, die empfindungsbezogenen Forderungen zu erfüllen.

Daher ist es im Vorliegenden unternommen, ohne Verzicht auf die empfindungsbezogenen Bewertungen eine Darstellung unter gründlichstem Ausbau der messungsbezogenen Tatsachen zu schaffen, wie sie in dieser Art noch nicht vorliegt.

Insonderheit wurde von der gesamten Lichttechnik nur das verarbeitet, was vom verständnisvoll planenden und sorgfältig entwerfenden Beleuchtungsfachmann wirklich für seine Arbeit gebraucht wird. Strahlungstheorie, Leuchttechnik sowie Lichtmeßtechnik, aber auch Einrichtungsbauliches (Installatorisches), ferner Elektro- und Gastechisches mußten ganz zurücktreten. Darüber hinaus

IV

wurde mit Rücksicht auf den Buchumfang auf Darstellung der Schaulen-, Leuchtanschlag- und Bauwerkbeleuchtung, sowie der noch im Fluß befindlichen Luftschutzbeleuchtung verzichtet, die der Lichttechnik im engeren Sinne schon näherliegen.

Als Ziel galt, das „Was“, „Wie“ und „Warum“ eines Beleuchtungsentwurfs mit Hilfe einer geeigneten Darstellung der Grundgesetzmäßigkeiten und durch möglichst eingehende, wenn auch allgemeinbleibende Entwurfsanweisungen klarzustellen.

Dabei konnte auf Verwendung einfacher mathematischer Hilfsmittel nicht verzichtet werden. Durch unterschiedlichen Druck, zahlreiche Abbildungen und Rechentafeln, die der einfachen Auswertung verwickelterer Ausdrücke dienen, wurde eine möglichst leichte Verständlichkeit und schnelle Anwendbarkeit angestrebt.

Das Buch ist für Lichttechniker, wie für Architekten gedacht. Es möchte die dringend notwendige Zusammenarbeit der Fachleute dieser beiden Richtungen fördern. Ohne ausdrücklich auf bestimmten Leserkreis zugeschnitten zu sein, enthält die Darstellung das, was in erster Linie heute an Technischen Fachschulen über Beleuchtungstechnik vorgetragen wird.

Schrifttumsnachweise geben überall den Zugang zu den Facharbeiten. Daß die Darstellung auch manches Neuartige erbrachte, wird der Fachmann erkennen. Diesen möchte sie auch durch die gegebene Übersicht dazu anregen, die Entwurfsverfahren im angestrebten Sinne zu vervollkommen. Fremdwörter konnten weitgehend ausgeschaltet werden.

Bekanntlich wächst der Bedarf an ausgebildeten Lichttechnikern von Tag zu Tag. Dies Buch möchte dieser Ausbildung dienen, indem es mit den Aufgaben und Verfahren des Beleuchtungsentwurfs vertraut macht; darüber hinaus aber ganz allgemein dazu beitragen, daß es gelingt, das Licht richtig einzusetzen, damit es als wirklicher Helfer und Förderer zu Leistung und Erholung immer besser den ihm zustehenden Dienst tut.

Delmenhorst, im Oktober 1937.

Dr. Erich Meyer

DLTG

Leiter des Beleuchtungstechnischen Laboratoriums
der Höheren Technischen Staatslehranstalten zu Bremen

Inhaltsverzeichnis

A. Allgemeine Beleuchtungstechnik

I. Physikalische Grundlagen			
Seite	Seite		
1. Der Lichtstrom	1	4. Die Lichtstärke	3
2. Die Beleuchtungsstärke ..	1	5. Beleuchtung bei schrägem Lichteinfall	5
3. Das Grundgesetz der Be- leuchtung	2	6. Spektralfarben	6
II. Beleuchtungstechnische Grundlagen			
1. Mittlere Beleuchtungs- stärke	7	5. Die Gleichmäßigkeit	12
2. Darstellungen von Be- leuchtungsverteilungen . .	9	6. Der beleuchtungstechni- sche Grundabstand	14
3. Beleuchtung der Waage- rechtgeraden	9	7. Die Lotrechtbeleuchtung .	15
4. Die Halbwertsbreite	11	8. Schrägbeleuchtungsvertei- lungen	17
III. Schattentechnische Grundlagen			
1. Schatten	17	5. Streckenteilschattigkeit... 23	
2. Geometrie der Schatten . .	18	6. Kritische Schattigkeits- grenzwerte	24
3. Schattigkeit	20	7. Mittlere Schattigkeit	25
4. Festsetzungen über Schat- tigkeiten	22		
IV. Lichttechnische Grundlagen			
1. Die Lichtverteilungen . . .	26	5. Zonenlichtströme	32
2. Lichtverteilung und Licht- strom	28	6. Lichtrückwurf, Lichtver- schluck, Lichtdurchlaß . . .	33
3. Das Lichtverteilungsfeld..	31	7. Die Leuchtdichte	35
4. Sonderwerte von Licht- stärken und Lichtströmen.	31	8. Lichtzerstreuung von Flä- chen	36
V. Auge und Beleuchtung			
1. Das Auge	38	4. Kontrast	42
2. Die spektrale Hellempfind- lichkeit	39	5. Blendung	43
3. Wahrnehmung der Be- leuchtung	40	6. Hellanpassung (Adaption). 46	
		7. Sehen bei farbigem Licht. 47	
		8. Mischlicht	48
VI. Gesundheitsschutz durch Beleuchtung			
1. Schonung des Auges	49	4. Abschluß	51
2. Unfall und Beleuchtung . .	50	Anhang zu Hauptteil A.	51
3. Gesundheit des Tageslichts	50		

B. Technische Mittel

VII. Beleuchtungsmessung

Seite

- | | |
|-------------------------------------------|----|
| 1. Beleuchtungs- und Schattenmesser | 53 |
|-------------------------------------------|----|

VIII. Beleuchtungsbaustoffe

- | | |
|-------------------------|----------------------------------------|
| 1. Durchlaßstoffe | 3. Luxferprismen und Uviolgläser |
| 2. Rückwurfstoffe | 57 |

IX. Beleuchtungslichtquellen

- | | |
|---------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1. Lichtquellenarten | 3. Lichtkennlinie und Lebensdauer |
| 2. Lichtstrom und Lichtausbeute | 63 |
| 59 | 4. Leuchtdichten |
| | 65 |
| | 5. Lichtfarben |
| | 65 |

X. Technische Geleuchte

- | | |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1. Zweck der Geleuchte | 6. Zonenlichtstromverteilungen |
| 67 | 71 |
| 2. Der Wirkungsgrad | 7. Leuchtdichten und Leuchtdichteverteilungen |
| 68 | 72 |
| 3. Zur Lichtverteilung | 8. Wichtige Winkel |
| 68 | 73 |
| 4. Einteilung und Kennzeichnung | 9. Vollständige Geleuchtangabe |
| 69 | 74 |
| 5. Sonderformen | |
| 70 | |

C. Planung und Entwurf von Beleuchtungsanlagen

XI. Beleuchtung von Räumen mit Tageslicht

- | | |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 1. Die Sachlage | 9. Fensterhöhe und Fensterbreite |
| 75 | 84 |
| 2. Das Tageslicht | 10. Die endgültigen Fensterwerte |
| 75 | 86 |
| 3. Beleuchtungsverteilung und Gleichmäßigkeit | 11. Zusammenstellung |
| 76 | 87 |
| 4. Die Tageslichtkennzahl | 12. Rechenblätter zu Tageslichtbeleuchtung |
| 78 | 87 |
| 5. Das Wirkungsgradverfahren | 13. Oberlichterarten |
| 79 | 90 |
| 6. Der Wirkungsgrad | 14. Größenberechnung |
| 81 | 91 |
| 7. Der Fensterbeiwert | 15. Gleichmäßigkeit und Schattigkeit |
| 82 | 92 |
| 8. Lage und Form der Fenster | 16. Abschließendes |
| 83 | 93 |

XII. Raumbelichtung mit künstlichem Licht

- | | |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1. Erforderliche Beleuchtungsstärken | 4. Gewölbebeleuchtung ... |
| 94 | 103 |
| 2. Dunkelstunden | 5. Beleuchtungstechnische Bestform von Gewölben. |
| 98 | 103 |
| 3. Die Hauptbeleuchtungsarten | 6. Lichtverteilungen für Gewölbebeleuchtungen ... |
| 98 | 104 |

	Seite		Seite
7. Gleichmäßigkeit und Schattigkeit bei Gewölbeleuchtungen	104	18. Lichtstromschattigkeitsformel	121
8. Die Lichtstromformel . .	106	19. Künstliche Glasdeckenbeleuchtung	122
9. Die elektrische Leistung .	106	20. Lichtquellenanordnung .	122
10. Raumbekleidung	107	21. Der Glasdeckenwirkungsgrad	123
11. Der Wirkungsgrad	109	22. Gleichmäßigkeit und Schattigkeit	124
12. Lichtquellenanzahl und Lichtpunkthöhe	112	23. Allgemeines über Heimbeleuchtung	125
13. Die Lichtquellenanordnung	113	24. Beleuchtungsstärken und Lampenleistungen für Heimleuchten	126
14. Der Berechnungsgang . .	116	25. Treppenbeleuchtung . .	127
15. Viel oder wenig Lichtquellen	117	26. Zahlbeispiele	129
16. Faustformeln	118		
17. Schattigkeitsbestimmungen	119		

XIII. Arbeitsplatzbeleuchtung

1. Arten der Arbeitsplatzbeleuchtung	130	7. Arbeitsplatzgebundene Allgemeinbeleuchtung . .	141
2. Beleuchtungsstärken . .	132	8. Besondere Fälle	143
3. Gleichmäßigkeitsforderungen	135	9. Schattigkeit	143
4. Zusatzbeleuchtung und Blendung	136	10. Das Lesen	146
5. Arbeitsplatzgeleuchte . .	137	11. Lese- und Schreibbeleuchtung	147
6. Erforderliche Lampenleistung	138	12. Wirtschaftlichkeit von Arbeitsplatzbeleuchtung	148
		13. Farbiges Arbeitslicht . .	151

XIV. Platz- und Hallenbeleuchtung

1. Allgemeine Voraussetzungen	153	5. Mittlere Beleuchtungsstärke	158
2. Die Anzahl der Lichtquellen	154	6. Wirkungsgradformel von Bloch	159
3. Der Lichtstrombedarf . .	157	7. Sportplatzbeleuchtung .	160
4. Zusammenfassung und Beispiel	158		

XV. Straßenbeleuchtung

1. Die technischen Geleuchte	163	5. Die Abstandsbestimmungen	170
2. Die Grundbeleuchtung des Geleuchts	164	6. Streckenbeleuchtung . .	172
3. Gleichmäßigkeit und Schattigkeit	166	7. Die Flächenbeleuchtung	173
4. Höhen, Abstände und Anordnungen der Lichtpunkte	168	8. Verlangte Werte und Lampenleistung	174
		9. Der übliche Rechnungsgang	176

	Seite		Seite
10. Bearbeitung bei nicht- achsenspiegelbildlichen Geleuchten.....	176	13. Farbige Straßenbe- leuchtung	182
11. Blochs Formel für E_m ..	177	14. Lotrechtbeleuchtung ...	183
12. Blendung und Blen- dungslichtstärke	178	15. Fernverkehrsstraßenbe- leuchtung	185
 XVI. Schönheit der Beleuchtung			
1. Allgemeine Richtlinien.	187	5. Lichtarchitektur mit Wolframröhren	193
2. Schönheitswirkung ver- schiedener Lichter	188	6. Schönheit der Straßen- beleuchtung	193
3. Schönheit der Raumbel- leuchtung	189	7. Schöne Geleuchte	194
4. Lichtarchitektur	191	8. Schönheit der Arbeit...	196

A. Allgemeine Beleuchtungstechnik

I. Physikalische Grundlagen

1. Der Lichtstrom. Eine jede Beleuchtungsanlage verlangt eine Lichtquelle. Diese Lichtquelle sendet in einem gewissen Zeitraum eine Lichtmenge aus.

Festsetzung. Man bezeichnet die in der Zeiteinheit von einer Lichtquelle ausgesandte Lichtmenge als „Lichtleistung“ oder meist als „Lichtstrom“. In Rechnungen dient als Zeichen hierfür der Buchstabe Φ . Der Lichtstrom dient zur Bewertung von Lichtquellen. Das Maß der Lichtleistung ist das Lumen (lm); mitunter wird auch das Dekalumen (1 dlm = 10 lm) und das Kilolumen (1 klm = 1000lm) gebraucht.

Begründung. Die Lichtleistung wird deshalb allen Beleuchtungsbewertungen zugrunde gelegt, weil das Auge für Beleichtungsbeurteilungen maßgebend ist. Das Auge vermittelt aber nicht, wie die lichtempfindliche Schicht, Eindrücke von den Lichtmengen, die es insgesamt aufnimmt, sondern nur von solchen, die es innerhalb von kleinen Zeitabschnitten (zwischen $\frac{1}{10}$ bis $\frac{1}{20}$ sec) aufnimmt; also von Lichtleistungen. Deshalb werden Lichtquellen und Beleuchtungen nach Lichtströmen bewertet. Eine Vorstellung von der Größe eines Lumens erhält man dadurch, daß das Auge bestenfalls um 10^{-15} lm noch wahrnehmen und die Aufnahme von rund 1 lm noch eben ertragen kann.

2. Die Beleuchtungsstärke. Das Licht, das eine Lichtquelle aussendet, ist bei allen Beleuchtungsanlagen dazu bestimmt, nicht unmittelbar in das Auge zu gelangen, sondern immer nur mittelbar über irgendeine Fläche, die es zunächst trifft. Das Licht soll immer Flächen beleuchten. Wenn ein Lichtstrom eine Fläche trifft, wird eine bestimmte Stärke der Beleuchtung entstehen. Diese gilt es zu bestimmen.

Festsetzung. Als Beleuchtungsstärke E gilt der auf die (in m^2 gemessene) Flächeneinheit treffende Lichtstrom. Man bestimmt sie also mit

$$E = \Phi/F, \quad [1]$$

worin F die Fläche ist, auf die der Lichtstrom entfällt. Als Einheit der Beleuchtungsstärke dient das Lux (lx); ein Lux ist vorhanden,

wenn auf ein m^2 ein lm entfällt. Das Beleuchtungsgesetz gestattet, den Lichtstrom zu bestimmen, der zur Erzielung einer Beleuchtungsstärke E (lx) auf einer Fläche F (m^2) erforderlich ist, gemäß $\Phi = E \cdot F$.

Verallgemeinerung. Beleuchtet eine Lichtquelle eine Fläche so, daß, wie fast immer, nicht allen Teilflächen F_n der gleiche Lichtstromteil zukommt, so fallen die Beleuchtungsstärken E_n der n Teilflächen verschieden aus. Soll dann der Gesamtlichtstrom berechnet werden, so muß er als Summe aus den n Teillichtströmen gebildet werden gemäß

$$\Phi_0 = \Sigma \Phi_n = \Sigma E_n \cdot F_n.$$

Wählt man alle Teilflächen F_n gleich groß, so daß die Gesamtfläche $F_0 = n \cdot F_n$ ist, so vereinfacht sich das Vorige zu

$$\Phi_0 = \sum \frac{F_0 \cdot E_n}{n} = F_0 \cdot \frac{\Sigma E_n}{n}.$$

Der Gesamtlichtstrom ist also aus Gesamtfläche, Einzelbeleuchtungen und deren Anzahl zu bestimmen. Eine weitere Vereinfachung erfolgt später.

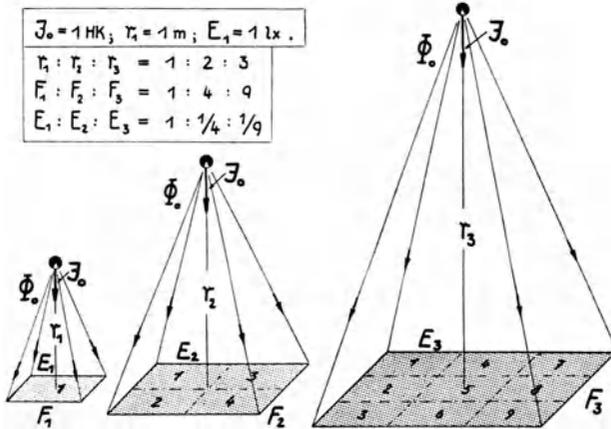


Abb. 1. Beleuchtungsstärke und Abstand

3. Das Grundgesetz der Beleuchtung. Bringt man eine Lichtquelle vom Lichtstrom Φ in die Mitte einer Kugel vom Halbmesser r , die die Innenfläche $O = 4 \pi r^2$ hat, so gilt

$$E = \frac{\Phi}{4 r^2 \pi} \quad \text{oder} \quad E \cdot r^2 = K,$$

wobei $K = \Phi/4\pi$ der für die gewählte Lichtquelle und jede Kugelgröße unveränderliche Festwert ist. Für zwei verschiedene Kugeln mit den Halbmessern r_1 und r_2 folgt

$$K = E_1 \cdot r_1^2 = E_2 \cdot r_2^2 \quad \text{oder} \quad E_1 : E_2 = r_2^2 : r_1^2. \quad [2]$$

Ergebnis. Die Beleuchtungsstärken, die eine Lichtquelle auf zwei Flächen hervorruft, die zur Lichtquelle sonst die gleiche Stellung haben, verhalten sich umgekehrt wie die Quadrate der Abstände. Daß das Abstandsgesetz quadratisch ist, wird aus Abb. 1 deutlich, nach der der gleiche Lichtstrom beim n -fachen Abstand eine Fläche von n^2 -facher Größe trifft.

4. Die Lichtstärke. Das Grundgesetz besagt, daß das Produkt $E \cdot r^2$ unveränderlich bleibt, wenn man als Beleuchtungsstärken E Werte einsetzt, die sich bei den Abständen r von Lichtquelle zur Beleuchtungsfläche ergeben. Die Gesetzmäßigkeit $E \cdot r^2 = K$ enthält nichts, wodurch die gesamte Kugeloberfläche als beleuchtete Fläche vorausgesetzt würde; also kann irgendein beliebiges Stück F der Kugeloberfläche als Beleuchtungsfläche dienen. Dieses bildet mit der Lichtquelle als Spitze einen Raumkegel (Abb. 2). Offenbar stellt der Festwert K des Gesetzes eine Eigenschaft der Lichtquelle in Richtung der Raumwinkelachse dar. Diese Eigenschaft heißt Lichtstärke J . Je stärker die Lichtquelle nämlich in der betrachteten Richtung Licht aussendet, um so größer fällt die Beleuchtungsstärke E aus und damit gleichungsgemäß der Festwert K . K ist also die Lichtstärke J . Ersetzt man daher K durch J , so bleibt

$$J = E \cdot r^2.$$

Entsprechend der Voraussetzung, daß die Lichtquelle in Kugelmittle sein sollte, gilt hierbei immer, daß die Beleuchtungsfläche von senkrecht einfallendem Licht getroffen wird.

Als Maß der Lichtstärke dient an Stelle von $1 \text{ lx} \cdot \text{m}^2$ die „Hefnerkerze“ (HK). Eine HK wird dargestellt durch die Lichtstärke, die einer technischen Lichtquelle, genannt Hefnerlampe, in einer bestimmten Richtung (unter Wahrung bestimmter Bedingungen) zukommt. Erst durch diese Einheit erhalten alle bisher eingeführten Einheiten bestimmte Bedeutung: So ist 1 lx auf dem Flächenstück vorhanden, das durch die Lichtstärke 1 HK aus dem Abstand 1 m senkrecht beleuchtet wird; diese Lichtquelle sendet der Fläche 1 lm zu, wenn die Fläche die Größe 1 m^2 besitzt (Abb. 1). (1), (3).

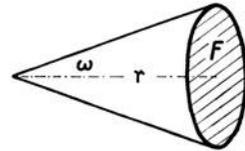


Abb. 2. Raumwinkel

„Lichtstärke“ ist eine beim Beleuchtungsentwurf unentbehrliche Größe, deren Verständnis tunlichst Sorgfalt entgegengebracht wird. Hierzu sind folgende Betrachtungen nötig.

Erstens. Der Beleuchtungsentwurf verwendet als „Punktlichtquelle“ eine gedachte Lichtquelle, die nach allen Seiten das Licht gleich stark sendet. Ein leuchtender Punkt hätte diese Eigenschaft. Bei einer solchen ist offensichtlich das Produkt $E \cdot r^2$ nicht nur für alle Abstände zu einer Richtung, sondern auch in allen Richtungen gleich groß. Eine Punktlichtquelle hat also in allen Richtungen gleiche Lichtstärke.

Zweitens. Alle Lichtquellen senden das Licht in verschiedenen Richtungen mit verschiedener Stärke. Bei ihnen gehört also zu jeder Richtung eine andere Lichtstärke. Die Richtung ist die der Achse des Raumkegels. Je nach Wahl der Größe des Raumwinkels entsteht aber etwas durchaus Verschiedenes. Den Raumwinkel ω veranschaulicht Abb. 2; eindeutig kennzeichnet man einen solchen durch die Beziehung $\omega = F/r^2$; d. h. der Raumwinkel ω schneidet auf einer Kugel vom Halbmesser r die Fläche von der Größe $F = \omega \cdot r^2$ ab.

a) *Erster Grenzfall.* Der Raumwinkel habe geringe Größe; derart, daß allen seinen Teilen Teillichtströme von praktisch gleicher Größe zukommen. Dann ist durch das Produkt $E \cdot r^2$ genau die Lichtstärke gegeben, die zu der Richtung der Raumwinkelachse gehört, sofern E auf der Ausschnittfläche des Raumwinkels Gültigkeit hat. Diese Lichtstärke heißt genau: Richtungslichtstärke.

b) *Zweiter Grenzfall.* Der Raumwinkel umfasse die ganze Kugel. Entsprechend der Veränderlichkeit der Lichtsendung kommt den Teilen des Vollraums verschiedener Lichtstrom zu. Die Beleuchtungsstärke der Kugeloberfläche ist dann nur ein Mittelwert aus Teilbeleuchtungsstärken verschiedener Größe. Daher ist „die Lichtstärke“ gemäß $J = E \cdot r^2$ jetzt nur ein Mittelwert. Diese Lichtstärke heißt die mittlere Lichtstärke der Lichtquelle J_m .

c) *Zwischenfall.* Der Raumkegel umfasse einen Raumwinkel beliebiger Größe. Dann ergibt die Gleichung $E \cdot r^2 = J$ eine „Lichtstärke“, die nur den Mittelwert der Lichtstärken innerhalb des verwendeten Raumwinkelbereichs darstellt.

Zusammenfassung. Man hat „Richtungslichtstärke“ und „mittlere Lichtstärken“ zu unterscheiden. Mittlere gelten in größeren Bereichen; die Richtungslichtstärke, künftig meist nur Lichtstärke genannt, gilt genau nur im Grenzfall verschwindender Raumwinkelgröße. Eine Richtungslichtstärke stellt man durch einen Pfeil von der Länge der Lichtstärke dar. Dies wird durch folgendes noch geklärt: Setzt man $E = \Phi/F$ in die Lichtstärken-gleichung ein, so entsteht

$$J = E \cdot r^2 = \Phi \cdot \frac{r^2}{F} = \Phi : \frac{F}{r^2} = \Phi/\omega. \quad [3]$$

Danach ist also Lichtstärke das Verhältnis von dem den Raumwinkel ω durchtretenden Lichtstrom Φ zur Größe ω des Raumwinkels selbst. Bei Lichtquellen mit geringer Lichtaussendungsveränderlichkeit können daher verhältnismäßig große Raumwinkel zur J -Bestimmung dienen; denn eine Raumwinkelverkleinerung ändert dann das Verhältnis Φ/ω nicht mehr. Bei starker Verschiedenheit muß der Raumwinkel fast zu einer Geraden ent-

arten, um nicht einen Mittelwert, sondern die Richtungslichtstärke zu ergeben. Der Übergang von kleinstem Raumwinkel zum Vollraumwinkel liefert den Übergang von Richtungslichtstärke zur mittleren Lichtstärke. Von der Raumwinkelgleichung der Lichtstärke machen lichttechnische Verfahren Gebrauch, die der Beleuchtung dienen. Im Beleuchtungsentwurf selbst benutzt man sowohl Mittelwerte wie Richtungslichtstärken.

Sonderfall. Es soll die mittlere Lichtstärke einer Lichtquelle bestimmt werden; der Raumwinkel ist dann

$$\omega = \frac{F}{r^2} = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi, \quad \text{also} \quad J_m = \frac{\Phi_0}{\omega} = \frac{\Phi_0}{4\pi} \approx \frac{\Phi_0}{13}, \quad [4]$$

wobei Φ_0 der Gesamtlichtstrom ist. Gesamtlichtstrom und mittlere Lichtstärke sind also bei allen Lichtquellen auseinander berechenbar. Besitzt man jedoch die Lichtstärken aller n Teilraumwinkel ω_n , so ist der Gesamtlichtstrom zu berechnen mit

$$\Phi_0 = \Sigma \Phi_n = \Sigma J_{\omega_n} \cdot \omega_n \equiv \omega_0 \cdot \Sigma J_{\omega_n},$$

wobei das letzte nur gilt, wenn alle Teilraumwinkel gleich groß ($= \omega_0$) sind. Diese Vereinfachung macht sich die Lichttechnik zunutze.

Abschluß. Für die Beleuchtungsstärke sind damit zwei Gesetze bekannt:

$$E = \frac{\Phi}{F} \quad \text{und} \quad E = \frac{J}{r^2}.$$

Das erste das Lichtstrom-Flächen-Gesetz, das zweite das Lichtstärken-Abstands-Gesetz. Gemäß den Gegebenheiten wählt der Beleuchtungsentwurf das eine oder das andere. Im allgemeinen erfolgen Raumbeluchtungsbestimmungen mit der Gesetzmäßigkeit des Lichtstroms, solche für Straßenbeleuchtungen mit der der Lichtstärke.

5. Beleuchtung bei schrägem Lichteinfall. Bisher wurde senkrechter Lichteinfall vorausgesetzt. Das ist nur ein Ausnahmefall. Meist fällt das Licht schräg ein. Daher ist das Gesetz der Beleuchtung für schrägen Lichteinfall wichtig.

Herleitung. Der Lichtstrom Φ treffe (Abb. 3) einmal die Fläche F_0 , ein zweites Mal die Fläche F_α , die den Winkel α mit F_0 bildet. F_0 sei die Projektion von F_α auf eine Ebene senkrecht zur Lichteinfallrichtung. Also $F_0 = F_\alpha \cdot \cos \alpha$. Für den eintretenden Lichtstrom gilt einerseits $\Phi = E_0 \cdot F_0$, andererseits $\Phi = E_\alpha \cdot F_\alpha$. Gleichsetzung ergibt:

$$E_\alpha \cdot F_\alpha = E_0 \cdot F_0 = E_0 \cdot F_\alpha \cdot \cos \alpha, \quad \text{also} \quad E_\alpha = E_0 \cdot \cos \alpha.$$

Ergebnis. Bei Neigung einer Ebene gegen den Lichteinfall um den Winkel α verringert sich die Beleuchtungsstärke wie $\cos \alpha$.

Daher richten heliotropische Pflanzen ihre Blüten senkrecht zur Sonnenlichteinstrahlung; und deshalb ist es Lichtvergeudung, wenn man mit sehr schrägem Lichteinfall Flächen beleuchtet (Straßenbeleuchtung).

Anwendung. Es läßt sich die Änderung der Beleuchtungsstärke berechnen, die durch Drehung der Beleuchtungsfläche um den Winkel γ von der Stellung α nach β hin gemäß $\gamma = \beta - \alpha$ eintritt:

$$\begin{aligned} \Delta E_{\beta-\alpha} &= E_{\beta} - E_{\alpha} = E_0 \cdot (\cos \beta - \cos \alpha) = E_0 \cdot \cos \alpha \left(\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} - 1 \right) \\ &= E_{\alpha} \cdot \left(\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} - 1 \right). \end{aligned}$$

Das allgemeine Gesetz. In dem Ausdruck $E_{\alpha} = E_0 \cos \alpha$ läßt sich E_0 ersetzen durch die aus dem Abstand r wirkende Lichtstärke J ; dann folgt (2)

$$E_{\alpha} = \frac{J}{r^2} \cdot \cos \alpha. \tag{5}$$

Damit ist die Beschränkung auf senkrechten Lichteinfall überwunden: der gewonnene Ausdruck gibt die Beleuchtungsstärke aus



Abb. 3. Drehung der Beleuchtungsebene

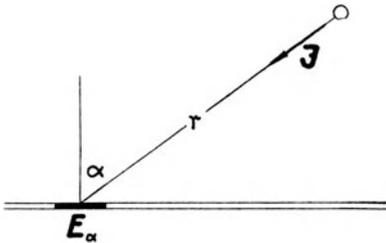


Abb. 4. Beleuchtung bei Schrägeinfall

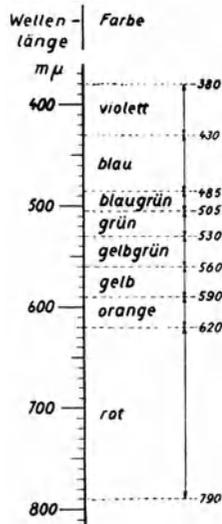


Abb. 5. Wellenlängen der Lichtfarben

Lichtstärke, Einfallswinkel und Abstand, wie Abb. 4 zeigt. Dieser Ausdruck stellt die Grundlage für die meisten Beleuchtungsberechnungen im Freien dar.

6. Spektralfarben. Läßt man Licht, das dem Auge weiß erscheint, durch ein Prisma fallen, so wird es in Licht verschiedener Farbe („rot“, „gelb“, „blau“) zerlegt. Diese Farben können grundsätzlich nicht mehr durch weiteren Durchgang durch Prismen in weitere Teilfarben zerlegt werden.

Sie stellen die Grundbestandteile des Lichtes dar. Licht ist ursprünglich nur in Form farbigen Lichts vorhanden. „Weiß“ ist nur ein (wenn auch sehr häufig nahezu erreichter) Sonderfall von Mischlicht. Die Bedeutung weißen Lichts rührt aber daher, daß weißes Licht alle Farben so erscheinen läßt, wie sie sind, weil eben nur weißes Licht alle Farben enthält, also von allen Flächen aller Farben zurückgeworfen werden und diese dadurch sichtbar machen kann. Die Kenntnis des in Spektralfarben zerlegten Lichtes ist wichtig; erstens, weil die Lichttechnik dadurch die Natur der Lichtquellen erkennt; zweitens, weil das Auge bei Licht verschiedener Spektralbereiche verschieden arbeitet; drittens, weil eine Beleuchtung nur dann richtig ist, wenn Farbe des Lichtes und der Beleuchtungsfläche einander entsprechen.

Als Ersatz für die unscharfe Farbangabe der Spektralbereiche verwendet man die Angabe der Wellenlängen der einzelnen Lichtfarben. Abb. 5 gibt eine Übersicht über den Zusammenhang von Lichtfarben und zugehörigen Wellenlängen.

Schriftumsnachweis

(1) E. Liebenthal, Praktische Photometrie, Braunschweig 1907, S. 102—151. — (2) Lambert, Photometria, Augsburg 1760; Übersetzung: Ostwald, Klassiker, Nr. 31—33, Leipzig 1892. — (3) v. Hefner-Alteneck, ETZ. 5, 20, 1884 und ZS. f. Instrkd. 13, 257, 1893.

II. Beleuchtungstechnische Grundlagen

1. Mittlere Beleuchtungsstärke. Nur in ganz seltenen Fällen gibt es Beleuchtungen mit überall gleichen Beleuchtungsstärken. In den meisten Fällen sind sie in allen Punkten der Fläche verschieden. Solche Beleuchtungen gibt man an, indem man die Gesamtfläche in Teilflächen gleicher, aber frei wählbarer Größe einteilt und jeder Teilfläche den in ihr herrschenden E -Wert zuordnet. Als Flächeneinheit wählt man in kleineren Räumen 1 m^2 , im Freien größere Flächen, z. B. 9 m^2 .

Festsetzung. Als Ersatz für die Gesamtheit aller Beleuchtungswerte führt man die „mittlere Beleuchtungsstärke“ E_m ein. Sie ist als der Mittelwert aus allen Einzel- E -Werten zu gewinnen gemäß

$$E_m = \frac{1}{n} \sum E_n,$$

wobei n die Anzahl der einbezogenen Teilflächen ist.

Die Beleuchtungsstärke wird, soweit nicht ausdrücklich anderes angegeben wird, auf eine Ebene 1 m über dem Boden bezogen und in ihr gemessen.

Zur Beachtung. Die mittlere Beleuchtungsstärke stellt zwar ein mögliches Bewertungsmittel für eine Beleuchtung dar; das Auge nimmt aber nur die Einzelwerte mit allen Unterschieden wahr, keineswegs aber den ausgeglichenen Mittelwert. So grundlegend

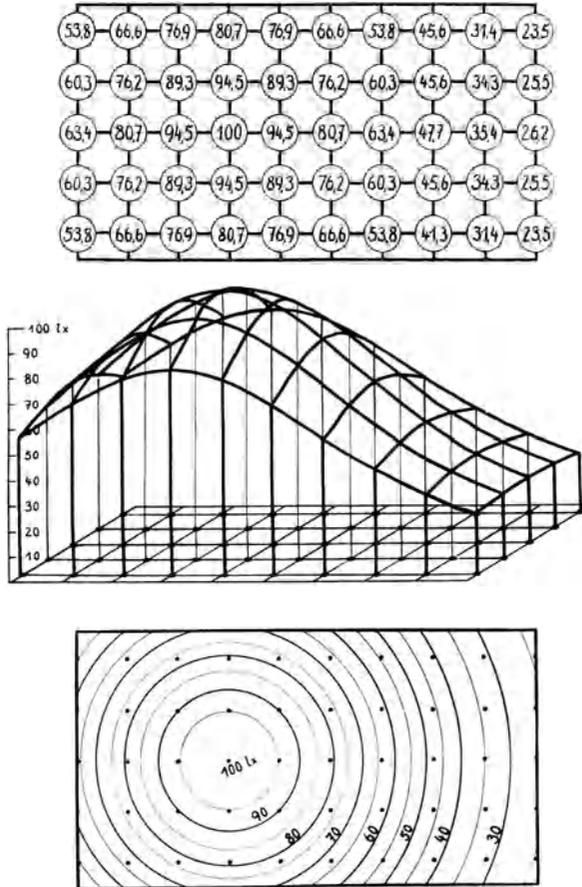


Abb. 6. Darstellungsarten von Beleuchtungsverteilungen

Beleuchtungsmittelwerte zur Beurteilung infolge der durch sie bewirkten Vereinfachung sind, so unzureichend ist eine Bewertung allein auf Grund des Mittelwertes.

Folgerung. Für den Gesamtlichtstrom, der einer Fläche zugeführt ist, ergibt sich gemäß der letzten Gleichung in I, 2 jetzt

$$\Phi_0 = F_0 \cdot E_m. \quad [6]$$

Es kann also auch die mittlere Beleuchtungsstärke aus dem der Fläche zugeführten Gesamtlichtstrom und der Gesamtfläche gewonnen werden.

2. Darstellungen von Beleuchtungsverteilungen. Es gibt drei Wege, eine Beleuchtungsverteilung darzustellen:

1. Die Meßfeldwiedergabe. Man trägt auf der Fläche die gemessenen Beleuchtungswerte an den zugehörigen Punkten als Zahlen auf (Abb. 6, oben).

2. Die isometrische Darstellung. Man trägt über der Fläche an den Stellen, zu denen die Beleuchtungswerte bestimmt sind, die E -Werte gleichmäßig auf und erhält so eine anschauliche räumliche Darstellung als „Beleuchtungsgebirge“ (Abb. 6, Mitte).

3. Das Isoluxen-Feldbild. Man verbindet auf der Fläche die Punkte gleicher Beleuchtungsstärken durch Kurven, sogenannte Isoluxen. Diese Kurven sind auch als die Höhenlinien des Beleuchtungsgebirges aufzufassen (Abb. 6, unten).

Bemerkung. Die mittlere Beleuchtungsstärke erhält aus der räumlichen Darstellung eine anschauliche Bedeutung: es ist die Höhe, die das Beleuchtungsgebirge annehmen würde, wenn seine Unebenheiten völlig ausgeglichen wären.

3. Beleuchtung der Waagrechtgeraden. *Schilderung.* Befindet sich eine Punktlichtquelle, also eine Lichtquelle mit unveränderlicher Lichtstärke, über einer waagerechten Fläche, so ruft sie gemäß der Gesetzmäßigkeit für schräge Beleuchtung auf allen Punkten der Fläche Beleuchtungsstärken hervor, die verschiedene Werte haben. Denn (Abb. 7) für verschiedene Punkte haben Abstand r und Auftreffwinkel α verschiedene Werte. Je größer die Entfernung d des betrachteten Flächenstücks vom Lichtquellenfußpunkt ($d = 0$) ist, um so geringer wird die Beleuchtungsstärke werden, und zwar in sehr stark abnehmender Weise; denn mit wachsender Entfernung d nehmen r und α ab.

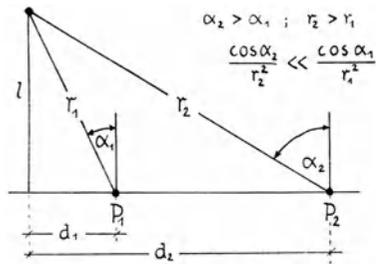


Abb. 7.
Zunahme von Luftlinie und Einfallswinkel bei Zunahme des Abstands

Für die Gesetzmäßigkeit der Beleuchtung auf einer Strecke durch den Lichtquellenfußpunkt ergeben sich verschiedene Formen; sie sind aus dem Grundgesetz $E = \frac{J}{r^2} \cdot \cos \alpha$ gewonnen und aus Aufstellung 1 zu ersehen. Die Formen unterscheiden sich nur durch die verschiedene Verwendung der Größen: Auftreffwinkel α , Luftlinie r , Lichtpunkthöhe l und Waagerechtabstand d . Mit

$$\frac{l}{r} = \cos \alpha, \quad \frac{r}{d} = \sin \alpha, \quad \frac{d}{l} = \operatorname{tg} \alpha, \quad r^2 = l^2 + d^2$$

lassen sie sich schrittweise durcheinander ersetzen. Je nachdem, welche von allen Größen gegeben sind, wird man diese oder jene Form vorziehen. Die sinnvollste und daher wichtigste ist die, die sich durch eine weitere Umformung aus der Form 3 ergibt. Wegen ihrer grundlegenden Bedeutung für die gesamte Beleuchtungstechnik soll sie ganz hergeleitet werden.

Aufstellung 1

	Gegebenes	Gesetz
1	r und α	$E_\alpha = \frac{J}{r^2} \cdot \cos \alpha$
2	r und l	$E_r = \frac{J}{r^3} \cdot l$
3	l und d	$E_d = \frac{J \cdot l}{\sqrt{(l^2 + d^2)^3}}$
4	α und l	$E_\alpha = \frac{J}{l^2} \cdot \cos^3 \alpha$
5	α und d	$E_\alpha = \frac{J}{d^2} \cdot \cos \alpha \cdot \sin^2 \alpha$

Ableitung. Der Ausgangsausdruck $E_\alpha = \frac{J}{r^2} \cdot \cos \alpha$ ist für die praktische Verwendung deshalb ganz unbrauchbar, weil α und r Größen sind, die nie von vornherein gegeben sind. Man muß sie immer erst aus den natürlichen Gegebenheiten l und d ermitteln (Zeichnung oder Rechnung). Man sucht daher diejenige Form, die nur noch l und d in zweckmäßigster Weise enthält.

Mit Hilfe von $\cos \alpha = l/r$ und $r = \sqrt{l^2 + d^2}$ entsteht schrittweise

$$E_\alpha = \frac{J_\alpha}{r^2} \cdot \cos \alpha = \frac{J_\alpha}{r^3} \cdot l = \frac{J_d \cdot l}{\sqrt{l^2 + d^2}^3} = \frac{J_d \cdot l}{(l^2 + d^2)^{3/2}} \equiv E_d.$$

Darin sind E_d und J_d die zum Abstand d gehörenden Werte.

Erweitert man Zähler und Nenner von E_d mit l^3 , so ergibt sich

$$E_d = \frac{J_d \cdot l}{l^3} \cdot \frac{1}{(l^2 + d^2)^{3/2}} = \frac{J_d}{l^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{l^2 + d^2}{l^2}\right)^{3/2}} = \frac{J_d}{l^2} \cdot \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{d}{l}\right)^2\right]^{3/2}} = J_d \cdot \frac{1}{l^2} \cdot f, \quad [7]$$

wenn man zur Vereinfachung einführt

$$f = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{d}{l}\right)^2\right]^{3/2}} \quad [8]$$

Dieser anscheinend denkbar verwickelte Ausdruck vermag die Lösungen aller Waagrechtbeleuchtungsaufgaben außerordentlich zu vereinfachen.

Erörterung. E_a hängt danach von drei Größen ab: von J_a , l und f , wobei f wiederum von l und von d abhängt. f heißt: „beleuchtungstechnische Grundfunktion“. Wichtig ist, daß d nur im Verhältnis d/l vorkommt. Man kann also den Einflußwert f ein für alle Mal zu allen praktisch in Betracht kommenden Werten von d/l bestimmen. Zweckmäßig trägt man diese f -Werte bildlich

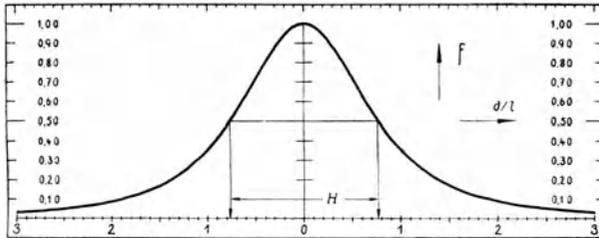


Abb. 8. Grundbeleuchtung der Waagrechtgeraden

in Abhängigkeit von d/l auf (Abb. 8). So ergibt sich eine Kurve, die man als „Grundbeleuchtung der Waagrechtgeraden“ bezeichnet. Denn sie stellt die Beleuchtungsverteilung auf einer Geraden dar, die eintritt, wenn die Lichtpunkthöhe $l = 1$ m beträgt und die Lichtstärke J_a den Wert 1 HK annimmt. Diese Kurve ist das Werkzeug zur Berechnung von Waagrechtbeleuchtungen beliebiger Art. Denn bei ganz beliebiger Lichtstärke J und irgendeiner Lichtpunkthöhe l ermittelt man E_a zu jedem waagrechten Abstand d dadurch, daß man d/l bildet, daraus f mit der Kurve feststellt und $E_a = J_a \cdot \frac{1}{l^2} \cdot f$ berechnet. (Eingehende Verwendung im Abschnitt XV, 6.) Den Vorteil dieses Verfahrens erkennt man, wenn man das gleiche Beispiel mit der Ausgangsformel aus r , α und J berechnet.

4. Die Halbwertsbreite. Da die Grundbeleuchtung der Waagrechtgeraden in reiner oder verdeckterer Form in allen Beleuchtungsanlagen vorkommt, so müssen noch allgemeine Kenn-

zeichen von ihr genannt werden. Man sieht, daß tatsächlich mit wachsendem Abstand d die Beleuchtungsstärke ganz außerordentlich abnimmt. Erreicht d den Wert l , so kommt die Grundfunktion f schon auf den Wert 0,35; und bei $d = 3l$ hat f nur noch den Wert 0,032. Man führt daher als eine dem Beleuchtungsentwurf unentbehrliche Größe die „Halbwertsbreite“ H ein; man versteht darunter die Breite der Gipfelkurve für f , innerhalb derer alle f -Werte noch über 0,50 bleiben. Die Kurve Abb. 8 zeigt, daß man vom Fußpunkt nach rechts und links bis $d/l = 0,75$ gehen darf. Die Halbwertsbreite beträgt danach $H = 2d = 1,5l$, also das Anderthalbfache der Lichtpunkthöhe. Die Wahl des geeigneten Abstandes mehrerer Lichtpunkte, die eine Fläche möglichst gut beleuchten sollen, beruht auf der Verwendung dieser Halbwertsbreite.

5. Die Gleichmäßigkeit. Von der natürlichen Beleuchtung durch das Himmelslicht ist das Auge gewohnt, daß die Beleuchtungsstärke über große Flächen gleichbleibenden Wert hat. Daher stellt man als eine der Grundforderungen für künstliche Beleuchtung die auf, daß auch bei ihr über einer Lichtnutzfläche die Beleuchtungsstärken nicht sehr schwanken sollen. Man führt daher als Maß für die erreichte Gleichheit der E -Werte die „Gleichmäßigkeit“ ein. Gleichmäßigkeit ist festgesetzt als das Verhältnis von geringster zu höchster Beleuchtungsstärke innerhalb der Lichtnutzfläche. Also

$$Glm = \frac{E_{\min}}{E_{\max}} \quad [9]$$

entweder gegeben als 1 : Zahlenwert oder in v. H.

Dieser fast ausschließlich bisher üblichen Festsetzung haftet noch ein Mangel an, wenn durch ihn zweifellos auch das Vorhandensein von Beleuchtungsunterschieden erfaßt wird. Da aber das Auge weniger für absolute Werte von E , wohl aber für Schwankungen in ihr empfindlich ist, so tut man gut, bei einer dienlichen Festsetzung über Gleichmäßigkeit den Abstand mit einzubeziehen, auf dem der Unterschied von E_{\max} und E_{\min} erreicht wird. Deshalb ist als „Ungleichmäßigkeit“ der Ausdruck (1)

$$UG_1 = \frac{1}{A} \cdot \frac{\Delta E}{E_m}, \text{ gemessen in v. H. je Meter,}$$

eingeführt worden, in dem ΔE die Differenz $E_{\max} - E_{\min}$, E_m die mittlere Beleuchtungsstärke und A den geringsten Abstand (in Meter) darstellen innerhalb dessen die Differenz ΔE vorkommt. Die Beleuchtung ist dann gut, wenn die Ungleichmäßigkeit einen möglichst kleinen Wert erreicht. In Abb. 9 sind drei Fälle einander gegenübergestellt. Der erste ist offenbar der beste, der dritte der schlechteste. Dies kommt nur durch den Wert von UG_1 , nicht aber durch den von Glm zum Ausdruck. Für die drei Fälle

der Abbildung ergeben sich der Reihe nach: $Glm = 0,1; 0,1; 0,1$, also gleiche Werte! und $UG = 0,136; 0,5; 1,5$. Es ist aber noch üblich, mit Glm zu arbeiten und zu bewerten.

Allgemein lassen sich Zahlwerte für Glm , die erforderlich oder nicht zulässig sind, nicht angeben. Sie richten sich nach den Ansprüchen und den Anlagen. Werte über 50 v. H. sind ausgezeichnet und selten. Durchschnittswerte liegen zwischen 10 und 30 v. H.; es kommen durchaus Werte von 1 v. H. und weniger vor! Näheres bei den einzelnen Beleuchtungsanlagen (Abb. 130).

Neben dieser Ungleichmäßigkeit wird unter gleichem Namen auch der Kehrwert der Gleichmäßigkeit gebraucht. Also (2)

$$UG_2 = \frac{1}{Glm} = \frac{E_{max}}{E_{min}} \quad [10]$$

Soweit im folgenden „Ungleichmäßigkeit“ verwandt wird, ist es immer UG_2 , falls nichts anderes erwähnt wird.

Die Forderung auf Gleichmäßigkeit geschieht, weil örtliche und zeitliche Helligkeitsschwankungen das Auge ermüden. Zeitliche Schwankungen sind durch örtliche Ungleichmäßigkeiten, mit denen sich die Beleuchtungstechnik zunächst nur beschäftigt, vorhanden für ein Fahrzeug in Bewegung. Man wird dann zu fordern haben, daß die Gleichmäßigkeit um so größer ist, je höher die Geschwindigkeiten werden. In Abänderung von UG_1 wäre zu verwenden.

$$UG_3 = \frac{\Delta E}{E_m \cdot v},$$

worin v die Geschwindigkeit ist. Zahlwertfestlegungen für UG_1 und UG_3 müssen sich erst noch aus Erfahrungen ergeben.

Für jede Beleuchtungsverteilung einer einzigen Punktlichtquelle gibt die f -Kurve ohne weiteres die Gleichmäßigkeit an; denn es ist

$$Glm = \frac{E_{min}}{E_{max}} = \frac{J \cdot \frac{1}{l^2} \cdot f_{a||}}{J \cdot \frac{1}{l^2} \cdot f_0} = f_{a||},$$

da ja $f_0 = 1$ ist.

Die f -Kurve ist also zugleich Glm -Kurve. Hiervon kann man vielfach Gebrauch machen, z. B. bei Straßenbeleuchtungen. So

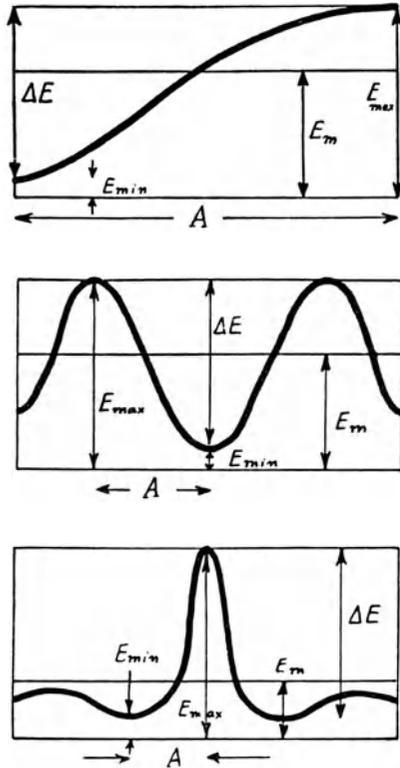


Abb. 9. Ungleichmäßige Beleuchtungen

ergibt sich für die Gleichmäßigkeit, die bei $d = 0,7l$ eintritt: $Glm = f_{d/l=0,7} = 50$ v. H. Die Gleichmäßigkeit einer Waagerechtleuchtung wächst mit wachsender Lichtpunkthöhe, wie daraus ersichtlich, daß E_{\max} dann stärker abfällt als E_{\min} zunimmt.

6. Der beleuchtungstechnische Grundabstand. Bringt man eine Punktlichtquelle über einer Ebene an, so entsteht als Beleuchtungsverteilung, waagrecht gemessen, eine solche von der Form der

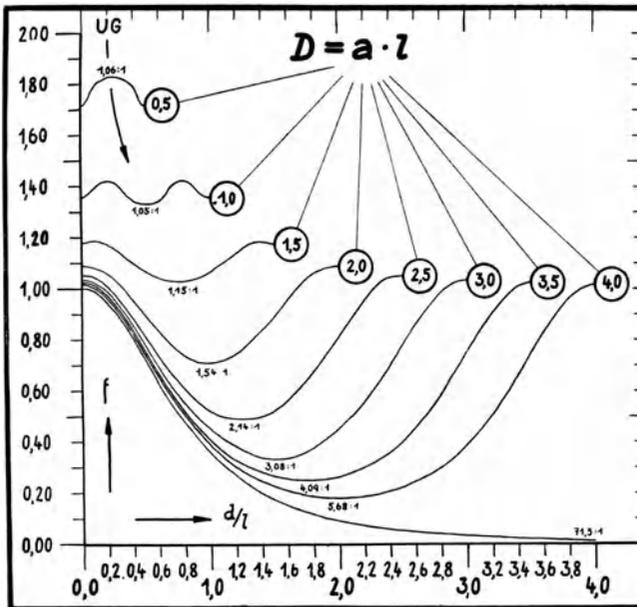


Abb. 10. Ungleichmäßigkeit und Lichtpunktabstand

f -Kurve. Zwei gleiche derartige Lichtquellen werden auf der Verbindenden eine E -Verteilung ergeben, die als Summe aus den einzelnen E -Werten beider Lichtquellen entsteht. Bei Abständen, wie sie für wirkliche Anlagen in Frage kommen, wird in der Mitte zwischen den Lichtquellen der Geringstwert der Summe liegen. Wie Geringstwert und Höchstwert der Summe vom Verhältnis Abstand zu Lichtpunkthöhe abhängen, das zeigt Abb. 10. Sie zeigt, wie die E -Verteilung sich ändert, wenn das Verhältnis Abstand D zu Höhe l gemäß $D = a \cdot l$ verringert wird. Durch den Abstand D wird daher — auch bei beliebigen Lichtverteilungen — sowohl die mittlere Beleuchtungsstärke, als auch die Ungleichmäßigkeit UG verändert.

In Abb. 10 ist bei wachsendem Abstand das Sinken des Mittelwerts unmittelbar deutlich; die UG -Werte sind den Kurven beigegeben.

Die Bestforderung wäre: $Glm = 100$ v. H. Daß dieser Zustand bei der Punktlichtquelle unerreichbar ist, zeigen die Summenkurven, die immer Wellenlinien bleiben. Als nächstbeste Forderung könnte man stellen, daß in der Mitte zwischen beiden Lichtquellen ein gleicher E -Wert herrschen soll, wie unter ihnen. Die Berechnung des dazu erforderlichen Abstands ist äußerst umständlich. Man stellt daher als nächstbeste Forderung die, daß in der Mitte ein gleicher E -Wert als Summe herrschen soll, wie unter den Lichtquellen, wenn man dort den von der Nachbarlichtquelle rührenden Teil vernachlässigt. Dies gewährleistet ein Abstand D von der Größe der Halbwertsbreite H ; denn in der Mitte herrscht dann zweimal 0,5 von dem E -Wert unter jeder der Lichtquellen. In dieser Tatsache liegt die Bedeutung der Halbwertsbreite.

Als „beleuchtungstechnischen Grundabstand“ setzt man daher die Halbwertsbreite der beleuchtungstechnischen Grundfunktion fest: $D_0 = 1,5 \cdot l$. Mit diesem arbeitet der Beleuchtungsentwurf, soweit die Erfahrung nicht andere (meist größere) Abstände als ausreichend erscheinen läßt. Die Gleichmäßigkeit, bezogen auf Lichtquellenfußpunkt und Mitte ist unter Berücksichtigung des Betrages der Nachbarlichtquelle unter jeder Lichtquelle bei $D_0 = 1,5 l$

$$Gl_m = \frac{E_{\min}}{E_{\max}} = \frac{0,5 + 0,5}{1,0 + 0,17} = 85,5 \text{ v. H.,}$$

also unter 1.

Bei sehr geringen Abständen entsteht sogar in der Mitte zwischen den Lichtquellen ein Höchstwert (Abb. 10 bei $D = 0,5 l$). Darin drückt sich die Tatsache aus, daß bei sehr großen Lichtpunkthöhen, verglichen mit dem Abstand, zwei benachbarte Lichtquellen gleichwertig einer einzigen werden, die in ihrer Mitte hängt. Die Ungleichmäßigkeiten bei kleinen Abständen sind verschwindend gegenüber denen bei großen Abständen.

K. Norden hat den allgemeinen Nachweis geliefert, daß (selbst bei beliebigen Lichtquellen) die Gleichmäßigkeit für verhältnismäßig sehr geringe Abstände ständigen Schwankungen unterworfen ist, wenn der Abstand abnimmt, also die Anzahl auf bestimmter Strecke zunimmt (3).

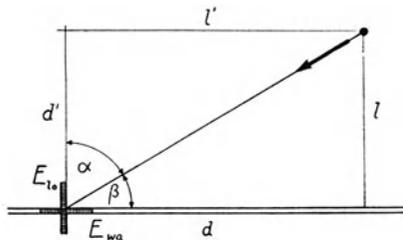


Abb. 11. Waagrecht- und Lotrechtbeleuchtung

7. Die Lotrechtbeleuchtung. Die praktischen Bedürfnisse machen es häufig erforderlich, daß man längs einer Waagrechtgeraden Beleuchtungsstärken kennt, die in lotrechten Ebenen Gültigkeit haben. Da die Flächen

von Verkehrsfahrzeugen, auf deren Erkennbarkeit es ankommt, meist lotrecht zur Straßenfläche liegen, so können die Werte einer Lotrechtbeleuchtung unter Umständen größere Bedeutung haben, als die der Waagerechten. Als Auftreffwinkel hat (Abb. 11) der Winkel β zu gelten. Daher lautet das Gesetz für lotrechte Beleuchtung

$$E_{10} = \frac{J}{r_2} \cdot \cos \beta.$$

Da $\cos \beta = \cos (90 - \alpha) = \sin \alpha$ ist, so entsteht

$$E_{10} = \frac{J}{r^2} \cdot \sin \alpha, \tag{11}$$

also ein Gesetz, das dem für waagerechte Beleuchtung eng verwandt ist. Die Beziehung beider Gesetze zueinander läßt sich ausdrücken durch

$$E_{10} : E_{wa} = \sin \alpha : \cos \alpha = \tan \alpha = d : l.$$

Abb. 11 zeigt, daß die Größe, die für waagerechte Beleuchtung die Lichtpunkthöhe ist, für lotrechte der Abstand ist, und umgekehrt. Daher gilt, indem man nur l und d vertauscht ($d = l', l = d'$):

$$E_{10} = \frac{J}{l'^2} \cdot \frac{1}{[1 + (d'/l')^2]^{3/2}} = \frac{J}{d^2} \cdot \frac{1}{[1 + (l/d)^2]^{3/2}}, \tag{12}$$

also ein Ausdruck, den man auch erhält, wenn man E_{wa} mit d/l erweitert gemäß $E_{10} = E_{wa} \cdot \frac{d}{l}$.

Daraus folgt: Hat man z. B. E_{wa} als Kurve, so gewinnt man E_{10} am einfachsten daraus, indem man Punkt für Punkt den Höchstwert E_{wa} mit dem zugehörigen d/l multipliziert. Dieser Zusammenhang von E_{wa} und E_{10} ist unabhängig von der Art der Lichtverteilung. Die Gesetzmäßigkeit für E_{10} zeigt: Je kleiner l , um so günstiger ist es für alle Werte von E_{10} .

In Abb. 12 sind E_{wa} und E_{10} bildlich zusammen (dick ausgezogene Kurven!) aufgetragen, und zwar für

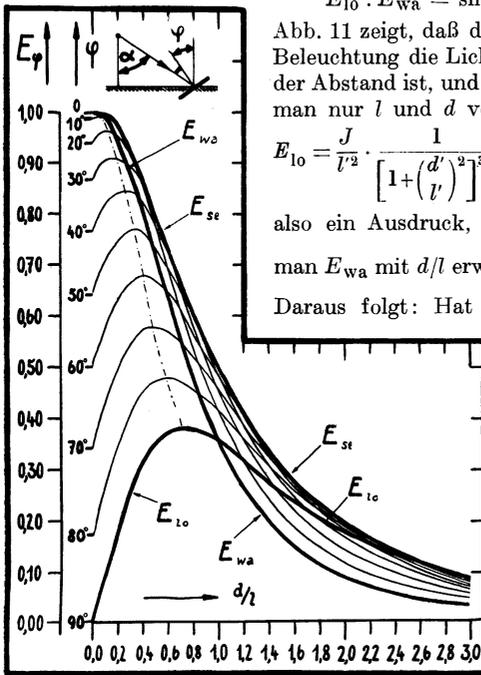


Abb. 12. Verteilungen der Waagrecht-, Lotrecht-, Senkrecht- und Schrägbeleuchtungen

den Sonderfall $J = 1$ HK und $l = 1$ m. Beide Kurven sind also die „ f -Kurven“ für waagerechte und lotrechte Beleuchtung. Praktisch wird jedoch die f_{10} nur selten zu Rechnungen gebraucht. Um so wichtiger ist die Kenntnis des Verlaufs von f_{10} für die Beurteilung von Straßenbeleuchtungen.

Bemerkenswert ist: Wo die eine Kurve ihren Höchstwert hat, besitzt die andere Kurve die Stelle größter Steigung (E_{10} ist der Differentialquotient von E_{wa} !). Das ist einmal bei $d/l = 0$ der Fall. Das andere Mal dort, wo E_{10} den Höchstwert erreicht; dieser liegt bei $d = 0,7 \cdot l$.

8. Schrägbeleuchtungsverteilungen. Als Ergänzung der Waagrecht- und Lotrechtbeleuchtungen müssen auch die Beleuchtungsverteilungen bekannt sein, die zwischen ihnen liegen, also zu Meßebenen gehören, die irgendeine schräge Stellung zur Waagerechten haben. Bezeichnet man mit φ den Winkel, den das Lot auf der Meßebene mit dem Lot auf der Waagerechten bildet und mit α wie üblich den Einfallswinkel auf der Waagerechten, so ist $\alpha - \varphi$ der Einfallswinkel für die schräge Meßrichtung; also gilt:

$$E_{\varphi} = \frac{J}{r^2} \cdot \cos(\alpha - \varphi) = E_{wa} \cdot \cos \varphi + E_{10} \cdot \sin \varphi.$$

Die letzte Form, die sich durch naheliegende Umformung ergibt, gestattet also die Berechnung der gesuchten Verteilung aus den beiden vorhandenen. Abb. 12 zeigt die Verteilungskurven, die zu verschiedenen Winkeln gehören; sie bilden einen vollständigen Übergang von E_{wa} auf E_{10} . Außer diesen beiden Grenzfällen, die bei $\varphi = 0^\circ$ und bei $\varphi = 90^\circ$ eintreten, gibt es noch den, bei dem immer $\alpha = \varphi$ ist, die Meßfläche also immer senkrecht zur Einfallrichtung liegt. Diese Senkrechtbeleuchtung stellt die günstigsten Fälle für alle Abstände dar. Daher bildet die Kurve der Senkrechtbeleuchtung E_{se} die Einhüllende aller anderen Beleuchtungsverteilungen. Es gilt

$$E_{se} = \frac{J}{\sqrt{d^2 + l^2}} = \sqrt{E_{wa}^2 + E_{10}^2}. \quad [13]$$

Bei $d = l$ nimmt E_{se} den Wert 0,5 an; im Abstand der Lichtpunkthöhe kann bei einer Punktlichtquelle daher nur die Hälfte des Wertes im Lichtquellenfußpunkt durch Drehung der Beleuchtungsebene in die günstigste Lage erzielt werden.

Damit sind die rein beleuchtungsmäßigen Voraussetzungen für die Bearbeitung von Beleuchtungen zusammengestellt.

Schrifttumsnachweis

- (1) E. Meyer, Li. La. 25, 369, 1936. — (2) V. D. E., ETZ: S. 382, 1910. — (3) K. Norden, Li. La. 21, 233, 1932. — (Li. La. = „Licht und Lampe“).

III. Schattentechnische Grundlagen

1. Schatten. Wo Licht ist, gibt es auch Schatten — das gilt auch für Beleuchtungsanlagen. Die Art des Auftretens von Schatten zu untersuchen, ist Sache der Schattentechnik. Untersuchungen über Schatten erweisen sich als schwieriger als die über Beleuchtung. Es sind nämlich immer zwei Feststellungen zu machen: erstens, sind Schatten überhaupt da?, zweitens, wie tief sind diese Schatten? Man hat also eine Größe zu verfolgen, die von Größe und Lage des Schattenspenders, kurz „Schatters“ genannt, abhängen, aber ebenso von Lage, Ausdehnung und Stärke der Lichtquelle. Auf der anderen Seite ist festzustellen, unter welchen Bedingungen Schatten nach-

teilig, einflußlos oder vorteilhaft sind. Körperliches Erkennen wird in vielen Fällen erst durch Schatten hervorgerufen. Schatten dienen also dann zur Erzeugung von künstlicher Hellabhebung. Andererseits kann durch künstliche Hellabhebung infolge von Schatten natürliche, zur Wahrnehmung nötigen Hellabhebungen so gestört werden, daß eine vorhandene Erkennbarkeit gestört wird. Daher handelt es sich, besonders in Hinsicht auf Arbeits- und Verkehrsbeleuchtungen um grundlegende Feststellungen, die zur Zeit noch nicht in dem Maße Berücksichtigung finden, wie es erforderlich wäre. Die Schattentechnik ist allerdings auch als jüngster Zweig der Beleuchtungstechnik erst in der Entwicklung begriffen (1).

So sind z. B. Unregelmäßigkeiten in Geweben bei schattenlosem Licht schwerer erkennbar als bei schattenreichem. Das Aussortieren von Stücken verschiedener Form und Größe ist leichter bei kräftigen Schatten.

2. Geometrie der Schatten. *Übersicht.* Die Schatten bilden sich in ganz verschiedener Art aus, je nachdem, ob eine oder zwei Lichtquellen, ein oder zwei Schatter, ob punktförmige oder ausgedehnte Lichtquellen vorliegen. In Abb. 13 sind alle möglichen Fälle, soweit sie sich auf zwei Lichtquellen und zwei Schatter beschränken, dargestellt. Es ergeben sich 8 Fälle.

1. Ein Schatter, eine punktförmige Lichtquelle.
2. Ein Schatter, eine ausgedehnte Lichtquelle.
3. Ein Schatter, zwei punktförmige Lichtquellen.
4. Ein Schatter, zwei ausgedehnte Lichtquellen.
5. Zwei Schatter, eine punktförmige Lichtquelle.
6. Zwei Schatter, eine ausgedehnte Lichtquelle.
7. Zwei Schatter, zwei punktförmige Lichtquellen.
8. Zwei Schatter, zwei ausgedehnte Lichtquellen.

Bezeichnungen. Soweit nur eine Lichtquelle da ist, besteht der Schatten aus einem Zusammenhang; man spricht von *Einfachschatten*. Sind zwei Lichtquellen da, so können sich die an sich unabhängigen Schatten überlagern; man spricht von *Doppelschatten*. Entstehen die letzten durch einen Schatter, so heißen sie „*erster Art*“, sonst „*zweiter Art*“. Soweit die Lichtquellen ausgedehnt sind, treten neben den *Kernschatten* auch *Halbschatten* auf; die Kennzeichen der letzten sind, daß sie in der Schattenfläche veränderliche *Schattentiefe* aufweisen, während bei *Kernschatten* die Tiefe der Schatten überall gleichbleibt.

Berechnung. Lage und Ausdehnung von Schatten aller dieser Arten sind berechenbar; jedoch ergeben sich in den verwickelteren Fällen so umständliche Ausdrücke, daß die Art der Schatten leichter durch eine Skizze

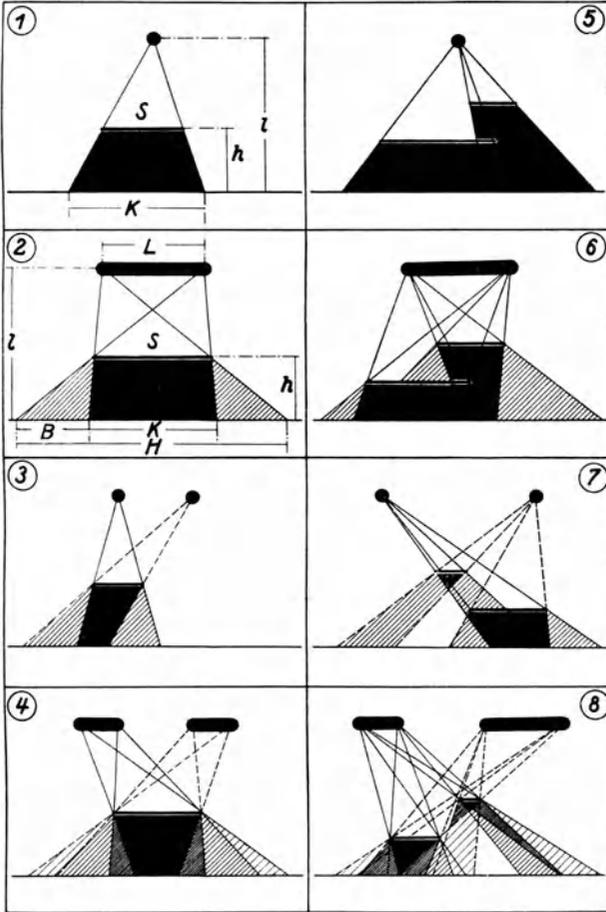


Abb. 13. Möglichkeiten von Schattenbildung

aufgeklärt wird. Es seien aber die folgenden häufigeren Fälle mitgeteilt: Für den Fall 1 folgt mit Hilfe des Strahlengesetzes für die Ausdehnung K des Kernschattens (1):

$$K = S \cdot \frac{l}{l-h} = S \left(1 + \frac{1}{l/h-1} \right).$$

Sie ist also durch die Ausdehnung S des Schattens bedingt, sowie durch das Verhältnis von Lichtpunkt- und Schatterhöhe. Bei kleinen Schatterhöhen

wirkt sich fast nur die Schattergröße aus, bei großen jedoch fast nur das Höhenverhältnis. Insonderheit wird also bei $h = 0 \div K = S$, bei $h = l/2 \div K = 2S$, bei $h = l \div K = \infty$.

Für den Fall 2 folgt aus $(L - K) : (S - K) = l : h$

$$K = S \left(1 + \frac{1}{l/h - 1} \right) - L \cdot \frac{1}{l/h - 1}.$$

Der Kernschatten ist also um einen Betrag gegenüber dem bei punktförmiger Lichtquelle verringert, der von der Ausdehnung der Lichtquelle und dem Höhenverhältnis abhängt. Der Ausdruck nimmt bei $h = 0$, $l/2$ und l der Reihe nach die Werte an: $K = S$, $2S - L$ und $(S - L) \cdot \infty$. Der Kernschatten kommt gerade nicht mehr zur Entstehung, wenn $S : L = h : l$. Die Breite des Halbschattens ergibt sich als Summe aus dem Stück B und eines Kernschattens für punktförmige Lichtquelle. Für B gilt:

$$B = L \cdot \frac{1}{l/h - 1},$$

also für den Halbschatten H :

$$H = S \left(1 + \frac{1}{l/h - 1} \right) + L \frac{1}{l/h - 1}.$$

Um soviel also, wie der Kernschatten durch die Ausdehnung der Lichtquelle abnimmt, ist der Halbschatten vergrößert gegenüber dem Schatten einer punktförmigen Lichtquelle. Für die Halbschattenringbreite R ergibt sich also

$$R = \frac{2L}{l/h - 1}.$$

Sie ist also nicht von der Schattergröße abhängig, sondern nur von der Lichtquellenausdehnung und dem Höhenverhältnis.

3. Schattigkeit. Entsprechend den verschiedenen Stärken einer Beleuchtung weisen auch die Schatten verschiedene Tiefen auf. Kommt allerdings das Licht ausschließlich unmittelbar nur von einem einzigen Lichtpunkt, so sind die Schattentiefen überall gleich, denn es herrscht im Schatten immer die Beleuchtungsstärke $E = 0$ lx. In den meisten Fällen erhalten jedoch die beschatteten Stellen noch Licht von anderswoher als der abgeschatteten Lichtquelle. So bei Tageslicht vom Himmelsgewölbe, auf Straßen von benachbarten Lichtquellen und in Räumen überdies von Wänden. Der Schatten wird um so tiefer sein, je größer der abgeschattete Beleuchtungsanteil an der ursprünglichen Gesamtbeleuchtung ist.

Man bezeichnet als Schattenhelle das Verhältnis von Gebliebenem zu Gesamtem, also (2)

$$SH = \frac{E_{\text{gebl}}}{E_{\text{ges}}}. \quad [14]$$

Häufiger verwendet man dagegen den Ausdruck, der sich mit der Schattenhelle zu 1 ergänzt, genannt Schattentiefe oder meist

„Schattigkeit S “, also das Verhältnis von Abgeschattetem zu Gesamtem, also (1)

$$S = \frac{E_{\text{abg}}}{E_{\text{ges}}} \quad \text{mit} \quad S + SH = 1. \quad [15]$$

Da bei der Schattigkeitsberechnung allerlei Möglichkeiten bestehen, sollen sie hier durch ein Beispiel von drei Lichtquellen, die sich in einem hellen Raum befinden, gezeigt werden.

Die Gesamtbeleuchtung E_0 bestehe aus den Teilbeleuchtungen E_1, E_2, E_3 dreier Lichtquellen. Diese Teilbeleuchtungen mögen nun wieder bestehen aus je einem gerichteten und einem zerstreuten Anteil; also $E_n = E_{g,n} + E_{z,n}$. Durch Abschattung gehen dann jeweils der Gesamtbeleuchtung verloren: $E_{g,1}$ oder $E_{g,2}$ oder $E_{g,3}$; oder auch $E_{g,1} + E_{g,2}$ oder $E_{g,2} + E_{g,3}$ oder $E_{g,3} + E_{g,1}$ oder auch $E_{g,1} + E_{g,2} + E_{g,3}$. Wird, wie im letzten Falle, alle gerichtete Beleuchtung abgeschattet, so liegt eine „Gesamtschattigkeit“ vor; in den ersten drei Fällen sind es „Einzelteil-schattigkeiten“, in den zweiten drei Fällen „Gruppenteilschattigkeiten“, in allen sechs Fällen sind es Teilschattigkeiten. Für diese Teilschattigkeiten gilt:

$$\begin{aligned} S_1 &= E_{g,1} : E_0, & S_2 &= E_{g,2} : E_0, & S_3 &= E_{g,3} : E_0. \\ S_{1,2} &= (E_{g,1} + E_{g,2}) : E_0; & S_{2,3} &= (E_{g,2} + E_{g,3}) : E_0; \\ S_{3,1} &= (E_{g,3} + E_{g,1}) : E_0. \end{aligned}$$

Für die Gesamtschattigkeit ebenso

$$S_0 = \frac{E_{g,1} + E_{g,2} + E_{g,3}}{E_0} = S_1 + S_2 + S_3 = \frac{S_{1,2} + S_{2,3} + S_{3,1}}{2}.$$

Da man die abgeschatteten Beleuchtungsstärken nicht unmittelbar messen kann, sondern nur die verbleibenden, so ist eine Umformung notwendig, die sich den Messungen anpaßt. Bezeichnet man mit $E_{\text{I, II}}$ z. B. den bleibenden Beleuchtungsteil, wenn Lichtquelle 1 und 2 abgeschattet sind, so gilt für diese (als Beleuchtungsstärke im Schatten unmittelbar meßbare) Größe:

$$E_{\text{I, II}} = E_0 - (E_{g,1} + E_{g,2}).$$

Da auch E_0 meßbar ist, so wird man unter Verwertung der Messungen ansetzen: $S_{1,2} = (E_0 - E_{\text{I, II}}) : E_0$. So ergibt sich für S_0 :

$$\begin{aligned} S_0 &= S_1 + S_2 + S_3 = \frac{E_0 - E_{\text{I}}}{E_0} + \frac{E_0 - E_{\text{II}}}{E_0} + \frac{E_0 - E_{\text{III}}}{E_0} \\ &= \frac{n \cdot E_0 - \Sigma E_N}{E_0} = n - \frac{\Sigma E_N}{E_0}. \end{aligned}$$

Das ist die Nordensche Schattigkeitsformel, die nur meßbare Größen enthält. Sie ist übrigens auch zur Berechnung jeder Teilschattigkeit geeignet. Sie stellt die Gesamtschattigkeit als die

Anzahl der zur Abschattung gelangten Lichtquellen vermindert um die auf die Gesamtbeleuchtung bezogene Summe der jeweils gebliebenen Teilbeleuchtung dar. Die Gesamtschattenhelle $SH_0 = 1 - S_0$ kann schließlich als Maß für die vorhandene „Zerstreuung“ Z des Lichtes gelten (1).

4. Festsetzungen über Schattigkeiten. *Schattigkeitswerte.* Bisher fehlen ausgedehnte Erfahrungen darüber, welche Schattigkeitswerte für verschiedene Arbeitsarten und Verkehrsverhältnisse eingehalten werden müssen; deshalb sind zur Zeit nur zwei Grenzen gesetzt; die größte Teilschattigkeit soll den Betrag 0,8 nicht überschreiten, damit noch eine Erkennbarkeit selbst in dem Teilschatten vorhanden ist. Die kleinste Teilschattigkeit soll aber den Betrag 0,2 nicht unterschreiten, damit mit Hilfe des noch verbleibenden gerichteten Lichtanteils die Erkennbarkeit durch Schatten noch gewährleistet ist. Beide Angaben gelten für die Stellen ungünstigster Schattigkeiten. Diese Forderungen ziehen wichtige Folgerungen nach sich (3).

Bei den Beleuchtungsarten für Arbeitsplätze und Verkehrsanlagen kommen leicht stärkste Teilschattigkeiten von 0,8 an den hierfür ungünstigsten Stellen vor. Da ein Doppelschatten eine größere Tiefe hat als ein Einfachschatten, der an seiner Entstehung beteiligt ist, so sind Doppelschatten möglichst zu vermeiden und nur dann zulässig, wenn die Schattigkeit der Teilschatten wesentlich kleiner als 0,8 sind, so daß der Doppelschatten ein $S < 0,8$ besitzt.

Die Ausschaltung von Doppelschatten kann einerseits dadurch geschehen, daß die Arbeitsplätze ausschließlich von Licht getroffen werden, das durchweg eine einheitliche Richtung hat — so wie wir es z. B. beim Tageslicht in Räumen gewohnt sind. Bei Einhaltung nur einer Lichteinfallrichtung ist die Möglichkeit der Entstehung von Doppelschatten gar nicht vorhanden. Diese Möglichkeit ist aber bei künstlichem Licht in der üblichen Anordnungsart selten vorhanden, das meist infolge der vielen Lichtquellen gerade dadurch gekennzeichnet ist, daß alle möglichen Lichtrichtungen gleichzeitig vorhanden sind. Trotz dieser Schwierigkeit ist hier die Beachtung bestimmter Regeln förderlich, die zunächst nur auf der Geometrie der Schatten beruhen:

Regeln. I. Bei zwei Lichtquellen und einem Schatter: Von keinem Punkte der Arbeitsfläche sollen in einem von dort gebildeten Sichtkegel, der den Schatter umfaßt, mehr als eine Lichtquelle vorhanden sein (Abb. 14, 1).

II. Bei zwei Schattern und zwei Lichtquellen: Von keinem Punkt der beschatteten Arbeitsfläche aus darf in den beiden Sichtkegeln zu den Schattern hin zugleich je eine Lichtquelle liegen, sondern nur in einem einzigen (Abb. 14, 2). Das ist in den eingezeichneten Fällen zwar der Fall, aber gilt nicht für Zwischengebiete der Arbeitsfläche. Die Schatter sind aber besonders groß gewählt (4).

Erst im Zusammenhang mit den Einsichten über die in jeweiligen Lagen auftretenden Schattentiefen können aber daraus Richtlinien über Lichtquellenanordnungen aus Schattigkeiten gezogen werden.

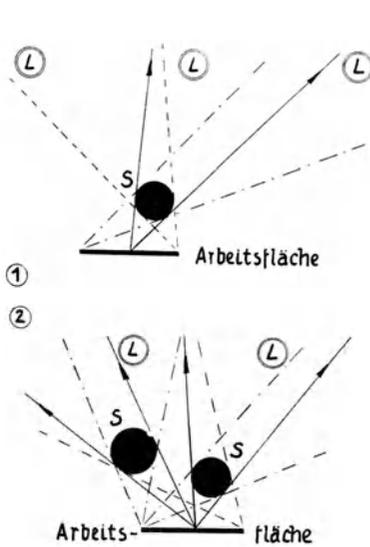


Abb. 14. Doppelschatten auf Arbeitsflächen

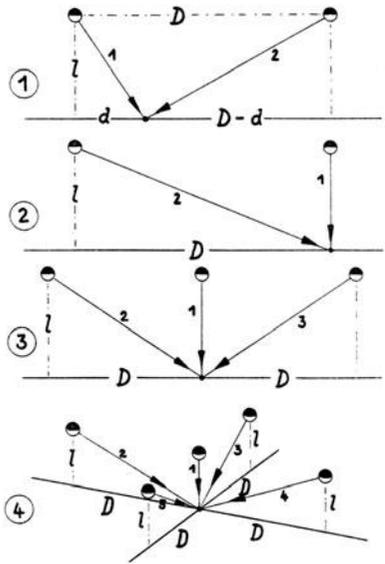


Abb. 15. Anordnungen abschattbarer Lichtquellen

5. Streckenteilschattigkeit. Befinden sich zwei Lichtquellen bei gleicher Lichtpunkthöhe l im Abstände D , so tragen sie beide zu den Beleuchtungsstärken bei, die zwischen beiden entstehen (Abb. 15, 1). Werden die Punkte der Verbindungsstrecke der Reihe nach gegen eine der Lichtquellen abgeblendet, so entsteht jederorts eine Restbeleuchtung, die berechenbar ist, sofern man von irgendwelchem Rückwurf durch Wände absieht: Die Gesamtheit der daraus berechenbaren Teilschattigkeiten bilden die Kurve der Streckenteilschattigkeit. Um ein allgemein gültiges Ergebnis zu erhalten, setzt man die Punktlichtquelle voraus; (offensichtlich sind die Schattigkeitenkurven für beide Lichtquellen die gleichen, nur in verschiedener Richtung; also braucht nur die eine berechnet zu werden).

Die Lichtquelle 1 werde abgeschattet. Dann ist die Schattigkeit $S = E_1 : (E_1 + E_2)$. Nach dem Gesetz der Beleuchtung der Waagerechgeraden ist einzusetzen $E = J \cdot f : l^2$. Das gibt, wenn man berücksichtigt,

daß in f für die Lichtquelle 1 das Abstandsverhältnis $d:l$, für die Lichtquelle 2 das Verhältnis $(D-d):l$ zu verwenden ist:

$$S_1 = \frac{J_{d|l} \cdot f_{d|l}}{J_{a|l} \cdot f_{a|l} + \frac{l}{l^2} \frac{J_{D-d} \cdot f_{D-d}}{l}} = \frac{1}{1 + \frac{l}{J_{d|l} \cdot f_{d|l}}} \equiv \frac{1}{1 + \frac{l}{f_{d|l}}}$$

Die hieraus berechneten Werte sind in Abb. 16 dargestellt worden. Man sieht aus der Gesetzmäßigkeit zunächst, daß die Schattigkeitswerte unabhängig vom Reinwert der Lichtpunkthöhe sind und nur durch das Verhältnis des Punktabstandes zur Lichtpunkthöhe sowie durch den Lichtquellenabstand bedingt sind. Die Schattigkeit weist um so höhere Unterschiede auf, je größer der Lichtquellenabstand ist. Erst bei Abständen, die kleiner sind als $D = 1,2 l$, werden die festgelegten Grenzwerte

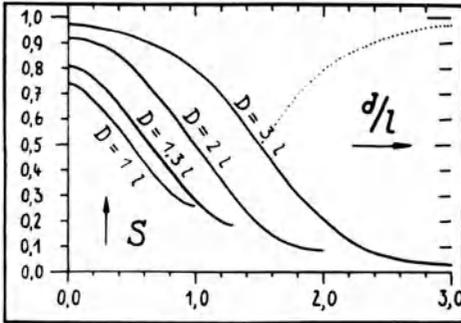


Abb. 16. Streckenteilschattigkeitskurven

($0,8 > S > 0,2$) nicht mehr über- oder unterschritten. Da es das Naheliegende ist, daß jeweils nur die nächste Lichtquelle eine Abschattung erfährt und man dann überall nur die ungünstigeren Schattigkeitswerte längs der Strecke erfährt (nach denen bewertet werden soll), so faßt man zweckmäßig einen Streckenteilschattigkeitsverlauf ins Auge, wie er (Abb. 16) (für $D = 3 l$) durch die gestrichelte Kurve im Zusammenhang mit dem

entsprechenden ausgezogenen oberen Kurvenstück gegeben wird. Der schattenmäßig beste Punkt mit dem Geringstwert von S liegt also in der Mitte zwischen beiden Lichtquellen, der schlechteste unter einer Lichtquelle. Zu Bewertungen ist also nur dieser letzte heranzuziehen. So besagt die Kurve, daß in dem behandelten Falle von nur zwei Lichtquellen (der nächst einer einzigen Lichtquelle, die nirgends schattenmäßig ausreicht, den schlechtesten Fall darstellt, der möglich ist) ein Abstand vom 1,2fachen der Lichtpunkthöhe nicht überschritten werden darf (2).

6. Kritische Schattigkeitsgrenzwerte. Die kritischen Stellen für Schattigkeiten liegen unter den Lichtquellen. Man wird also untersuchen, wie sich S unter einer Lichtquelle verhält, wenn Nachbarlichtquellen vorhanden sind, falls die Abstände der Nachbarlichtquellen verändert werden. Man hat dann immer zwei Schattigkeiten zu unterscheiden, S_{\max} und S_{\min} , je nachdem, ob die Lichtquelle selbst oder eine benachbarte abgeschattet wird. Die Berech-

nung der S -Werte wird besonders einfach, weil für die Lichtquelle, unter der S gelten soll, immer $d/l = 0$ gilt, also $f = 1$. So ergeben sich für die Anordnungen 2, 3 und 4 auf Abb. 15 der Reihe nach folgende Werte; dabei sind die Lichtstärken als für alle Richtungen gleich angenommen und alle Nachbarlichtquellen gleichwertig, d. h. gleich hoch und gleich weit:

Aufstellung 2

Anzahl der Nachbarlichtquellen	1 (Fall 2)	2 (Fall 3)	3 (Fall 4)
S_{\max}	$\frac{1}{1 + f_{D/l}}$	$\frac{1}{1 + 2 f_{D/l}}$	$\frac{1}{1 + 4 f_{D/l}}$
S_{\min}	$\frac{1}{\frac{1}{f_{D/l}} + 1}$	$\frac{1}{\frac{1}{f_{D/l}} + 2}$	$\frac{1}{\frac{1}{f_{D/l}} + 4}$

Abb. 17 zeigt für die drei Fälle den Verlauf der kritischen Grenzschattigkeiten. Im Falle 2 darf der Abstand der Nachbarn nicht größer als das 1,2fache, im Falle 3 als das 1,7fache und im Falle 4 als das 2,3fache der Lichtpunkthöhe sein, wenn die obere Grenze der Schattigkeit nicht überschritten werden soll. Die untere Grenze, die allerdings nicht so entscheidend sein dürfte, wird aber schon unterschritten im Falle 2 bei dem 1,2fachen, im Falle 3 beim 1fachen und im Falle 4 beim 0fachen der Lichtpunkthöhe.

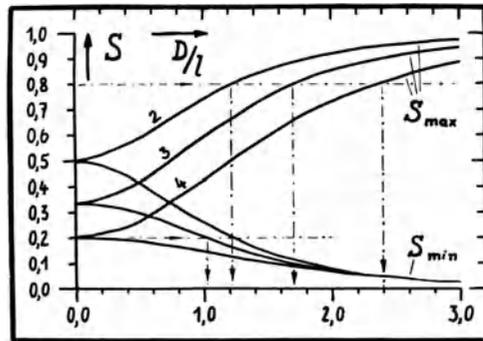


Abb. 17. Kritische Grenzschattigkeitswerte

Wichtig ist hieran, daß man in praktischen Fällen, die denen von Fall 3 (Straße) und Fall 4 (Raum) am nächsten kommen, den beleuchtungstechnischen Grundabstand $D_0 = 1,5 l$ einhalten darf, ohne die obere Schattigkeitsgrenze zu überschreiten (2).

7. Mittlere Schattigkeit. Während die bisher geschilderten Schattigkeiten solche sind, die an bestimmten Stellen gelten, hat es sich als dienlich erwiesen, auch Mittelwerte von Schattigkeiten

zu verwenden. Die mittlere Schattigkeit erweist sich als förderlich für den Beleuchtungsentwurf.

I. Mittlere Schattigkeit nach Norden (1). Als solche gilt das arithmetische Mittel der Einzelschattigkeiten aller einbezogenen gleichwertigen Stellen; also

$$S'_m = \frac{1}{n} \sum S_n = \frac{1}{n} \left(\frac{E_{g,1}}{E_1} + \frac{E_{g,2}}{E_2} + \dots + \frac{E_{g,n}}{E_n} \right).$$

Darin sollen die S_n Gesamtschattigkeiten sein.

II. Mittlere Schattigkeit nach Ondracek (5). Sie ist festgelegt als das Verhältnis von gerichtetem zu gesamtem Lichtstrom, der die Beleuchtungsfläche trifft. Dies Verhältnis ist den entsprechenden gerichteten und gesamten mittleren Beleuchtungsstärken gleich; also

$$S''_m = \frac{\Phi_{\text{ger}}}{\Phi_{\text{ges}}} = \frac{E_{m,\text{ger}}}{E_m} = \frac{\frac{1}{n} (E_{g,1} + E_{g,2} + \dots + E_{g,n})}{\frac{1}{n} (E_1 + E_2 + \dots + E_n)}.$$

Beide Ausdrücke sind nicht dasselbe; vielmehr werden sie nur dann einander gleich, wenn die mittleren unabgeschatteten Beleuchtungsstärken aller Stellen der Fläche gleich groß ($= E_0$) sind, wenn also vollkommene Gleichmäßigkeit herrscht. Beide Ausdrücke gehen dann über in

$$S'''_m = \frac{1}{n \cdot E_0} \cdot \sum E_{g,n}.$$

Schriftumsnachweis

- (1) K. Norden, Grundlagen der Schattentechnik. Berlin 1933. —
 (2) E. Meyer, Li. La. **26**, 162, 1937. — (3) DIN-Blatt 5035. —
 (4) K. Norden, Doppelschatten. Berlin 1935. — (5) J. Ondracek, Das Licht **7**, 97, 1937.

IV. Lichttechnische Grundlagen

1. Die Lichtverteilungen. Bisher ist mehrfach angenommen, daß die Lichtquelle nach allen Seiten mit der gleichen Stärke strahlt. Dies ist naturgemäß bei den technischen Lichtquellen keineswegs der Fall. Nach allen Seiten weist gleiche Lichtstärke nur die „Punktlichtquelle“ auf. Schon allein durch den Sockel und die Fassung besitzt jede Lampe einen Bereich mit der Strahlung Null. Aber auch

durch die Form des Leuchtkörpers oder durch irgendeine Lampenbekleidung wird verursacht, daß in verschiedene räumliche Richtungen die Lichtquelle verschieden stark strahlt.

Die Verteilung der Lichtstärken, „Lichtverteilungskörper“ genannt, ist nur schwer zur Darstellung zu bringen. Soweit die Lichtquellen Spiegelbildachsen besitzen, verwendet man daher die ebene Lichtverteilung, nämlich einen Schnitt durch den Lichtverteilungskörper, der seine Spiegelbildachse enthält. Dann fallen die Lichtverteilungen aller durch diese Achse gelegten Ebenen gleich aus.

Bei nicht achsen-spiegelbildlichen Lichtquellen pflegt man, in einer jedenfalls zur Kennzeichnung ausreichenden Form, zwei Lichtverteilungen festzulegen, deren Ebenen aufeinander senkrecht stehen und sich in denjenigen Sonderrichtungen befinden, in denen die schwächsten und die stärksten Lichtstärken vorliegen (s. Abb. 45, Abschn. X, 5). Eine Anwendung im Beleuchtungsentwurf macht genauere Angaben erforderlich.

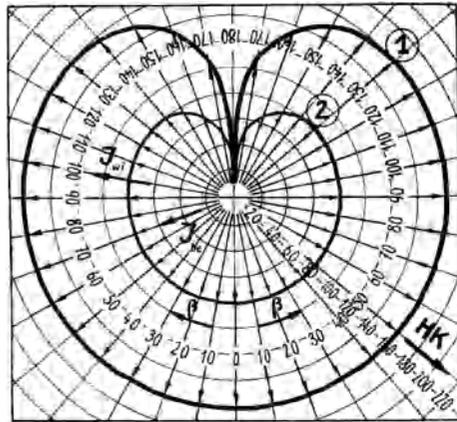


Abb. 18. Wirkliche und bezogene Lichtverteilung

Da hier Werte in verschiedenen Richtungen zur Darstellung gelangen sollen, so sind Polarkoordinaten angebracht. Zu jeder Richtung sind die Lichtstärken in irgendeinem Längenmaß aufgetragen. Sie sind abzulesen aus den Werten für J , die den Kreisen zugeordnet sind. Abb. 18 enthält zwei Lichtverteilungskurven. Die eine (1) ist eine Lichtverteilung, wie sie wirklich an einer Lichtquelle beliebigen Lichtstroms gemessen ist; die andere (2) stellt die auf 1000 lm bezogene Lichtverteilung dar. Die wirkliche Lichtquelle besitze den Lichtstrom Φ_0 . In die bezogene Lichtverteilung werden dann nur Lichtstärken eingetragen, die gegenüber den wirklichen J -Werten durch den Faktor $\frac{1000}{\Phi_0}$ verändert sind, also

$$J_{\text{bez}} = J_{\text{wi}} \cdot \frac{1000}{\Phi_0}. \quad [16]$$

Es gelangen also immer nur Lichtverteilungen zur Darstellung, die zum Lichtstrom 1000 lm gehören. Nur bei lichterzeugenden (selbständigen) Lichtquellen (Lampen) pflegt man auch die wahren Lichtverteilungen anzugeben, bei lichtverbreitenden (unselbständigen) Lichtquellen (Geleuchten) aber immer die bezogenen. Die bezogenen Lichtverteilungen sind denjenigen wirklichen nahezu gleich, die bei einer Glühlampe von 75 Watt auftreten.

Als Ungleichmäßigkeit der Lichtverteilung ug bezeichnet man das Verhältnis von größter Lichtstärke zu derjenigen bei 0° , also $J_{\max} : J_0 = ug$. Im Bild 18 ist $ug = 1$.

2. Lichtverteilung und Lichtstrom. Die Lichtstärke ist als der in einen kleinen Raumwinkel tretende und auf diesen bezogene

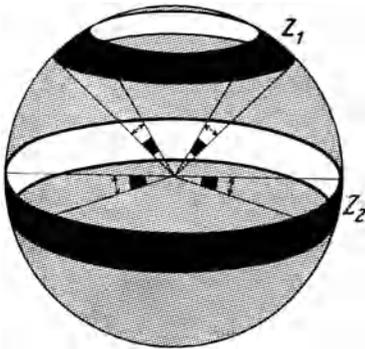


Abb. 19. Zonengrößen

Lichtstrom erklärt worden gemäß $J_\omega = \Phi_\omega : \omega$. Für den ganzen Lichtstrom, den eine Lichtquelle aussendet, ergab sich (I, 4)

$$\Phi_0 = \Sigma \Phi_\omega = \Sigma J_\omega \cdot \omega.$$

Auf dieser Gleichung beruht das Verfahren, aus der Lichtverteilung den gesamten Lichtstrom einer Lichtquelle (oder auch Teillichtströme) zu ermitteln. Da die Lichtverteilung gegeben sein soll, also die Werte J_ω , so besteht die ganze Aufgabe darin, zu den einzelnen Lichtstärken J_ω die Größen der zugehörigen Teilraumwinkel ω zu bestimmen. Dies sei an einer achsenspiegelbildlichen Lichtquelle dargestellt.

Bekanntlich sind die Raumwinkel (vergleiche I, 4) festlegbar durch die Oberflächengrößen der Zonen der Einheitskugel (Abb. 19); alle Zonen wiederum sind bei der Einheitskugel bestimmt durch $Z = 2 h_z \pi$, wobei h_z die Höhe der Zone in Richtung der Kugelachse ist. Damit erhält man an Stelle des obigen Lichtstromausdrucks:

$$\Phi_0 = 2 \pi \cdot \Sigma J_z \cdot h_z,$$

worin J_z die mittlere Lichtstärke der Zone ist. Wählt man nun die Raumwinkel gerade so, daß die zugehörigen Zonenhöhen h_z für alle Raumwinkel gleich groß, nämlich gleich h_0 , sind, so entsteht:

$$\Phi_0 = 2 \pi \cdot h_0 \cdot \Sigma J_z.$$

Nach dieser Gleichung kann man verfahren (Abb. 20): Man trägt zu der Lichtverteilung einen Einheitskreis auf, den Durchmesser (= 2) teilt man in 20 gleiche Teile und projiziert diese waagrecht auf den Kreisrand; die Treffstellen begrenzen je einen, insgesamt 20 Raumwinkel, denen allen also die gleiche Zonenhöhe $h_z = 0,1 = h_0$ zukommt. Man bestimmt nun die zu jeder Zonenmitte gehörende Lichtstärke J_z und schreibt sie untereinander auf. Bildet man deren Summe ΣJ_z und erweitert sie mit $2\pi h_0 = 0,2\pi = 0,628$, so besitzt man den gesuchten gesamten Lichtstrom der Lichtquelle. Im Bildbeispiel ist $\Sigma J_z = 1198$ HK, also

$$\Phi_0 = 0,628 \cdot 1198 = 751 \text{ lm.}$$

Zur Vereinfachung des Verfahrens benutzt man zur Auftragung der Lichtverteilung käufliches (Schmidt und Haensch) Polarschaubildpapier, das sowohl die übliche Winkelteilung, wie die Zonenteilung besitzt, die sich zu diesem Verfahren — von Russel — geeignet erweist (1).

Abb. 20 läßt erkennen, daß die Lichtstärken der mittleren Zonen für den Gesamtlichtstrom wesentlicher sind als die der unteren und oberen; denn sie kommen im mittleren Bereich viel dichter zur Ausnutzung. Eine Lichtstärkenveränderung in den Polzonen macht also auf den Gesamtlichtstrom weniger

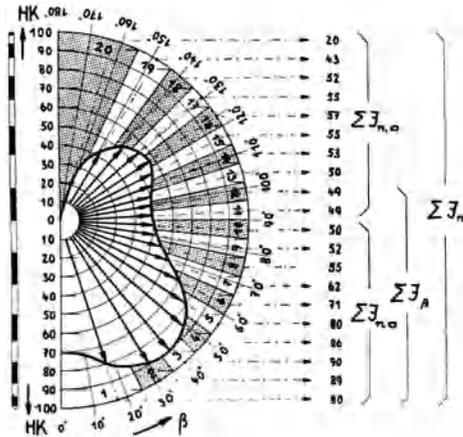


Abb. 20. Lichtstromermittlung nach Russel

aus als eine solche in den mittleren. Die Fläche der Lichtverteilung selbst ist kein Maß für den Gesamtlichtstrom. Die Lichtverteilungsfläche kann ohne weiteres bei kleinerem Lichtstrom größer sein als bei größerem.

Es gibt zwei Verfahren, die durch Verwendung besonderer Beiwertfelder (Koordinaten) die Bestimmung des Lichtstroms aus der Lichtverteilung vereinfachen.

I. Mit Berührungskreiswinkelfeld nach Sewig (2). Man trägt die Lichtverteilung in einem Beiwertfeld ein, bei dem die Kreise für die Lichtstärken sich im Anfangspunkt alle berühren, während die Winkelteilung bleibt (Abb. 21, 1). Trägt man in diesem Feld Lichtstärken gleichen Wertes bei 90° und bei einem anderen Winkel ein, so fallen die Strecken verschieden aus; sie verhalten sich wie die \sin der Winkel. Ebenso verhalten sich aber die Zonengrößen. Die Eintragung in dieses Feld ist also gleichwertig der Erweiterung mit der Zonengröße, die zur Lichtstrombestimmung nötig ist. Daher sind die Strecken vom Anfangspunkt bis

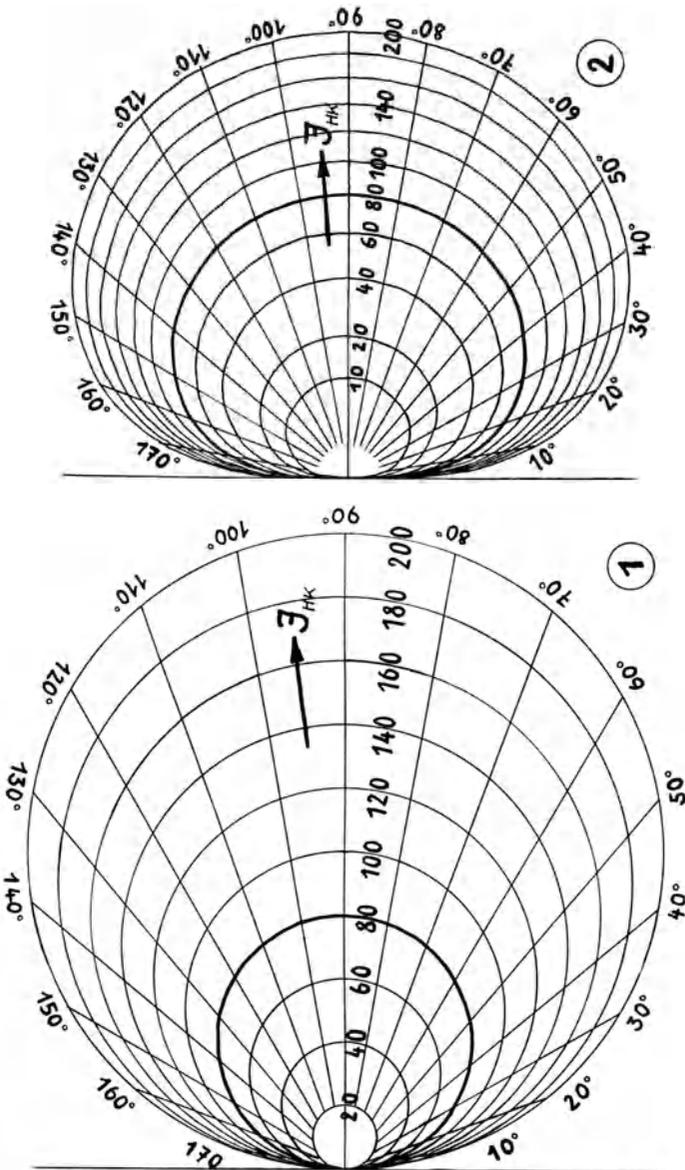


Abb. 21. Lichtverteilungsfelder zu vereinfachter Lichtstromermittlung

zum Kurvenzug gleich den Teillichtströmen jeder Zone. Fügt man nun mit Hilfe eines Zirkels alle Lichtstärkenlängen, die zu gleichen Winkelbreiten von 10 zu 10° gehören, im gewöhnlichen Maßstab aneinander, so

ergibt die Länge einen Wert, der gleich dem Gesamtlichtstrom ist. Jede Lichtstärkenlänge ist aber zugleich ein Maß für den Teillichtstrom des Winkelbereichs. Wählt man den 100 HK-Kreis vom Halbmesser 110 mm, dann entspricht einem mm der Lichtstrombetrag 1 lm. Dieses Verfahren arbeitet besonders schnell für Teillichtströme.

II. Mit Muschelwinkelfeld nach Meyer (3). Man trägt die Lichtstärken in ein Feld ein, das dadurch gewonnen ist, daß aus den Längen des Berührungskreiswinkelfeldes die Wurzel gezogen wurde (Abb. 21, 2); dann umschließt jede Lichtverteilung eine Fläche, die ein Maß des Lichtstroms ist; als Bezugsfläche dient die der Kurve mit 80 HK, zu der 1000 lm gehören. Auch jeder Teillichtstrom ist so unmittelbar als Fläche gegeben. Dies Verfahren benötigt ein gewöhnliches Planimeter. Wählt man den Maßstab so, daß 80 KH bei 90° die Länge 100 mm hat, so entspricht 1 cm^2 der Lichtstromfläche 10 lm. Im übrigen siehe (4).

3. Das Lichtverteilungsfeld. Die Lichtverteilungen der meisten Lichtquellen haben — für den Beleuchtungsentwurf glücklicherweise! — eine Spiegelbildachse. Es genügt die Aufnahme der Lichtverteilung in einer Ebene, um sie für alle zu haben. Es gibt aber auch Lichtquellen, insbesondere Geleuchte für Straßenbeleuchtung, die nach allen Richtungen verschiedenartige Lichtstärken besitzen. Diese Lichtquellen würde man erst durch den Lichtverteilungskörper vollständig kennzeichnen. Da dieser für die spätere Verwendung ungeeignet ist, bildet man ein „Lichtverteilungsfeld“. Man trägt zunächst auf der Ebene Kreise mit den Halbmessern $d = nl$ auf, worin n ganze Zahlen sind; ferner trägt man auf die gleiche Ebene die Kurven gleicher Lichtstärke ein. D. h. man verbindet die Punkte der Ebene, auf welche die in der Höhe l befindliche Lichtquelle mit gleicher Lichtstärke wirkt, durch Kurven. Diese ergeben im Verein mit den Kreislinien das Lichtverteilungsfeld. Dann liegt zu jeder Stelle der Ebene, der ein Zahlwert d/l zukommt, der J -Wert fest. Ist das Geleucht spiegelbildlich, so werden die Kurven gleicher Lichtstärke ebenfalls zu Kreisen. Das Lichtverteilungsfeld braucht mit Rücksicht auf spätere Verwendung nicht weiter als bis zu Werten $d/l = 6$ ausgeführt zu werden.

4. Sonderwerte von Lichtstärken und Lichtströmen. Wenn man von der (besten) Kennzeichnung einer Lichtquelle durch die volle Lichtverteilungskurve absieht, so kann man sie durch besonders ausgewählte Werte von J und Φ schon oft ausreichend kennzeichnen. Die am meisten üblichen Sonderwerte sind:

1. Φ_0 der Gesamtlichtstrom,
2. und 3. Φ_Δ und Φ_\ominus die Lichtströme des oberen bzw. unteren Halbraumes,

4. und 5. $J_{m,o}$ und $J_{m,u}$ die mittleren Lichtstärken des oberen bzw. unteren Halbraumes,
 6. J_m die mittlere Lichtstärke des Vollraumes.

Unter diesen Größen gelten die Beziehungen

$$\Phi_0 = \Phi_{\square} + \Phi_{\circlearrowleft} \text{ und } J_m = \frac{J_{m,o} + J_{m,u}}{2}$$

Diese Sonderwerte gewinnt man auf den gleichen Wegen, wie man J_m und Φ_0 aus der Lichtverteilung herleitet. Um die Teillichtströme zu erhalten, summiert man nur die Lichtstärken im oberen oder unteren Halbraum. Für die mittlere Lichtstärke gilt offenbar außer der schon gegebenen Beziehung $J_m = \Phi_0 : 13$:

$$J_m = \frac{1}{n} \sum J_n \equiv \frac{1}{20} \sum J_n,$$

sofern man als Zonenanzahl, wie zweckmäßig, $n = 20$ wählt. Entsprechend gilt für die mittleren Teillichtstärken:

$$J_{m,o} = \frac{1}{10} \sum J_{n,o} \text{ und } J_{m,u} = \frac{1}{10} \sum J_{n,u}.$$

Man bildet also Mittelwerte, die nur auf Lichtstärken des oberen oder unteren Halbraums beschränkt sind.

Für die drei mittleren Lichtstärken seien noch die folgenden Näherungsausdrücke angegeben, die sie aus einer Auswahl von J -Werten zu berechnen gestatten (5):

$$\begin{aligned} J_m &= \frac{1}{8} (J_{30^\circ} + 2J_{60^\circ} + J_{80^\circ} + J_{100^\circ} + 2J_{120^\circ} + J_{150^\circ}), \\ J_{m,o} &= \frac{1}{4} (J_{100^\circ} + 2J_{120^\circ} + J_{150^\circ}), \\ J_{m,u} &= \frac{1}{4} (J_{30^\circ} + 2J_{60^\circ} + J_{80^\circ}). \end{aligned}$$

5. Zonenlichtströme. Für den Beleuchtungsentwurf sind die als „Zonenlichtströme“ bezeichneten Teillichtströme von besonderer Wichtigkeit. Das sind die Teillichtströme, die in bestimmte Zonen des Kugelraums gelangen. Als Raumwinkelzonen wählt man alle bei 0° beginnenden Kugelzonen mit den Bereichen von 10 bis 180° . Man bestimmt den Zonenlichtstrom bis zum Winkel β entweder, indem man nach Abb. 20 $\Phi_\beta = 0,628 \cdot \sum J_\beta$ bestimmt; oder durch Aneinanderreihen der Lichtstärkestrecken im Berührungskreiswinkelfeld; oder durch Planimetrieren des Zonenbereichs im Muschelfeldbild.

Man pflegt die Zonenlichtströme bildlich in Abhängigkeit von den Zonenwinkeln aufzutragen und erhält so die Zonenlichtstromverteilung einer Lichtquelle. Abb. 22 gibt eine solche für die Punktlichtquelle an. Zu jedem Winkel ist darin der Zonenlichtstrom eingetragen, der innerhalb der von 0° bis zu dem Winkel β reichenden Zone ausgesandt wird.

Jede Zonenlichtstromverteilung ist, wie die Lichtverteilung, auf 1 km der Lichtquelle bezogen. Da die Zonenhöhe zum Winkel β den Wert $1 - \cos \beta$ hat, so lautet offenbar der Rechenausdruck für den Zonenlichtstrom der Zone $0^\circ - \beta^\circ$:

$$\Phi_\beta = 1000 \cdot (1 - \cos \beta) \text{ lm.} \quad [17]$$

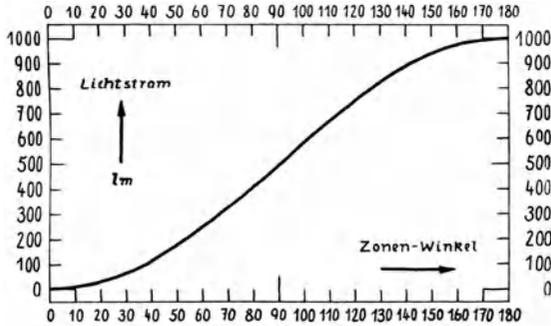


Abb. 22. Zonenlichtstromverteilung der Punktlichtquelle

6. Lichtrückwurf, Lichtverschluck, Lichtdurchlaß. Für die Beleuchtung sind die Wirkungen der lichtverteilenden Flächen von gleicher Wichtigkeit, wie die der lichterzeugenden Lichtquellen. Die Lichtquellen sind zum Schutz gegen Blendung mit Gläsern und Schirmen umgeben; das Licht wird an Wänden und Arbeitsflächen zurückgeworfen.

Jede Fläche, die von Licht getroffen wird, wirft einen gewissen Anteil (ρ) davon zurück, läßt einen anderen (τ) hindurch und nimmt einen Restteil (α) in sich auf. So gilt immer die Gleichung

$$\rho \text{ (in v. H.)} + \alpha \text{ (in v. H.)} + \tau \text{ (in v. H.)} = 100 \text{ v. H.}$$

Der Anteil α ist für die Lichtverteilung verloren; er verwandelt sich im Material in Wärme.

Was den Rückwurf angeht, so trifft man eine Einteilung der vorkommenden Verhältnisse nach folgenden Grenzfällen, die allerdings nie erreicht werden:

Aufstellung 3

	Flächenart	Rückwurf	Rückwurfrichtung
1.	„Schwarz“	nichts	keine
2.	„Weiß“	alles	der ganze Halbraum
3.	„Grau“	teilweise	„ „ „
4.	„Farbig“	teilweise	„ „ „
5.	„Spiegelnd“	alles	eine bestimmte Richtung

Abb. 23 zeigt die fünf Fälle in ihrem Verhalten gegenüber dem gleichen einfallenden Lichtstrahl.

Wichtig ist, daß die weiße Fläche das Licht in alle Richtungen zerstreut. Die „graue“ tut es an sich auch; sie gibt nur, da sie zwischen schwarz und weiß liegt, einen geringeren Teil als weiß zurück. Die farbige gibt alles Licht der eigenen Farbe völlig zurück, verschluckt aber das Licht, das ihre Farbe nicht enthält; sie ist also gegenüber der eigenen Farbe „weiß“, gegen-

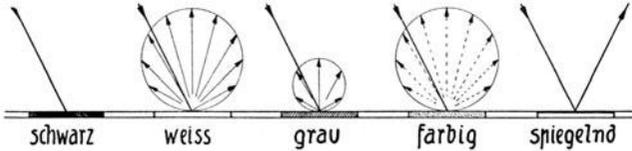


Abb. 23. Rückwurfarten

über der nicht eigenen Farbe „schwarz“. Alle wirklichen Flächen besitzen alle diese fünf Eigenschaften immer zusammen; nur ist meist eine von ihnen weitaus im Übergewicht, so daß man sie als Kennzeichnung der Fläche verwendet. So kann eine hellgrün gestrichene Wandfläche 50 v. H. des Lichtes durch ihre Farbigkeit ausschalten, vom Rest 50 v. H. durch ihre Graueigenschaft, den Rest vom Betrage 25 v. H. zu 5 v. H. spiegelnd, zu 20 v. H. weiß zurückstrahlen. Wenn es der Lichttechnik nicht auf die Art der Rückstrahlung ankommt, so gibt sie diese alle ganze wieder, im Beispiel also $\rho = 25$ v. H. Insbesondere liegen die wirklichen Fälle immer zwischen weiß und spiegelnd.

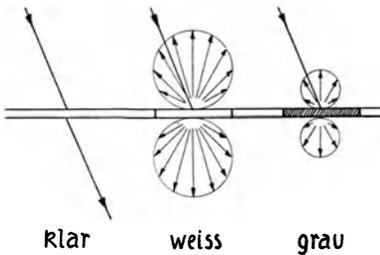


Abb. 24. Durchlaßarten

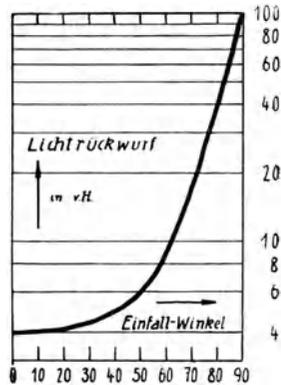


Abb. 25. Einfallswinkel und Rückwurf

Was den Lichtdurchlaß angeht, so legt man eine entsprechende Einteilung zugrunde. Abb. 24 zeigt die geschilderten Verhältnisse.

Auch jetzt sind es vereinfachende, gedachte Grenzfälle: Die „klare“ Scheibe läßt alles Licht richtungsungeändert hindurch; die „weiße“ läßt die Hälfte hindurch, verteilt es nur in alle Richtungen zur Hälfte nach vorn, zur Hälfte nach rückwärts; die „graue“ wirkt so wie die weiße Fläche; jedoch beiderseits mit geminderter Lichtstärke, die „farbige“ verhält sich „klar“ für die ihr eigenen, undurchlässig für die ihr nicht eigenen Farben.

In Wirklichkeit werden auch diese Fälle nie erreicht, sondern treten nur vereinigt auf.

Für den Beleuchtungsentwurf ist noch ein Verhalten teilweise spiegelnder (durchlässiger) Flächen von Bedeutung, nämlich das, welches sich darin äußert, daß die Stärke des gespiegelten Lichtes vom Einfallswinkel abhängig ist: eine bei senkrechtem Lichteinfall kaum spiegelnde Durchlaßfläche kann schräg getroffen ganz beträchtlich spiegeln und dadurch weniger durchlassen.

Abb. 25 zeigt die Zunahme der gespiegelten Lichtstärke bei zunehmendem Einfallswinkel, bezogen auf die Einfallslichtstärke. Soweit Lichtverluste an Durchlaßstoffen vermieden werden sollen, ist also möglichst senkrechter Lichteinfall auf sie anzustreben. Dies ist für die Formgebung der Glaskörper von Geleuchten ebenso wichtig, wie für die Fenster. So kommt durch ein schräg vom Licht getroffenes Fenster nur ein Lichtanteil hindurch, der beträchtlich geringer ist, als der, der ohne die Gläser gemäß der glaseinnehmenden Öffnung eintreten könnte. (Doppelfenster sind entsprechend ungünstiger.) Die ohnehin schon bei steilem Lichteinfall schlecht beleuchteten Räume erleiden durch die Glasfüllungen also noch besonders erhöhten Lichtstromverlust. Aus ähnlichen Gründen besitzt die Kugelform als Geleucht die geringsten, durch innere Spiegelung verursachten Lichtverluste, dadurch also hohen Wirkungsgrad (6).

7. Die Leuchtdichte. Die „Beleuchtungsstärke“ ist eine rein physikalische Größe, die zum Auge ohne unmittelbare Beziehung steht. Eine andere Größe, die sogenannte „Leuchtdichte“, ist für die Sehtchnik von allergrößter Bedeutung geworden, da sie das, was das Auge wahrnimmt, besser erfaßt. Die Leuchtdichte wird auf zwei verschiedene Arten verwandt (7).

a) Man geht von der Beleuchtungsstärke aus. Man sagt, daß es für das Auge völlig belanglos sei, wieviel Licht auf eine beleuchtete Fläche treffe, wenn nicht feststeht, wieviel Licht von der Fläche wieder abgestrahlt und damit dem Auge zugeführt wird. Daher wird für das, was das Auge wahrzunehmen hat, ebensowohl das Rückstrahlvermögen der Fläche, wie ihre Beleuchtungsstärke entscheidend sein. Daher führt man als „Leuchtdichte“ B das Produkt aus Beleuchtungsstärke E und Lichtrückwurf ρ ein, also

$$B = \rho \cdot E. \quad [18]$$

Leuchtdichte mißt man in „Lux auf Weiß“ oder „Apostilb“ (asb). Die Einheit der so festgesetzten Leuchtdichte besitzt also eine Fläche, die einen Lichtrückwurf von $\rho = 100$ v. H. besitzt (vollkommen weiß) und mit 1 lx beleuchtet ist.

Um auf Stoffen von verschiedenem Rückwurf ρ gleiche Leuchtdichten hervorzurufen, sind also verschiedene Beleuchtungsstärken E herzustellen gemäß $\rho_1 \cdot E_1 = \rho_2 \cdot E_2$, also $E_1 : E_2 = \rho_2 : \rho_1$. Diese

Tatsache ist für die Wahl richtiger (Arbeits-) Beleuchtungsstärken grundlegend! Die Beleuchtungsstärken müssen also, um gleiche Wirkung zu erzielen, sich umgekehrt verhalten wie die Rückwürfe. Daher erklären sich die weit höheren Beleuchtungsstärken, die für dunkles Arbeitsgut verlangt werden.

b) Man geht von der Lichtstärke aus. Man sagt, daß es für die Empfindung des Auges durchaus verschieden ist, ob eine Lichtquelle, die auf das Auge zu mit der Lichtstärke J strahlt, dem Auge in großer oder kleiner Fläche erscheint, ob also der gemäß der Lichtstärke in das Auge dringende Lichtstrom auf der Netzhaut auf größere oder kleinere Fläche verteilt wird. Man führt daher für Lichtquellen als Leuchtdichte das Verhältnis von Lichtstärke J zu der Fläche φ ein, die sich ergibt, wenn man den Leuchtkörper der Lichtquelle auf eine Ebene projiziert, die senkrecht auf der Verbindung Auge-Lichtquelle steht.

Also (Abb. 26)

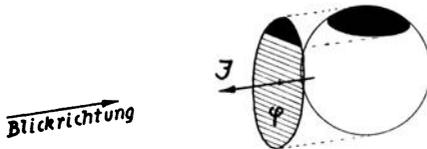


Abb. 26. Leuchtdichtenerklärung

$$B = \frac{J}{\varphi} \quad [19]$$

„Leuchtdichte“ ist also die Lichtstärke der Flächeneinheit der Sichtfläche. Diese Leuchtdichte mißt man in

Stilb (sb). Bei technischen Lichtquellen werden hohe Leuchtdichten bis 1000 sb erreicht. 1 sb hat die Lichtquelle, die bei 1 cm² Sichtfläche die Lichtstärke 1 HK besitzt (1 sb = 1 HK/1 cm²). Für die Sichtfläche gilt: $\varphi = F \cdot \cos \alpha$, wenn das Lot auf der leuchtenden Fläche F den Winkel α mit der Blickrichtung angibt. Der Zusammenhang beider Leuchtdichte-Einheiten wird durch die folgende Beziehung gegeben:

$$1 \text{ sb} = 10^4 \cdot \pi \text{ asb} = 31400 \text{ asb} \quad \text{oder} \quad 1 \text{ asb} = 0,0000318 \text{ sb.}$$

8. Lichtzerstreuung durch Flächen. Es gibt keinen lichttechnischen Baustoff, der Licht, das auf ihn trifft, völlig unzerstreut hindurchläßt oder der es so wie die vollkommen weiße Fläche wieder abgibt. Die wirklichen Stoffe zeigen also Streulichtverteilungen, die zwischen denen für „klar“ und „weiß“ liegen. Die streuenden Eigenschaften eines Lichtdurchlaßstoffes werden durch die Streulichtverteilungen gekennzeichnet. Ganz entsprechend sind die Verhältnisse für die Rückwurfstoffe, bei denen die Streulichtverteilungen zwischen denen für „weiß“ und „spiegelnd“ liegen. Abb. 27 gibt an einigen bezeichnenden Beispielen einen Eindruck von Streulicht-

verteilungen, die vorkommen. Einer genauen Beurteilung von lichttechnischen Baustoffen sind derartige Lichtverteilungen zugrunde zu legen.

Um die streuende Eigenschaft nicht nur durch eine Kurve, sondern vereinfachend durch eine Zahl zu gewinnen, sind zwei Ausdrücke für das „Streuvermögen“ σ geeignet. Bei dem ersten einfacheren geht man von der Lichtverteilung allein aus. Man bildet das Verhältnis der Halbwerts-
winkel für die zu beurteilende und die weiße Streufläche; das sind die Winkel,

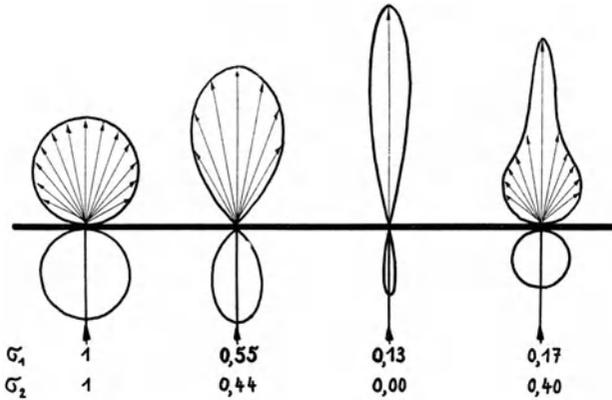


Abb. 27. Streulichtverteilungen

bei der die Lichtstärke die Hälfte des Wertes annimmt, den sie senkrecht zur Fläche (bei senkrechter Einstrahlung) besitzt, also

$$\sigma_1 = \gamma_{J/2}^0 : 60^\circ;$$

denn für die weiße Fläche ist der Halbwertswinkel 60° . Bei der genaueren Festsetzung geht man von der Leuchtdichteverteilung aus, weil durch die Streulichtleuchtdichteverteilung die Unterschiede der Stoffe betreffs des Streulichts deutlicher erfaßt werden. Dann gilt als Streuvermögen nach R. G. Weigel der Ausdruck (8):

$$\sigma_2 = \frac{B_{20^\circ} + B_{70^\circ}}{2 \cdot B_{60^\circ}},$$

zu dessen Bestimmung also drei Leuchtdichten dienen. Für die „weiße“ Fläche gilt danach:

$$\sigma_1 = \frac{60^\circ}{60^\circ} = 1; \quad \sigma_2 = 2 \cdot \frac{J_0}{F_0} : 2 \cdot \frac{J_0}{F_0} = 1;$$

denn

$$B_{20} = \frac{J_{20}}{\varphi_{20}} = \frac{J_0 \cdot \cos 20}{F_0 \cdot \cos 20} = \frac{J_0}{F_0}; \quad B_{70} = \frac{J_0}{F_0}; \quad B_6 = \frac{J_0}{F_0}.$$

Die „weiße“ Fläche hat also ein „Streuvermögen“ vom Betrag 1. Für alle anderen Flächen ist es kleiner als 1. Für die angegebenen Kurven ergeben sich so die Werte, die in der Abb. 27 angegeben sind (9).

Schriftumsnachweis

(1) Russel-Bloch, ETZ. S. 1075, 1905. — (2) R. Sewig, Das Licht 8, Januar 1938. — (3) E. Meyer, Das Licht 7, 247 1937. — (4) E. Liebenthal, Praktische Photometrie, S. 268—309. — (5) L. Bloch, Grundzüge der Beleuchtungstechnik, Berlin 1907, S. 21. — (6) Fresnels Lichttheorie nach Phys. Handwörterbuch, Berlin 1924, S. 642. — (7) A. R. Meyer, Li. La. 18, 45, 1929. — (8) R. G. Weigel, Li. La. 21, 379 und 395, 1932. — (9) Andere Streufestsetzung: Halbertma, ETZ. 39, 207, 1918. — Zu den Abschnitten 6 bis 8: DIN 5036, Bewertung und Messung von Beleuchtungsgläsern.

V. Auge und Beleuchtung

1. Das Auge. Das Leitwort der Beleuchtungstechnik: Schone deine Augen durch besseres Licht! deutet darauf hin, daß jede Beleuchtung dem Auge dienen soll und sich daher über die rein beleuchtungsmäßigen Forderungen hinaus den Bedürfnissen des Auges möglichst anpassen muß.

Die Hauptteile des Auges sind bekanntlich: Hornhaut, Augenwasser, Irisblende, Linse mit Akkommodationsmuskel, Glaskörper und Netzhaut. Linse sowie Akkommodation dienen erstlich der optischen Abbildung beim Sehen. Die Hornhaut dient dem mechanischen Schutze, Augenwasser und Glaskörper dem Strahlungsschutze (durch Zerstreung bzw. Fluoreszenzumschaltung der der Netzhaut schädlichen Wärme- bzw. Ultraviolettstrahlen). Der Helligkeitswahrnehmung, auf die es beleuchtungsmäßig ankommt, dienen Irisblende zur Regelung des eintretenden Lichtstroms und Netzhaut zur Wahrnehmung des Lichtes.

Die Wahrnehmungsmittel der Netzhaut heißen Zapfen und Stäbe. Die Anzahl der Stäbe beträgt rund 10^8 , die der Zapfen 10^6 ; die Durchmesser sind entsprechend 0,002 und 0,0055 mm. Zapfen und Stäbe sind ungleich über der Netzhaut verteilt. In Netzhautmitte sind rund zehnmal soviel Zapfen wie Stäbe, am Netzhautrand rund zehnmal soviel Stäbe wie Zapfen. Diese Verhältnismkehr kommt durch Veränderung der Anzahlen beider Wahrnehmungsmittel zustande.

Die Zapfen arbeiten bei Helligkeit und sind farbenempfindlich; die Stäbe arbeiten bei Dämmerung und sind farbenunempfindlich. Das reine Zapfensehen erfolgt in dem Leuchtdichtebereich von rund 10 bis 10^6 asb; das reine Stäbesehen zwischen $1 \cdot 10^{-6}$ und 0,05 asb. Im Bereich 0,05 bis 10 asb findet das Gemischtsehen statt (1).

Daraus folgt, daß bei Beleuchtung im Freien, soweit E -Werte um 1 lx vorkommen dürfen, das Sehen mit Stäben durchaus eintritt, wenn der mittlere Lichtrückwurf der Flächen nur unter 10 v. H. liegt. Arbeitsbeleuchtung muß ausschließlich in das Gebiet des Zapfensehens führen. In mangelhaft beleuchteten Räumen liegt

herrschen sollten. Die Stäbe haben eine andere Kurve (Abb. 29, b). Ihr Höchstwert liegt nach Blau verschoben bei $\lambda = 0,510 \mu$. Sie erfaßt die Gesamtbreite von $\lambda = 0,40$ bis $\lambda = 0,62 \mu$. Hieraus wird verständlich, weshalb bei geringen Leuchtdichten, wie sie leicht auf Straßen vorkommen, blaufarbiges Licht günstiger wirkt als weißes: bei Leuchtdichten unter 1 asb wird das Stäbesehen mit der *b*-Kurve wirksam, die im Blauen höher liegt, als die *a*-Kurve (3).

Wenn die Stäbe auch auf bestimmte Lichtfarben als Helligkeit ansprechen, so bewirken sie doch keinen Farbeindruck. Daher verschwinden,

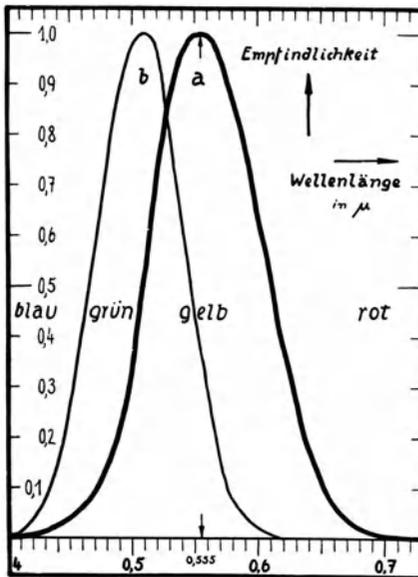


Abb. 29. Spektrale Hellempfindlichkeit

wenn das Auge selbständig bei wachsender Dämmerung vom Sehen mit dem „farbentüchtigen Hellapparat“ auf den „farbenuntüchtigen Dunkelapparat“ umschaltet, die Farbeindrücke aus dem Landschaftsbild; das Sehen erfolgt als „stäbchengraues“ Sehen. Der Volksmund sagt: Bei Nacht sind alle Katzen grau. Beim Stäbesehen erscheint rot als schwarz, grün als dunkelgrau, gelb als hellgrau, blau als weiß (4).

3. Wahrnehmung der Beleuchtung.

Wenn man die Angaben eines Beleuchtungsmessers mit den Eindrücken vergleicht, die das Auge von Beleuchtungsstärken hat, so fällt auf: 1. Wenn als Anhaltswert für eine *E*-Schätzung die mittlere Beleuchtungsstärke in einem Raum, z. B. 100 lx, bekannt ist,

wird die zu beurteilende Beleuchtungsstärke im Freien, die etwa den Wert 40000 lx hat, nur auf etwa 4000 lx geschätzt. 2. Das Verhältnis zweier Beleuchtungsstärken in einem Raum, das z. B. vom Werte 300 : 1 ist, wird nur als etwa 5 : 1 empfunden.

Es werden also sowohl die Vollwerte, wie die Vergleichswerte von Beleuchtungsstärken „falsch“, soll heißen, nicht der physikalischen Bewertung verhältnismäßig, empfunden. Diese Tatsache entspricht der (für alle menschliche Empfindung gültigen) Gesetzmäßigkeit (Weber und Fechner): daß alle Empfindungen nur verhältnismäßig dem Logarithmus vom Reiz anwachsen (5).

Dies verdeutlicht Abb. 30 für die durch Beleuchtungswerte *E* (Rechtswerte) verursachte Lichtempfindung ε (Hochwerte). Eine

Steigerung der Beleuchtungsstärke in gleichen Stufen, z. B. von 10 zu 10 lx, wird wie eine Steigerung in Stufen von abnehmender Größe empfunden. Die Art des Anwachsens der Empfindung mit der Beleuchtungsstärke gibt wieder: $\varepsilon = C_1 \cdot \log E - C_2$, worin C_1 und C_2 Festwerte sind, die hauptsächlich von der Augenempfindlichkeit abhängen. Einem Empfindungszuwachs von bestimmter Größe $\Delta\varepsilon$ entspricht bei größeren Beleuchtungsstärken eine weit größere Beleuchtungsstufe ΔE als bei kleineren. Es ist also um so schwerer, eine Verbesserung der Beleuchtungsempfindung durch Beleuchtungssteigerung zu erreichen, je höher die Beleuchtungsstärke schon liegt. Die Steigerungen der Aufwendungen für Licht werden daher immer weniger in dem Maße empfunden, wie sie wirklich geschehen. Eine

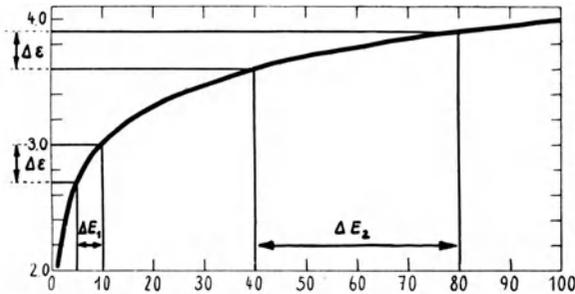


Abb. 30. Zunahme von Beleuchtung und Beleuchtungsempfindung

Steigerung von E um ΔE bei Anlagen mit verschiedenen Ausgangswerten E wird nur dann als gleich empfunden, wenn die ΔE den gleichen Bruchteil von E ausmachen; so erscheint eine Steigerung von 200 auf 300 lx geringer als eine von 100 auf 200 lx; jedoch werden die Steigerungen von 80 auf 88 lx ebenso erkennbar, wie die von 200 auf 220 lx. Dies stellt eine für den Beleuchtungsentwurf grundlegende Tatsache dar. Sie muß jedem planenden Beleuchtungstechniker vertraut sein, wenn er bei Verbesserungsausführungen nicht enttäuscht sein will.

Die Steilheit der Empfindungskurve im Anfang bringt aber den Vorteil, das bei geringen Leuchtdichten die Empfindung sehr stark wächst. Schlechte Anlagen lassen sich also besonders leicht wirksam verbessern. Solche Verbesserungen stehen aber heute noch im Vordergrund. — Die Art der Empfindung bewirkt übrigens, daß die starken Schwankungen von Tageslichtbeleuchtungen dem Auge kaum bemerkbar werden, weil sie im Vergleich zu den vorhandenen Gesamtwerten trotz großer Beträge gering sind. — Wünschenswert wäre es, wenn die Beleuchtungsmesser außer der für Rechnungen unerläßlichen Lux-Leiter auch eine solche enthielten, die eine Teilung gemäß dem Logarithmus der E -Werte darstellte.

4. Kontrast. *Erklärung.* I. In Beleuchtungsanlagen pflegen weder die Beleuchtungsstärken noch die Lichtrückwürfe überall gleich groß zu sein. Daher sind die Leuchtdichten von Punkt zu Punkt verschieden. Den Unterschied der Leuchtdichten bringt man durch den „Kontrast“ K zum Ausdruck gemäß

$$K = \frac{B_1}{B_2} = \frac{E_1 \cdot \varrho_1}{E_2 \cdot \varrho_2}. \quad [20]$$

Einen solchen (wirklichen) Kontrast bezeichnet man auch als „Hellgegensatz“; er ist rein physikalisch bestimmt, nämlich eine zahlenmäßig festlegbare, meßbare Größe. Der Hellgegensatz wird entsprechend der Gleichung als reine Verhältniszahl angegeben oder in v. H.-Werten; also $K = 20 : 1$ oder 2000 v. H. Der Hellgegensatz tritt in folgenden Arten auf:

Arten. 1. K entsteht ausschließlich dadurch, daß die E -Werte verschieden sind. Dann entsteht $K = E_1 : E_2$. Dieser Kontrast heißt Beleuchtungskontrast.

2. K entsteht ausschließlich durch den Unterschied der Rückwurferte. Dann entsteht $K = \varrho_1 : \varrho_2$. Dieser Kontrast heißt Gegenstandskontrast.

3. Als Gleichzeitigkeitskontraste bezeichnet man vorkommende K -Werte, wenn sie gleichzeitig durch Leuchtdichteunterschiede an verschiedenen Stellen auftreten.

4. Gleichörtlichkeitskontraste sind solche, die an einer Stelle im Laufe der Zeit durch Leuchtdichteunterschiede wirksam sind; sie sind dann meist durch Änderungen der E -Werte bewirkt.

Vorkommen. Eine jede Beleuchtungsverteilung weist also infolge der E -Unterschiede Beleuchtungskontraste auf. „Gleichmäßigkeit“ ist nur ein besonders wichtiger Beleuchtungskontrast, nämlich der Höchstkontrast einer Anlage. Er ist ein Gleichzeitigkeitskontrast. Gleichörtlichkeitskontraste werden z. B. durch zu langsam flimmernde Lichtquellen hervorgerufen; sie treten aber auch im bewegten Fahrzeug auf, das eine ungleichmäßige beleuchtete Strecke durchfährt. Sie können also als Folge von Gleichzeitigkeitskontrasten auftreten. Gegenstandskontraste sind z. B. vorhanden für schwarze Schrift auf weißem Grund.

Wirkung. Man kann im allgemeinen (d. h. durchaus mit Ausnahmen!) sagen, daß Kontraste von Nachteil sind, wenn sie durch Beleuchtung, von Vorteil, wenn sie durch Rückwurf erzeugt werden. So stört das Flimmern von Lichtquellen oder die Ungleichmäßigkeit der Beleuchtung einer Anlage. Dagegen ist das Lesen, z. B. nur durch ausreichenden Gegenstandshellgegensatz von Druck und Blatt möglich. Aufstellung 4 gibt hierfür Zahlwerte an. Das Körpererkennen geschieht aber gerade durch Leuchtdichteunterschiede auf verschieden geneigten Flächen, also durch Beleuchtungskontraste.

Aufstellung 4

Kontrast von schwarzer Tusche auf weißem Zeichenpapier.....	rund 1:18
Kontrast von Schreibmaschinenschrift auf weißem Schreibmaschinenpapier	„ 1:8
Kontrast von Durchschlägen und Kopien auf weißem Durchschlag- oder Kopierpapier.....	rund 1:2 bis 1:5
Kontrast von Bleistiftschrift auf weißem Zeichenpapier, je nach Härte.....	rund 1:1,5 bis 1:3

II. Das Auge spricht auf Hellgegensätze ganz verschieden an, je nach der Entfernung, in der sie voneinander auftreten. Bei großen Entfernungen sind Hellgegensätze unmerklich. Bei abnehmenden Abständen werden sie deutlicher. Stoßen sie aber unmittelbar aneinander, so empfindet das Auge sie als verstärkt. Dieser (scheinbare) Kontrast heißt „Hellabhebung“. So erscheint ein in sich durchweg gleich tiefer Kernschatten an seiner Trennlinie neben einem Halbschatten weit dunkler, als in größerem Abstand von der Trennlinie. Hellabhebung ist zahlenmäßig daher nicht sicher erfassbar. Sie nimmt jedenfalls in dem Maße zu, wie der Abstand der Vergleichsstellen abnimmt.

Hellabhebung ist für das Erkennen von großer Bedeutung. So wird das Erkennen der Formen der Buchstaben dadurch erleichtert, daß der oft nicht große Hellgegensatz durch Hellabhebung verstärkt wird.

III. Ein Farbkontrast tritt durch Unterschiede der Farben auf. Er ist ein Beleuchtungskontrast, wenn die Farbe des Lichts, ein Gegenstandskontrast, wenn die der beleuchteten Flächen die Ursache sind. Dieser wirkliche Farbgegensatz ist von Nachteil, wenn Flächenteile, die gleich gut erkannt werden sollen, in verschiedener Farbe nebeneinander erscheinen. Es gibt auch Farbabhebung: entweder dadurch, daß das Auge Flächen unterscheidet, wenn sie trotz gleicher Rückwurferte verschiedene Farben haben; oder dadurch, daß eine z. B. hellgraue Fläche in roter Umgebung grün erscheint. Das erste ist unselbständige, das zweite selbständige Farbabhebung.

5. Blendung. Es gibt wohl keinen Fehler in Beleuchtungsanlagen, der so häufig ist und sich dabei so nachteilig auswirkt, wie der durch Blendung. Blendung wird durch hohe Leuchtdichten inmitten geringer Leuchtdichten hervorgerufen. Ihr Vorhandensein ist immer dann erwiesen, wenn durch Beseitigung der hohen Leuchtdichten die Wahrnehmung dem Auge leichter und besser gelingt.

Als grober Anhaltswert kann gelten, daß Leuchtdichten über 1 Stilb blenden. Da die technischen Lichtquellen Leuchtdichten bis

zu 1000 sb besitzen, so blenden sie, wenn sie unabgeschirmt sind. Da Blendung die Sehleistung herabsetzt, müssen Lichtquellen abgeblendet werden. Deshalb die Mattierung der Glühlampen, die Umhüllung der Lichtquellen durch lichtzerstreuende Gläser, deshalb die Lampenschirme und Reflektoren. Hier zeigt sich, daß die nun einmal nicht vermeidbare, auf beinahe einen Punkt zusammengefaßte Lichtquelle, wie sie heute in der Glühlampe vorliegt, in Anbetracht der Blendung einen großen Nachteil besitzt. Die Lichtquelle muß deshalb dem Auge möglichst unsichtbar angebracht werden. Das Auge soll nicht Lichtquellen sehen, sondern beleuchtete

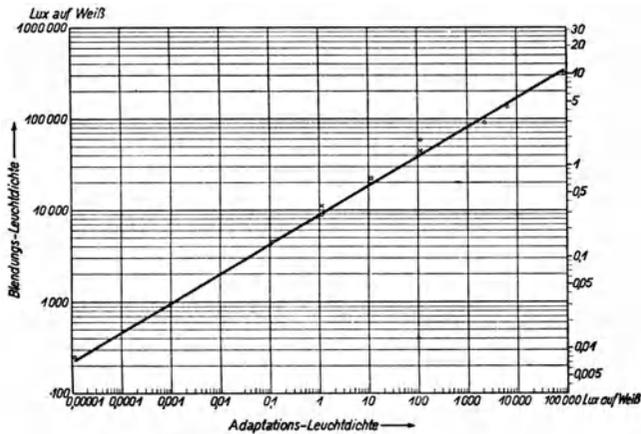


Abb. 31. Blendleuchtdichten

Flächen, Körper und Räume. Eine Abblendung des Auges ist aber nicht nur darum nötig, weil es sich blenden läßt, sondern weil es auch, gleich den lichtzustrebenden Faltern, immer zunächst den Punkt größter Leuchtdichte aufsucht und damit oft davon abgehalten wird, das anzusehen, was es eigentlich soll. Dies wird immer noch zu wenig beachtet, insbesondere bei Beleuchtung im Freien (Straßen).

Entscheidend für die Bekämpfung der Blendung ist nun, daß die Leuchtdichten, die blenden, wesentlich von den Leuchtdichten der Umgebung bestimmt sind. So kann man bei hellem Tageslicht ungestört in einen Scheinwerfer blicken, der bei Dunkelheit die stärkste Blendung verursachen würde. Abb. 31 gibt die zu den Umfeldleuchtdichten, auf die das Auge eingestellt ist [die daher Anpaß- (Adaptions-) Leuchtdichten A heißen], diejenigen Leuchtdichten B_{\max} an, die innerhalb des Umfeldes auftreten dürfen, ohne

daß sie blendend wirken. Eine Gleichung, die den Zusammenhang näherungsweise wiedergibt, lautet (6):

$$B_{\max} = 8 \cdot \sqrt[3]{A} \quad (B \text{ und } A \text{ gemessen in Stilb}),$$

$$B_{\max} = 10^4 \cdot \sqrt[4]{A} \quad (B \text{ und } A \text{ gemessen in Apostilb}).$$

Danach kann Blendung auch dadurch zum Verschwinden gebracht werden, daß man die Umfeldleuchtdichten A vermehrt. Das ist der Grund, warum man in Räumen, in denen Blendungsgefahr besteht, die Wandanstriche immer so hell wie möglich wählen soll; warum



Abb. 32. Blendende Anlage

viele Lichtquellen von geringerer Lichtstärke (Kronleuchter) weniger blenden, als wenige von gleicher Stärke: es wirken die Nachbarlichtquellen als blendungsherabsetzendes Umfeld; warum große Leuchtflächen trotz hoher Leuchtdichten nicht sehr blenden; warum andererseits Blendung so schwer bei Straßenbeleuchtungen zu vermeiden ist; denn die Rückwurferte der Straßenflächen sind meist nur gering.

Blendung wird durch hohe Leuchtdichten hervorgerufen; diese herrschen meist nur auf Flächen von geringer Ausdehnung; deshalb findet unmittelbare Blendung meist nur auf kleinem Felde der Netzhaut statt, eben dort, wo die Leuchtfläche zur Abbildung gelangt. Es erweist sich aber dann auch ein Umkreis der echt geblendeten Stelle als „geblendet“, d. h. in ihrer Sehtüchtigkeit herabgesetzt; diesen Umkreis nennt man Blendstörungenkreis. Seine Größe wächst mit der Stärke der Blendung.

Als Blendstelle kann die Netzhautmitte oder ein Netzhautrandstück in Frage kommen. Im letzten Falle ist die (für weitere Sehleistung hauptsächlich erforderliche) Netzhautmitte nur mehr oder weniger gestört. In den meisten Fällen findet aber Blendung gerade in Netzhautmitte statt. Dann ist die für das Sehen wichtigste Stelle für gewisse Zeiten ausgeschaltet, also oft für Zeiten, die im heutigen Verkehrswesen längst hinreichenden Spielraum für Unfallverursachung bieten. Nach solcher Blendung erweist sich der Netzhautrand als notdürftiger Behelf für weiteres Erkennen. So vermag nach sehr starker Blendung von Netzhautmitte der Netzhautrand einen Hellgegensatz nach etwa 60 Sekunden zu bemerken, die Netzhautmitte aber erst nach etwa 350 Sekunden. Alle Bestrebungen zur Blendungsvermeidung müssen also darauf hinausgehen, daß Blendungen für Direktsehen unter allen Umständen ausgeschaltet werden (7).

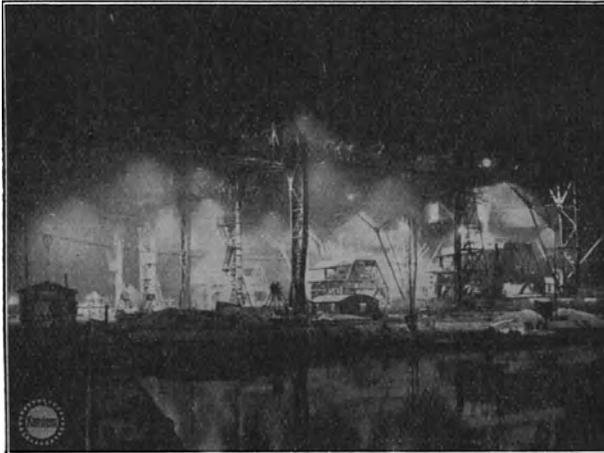


Abb. 33. Nichtblendende Anlage

Abb. 32 zeigt schlechte, blendende Beleuchtung, Abb. 33 gute, blendfreie Beleuchtung bei Verladebrücken. Nur im zweiten Fall ist die Arbeitsfläche, auf die es ankommt, gut beleuchtet; vgl. auch Abb. 94 a und 94 b.

6. Hellanpassung (Adaption). Mit Rücksicht auf die starken Helligkeitsschwankungen von Tag zu Nacht ist das Auge befähigt, einen ungeheuren Leuchtdichtenbereich, der sich von 10^{-6} bis 10^6 asb erstreckt, zu überbrücken, d. h. in ihm wahrnehmungsfähig zu sein.

Daher sind Angaben wie „hell“ oder „dunkel“ sehr unbestimmt; die durchschnittliche Beleuchtung eines Raumes, die als „hell“ empfunden wurde, erscheint sobald als dunkel, wie sie mit einem besser beleuchteten

Raum verglichen wird; oder eine vorzügliche Raumbelichtung mit künstlichem Licht wirkt geradezu dürftig, wenn sie mit Tageslicht zum Vergleich kommt.

Die Anpassung erfolgt auf zwei Arten:

1. *Die physikalische Anpassung.* Die Irisblende kann durch ihre Veränderlichkeit die Pupille des Auges auf die Grenzdurchmesser 2 und 8,5 mm, also auf die Pupillenfläche 3 und 60 mm² einstellen. Durch diese im Verhältnis 1 : 20 erfolgende Lichtstromregelung kann daher die insgesamt nötige Anpassung nicht geleistet werden. Pupillenregelung ist nur ein zusätzlicher Behelf, der allerdings den Vorzug hat, schnell zu arbeiten (8).

2. *Die physiologische Anpassung.* Die Netzhaut kann sich selbständig auf höhere oder geringere Empfindlichkeit einstellen (voraussichtlich durch Regelung des photochemischen Grundstoffs). Erst diese Anpaßart erfaßt die ganze Leuchtdichtenbreite. Wichtig ist, daß sie nur langsam erfolgt in Zeitspannen, die durch die Größe des Helligkeitssprunges bestimmt sind. Der erste Grad einer solchen Anpassung wird in wenigen Minuten, die völlige Anpassung bei großen Leuchtdichteunterschieden erst in etwa 1 Stunde erreicht (9).

Diese Tatsachen sind für Gefahrenverhütung durch richtige Beleuchtung von größter Bedeutung. Fälle schnellen Leuchtdichteabfalls gibt es auf Straßen z. B. dann, wenn bei großen Lampenabständen ein Lichtpunkt durchfahren wird und das Auge nach Verschwinden der Blendlichtquelle auf Dunkelsehen angewiesen ist. Die Größe der Anpaßzeiten ist bestimmend für das Anwachsen der Möglichkeit eines Verkehrsunglücks.

Jede Hellanpassung bedeutet für das Auge eine anstrengende Leistung. Diese dem Auge möglichst zu ersparen, ist Aufgabe des Beleuchtungstechnikers. Eine gute Beleuchtung muß daher sowohl örtliche wie zeitliche Gleichmäßigkeit besitzen. Diese Forderung der Anpaßschonung des Auges ist besonders wichtig für Beleuchtung von Arbeitsplätzen.

In praktischen Fällen soll nach Umschalten von einer hohen auf eine niedrige Leuchtdichte ($B_1 \rightarrow B_2$) ein Kontrast K sofort erkennbar sein, wenn das Umschalten als nicht von Nachteil gelten soll. Je größer der Sprung ist, um so größer muß dieser „Sofortkontrast“ sein. Näherungsweise läßt sich dieser bestimmen gemäß K (v. H.) = $2 \cdot B_1/B_2$ (7). Demnach muß beim Umschalten von 100 auf 1 asb der Sofortkontrast den Wert haben $K = 2 \cdot 100 : 1 = 200$ v. H. = 2 : 1. Genau so läßt sich zu gegebenem Kontrast angeben, welcher Leuchtdichtesprung zulässig ist, damit der Kontrast ungestört erkennbar bleibt.

7. Sehen bei farbigem Licht. Das Auge ist gewohnt, bei Sonnen- oder Himmelslicht zu sehen, das es als weiß empfindet. Glühlampenlicht ist im Vergleich zum Tageslicht rötlich, Tageslicht im Vergleich zum Glühlampenlicht bläulich. Solange nicht beide Lichtfarben zum Vergleich gebracht werden können, verschwindet ihr Farbeindruck; sie werden als weiß empfunden.

Die neuen Dampf lampen geben farbiges Licht. Erfahrungsgemäß ist die Sehtüchtigkeit weder bei einfarbigem (monochromatischem) Licht, noch bei mehrfarbigem oder bei allfarbigem Licht herabgesetzt. Voraussetzung dafür ist, daß dem Auge nur die eine Lichtfarbe zugänglich ist. Auch sind schädliche Wirkungen von einfarbigem oder mehrfarbigem Licht nicht beobachtet. Im Gegenteil: bei einfarbigem Licht besitzt das Auge die Fähigkeit, höchste Feinheiten im Material (Haarrisse) besser zu erkennen, als bei weißem.

Als unbrauchbar muß hingegen farbiges Licht dann gelten, wenn Farbeindrücke von Oberflächen gesehen werden sollen und nicht nur Formen oder Helligkeiten; denn eine Fläche erscheint schwarz oder farbenstelt, wenn sie nicht das Licht erhält, das sie infolge ihrer Farbigkeit einzig zurückwerfen kann. Sind Unterschiede zwischen der Farbzusammensetzung von Licht und Fläche vorhanden, so treten Farbverzerrungen ein (die an dem vom Quecksilberlicht beleuchteten Gesicht bekannt sind, in dem alle sonst rötlichen Gebiete schwärzlich-bläulich erscheinen).

8. Mischlicht. Neuerdings wird mit Vorteil eine Lichtart eingesetzt, die als eine Mischung aus dem Licht zweier Lichtquellen hergestellt wird. Meist verwendet man Licht aus Quecksilberlicht (blau-grün) und Glühlampenlicht (weiß-rötlich). So verbindet es die Vorzüge beider Lichtarten unter Milderung ihrer verschiedenen Nachteile. Als Mischungsverhältnisse werden gewählt (Qu. : Gl.) 1 : 1 bei anspruchsvollsten bis 8 : 1 bei anspruchlosesten Anlagen.

Mischlicht ist nur dann einwandfrei, wenn es überall, wo es beleuchtet, in dem einen gleichbleibenden Mischungsverhältnis auftritt; meist heißt das, daß es schon als Mischlicht ein Geleucht verlassen soll. Verfehltes Mischlicht liegt vor, wenn die verschiedenfarbigen Lichtteile aus verschiedenen Richtungen kommen. Die ungleichen Mischungsverhältnisse verursachen durch Farbkontraste dann Störungen, welche die Vorteile des Mischlichtes wieder aufheben. Beispiel: Straßenbeleuchtung mit reinem Dampflicht bei gleichzeitiger Schaufensterbeleuchtung mit Glühlampenlicht.

Zwielicht ist eine Art verfehlten Mischlichtes. Es vermengt sich bläuliches und rötliches Licht aus verschiedenen Richtungen. Die besondere Mangelhaftigkeit des Zwielichtes besteht darin: Das Auge stellt an tageslichtfarbigen Licht hinsichtlich der Stärke höhere Anforderungen als an Glühlampenlicht; im Zwielicht ist aber meist die Helligkeit des als unzureichend empfundenen Tageslichtes noch größer als die der zusätzlichen Lampen. Das Lampenlicht wird also als mangelhaft empfunden, obgleich es, ohne Tageslichtzusatz, als ausreichend wirkt.

Schriftumsnachweis.

(1) Schröder ZS. f. Sinn.-Phys. 57, 195, 1926. — (2) Baas, Osram-Lichtheft C 20. — (3) DIN 5031. — (4) O. Lummer, Grundlagen, Ziele und Grenzen der Leuchttechnik, München 1918. — (5) Fechner, Elemente der Psychophysik, Leipzig 1907. — (6) W. Arndt, Li. La. 19, 20, 1925 und 16, 589, 1927 sowie E. Meyer, Li. La. 16, 370, 1936. — (7) H. Lossagk, Das Licht 6, 127, 1936. — (8) A. König, Fernrohre und Entfernungsmesser, Berlin 1923, S. 16. — (9) Osram-Lichtheft 22. — Für diesen Abschnitt ist besonders zu empfehlen: L. Schneider, Einfluß der Beleuchtung auf die Leistungsfähigkeit des Menschen, Osram-Lichtheft A 1.

VI. Gesundheitsschutz durch Beleuchtung

1. Schonung des Auges. Während die Forderungen und Empfehlungen des Deutschen DIN-Werks (DIN-Blatt 5034 und 5035) für mittlere und höhere Werte dadurch bestimmt sind, daß gute Leistungen erzielt werden sollen, sind die Angaben der zulässigen Geringstwerte durch gesundheitliche Notwendigkeiten gegeben. Zustände zu schaffen, die eine Schonung des Auges als des unentbehrlichsten Arbeitsmittels gewährleisten, ist Grundpflicht der Beleuchtungstechnik.

Zwar hat das Auge eine ungewöhnliche Anpaßfähigkeit auf Helligkeiten. Trotzdem soll sie nicht unnötig beansprucht werden. Das Auge muß als

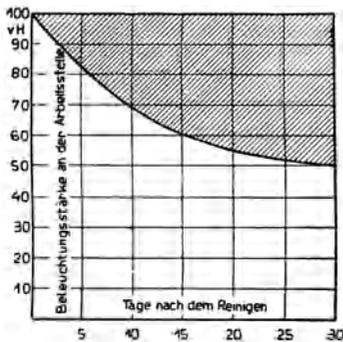


Abb. 34. Geleuchtverschmutzung und Beleuchtungsstärke

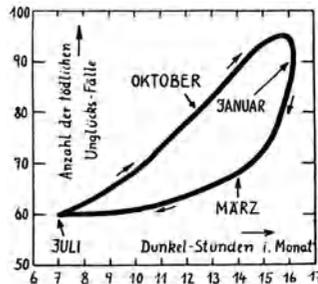


Abb. 35. Jahresunfallskennlinie

kostbarster Sinn gesund und leistungsfähig erhalten werden. Schonung des Auges ist aber zugleich Schonung der gesamten Arbeitskraft. Denn Überlastung des Auges wirkt sich nicht nur unmittelbar auf dieses aus, sondern auf den gesamten Leistungszustand des Menschen. Lichtpreisgestaltung und Anerkennung der Bedürfnisse des Auges müssen so werden, daß der arbeitende Mensch nicht mehr Schaden am Auge zu erleiden braucht. Dieses wird nur dadurch durchführbar, daß „gutes“ Licht nicht als viel Licht, sondern als richtig eingesetztes erkannt wird.

In erster Linie sind es die Forderungen auf Beleuchtungsstärke, Gleichmäßigkeit und Blendungslosigkeit, denen mit Rücksicht auf das Auge genügt werden muß. Anhaltende Arbeit bei zu geringer Beleuchtungsstärke ist nachweislich die Ursache von Augenerkrankungen. Durch starke Ungleichmäßigkeit wird das Auge überanstrengt und kommt schnell zur Ermüdung. Starke Blendung beansprucht das Auge übermäßig und verringert die Sehkraft nicht nur im Blendungszeitraum, sondern noch während der Blendungsnachwirkzeit. Wiederholte Blendungsbeanspruchung schwächt das Sehvermögen auf die Dauer. Erfahrungsgemäß grenzen die Beträge der Beleuchtungsstärke, Gleichmäßigkeit und Blendungslosigkeit zahlreicher

Beleuchtungsanlagen (sowohl in Wohnungen wie auf Arbeitsstätten, besonders noch denen kleinerer Betriebe) an die unmittelbar dem Auge schädlichen Werte. Der Beleuchtungstechniker muß also vielerorts erst die dem Auge gemäßen gesunden Arbeitsbedingungen schaffen (1).

Daß zu guter Beleuchtung auch Wartung der Anlage gehört, zeigt Abb. 34, aus der die Abnahme der Beleuchtungsstärke durch Verstaubung zu ersehen ist. Eine noch zulässige Beleuchtung kann so bei starken Außenwirkungen mit der Zeit unzulässig werden.

2. Unfall und Beleuchtung. Die Beleuchtung hat einen beträchtlichen Einfluß auf Unfälle, ihre Vermehrung oder Verhütung. Dies wird deutlich an Abb. 35, die die Abhängigkeit der Anzahl der Unfälle von den Jahreszeiten zeigt. Sie ist im Winter am größten, im Sommer am kleinsten. Hieran sind mancherlei Umstände beteiligt. Die Unfallstatistik (2) hat ergeben, daß 60 v. H. aller Unfälle auf Beeinträchtigung der Wahrnehmungsbedingungen zurückzuführen sind. Diese Bedingungen sind in 20 v. H. rein optisch-physiologischer Art. Die Hälfte davon ist als beleuchtungstechnisch erwiesen. Man muß also 10 v. H. aller Unfälle der Beleuchtung zur Last legen. In jeder zweiten Minute findet im Deutschen Reich ein Verkehrsunfall statt. In jeder Stunde erfolgen also drei Verkehrsunfälle infolge unzureichender Beleuchtung. Ähnlich dürften die Verhältnisse bei Betriebsunfällen liegen (3).

3. Gesundheit des Tageslichts. In Hinsicht auf volle Ausnutzung des Tageslichts ist zu beachten: Unsichtbares ultraviolette und ultrarotes Licht sind für die menschliche Gesundheit unentbehrlich. Dieses Licht sollte daher nicht erst dem Erkrankten, sondern schon dem Gesunden dauernd hinreichend zuteil werden.

Das übliche Fensterglas läßt in die Räume praktisch kein Ultraviolett ein. Erst „Uviolgläser“ lassen den wichtigsten Bereich zwischen 0,290 μ und 0,315 μ („Dorno-Bereich“) hindurch. Seine Verwendung sollte daher für alle die Fenster erwogen werden, die den Räumen dienen, in denen sich Menschen die meiste Zeit der Hellstunden aufhalten; überdies in Schulen, Krankenhäusern und Erholungsheimen. Auch in Gewächshäuser und Kleintierfarmen sind Uviolgläser mit wirtschaftlichem Erfolg zum Einsatz gebracht. Da auch das zerstreute Himmelslicht ultraviolettreich ist, sollte Uviolglas auch an Nordseiten eingesetzt werden.

Im übrigen sollten dunkle, lichtundurchlässige Vorhänge möglichst verschwinden. Ebenfalls die nicht nur lichtfärbenden, sondern auch lichtentwertenden Buntgläser in Fensteroberteilen oder Glasveranden. Ebenso sollten auch lichtraubende Bäume vor Fenstern von Arbeitsräumen beseitigt werden, soweit sie nicht bei den Berechnungen der Fensteröffnungen einbezogen sind. Es sollten die Empfehlungen für Häuserfrontabstände beachtet werden (Abstand gleich dem zweifachen der Häuserhöhe!), wodurch jedem Arbeitsplatz unmittelbares Himmelslicht gewährt werden soll. Auch sollten Verkaufsräume hinter tageslichtverbrauchenden Schaufenstern von irgendeiner Seite her ausreichendes Tageslicht erhalten. Andererseits sollten, soweit Mangel an Fensterfläche besteht, Räumlichkeiten, in denen

man sich nur vorübergehend aufhält (Bad usw.), nur künstlich beleuchtet werden, wenn Mangel an Fensterfläche besteht; damit wird für die wichtigeren Räume mehr Tageslicht gewonnen.

Diese Darlegungen zeigen, daß beim Beleuchtungsentwurf Gesichtspunkte der Volksgesundheit eine bedeutende Rolle spielen müssen.

4. Abschluß. Damit ist die Gesamtheit der Grundlagen zur Darstellung gelangt. Es hat sich gezeigt, daß zur vollen Beurteilung einer Beleuchtungsanlage viele Gesichtspunkte herangezogen werden müssen. Vom Beleuchtungstechniker wird, zumal noch psychologische und ästhetische Voraussetzungen dazukommen, eine beträchtliche Vielseitigkeit verlangt. Die besonderen Schwierigkeiten des vollständigen Beleuchtungsentwurfs bestehen nicht etwa in Schwierigkeiten der einzelnen Gesetzmäßigkeiten, sondern darin, daß es gilt, ganz verschiedenartige Forderungen gemeinsam zu berücksichtigen. Je nach der Anlage sind diese oder jene Gesichtspunkte besonders zu bevorzugen. Daher kommen beim Beleuchtungsentwurf die gesamten Grundlagen nicht immer in gleicher Weise zur Geltung.

Schrifttumsnachweis

(1) W. Schmidt, Das Licht **6**, 111, 1936. — (2) H. Lossagk, Das Licht **6**, 101, 1936. — (3) H. Lossagk, Sinnestäuschung und Verkehrsunfall, Berlin 1937.

Anhang zu Teil A

Beispiele.

Zu Abschnitt I:

1. Auf den vier gleich großen Teilflächen der Fläche 10 m² sei gemessen $E_1 = 100$, $E_2 = 80$, $E_3 = 150$, $E_4 = 110$ lx. Der Gesamtlichtstrom zur Fläche ist dann gemäß I, 2:

$$\Phi_0 = F_0 \cdot \frac{\sum E_n}{n} = 10 \cdot \frac{440}{4} = 1100 \text{ lm.}$$

2. Gesucht ist die Höhenänderung, die bei senkrechtem Lichteinfall nötig ist, um E von 9 lx auf 20 lx zu steigern, wenn 9 lx bei 10 m Höhe herrschen. Gemäß Formel [2] in I, 3 ist

$$r_2 = r_1 \cdot \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} = 10 \cdot \sqrt{\frac{9}{20}} = 6,7 \text{ m; } \Delta r = 3,3 \text{ m.}$$

3. Welche Lichtstärke herrscht, wenn der Lichtstrom 100 lm durch den Raumwinkel tritt, der auf der Kugel von 3 m Durchmesser die Fläche 0,5 m² abschneidet? Gemäß I, 4:

$$\omega = \frac{F}{r^2} = \frac{0,5}{1,5^2} = 0,221; \quad J = \frac{\Phi}{\omega} = \frac{100}{0,221} = 452 \text{ HK.}$$

4. Wie groß ist, in v. H., die E -Änderung, wenn die Beleuchtungsfläche von der Stellung 60° auf 40° gedreht wird? Gemäß I, 5:

$$\frac{\Delta E_{\beta-\alpha}}{E_\alpha} = \frac{\cos 40}{\cos 60} - 1 = 1,53 - 1 = 53 \text{ v. H.}$$

5. Welche Lichtstärke ist nötig, um beim Lichteinfallswinkel 30° beim Abstand 20 m die Be-St. 10 lx zu erzeugen. Gemäß I, 5 [5]:

$$J = \frac{E \cdot r^2}{\cos \alpha} = \frac{10 \cdot 400}{0,866} = 4520 \text{ HK.}$$

Zu Abschnitt II:

1. Welchen Gesamtlichtstrom erhält die Fläche, die je 4 m^2 die Beleuchtungsstärken 20, 30, 10, 5 lx erhält? (II, 1)

$$E_m = \frac{1}{4} \cdot 65 = 16,6 \text{ lx. } \Phi_0 = 4 \cdot 4 \cdot 16,6 = 260 \text{ lm.}$$

2. Welchen Wert nimmt E an zu $d = 20 \text{ m}$, $l = 10 \text{ m}$, $J_d = 10000 \text{ HK}$? (II, 3)

$$d/l = 2, f_{dl} = 0,089; \text{ also } E = \frac{10000}{100} \cdot 0,089 = 8,9 \text{ lx.}$$

3. Wie hoch über der Mitte einer Kreisfläche vom Durchmesser 50 m muß eine Punktlichtquelle angebracht sein, wenn $G_{lm} = 30 \text{ v. H.}$ sein soll?

$G_{lm} = 0,3 \equiv f_{dl}$. Dazu gibt $f \div \frac{d}{l} = 1,1$. $d = 25 \text{ m}$; also $l = 22,7 \text{ m}$.

Zu Abschnitt III:

1. Lichtquellenausdehnung: 40 cm; Schatterausdehnung: 20 cm; Schatterhöhe: 40 cm; Lichtpunkthöhe: 200 cm. Dann ist die Kernschattenausdehnung gemäß III, 2:

$$K = 20 \left(1 + \frac{1}{200/40 - 1} \right) - 40 \cdot \left(\frac{1}{200/40 - 1} \right) = 15 \text{ cm.}$$

Die Halbschattenausdehnung ist $H = 20 (1 + 0,25) + 40 \cdot \frac{1}{4} = 35 \text{ cm}$. Die Halbschattenringbreite beträgt $R = \frac{2 \cdot 40}{4} = 20 \text{ cm}$.

2. Gemessen ist: $E_0 = 200 \text{ lx}$, $E_I = 120 \text{ lx}$, $E_{II} = 150 \text{ lx}$, $E_{III} = 165 \text{ lx}$. Für alle Schattigkeiten ergibt sich gemäß III, 3: $E_{g,1} = 200 - 120 = 80 \text{ lx}$; $E_{g,2} = 50 \text{ lx}$; $E_{g,3} = 35 \text{ lx}$. Also $S_1 = 80 : 200 = 0,40$; $S_2 = 0,25$; $S_3 = 0,175$. Also $S_0 = 0,4 + 0,25 + 0,175 = 0,83$. Gleiches folgt aus der Hauptformel $S_0 = 3 - \frac{120 + 150 + 165}{200} = 0,83$. Für die Gruppenteilschattigkeiten gilt:

$E_{I,II} = 70 \text{ lx}$, $E_{II,III} = 115 \text{ lx}$, $E_{III,I} = 85 \text{ lx}$. Also $S_{1,2} = (200 - 70) : 200 = 0,65$; $S_{2,3} = 0,43$; $S_{3,1} = 0,58$. Auch daraus folgt $S_0 = 0,83$. Die „Zerstretheit“ des Lichtes ist $Z = 1 - 0,83 = 0,17$.

B. Technische Mittel

VII. Beleuchtungsmessung

1. Beleuchtungs- und Schattenmesser. Der Beleuchtungsentwurf hat das Ziel, die für einen bestimmten Zweck beste Ausführungsart der Anlage so vollständig wie möglich vor Erstellung der Anlage anzugeben. Derjenige, der den Entwurf durchgeführt hat, wird möglichst immer eine Vermessung der erstellten Anlage durchführen. Erst die Messungen geben ein Urteil darüber, wieweit es im Entwurf gelungen ist, alle Sonderumstände zu berücksichtigen und allen Sonderanforderungen gerecht zu werden. Wegen der immerfort anderen Verhältnisse bei Beleuchtungsanlagen gehört die Beleuchtungsmessung zum Beleuchtungsentwurf. Während der Beleuchtungsentwurf im wesentlichen das Richtige sicherstellen soll, werden auf Grund der Beleuchtungsmessung etwa noch vorhandene Mängel zu beseitigen sein. Es gibt aber, wie unter den Anwendungen behandelt, Fälle, in denen ein Beleuchtungsentwurf leicht versagt; dann wird ein Entwurf nur einen ersten groben Anhalt geben; die Anlage muß dann im einzelnen unter dauernder Beleuchtungsmessung erstellt werden. So gehört der Beleuchtungsmesser zu den unentbehrlichsten Hilfsmitteln des planenden und ausführenden Beleuchtungstechnikers.

Man unterscheidet zwei Arten von Beleuchtungsmessern (Luxmetern):

1. Beleuchtungsmesser mit Zeigerausschlag („objektive“). Sie sind empfehlenswert, wenn Messungen vorzunehmen sind, die sehr umfangreich sind oder schnell geschehen müssen und bei denen auf möglichst große Genauigkeit verzichtet wird. Sie bestehen aus einer Photozelle und einem hochempfindlichen Strommesser.

Die Photozellen sind „Sperrschichtzellen“ entweder aus Kupferoxydulkupfer oder aus Selenideisen. Die Grenzschicht sperrt den elektrischen Strom in einer Richtung. Fällt Licht auf den Kristall, so werden in ihm Elektronen ausgelöst, die in das Metall gelangen. Da der Rückweg gesperrt ist, tritt eine Spannung zwischen Kristall und Metall auf. Diese kann in einem Stromkreis einen Strom erzeugen. Den Stromkreis bildet ein Strommesser. Je geringer sein Widerstand, um so besser sind aufgenommener Lichtstrom und Stromstärke verhältnisgleich (1).

Die Photozelle ersetzt das Auge aber nur, wenn ihre spektrale Hellempfindlichkeit der des Auges gleicht. Das ist bei diesen Zellen nicht ganz der Fall, kann aber durch ein Vorsatzfilter nach Dresler völlig erreicht werden (2).

2. Beleuchtungsmesser für Augeneindruck („subjektive“). Bei ihnen hat das Auge zu entscheiden, ob die Helligkeit zweier Vergleichsfelder gleich groß ist. Das eine Vergleichsfeld erhält seine Helligkeit von einer Auffangfläche gemäß der zu messenden Beleuchtungsstärke; das andere von einer Hilfslichtquelle im Beleuchtungsmesser; diese muß mit gleichbleibender Spannung brennen; ihr Licht wird durch eine Schwächungsvorrichtung so geregelt, bis Gleichheit der Helligkeiten entsteht. An der Stellung der Schwächungsvorrichtung, die eine Eichleiter trägt, ist die Beleuchtungsstärke ab-



Abb. 36. Beleuchtungsmesser nach Voege

zulesen. Diese Beleuchtungsmessung ist infolge der Mitarbeit des Auges anstrengender und zeitraubender; sie sichert aber bei richtigem Betrieb der Hilfslichtquelle eine gute Beleuchtungsmessung. Beide Arten der Meßgeräte bedürfen gelegentlicher Nacheichung in licht-technischen Laboratorien; die ersten wegen Veränderlichkeiten der Zellen, die zweiten wegen derjenigen der Hilfslichtquelle.

Abb. 36 gibt ein besonders für den Beleuchtungspraktiker geeignetes Gerät von Voege an. Es gestattet sowohl die Messung mit Ausschlag wie nach Eindruck. Mit erster Art mißt es von 1 bis 100 000 lx, mit der zweiten (was für Straßenbeleuchtung wichtig ist) von 0,01 bis 100 000 lx. Wichtig ist, daß hier vor jeder Meßreihe mit Ausschlag eine Kontrolle mit Eindruck vorgenommen werden kann. [Das Gerät ist überdies zu Lichtstärken-, Leuchtdichten- usw. Messungen geeignet.] (3).

Die wichtige Meßregel für Beleuchtungsmessung lautet: Man messe da, wo man sehen will; und so, wie man sehen will. Das heißt: man halte die Meßfläche (Zelle oder Auffangfläche) dahin, wo der E -Wert gesucht wird; und man richte die Fläche so ein, wie die Ebene, in der die gesuchten E -Werte liegen. Auf Arbeitsflächen muß also so gemessen werden, wie das Arbeitsgut liegt; auf Straßen waagrecht oder lotrecht; in Räumen meist nur waagrecht in der Lichtnutzebene 1 m über dem Boden.

Der Beleuchtungsmesser ist zu Schattigkeitsmessungen geeignet, wenn er eine Abschattungsvorrichtung der Lichtauffangfläche besitzt. Die Schatterfläche muß so groß sein, daß sie den unmittelbaren Zutritt von Licht von der abgeschatteten Lichtquelle verhindert. Der Kernschatten des Schatters muß so groß sein wie die Lichtauffangfläche. Aus der Gleichung für den Kernschatten (III, 2) Fall 2 folgt für den Schatterdurchmesser

$$S = K + \frac{h}{l} (L - K).$$

Darin ist der Kernschattendurchmesser K gleich dem der Meßfläche zu setzen (4).

Der Schatter ist um so besser, je näher er der Lichtquelle ist; denn mit abnehmendem Abstand von der Meßfläche nimmt der Raumwinkel notwendig zu, den er einnimmt und damit die Abdeckung anderer Raumteile; es sind aber Schatterabstände größer als 20 cm kaum üblich. Ob der Schatter richtig ist, erkennt man an der Überdeckung der Meßfläche vom Kernschatten. Hat das Geleucht einen vom Kreis wesentlich abweichenden Querschnitt, so muß ein ähnlich geformter Schatter gebildet werden (5).

Schriftumsnachweis

(1) R. Fleischer und H. Teichmann, Die lichtelektrische Zelle, Leipzig 1932, S. 138—153. — (2) A. Dresler, Das Licht **3**, 41, 1933 und R. Sewig, Objektive Photometrie, Berlin 1935. — (3) W. Voegelé, Li. La. **18**, Heft 4, 1924; **25**, 348, 1936. — (4) K. Norden, Grundlagen der Schattentechnik, 1933. — (5) Wegen des umfangreichen Gebiets der Lichtmessung (Photometrie), von der Beleuchtungsmessung nur ein Teil ist, sei verwiesen auf: E. Liebenthal, Praktische Photometrie und A. Richter, Beleuchtungstechnik, Leipzig 1936, S. 66—136.

VIII. Beleuchtungsbaustoffe

1. Durchlaßstoffe. In IV, 6 ist der Lichtdurchlaß τ erklärt. Zum Entwurf benötigt man die τ -Zahlwerte der üblichen Baustoffe. Aufstellung 5 gibt diese an. Man erkennt, daß die Streuung gering ist,

wenn der Durchlaß hohe Werte erreicht. Gute Streuung wird also immer nur bei Durchlaßwerten um oder unter 50 v. H. möglich sein (1).

Die τ -Werte, die bei anderen als den angegebenen Glasdicken eintreten, lassen sich für die Voll-Opalgläser berechnen mit

$$\log \tau_2 = \frac{D_1}{D_2} \cdot \log \tau_1,$$

worin D die Glasdicken bedeuten. Die anderen Baustoffe sind weitgehend dickenunabhängig.

Die Angaben über Streuvermögen sind bisweilen für die Auswahl des Stoffes maßgebend, so bei Glasdecken, die gute Gleichmäßigkeit aufweisen sollen¹⁾.

A u f s t e l l u n g 5

Durchlaßstoff	Dicke mm	Lichtdurchlaß τ (v. H.)	Streuung
Klarglas	3	90	keine
Ornamentglas	3—6	55—90	gering
Mattglas,			
eintrittsseitig	2,5	82	gering
austrittsseitig	2,5	75	gering
beidseitig			mittel
Opalüberfangglas	2,5	56	sehr gut
Voll-Opalglas,			
licht	2,0	44	gut
dicht	2,5	25	sehr gut

A u f s t e l l u n g 6

Rückwurfstoff	Rückwurf ρ in v. H.	Streuung
Glassilberspiegel	80—88	keine
Aluminium	63	gering
Stahl, blank	60	keine
Eisen	55	keine
Emaile, weiß	67	sehr gut
Zeichenpapier, weiß	75	sehr gut
Gips	85	sehr gut
Farben (siehe Aufstellung 26)		gut, soweit Matt- anstriche
Straßendecke	8—30	(2)
Steinkohle	1	

2. Rückwurfstoffe der Lichttechnik. Auf allen Beleuchtungsflächen, wie bei Wandbekleidungen oder Arbeitsflächen und Spiegeln kommen die lichtrückwerfenden Eigenschaften zur Wirkung. Die Aufstellung 6 gibt die Zahlwerte für den Lichtrückwurf derartiger Stoffe an (1).

¹⁾ Dieser Abschnitt beschränkt sich auf die Baustoffe, die beim Beleuchtungsentwurf einzubeziehen sind. Er läßt also alle rein lichttechnischen Baustoffe, die für den Aufbau von Lichtquellen und Geleuchten entscheidend sind, außer acht. Dieserhalb sei auf Darstellungen der Lichttechnik (A. Winter, „Beleuchtungstechnik“ oder W. Köhler, „Lichttechnik“) verwiesen.

Der hohe τ -Wert eines Silberspiegels erklärt den hohen Wirkungsgrad von Geleuchten mit Silberspiegeln. Der äußerst geringe Lichtrückwurf von dunklen Wandbekleidungen zeigt, wie wichtig für wirtschaftliche gute Raumbeleuchtung ein heller Wandanstrich ist; daher ist es häufig Verschwendung, eine Verbesserung der Geleuchte oder eine Erhöhung der Lampenleistung vorzunehmen, ehe nicht die Wandbekleidung einwandfrei ist. Da unverhängte Fensteröffnungen fast wie schwarze Flächen wirken, so haben helle Fenstervorhänge in Räumen mit großer Fensterfläche große Bedeutung. Die geringen Zahlwerte für Häuserfrontbekleidungen dunklerer Art weisen darauf hin, daß in Straßen, die so eng sind, daß zahlreiche Räume hauptsächlich nur solches Licht erhalten, das von Häuserfronten zurückgeworfen ist, möglichst nur helle Hausfrontbekleidungen gewählt werden sollten. Die Rückwurfzahlen von Straßendecken zeigen, daß auf ihnen das Licht sehr schlecht zur Ausnutzung gelangt; man könnte diese geringen Werte dadurch vorteilhaft ausnutzen, daß man an alle Verkehrsmittel die Forderung heller Farbe richtet, so daß durch den hohen Kontrast gute Erkennbarkeit gewährleistet wäre. Schließlich ist zu entnehmen, daß dunkles Arbeitsgut, z. B. Kohlen oder schwarzes Leder, sehr stark beleuchtet werden muß, wenn auf ihnen eine Leuchtdichte erreicht werden soll, die brauchbare Sichtverhältnisse gibt.

3. Luxferprismen und Uviolgläser. Der Beleuchtung durch Tageslicht dienen zwei Gläser, die eine besondere Hervorhebung verdienen; sie beide haben eine besondere, anderen Gläsern nicht zugeordnete Aufgabe.

1. In vielen Fällen kommt Licht in Räume ausschließlich so steil, daß das einfallende Licht nur die vordersten Flächen des Raumes trifft. Um aus der steilen Lichteinfallrichtung eine angenähert raumdurchquerende zu machen, bringt man „Luxferprismen“ zur Anwendung. Dadurch erhalten die hinteren Lichtnutzflächen nicht nur Licht, das an den Raumflächen zurückgeworfen ist, sondern solches, das, bis auf die Richtungsänderung, unmittelbar als Himmelslicht ankommt. In ihnen wird die Lichtablenkung in einem keilförmigen Glasprisma ausgenutzt (Abb. 37). Das Prismenglas ist auf der Lichteinfallfläche meist glatt; auf der Lichtaustrittsfläche trägt es keilförmige Rippen, die für die ganze Glasfläche eine gleichmäßige Lichtablenkung bewirken. Luxferprismen eignen sich

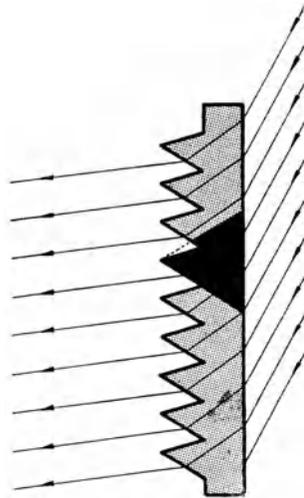


Abb. 37. Luxferprismen-Querschnitt

sowohl an lotrechten Fenstern wie an waagerechten (Oberlichtern), sowie für jede schräge Zwischenlage. Da die Lichtdurchlässigkeit mit steilerem Lichteinfall (vgl. Abb. 25) nachläßt, ist es vorteilhaft, die Luxferprismenfläche möglichst senkrecht zum Lichteinfall einzustellen. Abb. 38 veranschaulicht eine Anwendungsmöglichkeit.

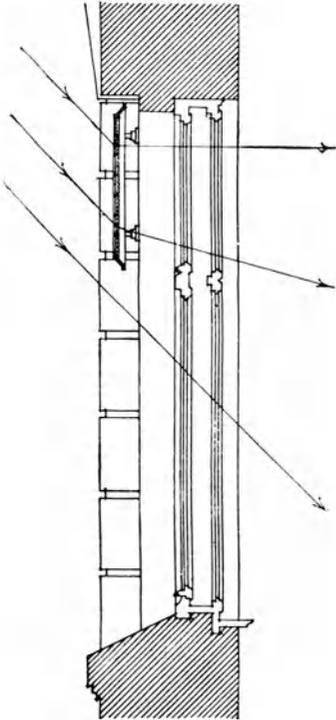


Abb. 38.

Fenster mit Luxferprismeneinsatz

2. Um von dem gewöhnlichen Tageslicht nicht nur den sichtbaren Teil in die bewohnten Räume gelangen zu lassen, wie es die üblichen Fenstergläser tun, sondern auch den für Gesundheit und Wohlergehen wichtigen ultra-

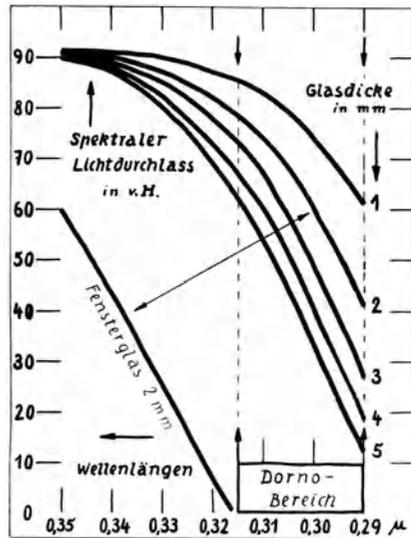


Abb. 39.

Ultraviolett durchlaß von Uviolglas

violetten, verwendet man Uviolgläser. Sie sind durchlässig für den „Dornbereich“ der Ultraviolettstrahlung von 290 bis 315 $\mu\mu$, der biologisch besonders wirksam ist. Abb. 39 zeigt die Durchlässigkeitskurven für verschiedene Wellenlängen und Glasdicken. Minderwertige Uviolglasarten weisen eine Abnahme der Ultraviolett durchlässigkeit im Laufe der Zeit auf; diese dürfte bei guten Gläsern nicht nennenswert sein.

Schriftumsnachweis

- (1) E. Sumerer, ETZ, Heft 43, 1930 (Osram-Lichtheft S. 8). —
 (2) R. G. Weigel und P. Schlüssler, Das Licht 5, 161, 1935.

IX. Beleuchtungslichtquellen

1. Lichtquellenarten. Als Lichtquellen für Beleuchtung kommen in Frage: abgesehen von der Sonne in erster Linie die Glühlampen; ferner die Bogenlampen und die Hochleistungsdampflampen; weiterhin die Gasglühlichtlampen, schließlich die Luminophorlampen. Die fünf Lampenarten unterscheiden sich durch die Art der Lichterzeugung. Bei den Glühlampen wird das Licht durch die hohe Temperatur des Glühdrahts erzeugt. Bei den Dampf lampen wird mit Hilfe eines Stromes eine Gas- oder Dampfsäule zum Leuchten gebracht. Bei den Bogenlampen überlagert sich das Leuchten der Kohlelektroden und das der stromdurchflossenen Luftschicht, in der Leuchtdämpfe enthalten sind; sie werden aus den glühenden Kohlen und den in ihnen enthaltenen Leuchtzusätzen nachgeliefert. Diese Lichtquelle nimmt also eine Zwischenstellung zwischen den beiden Grenzarten der Dampf- und der Glühlampe ein. In den Gasglühlichtbrennern wird die Temperatur des schwach leuchtenden Brenngases übertragen auf einen weißleuchtenden Oxydkörper¹⁾. Eine Sonderstellung nehmen die Luminophorlichtquellen ein, die erst am Anfang der Entwicklung stehen: einerseits senden sie Licht aus, das von stromdurchflossenen Gasen kommt; andererseits besitzen sie eine Hülle aus „Luminophoren“, die unsichtbare Strahlung der Gase in sichtbare verwandelt.

Der Rahmen dieser Darstellung erlaubt es nicht, die Theorie der Lichterzeugung näher zu geben oder nähere Angaben über Form, Aussehen, Maße und sonstige Einzelheiten der Lichtquellen zu bringen. Es muß daher auf das hierüber reichlich vorhandene Schrifttum verwiesen werden (1).

Entsprechend der Lichterzeugung unterscheiden sich die Lichtquellen im äußeren Aufbau, in der elektrischen Energieversorgung, in der Fähigkeit, Energie in Licht zu verwandeln, und in der Lichtfarbe. Die für den Beleuchtungsentwurf unbedingt wichtigen Eigenschaften werden im folgenden geschildert.

2. Lichtstrom und Lichtausbeute. Die für Beleuchtung wichtigste Größe einer Lichtquelle ist der Gesamtlichtstrom, den sie aussendet.

¹⁾ Für Beleuchtung tritt das Gasglühlicht immer mehr in den Hintergrund. 1935 war selbst bei Straßenbeleuchtung, bei der sich Gaslicht nur noch nennenswert hält, das Verhältnis von Elektrizität zu Gas wie 11 : 9. ein Verhältnis, das sich durch die Dampf lampen in Zukunft noch zuungunsten des Gaslichts auswirken dürfte. Es wird deshalb das Gaslicht in dieser Darstellung nicht weiter berücksichtigt (Seeger, Das Licht 1935, S. 128).

Diese für alle Rechnungen grundlegenden Zahlwerte sind in der Aufstellung 7 für die meist zu verwendenden Glühlampen enthalten¹⁾.

Aufstellung 7

Leistungs- aufnahme } Nennspannung	15	25	40	60	75	100
	Osram-Einheitslampe (matt oder klar)					
20—165 (A)	150 (10,0)	270 (10,8)	510 [560] (12,7)	870 [915] (14,5)	1160 [1210] (15,5)	1660 [1710] (16,6)
170—260 (A)	135 (9,0)	240 (9,6)	400 [480] (10,0)	690 [805] (11,5)	940 [1060] (12,5)	1380 [1510] (13,8)

Bemerkung: In eckiger Klammer stehen Werte der „D-Lampen“.

Leistungs- aufnahme } Nennspannung	150	200	300	500	750	1000	1500	2000
	Osram Nitra-Lampe (klar)							
100—165 (A)	2620 (17,4)	3620 (18,1)	6000 (20,0)	10 500 (20,1)	16 500 (22,0)	23 500 (23,5)	35 000 (23,3)	44 000 (22,0)
200—260 (A)	2280 (15,2)	3220 (16,1)	5250 (17,5)	9500 (19,0)	15 300 (20,4)	21 000 (21,0)	34 000 (22,6)	41 600 (20,8)

Die Lichtströme, bezogen auf gleiche elektrische Leistungen, sind bei Mattglaslampen kleiner als bei Klarglaslampen; sie sind bei Lampen mit Opalglas noch kleiner als bei solchen mit Mattglas. Ferner zeigen die als D-Lampen bezeichneten Doppelwendellampen höhere Lichtströme als die nur einfach gewendelten. Durch die Wendelung des Glühdrahtes wird eine Selbstaufheizung des Glühdrahtes durch Strahlung erreicht, bei Doppelwendelung wird diese weiter gesteigert; der Energieverbrauch wird also für gleiche Lichtmengenerzeugung günstiger. Die als Nitalampen bezeichneten Glühlampen haben Gasfüllung, wodurch die bei den hohen Temperaturen starke Glühdrahtverdampfung herabgesetzt wird.

Die entsprechenden Tafeln sind für Bogenlampen in Aufstellung 8 und für Dampfampfen in Aufstellung 9 gegeben. Für Luminophorlampen liegen zur Zeit Werte von A zwischen 30 und 100 lm/Watt vor. Es fallen die durchweg höheren Werte als die der Glühlampen auf; sie erreichen bei den Luminophorlampen ihre Höchstwerte, bei den Dampfampfen die nächsthöheren, bei den Bogenlampen die den Glühlampen nächststehenden.

¹⁾ Für die nicht mitgeteilten Lichtstromwerte aller übrigen Glühlampen sei auf die Firmenschriften verwiesen. Die ständige Vervollkommnung der Lichtquellen und Verbesserung der Lichtstromwerte läßt es unangebracht erscheinen, die augenblicklichen Lichtstromtabellen aller für Beleuchtung verwendbarer Lichtquellen vollständig aufzunehmen.

Aufstellung 8

Gleichstrom			Wechselstrom		
<i>N</i> Watt	ϕ lm	<i>A</i> lm/Watt	<i>N</i> einschl. Drossel Watt	ϕ lm	<i>A</i> lm/Watt
550	13 800	25,1	460	11 000	23,9
660	16 200	24,6	575	14 000	24,4
825	20 700	25,1	770	19 000	24,7
1100	27 500	25,0	960	21 500	22,4
1375	34 600	25,1	1150	26 400	23,0
1650	44 000	26,6	1540	36 400	23,6
Mittel: 25,3			Mittel: 23,7		

Aufstellung 9

Bezeichnung	<i>N</i> einschl. Drossel Watt	ϕ lm	<i>A</i> lm/Watt
HgH 300	100	3 300	36,6
HgH 500	150	5 500	39,2
HgH 1000	280	11 000	41,5
HgH 2000	475	22 000	44,0
HgH 5000	1050	55 000	52,5
Na 300	63	3 300	52,4
Na 400	80	4 400	55,0
Na 500	94	5 500	58,5
Na 650	105	7 200	68,6
Na 1000	160	11 000	68,8

Der Erfolg der Lichterzeugung wird durch die „Lichtausbeute“ *A* gekennzeichnet; darunter versteht man das Verhältnis von entstehendem Lichtstrom zu aufgewandter Leistung; gemessen in lm/Watt gemäß (2)

$$A = \phi : N. \quad [20]$$

Die Lichtausbeuten sind den Tafeln ebenfalls zu entnehmen. Welchen Schwierigkeiten Lichterzeugung begegnet, erkennt man daraus, daß bei verlustloser Energie-Lichtumwandlung 690 (689,6) lm durch ein Watt erzeugt werden könnten.

Die Glühlampen haben die geringsten Lichtausbeuten; das liegt im Wesen der Lichterzeugung durch Metallerwärmung. Die Glühlampen höherer Leistung sind denen niederer Leistung an Lichtausbeute beträchtlich überlegen; das ist daher möglich, weil die bei größeren Leistungen größeren Glühdrahtdicken mit Rücksicht auf die Fehler der Glühdrahtdicken eine stärkere Strombelastung und daher höhere Temperatur ertragen als die dünneren. Aus gleichen Gründen sind die Glühlampen niedrigerer Spannung denen höherer überlegen.

Wegen ihrer Handlichkeit und vielseitigster Einsatzfähigkeit behauptet die Glühlampe nach wie vor trotz geringster Lichtausbeute ihren Platz. Die Bogenlampen eignen sich wegen der hohen Lichtströme, der umfangreichen Abmessungen besonders für Beleuchtung großer Plätze und Hallen. Die Dampf lampen sind Beherrscher der Beleuchtungsanlagen, bei denen gute Wirtschaftlichkeit erwünscht ist und Farbigeit des Lichts in Kauf genommen werden kann, also auf Fernverkehrsstraßen und Arbeitsplätzen für gewisse farzunabhängige Arbeiten. Es gibt also nicht „die“ beste Lichtquelle; sondern eine jede erfüllt zur Zeit einen von den anderen in der Vollkommenheit nicht erreichten Zweck.

Wichtig für den Beleuchtungsentwurf ist nun, daß nur eine bestimmte Wertereihe von Lichtströmen zur Verfügung steht. Man muß sich also den vorhandenen Werten anpassen. In dieser Gegebenheit beruht eine der immer wieder auftretenden und für den Entwurf geradezu kennzeichnenden Erschwerungen der vollkommenen Lösbarkeit von Beleuchtungsaufgaben. Dies tritt immer um so fühlbarer hervor, je geringer und je unveränderlicher die Anzahl der Lichtpunkte ist. Bei verhältnismäßig großer Lichtpunktanzahl kann sie meist ohne Nachteil derart umgeändert werden, daß die Beleuchtungsberechnung auf Lichtstromwerte führt, die in der Nähe der technischen Lichtstromwerte liegen. Da die Lichtausbeuten mit den Spannungen verschieden sind, müssen für Beleuchtungsberechnungen die Spannungen bekannt sein.

Für Beleuchtungsberechnungen ist es ein Nachteil, daß die Lichtausbeute für Glühlampen nicht einen gleichbleibenden Wert darstellt. Für Fälle, bei denen man nicht die größten Lampenleistungen benötigt, also bis 200 Watt, kann man als Mittelwert $A = 14$ zugrunde legen. Mit einer für theoretische Beleuchtungsuntersuchungen allgemeiner Art ausreichenden Genauigkeit kann man aus dem Lichtstrom die Lichtausbeute berechnen mit

$$A = C_1 \log \Phi - C_2.$$

Darin sind bei 110 Volt $C_1 = 6,3$ und $C_2 = 4,6$ und bei 220 Volt $C_1 = 5,5$ und $C_2 = 3,7$. Gemäß der Festsetzung über die Lichtausbeute $A = \Phi : N$ gilt $N = \Phi : A$. Also kann man aus Φ die Zahl A und mit A die Zahl N berechnen. Der umgekehrte Weg, aus der Leistung N den Lichtstrom zu berechnen, ist nicht möglich. Beleuchtungstechnisch wird aber auch fast immer die Leistung aus dem Lichtstrom gesucht.

Beim Vergleich von Glüh- und Bogenlampen sind die bei Bogenlampen hohen Bedienungskosten mit zu berücksichtigen; die Kohlen müssen alle 120 Stunden ausgetauscht werden, die Glühlampen aber nur alle 1000 Brennstunden; die Bedienungskosten betragen daher rund das 8fache derjenigen bei Glühlampen. Der Lichtbogen ist wirtschaftlich der Glühlampe daher erst von 400 Watt ab überlegen (3).

3. Lichtkennlinie und Lebensdauer. Alle technischen Lichtquellen sind für bestimmte Betriebsspannungen gebaut. Tafelwerte von Lichtstrom und Lichtausbeute haben daher nur Gültigkeit, solange Brennspannung und Nennspannung übereinstimmen. In welcher Weise Lichtstrom und Lichtausbeute sich ändern, wenn die Brennspannung die Nennspannung über- oder unterschreitet, zeigt für Glühlampen Abb. 40. Gesteigerte Spannung gibt ganz beträchtliche

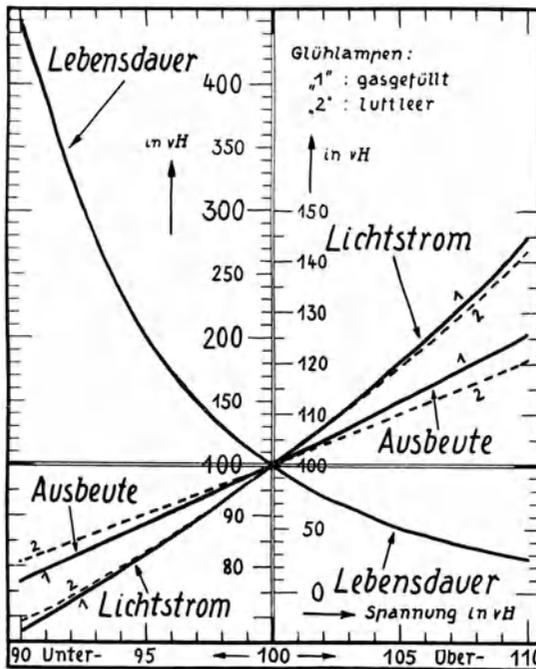


Abb. 40. Lichtkennlinien

Zunahmen des Lichtstroms und der Lichtausbeute; Senkung entsprechende Abnahmen. Eine Spannungsänderung von 1 v. H. bewirkt eine Lichtstromänderung von 4 v. H. und eine Ausbeutezunahme von 2 v. H.

Als „Lebensdauer“ bezeichnet man die Anzahl der Brennstunden, innerhalb derer eine Lichtquelle noch verwendungsfähig ist; d. h. innerhalb derer ihre Lichtausbeute nicht unter einen festgesetzten Hundertwert der angegebenen Lichtausbeute sinkt. Aufstellung 10 gibt die zulässigen Lichtstromverluste an. Die Werte der Lebensdauer sind ebenfalls zu ersehen. Diese Normallebensdauer

setzt Übereinstimmung von Brenn- und Nennspannung voraus. Die Lebensdauer nimmt zu bei Unterspannung und ab bei Überspannung.

Aufstellung 10

Lampenart	Lebensdauer in Stunden	Lichtstromverlust innerhalb der Lebens- dauer in v. H.
Glühlampe	1000	20
Bogenlampe	120	15
Quecksilberdampflampe	über 2000	18
Natriumdampflampe	3000	15

Eine Lichtquelle arbeitet nur wirtschaftlich, wenn die Kosten für Anschaffung und Betrieb den Bestwert im Vergleich zum erhaltenen Licht darstellen. Lichtwirtschaftlichkeit ist also von Lebensdauer und Lichtausbeute bestimmt. Verkürzung der Lebensdauer durch Spannungssteigerung erhöht die Anschaffungskosten und hebt den Gewinn an Lichtausbeute auf. Verlängerung der Lebensdauer durch Spannungssenkung senkt die Lichtausbeute und hebt den Gewinn durch Betriebskosten, bezogen auf gleichen Lichtstrom, auf. Die Nennspannung ist gerade die Spannung höchster Eigenwirtschaftlichkeit der Lichtquelle. Es ist daher keineswegs angebracht, einen erwünschten Lichtstrom durch eine Änderung der Spannung zu erzielen (4). Die angesetzte Lebensdauer sollte daher bei allen Anlagen Beachtung finden, die auf wirtschaftlichen Betrieb Wert legen. Einen Anhalt darüber, wie oft eine Erneuerung von Lampen bei verschiedenen Anlagen durchschnittlich in einem Jahre angebracht ist, gibt Aufstellung 11 dadurch, daß man die Stundenzahlen durch die Lebensdauer teilt (5).

Aufstellung 11. Jahresbrennstunden

1. Tag- und Nachtlampen	8760 Std.
2. Halbnächtige Lampen	1915 „
3. Ganznächtige Lampen	3756 „
4. Wohnungsbeleuchtung	300 „
5. Geschäftsbeleuchtung	500 „
6. Mittelwert aller Privatbeleuchtungen	460 „
7. Bahnhöfe mit starkem Verkehr	3000 „
8. Güterbahnhöfe	1500—2800 „

Jede Beleuchtung verschlechtert sich also durch natürliche Lichtquellenalterung. Diese wird durch (oft unbekannte oder nicht beachtete) Spannungsabweichungen beschleunigt oder verzögert. Ebenso wie Abweichungen wirken sich auch regelmäßige Spannungsschwankungen aus. Darüber gibt Aufstellung 12 Auskunft (6).

Aufstellung 12

Regelmäßige Schwankungen der Brennspannung in v. H. der Nennspannung	0,0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
entsprechen einer gleichbleiben- den Überspannung von etwa (in v. H.)	0,0	0,4	1,0	2,3	4,5	6,7	9,0
also einer Verkürzung der Le- bensdauer von etwa (in v. H.)	0,0	2,5	12	27	41	53	64

Der Alterungszustand der Lichtquellen muß bei Vergleich zweier Anlagen und beim Vergleich von Rechnung und Messung immer mit berücksichtigt werden. Insbesondere dürfen zwei verschiedene Geleuchte licht- und beleuchtungstechnisch nur miteinander verglichen werden, wenn sie beide mit ungealterten oder gleich gealterten Lichtquellen besteckt sind. Unter bewußter Vernachlässigung dieser Grundforderung finden die bedauerlichsten Täuschungen über die Wirkungen von technischen Geleuchten statt.

4. Leuchtdichten. Hohe Leuchtdichten sind dem Auge eine Störung oder Behinderung der Wahrnehmungsarbeit. Aufstellung 13, die eine Übersicht über die Leuchtdichten von Lichtquellen gibt, zeigt, daß mit wenigen Ausnahmen Leuchtdichten auftreten, die Blendung verursachen. Die Tafelwerte stellen die zahlenmäßige Begründung dafür dar, daß Lichtquellen stets durch Geleuchte vor unmittelbarem Erblicktwerdenkönnen geschützt werden müssen.

Aufstellung 13

Lichtquellenart	Leuchtdichte Stilb	Lichtquellenart	Leuchtdichte Stilb
Himmelsgewölbe . . .	0,3—0,5	150—500 Watt { klar opal	850—1200
Stearinkerze	0,75		2,4—5
Gasglühlicht	3—30	750—2000 Watt, klar	1300—1500
Wolframlampe		Quecksilberdampf- lampe	250
15—40 Watt { klar matt opal	160—470	Natriumdampf- lampe	8—10
	3—12	Bogenlampe	5000
	bis 1,3	Mittagssonne	100 000
60—100 Watt { klar matt opal	580—760		
	14—40		
	1,5—2,2		

Als ein großer Vorzug der Natriumdampf Lampe ist ihre geringe Leuchtdichte hervorzuheben. Lichtbogenlampen besitzen andererseits Leuchtdichten, die außerordentlich hohe Werte erreichen können, einerseits wegen der hohen Lichtstärken, andererseits wegen der kleinen Leuchtkörper-sichtfläche.

5. Lichtfarbe. Die Lichtfarben der Lichtquellen sind verschieden. Danach ist auch ihre Verwendung vorzunehmen. Für die meisten Beleuchtungsanlagen dürfte ein tageslichtähnliches weißes Licht zu erstreben sein. Aufstellung 14 gibt an, welche „Farbe“ die üblichen Lichtquellen durchschnittlich haben; zugleich welche Farben dabei bevorzugt und welche entsteht wiedergegeben werden. Über die Eignung des farbigen Lichtes wird in den Anwendungsgebieten das Erforderliche mitgeteilt, soweit es nicht schon in den allgemeinen Richtlinien über das Sehen bei farbigem Licht enthalten ist (7).

Aufstellung 14

Lichtquellenart	Farbe	Bevorzugt	Entstellt
			wiedergegeben
Glühlampe	„weiß“	rot (verstärkt)	blau (geschwächt)
Natriumdampflicht. . .	gelb	gelb	rot, grün, blau (als schwarz)
Quecksilberdampflicht	blau	blau, grün	rot (als schwarz)

In neuerer Zeit wird Mischlicht verwendet, um die hohe Lichtausbeute der Dampf lampen mit der Weißfarbigkeit der Glühlampen zu vereinigen. Man bildet meist Mischlicht aus Quecksilber- und Glühlampenlicht; man verwendet es in Räumen und im Freien. Die verwendeten Mischungs-

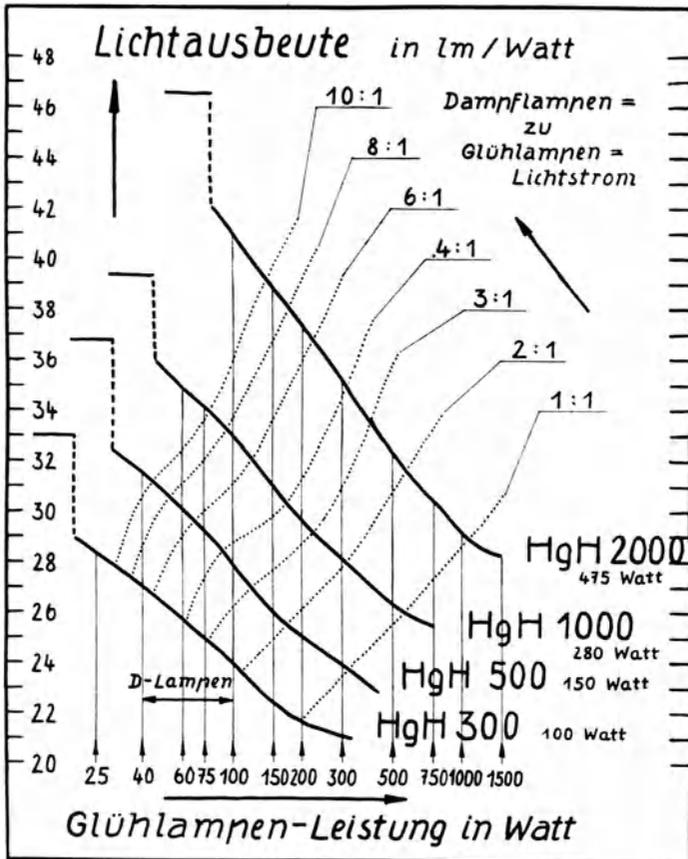


Abb. 41. Lichtausbeute bei Mischlicht

verhältnisse sind 1 : 1 bei hohen Ansprüchen, 1 : 3 bei mittleren und 1 : 8 bei geringen Ansprüchen, wobei das Verhältnis als Dampflicht zu Glühlicht angegeben ist. Die wirksame Lichtausbeute läßt sich zu einem bestimmten Mischungsverhältnis nicht angeben, weil sie noch vom Vollwert des Gesamtlichtstromes abhängt. Man berechnet sie aus der Summe der Teillichtströme und der Teilleistungen mittels

$$A_0 = (\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_n) : (N_1 + N_2 + \dots + N_n).$$

Beispiel. 1 Glühlampe zu 1000 Watt (21000 lm) und 1 Quecksilberdampf-
lampe zu 475 Watt (22000 lm): $A_0 = 43000 \text{ lm} : 1475 \text{ Watt} = 29.1 \text{ lm/Watt}$
bei Mischverhältnis 1 : 1.

Abb. 41 erlaubt, die wirksame Lichtausbeute von Mischlicht zu entnehmen, wenn man von der Dampflampe (Kurven) und der Glühlampe (Rechtswert) ausgeht; die Lichtstromverhältniszahlen sind auch zu entnehmen (Punktlinien). Die Drosselverluste sind einbezogen.

Neuerdings werden auch Lichtquellen hergestellt, die einen Glühlampen- und einen Dampflampenleuchtkörper zugleich enthalten.

Schrifttumsnachweis

(1) W. Köhler, *Lichttechnik*, Leipzig 1936, S. 13—75; A. Richter, *Beleuchtungstechnik*, S. 137—210; W. Köhler und R. Rompe, *Die elektrischen Leuchtröhren*, Braunschweig 1933; H. Schering, *Elektrische Beleuchtung*, Leipzig 1931, S. 36—170; A. R. Meyer in Bloch, *Lichttechnik*, München 1921, S. 1—49; Osram-Lichtheft S. 20, 23, 24, 32. — (2) A. R. Meyer in Bloch, *Lichttechnik*, S. 13. — (3) H. Groher, *Das Licht* 6, 85, 1936. — (4) W. Köhler, *Lichttechnik*, S. 41. — (5) L. Bloch, *Lichttechnik*, S. 299. — (6) W. Köhler, *Li. La.* 19, 22, 1930. — (7) DIN 5033, *Bewertung und Messung von Farben*.

X. Technische Geleuchte

1. Zweck der Geleuchte. Die meisten technischen Lichtquellen haben Lichtverteilungen ähnlich der der Punktlichtquelle. Sie liefern daher eine häufig ungeeignete Beleuchtungsverteilung. Außerdem verursachen die meisten Lichtquellen, ungeschützt dem Auge dargeboten, Blenderscheinungen. Deshalb müssen Lichtquellen fast immer mit Geleuchten umgeben sein. Technische Geleuchte haben den Zweck, das Licht zu lenken und die Leuchtdichte zu mindern.

Die stärkste Lichtlenkung wird durch Spiegelflächen, schwächere durch Emailleflächen und geringste durch Trüßgläser erreicht. Mit der Blendungsminderung ist es umgekehrt; Blendlosigkeit wird daher nur völlig durch gut streuende Durchlaßstoffe erreicht; aber auch große Rückleuchtflächen können weitgehend blendfrei sein. In Hinsicht der Blendfreiheit sind daher Großflächengeleuchte erstrebenswert (1).

2. Der Wirkungsgrad. Sowohl Lichtlenkung wie Streuung verursachen Lichtverluste; je besser die Streuung, um so größer meist die Verluste. Daher gibt ein Geleucht, das mit einer Lichtquelle des Lichtstromes Φ_0 besteckt ist, nur den kleineren Lichtstrom Φ ab. Als „lichttechnischen Wirkungsgrad“ ψ eines Geleuchtes bezeichnet man das Verhältnis dieser beiden Lichtströme:

$$\psi = \Phi : \Phi_0. \quad [21]$$

Diese Bewertungszahl nimmt im allgemeinen mit stärkerer Lichtlenkung und Blendfreiheit ab. Die Wirkungsgrade sind für die einzelnen Geleuchtgruppen verschieden. Wirkungsgrade dürfen daher nur innerhalb der Geleuchtgruppen zu Bewertungen dienen. Als Mittelwerte für die Hauptgeleuchtgruppen gelten: bei Geleuchten für unmittelbare, vorwiegend unmittelbare, halbmittelbare, vollmittelbare Beleuchtung der Reihe nach die Werte $\psi = 65, 80, 80, 70$ v. H. Beleuchtungstechnisch ist also keineswegs ein Geleucht mit hohem Wirkungsgrad immer das Beste; hoher Wirkungsgrad schließt meist gute Streuung aus. Es ist an sich das Ziel der Lichttechnik, Geleuchte mit möglichst hohem Wirkungsgrad zu schaffen.

3. Zur Lichtverteilung. Neben Verbrauchs- und Nutzlichtstrom (Φ_0 und Φ) ist die Lichtverteilung die wichtigste Größe zur Beurteilung eines Geleuchtes. Alle Anwendungen beruhen auf der

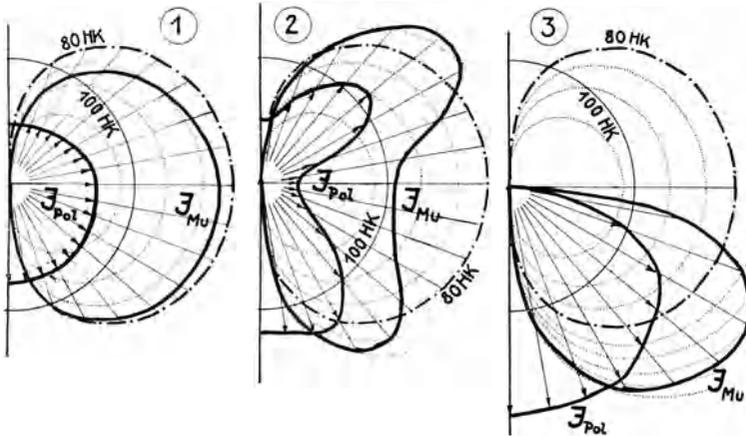


Abb. 42. Lichtverteilungen im Muschelfeld

Kenntnis der Geleuchtlichtverteilungen. Sie müssen daher in den Geleuchtlisten enthalten sein. Was ein Geleucht an Lichtlenkung leistet, das ist aus dem Unterschied der Lichtverteilungen von nackter Lichtquelle und Geleucht zu erkennen.

Dabei kommt dem Flächeninhalt beider Lichtverteilungen keine Bedeutung zu, etwa als Maß der Lichtströme, solange die Lichtverteilung in reinen Polarkoordinaten eingetragen ist. Erst die Eintragung in Muschelfeldkoordinaten gibt durch den Flächeninhalt den Geleuchtlichtstrom Φ . Abb. 42

gibt für drei Geleuchtarten (1. Allseitstrahler, 2. Halbmittelbarleuchte, 3. Tiefstrahler) an erstens: in Polarkoordinaten den 100-HK-Kreis und die Lichtverteilung (mit Pfeilen); zweitens: in Muschelkoordinaten den 80-HK-Kurvenzug, der 1000 lm umschließt (strichpunktiert) und die Lichtverteilung als geschlossenen Linienzug.

Die Lichtverteilungsfläche im Muschelfeld ist stets kleiner als die des 80-HK-Kreises. Setzt man die letzte gleich 1, so ist die im gleichen Maßstab bewertete Fläche der Lichtverteilung zugleich der Geleuchtwirkungsgrad.

4. Einteilung und Kennzeichnung. Am besten erfolgt die Kennzeichnung von Geleuchten durch ihre Lichtverteilungen. Die

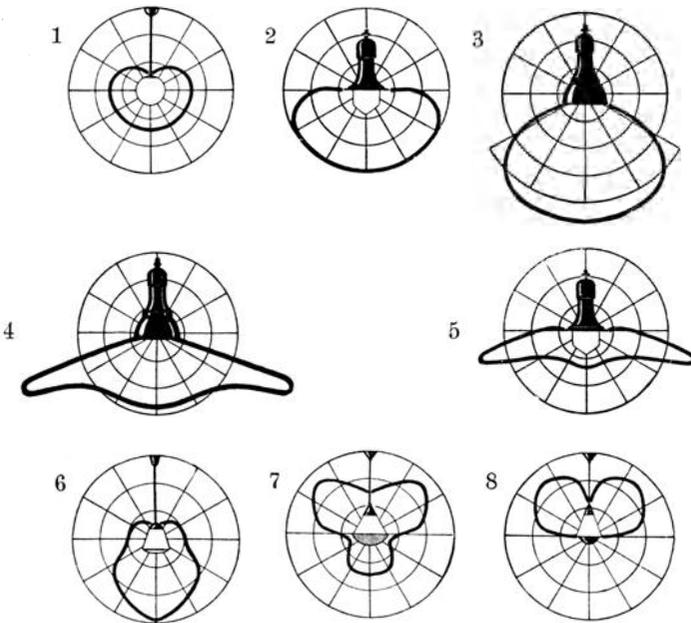


Abb. 43. Wichtigste Lichtverteilungen

wichtigsten Formen gibt Abb. 43 wieder. Der Reihe nach enthält sie: 1. Allseitstrahler, 2. Breitstiefstrahler, 3. Tiefstrahler (Starktiefstrahler zeigen noch schmalere Lichtkegel), 4. Breitstrahler, 5. Starkbreitstrahler (Flachstrahler), 6. Geleucht für vorwiegend unmittelbare, 7. für halb mittelbare und 8. für voll mittelbare Beleuchtung. Um die volle Angabe der Lichtverteilung zu umgehen, werden zur Kennzeichnung oft vorteilhaft Teillichtströme angegeben. Die wichtigste Kennzeichnung richtet sich nach den Teillichtströmen in den Bereichen 0 bis 60° und 0 bis 90° (2). Nach ihr ist in den beiden ersten Zahlspalten bewertet.

Aufstellung 15

		Bezeichnung	Φ_{0-90°	Φ_{0-60°	Φ_{\square}	Φ_{\triangle}	J_{\max}	ψ
I	Tiefstrahler	Starktiefstr.	1,00	0,8—1,0	1	0	0—20°	0,65
		Schwachtiefstr.	1,00	0,8—1,0	0,9	0,1	0—40°	0,65
		Breittiefstrahler	1,00	0,6—0,8	1	0	0—60°	0,8
		Hochtiefstrahler	0,65—0,8	0,4—0,6	0,75	0,25	0—45°	0,8
II	Breitstrahler	Starkbreitstr.	1,0	0,8—1,0	1	0	60—90°	0,65
		Schwachbreitstr.	1,0	0,8—1,0	0,9	0,1	40—60°	0,8
		Tiefbreitstrahler	0,8	0,6	1	0	20—50°	0,8
		Hochbreitstrahler	0,7	0,5	0,75	0,25	30—90°	0,8
III	Hochstrahler	Starkhochstr.	0,1	0	0	1	130—180°	0,7
		Schwachhochstr.	0,2	0	0	1	90—150°	0,7
		Tiefhochstrahler	0,3	0,2	0,25	0,75	90—160°	0,8
		Breithochstrahler	0,4	0,2	0,25	0,75	60—130°	0,8
IV		Allseitstrahler . .	0,5—0,6	0,8—1,0	0,5	0,5	0—180°	0,8

Die Tabelle enthält außerdem noch Einteilungsangaben, die bisweilen dienlich sind, nämlich eine solche nach den Lichtströmen im oberen und unteren Halbraum und eine nach der Lage der höchsten Lichtstärke. Bei der Benennung gibt die vorgesetzte Silbe die zweitbetonte Eigenart an; so ist ein Hochtiefstrahler ein Geleucht, das hauptsächlich tiefstrahlt, daneben aber auch in geringerem Grade hoch. Diese Bezeichnungsweise gestattet auch die Übergangsformen zu kennzeichnen.

5. Sonderformen. Abgesehen von solchen Sonderformen, die nur ganz seltenen Fällen vorbehalten und nur für diese hergestellt

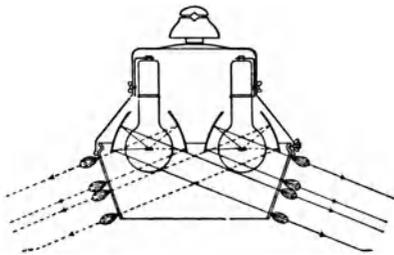


Abb. 44. Zweirichtungsleuchte

werden, sind als wichtigste Sondergeleuchte zu nennen:
 1. die mit nichtspiegelbildlicher Lichtverteilung und
 2. die für Mischlicht.

1. Die Nichtspiegelbildlichkeit, die bisher fast nur für Außen- oder Arbeitsplatzleuchten angewandt wird, wird entweder mit einer Lichtquelle durch geeignete Spiegelform erreicht oder durch mehrere Lichtquellen, die außerhalb der Spiegelmittle angeordnet sind, oder durch beides (Abb. 44). Man kennt Zwei-, Drei- oder Vierrichtungs-

leuchten, je nachdem, ob zwei, drei oder vier bevorzugte Lichtstärkerichtungen vorgesehen sind. Für den Beleuchtungsentwurf sind die Lichtverteilungsfelder dieser Geleuchte vorauszusetzen. Sie geben die Kurven gleicher Lichtstärke auf waagerechter Ebene an, wobei als Einheit der Abstände die Lichtpunkthöhe gilt

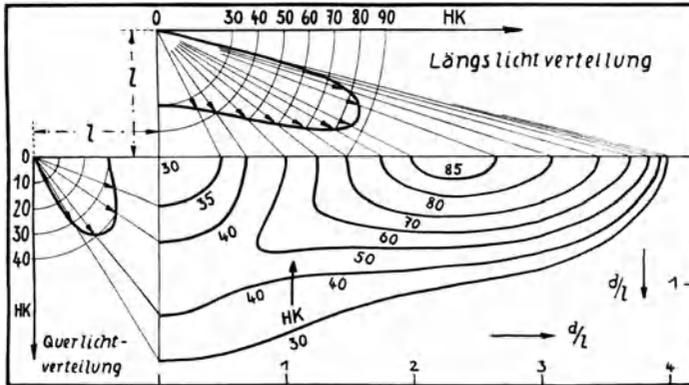


Abb. 45. Lichtverteilungsfeld einer Zweirichtungsleuchte

(Abb. 45). Lichtverteilungsfelder ersetzen vollständig den gesamten Lichtverteilungskörper. Für achsenspiegelbildliche Geleuchte besteht das Lichtverteilungsfeld aus gleichmittigen Kreisen (5).

2. Mischlichtgeleuchte werden heute für Innen- und Außenbeleuchtung hergestellt. Das Geleucht enthält dann mindestens zwei Fassungen für die verschiedenen Lichtquellen: Glühlampe und Dampfampe. Abb. 46 zeigt eine Mischlichtleuchte für mittelbare Beleuchtung. Es ist dafür Sorge zu tragen, daß die Orte der verschiedenen Lichtfarbsendungen im Geleucht nicht störend empfunden werden; daß also das Licht das Geleucht schon als Mischlicht verläßt.

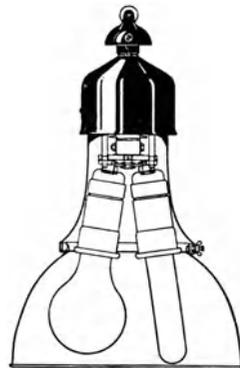


Abb. 46. Mischlichtleuchte

6. Zonenlichtstromverteilungen. Entsprechend der Erklärung der Zonenlichtströme bestimmt man Zonenlichtstromverteilungen für technische Geleuchte. Man benötigt sie für die Lösung der Platzbeleuchtungsberechnung. Abb. 47 gibt einige kennzeichnende Zonenlichtstromkurven wieder.

Entsprechend den Lichtverteilungen für Lichtquelle und Geleucht gibt man häufig auch die Zonenlichtstromverteilungen für beide an. Das Verhältnis der Kurvenwerte bei 180° gibt den Geleuchtwirkungsgrad an.

7. Leuchtdichten und Leuchtdichteverteilungen. Für die Beleuchtungsanlagen wichtiger als die Kenntnis von Lichtquellen-

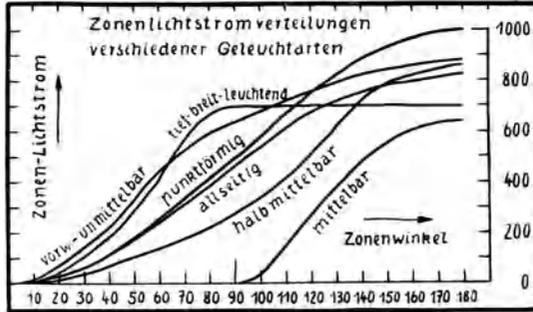


Abb. 47. Zonenlichtstromverteilungen

leuchtdichten sind die von Geleuchten selbst. Wenn schon einer Lichtquelle nicht nur eine einzige Leuchtdichte zukommt, so erst recht nicht technischen Geleuchten; sie bieten dem Auge in verschiedenen Richtungen neben verschiedenen Lichtstärken Sichtflächen

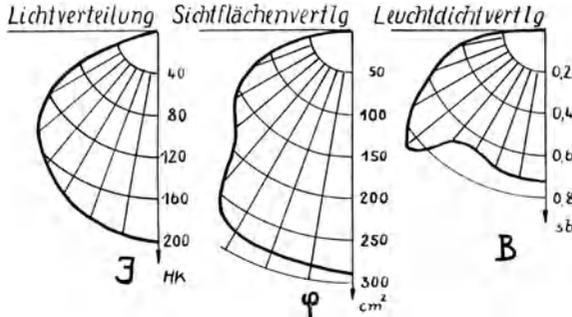


Abb. 48. Polare Verteilungen der Lichtstärke, Sichtfläche und Leuchtdichte

verschiedener Größe dar. Zur vollen Erfassung der Leuchtdichtenverhältnisse dient die polare Leuchtdichteverteilung. Sie wird aus der polaren Lichtverteilung und der polaren Sichtflächenverteilung gewonnen, indem die J - und φ -Werte für jede Richtung gemäß $B = J : \varphi$ durcheinander geteilt werden. Abb. 48 zeigt die drei Verteilungen für eine Werkplatzleuchte (3). Eine Kugelleuchte hat

Aufstellung 16.
Empfohlene Leuchtdichten

Geleucht für	asb	sb	Im Winkelbereich
Allgemeinbeleuchtung	10 000	0,3	30°—90°
Außenbeleuchtung	60 000	2	60°—90°
Arbeitsplatzbeleuchtung	6 000	0,2	75°—180°

nahezu kreisförmige Leuchtdichteverteilung. Aufstellung 16 gibt eine Reihe von empfohlenen Leuchtdichten an zu geschlossenen und offenen Geleuchten (DIN 5035).

8. Wichtige Winkel. Es müssen noch Winkel erwähnt werden, die für Geleuchte beträchtliche Bedeutung haben.

1. Der „Blendwinkel“. Das ist ein Winkel, außerhalb dessen jeder Grad von Blendung zulässig ist, ohne daß das waagrecht blickende

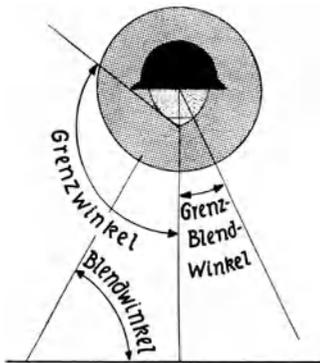


Abb. 49. Geleuchtwinkel

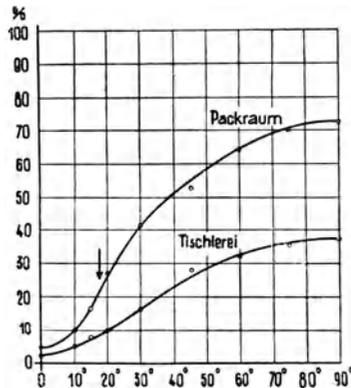


Abb. 50. Geleuchtflächenneigung und Verstaubung

Auge dadurch gestört wird; es ist also ein Winkel, der nicht vom Geleucht, sondern vom Auge bestimmt ist. Der Blendwinkel ist der Winkel 60°, gemessen nach aufwärts von der waagerechten Blickrichtung aus (Abb. 49). (Vgl. Abb. 28.) Bei den meisten Außenbeleuchtungen sind aber schon Blendlichtstärken innerhalb des Blendwinkels vorhanden. Ein gutes Geleucht soll bis zum Winkel 30° keine Blendungsleuchtdichten aufweisen; zwischen 30 und 60° darf ein allmählicher Aufstieg bis zu sicherlich blendenden Leuchtdichten erfolgen.

2. Als „Grenzwinkel“ eines Geleuchtes gilt (nach Halbertsma) der Winkel (-bereich), über den hinaus es keine nennenswerte Lichtstärke mehr besitzt (4).

3. „Blendgrenzwinkel“ ist der Winkel, mit dem die Blendung eines Geleuchts aufhört, wobei der Winkel von der Lotrechten gerechnet werden muß. Bei einwandfreien Geleuchten ist der Blendgrenzwinkel höchstens 30° , nämlich die Differenz von 90° und Blendwinkel. Zwischen dem Blendgrenzwinkel und dem Grenzwinkel herrscht dann keine Blendleuchtdichte.

In gänzlich anderer Weise ist noch der Neigungswinkel der nach oben gerichteten Glas- oder Rückstrahlflächen eines Geleuchts für dieses von erheblicher Wichtigkeit. Je steiler die Glasfläche, um so weniger leicht tritt Verstaubung ein. Hierüber liegen Messungen vor. Abb. 50 zeigt den Lichtverlust, den Geleuchte für gleiche Zeitspanne aufweisen, wenn sie mit immer flacher werdenden Glasflächen versehen werden. Da die beiden für verschiedene Betriebe geltenden Kurven ihre größten Steigungen bei 18° und 35° aufweisen, so dürfte ein Winkel von rund 25° möglichst nicht überschritten werden. Man hat dann mit Verlusten bis 20 v. H. zu rechnen. Die angegebenen Werte gelten für glatte Flächen; bei rauhen sind die Verhältnisse entsprechend ungünstiger.

Wo man, wie auf hochwertigen Sportanlagen, jede Blendung ausschalten will, bringt man unter dem unteren Rand des Tiefstrahlers einen lichtundurchlässigen schwarzen Ring an, so daß dem Auge nicht einmal die Leuchtdichte der Rückstrahlflächen des Tiefstrahlers wahrnehmbar ist; der Grenzblendwinkel wird dadurch stark herabgesetzt; durchaus bewußt auf Kosten des Wirkungsgrades.

9. Vollständige Geleuchtangabe. Sollen alle Angaben, die für ein Geleucht zu Auswertungszwecken benötigt werden können, erfolgen, so müssen diese bestehen aus:

1. Gesamtlichtstrom für 1000 lm der Lichtquelle; ferner oberer und unterer Lichtstrom.
2. Lichtverteilung; einschließlich der mittleren Lichtstärke und derjenigen im oberen und unteren Halbraum.
3. Soweit benötigt, das Lichtverteilungsfeld.
4. Die Leuchtdichteverteilung.
5. Der Grenzwinkel und der Blendgrenzwinkel.
6. Die Zonenlichtstromverteilung; einschließlich des Wirkungsgrades.
7. Die Grundbeleuchtungskurve einschließlich der Grundgleichmäßigkeitskurve (hierüber siehe S. 66).

Auf Grund dieses vollständigen Materials lassen sich alle Auswertungen und Anwendungen sofort vornehmen.

Schriftumsnachweis

- (1) H. Schering, Elektrische Beleuchtung, Leipzig 1931, S. 170—187; L. Bloch, Lichttechnik, S. 209—247. — (2) L. Scheider, Li. La. **20**, 384, 1931. — (3) W. Pohle, ETZ., Heft 15, 353, 1932. — (4) Halbertma, ETZ. S. 482, 1917. — (5) E. Meyer, Das Licht **7**, 247, 1937.

C. Planung und Entwurf von Beleuchtungsanlagen

XI. Beleuchtung von Räumen mit Tageslicht

1. Die Sachlage. Die richtige Beleuchtung von Räumen mit Tageslicht ist Sache des Architekten. Er bedarf aber der Mitarbeit des Beleuchtungstechnikers. Das bekundet sich darin, daß alle Förderung der Beleuchtungsbestimmung für Tageslicht in Zusammenarbeit oder Wechselwirkung von beiden erfolgt ist.

Es handelt sich immer um zwei Feststellungen: Erstens, wie groß die Fensterfläche, zweitens, welcher Art die Form der Fenster sein muß, damit der Raum den Anforderungen genügen kann, die ihm aus seiner Bestimmung erwachsen. Mit der Fenstergröße wird in erster Linie der Stärke der notwendigen Beleuchtung genügt; mit der Fensterform der notwendigen Gleichmäßigkeit (1).

2. Das Tageslicht. Als Tageslicht kommen zwei Arten von Licht in Betracht; erstens das unmittelbare gerichtete Sonnenlicht, zweitens das mittelbare, allseitig gerichtete Himmelslicht. Würde nur das Sonnenlicht da sein, so wäre eine Beleuchtung von Räumen damit eine Unmöglichkeit. Denn es wären nur die Räume erhellt, in deren Inneres unmittelbares Sonnenlicht gelangte, also nur bei bestimmten Sonnenstellungen und Tageszeiten. Bis auf die dürftigen Beträge, die durch Rückstrahlung an Häuserflächen entstanden, wäre es in den Räumen sonst vollständig dunkel. Daraus erkennt man die Bedeutung des Himmelslichtes für die Raumbelichtung. Daher legt man allen Berechnungen nicht das Sonnenlicht, sondern das Himmelslicht zugrunde. Und zwar das in vollkommener Weise gedachte Himmelslicht, das vorhanden ist, wenn die Himmelshalbkugel gleichmäßig weiß strahlt, wie das etwa bei der in Mitteleuropa häufigsten Wolkenart „Alto-Stratus“ bisweilen weitgehend gewährleistet ist. Bei ihr ist auch die Sonnenstrahlung praktisch ausgeschaltet. Bei einer derartigen Himmelsstrahlung ist auch im Freien größte Gleichmäßigkeit und geringste Schattigkeit vorhanden.

Das Tageslicht ist äußerst starken Veränderungen unterworfen, die einerseits durch die Sonnenstellung, andererseits durch die Wolkenart bedingt sind. Am wichtigsten, weil regelmäßigsten, sind die ersten. Die mittleren Beleuchtungsstärken, die in verschiedenen Monaten zu verschiedenen

Tagesstunden festgestellt sind, sind aus Abb. 51 zu erkennen. Es ergeben sich daraus folgende wichtigen Zahlen.

Die Anzahl der Jahresstunden	8760
Die Anzahl der Jahres-Hellstunden	4684
Mittlere Beleuchtungsstärke für alle Jahresstunden	13000 lx
Mittlere Beleuchtungsstärke für alle Hellstunden	22800 lx
Höchster Beleuchtungswert mittags Mitte Juni	250000 lx
Mittlerer Mittagswert im Juni	70000 lx
Mittlerer Mittagswert im Dezember	9500 lx

Als geringster Wert, bei dem noch die Beleuchtungen in Räumen mit Tageslicht ausreichen sollen, wird festgesetzt: $E_{\min} = 3000$ lx. Das ist eine Beleuchtungsstärke, die im Monatsmittel im Dezember nur vor 9 Uhr 15 Min.

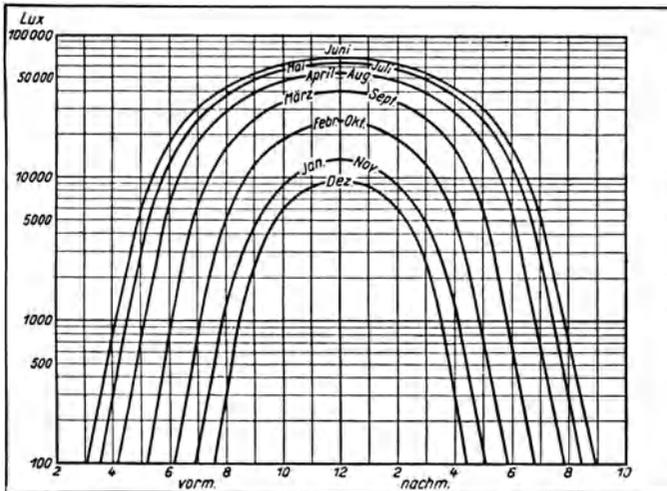


Abb. 51. Mittlere Beleuchtungsstärken zu Tages- und Jahreszeiten

und nach 14 Uhr 45 Min. unterschritten wird, im Juni vor 4 Uhr 40 Min. und nach 19 Uhr 20 Min., im Jahresmittel vor 6 Uhr 30 Min. und nach 17 Uhr 30 Min. Damit ist eine Zahl gefunden, die für die Hauptzeit der Arbeitsstunden sichersteht.

3. Beleuchtungsverteilung und Gleichmäßigkeit. Die Beleuchtungsverteilung bei Tageslicht zeigt bei Räumen mit der üblichen einseitigen Fensteranordnung stets einen Verlauf derart, daß hohen Werten von E in Fensternähe geringe Werte in Fensterferne gegenüberstehen. Abb. 52 zeigt einen kennzeichnenden Verlauf (vgl. auch die Kurven Abb. 57). Er herrscht also eine starke Ungleichheit der Beleuchtungsstärken. Durch das Fenster fortgesetzt findet E den Übergang von den verhältnismäßig geringen Innenwerten auf die beträchtlichen Außenwerte.

Die Gleichmäßigkeit wird daher, bezogen auf die gesamte Lichtnutzfläche, nur gering sein. Es kommen Werte der Gleichmäßigkeit zwischen 1 : 10 bis 1 : 300 vor. Die Ungleichmäßigkeit wird größer sein, je tiefer der Raum ist.

Mit wachsender Tiefe ist aber auch die Strecke größer, auf der die Abnahme von E stattfindet. Erfahrungsgemäß werden die Abnahmen von E , soweit sie in Richtung der Raumtiefe stattfinden, nicht als sehr störend vom Auge empfunden, falls sie sich auf Werten bis 1 : 100 bewegen. Das wird durch die Schwankungslosigkeit der Abnahme bewirkt, sowie durch die Höhe der Absolutwerte, durch die man schon in dem Bereich der Empfindungskurve ist, in dem eine Veränderung der Leuchtdichten nicht mehr entsprechend hohe Änderungen der Empfindung verursacht (Abb. 30).

50 000 lx

2500 lx

400 lx

80 lx



Abb. 52. Abstand vom Fenster und Beleuchtungsstärke

Trotzdem wird man alles tun, um die Gleichmäßigkeit in Räumen zu heben. Auf die Gleichmäßigkeit hat der Wandanstrich hohen Einfluß (wenig jedoch auf die mittleren Beleuchtungsstärken, die hauptsächlich durch die hohen E -Werte bestimmt sind), denn durch ihn werden die geringen E -Werte in Nähe der Rückwand leicht vervielfacht, etwa verdreifacht, während die hohen fensternahen Werte dadurch fast unverändert bleiben. Die Gleichmäßigkeit wächst also praktisch so wie die geringsten Beleuchtungsstärken. Viel schärfer ist aber die Ungleichmäßigkeit in Fensternähe in einer Strecke parallel zur Fensterwand, wenn die Mauerteile zwischen den Fenstern nicht mehr gering sind (Abb. 53). Nach der Rückwand hin verschwindet diese Ungleichmäßigkeit fast ganz. Sie ist besonders störend, weil die Unterschiede von E auf kurzer Strecke nebeneinanderliegen. Auch sie wird verringert durch hellen Raumanstrich, besonders aber durch hinreichend hohe Anzahl der Fenster. Den

wichtigsten Einfluß auf die Gleichmäßigkeit hat die Fensterform, wovon noch ausführlich die Rede ist.

Hier sei erwähnt, daß durch helle Vorhänge die Gleichmäßigkeit bei erheblicher Schwächung der Tageslichtkennzahl (Nr. 4) beträchtlich erhöht wird. Das ist dadurch verständlich, daß das Licht nicht mehr schräg einfällt, sondern (IV, 6 und Abb. 24) von der lichtstreuenden Fläche senkrecht zu ihrer Oberfläche in Richtung der Raumentiefe abgestrahlt wird. Um zu starke

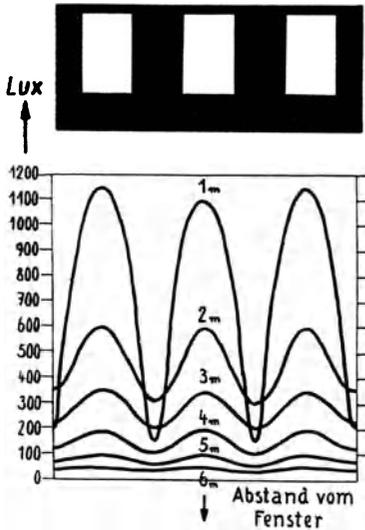


Abb. 53. Ungleichmäßigkeit längs der Fenster

Ungleichmäßigkeit praktisch ausschalten, verlegt man die Hauptarbeitsfläche nicht in die fensternächsten und fensterfernsten Plätze, wobei allerdings den fensternächsten doch der Vorrang gebührt.

Je besser die Fensterfläche auf der Fensterwand verteilt ist, um so besser ist die Gleichmäßigkeit. Fenster, die auf zwei benachbarten Wänden liegen, geben bessere Gleichmäßigkeit als solche, die an einer Wand liegen. Noch mehr erhöht sich die Gleichmäßigkeit, wenn sie auf gegenüberliegenden Wänden angebracht sind. Für größere Räume, wie Hallen, Kirchen, Hörsäle, Versammlungsräume ist daher die beiderseitige Fensteranordnung unerlässlich.

4. Die Tageslichtkennzahl. Für Räume, die durch Tageslicht beleuchtet werden, können feste Beleuchtungsstärken nicht verlangt werden. Denn entsprechend den Schwankungen der Helligkeiten im Freien je nach Zeit und Bewölkung schwanken auch die Helligkeiten in den Räumen. Deshalb gibt man bei Tageslicht nicht Beleuchtungsstärken an, sondern das Verhältnis der Beleuchtungsstärken im Raum zu denen im Freien. Dies Zahlverhältnis heißt Tageslichtkennzahl. Sind E_i und E_a zwei gleichzeitig innen und außen gemessene Werte, so gilt daher $T = E_i/E_a$. Bei Messungen ist daher zu beachten, daß E_a im Freien an einer Stelle bestimmt wird, auf die das Himmelslicht der unbeschatteten Halbkugel einwirkt (2).

Ebenso wie die Beleuchtungsstärken in einem Raum verschiedene Werte haben je nach Lage zum Fenster, sind auch die Tageslichtkennzahlen verschieden. Zu den Stellen der Arbeitshalle Abb. 52

gehören die T -Werte 0,05, 0,008, 0,0016, wie sich durch Division der Innenwerte durch $E_a = 50\,000$ ergibt. Zur vollständigen Kennzeichnung einer Raumbelichtung verwendet man die Tageslichtkennzahlverteilung (Abb. 54). Für den Beleuchtungsentwurf lassen sich aber schwerlich die ganzen Verteilungen, sondern nur Einzel- oder Mittelwerte verwenden. Daher gibt man entweder die T -Werte für besondere Raumstellen an (3), oder den Mittelwert T_m (2), der zu bilden ist gemäß

$$T_m = \frac{\sum T_n}{n} = \frac{\sum E_i}{n \cdot E_a} = \frac{\sum E_i}{\sum E_a}$$

Dabei gilt der erste Ausdruck, falls die Einzel- T -Werte schon vorliegen; der zweite, falls die Außenbeleuchtungsstärke während der Bestimmung im Innern unverändert blieb, was selten sein wird; der dritte, falls sich während der E_i -Messungen die E_a -Werte außen änderten, so daß zu jeder E_i -Messung eine E_a -Messung gleichzeitig gemacht wurde. Die Verteilung Abb. 54 liefert den Wert $T_m = 0,015$. Bei einer solchen müssen die einbezogenen T -Werte zu Punkten gehören, die gleichmäßig über die Beleuchtungsfläche verteilt sind. n ist die Anzahl der Punkte. Zur Kennzeichnung der T -Verteilung in Räumen mit einseitigen oder gegenüberliegenden Fensterreihen genügt häufig eine Darstellung auf einer Querschnittslinie senkrecht zur Fensterreihe. Die Schnittlinie muß dann in der Mitte zwischen Fenster- und Fensterpfeilermitte gewählt sein.

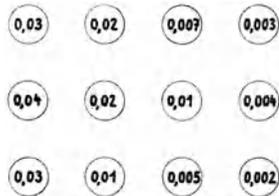


Abb. 54. Tageslichtkennzahlverteilung

Die als Richtwerte dienenden T -Zahlen sind in Aufstellung 17 angegeben. Bei Tageslicht läßt sich die Gleichmäßigkeit auch mit Hilfe der Tageslichtkennzahlen angeben gemäß $Glm = T_{\min}/T_{\max}$. Erst ausreichende Werte der Tageslichtkennzahlen gemeinsam mit solchen der Gleichmäßigkeit stellen eine gute Tageslichtbeleuchtung sicher (4).

Aufstellung 17

Art der Arbeit	T	
		in v.H.
Sehr feine	0,035	3,5
Feine	0,018	1,8
Durchschnittliche	0,007	0,7
Halbfeine	0,005	0,5
Grobe	0,002	0,2

5. Das Wirkungsgradverfahren. Zur Bestimmung von Fensterform und Fenstergröße liegen heute zwei Verfahren vor: das von A. Burchard und H. Frühling (2) und das von W. Arndt und

W. Büning (3). Das letzte kann hier nicht mitgeteilt werden; denn es setzt den Besitz der 44 Kurventafeln voraus, mit denen für alle vorkommenden Fälle Fenstergröße und Fensterform ermittelt werden sollen. Es wird daher hier nur das erste Verfahren dargestellt.

Das durch die Fenster auf die Lichtnutzfläche des Raumes gelangende Licht ruft eine Beleuchtungsstärke hervor, die erheblich von derjenigen im Freien abweicht. Das macht Abb. 55 anschaulich. Man erkennt, durch welche Einflüsse schrittweise die geringe Beleuchtungsstärke entsteht: nur ein Bruchteil von dem Lichtstrom,

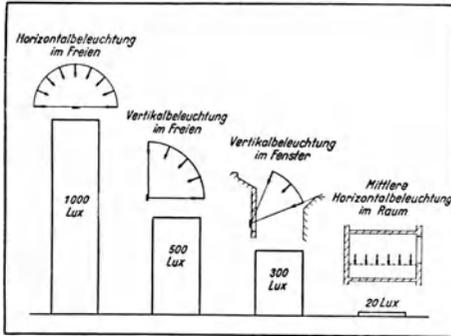


Abb. 55. Abnahme der Beleuchtungsstärke mit Einschränkung des Himmelslichts

der im Freien die Flächeneinheit trifft, gelangt auf die Flächeneinheit der Raumfläche. Diese Schwächungswirkung ist berechenbar.

Durch die Fenster gelange in den Raum der Lichtstrom Φ_0 . Ihm zufolge entsteht eine Beleuchtungsstärke E_m auf der Lichtnutzfläche F_B . Diese ist aber kleiner als der Betrag $E_{m,0} = \Phi_0/F_B$.

Denn nicht der ganze Lichtstrom beleuchtet ausschließlich die Fläche F_B ; sondern ein Teil dient zur Aufhellung von Decke und Wänden. Als Wirkungsgrad des Raumes für Tageslicht führt man die Verkleinerungsziffer η ein gemäß $\eta = E_m : E_{m,0}$. Also folgt

$$E_m = \eta \cdot \frac{\Phi_0}{F_B}.$$

Für Φ_0 kann man setzen $\Phi_0 = E_F \cdot F_F$, worin F_F die Fensterglasfläche und E_F die Beleuchtungsstärke in Fensterglasfläche ist. Das ergibt

$$E_m = \eta \cdot E_F \cdot \frac{F_F}{F_B} \quad \text{oder} \quad \frac{E_m}{E_F} = \eta \cdot \frac{1}{V_0},$$

wenn man als Flächenverhältnis V_0 einführt: $V_0 = F_B : F_F$. Erweitert man links mit $E_{a,wa}$, der waagrecht im Freien gemessenen Beleuchtungsstärke, so entsteht

$$\frac{E_m}{E_{a,wa}} \cdot \frac{E_{a,wa}}{E_F} = \frac{\eta}{V_0} \quad \text{oder} \quad T \cdot \frac{1}{f} = \eta \cdot \frac{1}{V_0},$$

wenn man $f = E_F : E_{a,wa}$ einführt. Endgültig ergibt sich also

$$\eta \cdot f = T \cdot V_0. \quad [21]$$

Das ist das Grundgesetz für Raumbeleuchtung mit Tageslicht. f heißt „Fensterbeiwert“. Die Gesetzmäßigkeit ermöglicht, das Verhältnis von Lichtnutzfläche zu Fensterfläche zu berechnen, wenn Wirkungsgrad η , Tageslichtkennzahl T und Fensterbeiwert f bekannt sind. Im folgenden wird behandelt, wie diese drei Größen gewonnen werden. Das aufgestellte Gesetz ist aber das wichtigste Hilfsmittel zur Lösung von Tageslichtbeleuchtungsaufgaben (2).

Beispiel. $f = 0,3$; $\eta = 0,4$; $T = 0,5$ v. H. Also $V = \frac{0,4 \cdot 0,3}{0,005} = 2,4$; also bei $F_B = 30 \text{ m}^2$; $F_F = 12,5 \text{ m}^2$.

6. Der Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad η eines Raumes für Tageslicht wird, wenn man von Ausstattungsgegenständen absieht, von Wand- und Deckenanstrich sowie von der Raumform bestimmt.

Nun zeigen alle mit Tageslicht beleuchteten Räume (Abb. 52) sehr große Beleuchtungsstärken in Nähe der Fenster und im Vergleich dazu sehr geringe Beträge in Nähe der gegenüberliegenden Wand. Die fensternahen Werte werden nur vom unmittelbaren Himmelslicht stammen, die fensterfernen aber um so mehr durch Wandrückstrahlung bestimmt sein, je tiefer der Raum ist. Bildet man den Mittelwert der Beleuchtungsstärken, so liefern die hohen Werte den größten Anteil; die Größe der geringen Werte beeinflusst die Summe dann wenig. Daher ist es verständlich, daß Wirkungsgradwerte, die aus Messungen gewonnen wurden, sich verhältnismäßig wenig abhängig von der Raumbekleidung erweisen, eher noch von den Raummaßen.

Bei geringer Raumtiefe liegt der Wirkungsgrad höher als bei großer; darin zeigt sich der Einfluß der ungünstigeren, fensterfernen Raumpunkte. Bei geringer Raumhöhe liegt er ebenfalls höher als bei großer; das wird verursacht durch die größer werdende Raumboberfläche, die als Lichtverbraucher auftritt. Für Rechnungen legt man daher häufig einen mittleren Zahlwert $\eta = 0,4$ zugrunde. Besser ist es, die in Aufstellung 18 aufgestellten Werte zu verwenden, in denen zum Ausdruck kommt, daß für tiefe Räume die Wandbekleidung wichtiger ist (was η angeht!) als für kurze.

Aufstellung 18

Raumhöhe bzw. Raumtiefe	Raumbekleidung		
	sehr hell	mittelhell	dunkel
Groß	0,33	0,25	0,15
Mittel	0,36	0,29	0,20
Gering	0,40	0,33	0,25

Meyer

7. Der Fensterbeiwert. Der Fensterbeiwert ist gemäß seiner Festsetzung $f = E_F : E_{a, wa}$ eine aus zwei Beleuchtungsmessungen bestimmbare Zahl. Es ist aber für den Wert dieser Betrachtungen entscheidend, ob sich f in jedem Falle auch berechnen läßt. Zunächst: Für ein Fenster an einer lotrechten Hauswand, der keine Hausfront gegenübersteht, muß $f = 0,5$ sein; denn die Hauswand deckt genau die Hälfte des Himmelsgewölbes, das als überall gleich stark strahlend

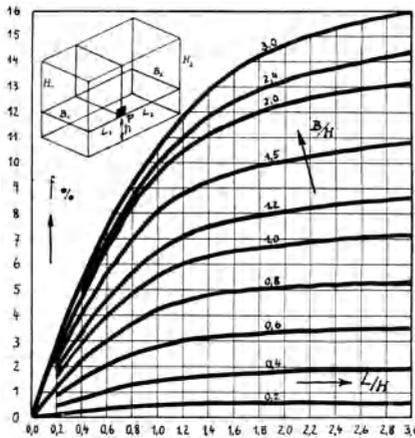


Abb. 56. Fensterbeiwerte für Höfe

angenommen wird, ab (Abb. 55, Teil 2). In allen anderen Fällen, in denen gegenüberliegende Häuser weitere Teile des Himmelsgewölbes abdecken, wird f kleiner als 0,5 sein. Maßgebend wird sein der Raumwinkel, der, vom Fenster aus gesehen, vom Himmelsgewölbe frei bleibt. Er wird durch die Höhe der gegenüberliegenden Front H , von der Höhe h des Fensters selbst über Straßenebene und vom Abstand D beider Häuserfronten abhängig

sein (Abb. 59, rechts unten). Burchard leitete die Formel für den Raumwinkel ab. Sie ergibt für den Fensterbeiwert (5):

$$f = 0,5 \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{H-h} \right)^2}} \right] \quad [22]$$

Die Übereinstimmung dieser Gesetzmäßigkeit mit der Wirklichkeit ist durch Messungen erwiesen. Dieser Ausdruck gilt für Straßen. Für Höfe wurden ebenfalls von Burchard rechnerische Ausdrücke hergeleitet. Für einen Fensterpunkt P (Abb. 56), der sich in Höhe h befindet und von den zu seiner Wand senkrechten Wänden die Abstände L_1 und L_2 hat, wenn die gegenüberliegende Wand die Höhe H hat, gilt (5)

$$f = f_1 + f_2,$$

wobei f_1 für den linken Hofteil (und entsprechend f_2) berechnet wird nach

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \left(\arctg \frac{L_1}{H-h} - \frac{H-h}{\sqrt{B^2 + (H-h)^2}} \cdot \arctg \frac{L_1}{\sqrt{B^2 + (H-h)^2}} \right).$$

Abb. 56 gibt daraus berechnete Werte bildlich wieder.

Für die Berücksichtigung von Mauervorsprüngen muß auf das Schrifttum verwiesen werden: (2) und (5). Für Höfe mit nichtrechteckiger Grundfläche ist (2) das Burchardsche Beleuchtungsmeßblatt angegeben. In den meisten Fällen reicht das hier Angegebene aus.

Hervorgehoben sei der beachtliche Vorschlag in den Leitsätzen für Tagesbeleuchtung, daß der Frontenabstand der Häuser aus beleuchtungstechnischen, also auch gesundheitlichen Gründen, nicht weniger als das Doppelte der Häuserhöhe betragen sollte — eine Forderung, die zum Leidwesen vieler Wohnenden und Arbeitenden noch nicht entfernt hinreichend Berücksichtigung findet.

Wie wichtig ein flacher und wie nachteilig ein steiler Lichteinfall ist, das macht folgende Rechnung deutlich; sie bezieht auch die Verschlechterung durch gesteigerte Spiegelung am Fensterglas bei steilerem Lichteinfall mit ein. In einer Fensterfläche herrsche, wenn keine gegenüberliegende Wand da ist, die Beleuchtungsstärke $E_{10} = E_{a, wa} \cdot f = 10000 \cdot 0,5 = 5000 \text{ lx}$. Die Fensterfläche betrage 10 m^2 . Dann tritt in die Fensteröffnung der Lichtstrom $\Phi = 50000 \text{ lm}$ ein. Da die mittlere Einfallrichtung 45° beträgt, so treten durch das Glas nur 47500 lm , nämlich 95 v. H. (Abb. 25). Steht diesem Fenster aber eine Häuserwand von gleicher Höhe über dem Fenster, wie Abstand, gegenüber, so wird $f = 0,18$, also $E_{10} = 1800 \text{ lx}$. Falls man von Abschattungen durch die Mauerdicke noch ganz absieht, wird dann $\Phi_a = 18000 \text{ lm}$. Der mittlere Einfallswinkel ist 75° , die Spiegelung nimmt dann 28 v. H. fort. Durch das Fenster gelangen also nur 13000 lm . Während sich also der Fensterfaktor in beiden Fällen verschlechtert wie $2,8 : 1$, nimmt der in den Raum gelangende Lichtstrom ab wie $3,8 : 1$.

8. Lage und Form der Fenster. Das Bisherige führte zur Bestimmung der Fenstergröße. Mag sie schon richtig bestimmt sein, so führt erst die richtige Fensterform und Fensterlage auf eine gute Beleuchtung und damit volle Ausnutzung der Fensterfläche. Dieselbe Fensterfläche, an verschiedenen Wandstellen angebracht, hat ganz verschiedene Wirkungen. Dabei ist die Lage in Breitenrichtung nicht so wesentlich. Denn, sobald die Fläche breiter ist als etwa 3 m , wird man beginnen, mehrere Fenster anzubringen. Dagegen ist die Lage in Höhe sehr wesentlich; sie verursacht ganz verschiedenartige Wirkungen.

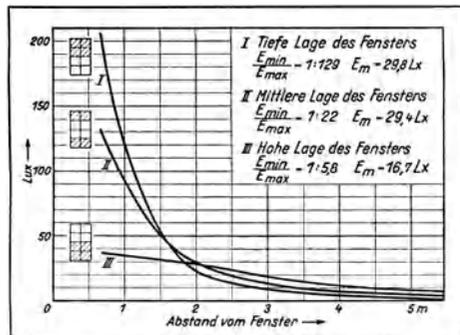


Abb. 57. Beleuchtungsverteilung und Fensterlage

Das zeigt Abb. 57: Liegt die Fensteröffnung tief, so werden die fensternahen Punkte sehr stark, die fensterfernen sehr schwach beleuchtet; liegt die Öffnung aber hoch, so werden die Beleuchtungswerte im Vergleich zum vorigen Fall bei den fensternahen Punkten abnehmen und bei den fensterfernen wegen des weniger steilen Licht-einfalls zunehmen. Die unteren Fensterteile versorgen also in erster Linie die fensternahen Bereiche, die oberen die fensterfernen mit Licht. Die mittlere Beleuchtungsstärke wird also bei tiefer gelegenem Fenster größer sein als bei höherem; die Gleichmäßigkeit wird aber um so besser sein, je höher das Fenster liegt. Was die Form eines Fensters betrifft, so folgt daraus: Je größer die Höhe eines Fensters ist, um so besser wird die Gleichmäßigkeit in Richtung der Raumentiefe; je größer die Breite, desto besser wird die Gleichmäßigkeit in Breite. In Kirchen herrscht daher durch die oft hoch angebrachten oder hochragenden Seitenfenster eine hohe Gleichmäßigkeit auch bei verhältnismäßig kleiner Fensterfläche.

Da die Kosten für Erstellung und Erhaltung einer Fensterfläche etwa das Fünffache derjenigen für Mauerwerk darstellen und da Fensterflächen immer Stellen erhöhten Wärmeverlustes bedeuten, so wird man Fensterflächen in gewissen Grenzen halten. Wichtig sind daher die Breiten und Höhen, die wirklich notwendig sind. Man wird im allgemeinen unter den Fenstern eine Brüstung von 80 bis 100 cm lassen; so schützt man das Auge vor störenden Außenhelligkeiten in Richtung von unten. Über den Fenstern wird mit einem Fenstersturz von 10 bis 30 cm zu rechnen sein. Von der Raumhöhe steht also für den Durchschnitt 1 m nicht für die Fensterhöhe zu Gebote.

9. Fensterhöhe und Fensterbreite. Wie die Berechnungen über Fensterflächen beziehen sich diese Bestimmungen auch nur auf die Maße der Glasfläche, nicht etwa auf die der Maueröffnung.

Die Leitsätze für Tagesbeleuchtung stellen die Forderung auf, daß für Arbeitsplätze die Entfernung a vom Fenster höchstens das Doppelte der Fensterhöhe sein soll. In Anbetracht der Erfahrung, daß diese Forderungen der Leitsätze für den Durchschnitt noch zu hoch sind, wird man die zulässigen Arbeitstiefen abstufen je nach der Art der Arbeit. Da man die Raumentiefe t nicht erheblich größer wünschen wird als die zulässige Arbeitstiefe a , so wird man für sie ansetzen $t = 1,25 a$. Demgemäß werden für die Verhältniszahl V_2 von Fensterhöhe zu Raumentiefe ($V_2 = h_F : t$) die Werte der Aufstellung 19 anzusetzen sein. Wollte man einzig hiervon ausgehen, so wäre also

Aufstellung 19

Art der Arbeit	V_0	V_1	V_2	T
Sehr feine	5	0,5	0,4	0,035
Feine	8	0,43	0,3	0,015
Durchschnittliche (Wohnen) . .	10	0,4	0,25	0,007
Halbfeine	14	0,35	0,2	0,005
Grobe	33	0,3	0,1	0,002

jetzt auch die Fensterbreite bestimmt, da die Höhe aus der Tiefe gewonnen ist und die Fläche aus der Wirkungsgradberechnung. Aber auch über die Breite der Fenster besteht von seiten der Architekten eine Forderung, die man nicht unberücksichtigt lassen darf.

Es gilt als Anhalt, daß die Fensterbreite eines Raumes insgesamt etwa $\frac{3}{4}$ von der Breite der Fensterfront betragen soll. Auch dies ist eine Durchschnittsforderung, die man gemäß der Art der Arbeit abstufen muß. So ergeben sich für die Verhältniszahlen V_1 Fensterbreite zu Raumbreite ($V_1 = b_F : b_R$) die Werte der Aufstellung 18. Also läßt sich die Fensterbreite ausschließlich aus der Raumbreite berechnen.

Die beleuchtungstechnische Forderung wegen der Fensterhöhe folgt aus einer Winkelbetrachtung. Man glaubt, fordern zu müssen, daß jeder Arbeitsplatz unmittelbar vom Himmelslicht getroffen wird und daß der Lichteinfall nicht zu flach ist. Letzteres, damit die Schatten nicht zu ausgedehnt werden. Je steiler das Licht, um so kürzer die Schatten. Der geringste Wert des Einfallswinkels ϵ soll an einem Arbeitsplatz 27° betragen (Abb. 58). Das ist gemäß $\text{tg } \epsilon = 0,5$ bei $\epsilon = 27^\circ$ gleichwertig der Forderung, daß $a = 2 \cdot h_F$ sein soll und hängt wegen

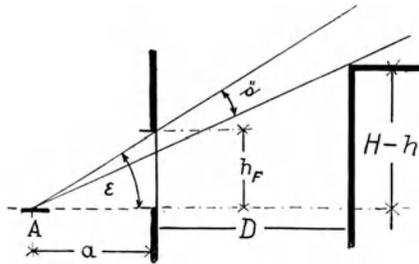


Abb. 58. Öffnungs- und Erhebungswinkel

$$\text{tg } \epsilon = \frac{h_F}{a} = \frac{H-h}{D+a} \left(\sim \frac{H-h}{D}, \text{ wenn } D > a \right) \cong \frac{1}{2}$$

mit der Forderung über den Häuserabstand ($D > 2 H$) zusammen. Außerdem wird aber verlangt, daß der Öffnungswinkel δ , in dem also das Himmelsgewölbe vom Arbeitsplatz aus sichtbar ist, mindestens 4° betrage. Die obigen Festsetzungen für die verschiedenen Arbeitsarten bewirken, daß diese Winkelorderungen nur bei den feineren Arbeiten für alle Arbeitstiefen erfüllt werden. Aus $D = 2 \cdot (H - h)$ folgt für f ein geforderter Mindestwert f_{min} vom Wert 0,277, der aber praktisch oft unterboten wird.

10. Die endgültigen Fensterwerte. Bildet man unter Berücksichtigung der Ausdrücke von V_1 und V_2 deren Produkt, so ergibt sich

$$V_1 \cdot V_2 = \frac{b_F h_F}{b_R t} = \frac{F_F}{F_B} = \frac{1}{V_0}.$$

Also bestehen nebeneinander für V_0 zwei unabhängige Beziehungen

$$V_0 = \frac{1}{V_1 \cdot V_2} \quad \text{und} \quad V_0 = \frac{\eta \cdot f}{T}.$$

Ihre Ergebnisse sind keineswegs immer gleich.

Sind beide V_0 -Werte ungleich, so ist der größere der maßgebende. Liefert das Fensterformverfahren den größeren, so bleibt es bei dieser Fensterform; liefert aber das Wirkungsgradverfahren das größere Flächenverhältnis, so muß die Fensterfläche hiernach gewählt werden und die Fensterform entsprechend dieser größeren Fläche unter Berücksichtigung der schon vorhandenen Mindestwerte für die Form bestimmt werden. Soweit die Vergrößerung von V_0 nach dem Wirkungsgrad durch hohe Gegenfront verursacht ist, wird man die Fensterform möglichst in Höhe vergrößern; soweit die Raumausstattung daran teilhat, braucht nur in Fensterbreite zugeschlagen zu werden; im allgemeinen wird man Breite und Höhe des Fensters verhältnismäßig vergrößern.

Beispiel. Raumbreite $b_R = 12,5$ m; Raumtiefe $t = 8$ m; Arbeit : halbflein; V_0 nach Wirkungsgradformel = 17. Es ergibt sich 1. $h_F = V_2 \cdot t = 8 \cdot 0,2 = 1,6$ m mit $V_2 = 0,2$; 2. $b_F = 12,5 \cdot 0,35 = 4,4$ m mit $V_1 = 0,35$. Also: Fensterfläche $F_F = 1,6 \cdot 4,4 = 7$ m². Da $F_B = 100$ m² ist, so folgt $V_0 = 100 : 7 = 14,2$. Es ist das größere Verhältnis zu wählen; daher Flächenvergrößerungsfaktor $p = 17 : 14 = 1,2$; Breiten und Höhenvergrößerungsfaktor daher $q = \sqrt{1,2} = 1,1$. Fensterbreite daher 4,84 m, Fensterhöhe 1,76 m.

Durch das Bisherige sind aber erst Fläche und Form des Fensters als diejenigen einer einzigen Öffnung bekannt. Sobald die Fensterfront es zuläßt, wird man diese einzige theoretische Gesamtöffnung in mehrere Fensteröffnungen zerlegen und gleichmäßig auf die Front verteilen. Je mehr Fenster, um so bessere Breitengleichmäßigkeit. Hier läßt der Beleuchtungsentwurf dem Architekten daher große Möglichkeiten der Gestaltung.

Die Fensteröffnung ist die Glasöffnung. Die Maueröffnung bestimmt man durch Zuschlag des Rahmenwerks. Dieses pflegt bei geringer Ausdehnung $\frac{1}{4}$ des Glases, bei größter die gleiche Fläche wie das Glas auszumachen, so daß die Vergrößerungsfaktoren für Mauer- zu Glasöffnung schwanken zwischen 1.3 und 2.

Die Bestimmungen beziehen sich nur auf Einfachglas. Bei Doppelfenstern ist wegen des erhöhten Lichtrückwurfs die Fensteröffnung bei freiem Lichteinfall auf das 1,1fache, bei steilem auf das 1,3fache zu erhöhen. Bei Matt- bzw. Opalgläsern müssen die Vermehrungen mindestens das 1,3- bzw. 1,5fache betragen.

11. Zusammenstellung. Die Übersicht über alle vorkommenden Größen wird durch eine Zusammenstellung erleichtert:

$$1. \eta \cdot f = T \cdot V. \quad 2. T = E_m/E_{a, wa}.$$

$$3. f = 0,5 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{H-h} \right)^2}} \right) = \frac{E_F}{E_{a, wa}}.$$

$$4. V_0 = F_B : F_F = \frac{1}{V_1 \cdot V_2}. \quad 5. V_1 = b_F : b_R. \quad 6. V_2 = h_F : t.$$

Es bedeuten: η Wirkungsgrad, f Tageslichtkennzahl, D Häuserabstand, H Hausfronthöhe, h äußere Fensterbrüstungshöhe, E_F Beleuchtungsstärke im Fenster, $E_{a, wa}$ Beleuchtungsstärke draußen waagrecht, E_m Innenbeleuchtungsstärke, T Tageslichtkennzahl, V_0 Flächenverhältnis, F_B Bodenfläche, F_F Fensterglasfläche, b_R Raumbreite (fensterseitig), b_F Fensterbreite, t Raumtiefe, h_F Fensterhöhe.

12. Rechenblätter zur Tageslichtbeleuchtung. Die Rechenblätter sind deshalb nützlich, weil sie neben schneller Bestimmung der gesuchten Werte auch schnell eine Übersicht ihrer Veränderung gestatten.

Im ersten Blatt (Abb. 59), dem Fensterflächenblatt, das dem Wirkungsgradverfahren entspricht, geht man (rechts) vom Häuserabstand D aus, verbindet ihn mit der wirksamen Höhe $(H - h)$ und gelangt unmittelbar zu f . Nun verbindet man in der anderen Leiterngruppe (links) den f -Wert mit dem η -Wert, und gelangt zu einem Punkt der unbenannten Achse. Diesen verbindet man mit dem T -Wert und erhält V_0 . Verbindet man V_0 mit F_B , so ergibt sich $F_{F,1}$. Man erhält also die gesuchte Fensterfläche mit Hilfe von vier Geraden (6).

Im zweiten Blatt (Abb. 60), dem Fensterformblatt, geht man, je nach der Raumbestimmung, vom Festwert V_1 aus, verbindet ihn mit b_R und gelangt zur Fensterbreite b_F . Verbindet man den V_2 -Wert mit t , so erhält man h_F . Damit liegt die Fensterform fest. Die Fensterfläche $F_{F,2}$ findet man durch Verbindung von b_F mit h_F . Ebenso findet man durch Verbindung von b_R und t_R die Lichtnutzfläche F_R . Mit den Rechenblättern wird sich jede vorkommende Fensterform und Flächenbestimmung schnell und leicht erledigen lassen. Die volle Lösung geschieht mit 8 Fluchtgeraden. Man ist dann sicher, alle Einflüsse, wie Raumbestimmung (in T , V_1 und V_2), Raumbreite, Raumtiefe, Raumwirkungsgrad und Lichteinfallswinkel berücksichtigt zu haben.

Die verhältnismäßige Erweiterung von Fensterbreite und Fensterhöhe ist mit dem Rechenblatt ebenfalls leicht dadurch möglich, daß man durch den verlangten Fensterflächenwert eine Gleichgerichtete zu der Verbindenden der bisherigen Höhen- und Breitenwerte zieht. Reichen die Raummaße in einer Richtung nicht aus, so führt eine Drehung um den Punkt verlangter Fläche zu der besten noch erfüllbaren Fensterform.

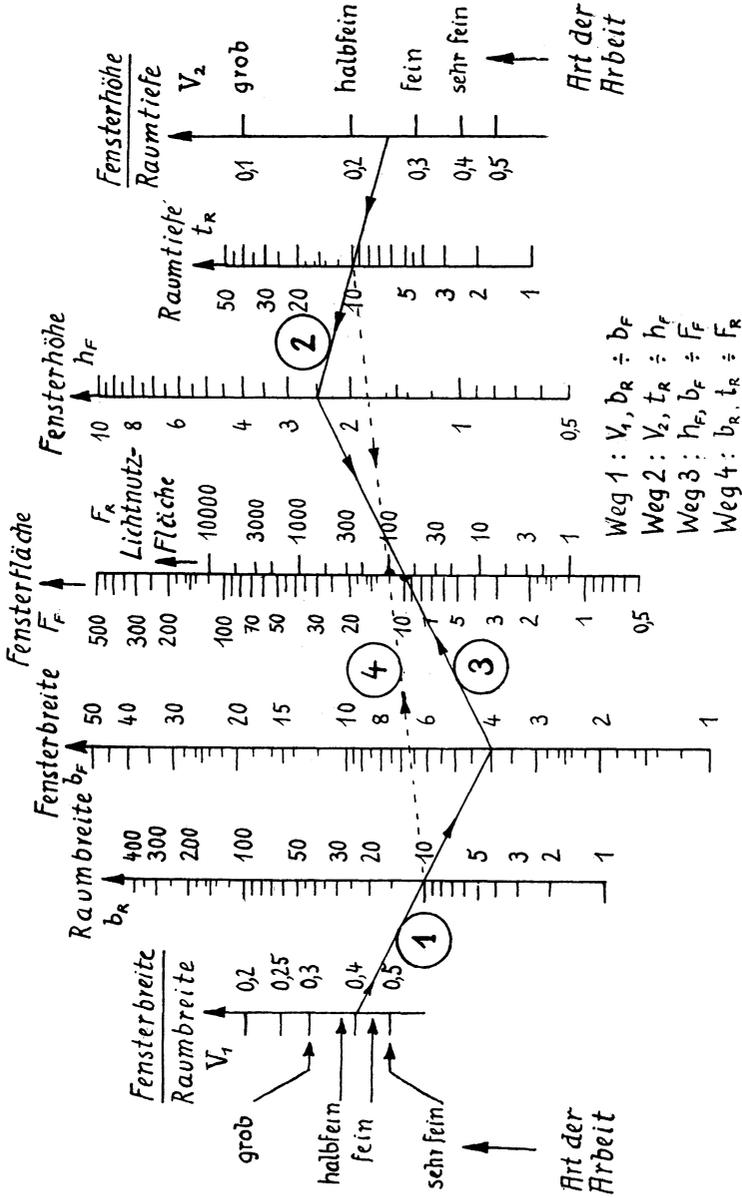


Abb. 60. Bestimmung der Fensterform

Muß die Fensterhöhe auf Grund der Raumhöhe unzureichend gewählt werden, so läßt sich mit $a = 2 h_F$ die für die Arbeit zulässige Raumtiefe bestimmen.

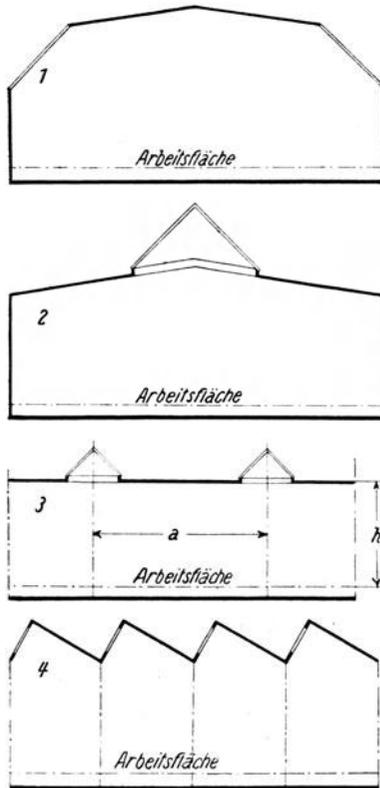


Abb. 61. Hauptarten von Oberlichtern

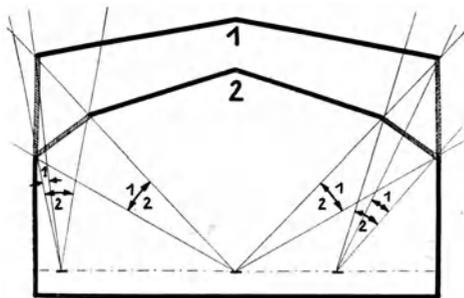


Abb. 62. Lotrechte und schräge Fenster

13. Oberlichterarten. Oberlichter für Tageslicht sind dann notwendig, wenn es sich um Räume handelt, die überhaupt keine Flächen besitzen, an denen lotrechte Fenster angebracht werden können, wie bisweilen bei Versammlungsräumen in größeren Gemeinschaftshäusern; oder doch solche, bei denen die Wandflächen nicht entfernt eine solche Ausdehnung besitzen, daß sie die Fensterglasflächen ausreichender Größe aufnehmen können, wie vielfach in Fabrikhallen von großer Arbeitsfläche, jedoch geringer Höhe. Abb. 61 zeigt alle wichtigen Fälle von Oberlichtern (entsprechend den Leitsätzen für Tageslicht) mit Ausnahme des einfachsten Falles: eines waagerechten Oberlichtes. „1“ ist ein „Mansarddach“, „2“ ein „Firstdach“, „3“ ein „Satteldach“, „4“ ein „Sheddach“. Bei dem letzten soll, um den Einfall unmittelbaren Sonnenlichts zu vermeiden, die Glasfläche nach Norden gerichtet sein.

Welchen Vorteil ein nicht lotrechter Lichteinlaß gegenüber einem lotrechten gibt, zeigt Abb. 62. Dort ist ein lotrechtes und ein schräges Fenster so gewählt, daß beide im ungünstigsten Punkt die gleiche Beleuchtungsstärke bewirken. Dann erhalten alle anderen Punkte durch das

schräge Fenster höhere Beleuchtungsstärken, wie an den größeren Raumwinkeln zu erkennen ist. Dabei hat das schräge Fenster kleinere Fensterfläche, bietet also besseren Wärmeschutz!

14. Größenberechnung. Die Größe der Oberlichtglasfläche bestimmt man ebenso wie die der lotrechten Fenster mit der Fensterformel

$$V_0 \cdot T = \eta \cdot f.$$

Für die Tageslichtkennzahlen T bleiben die Werte von Aufstellung 16 gültig. Da für Oberlichter aber weniger Maßbegrenzungen vorliegen als bei Seitenlichtern, so sollten Vergrößerungen von T bis auf das Doppelte der Tabellenwerten nicht gescheut werden, zumal für Stätten der Arbeit, für die möglichst gute Beleuchtung geschafft werden sollte. Gesucht ist das Flächenverhältnis V_0 von Lichtnutzfläche zu Fensterglasfläche. Dazu müssen

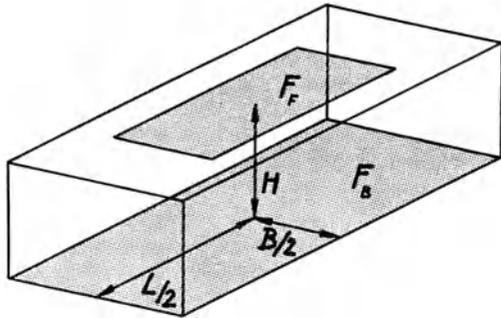


Abb. 63. Zur Bestimmung der Oberlichtgröße

die Werte vom Wirkungsgrad η und dem Fensterbeiwert f bekannt sein. Der Bestimmung dieser Werte dient das Folgende.

1. *Der Wirkungsgrad.* Da das von oben kommende Licht eine andere Einfallsrichtung hat als das eines Seitenfensters, so ist die Lichtausnutzung im Raum in beiden Fällen eine verschiedene. Die Wirkungsgradwerte der Aufstellung 17 sind also ohne weiteres nicht zu übernehmen. Soweit andere Werte für η nicht vorliegen oder ermittelt werden können, kann man $\eta = 50$ v. H. einsetzen. Von Frühling wird jedoch für einen Raum mit waagrechttem Oberlicht eine Berechnung für η angegeben (2). Sie gilt genau nur für Räume mit kreisförmiger Grundfläche (Pantheon). Da die Abweichungen für rechteckige Räume nicht groß sind, sei das Berechnungsverfahren hier für diesen häufigsten Fall angegeben. Für zylindrische Räume mit dem Halbmesser R gilt

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{H}{R}\right)^2}.$$

Bei einem rechteckigen Raum wird man für R ersetzen können (Abb. 63)

$$R = \frac{L + B}{4},$$

so daß für η folgt

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{4H}{L+B}\right)^2}.$$

Beispielsweise ergibt sich für $L = 40$ m, $B = 20$ m und $H = 10$ m: $\eta = 0,7$. Für Fall 2 und 3 wird man diese Formel auch anwenden. Je größer die Höhe ist, um so kleiner wird η . Der Einfluß einer Raumbekleidung ist geringer als bei lotrechten Fenstern, weil das Licht größtenteils unmittelbar zur Lichtnutzfläche gelangt.

2. *Der Fensterbeiwert.* Hier kommt die Fensterbeiwertformel von Burchard in ihrer ursprünglichen Form zur Anwendung, aus der die für lotrechte Fenster nur als Sonderfall abgeleitet ist (Frühling) (5).

$$f = \sin(\gamma/2) \cdot \cos \varphi.$$

Darin ist gemäß Abb. 64 der Winkel γ der Winkel für den Himmelsausschnitt, der für das Fenster infolge abschirmender Gebäudeteile in Betracht kommt,

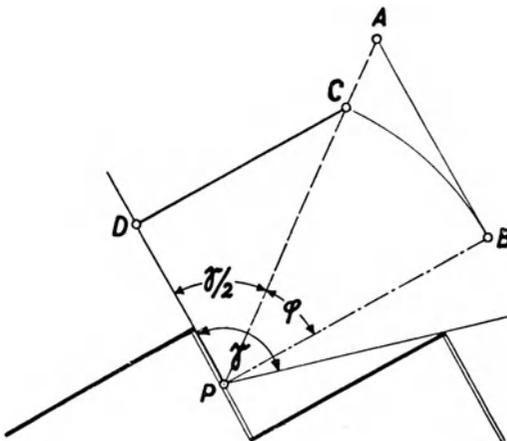


Abb. 64. Konstruktion des Fensterbeiwerts

gemessen von Fenstermitte. Winkel φ ist die Abweichung der Richtung der Halbierenden von γ von der Senkrechten auf dem Fenster. Diese Formel ist auf alle Fensterarten unmittelbar anwendbar. Man sieht, daß f für ein waagerechtes Fenster, das durch keine Nachbarbauten abgeschirmt wird, den Wert 1 annimmt; denn φ ist dann gleich 0 und $\gamma/2$ gleich 90° . Abb. 64 gibt ein zeichnerisches Verfahren an zur Auffindung von f : Auf der Richtung $\gamma/2$ wird die Strecke PA von beliebiger Länge aufgetragen. Man fällt das Lot AB auf die Senkrechte des Fensters. Die Länge PB überträgt man auf Richtung PA . Das Lot von C auf die Fensterebene hat eine solche Länge, daß $CD : PA = f$ ist. Wählt man $PA = 1$, so ist CD selbst gleich f .

Beispiel. Voriges Beispiel: $f = 1$. $\eta = 0,7$, $T = 2$ v. H., $V_0 = \frac{1 \cdot 0,7}{0,02} = 35$. $F = 40 \cdot 20 = 800$ m². Fensterfläche also $800 : 35 = 23$ m² Glas.

15. Gleichmäßigkeit und Schattigkeit. Da die Gleichmäßigkeit der Beleuchtung mit der Unterteilung der Lichtsendestellen zunimmt, hat der Fall 2 die stärkste Ungleichmäßigkeit, die durch einen ausgeprägten Gipfel der Kurve der Tageslichtkennzahlen unter dem Oberlicht zum Ausdruck kommt (Abb. 61). Das Firstglasdach ist also besonders geeignet,

wenn die Hauptarbeitsfläche in Richtung der Längsachse des Raumes in seiner Mitte liegt. Für ausgedehnte Arbeitsflächen ist Fall 1 der nächstbessere; die Gipfel der T -Kurven liegen unter den Oberkanten der Fenster. Das Satteldach (3) hat unter den Glassatteln die Beleuchtungsgipfel; die Gleichmäßigkeit ist gut, wenn die undurchlässige Deckenstrecke zwischen zwei Satteln nicht größer als die Deckenhöhe ist; sie ist sehr gut, wenn der Abstand der Sattelmitten gleich der Deckenhöhe ist. Das Sheddach zeigt die beste Gleichmäßigkeit durch die naturgemäß große Fensteranzahl. Als förderlich wirkt sich aber ein Lichtrückwurf an den undurchlässigen Dachflächen im Innern aus. Diese sind daher so hell wie möglich zu halten. Die Sheddachwinkel pflegt man mit 30° (Glas) und 60° anzusetzen. Selbstverständlich wächst die Gleichmäßigkeit mit Abnahme des Flächenverhältnisses V_0 , das heißt mit wachsender Fensterglasfläche. Die Ungleichmäßigkeiten für Abb. 61 sind der Reihe nach rund: 4 zu 1; 1,7 zu 1; 1,5 zu 1; 1,05:1 (1).

Die Teilschattigkeit ist um so geringer, je größer die Anzahl der Fenster ist. Im Fall 4 liegen die Schatten überall in gleicher Richtung. In diesem Fall hat man es mit einer Art vorwiegend unmittelbaren Beleuchtung zu tun wegen des teilweisen Lichtrückwurfs an den undurchlässigen Dachflächen. Alle anderen Fälle sind, mit Ausnahme des ersten für geringe Raumbreite, wie unmittelbare Beleuchtung zu betrachten. Denkbar, jedoch wohl bisher kaum angewandt, wäre eine voll oder halbmittelbare Beleuchtung mit Oberlichtern derart, daß die Oberlichter durch Spiegelflächen ganz oder teilweise so abgedeckt sind, daß die Spiegel das Licht auf helle, den Oberlichtern benachbarte Rückwurfflächen werfen, von denen es zur Arbeitsfläche gelangt. Hier würde die Gleichmäßigkeit wachsen und die Schattigkeit abnehmen. Trotz Herabsetzung des Wirkungsgrades sollte diese Anordnung gerade für Räume mit anspruchsvoller Arbeit in Betracht gezogen werden. Vergleichbares gibt es in nordischen Backsteindomen, in denen man von bestimmten Stellen aus kein einziges der zahlreichen Fenster sehen kann, da sie durch die Säulen verdeckt sind.

16. Abschließendes. An das Fensterrahmenwerk ist die Forderung zu stellen, daß es so hell wie möglich sein soll; denn nur dann führt der immer noch große Hellgegensatz von Himmelsleuchtdichte zu der des Rahmens auf Beträge, die nicht stören.

Alle nicht unbedingt notwendigen Vorsprünge an den Außenbegrenzungen der Maueröffnungen sind zu vermeiden, um den Lichteintritt nicht zu beschneiden. Ebenso sollten dunkle ständige Vorhänge über den oberen Teilen eines Fensters völlig vermieden werden, es sei, daß die Fenster auch dann noch ausreichen. Die Fensterleibungen sollten immer so hell wie möglich gehalten werden, denn sie heben noch beträchtlich durch den Rückwurf die Raumaufhellung. Abgeschrägte Leibungen sind beleuchtungstechnisch von Vorteil. Bei der Anlage von Baumgruppen sollte immer mit erwogen werden, niemals die Fenstergröße von Arbeitsräumen dadurch unwirksam zu machen, daß der Schönheit mehr Recht gegeben wird als der Gesundheit. Von allergrößter Wichtigkeit für die Beleuchtungsverhältnisse solcher Räume, die geringen Fensterbeiwert aufzuweisen haben, die also wenig unmittelbares Licht erhalten, ist der Lichtrückwurf der Oberfläche der Häuseraußenwandungen. Diese sollten daher immer, wo ein solcher Einfluß möglich ist

(auf Stadtstraße immer!), auch so hell wie ausführbar gehalten werden, zwar nicht zum eigenen Vorteil, jedoch dessen des Gegenüber.

Versammlungsräume erhalten oft Fenster auf zwei gegenüberliegenden Seiten. Die Berechnung wird dann so angestellt, als ob für jede Seite nur eine Längshälfte des Raumes zu beleuchten wäre. Man führt die Bearbeitung also nur für eine Raumhälfte durch; die Gleichmäßigkeit wird dann immer besonders gut.

Architekten werden für viele Fälle die benötigte Fenstergröße aus ihren Erfahrungen richtig wählen und die geschilderten Verfahren nicht benötigen. Das gilt vornehmlich für Wohnbauten. Die Bedeutung der Berechenbarkeit zulänglicher Fenstergrößen und Formen beginnt da, wo die Voraussetzungen für wirklich gut zu leistende Qualitätsarbeit geschaffen werden sollen; dort wird eine exakte Ermittlung unerlässlich sein. Auch werden so erst Räume als für gewisse Arbeiten nicht ausreichend mit Sicherheit gekennzeichnet werden können. Mit einer Rationalisierung des unbedingt in der Hauptsache unrational bedingten Wohnhauses haben die dargelegten Betrachtungen nichts zu tun, sondern nur mit der Erhaltung der Arbeitskräfte des leistungsberufenen Menschen.

Die gegebene Bestimmung von Fensterform und -fläche in der dargestellten Art hat nicht das Ziel, möglichst große Fensteröffnungen zu schaffen, sondern solche von jeweils ausreichender Größe. Diese wirklich ausreichenden Fenster sind bisweilen kleiner als die, welche vom Architekten gewählt werden. Einer Vergrößerung der Fensterfläche gegenüber der beleuchtungstechnisch bestimmten Größe steht beleuchtungstechnisch nichts im Wege.

Zum Abschluß sei erwähnt, daß dort, wo das Tageslicht durch zusätzliches künstliches ergänzt werden muß, am besten Mischlicht mit Quecksilberdampflicht verwendet wird (7).

Schriftumsnachweis

(1) DIN 5034, Leitsätze für Tagesbeleuchtung; H. Lux, Licht **3**, 51, 1933. — (2) H. G. Frühling, Beleuchtung von Innenräumen durch Tageslicht, Berlin 1931. — (3) W. Büning und W. Arndt, Tageslicht im Hochbau, Berlin 1935. — (4) Die Aufstellung gibt kleinere Werte an als die entsprechenden in DIN 5034, die sich als zu hoch erwiesen. — (5) A. Burckhard, Zentrabl. d. Bauverw. S. 38 u. 597, 1919. — (6) E. Meyer, Licht **4**, 19, 1934. — (7) H. Lux, Li. La. **15**, 721, 1926; E. Summerer, Licht **5**, 152, 1935.

XII. Raumbeleuchtung mit künstlichem Licht

1. Erforderliche Beleuchtungsstärken. Wenn ein Raum mit Hilfe von künstlichem Licht richtig beleuchtet werden soll, so ist es allererst notwendig, die richtigen Stärken der Beleuchtung zu wählen. Auf Grund praktischer Erfahrungen sind von der Deutschen

Lichttechnischen Gesellschaft bestimmte Beleuchtungsstärken festgelegt worden, die für verschiedene Räume und ihre Bedürfnisse als ausreichend gelten; es sind das Mittel- und Geringstwerte. Die Aufstellung 20 und 21, zu deren Erläuterung die weiteren Aufstellungen 22 und 23 dienen, geben eine Zusammenstellung der anzuwendenden Zahlwerte. Auf der Kenntnis dieser Werte baut sich die Raumbeleuchtungsberechnung auf (1), (23).

Aufstellung 20. Für Arbeitsstätten und Schulen

Art der Arbeit	Reine Allgemeinbeleuchtung			Arbeitsplatzbeleuchtung und Allgemeinbeleuchtung		
	Mittlere Beleuchtungsstärke		Beleuchtungsstärke der ungünstigsten Stelle, Mindestwert lx	Arbeitsplatzbel., Beleuchtungsstärke der Arbeitsstelle lx	Allgemeinbeleuchtung	
	Mindestwert lx	Empfohl. Wert lx			Mittlere Beleuchtungsstärke lx	Beleuchtungsstärke der ungünstigsten Stelle lx
Grobe . .	20	40	10	50— 100	20	10
Mittel- feine . .	40	80	20	100— 300	30	15
Feine . .	75	150	50	300—1000	40	20
Sehr feine . .	150	300	100	1000—5000	50	30

Aufstellung 21.

Für Räume für Wohnen, Aufenthalt und Durchgang

Art der Ansprüche	Reine Allgemeinbeleuchtung		
	Mittlere Beleuchtungsstärke		Beleuchtungsstärke der ungünstigsten Stelle, Mindestwert lx
	Mindestwert lx	Empfohlener Wert lx	
Niedrige	20	40	10
Mittlere	40	80	20
Hohe	75	150	50

Aufstellung 22

Grobe Arbeit

<i>Gießerei:</i>	Eisengießen — Gußputzen.
<i>Metallbearbeitung:</i>	Grobwalzen und -ziehen — Schmieden am Amboß und im Gesenk — Schruppen.
<i>Keramische Industrie:</i>	Arbeiten im Ofenraum der Glashütte und Ziegelei.
<i>Gerberei:</i>	Arbeiten an den Gruben und Fässern.

Mittlere Arbeit

<i>Gießerei:</i>	Spritzguß — einfaches Formen.
<i>Metallbearbeitung:</i>	Arbeiten an der Revolverdrehbank (ausgenommen Einrichten) — Pressen und Stanzen — Grobmontage.
<i>Holzbearbeitung:</i>	Sägen, Hobeln, Fräsen — Zusammenbau.
<i>Papierherstellung:</i>	Cellulose- und Holzstoffbereitung — Arbeiten an Papiermaschinen.
<i>Lebensmittelbetriebe:</i>	Bäckerei — Metzgerei — Mühlen — Küche — Wirtschaftsräume.
<i>Schule:</i>	Aula, Sammlungen, Turnhallen.
<i>Verkaufsräume:</i>	Mittlere Ansprüche, helles Gut.

Feine Arbeit

<i>Gießerei:</i>	Schwieriges Formen.
<i>Metallbearbeitung:</i>	Feinwalzen und -ziehen — Einrichten von Revolverdrehbänken — Feindrehen — feine Preßarbeit — Feinmontage.
<i>Holzbearbeitung:</i>	Feine Sägearbeiten — Polieren.
<i>Papierherstellung und -verarbeitung:</i>	Zurichten und Fertigmachen.
<i>Geweberherstellung und -verarbeitung:</i>	Spinnen, Weben und Bearbeiten von hellem Gut, Färben, Zuschneiden, Nähen.
<i>Lederbearbeitung:</i>	Färben, Zuschneiden und Nähen.
<i>Druckerei:</i>	Maschinensatz, Drucken.
<i>Büroarbeit:</i>	Maschinenschreiben, Lese- und Schreibarbeit, Technisches und kaufmännisches Büro.
<i>Schule:</i>	Klassenzimmer, Hörsäle, Lesezimmer, Lehrerzimmer, Werkstätten.
<i>Verkaufsräume:</i>	Hohe Ansprüche, dunkles Gut.

Sehr feine Arbeit

<i>Metallbearbeitung:</i>	Gravieren — feinmechanische Arbeiten — Montage von Meßinstrumenten.
<i>Glasbearbeitung:</i>	Schleifen und Polieren optischer Gläser.
<i>Geweberherstellung und -verarbeitung:</i>	Spinnen, Weben und Bearbeiten von dunklem Gut, Zuschneiden, Nähen.
<i>Druckerei:</i>	Zurichten von Druckmaschinen, Handsatz, Lithographieren, Papierprüfen.
<i>Büroarbeit:</i>	Zeichnen.
<i>Schule:</i>	Zeichensäle, Konstruktionsbüro, Handarbeitsräume, Räume für kunstgewerbliche Arbeiten.

Aufstellung 23

Geringe Ansprüche

<i>Wohnen:</i>	Schlafräume — Fremdenzimmer — Keller — Boden.
<i>Aufenthalt und Gemeinschaft:</i>	Kirchen.
<i>Durchgang:</i>	Flur — Treppe — Vorraum — Hallen — Bahnsteighallen.

Mittlere Ansprüche

<i>Wohnen:</i>	Wohn-, Herren-, Speise-, Musikzimmer — Bad — Küche.
<i>Aufenthalt und Gemeinschaft:</i>	Zuschauerraum — Gesellschaftsraum — Vortragsraum — Gaststätten — Wartesaal.
<i>Durchgang:</i>	Garderobe — Gepäckraum — Schalter.

Hohe Ansprüche

<i>Aufenthalt und Gemeinschaft:</i>	Konzertsaal — Festsaal.
-------------------------------------	-------------------------

Die Berechtigung der vorgeschlagenen Beleuchtungsstärken ist genauer aus folgendem zu ersehen:

In besonders vielen Fällen beruht das Erkennen darauf, daß man Helligkeitsunterschiede wahrnimmt. So wird Körperlichkeit oft nur durch Leuchtdichteunterschiede wahrgenommen; denn die verschieden zum Licht gerichteten Oberflächen sind verschieden stark beleuchtet und haben damit verschiedene Leuchtdichte. Wichtig ist daher die Kenntnis wahrnehmbarer Leuchtdichteunterschiede.

Hebt sich die zu erkennende Fläche durch ihre Leuchtdichte B von derjenigen B_0 des Umfeldes ab, so bezeichnet man den auf die Umfeldleuchtdichte bezogenen Leuchtdichteunterschied als Grenzkontrast GK , falls er eben noch wahrnehmbar ist. Also

$$GK = (B - B_0)_{\min} : B_0.$$

Der Grenzkontrast ist eine wichtige Größe zur Beurteilung von Beleuchtungen.

Abb. 65 zeigt nun, daß der Grenzkontrast durch Zunahme der Umfeldleuchtdichte B_0 verändert wird; bis zu $B_0 = 10^4$ asb nimmt GK ab, um von da ab wieder zu wachsen, offenbar auf Grund beginnender Blendung. Die beste Leuchtdichteunterschiedsempfindlichkeit liegt also bei kleinstem Grenzkontrast zwischen 100 und 10000 asb. Das besagt, daß für einen mittleren Lichtrückwurf von 0,4 die beste Unterschiedsempfindlichkeit erreicht wird mit etwa $B = 5000$ asb = $\rho \cdot E$, also $E = 12500$ lx. Diese Zahl ist also heranzuziehen, wenn man ein Urteil über die Höhe von geforderten Beleuchtungsstärken gewinnen will. Abb. 65 zeigt eingehender, welche Werte der Grenzkontrast bei den heute vorgeschlagenen Beleuchtungsstärken und bei verschiedenen Lichtrückwurfwerten annimmt; je geringer der Lichtrückwurf und die Beleuchtungsstärke, um so größer wird der Grenz-

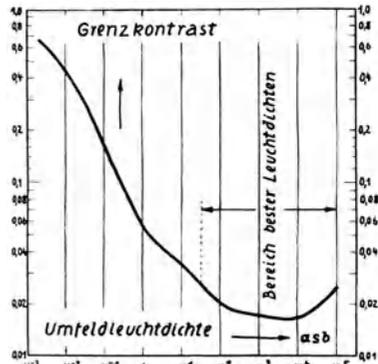


Abb. 65. Zusammenhang von Grenzkontrast und Leuchtdichte

kontrast. Die Bedeutung dieser Tafel besteht darin, daß man aus ihr, sobald feststeht, welcher Grenzkontrast bei einer Arbeit erkannt werden soll, sofort ablesen kann, welche Beleuchtungsstärke notwendig ist (2).

2. Dunkelstunden. Zur Berechnung der Beleuchtungskosten ist die Betriebsdauer unerlässlich. Die Gesamtzahl aller Jahresdunkelstunden beträgt 4076, das sind 46 v. H. aller Jahresstunden. Aufstellung 24 gibt für jeden Monat die zeitliche Lage und Dauer der Beleuchtungsstunden an (3).

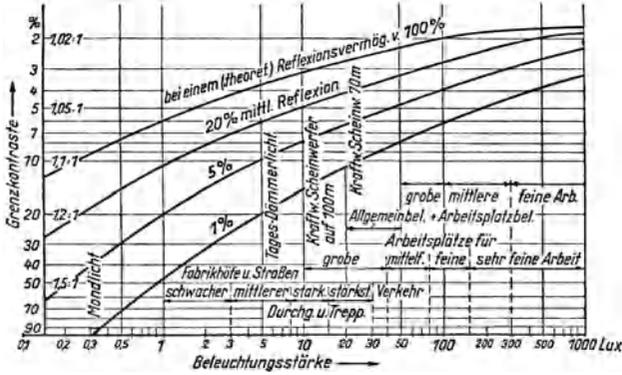


Abb. 66. Grenzkontraste

3. Die Hauptbeleuchtungsarten. Nicht alle Räume können gleichartig beleuchtet werden. Entsprechend den Bedürfnissen der Räume haben sich bestimmte Beleuchtungsarten gebildet.

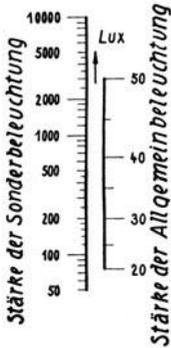


Abb. 67. Allgemein- und Sonderbeleuchtung

Zunächst unterscheidet man „Allgemeinbeleuchtung“ und „Zusatz-(Sonder-)beleuchtung“. Die Zusatzbeleuchtung wird im Abschnitt „Arbeitsplatzbeleuchtung“ eingehend behandelt. Hier soll nur ausführlich die Allgemeinbeleuchtung dargestellt werden, soweit sie als reine Allgemeinbeleuchtung oder als solche bei vorhandener Zusatzbeleuchtung auftritt (21).

Zusatzbeleuchtung ermöglicht es, die Stärke der Allgemeinbeleuchtung niedriger zu halten und dadurch an Gesamtlichtstrom zu sparen. Dies wird dann wichtig, wenn der Zweck des Raumes hohe Beleuchtungsstärken nötig macht. Die Werte der Allgemeinbeleuchtungsstärken, die bei vorhandener Zusatzbeleuchtung notwendig sind, gibt Aufstellung 20 an. Ihr Zusammenhang wird durch Abb. 89 veranschaulicht, die zeigt, wie stark die Stärke der Allgemeinbeleuchtung bei Zusatz diejenige ohne Zusatz unterschreiten

Aufstellung 24

	Datum	Beleuchtungszeit (M. E. Z.)		Beleuch- tungsdauer täglich	Beleuch- tungs- stunden im Monat
		von	bis	Std. Min.	
Januar	1.—10.	16 ³⁵	7 ⁵⁰	15 15	462
	11.—20.	16 ⁵⁰	7 ⁴⁵	14 55	
	21.—31.	17 ⁰⁵	7 ⁴⁰	14 35	
Februa	1.—10.	17 ²⁵	7 ²⁵	14 00	376
	11.—20.	17 ⁴⁰	7 ⁰⁵	13 25	
	21.—28.	18 ⁰⁰	6 ⁴⁵	12 45	
März	1.—10.	18 ¹⁵	6 ³⁰	12 15	361
	11.—20.	16 ³⁰	6 ¹⁰	11 40	
	21.—31.	18 ⁴⁵	5 ⁴⁵	11 05	
April	1.—10.	19 ⁰⁵	5 ²⁰	10 20	291
	11.—20.	19 ²⁰	5 ⁰⁰	9 45	
	21.—30.	19 ⁴⁰	4 ³⁵	9 00	
Mai	1.—10.	19 ⁵⁵	4 ¹⁵	8 25	245
	11.—20.	20 ¹⁰	4 ⁰⁰	7 55	
	21.—31.	20 ²⁵	3 ⁴⁵	7 25	
Juni	1.—10.	20 ⁴⁰	3 ³⁰	6 55	202
	11.—20.	20 ⁴⁵	3 ³⁰	6 40	
	21.—30.	20 ⁵⁰	3 ³⁰	6 35	
Juli	1.—10.	20 ⁵⁰	3 ¹⁵	6 20	215
	11.—20.	20 ⁴⁰	3 ⁴⁵	7 00	
	21.—31.	20 ³⁰	4 ⁰⁰	7 25	
August	1.—10.	20 ¹⁰	4 ²⁰	8 05	269
	11.—20.	19 ⁵⁰	4 ³⁵	8 40	
	21.—31.	19 ³⁰	4 ⁵⁰	9 15	
September	1.—10.	19 ⁰⁵	5 ¹⁰	10 00	325
	11.—20.	18 ⁴⁵	5 ²⁵	10 55	
	21.—30.	18 ²⁰	5 ⁴⁰	11 35	
Oktober	1.—10.	18 ⁰⁰	6 ⁰⁰	12 15	400
	11.—20.	17 ³⁵	6 ¹⁵	12 55	
	21.—31.	17 ¹⁵	6 ³⁰	13 30	
November	1.—10.	16 ⁵⁵	6 ⁵⁰	14 10	439
	11.—20.	16 ⁴⁰	7 ⁰⁵	14 40	
	21.—30.	16 ³⁰	7 ²⁰	15 05	
Dezember	1.—10.	16 ³⁵	7 ³⁵	15 25	483
	11.—20.	16 ²⁰	7 ⁴⁵	15 40	
	21.—31.	16 ²⁵	7 ⁵⁰	15 40	

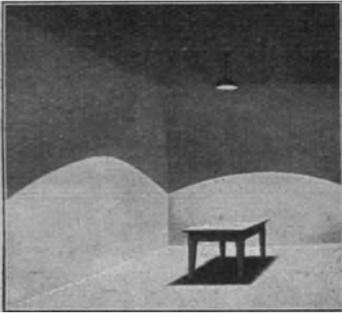


Abb. 68.
Unmittelbare Beleuchtung

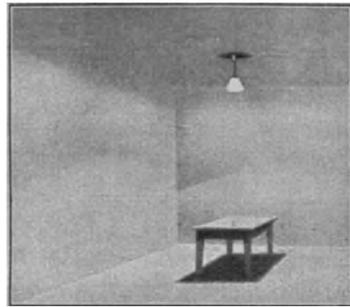


Abb. 69.
Vorwiegend unmittelbare Beleuchtung

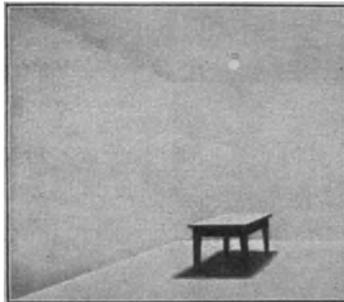


Abb. 70. Allseitige Beleuchtung

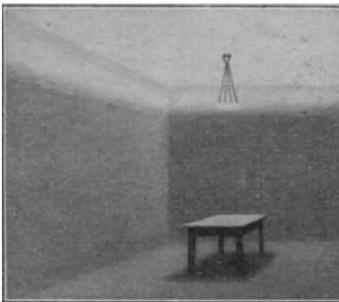


Abb. 71. Halbmittelbare Beleuchtung

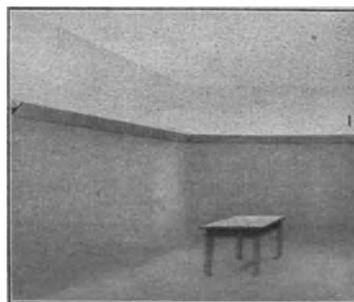


Abb. 72. Vollmittelbare Beleuchtung

darf. Mit wachsender Zusatzbeleuchtung muß auch die Allgemeinbeleuchtung wachsen. Hierdurch werden Gleichzeitigkeitshelligkeitsunterschiede verhindert, die sonst durch den Unterschied der hell beleuchteten Teilflächen und der dunklen Umgebung entstünden. Zur Berechnung der Allgemeinbeleuchtungsstärke E_A aus der Zu-

Aufstellung 25

Eigenart und Eignung der Hauptbeleuchtungsarten.		
Beleuchtungsart:	Unmittelbare	<p><i>Eigenart:</i> Bei verhältnismäßig geringer elektrischer Leistung hohe Beleuchtungsstärken unter Verzicht auf Raumaufhellung. Kräftige Schatten. Ungleichmäßigkeit und Blendung leicht vorhanden.</p> <p><i>Eignung:</i> Z. B. Turnhallen, Schaufenster, Arbeitsplatz (z. B. Drehbank, Schreibtisch), Verkehrsplatz.</p>
	Vorwiegend unmittelbare	<p><i>Eigenart:</i> Gute Beleuchtungsstärken bei nicht ungewöhnlicher elektrischer Leistung, gute Aufhellung von Arbeits- und Betriebsflächen bei mäßiger Raumaufhellung und gemäßigter Schattigkeit. Geringe Blendung und Ungleichmäßigkeit.</p> <p><i>Eignung:</i> Z. B. Laboratorien, Klassenzimmer, Verkaufsraum, Konstruktionsbüro, Speisezimmer, Festsäle, Schreibzimmer, Fremdenzimmer, Handarbeitszimmer, Küche.</p>
	Halbmittelbare	<p><i>Eigenart:</i> Starke Raumaufhellung, Arbeitsflächen und Raumflächen von gleicher Helligkeit, schwache Schattigkeit. Gute Beleuchtungsstärken bei beträchtlicher elektrischer Leistung. Geringe Blendung und Ungleichmäßigkeit.</p> <p><i>Eignung:</i> Z. B. Wohnzimmer, Herrenzimmer, Gesellschaftszimmer, Konzertsaal, Schlafzimmer, Krankenzimmer, Technische Büros, Hörsäle, Zeichensäle, Aufenthaltsräume.</p>
	Vollmittelbare	<p><i>Eigenart:</i> Stimmungschaffende Beleuchtung, ungeeignet oder anspruchsvoll für Stätten der Arbeit. Keine Blendung, hohe Gleichmäßigkeit und Schattenlosigkeit.</p> <p><i>Eignung:</i> Z. B. Kirche, Konzertsaal, Musikzimmer, Zuschauerraum, Schlafsaal.</p>

satzbeleuchtungsstärke E_Z kann dienen

$$E_A = 13 \cdot \log E_Z. \quad [23]$$

Zusammengehörige Wertepaare $E_A - E_Z$ gestattet die Doppelleiter Abb. 67 abzulesen.

Allgemeinbeleuchtung tritt auf als: 1. unmittelbare (direkte); 2. vorwiegend unmittelbare (vorwiegend direkte); 3. allseitige; 4. halbmittelbare (halbindirekte) und 5. vollmittelbare (indirekte) Beleuchtung.

Jede dieser Beleuchtungsarten leistet etwas Verschiedenes und ist verschiedenen Zwecken angemessen. Hierüber gibt die Aufstellung 25 Auskunft. Abbildungen 68 bis 72 veranschaulichen

die wichtigsten Unterschiede der fünf Beleuchtungsarten. Die Lichtverteilungen, die die Beleuchtungsarten erzeugen, sind aus Abb. 43 zu ersehen; es gehören der Reihe nach Verteilungen 1, 3, 6, 7, 8 zu den Beleuchtungsarten 3, 1, 2, 4, 5. Die Unterschiede, die in Hinsicht auf Gleichmäßigkeit durch die Beleuchtungsarten erzeugt wurden, zeigt Abb. 73: Sie gibt Beleuchtungsgebirge wieder für den gleichen Raum bei gleichem Lichtstrom und gleicher Anordnung. Die Gleichmäßigkeit ist also für vollmittelbare Beleuchtung am größten. Bei unmittlbarer ist dagegen die mittlere Beleuchtungsstärke am größten (4):

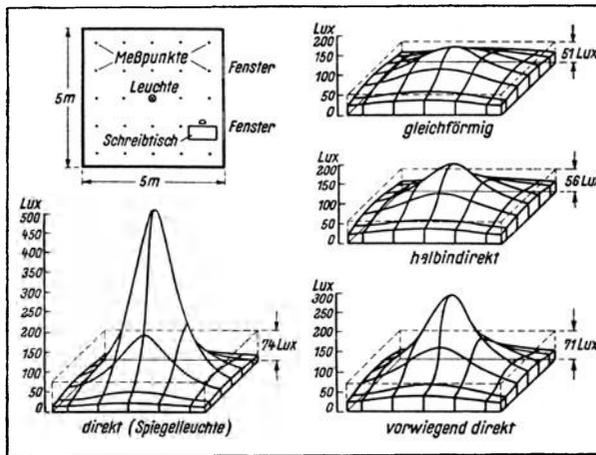


Abb. 73. Beleuchtungsart und Beleuchtungsverteilung

Vollmittelbare Beleuchtung ist nur mit Vorsicht einzusetzen; sie ist meist unwirtschaftlich und besitzt häufig zu geringe Schattigkeit. Ihr Hauptnachteil ist, daß die Lichtnutzfläche trotz hoher Beleuchtungsstärken als mangelhaft beleuchtet wirkt, weil die Decke größere Leuchtdichte hat als sie. Allseitige Beleuchtung ist wohl die häufigste, vorwiegend unmittlbar wohl die durchschnittlich am meisten empfehlenswerte Beleuchtungsart. Die Wahl der Beleuchtungsart ist der zweite wichtige Schritt bei Erstellung einer Beleuchtungsanlage. Die Wahl kann nur richtig erfolgen, wenn in Betracht gezogen wird, ob für den vorliegenden Fall hohe Beleuchtungsstärke oder gute Gleichmäßigkeit oder geringe Schattentiefe oder alles vorliegen soll. Im allgemeinen kann eine Beleuchtungsanlage erst als „gut“ bezeichnet werden, wenn mindestens diese drei Forderungen hinreichend berücksichtigt sind (5).

4. Gewölbebeleuchtung. Bei der mittelbaren Beleuchtung dient die Decke als eigentliche Leuchtfläche. Das Ziel einer solchen Anlage wird meist sein müssen: der ganzen Deckenfläche gleiche Leuchtdichte zu geben. Dies kann auf zwei grundsätzlich verschiedene Arten angestrebt werden: entweder so, daß man den Deckenquerschnitt sucht, der zu der Lichtverteilung der häufigsten Lichtquelle das Verlangte sicherstellt, oder so, daß man diejenige Lichtverteilung aufsucht, die einen vorliegenden Gewölbequerschnitt gleichmäßig oder doch in vorgeschriebener Weise beleuchtet. Im folgenden werden die sich so ergebenden Forderungen hergeleitet.

5. Beleuchtungstechnische Bestform von Gewölben. Unter der Bestform von Gewölben versteht man denjenigen Querschnitt, bei dem eine Punktlichtquelle auf der Gewölbefläche überall gleiche Leuchtdichte (und Beleuchtungsstärke) hervorruft. Die Kenntnis dieser Form hat deshalb Bedeutung, weil für Geleuchte mit Lichtverteilungen, die der der Punktlichtquelle ähnlich sind, Gewölbeformen die besten sind, die der Bestform nahe kommen.

Auf der Gewölbefläche soll überall die Beleuchtungsstärke E_0 herrschen; die Punktlichtquelle habe die unveränderliche Lichtstärke J_0 . Unter dieser Voraussetzung liefert das Beleuchtungsgesetz $E_0 = J_0 \cdot \cos \alpha / r^2$ den Ausdruck

$$\frac{\cos \alpha}{r^2} = \frac{E_0}{J_0} = \text{konst.}$$

Es muß das Gewölbe also solche Form haben, daß für alle Punkte der \cos des Einfallswinkels dem Quadrat des Abstandes verhältnismäßig ist. Also müssen alle Gewölbepunkte vom gleichen Abstand den gleichen Einfallswinkel haben.

Daher läßt sich, wenn E_0 und J_0 gegeben sind, zu jedem Abstand der erforderliche Einfallswinkel angeben und damit die Flächenneigung. Abstände und Flächenneigung geben ein Richtungsfeld. Jede Kurve, die sich diesem Richtungsfeld einpaßt, ist eine Bestform an Querschnitt. Abb. 74 zeigt das Richtungsfeld und einen Querschnitt.

Für festes E_0 und J_0 gibt es einen größten Abstand: wenn $\alpha = 0^\circ$ wird, also bei $r_0 = \sqrt{J_0/E_0}$ (in der Kurve Abb. 74 ist angenommen: $J_0 = 100$ HK, $E_0 = 1$ lx; also $r_0 = 10$ m). Dieser Grenzkreis schließt also alle möglichen Formen ein; nämlich alle die, die durch den Lichtpunkt laufen. Die einzige Bestform, die nie durch den Lichtpunkt läuft, ist der Grenzkreis selber, in dessen Mitte die Punktlichtquelle steht.

Damit ist eine Richtlinie geschaffen darüber, wie die Gewölbeform sein muß, die am einfachsten einwandfrei zu beleuchten ist. Bei den kelchartigen Rückwurfflächen von „Pilzleuchten“ und von Säulenköpfen, die als Rückstrahler dienen, wird diese Form möglichst angestrebt. Man wird die Bestform also gegebenenfalls auch für ganze Gewölbe heranziehen. Je mehr aber wirkliche Gewölbe von dieser Bestform abweichen, um so mehr muß ihre Lichtverteilung von der der Punktlichtquelle verschieden sein.

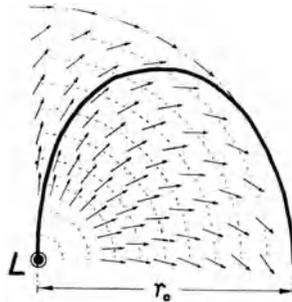


Abb. 74. Gewölbe-Bestform

6. Lichtverteilungen für Gewölbebeleuchtungen. Bei den meisten Fällen von Gewölbe- (und Decken-) Beleuchtungen wird die Form der Gewölbe vorliegen, so daß die Lichtverteilung gesucht ist, die eine verlangte Beleuchtung liefert. Die Lichtverteilungsart ist dann durch Lage des Lichtpunktes, Gewölbeform und verlangte Beleuchtungsverteilung bestimmt.

Raumbreite: 46,5 m ; Raumhöhe: 9,5 m ; $E_{\text{Decke}} = 100 \text{ lx}$

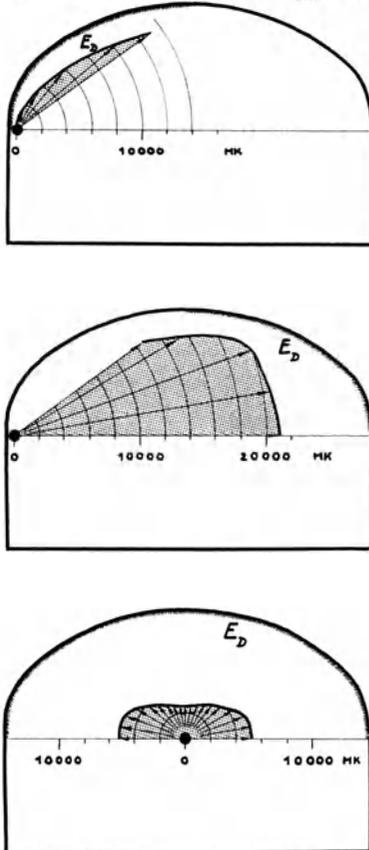


Abb. 75.
Lichtverteilungen zu Gewölbebeleuchtungen

Die Bestimmung der Lichtverteilung muß Punkt für Punkt durchgeführt werden: eine Maßskizze liefert für jeden Punkt Auftreffwinkel und Entfernung. Daraus folgt dann jeweils die Lichtstärke mit $J_{\beta} = E \cdot r^2 / \cos \alpha$.

Abb. 75 zeigt verschiedene Anordnungsarten der Lichtquellen und demgemäß verschiedene Lichtverteilungen. Im ersten Falle beleuchtet jede einseitig angebrachte Lichtquelle nur die eigene Deckenhälfte; im zweiten Falle nur die gegenüberliegende; im dritten jedoch von der Mitte aus die ganze Decke. Der letzte Fall führt am nächsten zur Punktlichtquelle. Trotzdem können bei ihm Tief- oder Schrägstrahler angewandt werden; denn im ausgenutzten Winkelbereich zeigen solche oft verhältnismäßig wenig veränderliche Lichtstärke. Der erste Fall verlangt eine Lichtquelle mit stärkster gerichteter und ungleichmäßiger Verteilung; er ist daher der am wenigsten ratsame. Im zweiten Falle liegt nicht eine ungewöhnliche Verteilung vor; er läßt sich gut verwirklichen.

Aus den Lichtverteilungen darf nicht auf die Größe des nötigen Gesamtlichtstroms geschlossen werden; denn die Anzahl der Lichtquellen wird im Fall 1 am größten, im Fall 2 am geringsten sein.

7. Gleichmäßigkeit und Schattigkeit bei Gewölbebeleuchtungen.

Alles Bisherige war hergeleitet unter der Voraussetzung, daß volle Gleichmäßigkeit der Beleuchtung erreicht würde. Hierauf wird man meist verzichten müssen. Denn die Wahl von beträchtlichen Lichtstärken wird Geleuchte notwendig machen, die beträchtliche Leistungen besitzen; und diese müssen, um die Gesamtleistung in Grenzen zu halten, in nicht zu geringen Abständen angeordnet werden. Längs des Gewölbes werden dann aber Ungleichmäßigkeiten unvermeidlich sein, in der Geleuchtnähe am größten. Dies gilt besonders für Anordnung 1. Daher sollte man

den Abstand der Verdeckungen von der Wand für die Geleuchte nicht zu gering wählen und ferner die Verdeckungen so hoch führen, daß noch das Stück über den Geleuchten, das die größten Ungleichmäßigkeiten aufweist, weitgehend verdeckt wird. Hierüber liegen aber noch keine zahlenmäßigen Festsetzungen vor. Man sollte aber die Abstände der Geleuchte nicht größer wählen als das $1\frac{1}{2}$ fache der Lichtpunkthöhe der Lichtquelle über demjenigen Punkt, den man über der Abdeckung als geleuchtnächsten Punkt von der dafür ungünstigsten Raumstelle sehen kann (Abb. 76). Daraus ergibt sich schon der günstige Einfluß einer nicht zu knappen Bemessung der Abdeckung. Bezeichnet man die Höhe des Auges, der Rinnenoberkante und der Lampenreihe der Reihe nach mit h_3 , h_1 und h_2 und die zugehörigen Abstände von der Rinnenwand mit a_3 , a_1 , a_2 , so ist als Lampenabstand zu wählen

$$d = 1,5l = 1,5 \cdot \sqrt{\left[\frac{h_1 - h_3 \frac{a_1}{a_3} - h_2}{1 - \frac{a_1}{a_3}} \right]^2 + a_3^2}$$

Den Wert l wird man häufig ebenso leicht durch eine Maßstabszeichnung finden, wie durch Rechnung. Bei den Anordnungen 2 und 3 sind diese Ungleichmäßigkeiten unvergleichlich weniger vorhanden. Bei ihnen können auch die Abstände unvergleichlich größer gewählt werden als bei den anderen Anordnungen. Sie erweisen sich also durch die geringere Anzahl auch als wirtschaftlicher. Soweit es also auf Gleichmäßigkeit ankommt, verdienen auch sie wieder den Vorzug. Im Fall 3 wird man dem Geleuchttträger eine schöne, den Raum schmückende Gestalt geben (22).

Mit Rücksicht auf klares Raumempfinden wird man oft absichtlich auf überall gleiche Leuchtdichte verzichten. Durch Musterungen wird man Decken größeren Ausmaßes gröber und feiner unterteilen und diese so anlegen, daß sie durch Schattenbildungen erst zu einer starken Wirkung der leuchtenden Fläche führen. Man wird auch gewissen Teilflächen der Gewölbe besondere Neigungen geben, damit sie sich, wegen des anderen Lichteinfalls, durch ihre andere Leuchtdichte hervorheben. So zeigt Abb. 77 ein Gewölbe, dessen beleuchtete Teilflächen,

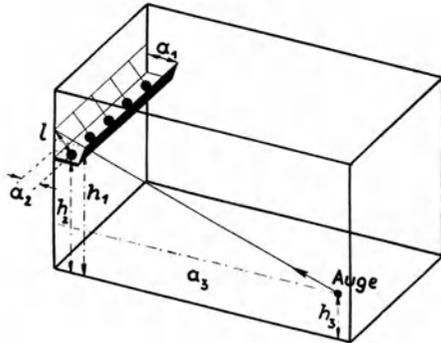


Abb. 76. Lichtpunktdichte in Leuchtrinnen

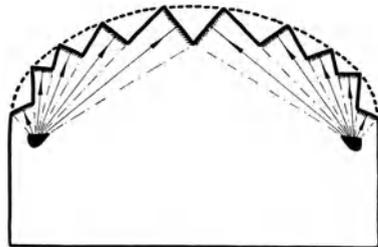


Abb. 77. Beleuchtungstechnische Deckengestaltung

die mit nicht beleuchteten abwechseln, untereinander verschiedene, jedoch in sich gleiche Leuchtdichte aufweisen (überall senkrechter Lichteinfall).

Eine fehlerhafte Decken- oder Gewölbebeleuchtung wirkt schlechter als irgendeine andere viel anspruchslosere Beleuchtungsart.

8. Die Lichtstromformel. Als Lichtnutzfläche in Räumen rechnet man, soweit nicht anderes verlangt, die Fläche von Größe des Raumbodens in 1 m Höhe über ihm. Soll diese Fläche F die Beleuchtungsstärke E erhalten, so benötigt sie den Lichtstrom Φ . Bringt man Geleuchte in dem Raum an, die mit Lichtquellen besteckt sind, die zusammen den Lichtstrom Φ_0 hergeben, so gelangt nur ein Bruchteil η davon auf die Lichtnutzfläche. Denn der volle Lichtstrom Φ_0 verläßt — wegen des lichttechnischen Wirkungsgrades ψ der Geleuchte — diese gar nicht; und von dem sie verlassenden Hauptteil geht ein Bruchteil χ für Beleuchtung von Wänden und Decken verloren. Sind die Verhältnisse von Geleuchten und Raum nun so, daß von dem Lichtquellenlichtstrom Φ_0 auf die Lichtnutzfläche der Teil Φ gelangt, so sagt man: Der Raum hat den Beleuchtungswirkungsgrad $\eta = \frac{\Phi}{\Phi_0}$. Dieser hängt vom Geleuchtwirkungsgrad ψ und dem räumlichen Wirkungsgrad χ für die Beleuchtungsart ab gemäß $\eta = \psi \cdot \chi$. Für den zur Lichtnutzfläche gelangenden Lichtstrom gilt also einerseits $\Phi = \eta \cdot \Phi_0$ und andererseits $\Phi = E \cdot F$. Daraus folgt durch Gleichsetzung

$$\Phi_0 = \frac{E \cdot F}{\eta}. \quad [24]$$

Der letzte Ausdruck, der also aus der mittleren Beleuchtungsstärke und der Lichtnutzfläche, sowie aus dem Wirkungsgrad den zur Erzeugung der Beleuchtungsstärke erforderlichen Lichtstrom Φ_0 zu berechnen gestattet, heißt Lichtstromformel von Harrison—Anderson, auch Wirkungsgradformel (6). Sie bildet die Grundlage für die Berechnung von Raumbeleuchtungen für künstliches Licht.

9. Die elektrische Leistung. Die Lichtstromformel gestattet den insgesamt erforderlichen Lichtstrom zu bestimmen. Ziel einer Beleuchtungsberechnung muß es aber sein, die Lichtquellen, die erforderlich sind, nach Leistung und Anzahl festzustellen. Die Leistungsermittlung, die übrigens die Kenntnis der richtigen Anzahl voraussetzt, geschieht folgendermaßen:

Den gesamten Lichtstrom Φ_0 teilt man durch die Anzahl n der vorgesehenen Lichtpunkte. Mit Hilfe der Aufstellung 7 sucht man diejenige Lampe aus, deren Lichtstrom dem Werte $\Phi = \frac{\Phi_0}{n}$ möglichst nahe kommt. Da es nur Lampen mit ganz bestimmten Lichtstromwerten gibt, so liegt hier die Schwäche der einwandfreien Lösung einer Beleuchtungsaufgabe: Man hat nicht nur eine Lösung zu finden, sondern sie ganz bestimmten, vorhandenen Werten anzupassen. Es sind ja nicht immer Lampen der gewünschten Lichtströme vorhanden.

Man hat nun drei Wege: 1. Der schlechteste Weg: Man begnügt sich mit der Wahl von Lampen, deren Lichtstrom nur sehr roh dem verlangten gleichkommt. 2. Ein jedenfalls brauchbarer Weg: Man wählt nicht für alle Stellen Lampen gleicher Leistung, sondern wählt Lampen verschiedener, wenn auch nicht sehr unterschiedlicher Leistungen derart, daß die Summe ihrer Lichtströme dem verlangten Wert Φ_0 gleichkommt. 3. Der beste Weg: Man verändert, ausgehend von Anzahl oder Lichtpunkthöhenänderungen, die Anlage so lange, bis eine befriedigende Übereinstimmung erreicht wird.

Die Erfahrung hat gezeigt, daß es stets ratsamer ist, Über- als Unterbeleuchtung zu wählen; d. h. eher soll man zu hohe als zu niedrige Lampenleistungen und damit Lichtströme wählen. Dies aus zwei Gründen: Jede Beleuchtungsanlage altert und verstaubt. Glühlampen haben eine begrenzte Lebensdauer von an 1000 Brennstunden; innerhalb derselben sinkt der Lichtstrom dauernd derart, daß nach den 1000 Stunden die Lichtausbeute unwirtschaftlich wird (Aufstellung 10); andererseits ist trotz gelegentlicher und durchaus unerläßlicher Reinigung eine gewisse Verstaubung unvermeidlich (vgl. Abb. 34). Beide Wirkungen können den Wirkungsgrad der Anlage auf 50 v. H. herabsetzen.

10. Raumbekleidung. Die Tatsache, daß Räume mit dunkler oder heller Wandbekleidung sehr voneinander abweichende Beleuchtungsstärken aufweisen, wird durch den Wirkungsgrad η erfaßt. Zu seiner Bestimmung braucht man die Kenntnis der Rückwurferte ρ von Wandbekleidungen; Aufstellung 26 gibt darüber Auskunft. Für das Spätere haben als „hell“ Flächen mit $\rho > 50$ v. H. zu gelten, als „mittelhell“ solche mit 20 v. H. $< \rho < 50$ v. H. und als dunkel solche mit $\rho < 20$ v. H. (7).

Nur selten wird ein Raum durchweg einheitliche Wandbekleidung aufweisen. Man hat dann den Mittelwert des Wandrückwurfs zu bestimmen mit

$$\rho_0 = \frac{\sum \rho_n \cdot F_n}{\sum F_n},$$

d. h. die auf die Gesamtwandfläche bezogene Summe der Produkte aus Teilrückwurf und zugehöriger Teilfläche zu bilden. Hierbei kann die Bodenbekleidung und diejenige der Wandflächen bis in 1 m Höhe unberücksichtigt bleiben.

Aufstellung 26.

Rückwurfwerte von Anstrichen und Tapeten. (T) in v. H.

Bestes Weiß	82—89	Beige	38
Deckweiß	86	Lila, starkmatt (T)	30
Bleiweiß (Öl)	70—85	Grün und grau, matt (T)	30
Weiß, alt	75—85	Ockergelb	25
Elfenbein	73—78	Braun, starkmatt (T)	23
Hellgelb	50—75	Dunkelrot	15—30
Hellgrün	48—75	Dunkelgrau	10—35
Aluminiumfarben (T)	60	Orangerot	20—25
Rotgelb	49—66	Nachtblau	20
Rosa	36—61	Olivgrün	10—25
Chromgelb	55	Sattgrün	16
Hellgrau	35—61	Grau, halbmatt (T)	16
Hellblau	34—61	Scharlachrot	10—15
Resedagrün	48	Braun	12
Steingrau	48	Dunkelblau	10—12
Hellblau	45	Berlinerrot	10
Dunkelgelb	44	Blau, matt (T)	9
Lehmbraun	43	Ultramarinblau	7
Hellbraun	30—46	Schwarz	2—4

Im Laufe der Zeit pflegt sich die Beleuchtung in einem Raum zu verschlechtern. Dies geschieht durch Veränderungen der Glühlampe, Verstaubungen des Gelechts und Abnahme des Lichtrückwurfs der Wandbekleidungen. In der mittleren Beleuchtungsstärke sind alle diese Wirkungen vereinigt zu bemerken. Die Schattenmessung ermöglicht es, die Veränderungen des Wandrückwurfs gesondert zu bestimmen (8).

Man mißt dazu an allen Stellen eines Meßnetzes die volle Beleuchtungsstärke und die bei voller Abschattung aller gerichteter Leuchtung vorhandenen Beleuchtungsstärken. Aus beiden bildet man die gerichteten Anteile der E -Werte. Man bildet dann die Mittelwerte der gerichteten und der ungerichteten Beleuchtung $E_{g,m}$ und $E_{z,m}$. Führt man nach geänderter Raumbekleidung die gleichen Messungen durch, so erhält man die entsprechenden Werte $E'_{g,m}$ und $E'_{z,m}$. Bildet man nun $E'_{g,m} : E_{g,m} = U$, so gibt diese Zahl die Veränderung der Lichtstromabnahme des Gelechts einschließlich der Lichtquelle. Nun läßt sich auch bilden $V = E'_{z,m} : E_{z,m}$. Hätte die Raumbekleidung keine Änderung erfahren, so müßte $V = U$ sein. Soweit aber eine Wandbekleidungsveränderung stattgefunden hat, muß V sich stärker als U geändert haben. Der Unterschied ist unmittelbar ein Maß für die Änderung. So gilt, wenn q_m die mittleren Raumbekleidungs-rückwurfzahlen sind,

$$e'_m = q_m \cdot \frac{U}{V} = q_m \left[\left(\frac{E'_m}{E_{z,m}} - 1 \right) : \left(\frac{E'_m}{E'_{z,m}} - 1 \right) \right],$$

wobei der letzte Ausdruck für die meßbaren Größen gilt; er folgt aus dem ersten.

Änderungen, die so schnell vor sich gehen, daß eine Wirkungsgradabnahme des Gelechts und der Lichtquelle nicht berücksichtigt zu werden brauchen, wie Neuanstrich oder Anbringung heller statt dunkler oder keiner

Aufstellung 27.

Wirkungsgrade η für Allgemeinbeleuchtung von Innenräumen

Raumverhältnis:	Beleuchtungsart:		unmittelbar		vorwiegend un-		Linestra		halb-		mittelbar	
	V_1		η_I	η_{II}	η_I	η_{II}	η_I	η_{II}	V_2	η_I	η_{II}	η_I
$V_1 = \left\{ \begin{array}{l} L:l \\ \text{oder} \\ B:l \end{array} \right.$	1,0	25	(18)	17	(9)	20	(10)	0,6	14	(7)	11	(6)
	1,5	36	(30)	25	(16)	27	(16)	1,0	21	(13)	15	(8)
	2,0	40	(35)	29	(20)	35	(22)	1,5	27	(17)	20	(11)
	2,5	44	(40)	33	(23)	40	(28)	2,0	31	(21)	23	(14)
$V_2 = \left\{ \begin{array}{l} L:h \\ \text{oder} \\ B:h \end{array} \right.$	3,0	46	(42)	36	(25)	44	(32)	2,5	35	(24)	26	(16)
	4,0	51	(47)	41	(30)	50	(36)	3,0	37	(26)	28	(17)
	5,0	53	(49)	43	(33)	54	(39)	3,5	39	(28)	29	(18)
	6,0	55	(51)	46	(36)	58	(42)	4,0	42	(29)	31	(20)
	7,0	56	(52)	49	(38)	61	(45)	4,5	44	(31)	32	(21)
	8,0	58	(54)	53	(41)	64	(48)	5,0	46	(33)	34	(22)

Zahlwerte nicht eingeklammert: Decke hell, Wände mittelhell: η_I .Zahlwerte eingeklammert: Decke mittelhell, Wände dunkel: η_{II} . L : Raumlänge; B : Raumbreite; l : Lichtpunkthöhe; h : Deckenhöhe; beide Höhen gerechnet über Meßebe.

Vorhänge, können natürlich aus der Veränderung der mittleren Beleuchtungsstärke unmittelbar gemäß

$$q'_m = e_m \cdot \frac{E'_m}{E_m}$$

geschlossen werden. — Zur Optik der Farbanstriche von Wänden liegen eingehende theoretische Ergebnisse vor (26).

11. Der Wirkungsgrad. Die Benutzung der Wirkungsgradformel setzt die Kenntnis der Wirkungsgrade η von Räumen voraus. Für die Werte von η sind auf Grund umfangreicher Messungen Anhaltswerte aufgestellt worden, die aus der Aufstellung 27 zu ersehen sind. Dabei zeigt sich, daß, wie auch zu erwarten ist, die η -Werte abhängig sind von der Beleuchtungsart, der Raumausstattung (Wand- und Deckenbekleidung), der Aufhängenhöhe des Geleuchts sowie von Breite B und Länge L des Raumes und zum Teil von seiner Höhe. Alle diese Größen werden in der Aufstellung erfaßt (6).

Die Tafel wird folgendermaßen benutzt. 1. Man stellt fest, ob nach der Raumbekleidung η_I oder η_{II} zu wählen ist. In unsicheren Fällen kann zwischengeschaltet werden. 2. Man bildet die beiden Raumverhältnisse V_1 oder V_2 je nach Art der Beleuchtung aus Raumlänge, Raumbreite, Lichtpunkthöhe bzw. Deckenhöhe (über Meßebe!). V_1 gilt für die ersten drei Arten, V_2 für die letzten beiden. 3. Mit diesen bestimmt man die Wirkungs-

grade, nämlich erstens den Längenwirkungsgrad zu $V_1 = L:l$ (bzw. $V_2 = L:h$) und zweitens den Breitenwirkungsgrad zu $V_1 = B:l$ (bzw. $V_2 = B:h$). Etwa notwendige Zwischenschaltung zwischen die angegebenen Werte erfolge immer so, daß nur ganzzahlige η -Werte gewonnen werden. 4. Man bildet aus dem Breitenwirkungsgrad η_B und dem Längenwirkungsgrad η_L den wirksamen Wirkungsgrad η nach Harrisons Erfahrungsformel (6)

$$\eta = \frac{1}{3} (2 \eta_B + \eta_L).$$

Ist die Decke bei sonst hellen Wänden dunkel (altdeutsche Holzdecke), so wird man eine vorwiegend unmittelbare Beleuchtung nehmen; die Wirkungsgrade kann man dann unter 10 bis 20 v. H. Abzug des Zahlenwertes aus der Gruppe für helle Decken entnehmen.

Die Tabellenwerte für η zeigen deutlich, welche große Bedeutung bei künstlicher Beleuchtung den Wandbekleidungen zukommt. Dies wird bisweilen unterschätzt. Es ist Verschwendung, bei schlechten, dunklen Wänden die Lichtströme zu erhöhen. Daher verlange der Beleuchtungstechniker, wo es angängig ist, helle Raumbekleidung. Diese bildet die Voraussetzung für den Erfolg seiner beleuchtungs-technischen Arbeit. Besonders beachte er, daß die lichtschluckenden Fenster durch helle Vorhänge verdeckt werden. Das erhöht η ganz beträchtlich. Ein unverhängtes Fenster hat ein ρ von etwa 0,05. Bei großen Fensterflächen können daher große Verluste entstehen.

Weichen die Rückwurfwerte von Decken und Wänden beträchtlich von denen ab, welche die Aufstellung 27 voraussetzt, so sind die η -Werte entsprechend zu verändern, wobei man beachte, daß sich die mittleren ρ -Werte der uneingeklammerten und eingeklammerten Zahlen verhalten wie 2 : 1, nämlich 50 v. H. und 25 v. H.

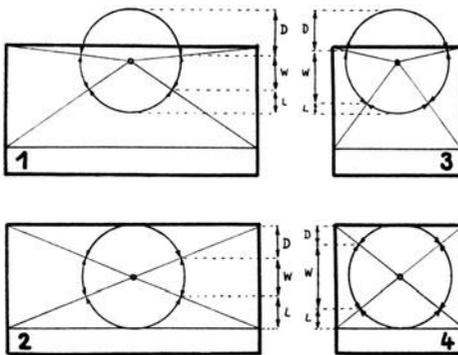


Abb. 78. Lichtstrom-Erstaufteilung im Raum

Die Wirkungsgradwerte für Linestra-Wolframröhren gibt die gleiche Aufstellung an. Für Beleuchtung mit Leuchtrinnen (Vouten) ist $\eta = 15$ bzw. 10 v. H. Die beträchtliche Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Lichtpunkthöhe wird durch Abb. 78 veranschaulicht. Der Vergleich von Teilbild 1 und 2 sowie von 3 und 4 zeigt, wie der auf die Lichtnutzfläche ent-

fallende, für die Beleuchtungsstärke wirksamste Teil L des Lichtstroms mit wachsender Lichtpunkthöhe abnimmt. Dabei ist eine Punktlicht-

quelle vorausgesetzt; die Teillichtströme sind durch die zugehörigen Zonenhöhen gekennzeichnet. Auch der Einfluß der Raummaße wird deutlich: Die Wände nehmen bei tieferer Lichtpunktlage einen größeren Teil auf. Vergleich von 1 mit 3 und von 2 mit 4 zeigt, daß größere Ausdehnung der Lichtnutzfläche im Vergleich zur Lichtpunkthöhe günstig ist, da der auf die (beleuchtungsmäßig am schlechtesten wirkenden) Wände entfallende Teil W dann geringer wird (9).

Im Durchschnitt gilt es als ausreichend, wenn die Beleuchtungsstärke auf den Wänden den vierten Teil von der auf der Lichtnutzfläche annimmt.

Zur Bestimmung des Wirkungsgrades η gibt es eine Formel, die sich besonders gut für vorwiegend unmittelbare Beleuchtung eignet; sie gibt indessen auch für die anderen Beleuchtungsarten befriedigende Werte. Sie lautet: (10)

$$\eta = C_1 \cdot \log \frac{B^2 \cdot L}{K^3} + C_2.$$

Darin sind L und B wieder Raumlänge und Raumbreite; die Formel erfaßt also ohne weiteres die η -Werte für Räume jeden Grundrisses. K ist ein Festwert, der nach Aufstellung 28 je nach der Beleuchtungsart aus Lichtpunkthöhe und Raumhöhe über der Lichtnutzfläche zu bestimmen ist. Die Festwerte C_1 und C_2 sind Zahlen, die die Beleuchtungsart und die Raumausstattung erfassen. Sie sind ebenfalls der Aufstellung 28 zu entnehmen.

Aufstellung 28. Festwerte der Wirkungsgradgleichung

Art der Beleuchtung	Decke hell, Wände mittelhell		Decke mittelhell, Wände dunkel		K
	C_1	C_2	C_1	C_2	
Unmittelbar	0,160	0,25	0,166	0,20	l
Vorwiegend unmittelbar	0,133	0,17	0,111	0,10	$\frac{5l + 3h}{8}$
Allseits	0,126	0,19	0,103	0,12	$\frac{l + h}{2}$
Halb mittelbar	0,119	0,21	0,095	0,13	$\frac{3l + 5h}{8}$
Voll mittelbar	0,09	0,15	0,066	0,08	h

Die Wirkungsgradformel zeigt, daß η mit wachsender Lichtpunkthöhe und Deckenhöhe (in K !) abnimmt, und zwar infolge der dritten Potenz beträchtlich. Andererseits nimmt η mit wachsender Breite und Länge zu, wobei die Breitenänderung höheren Einfluß hat. Darin zeigt sich, daß die Lichtausnutzung in einem Raum um so besser wird, je größer das Verhältnis von Rauminhalt zu Raumboberfläche wird.

Hasenkämper leitete ebenfalls eine allerdings erheblich verwickeltere Formel für den räumlichen Wirkungsgrad ab (11).

12. Lichtquellenanzahl und Lichtpunkthöhe. Über die Anzahl der Lichtquellen, die ein Raum bestimmter Lichtnutzfläche benötigt, gibt es grobe Durchschnittsregeln, wie: auf 25 m^2 eine Lichtquelle. Mit derartigen Regeln darf sich der Beleuchtungstechniker nur bei überschläglichen Abschätzungen zufrieden geben. Für die Punktlichtquelle läßt sich in hinreichend genauer Weise der notwendige Zusammenhang von Lichtpunkthöhe und Lichtquellenanzahl angeben. Der Abstand D der Lichtpunkte von Punktlichtquellen muß, um volle Gleichmäßigkeit zu erzielen, gleich der Halbwertsbreite H sein, also $D = H = 1,5 l$. Ferner muß die Anzahl n der Lichtquellen sich ergeben, wenn man die Lichtnutzfläche F durch die einer jeden Lichtquelle zukommenden Teilfläche F_1 von der Seite D teilt, also

$$n = \frac{F}{D^2}.$$

Mit $D = 1,5 l$ folgt:

$$n = \frac{4 F}{9 l^2} \equiv \frac{F}{k l^2}.$$

Daraus ergibt sich

$$n \cdot l^2 = \frac{F}{k}. \quad [25]$$

Das heißt: Die Lichtpunktanzahl muß verhältnismäßig der Lichtnutzfläche sein, aber umgekehrt verhältnismäßig dem Quadrat der Lichtpunkthöhe. Dies wird durch Abb. 79 unmittelbar an-

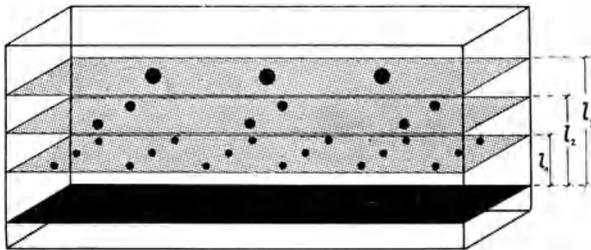


Abb. 79. Lichtquellenanzahl und Lichtpunkthöhe

schaulich, die für verschiedene Lichtpunktebenen die notwendigen Lichtpunktmengen zeigt. Die Abbildung bezieht sich auf $F = 216 \text{ m}^2$. Die Lichtpunkthöhen sind $l_1 = 2 \text{ m}$, $l_2 = 3,5 \text{ m}$, $l_3 = 6 \text{ m}$, die Anzahlen der Reihe nach 18, 5 und 3. Die Zahl k ist je nach Ansprüchen und Beleuchtungsart verschieden zu wählen, worüber Aufstellung 29 Auskunft gibt. Die Zahl k ist immer kleiner als $9/4 \sim 2$, da eine Gleichmäßigkeit von 100 v. H. wohl nur ausnahmsweise verlangt werden kann.

Aufstellung 29

Beleuchtungsart	Ansprüche		
	hoch	mittel	gering
Unmittelbar . . .	3	4	5
Allseits	4	5	6
Mittelbar	5	6	7

Bei der „freien“ Wahl der Lichtpunkthöhe l muß noch beachtet werden, daß sie für halbmittelbare und besonders für mittelbare Beleuchtung nicht ganz frei steht; große Lichtpunkthöhe würde zu kleinem Abstand: Geleucht—Decke führen. Dann würde die Decke selbst eine hohe Ungleichmäßigkeit der Beleuchtung aufweisen, durch die die beabsichtigte Wirkung des weitverteilten zerstreuten Lichtes aufgehoben würde. Verlangt man für die Decke selbst bei hohen Ansprüchen große Gleichmäßigkeit, so muß für vollmittelbare Beleuchtung der Abstand Decke—Geleucht als Lichtpunkthöhe angesehen werden, aus dem die Geleuchtanzahl folgt. Für halbmittelbare Beleuchtung brauchen solche Rücksichten um so weniger genommen zu werden, je weniger man auf den mittelbaren Deckenanteil Wert legt.

13. Die Lichtquellenanordnung. Entweder geht man von einer etwa aus architektonischen Gründen gewollten Anzahl und Verteilung der Lichtquellen aus. Dann liegt die Lichtpunkthöhe dadurch

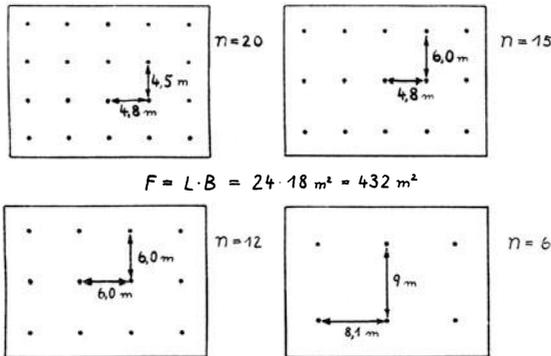


Abb. 80. Gleichmäßige Lichtpunktverteilung

fest. Ebensogut kann die Lichtpunkthöhe geplant sein, so daß sich die Anzahl ergibt. Diese theoretische Anzahl, die also die Rechnung liefert, muß den wirklichen Raummaßen geometrisch und ästhetisch angepaßt werden. Dies wird man immer in Form einer Grundrißskizze ausführen, mit deren Hilfe man eine möglichst sachgemäße Verteilung vornehmen wird. Dabei stehen drei Wege offen.

1. Es handelt sich um eine Gesamtbeleuchtung, die keiner Stelle eine Bevorzugung geben soll. Dann wird man die Verteilung über der Lichtnutzfläche anstreben, bei der mit einer Anzahl n , die der berechneten Zahl n' nahe kommt, die Lichtpunktabstände in Länge und Breite möglichst gleich werden (Abb. 80).

Die Abstände der Lichtpunkte von den Wänden ergeben sich dann halb so groß, wie die der Lichtpunkte untereinander. Völlige Gleichheit der Abstände läßt sich nur ausnahmsweise erreichen.

Um bei der Wahl der Anordnung die Lichtpunktzahlen n_L in Länge und n_B in Breite schnell bestimmen zu können, ist eine Rechentafel angegeben (Abb. 81). Auf dieser wählt man Länge (30 m) und Breite (10 m) des Raumes und verbindet sie [die Verbindung ergibt nebenbei die Lichtnutzfläche (300 m²)]. Dann legt man durch denjenigen Punkt der Mittelleiter, der die vorher festgelegte Gesamtzahl der Lichtpunkte angibt, eine Gleichgerichtete zu der ersten Geraden. Diese schneidet auf den Seitenleitern gerade die gesuchten Anzahlen n_L (5,3) und n_B (1,8) ab, die sich so verhalten wie Länge und Breite. Also $n_L : n_B = L : B$ unter Wahrung von $n_L \cdot n_B = n$. Daraus folgen die Ausdrücke:

$$n_L = \sqrt{n \cdot \frac{L}{B}} \quad \text{und} \quad n_B = \sqrt{n \cdot \frac{B}{L}}, \quad [26]$$

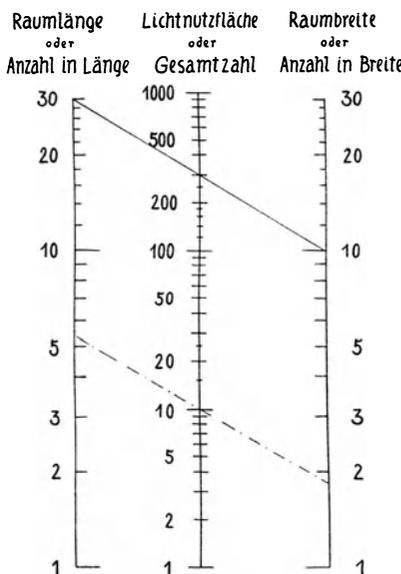


Abb. 81. Ermittlungsblatt für Lichtpunktzahl in Länge und in Breite

denen das Rechenblatt genügt und mit denen man die Bestimmungen ebenfalls rechnerisch durchführen kann. Läßt sich eine brauchbare Aufteilung bei der gegebenen Anzahl nicht bestimmen, so sucht man auf dem Rechenblatt unter möglicher Einhaltung der Richtung der Geraden geeignetere Anzahlen auf, die zu einer anderen Gesamtzahl gehören. Von dieser aus muß dann eine Veränderung der Lichtpunkthöhe vorgenommen werden. — Die hier dargestellte Sorgfalt ist notwendig, wenn man auch berechtigten Forderungen in Hinsicht auf Gleichmäßigkeit genügen will.

Soweit Deckenbalken, Unterzüge oder Pfeiler da sind, wird naturgemäß die Anordnung nur unter Berücksichtigung der durch sie bewirkten Raum- und Deckenaufteilung geschehen.

2. Es handelt sich um Gesamtbeleuchtung, mit deren Hilfe gewisse Flächen des Raumes besonders gut mit Licht bedacht sein sollen; etwa Verkaufsflächen oder Büroschreibflächen. Dann wird

man eine Anordnung wählen, die diese Stellen berücksichtigt und bevorzugt beleuchtet. Man wird dann gut tun, so zu rechnen, als ob nur ein gewisser Umkreis um diese Flächen beleuchtet werden sollte, die dafür erforderlichen Lichtströme ermitteln und die übrigen Gebiete mit einer im Verhältnis der geringeren Ansprüche abgeschätzten Beleuchtung versehen.

Über diese Angaben hinaus können hier Anweisungen bestimmterer und doch allgemeingültigerer Art nicht gemacht werden (vgl. „Arbeitsplatzgebundene Allgemeinbeleuchtung“). Hier ist der Punkt erreicht, wo die persönliche Gestaltungsfähigkeit des Beleuchtungstechnikers voll ins Gewicht fällt. Derartige Anlagen verursachen oft nicht geringe Schwierigkeiten, aber um so mehr Gelegenheit zu selbständigen und eigenartigen Lösungen.

3. Es handelt sich um Gesamtbeleuchtung mit bestimmter Beleuchtungsrichtung. Derartige kommt z. B. in Lehrsälen vor, in denen bevorzugt gezeichnet oder geschrieben wird. Der Zeichner ist gewohnt, das Licht am stärksten von links vorne zu erhalten. Mit Rücksicht darauf zeichnet und schreibt ja jeder möglichst rechts-händig. Man wird dann, wie es schon wiederholt ausgeführt ist,

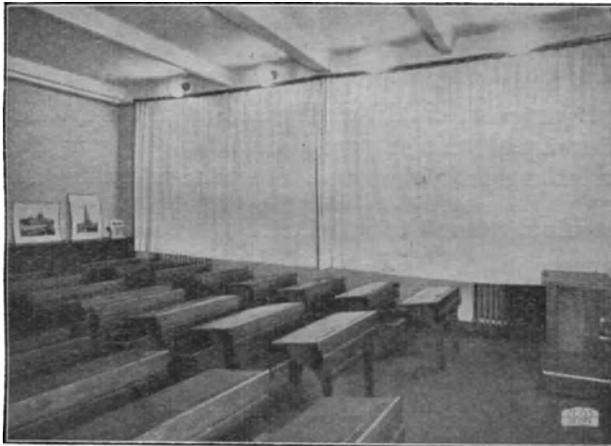


Abb. 82. Einseitig gerichtete Raumbelichtung

die Lichtquellen der linken Reihe stärker an Lichtstrom wählen als die der rechten und die gesamten Lichtreihen mehr nach der Fensterseite verschieben, also eine absichtlich ungleichmäßige Lichtquellenverteilung über der Lichtnutzfläche schaffen. Abb. 82 zeigt diese Beleuchtungsart für eine Schulklasse (23).

Falls die Verteilung der Lampenleistungen gemäß Gesamtlichtstrom und Geleuchtzahl nicht auf vorhandene Leistungswerte führt, wird man auch in allen anderen Fällen, die nicht bevorzugte Lichtrichtung unbedingt fordern, aus gleichem Grunde die fensternahen Geleuchte für höhere Leistungen bevorzugen, soweit man in einer ungleichmäßigen Leistungsauswahl den Ausweg der Lichtstromaufteilung sucht.

14. Der Berechnungsgang. Um den Zusammenhang der vielen Größen zu übersehen, ist eine Übersicht, die alles enthält, angebracht.

Gegeben sind die Größen:

1. Länge, Breite, Höhe des Raumes.
2. Die Raumbestimmung.
3. Der Raumzustand.
4. Die Spannung und der Preis der kWh.
5. Ansprüche.

Die Berechnungsschritte erfolgen in der Reihenfolge:

1. Wahl der Beleuchtungsstärke E_m (nach Aufstellung).
2. Wahl der Beleuchtungsart (nach Aufstellung).
3. Wahl der Lichtpunkthöhe l' (meist frei).
4. Bestimmung der Lichtnutzfläche $F = B \cdot L$.
5. Berechnung der Lichtpunktanzahl nach $n' = \frac{F}{k \cdot l'^2}$.
6. Festlegung der Anzahl nach Skizze n (mit Hilfe des Rechenblatts).
7. Rückwärtsbestimmung von l aus n .
8. Ermittlung des Wirkungsgrades η (mit Aufstellung).
9. Berechnung des Gesamtlichtstroms $\Phi'_0 = \frac{E_m \cdot F}{\eta}$.
10. Bestimmung des Einzellichtstroms jeder Lichtquelle $\Phi' = \frac{\Phi'_0}{n}$.
11. Wahl der Lampenleistung N (nach Aufstellung).
12. Berechnung der Gesamtleistung $N_0 = n \cdot N$.
13. Feststellung des wirklichen Einzellichtstroms Φ .
14. Berechnung des wahren Gesamtlichtstroms $\Phi_0 = n \cdot \Phi$.
15. Berechnung der wahren Beleuchtungsstärke $E'_m = \frac{\eta \cdot \Phi_0}{F}$.

Falls das Ergebnis nicht befriedigt, kann mit neuer Lichtpunkthöhe l oder mit neuer Lichtpunktanordnung oder mit neuer Beleuchtungsart neu gerechnet werden.

Abgesehen von den obigen fünf Angaben, die unbedingt gegeben sein müssen, ist es zur Planung ratsam, auch noch folgende Angaben zu haben:

Unterzüge, Oberlichter in Höhe und Breite; Fenstergröße, Vorhangsfarbe; Lage und Richtung der Arbeitsplätze; feste Einrichtungsgegenstände wie Schränke, Heizungs- und Entlüftungsschächte, Kräne, Pfeiler, Treibriemen, Wandtafeln, Gebiete hoher und geringerer Ansprüche usw. Erst auf Grund aller Gegebenheiten läßt sich eine einwandfreie Beleuchtung erstellen.

15. Viel oder wenig Lichtquellen? Bisher war angenommen, daß die Lichtpunkthöhe frei gewählt werden könnte. Das hieße, es ist freigestellt, viel oder wenig Lichtpunkte zu wählen. Nun ist aber (Aufstellung 7) eine Glühlampe höherer Leistung wirtschaftlicher infolge ihrer höheren Lichtausbeute A . Dies macht die Kurve in

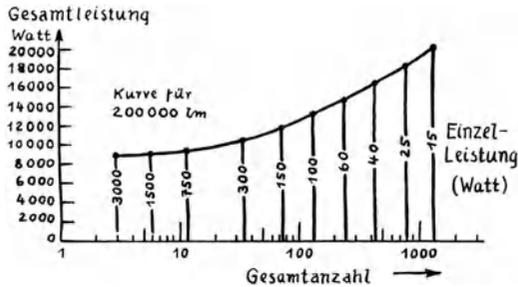


Abb. 83. Beeinflussung der Gesamtleistung durch die Lichtquellenanzahl

Abb. 83 klar, die einem bestimmten Gesamtlichtstrom gehört: Je größer die Lichtquellenanzahl, also je geringer die Einzelleistung, um so höher wird die aufzuwendende Gesamtleistung. Daraus müßte der Schluß gezogen werden, daß möglichst wenig Lichtquellen zu wählen seien, daß also die Lichtpunkthöhe immer so groß wie möglich gewählt werden müßte — von ästhetischen Gesichtspunkten jetzt noch völlig abgesehen. Durch die Lichtpunkthöhe ist aber auch der Wirkungsgrad bestimmt; und zwar derart, daß mit wachsendem l der Wert η abnimmt. Die endgültig erforderliche elektrische Leistung ist aber von der Lichtausbeute A und von η abhängig, also von zwei Größen, die beide in entgegengesetzter Weise von der Lichtpunkthöhe abhängig sind. Danach kann man eine günstigste Lichtpunkthöhe erwarten. Zahlenmäßige Auswertung ergibt, daß tatsächlich eine günstigste Höhe da ist. Die Höhe ist verschieden für die verschiedenen Beleuchtungsarten. Im Falle der mittelbaren Beleuchtung läßt sich die günstigste Höhe gar nicht verwirklichen. Bei den anderen liegt sie in praktisch brauchbaren Höhen, so bei dem 0,2- bzw. 0,4- bzw. 0,7fachen der Raumbreite für unmittelbare bzw. vorwiegend unmittelbare bzw. halbmittelbare Beleuchtung (12).

Rein beleuchtungstechnisch wäre also durch die Raummaße die Lichtpunkthöhe festgelegt, und damit die ganze Beleuchtungsanlage. Das kommt aber streng genommen nicht in Frage. Denn es sind gar nicht immer Glühlampen in der zu der Lichtpunkthöhe gehörenden Anzahl vorhanden, die zusammen gerade die verlangte Leistung haben. Daher wird man diese günstigsten Höhen nur als Anhaltswerte verwenden und sich nach ihnen um so mehr richten, je weniger andere Gesichtspunkte dagegenstehen. Wichtig ist jedenfalls, daß nicht allein die möglichst geringe Anzahl der Lichtquellen einen besonders günstigen Wert gewährleistet, wie in oberflächlicheren Darstellungen bisweilen behauptet wird, bei denen dann nur die höhere Lichtausbeute der Lichtquellen bei geringerer Anzahl, nicht aber die Veränderung des Wirkungsgrades ins Auge gefaßt wird. Während die hier gewonnene Erkenntnis nur richtunggebend sein soll, werden in vielen Fällen ausschlaggebend erst die Gesichtspunkte ästhetischer Natur sein müssen. Ehe man aber die geltend macht, müssen die Ansprüche der Beleuchtungstechnik selbst geklärt sein.

16. Faustformeln. Die dargestellte möglichst einwandfreie Beleuchtungsberechnung wird nur angewandt werden, wenn es sich um Anlagen handelt, die einer sorgfältigen Durcharbeitung bedürfen. Das ist nicht immer der Fall. Für viele Fälle werden bewährte Faustformeln gute Dienste tun. Es seien mitgeteilt:

1. Die „Wattregel“ von Heyck und Högner.

$$\text{„10 Watt auf 1 m}^2 \text{ geben 70 lx.} \text{“} \quad [27]$$

Danach lassen sich für gewünschte Werte von E und F die erforderlichen Leistungen durch Verhältnisrechnung abschätzen. Es liegt zugrunde: $A = 14$ und $\eta = 0,5$ (13).

2. Die Wattformel von Meyer:

$$N_{25} \text{ (Watt)} = 4 \text{ (oder 5) mal } E \text{ (lx)}; \quad [28]$$

darin ist N_{25} die auf 25 m^2 erforderliche Leistung, um die Beleuchtungsstärke E zu erzielen. Die Zahl 4 ist zu wählen bei anspruchlosen oder günstigen, die Zahl 5 bei anspruchsvollen oder ungünstigen Anlagen. Zugrunde liegen: $A = 14$, $\eta = 0,4$ (10).

3. Die Anzahlregel: Auf 25 m^2 kommt eine Lichtquelle.

4. Die Lichtpunkthöhenregel: Die Lichtpunkthöhe gleich $\frac{2}{3}$ des Lichtpunktabstandes.

Anmerkung. Es sei darauf hingewiesen, daß es Sonder-Rechenschieber zu Raumbeleuchtungsberechnungen gibt, und zwar den der Osram, System Sumerer-Höpke und den „Elektropracticus“ von Seehase. Außerdem tut der Schaco-Nomograf gute Dienste (Schanzenbach & Co.). Auch liefert Zeiss-Ikon eine Reihe von dienlichen Rechentafeln.

17. Schattigkeitsbestimmungen. Die Messung der Schattigkeit geschieht mittels Schattenmessers durch zwei Schattenmessungen, die man entweder an der für Schattigkeit ungünstigsten Stelle unter einer der Lichtquellen mißt oder, wenn man die mittlere Schattigkeit haben will, an allen Stellen eines Meßnetzes. Wichtig ist aber, daß auch eine Berechnung der Schattigkeit im unmittelbaren Anschluß an die Planung möglich ist, daß also schon vor Erstellung der Anlage ein Urteil über die Schattigkeit derselben gewonnen werden kann.

Die Berechnung beruht darauf, daß man den gerichteten und ungerichteten Beleuchtungsanteil verhältnismäßig sicher getrennt bestimmen kann: Den gerichteten so, wie man bei Beleuchtungen im Freien diesen ermittelt, den ungerichteten, indem man den in den oberen Halbraum gehenden Lichtstrom als voll mittelbare Beleuchtung auswertet. Es wird immer genügen, diese Bestimmung für den ungünstigsten Punkt unter der Leuchte vorzunehmen.

Angenommen sei ein Raum mit einer größeren Anzahl von n Lichtquellen in Länge und in Breite. Eine bestimmte Lichtquelle wird ins Auge gefaßt; es wird angenommen, daß nur die nächsten (n , höchstens gleich vier) Nachbarlichtquellen zu der unmittelbaren Beleuchtung unter ihr beitragen. Abstände D und Lichtpunkthöhen l seien bekannt. Dann ergibt sich für den gerichteten Beleuchtungsanteil (wenn alle Nachbarn gleichen Abstand D haben) (14)

$$E_g = J_0 \cdot f_0 \cdot \frac{1}{l^2} + J_{D|l} \cdot f_{D|l} \cdot \frac{1}{l^2} \cdot n.$$

Man braucht also dazu die Lichtverteilung der Geleuchte, um daraus J_0 und $J_{D|l}$ zu entnehmen. Für den mittelbaren Beleuchtungsanteil braucht man das Zonenlichtstromschaubild; aus ihm entnimmt man den Lichtstrom im oberen Halbraum Φ_Δ ; kennt man nur die Beleuchtungsart und nicht das Zonenbild, so kann man überschläglich rechnen mit $\Phi_\Delta = p \cdot \Phi_0$, worin die Beiwerte p für die fünf verschiedenen Beleuchtungsarten die Werte $p = 0,0; 0,35; 0,5; 0,7; 1,0$ haben. Ist die Lichtnutzfläche je Lichtquelle von der Größe F , sind es m Lichtpunkte, die zu der Beleuchtung des Punktes wesentlich beitragen, und hat der Raum den Wirkungsgrad für mittelbare Beleuchtung η , so gilt

$$E_z = m \cdot p \cdot \Phi_0 \cdot \eta \cdot \frac{1}{m \cdot F} = \frac{p \cdot \Phi_0 \cdot \eta}{F}.$$

Gesamtschattigkeit ist dann gerichteter Anteil zu gesamter Beleuchtung, also

$$S_0 = E_g : (E_g + E_z).$$

Daraus folgt:

$$S_0 = \frac{1}{1 + \frac{p \cdot \Phi_0 \cdot \eta \cdot l^2}{F(J_0 f_0 + J_{D/l} \cdot f_{D/l} \cdot n)}} \equiv \frac{1}{1 + \frac{2 \pi \cdot \eta \cdot l^2}{F(1 + n \cdot f_{D/l})}}. \quad [29]$$

Das letzte gilt für den Fall der Punktlichtquelle, bei der

$$J_0 = J_{D/l} = \Phi_0 : 4 \pi \quad \text{und} \quad p = 0,5$$

ist. Hiernach ist die Schattigkeit nicht durch die Lampenleistung bestimmt oder beeinflussbar; denn es treten Lichtstrom und Lichtstärke nur als Verhältnis auf; ihr Verhältniswert ändert sich also infolge von Lampenleistungsänderungen nicht. Man erkennt, daß die Gesamtschattigkeit, wie meist wünschenswert, abnimmt, wenn der nach oben gehende Lichtstrombruchteil p oder der Wirkungsgrad η für Mittelbarbeleuchtung, oder die Lichtpunkthöhe, oder der Abstand D zunimmt, und wenn die Teilfläche je Lichtquelle abnimmt.

Ganz entsprechend läßt sich die größte Teilschattigkeit berechnen, für den Fall der Abschattung von nur einer Lichtquelle über dem Meßpunkt, gemäß

$$S_1 = E_0 : (E_g + E_z).$$

Daraus folgt

$$S_1 = \frac{1}{1 + \frac{J_{D/l} \cdot f_{D/l} \cdot n \cdot F + \eta \cdot p \cdot \Phi_0 \cdot l^2}{J_0 \cdot f_0 \cdot F}} \equiv \frac{1}{1 + f_{D/l} \cdot n + 4 \pi p \cdot l^2 \cdot \frac{\eta}{F}}$$

wobei wiederum das letzte für die Punktlichtquelle gilt.

Zur Berechnung der Schattigkeit in Räumen braucht man also: Die Fläche je Lichtquelle F , die Anzahl der Nachbarlichtquellen n , den Abstand der Lichtquellen D , die Lichtpunkthöhe l , den Wirkungsgrad η und den Lichtstromanteil des oberen Halbraumes p , sowie bei Lichtquellen mit beliebiger Lichtverteilung diese letzte selbst. Beispielsweise ergibt sich für eine Punktlichtquelle bei $n = 4$, $F = 25 \text{ m}^2$, $p = 0,5$, $\eta = 0,2$, $D = 5 \text{ m}$, $l = 2,5 \text{ m}$: $D/l = 2$, $f_{D/l} = 0,09$; $S_0 = 0,813$ und $S_1 = 0,60$. Der angenommene Fall würde als gut zu bezeichnen sein, da ein gerichteter Anteil von 66 v. H. und ein ungerichteter von 33 v. H. für Raumbeleuchtung für wünschenswert angesehen wird.

Den Einfluß der Beleuchtungsart verdeutlicht Abb. 84, die einen Eindruck der Schattigkeit für unmittelbare (Teilbild 1 und 2), halbmittelbare (3) und vollmittelbare (4) Beleuchtung vermittelt. Das erste Teilbild gilt für eine Lichtquelle, das zweite für zwei. Alle Verhältnisse sind sonst gleich gehalten.

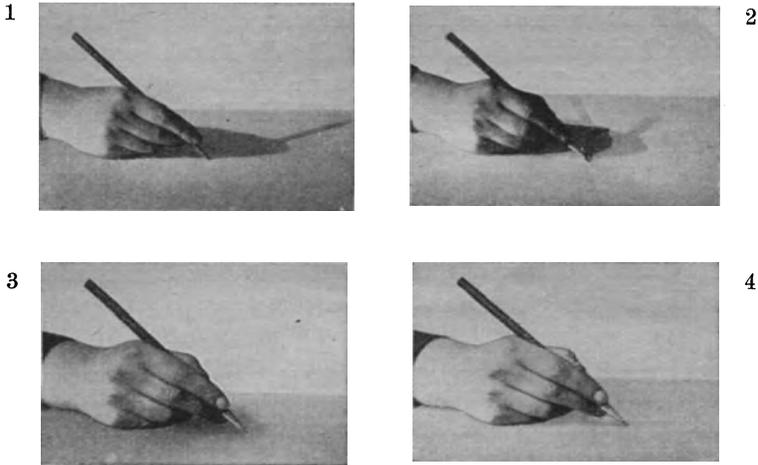


Abb. 84. Schattigkeitswirkungen verschiedener Beleuchtungsarten

18. Lichtstromschattigkeitsformel. Die im vorigen dargestellten Punktschattigkeiten erlauben es, die zur Beurteilung entscheidenden Punktschattigkeiten zu bestimmen. Unter Verwendung der mittleren Schattigkeit stellte Ondracek einen Ausdruck auf, der den Lichtstrom berechnen läßt, wenn man verlangt, daß auch im Gebiete der Schatten im Mittel die nach den Leitsätzen (1) geforderten Beleuchtungsstärken gelten sollen. Bezeichnet man mit den Zeichen g und z den gerichteten und den zerstreuten Lichtstromanteil, so gilt für den Gesamtlichtstrom, der zur Beleuchtungsfläche gelangt,

$$\Phi_{\text{ges}} = \Phi_g + \Phi_z \quad \text{und} \quad \Phi_{\text{ges}} = \eta \cdot \Phi_0,$$

wenn Φ_0 der Lichtquellenlichtstrom ist. Der zerstreute Anteil des Beleuchtungsflächenlichtstromes ist $\Phi_z = \eta_z (\Phi - \Phi_g)$, worin η_z der Wirkungsgrad für vollmittelbare Beleuchtung ist. Setzt man diese Ausdrücke in den für die mittlere Schattigkeit S_m'' (III, 7) ein, so folgt $S_m'' = P : \eta$, worin $P = (\eta - \eta_z) : (1 - \eta_z)$ ist. Mit Hilfe einiger Umformungen ergibt sich daraus für den zur Beleuchtung notwendigen Lichtquellenlichtstrom (15)

$$\Phi_0 = \frac{E_m \cdot F}{\eta - \frac{n+1}{2n} \cdot P}, \quad [30]$$

also ein Ausdruck, der eine Erweiterung der Formel [24] darstellt; mit $\eta = \eta_z$, also $P = 0$, geht er in sie über. Darin ist unter E_m die mittlere Beleuchtungsstärke im Schatten zu verstehen; n ist die

Anzahl der Lichtpunkte im Raume. Der Ausdruck $(n + 1) : 2n$ ist bei einer Lichtquelle gleich 1; je größer die Anzahl, um so mehr nähert er sich der Zahl 0,5. Die erweiterte Lichtstromformel besagt: 1. Je stärker die Schattentiefe (je größer das Verminderungsglied im Nenner), um so größer muß der Gesamtlichtstrom sein. 2. Je größer die Lichtpunktanzahl, um so kleiner das Verminderungsglied, also um so weniger braucht der Lichtstrom wegen der Schatten vergrößert zu werden. 3. Je mehr die Beleuchtungsart (η) von der vollmittelbaren (η_z) abweicht, um so größer ist der schattentechnisch notwendige Zuschlag des Lichtstromes.

19. Künstliche Glasdeckenbeleuchtung. Die guten Erfahrungen mit Oberlichtbeleuchtungen bei Tageslicht haben dazu geführt, auch Oberlichter mit künstlichem Licht einzurichten. Um die Lichtquellen unsichtbar zu machen, wird eine, oft als Staubdecke bezeichnete Glasdecke eingezogen, die das Licht zerstreuen soll. Die Verwendung von Streuglasdecken ist auch dann bei Tageslicht gut und erforderlich, wenn an die Weichheit des Lichtes hohe Anforderungen gestellt werden. Während aber für Tageslicht Mattglasdecken meist schon hinreichende Verteilung (des an sich schon gleichmäßigeren und blendungsfreieren Tageslichtes) bewirken, kommen für anspruchsvollere Glasdecken bei künstlichem Licht nur Opalglasdecken in Frage, meist solche aus Opalüberfangglas. Da diese Anlagen mit Tiefstrahlern vom besten lichttechnischen Wirkungsgrad beleuchtet werden können und eine gut streuende Glasdecke bestes Licht in Hinsicht auf hohe Gleichmäßigkeit und geringe Schattentiefe liefert, so stellt diese Beleuchtungsart, gemessen an dem was sie leistet, eine besonders wirtschaftliche dar. In Schalträumen, Postämtern usw., Ausstellungsräumen, ist reichlich Gelegenheit für Verwendung solcher Glasdecken gegeben (24).

Mattglasdecken lassen die Plätze der Lichtquellen selbst bei verhältnismäßig hohen Abständen von der Glasfläche immer noch erkennen und können daher nur für geringere Ansprüche genügen.

20. Lichtquellenanordnung. Damit die Glasdecke selbst überall die gleiche Leuchtdichte aufweist, ist es notwendig, die Abstände der Lichtpunkte voneinander nicht zu groß zu wählen. Für Mattgläser können Anweisungen, die das erreichen, nicht angegeben werden. Als Baustoff für die Glasdecken kommt Mattglas, mattiertes Drahtglas, Kathedralglas und Opalglas in Frage. Bei Opalüberfangdecken soll man sich daran halten, dem Verhältnis: Lichtpunktabstand zu Lichtpunkthöhe d/l , folgende Werte zu geben: Bei Starktiefstrahlern

$d/l = 1$, bei Tiefstrahlern $d/l = 1,5$, bei Breittiefstrahlern $d/l = 2$. Wird nur eine einzige Lichtquellenreihe angebracht, so soll $d/l = 1,3$ sein, ist überhaupt nur eine einzige Lichtquelle da, so $d/l = 1$, beides für Tiefstrahler. Dabei soll über einer Fläche die Anzahl in Länge und in Breite der Länge und Breite der Glasdecke verhältnismäßig sein. Meist ist die Lichtpunkthöhe durch die baulichen Verhältnisse des Glasdeckenüberbaues bedingt; bisweilen ist sie sehr gering. Dann bleibt für die Anzahl nichts als eine recht große übrig. Der Umstand, daß eine waagerechte Glasdecke nur so lange eine einwandfreie

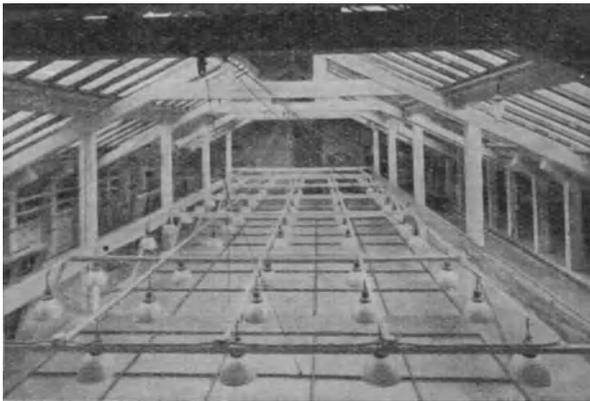


Abb. 85. Geleuchtanordnung über einer Glasdecke

beleuchtungstechnische Wirkung haben kann, wie sie vor Verstaubung bewahrt wird, macht es erforderlich, daß eine leichte und häufige Reinigung möglich sein muß (Abb. 85) (16).

Zu müheloserer Ermittlung der Gesamt- und der Teilanzahlen kann auch hier die Rechentafel Abb. 81 herangezogen werden.

21. Der Glasdeckenwirkungsgrad. Verlangt ist eine gewisse Beleuchtungsstärke; sie wird den üblichen Tabellen entnommen. Die weitere Bestimmung erfolgt nach dem für alle Raumbeleuchtungen anzuwendenden Wirkungsgradverfahren. Gemäß dem Formel-ausdruck dafür

$$\Phi = \frac{E \cdot F}{\eta_0}$$

handelt es sich im wesentlichen um die Bestimmung des Wirkungsgrades η_0 .

Hierüber sind sehr eingehende Untersuchungen vorhanden; da die Ergebnisse aber in zahlreichen Kurven niedergelegt sind, die hier nicht wiedergegeben werden können, so kann nur darauf verwiesen werden (17). Als Beleuchtungsart entspricht die Glasdeckenbeleuchtung am ehesten einer vorwiegend unmittelbaren. Also sind die η_0 -Werte demgemäß zu wählen. Diese Wirkungsgrade setzen sich aus mehreren Einzelwirkungsgraden zusammen. Sind diese bekannt, so kann man die Wirkungsgradberechnung mit ihnen vornehmen.

Zunächst hat das Geleucht über der Glasfläche einen lichttechnischen Wirkungsgrad χ_u . Dann trifft das Licht die Glasdecke; nur ein Bruchteil (von der Größe des Lichtdurchlasses τ) durchtritt die Fläche. Dieser tritt in den Raum ein und verursacht nun je nach Raumform und Verhältnis der Größe der Glasfläche F und der Lichtnutzfläche F_0 einen räumlichen Wirkungsgrad $\eta'_{v. u.}$, von dem erwiesen ist, daß er mit wachsendem Verhältnis Raumbreite : Raumhöhe abnimmt; daß er um so höher liegt, je kleiner das Verhältnis F/F_0 ist und je mehr die Glasfläche von den Wänden entfernt liegt; daß er schließlich durch helle Wände sehr vermehrt wird. In solch einem Falle, in dem diese Einzelwirkungsgrade bekannt sind, gilt für den Gesamtwirkungsgrad $\eta_0 = \chi_u \cdot \tau \cdot \eta'_{v. u.}$. Den nur für den Raum ohne das Geleucht geltenden Wirkungsgrad $\eta'_{v. u.}$ erhält man angenähert, indem man den η -Wert für vorwiegend unmittelbare Beleuchtung durch den lichttechnischen Wirkungsgrad χ für die gleiche Art dividiert, gemäß $\eta'_{v. u.} = \eta_{v. u.} : \chi_{v. u.}$. Dann gilt endgültig

$$\eta_0 = \frac{\chi_u \cdot \tau \cdot \eta'_{v. u.}}{\chi_{v. u.}}$$

Setzt man nun als Durchschnittswerte an: $\chi_u = 0,65$, $\chi_{v. u.} = 0,8$, $\tau = 0,50$, so erhalte man

$$\eta_0 = 0,35 \cdot \eta'_{v. u.},$$

einen Ausdruck, mit dem man, sofern man auf die genaueren Erfahrungen verzichtet, mit Hilfe der üblichen Tabellen gute Berechnungen durchführen kann.

Für rechteckige Räume wird empfohlen (Harrison-Pahl)

$$\eta = 1/2 (\eta_B + \eta_L),$$

worin η_B und η_L die Wirkungsgrade quadratischer Räume mit den Seiten B und L , den Rechtecksseiten, sind.

22. Gleichmäßigkeit und Schattigkeit. Falls Lichtnutz- und Glasdeckenfläche gleich groß sind, nimmt die Gleichmäßigkeit den Wert 1 wirklich an. Je mehr sich die Glasfläche verkleinert, um so mehr wächst die Ungleichmäßigkeit auf der Lichtnutzfläche. Beträgt die Glasfläche nur einen Bruchteil der Lichtnutzfläche, so wird man zur Erhöhung der Gleichmäßigkeit diese noch in Teilglasflächen zerlegen. Jede Teilfläche muß aber immer noch eine Größe behalten, die mit der Lichtnutzfläche vergleichbar ist.

Für die Schattigkeit erweisen sich die Glasdecken als sehr günstig, um so mehr, je ausgedehnter sie sind. Dies zeigt die Kernschattenformel S. 20. Wählt man z. B. $l = 8$ m, $h = 0,3$ m, $I. = 5$ m, $S = 0,2$ m, so

bekommt man eine Kernschattenausdehnung von rund $K = 0$. Die Halbschattenbreite R nimmt dann den, im Vergleich zur Schatterausdehnung, großen Wert 0,4 an und besitzt notwendig geringe Tiefe. Es kann also z. B. kein Platz durch Kopfschatten Beeinträchtigung erfahren.

23. Allgemeines über Heimbeleuchtung. Wenn heute dem Eigenheim und dem Siedlungshaus erhöhte völkische Bedeutung zukommt, so besitzen auch alle Mittel, das Heim zu verschönern, entsprechenden Wert. Zu diesen Mitteln zählt auch die Beleuchtung des Heims. Ihr Wert besteht darin, daß sie eines der besten Mittel ist, ein Heim wohnlich, anziehend und schön zu machen. Indem aber der Heimbeleuchtung diese Aufgabe zukommt, haben sich in ihr Wünsche und Geschmack der Heimbewohner auszudrücken. Für diesen das Gemüt und den Schönheitssinn des Menschen dienenden Teil der Beleuchtung können daher allgemein gültige Bestimmungen kaum gegeben werden. In der Ausgestaltung soll sich der persönliche Geschmack eines jeden ausdrücken. Trotzdem lassen sich einige Richtlinien allgemeinerer Art angeben, die überall Geltung besitzen dürften. Das ist um so wichtiger, als bisweilen Beleuchtungsforderungen für das Heim angegeben werden, die für einen aufwandfähigen Haushalt richtig sind, für die große Menge der Heime unserer Volksgenossen aber keine Bedeutung haben.

Das Haus, die Wohnung ist nur zum Teil Aufenthalts-, Gemeinschafts- und Erholungsstätte im Rahmen der Familie: Es ist ebenso eine Stätte der Arbeit. Soweit dies letzte ausgeprägt Geltung hat, müssen die Richtlinien für Arbeitsbeleuchtung berücksichtigt werden; jedoch nur in eingeschränktem Sinne. Im Heim werden verschiedenartigste Arbeiten gleicherorts verrichtet; die Beleuchtung der Arbeitsbereiche muß daher vielseitig brauchbar sein. Aus dieser Bedingung und aus den Bedingungen für schöne Beleuchtung folgt nun der Hauptgrundsatz aller Heimbeleuchtung: Es soll möglichst für jeden Platz, sei es einer der Arbeit oder einer der Erholung, eine geeignete und entsprechende Beleuchtungseinrichtung vorhanden sein.

Also zahlreiche Lichtstellen. Das heißt nicht unbedingt: viel Licht. In der letzten Hinsicht eine Forderung aufstellen, hieße etwas fordern, was dem Einzelheim heute nur selten tragbar wäre. Zahlreiche Lichtstellen können aber gerade das (zwar nicht in der Anschaffung, aber) im Betrieb Billigste darstellen. Ja, nur durch zahlreiche Lichtquellen kann den berechtigten Forderungen betreffs der Stärke der Heimbeleuchtung genügt werden. Die Energiewirtschaft sollte daher auch mehr Sorge darauf richten, wie der Lichtenergieverbrauch in Heimen durch Herabsetzung von Tarifen gesteigert werden könnte, als darauf, die Forderungen ständig zu steigern. Denn gute Heimbeleuchtung wird am ehesten als „Verschwendung“ empfunden, da

sie sich nur zu einem geringen Teil „lohnt“. Das Kulturgut „Licht“ sollte aber bei einer volksverbundenen Kultur nicht nur auf die Stätten der Arbeit, des Kunstgenusses, der Volksgemeinschaft, des Sports oder des Verkehrs beschränkt bleiben, sondern auch in den Heimen als hohes Gut wirksam werden.

Die genannte Lichtquellenunterteilung sei an einigen Beispielen erläutert; sie läßt sich leicht sinngemäß andernorts erweitern; ein Zuviel kann es darin schwerlich geben. Zunächst soll jeder Raum möglichst eine Allgemeinbeleuchtung haben. Der Flur habe zweckmäßig neben dem Spiegel Zusatzleuchten, vielleicht auch in der Nähe der Kleiderablage. Das Wohnzimmer habe eine Hauptbeleuchtung, bestehend aus einer Lichtquellengruppe in Deckenhöhe (sie soll alle Raumteile erleuchten können) und einer Großflächenleuchte über dem großen Tisch; daneben aber etwa eine Standleuchte, die mit warmem Licht den gemütlichen Zimmerteil erhellt, oder an einer Wand, etwa neben einem wertvollen Bilde, Kerzenleuchten; außerdem vielleicht noch eine Lichtquelle am Klavier; meist noch eine kleinere Stehlampe, geeignet für Handarbeiten. Im Herrenzimmer zunächst eine gute Schreibtischleuchte; außerdem möglichst noch eine Tischleuchte, die nur einen kleinen Platz zu erhellen braucht; sonst vielleicht noch eine Leuchte beim Bücherschrank oder auch an geeigneter Wandstelle (denn von je weniger großer Höhe das Licht kommt, um so angenehmer wird es empfunden). Im Schlafzimmer als Zusatz die üblichen Nachttischleuchten, am Spiegel etwa eine Röhrenleuchte; vielleicht auch eine Leseleuchte über dem Kopfende des Bettes. Am Schreibtisch der Schulkinder eine Arbeitsplatzleuchte. An den Treppen Leuchten, auch an den Treppenabsätzen, nicht nur in den Stockwerken. In der Küche nicht nur das Licht über dem Mitteltisch, sondern insbesondere an der Wand über dem Abwaschplatz und dem Herd, damit dieser nicht gerade durch den Arbeitenden beschattet wird. Und so fort. Wer dann immer nur das benötigte Licht einzuschalten versteht, verbraucht weniger so, als mit der ständig brennenden und meist doch nicht genügenden Allgemeinbeleuchtung; mit deren Beibehaltung bei Zusatzbeleuchtung es im Heim nicht so wichtig ist wie bei beruflicher Arbeit. Durch die vielartigen Beleuchtungsmöglichkeiten wird dem Wohnraum die Einförmigkeit des Eindrucks genommen; das Licht hilft, einen einzigen Raum immer anders und neu wirken zu lassen (18), (25).

24. Beleuchtungsstärken und Lampenleistungen für Heimleuchten. Es ist nicht möglich, in Hinsicht der Beleuchtungsstärken durchgängig gültige Zahlen anzugeben. Die Ansprüche sind nirgends so verschieden wie in Heimen. Für Nebenräume kann die Regel: 1 Watt aufs Kubikmeter, gute Dienste tun, in Haupträumen gilt entsprechend geringen bis höheren Ansprüchen: 3 bis 5 Watt je Kubikmeter. Für die Fälle, in denen die Angabe einer mittleren Beleuchtungsstärke einen Sinn hat, gibt die Aufstellung 21 Auskunft. Die Spanne zwischen dem Geringstwert und dem empfohlenen Höchstwert ist hier naturgemäß sehr groß. Für manche Fälle läßt sich besser nur die Lampenleistung angeben. Diesen Fällen gilt die Aufstellung 30. Hier sei beachtet, daß heute bei Heimbeleuchtung im Durchschnitt nur ein Drittel, im Einzelfall oft ein weit geringerer Bruchteil der verlangten Beleuchtungsstärke erreicht wird (19).

Aufstellung 30. Lampenleistungen für Heimbeleuchtung

<i>Vorraum:</i>	Flur, Diele: 25 bis 75 Watt; Treppe 25 Watt.
<i>Wohnzimmer:</i>	Hauptleuchte: 40 bis 150 Watt; Schreibtisch: 60 Watt; Klavier: 40 Watt; Standleuchte 100 Watt; Handarbeit: 100 Watt; Leseleuchte: 40 Watt.
<i>Küche:</i>	Hauptleuchte: 100 Watt; Zusatz: 40 Watt. Speisekammer: 15 Watt.
<i>Eßzimmer:</i>	Hauptleuchte: 40 bis 150 Watt; Tischleuchte: 40 bis 75 Watt.
<i>Kinderzimmer:</i>	60 bis 100 Watt.
<i>Schlafzimmer:</i>	40 bis 100 Watt; Bad: 60 Watt.

An einem Beispiel werde der Nutzen der Unterteilung erläutert. In einem Zimmer soll gleichzeitig Schreibtischarbeit, Näharbeit und Lese-tätigkeit vor sich gehen. Die erste erfordert 100 lx, die zweite 100 lx, die dritte 50 lx. Bei allgemeiner Beleuchtung müßte also 100 lx vorhanden sein. Der Raum habe die Fläche 25 m². Die Wandbekleidung sei mittelhell. Dann ist mit einem Lichtstrom von 6000 lm zu rechnen, also etwa mit 300 Watt. Bei Anwendung von Einzelbeleuchtungen wäre nötig: 60 Watt, 60 Watt und 40 Watt, insgesamt also 160 Watt. Bei geringerer Gesamtleistung würde also eine größere Platzbeleuchtung erreicht. Auf die Dauer machen sich daher die Anschaffungskosten der einzelnen Leuchten durchaus bezahlt.

Die Wandbekleidungen in Heimen sollen immer auf beleuchtungstechnische Forderungen Rücksicht nehmen. In Schlafräumen, Küchen, allen Neben-räumen sei die Wand so hell wie möglich, am besten weiß. Wohn- und Eß-räume sollten aber auch schöne lichte Wandbekleidungen erhalten. Werden aber doch dunklere Bekleidungen bevorzugt, so sollte der weiße Wandabsatz bis zur Decke groß gehalten werden, und mindestens bis zur Aufhängehöhe der Hauptleuchte herabreichen. Niemals sollten unabgeschirmte Lichtquellen verwendet werden. Für alle Nebenräume einschließlich der Küche sind Opal-glasleuchten zu wählen, für Boden und Keller jedoch geeignete Schirm-leuchten. Für die eigentlichen Wohnzimmer kommen technische Zweck-geleuchte nie in Frage. Es gibt heute vorzügliche Leuchten, aus Seide oder Edelpapier ausgeführt. Als Wandleuchten kommen Leuchter mit echten Kerzen oder die künstlichen Kerzenschaftlampen oder die Linestralampen in Betracht. Bei Schreibtischleuchten achte man besonders auf richtige Höhe. Die Höhe soll mindestens ein Drittel der Strecke betragen, die aus-reichende Helligkeit erhalten soll.

25. Treppenbeleuchtung. Diese Beleuchtung verdient besondere Beachtung. Nicht die geringste Anzahl aller Verkehrsunfälle geschieht auf Treppen; und deshalb, weil die Stufen nicht mit hinreichender Sicherheit erkennbar sind. Große Beleuchtungsstärke allein nützt noch nicht. Am schlechtesten ist die Beleuchtung, die durch eine Lichtquelle entsteht, welche sich über der Mitte der Treppe in beträchtlicher Höhe senkrecht über der Treppenebene befindet, um so mehr, je schattenloser ihr Licht ist. Denn die auf allen Stufenflächen gleichstarke Leuchtdichte macht jede Formerkenn-barkeit der Stufen unmöglich. Besser, jedoch noch im wesentlichen ein Versager, ist die Anlage, die auf den waagerechten Trittstufen stärkere Beleuchtung erzeugt als auf den lotrechten (Abb. 86, 2). Diese Treppe würde

von unten her gut begehbar sein. Eine solche Beleuchtung würde durch eine Lichtquelle entstehen, die senkrecht über der Treppe angebracht wäre. Fast alle Unfälle auf Treppen geschehen aber beim Begehen von oben nach unten. Im letzten Fall würden alle Stufen sich infolge der von oben nach unten wahrnehmbaren gleichen Leuchtdichten nicht unterscheiden. Jede Stufe muß daher bei richtiger Treppenbeleuchtung von oben unterscheidbar sein. Das ist nur möglich durch die Mitwirkung von Schatten. Da es hauptsächlich auf die Sichtbarkeit der Stufenkante ankommt, so wäre die Von-Oben-

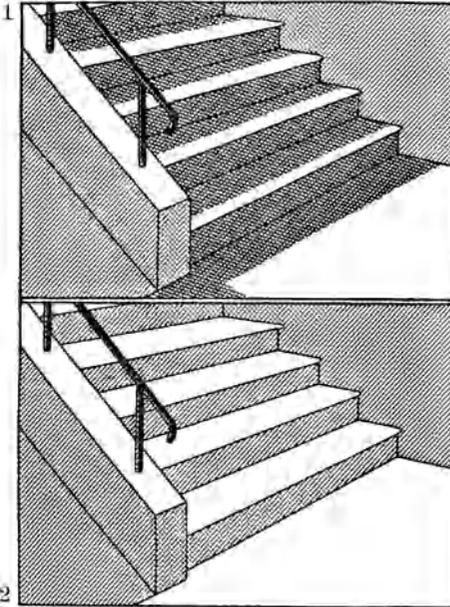


Abb. 86.

Richtige und falsche Treppenbeleuchtung

Erkennbarkeit gewährleistet durch eine scharfe schattenwerfende, also etwa vorwiegend unmittelbare Beleuchtung, die das Licht in einer Richtung, die zwischen der Treppenebene und der Blickrichtung des Treppenbenutzers liegt, einfallen ließe, so daß jede Stufenkante sich hell gegen den dunklen, beschatteten Teil der nächst unteren Stufe abhobe (Abb. 86,1). Um bei dieser Beleuchtungsart eine Abdeckung der Lichtquelle durch den Benutzer zu verhindern, müssen zwei Lichtquellen nebeneinander angebracht werden. Ein anderer Weg ist der, die Treppe von der Seite her durch eine so nah über der Treppenebene angebrachte Leuchte zu beleuchten, daß infolge der verschiedenen Abstände zur Lichtquelle jede Stufe eine andere Beleuchtung hätte. Die vollkommenste Beleuchtung wird, wenn auch mit höchstem Aufwand, da-

durch geschaffen, daß unter der Vorderkante jeder Stufe trittsicher eine Soffittenlampe angebracht wäre, die infolge der geringen Lichtpunkthöhe solch starke Leuchtdichteunterschiede auf jedem Tritt erzeugen, daß die dann verhältnismäßig dunklen Kanten deutlich erkennbar wären. — So zeigt die Treppenbeleuchtung, daß eine Beleuchtung immer den Sonderbedürfnissen voll entsprechen muß. Nicht auf hohe Beleuchtungsstärken, sondern auf dienliche Leuchtdichteunterschiede kommt es z. B. hier an (20).

Die Schwierigkeit, rein beleuchtungsmäßig die notwendigen Leuchtdichteunterschiede hervorzurufen, würde gemindert, wenn die erforderlichen Hellgegensätze nicht durch das Licht, sondern durch die Treppenbekleidung gegeben wären; entweder so, daß die Stufen abwechselnd heller und dunkler gehalten würden; oder so, daß die Stufenvorderkanten durch einen hellen oder dunklen Streifen kenntlich gemacht wären; oder auch so, daß die Vorderkante der Stufe verbrochen oder gerundet wird, so daß sie durch die

andere Leuchtdichte auffällt, die infolge der anderen Lage zum Lichteinfall entsteht (27).

Für Treppenbeleuchtung ist im übrigen zu beachten, daß sie oft schon einzuschalten ist, wenn andere Räume es noch nicht erfordern; und daß Treppen — wie z. B. bei Aussichtstürmen —, die oft nur teilweise gutes Tageslicht erhalten, auch teilweise dauernde Beleuchtung benötigen.

Als Beleuchtungsstärken für Treppen werden empfohlen: Bei schwachem Verkehr: 15 lx, bei starkem Verkehr: 30 lx, dann sollen an den schlechtesten Stellen noch herrschen 5 bzw. 10 lx.

26. Anhang. Zahlbeispiele.

1. Zu [24]. Lichtnutzfläche $F = 20 \text{ m}^2$, $E_m = 80 \text{ lx}$; $\eta = 40 \text{ v. H.}$

Die Lichtstromformel ergibt: $\Phi_0 = \frac{80 \cdot 20}{0,4} = 4000 \text{ lm.}$

2. Zu XII, 10. Länge 1,8 m, Breite 1,6 m, Höhe 4 m. Decke weiß, Wände zu $\frac{2}{3}$ dunkelbraun, sonst hellgelb. $H' = \frac{2}{3}H = 2,66 \text{ m}$; dunkle Fläche: $1,66 \cdot 2 \cdot (8 + 6) = 46,5 \text{ m}^2$; helle Fläche: $1,33 \cdot 2 \cdot 14 = 37,3 \text{ m}^2$. $\rho_1 = 0,12$, $\rho_2 = 0,6$. Wand:

$$\rho = \frac{46,5 \cdot 0,12 + 37,3 \cdot 0,6}{83,8} = 0,33.$$

Decke: $\rho = 0,8$. Also Wand: mittelhell, Decke: hell.

3. Zu 11. Wand mittelhell, Decke hell. $l = 2 \text{ m. a)}$ Vorwiegend unmittlere Bel. $B/l = 3$; $\eta_B = 0,36$; $L/l = 4$; $\eta_L = 0,41$; $\eta = 38 \text{ v. H. b)}$ Halbmittlere Bel. $B/h = 2$; $\eta_B = 0,31$; $L/h = 2,66$; $\eta_L = 0,35$; $\eta = 32 \text{ v. H.}$

4. Zu 14. Vortrags- und Lehrsaal. $L = 12 \text{ m}$, $B = 8 \text{ m}$, $H = 4,5 \text{ m}$. Decke hell, Wände hell mit hellgrauem Sockel von 2 m Höhe. Spannung 220 Volt. 1 kWh = 0,30 RM. Ansprüche hoch. — Lösung: $E_m = 80 \text{ lx}$. $E_{\min} = 20 \text{ lx}$. Beleuchtungsart: Halbmittelbar. $l' = 2,0 \text{ m}$. $F = 96 \text{ m}^2$, $k = 4,5$, $n' = 5,3$. Gewählt $n = 6$, $n_L = 3$, $n_B = 2$. Daraus $l = 1,87 \sim 1,9 \text{ m}$. $\eta_B = 0,43$, $\eta_L = 0,37$,

$\eta = 0,41$. $\Phi'_0 = \frac{80 \cdot 96}{0,41} = 18700 \text{ lm.}$ $\Phi' = 3120 \text{ lm.}$ Gewählt

$N = 200 \text{ Watt}$ (mit 3220 lm). $N_0 = 1200 \text{ Watt}$. $\Phi_0 = 19320 \text{ lm.}$

$E'_m = 80 \cdot \frac{19,3}{18,7} = 82,6 \text{ lx}$. Die Faustregel 1 ergibt: $N = 1056 \text{ Watt}$.

Regel 2: $N = 1440 \text{ Watt}$. Regel 3: 4 Lichtquellen. Also je 300 Watt. Die obige Bearbeitung sichert größere Gleichmäßigkeit.

5. Zu 20 u. 21. $F_0 = 15 \cdot 10 \text{ m}^2$; $F = 60 \text{ m}^2$. Raumhöhe 8 m. Wände mittelhell. $E = 80 \text{ lx}$. Über der Decke 2 m Platz. Opal-

glas $\tau = 0,4$. $V = 220$ Volt. Lösung: $B/l = 1,43$; $L/l = 2,14$;
 $\eta_B = 0,20$; $\eta_L = 0,25$; $\eta = 22$ v. H.; $\chi_{u.} = 0,65$; $\chi_{v. u.} = 0,85$;
 $\eta_0 = \frac{0,65 \cdot 0,4}{0,85} \cdot 0,22 = 0,067$; $\Phi = \frac{80 \cdot 150}{0,067} = 180$ klm. Geleucht-
höhe $l' = 1,5$ m. Anzahl $n = 60 : (1,5 \cdot l'^2) = 12$. $\Phi' = 180 : 12$
 $= 15$ klm; $N = 750$ Watt; $N_0 = 9$ kW. Also 60 Watt/m².

Schrifttumsnachweis

(1) DIN 5035. DLTG.-Leitsätze für Beleuchtung mit künstlichem Licht.
— (2) L. Schneider, Osram-Lichtheft A 1 nach König u. Brodhun, Ber. d. Akad. d. Wiss. Berlin 8, II, 1917. — (3) AEG-Hilfsbuch f. Elektr. Licht- u. Kraftanlagen, 3. Ausg., S. 359. — (4) Wittig, Bürobeleuchtung, Siemens-Zeitschr. 16, 1936. — (5) J. Teichmüller, Li. La. 13, 526, 1924; W. Arndt, Die Güte von Beleuchtungsanlagen, Berlin 1926. — (6) Harrison u. Anderson, Trans. Ill. Eng. Soc. 11, 67, 1916. — (7) E. Summerer, ETZ Heft 43, 1930 (Osram-Lichtheft S. 8); O. H. Knoll, Das Licht 5, 69, 89, 111, 1935; G. Laue, Lichttechnik, Körting u. Mathiesen Druckschrift Nr. 8663. — (8) K. Norden, Grundlagen der Schattentechnik, S. 47. — (9) Zu entsprechenden Betrachtungen bei beliebigen Lichtverteilungen dient das Lichtstrompapier von Wohlaue (Schleicher u. Schüll, Düren, Nr. 403 1/2). — (10) E. Meyer, Li. La. 24, 197, 219, 1935. — (11) Hasenkämper, ZS. f. techn. Phys. 5, 355, 1934. — (12) Näheres wird vom Verfasser noch veröffentlicht. — (13) P. Heyck u. P. Högner, Projektierung von Beleuchtungsanlagen, ZS. f. Beleuchtungs-Wesen, Heft 3 bis 10, 1919; P. Högner, Lichtstrahlung u. Beleuchtung, Braunschweig 1906. — (14) E. Meyer, Li. La. 26, 162, 1937. — (15) J. Ondracek, Das Licht 7, 97, 117, 1937. — (16) H. Stöckel, Spiegellichtblätter, Zeiss-Ikon, Heft 11, S. 10, 1932; A. Pahl, ebenda, Heft 12, 1933. — (17) A. Pahl, Das Licht 5, 223, 241, 269, 1935. — (18) F. Hägele, Das Licht 4, 167, 1934. — (19) W. Schmidt, Das Licht 6, 111, 1936. — (20) K. Norden, ZS. f. phys. u. chem. Unterr. 48, 68, 1935. — (21) W. Arndt, Raumbeleuchtung, Berlin 1931; hier wird mit einer neu festgesetzten „Raumhelligkeit“ eine völlig neue Beleuchtungsberechnung und Bewertung geschaffen, die in der Praxis aber noch nicht Eingang gefunden hat. — (22) E. Summerer, Li. La. 18, Heft 20, 1929 (Osram-Lichtheft S. 2). — (23) H. Lux, in Bloch, Lichttechnik, S. 352—431 und G. Nilson, Das Licht 4, 11, 1934. — (24) A. Stege, Das Licht 3, 77, 1933. — (25) W. Wagenfeld, Spiegellichtblätter 8, 1931. — (26) P. Kubelka u. F. Munck, ZS. f. techn. Phys. 12, 593, 1931. — (27) E. Besser, Das Licht 7, 141, 1937.

XIII. Arbeitsplatzbeleuchtung

1. Arten der Arbeitsplatzbeleuchtung. Unter allen Beleuchtungsaufgaben ist es die vornehmste, eine gute Beleuchtung der Arbeit zu schaffen.

Wohl jeder Arbeitsvorgang geht unter Sehleistung vonstatten. Daher müssen Arbeitsstätten und -plätze aufs beste beleuchtet sein. Arbeitsplatzbeleuchtung sollte allen Beleuchtungen als vorbildlich vorangehen. Gute Beleuchtung verursacht (siehe Abschn. 12): erstens eine Steigerung der

Arbeitsleistung und gleicht dadurch die gesteigerten Unkosten wieder aus; zweitens ist sie eines der unentbehrlichsten Mittel zur Bekämpfung von Verkehrsunfällen; drittens hebt Stärke, Gleichmäßigkeit, Schattenlosigkeit und Blendungsfreiheit die Freude an der Arbeit, ein Ziel, das heute jedem am Herzen liegen muß.

Man unterscheidet zwei Arten von Arbeitsbeleuchtungen: 1. Die „Allgemeinbeleuchtung“; bei ihr wird der ganze Raum oder die ganze Arbeitsstätte gleichartig beleuchtet. 2. Allgemeinbeleuchtung mit „Zusatzbeleuchtung“. Im ersten Falle handelt es sich um reine Raum- oder reine „Platzbeleuchtung“ (Abschn. XIII u. XV); (1).

Die Allgemeinbeleuchtung reicht nur für Beleuchtung zu größerer bis durchschnittlicher Arbeit aus. Man wendet sie z. B. an bei freien Arbeitsplätzen, wie Werften oder Holzzusammenbau- plätzen. Bei feineren Arbeiten würde es in den meisten Fällen zu einem nicht tragbaren Aufwand

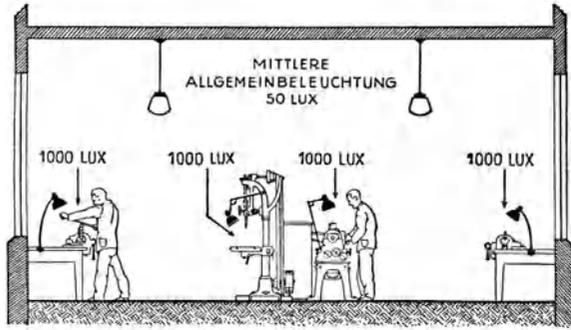


Abb. 87. Stärke der Arbeitsplatzbeleuchtung durch Zusatzleuchte

kommen, wenn man die gesamte Beleuchtung den Anforderungen anpassen würde, die für die Arbeitsstelle selbst benötigt werden. Darum wählt man bei feineren Arbeiten außer der Allgemeinbeleuchtung, die dann geringer gehalten werden kann, Sonderbeleuchtungen, die nur dem beschränkten Arbeitsbereich selbst gelten (Abb. 87).

Als Vorteil der Beleuchtung mit Zusatz gilt, daß durch sie leicht derartige Beleuchtungsstärken erreichbar sind, wie sie als wünschenswert gelten. Als Nachteil gegenüber einer reinen Allgemeinbeleuchtung gleicher Stärke wirkt sich größere Ungleichmäßigkeit aus, die dadurch entsteht, daß die Arbeitsstellen sehr hell, ihre Umgebung aber nur mäßig erhellt ist. Beschränkt sich die Arbeit nicht auf einzelne Bereiche, sondern spielt sie sich auf größeren Flächen ab, so ist wegen der größeren Gleichmäßigkeit Allgemeinbeleuchtung vorzuziehen.

Wenn Zusatzbeleuchtung vorliegt, so darf die Allgemeinbeleuchtung auf geringere Stärken eingerichtet werden als es ohne Zusatz zulässig wäre. Die mindest nötige Stärke der Allgemeinbeleuchtung läßt sich aus der Stärke der Zusatzbeleuchtung berechnen mit

$$E_{\text{Allg}} = 13 \cdot \log E_{\text{Zu}}$$

Leiter Abb. 67 gibt den Zusammenhang wieder (vgl. auch Abb. 89). Einhaltung dieser Werteverhältnisse sichert, daß sich die zwischen Sonder-

und Allgemeinbeleuchtung bestehenden Unterschiede nicht durch zu starke Ungleichmäßigkeiten störend auf die Sehleistung bemerkbar machen.

Allgemeinbeleuchtung ist nach den Grundsätzen der Raumbelichtung einzurichten. Ist Zusatzbeleuchtung vorhanden, so genügt eine gröbere Berechnung; die Lichtpunkthöhe wird man immer, um die Gleichmäßigkeit zu heben, möglichst groß wählen. Die Lichtpunkte der Allgemeinbeleuchtung werden tunlich in die Raumbereiche gebracht, die von den Zusatzgeleuchten nicht besetzt sind. Ist eine hochwertige Zusatzbeleuchtung erstellt, so kann sie (Abb. 88) eine Allgemeinbeleuchtung überflüssig machen.



Abb. 88. Übergangsform von Arbeitsplatz- in Allgemeinbeleuchtung

2. Beleuchtungsstärken. Die Beleuchtungsstärken müssen je nach Art der Arbeit verschieden groß gewählt werden. Alles Nötige geben die Aufstellungen 20 und 22 an. Die dort angegebenen Werte werden in Abb. 89 größenordnungsmäßig zum Vergleich gebracht. Darin beziehen sich die Zeichen *a* auf reine Allgemeinbeleuchtung, *b* und *c* auf gleichzeitige Zusatz- und Allgemeinbeleuchtung.

Beim Sehen am Arbeitsgut kommt es auf die Leuchtdichten an. Die Werte der Aufstellungen beziehen sich auf mittleren Lichtrückwurf von $\varrho = 0,4$. Besitzt ein Arbeitsgut aber den Rückwurf ϱ' , so ist als Beleuchtungsstärke zu wählen

$$E' = E \cdot \varrho' / \varrho.$$

Es können daher bei Verarbeitung von besonders dunklem Gut Beleuchtungsstärken vom 30fachen des genannten Betrages auf-

treten. Bei besonders hellem Gut darf man, wenn größte Sparsamkeit verlangt ist, eine Verminderung vornehmen. Überdies gelten die *E*-Werte nur für mittlere Hellabhebung, mittlere Gegenstandsgrößen und mittlere Geschwindigkeit; werden diese wesentlich über- oder unterschritten, so sind die *E*-Werte entsprechend zu erhöhen.

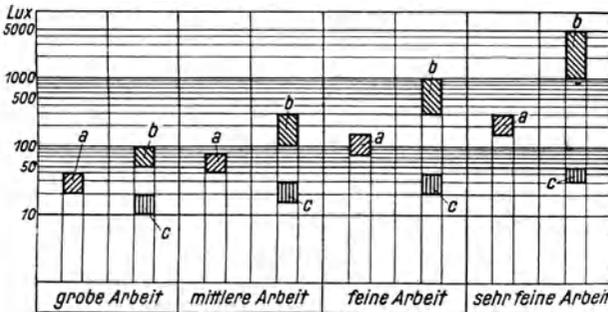


Abb. 89. Maßstäblicher Vergleich verlangter Beleuchtungsstärken

Daß die vorgeschlagenen *E*-Werte noch keineswegs solche höchster Leistung darstellen, geht aus Abb. 90 hervor. Sie zeigt, daß die empfohlenen *E*-Werte nur bei Einhaltung ihrer obersten Grenzen und nur bei Zusatzbeleuchtung an die Höchstleistungsgrenzen heranführen (100 v. H.) und daß Allgemeinbeleuchtung sogar nur bei grober Arbeit in den Bereich dieser Leistungsgrenze führt. Je feiner die Arbeit, um so weniger kann daher Allgemeinbeleuchtung als ausreichend bezeichnet werden.

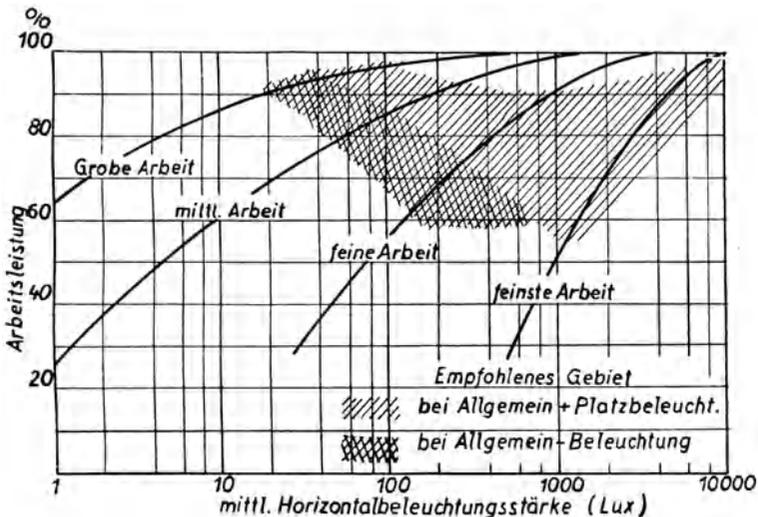


Abb. 90. Die durch die verlangten Beleuchtungswerte erreichbaren Leistungsbereiche

Des Näheren kann die „Sehschärfe“ zur Beurteilung einer Beleuchtung dienen. Sehschärfe ist eine bestimmt angebbare Sehleistung, nämlich der Kehrwert des Winkels α , also $S = 1/\alpha$, mit dem das Auge einen Gegenstand,



Abb. 91. Zur Sehschärfe

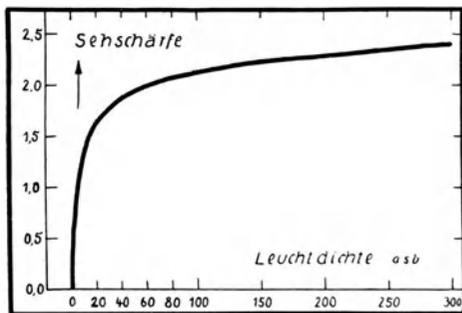


Abb. 92.

Zusammenhang von Sehschärfe und Leuchtdichte

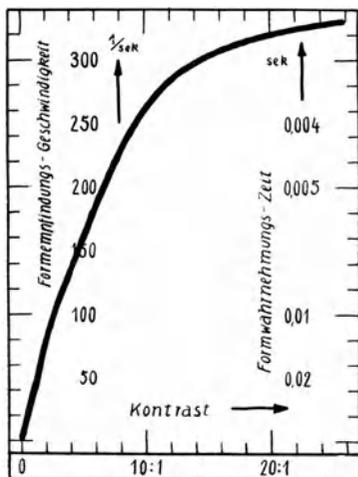


Abb. 93. Kontraststeigerung als Hilfsmittel zur Verbesserung der Formempfindungsgeschwindigkeit

z. B. einen „Landoltschen Ring“ (Abb. 91), betrachten muß, um ihn mit Sicherheit gerade zu erkennen. Sehschärfe ist leuchtdichteabhängig; deshalb haben Augen nicht eine feste Sehschärfe. Ein Durchschnittswert ist $S = 1$; dann kann also bei 1° Schinkel noch erkannt werden. Abb. 92 zeigt, wie die Sehschärfe mit der Leuchtdichte zunimmt. In den als gut zu bezeichnenden Bereich von $S = 2$ gelangt man also nur von Leuchtdichten an, die über 60 asb liegen; für mittleren Lichtrückwurf entspricht das 150 lx. (2).

Der Grenzkontrast (S. 97) verhält sich bei Zusatzbeleuchtung ebenso wie bei allgemeiner. Er nimmt im übrigen zu, wenn das Arbeitsgut bewegt wird; er nimmt ab, wenn die Größe der zu erkennenden Arbeitsteile abnimmt.

Außer Grenzkontrast und Sehschärfe werden zu Bewertungen auch die Geschwindigkeit der Leuchtdichteempfindung und die der Formempfindung herangezogen. Die letzte ist z. B. wichtig beim Erfassen von Buchstabenformen beim Lesen; die erste z. B. beim Erkennen von Werkstoffehlern, die durch Helligkeitsabweichung auffallen. Die Geschwindigkeit beider Empfindungen nimmt beträchtlich mit wachsender Leuchtdichte des Arbeitsgutes zu, um schließlich einem Grenzwert nahezu kommen. Wie sehr durch Steigerung der Hellabhebung die Formempfindungsgeschwindigkeit verbessert wird, zeigt Abb. 93. Daher

soll der Lichtrückwurf eines laufenden Bandes immer von dem des Arbeitsgutes abweichen. Durch gute Hellabhebung kann also an Beleuchtungsstärke gespart werden.

3. Gleichmäßigkeitsforderungen. Sind auf der Arbeitsfläche Beleuchtungskontraste durch ungleichmäßige Beleuchtung vorhanden, so wird die Anpaßdauer beim Erkennen von Feinheiten auf dem Arbeitsgut eine Verlangsamung der Arbeit verursachen. Erfahrungsgemäß sind gewisse Anpaßdauern für Arbeitsbeleuchtungen wünschenswert je nach der Art der Arbeit. So wird man für feinste und feine Arbeit solche von 0,2 sec, für halbfine Arbeit 0,5 sec und



Abb. 94 a. Blendende Werkraumbeleuchtung

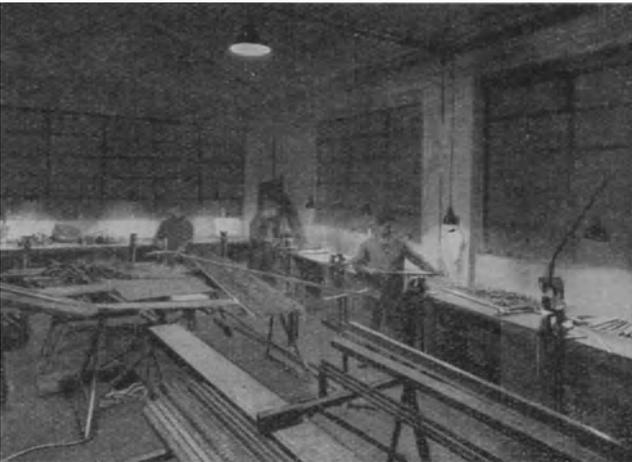


Abb. 94 b. Nichtblendende Werkraumbeleuchtung

für gröbere Arbeiten 1 sec verlangen. Daraus ergeben sich höchstzulässige Ungleichmäßigkeiten innerhalb des Arbeitsbereichs; sie sollen betragen: bei feinsten Arbeit höchstens 5:1 bis 10:1; bei halbfeyner Arbeit 10:1 bis 15:1; bei gröberer Arbeit 15:1 bis 25:1 und bei ganz grober Arbeit 25:1 bis 35:1. Diese Zahlen stellen sicher, daß die zugrunde gelegten Anpaßzeiten nicht überschritten werden (3).

4. Zusatzbeleuchtung und Blendung. Eine Zusatzbeleuchtung schadet dann mehr als sie nützt, wenn sie die Ursache für Blendung ist. Eine nackte Lichtquelle über dem Arbeitsplatz ist dafür das Muster-

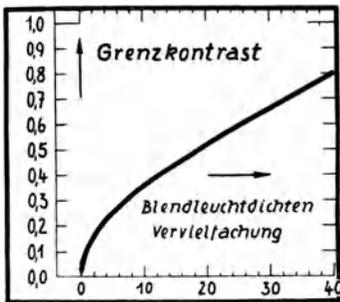


Abb. 95.

beispiel. Verfehlt bleibt aber auch der Tellerschirm, der das Geleucht zwar zur Decke hin abschirmt, aber nicht fürs Auge. Zulässig und einwandfrei ist ausschließlich ein Geleucht, das dem Auge die Lichtquelle selbst völlig verdeckt und das Licht kräftig auf die Arbeitsfläche lenkt; meist also ein Tiefstrahler. Beleuchtungssteigerung durch Einführung von Blendung ist immer eine Verschlechterung.

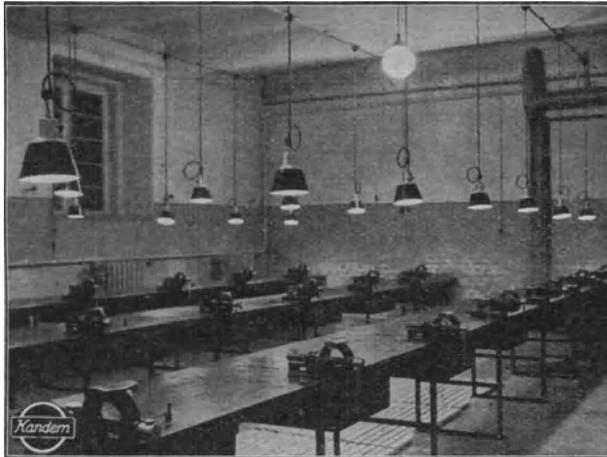


Abb. 96. Vorbildliche Arbeitsplatzbeleuchtung

Abb. 94 a und b zeigen gute und schlechte, nämlich nichtblendende und blendende Beleuchtung bei zusätzlicher und allgemeiner am

gleichen Beispiel. Die Vermeidung von Blendung ist die wichtigste Forderung, der bei Zusatzbeleuchtung genügt werden muß. Alle Prüfung von Arbeitsplatzbeleuchtungen durch Zusatz sollte daher mit derjenigen auf Blendungsfreiheit beginnen.

Abb. 95 zeigt, wie der Grenzkontrast zunimmt, wenn die Blendleuchtdichte größer wird. (Je geringer der Grenzkontrast, um so besser die Beleuchtung.) Da der Grenzkontrast weit weniger stark abnimmt als die Leuchtdichte, die dem Erkennen dienen soll, zunimmt, so würde eine sehr hohe Verstärkung der Beleuchtungsstärke nötig sein, um den Verlust durch Blendung wieder gut zu machen. Licht, das blendet, zerstört also in nicht wieder aufhebbarer Weise die Wirkungen, die es haben soll.

Abb. 96 zeigt eine Lehrwerkstatt mit einwandfreier Arbeitsplatzbeleuchtung. Betreffs empfohlener (1) Leuchtdichten: Aufstellung 16.

5. Arbeitsplatzgeleuchte. Die Beleuchtung einer jeden Arbeitsplatzanlage muß möglichst den Anforderungen entsprechen, die sich aus der Arbeit ergeben. Nirgends sind die Beleuchtungsgegenstände so mannigfaltig, wie bei Arbeitsplätzen. Daher lassen sich hier am wenigsten allgemeingültige Angaben machen.

Man unterscheidet Geleuchte für übliche und für besondere Anlagen; die letzten sind bestimmten Zwecken angepaßt; die ersten eignen sich bei den am meisten auftretenden Arbeitsarten.

Die üblichen Arbeitsplatzgeleuchte sind Tiefstrahler oder Breittiefstrahler. Die Rückstrahlerflächen sind meist Emailleflächen, aber auch Glassilberspiegel mit Oberflächenwellung zur Zerstörung von Spiegelbildern. Emaille rückwerfer werden gewählt, wenn es auf besonders gute Gleichmäßigkeit ankommt, Glassilberspiegel, wenn die Beleuchtungsstärken besonders hoch sein sollen.

Das Hauptmerkmal von Arbeitsplatzgeleuchten der üblichen Art ist ihre Verstellbarkeit und Beweglichkeit. Zwar steht bei zahlreichen Arbeitsvorgängen das Arbeitsgut still; dann kann auf Beweglichkeit unter Umständen verzichtet werden. In den meisten Arbeitsvorgängen ist das Arbeitsgut aber Lageveränderungen unterworfen, denen die Beleuchtung folgen muß. Manche Arbeit macht es nötig, daß bisweilen die Beleuchtungsstärke auf einen engeren Bereich zusammengefaßt und erhöht wird, was durch Geleuchtsenkung möglich ist. Dabei wirkt sich das Grundgesetz der Beleuchtung aus, daß (Abb. 1) die Beleuchtungsstärke sich wie das Quadrat des Abstandes ändert (4).

Die Kennzeichen zweckmäßiger Arbeitsplatzgeleuchte sind daher:

1. Verstellbarkeit des Geleuchtes über der Arbeitsfläche.
2. Drehbarkeit der Geleuchtachse, um dem Lichteinfall verschiedene Richtungen geben zu können.

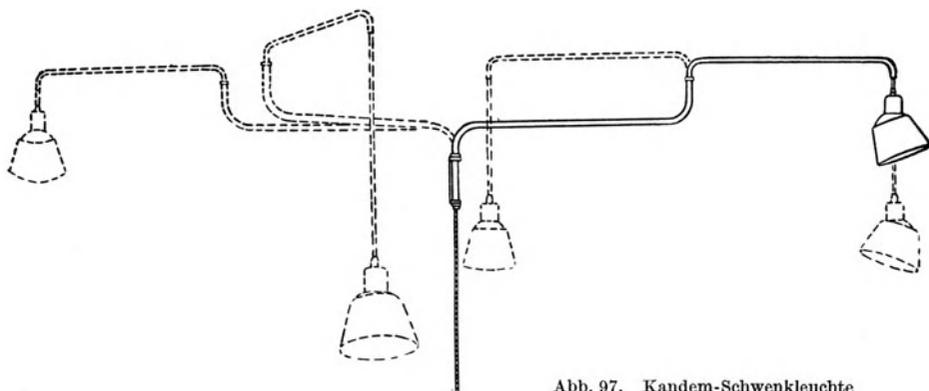


Abb. 97. Kaudem-Schwenkleuchte

3. Schwenkbarkeit des Gelechts um seine Befestigungsachse an einem Schwenkarm ausreichender Länge, um verschiedene Teile einer größeren Arbeitsfläche nacheinander gut beleuchten zu können.
4. Streckbarkeit des Gelechtschwenkarms, um den Halbmesser des Schwenkkreises verändern zu können.
5. Beste mechanische Ausführung der beweglichen Teile, besonders der Gelenke, um eine dauerhafte und leichte Beweglichkeit zu gewährleisten.

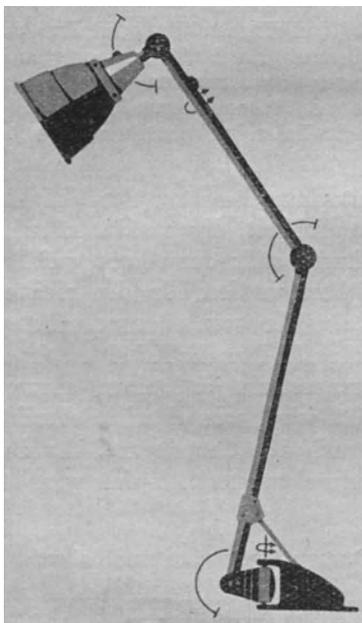


Abb. 98. Migard-Lenkleuchte

Nicht alle Arbeitsarten machen alle diese Veränderungsarten erforderlich. Von einem vielseitig einsetzbaren Geleucht sind sie aber zu verlangen. Abb. 97 und 98 zeigen Ausführungsarten, die das Verlangte auf grundsätzlich verschiedene Weise vorbildlich erreichen. Als „Lenklampen“ bezeichnet man die Gelenklampen, die mit einer Hand verstellbar werden können (20).

Bei Anbringung der Geleuchte ist zu beachten, daß das Geleucht den Arbeitenden nicht bei der Ausführung der Arbeit behindert; daß nicht Kopf, Hände oder andere Körperteile eine Beschattung des Arbeitsgutes bewirken; daß nicht Spiegelung am Arbeitsgut entsteht; daß hinreichende Gleichmäßigkeit durch richtige Lichtpunkthöhe erreicht wird.

6. Erforderliche Lampenleistung. Bei Beleuchtung eines Einzelarbeitsplatzes ist die Ar-

beitsfläche F gegeben und die Beleuchtungsstärke E_m verlangt. Man wählt dann ein für einen Arbeitsplatz geeignetes Geleucht, meist einen Tiefstrahler. Die Bestimmung der Lampenleistung kann dann auf drei verschiedenen Wegen geschehen.

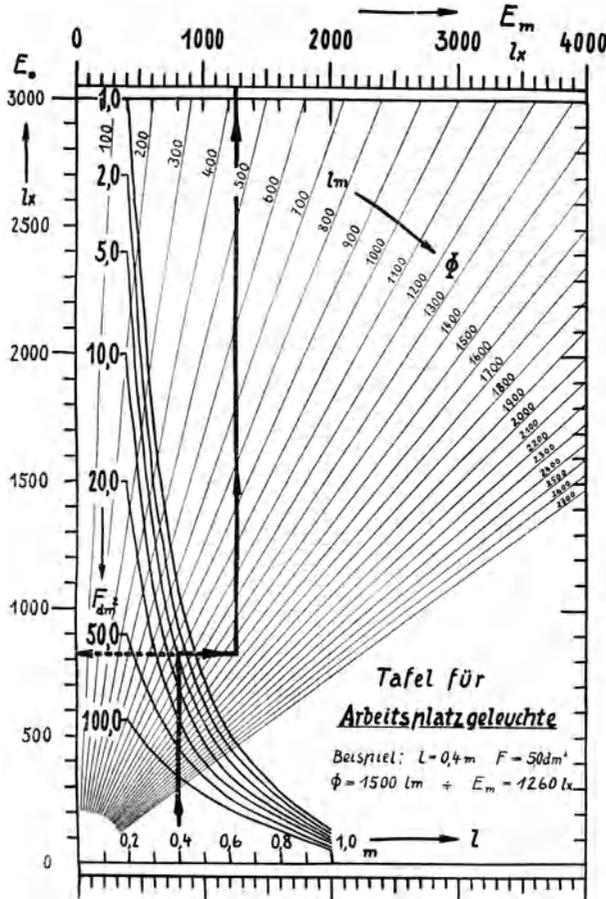


Abb. 99. Beleuchtungstafel für Arbeitsplatzgeleucht

1. *Durch Erproben.* Während im allgemeinen der Beleuchtungsentwurf das Ziel hat, das Erproben bei Beleuchtungserstellung zu ersparen, wird bei Arbeitsbeleuchtung ein solches immer unentbehrlich bleiben. Denn die Bedingungen von Arbeitsanlagen sind weniger gleichartig als die sonstigen. Das Erproben erfolgt unter Zuhilfenahme eines Beleuchtungsmessers. Der Beleuchtungsmesser ist daher für Arbeitsplatzbeleuchtung besonders unentbehrlich. Die erprobende Messung ist aber auch deshalb angemessen, weil ein Auswechseln oder Verändern des Geleuchts oder die Anbringung eines

Arbeitsplatzgeleuchts unvergleichlich weniger mühsam, zeitraubend und kostspielig ist, als z. B. bei Raumbelichtungen. Sie ist aber häufig sogar unumgänglich, wenn die Beleuchtung nicht nur eine Fläche, sondern ein Raumgebiet um den Arbeitsgegenstand erfassen soll, so daß die üblichen Flächenberechnungen versagen. — Soweit im wesentlichen Flächenbeleuchtungen vorliegen, sind die nächsten Verfahren anwendbar.

2. *Mit Hilfe von Geleuchttafeln.* Dazu müssen für das Geleucht Tafeln vorliegen, die die Zusammenhänge angeben für die mittlere Beleuchtungsstärke E_m , die das Geleucht auf der Arbeitsfläche F hervorruft, wenn es die Lichtpunkthöhe l hat, und mit einer Lampe vom Lichtstrom Φ besteckt ist. Tafeln dieser Art sollten firmenseitig allen hochwertigen Arbeitsplatzgeleuchten beigegeben sein. Eine mögliche Ausführungsart zeigt Abb. 99. Sie wird aus dem Zonenlichtstromschaubild gewonnen.

Anwendung. Auf der unteren waagerechten Achse wählt man die Lichtpunkthöhe l , die man für geeignet hält ($l = 0,4$ m). Man geht lotrecht aufwärts bis zu der Kurve, die zu der Größe der Arbeitsfläche gehört ($F = 5,0$ dm²). Waagerechter Übergang zur E_0 -Leiter gibt die Beleuchtungsstärke, die sich bei einer Lampe von 1000 lm ergäbe ($E_0 = 820$ lx). Waagerechter Übergang bis zum Lichtstrom der geplanten Lampe ($\Phi = 1500$ lm) und von dort lotrechter Übergang zur oberen waagerechten Achse liefert die eintretende Beleuchtungsstärke ($E_m = 1260$ lx). Diese Bestimmungstafel gehört zu dem Zonenlichtstrombild „tiefbreitleuchtend“ von Abb. 47. Selbstverständlich kann man auch von l , E_m und F ausgehend den Lichtstrom Φ gewinnen.

Vielfach — bei geringeren Ansprüchen — reichen auch Zahltafeln wie die der Aufstellung 31 zu der Bestimmung aus.

Aufstellung 31

Beleuchtungsstärke in lx bei Höhe der Lampen über dem Arbeitsplatz					
Watt	80 cm	60 cm	50 cm	40 cm	30 cm
40	140	280	400	650	1080
60	270	500	700	1000	1700
75	330	600	850	1250	2200
100	450	870	1220	1700	3000

3. *Durch Berechnung.* Hierzu muß das Zonenlichtstromschaubild des Geleuchts bekannt sein. Der Rechnungsvorgang wird meist in der Weise durchzuführen sein, die in Aufstellung 32 festgelegt ist (dazu Abb. 100): 1. Der Halbmesser der Arbeitsfläche liefert ihre Fläche; 2. das Zonenlichtstromschaubild liefert durch die Stelle des schärfsten Knicks den Grenzwinkel α ; 3. Halbmesser und Winkel geben die Lichtpunkthöhe, die einzuhalten ist, damit der Hauptlichtkegel die Arbeitsfläche trifft; 4. Winkel α und Zonenlichtstromschaubild ergeben den Lichtstrom Φ_α im Winkelbereich; 5. dieser Lichtstrom und die Fläche bestimmen die auf 1000 lm entstehende Beleuchtungsstärke $E_{m, \alpha, 0}$; 6. diese und die verlangte Beleuchtungsstärke $E_{m, \alpha}$ ergeben den Lichtstrom, den das Geleucht im Winkelbereich α aussenden

Aufstellung 32

Gegeben: Beleuchtungsstärke, Geleucht, Spannung,
Arbeitsplatzhalbmesser

	Man erhält aus	mit Hilfe von	die Größe
1	r	$r^2 \cdot \pi$	F_α
2	Geleucht	Zonenlichtstromschaubild	α
3	α, r	$r : \operatorname{tg} \alpha$	l
4	Geleucht, α	Zonenlichtstromschaubild	$\Phi_{\alpha, 0}$ und ψ_α
5	$\Phi_{\alpha, 0}, F_\alpha$	$\Phi_{\alpha, 0} : F_\alpha$	$E_{m, \alpha, 0}$
6	$E_{m, \alpha}, E_{m, \alpha, 0}$	$E_{m, \alpha} : E_{m, \alpha, 0}$	Φ_α
7	Φ_α, ψ_α	$\Phi_\alpha : \psi_\alpha$	Φ
8	U, Φ	Lichtstrom-Leistungstafel	N

muß; 7. dieser Zonenlichtstrom und der Zonenwirkungsgrad ψ_α liefern den Lichtstrom, den die Lampe haben muß, mit dem das Geleucht besteckt sein muß; 8. aus Spannung und Lichtstrom folgt die aufzuwendende Leistung.

Führt ein Geleucht nicht zu einer befriedigenden Lösung, trotz verschiedener Wahl der Lichtpunkthöhe, so muß ein anderes herangezogen werden, das weiteren oder engeren Leuchtkegel hat.

Soll eine größere Arbeitsfläche mit mehreren Geleuchten beleuchtet werden, so hat man entweder nach dem Verfahren der „Platzbeleuchtung“ vorzugehen; oder man ordnet, wenn es sich um eine einzige Reihe von Geleuchten handelt, etwa über einer Werkbank, einem Geleucht eine Teilfläche zu und bestimmt die Geleuchtabstände aus der gewählten Lichtpunkthöhe gemäß $d = 1,5 l$ (Abb. 88).

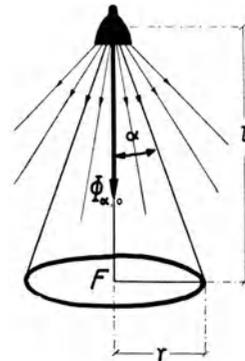


Abb. 100.
Zur Beleuchtungsberechnung

7. Arbeitsplatzgebundene Allgemeinbeleuchtung. In vielen Fällen wird weder nur reine Allgemeinbeleuchtung, noch diese mit Zusatzbeleuchtung gewählt, sondern eine Zwischenform: nämlich eine Art Allgemeinbeleuchtung, bei der die Lichtpunktverteilung aber nicht nach den räumlichen Maßen, sondern mit Rücksicht auf die Arbeitsflächen vorgenommen ist. Man verzichtet bei dieser

„Arbeitsplatzgebundenen Beleuchtung“ auf beste räumliche Beleuchtungswirkung zugunsten besserer Beleuchtung auf den Arbeitsflächen.

Diese Beleuchtungsart ist am ratsamsten für vorwiegend unmittelbare Beleuchtung. Sie kommt mit Recht viel zur Anwendung in Büros, Verkaufsräumen, Zeichensälen, Lebensmittelverarbeitungsräumen, Handwerksstätten. So erhalten Schreib- und Zeichenflächen, Verkaufsflächen, Verarbeitungsflächen bessere Beleuchtungen. Diese Beleuchtungsart ist besonders unentbehrlich in kleineren Arbeitsbetrieben, wie sie Handwerk und Gewerbe und Haushalt in unerschöpflicher Vielartigkeit liefern. Wenn richtig angelegt, verhindert sie besonders leicht die Beschattung der Arbeitsfläche durch den Arbeitenden selber. In größeren Betrieben wird im allgemeinen die Aufteilung in Arbeitsplatz- und Allgemeinbeleuchtung zu bevorzugen sein (5).

Die erforderliche Lampenleistung wird am besten durch Erproben und Vermessen mit Beleuchtungsmessern bestimmt. Mit gutem Erfolg kann man aber auch eine rechnerische Planung durchführen, falls die Räume nicht zu groß im Vergleich zu den Arbeitsflächen und falls die letzteren nicht zu sehr



Abb. 101. Arbeitsplatzgebundene Allgemeinbeleuchtung

abseits liegen. Man geht vor wie bei Allgemeinbeleuchtung. Die Lichtpunkthöhe wählt man frei. Soll auf der Arbeitsfläche E_m herrschen, so legt man der Rechnung den Wert $E_m/2$ zugrunde. Man bringt dann die eigentlich für gleichmäßige Verteilung berechneten Geleuchte über den Arbeitsflächen an. Die so entstehende größere Ungleichmäßigkeit im ganzen Raum nimmt man in Kauf; sie pflegt bei Allseitsbeleuchtung und hellen Wänden gar nicht beträchtlich zu werden.

Abb. 101 zeigt arbeitsplatzgebundene Allgemeinbeleuchtung.

8. Besondere Fälle. Für besondere Beleuchtungsfälle gibt es entweder Sondergeleuchte oder geeignete Anordnungsarten.

So gibt es für Fahrkartenschalter Langfeldleuchten, die blendungsfrei ein schmales langes Feld ausleuchten. Für Betriebe, in denen alle Gegenstände mechanischen oder chemischen Beanspruchungen ausgesetzt sind, gibt es Sondergeleuchte, die z. B. stoß-, explosions- oder feuchtigkeitssicher sind.

Bei der Beleuchtung von Seidenwebstühlen kommt man zu guten Sichtverhältnissen, wenn die Spiegelung des Beleuchtungslichts an der Seide ausgenutzt wird. So erhält in Abb. 102 Auge links und Auge in der Mitte vorteilhaft gespiegeltes Licht von den Lichtquellen *A* und *B*, während Auge rechts die Beleuchtung ohne Spiegelung wahrnimmt (6).

Immer gilt es, daß der Beleuchtungstechniker die Besonderheit der jeweiligen Arbeit erkennt und die Anlage entsprechend erstellt. Gute Arbeitsplatzbeleuchtung wird daher meist nur aus verständnisvoller Zusammenarbeit von Betriebsingenieur und Beleuchtungstechniker erwachsen.

Immer muß auf bewegte Teile von Maschinen Rücksicht genommen werden, so daß sie, soweit sie Gefahrenquellen darstellen, gut erkennbar sind, aber auch nicht im Strahlengang der Lichtquellen liegen, wodurch bewegliche Schatten, also Sichtverschlechterung, eintritt.

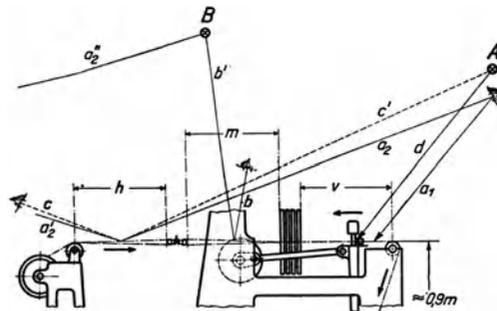


Abb. 102. Richtige Webstuhlbeleuchtung

9. Schattigkeit. Arbeitsplätze bedürfen besonderer Beachtung in Hinsicht auf Schattigkeit. Sowohl bisweilen Maschinenteile, wie fast allemal Kopf und Hand des Arbeitenden wirken als Schattenwerfer. Es wird hier daher sehr darauf geachtet werden müssen, daß die Grenzwerte der Schattigkeit nicht über- oder unterschritten werden; d. h. daß die Abstände der Lichtquellen richtige Werte haben.

Zunächst ist festzustellen, daß gerade völlig schattenloses Licht nur ausnahmsweise zu Arbeiten geeignet ist. Damit kommt vollmittelbare Beleuchtung für Arbeitsplätze kaum in Betracht. Häufig

schaffen beträchtliche Schattentiefen erst die notwendige Erkennbarkeit. So beim Ordnen von Schraubenmuttern (Abb. 103). Aus gleichem Grunde müssen Setzpulte möglichst unmittelbar beleuchtet sein: Die Lettern bekommen so bessere Plastik. Webfehler in Geweben lassen sich ebenfalls am besten bei schräg einfallendem, schattenreichem Licht feststellen (7).

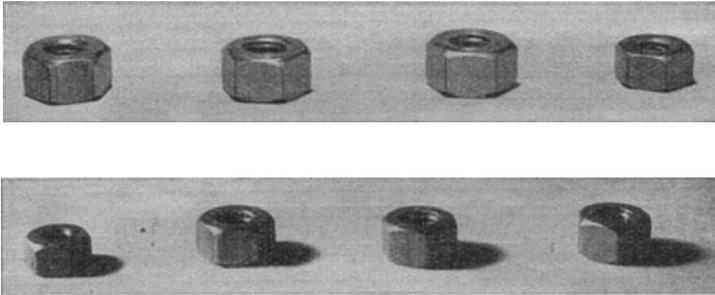


Abb. 103. Verbesserung der Erkennbarkeit am laufenden Band durch Schatten

Es könnte angenommen werden, daß die Allgemeinbeleuchtung, die zu einer Sonderbeleuchtung vorhanden sein soll, die richtige Schattigkeit sicherstellt. Dies ist keineswegs der Fall. Denn das abgeblendete E ist E_{zus} , das gesamte $E_{\text{zus}} + E_{\text{allg}}$. Also die mittlere Schattigkeit

$$S_m = \frac{E_{\text{zus}}}{E_{\text{zus}} + E_{\text{allg}}} = \frac{1}{1 + 13 \cdot \frac{\log E_z}{E_z}}$$

Dieser Ausdruck ist nur bei Beleuchtungsstärken E_z kleiner als 100 lx unter 80 v. H. Bei $E_z = 10$ lx erreicht er sogar 44 v. H. Bei 1000 und 10000 lx ist S aber 96 bzw. 99 v. H. D. h. gerade bei den verlangten E_z -Werten reicht die Schattigkeit durch die Allgemeinbeleuchtung nicht aus. Daraus folgt, daß die Allgemeinbeleuchtung nicht zur Behebung zu großer Schattigkeit da ist, sondern nur dazu, dem Raum und dem Arbeitsumfeld eine Helligkeit zu geben, die dem Auge nicht zu viel in Helligkeitsanpassung zumutet.

Also muß die Sonderbeleuchtungsanlage für sich allein ausreichende Schattigkeit sicherstellen. Hier sind zwei Maßnahmen zu unterscheiden. Erstens muß, wenn es sich um eine Geleuchtreihe handelt (Abb. 88), der Abstand nach der Regel Abschnitt III, 6 Fall 3, gewählt sein. Das heißt z. B.: Soll einmal $S = 0,5$ sein, so muß gelten $D/l = 0,8$! Deshalb muß eine Reihe von Arbeitsplatzgeleuchten eng angeordnet sein. Zweitens müssen die Leuchtflächen der Geleuchte in bestimmtem Verhältnis zu den Schattergrößen,

Schatterhöhe und Lichtpunkthöhe stehen gemäß $L : S = l : h$, falls Kernschatten vermieden werden sollen (Absch. III, 2). So müßte sein bei $S = 20$ cm (Kopf) mit $h = 50$ cm und $l = 100$ cm : $L = 40$ cm oder bei $S = 15$ cm (Handmittel) $h = 20$ cm und $l = 100$ cm : $L = 75$ cm. In diesem letzten Falle müßte also die Geleucht- ausdehnung gleich dem Geleucht- abstand sein; also wird man ein leuchtendes Band als Geleucht verwenden.

Während im obigen Ausdruck für die mittlere Schattigkeit angenommen wird, daß die Beleuchtungsstärken gerade so sind, wie sie den Empfehlungen entsprechen und daß die betreffs Schattigkeit günstigsten Verhältnisse herrschen, nämlich vollmittelbare Beleuchtung, läßt sich nach Ondracek die bei beliebiger Arbeitsplatzbeleuchtung wirklich herrschende mittlere Schattigkeit $S_{m,z}$ berechnen (8).

Für $S_{m,z}$ gilt offenbar

$$S_{m,z} = (\Phi_g + \Phi_z) : (\Phi_F + \Phi_z),$$

wenn Φ_z , Φ_g und Φ_F der Reihe nach die Lichtströme der Zusatzbeleuchtung, des gerichteten und des gesamten Teils der Allgemeinbeleuchtung sind, die zur Beleuchtungsfläche gelangen. Beachtet man, daß (III, 7) $\Phi_g = S''_m \cdot \Phi_F$ und (XII, 18) $\Phi_F = \eta \cdot \Phi_0$ ist, so entsteht

$$S_{m,z} = \frac{\eta \cdot S''_m + V}{\eta + V} \text{ mit } V = \Phi_z : \Phi_0, \quad [31]$$

worin S''_m die mittlere Schattigkeit der Allgemeinbeleuchtung ist. Der Ausdruck besagt, daß die mittlere Schattigkeit der Arbeitsfläche bei vollunmittelbarer Allgemeinbeleuchtung, für die $S''_m = 1$ ist, auch den Wert 1 annimmt; daß $S_{m,z}$ dem Werte S''_m um so mehr zustrebt, je kleiner V , also je geringer der Zusatzlichtstrom; daß $S_{m,z}$ dem Wert 1 zustrebt, je größer V ist, also je größer der Zusatzlichtstrom ist; daß $S_{m,z}$ um so mehr dem Wert 1 zustrebt, je geringer der Wirkungsgrad η für die Allgemeinbeleuchtung ist. Immer aber bleibt $S_{m,z}$ kleiner oder gleich S''_m .

Wichtig ist nun, daß, wenn man mittlere Verhältnisse mit $S''_m = 0,5$ und $\eta = 0,4$ voraussetzt, V nicht größer als 0,6 sein darf, wenn $S_{m,z}$ kleiner als 0,8 bleiben soll. Das heißt: eine Arbeitsplatzbeleuchtung, deren Zusatzbeleuchtung selbst die Schattigkeit 1 besitzt, bleibt durchschnittlich nur so lange unter dem gesetzten Höchstwert 0,8, wie die Beleuchtungsstärke der Allgemeinbeleuchtung das 1,6fache derjenigen der Zusatzbeleuchtung beträgt. Soll aber die Zusatzbeleuchtung nur ein Bruchteil der Allgemeinbeleuchtung sein, so kann sie besser unterbleiben. Also wird schwerlich bei sinnvollem Verhältnis der Zusatz- und Allgemeinbeleuchtung die Schattigkeit durch Allgemeinbeleuchtung brauchbare Werte annehmen; also muß tunlichst die richtige Schattigkeit stets durch die Zusatzbeleuchtung selbst gewährleistet sein.

10. Das Lesen (9)

Das Lesen stellt eine Tätigkeit des Auges dar, bei der die Formempfindung als Erkennen der Buchstaben und auch die Formempfindungsgeschwindigkeit als Lesegeschwindigkeit eine große Rolle spielen. Die Lesetätigkeit stellt eine der verbreitetsten hochwertigen Leistungen des Auges dar. Nicht zuletzt dürften gerade durch das Lesen bei unzureichender Beleuchtung viele Augenschädigungen hervorgerufen werden. Daher sind für das Lesen, soweit es ohne Schädigung erfolgen soll, die geschilderten Einflüsse zu beachten. In der Hauptsache sind Beleuchtungsstärke, Buchstabengröße und Buchstabenkontrast zu beachten. Durch höhere Beleuchtungsstärke wird die Lesegeschwindigkeit beträchtlich gefördert; das Lesen dann stellt keine besondere Anstrengung mehr dar. Die Hellabhebung kann bei Lesestücken sehr verschieden sein. Die Schwärze der Buchstaben ist bei üblichem Druck sowie bei Beschriftung mit Ausziehtusche wohl am tiefsten; Schreibmaschinenschrift ist schon kontrastschwächer, ebenso Tintenschrift; Schreibmaschinendurchschläge zeigen noch geringere Kontraste, Bleistiftschrift kann in dieser Hinsicht darüber und darunter liegen. Das Papier kann aber auch weißer, gelblich oder grauer sein. Je danach stellt sich anderer Kontrast ein. Dunkle Papelerunterlage bei dünnem Papier verringert die Kontraste. Der Einfluß der Buchstabengröße ist bei längerer Lesedauer auch schon innerhalb garnicht auffallender Größen merklich. Er wird aber sehr deutlich, wenn die Buchstaben ungewöhnlich klein werden. Hier treten Sehleistungen auf, wie sie sonst nur noch bei den schwierigsten Sehauflagen vorkommen, wie bei feinmechanischen Arbeiten, beim Gravieren, beim Zusammenbau von Meßinstrumenten oder von Uhrwerken, bei technischen Zeichnungen usw. Die geringe Größe kann nun durch recht hohe Beleuchtungsstärken z. T. wieder unwirksam gemacht werden. So kann man an einem Lesestück die Notwendigkeit der außerordentlich hohen Arbeitsplatzbeleuchtung für feinste Arbeit leicht erproben. Die kaum noch lesbaren Zeilen werden dann wieder gut lesbar. Die Lesetätigkeit hat aber auch bei Größen, die noch über der der Sehschärfe liegen, ihre natürliche nicht unterschreitbare Grenze. Neben den genannten Einflüssen wirken sich beim Lesen häufig noch Schatten und noch mehr Spiegelungen nachteilig aus. Viele Papiere haben Glanz; manchmal spiegelt auch die Schrift, wie bei Kopierstiftschrift. Dann muß durch richtige Wahl des Lichteinfalls, der nicht von vorne sein darf, verhindert werden, daß gespiegeltes Licht ins Auge gelangt.

11. Lese- und Schreibbeleuchtung. Eine gute Lese- oder Schreibbeleuchtung ist nicht leicht zu erstellen. Da Papier immer einen gewissen Glanz besitzt, also eine Spiegelfähigkeit, und die Schrift mit Blei- und Tinten-

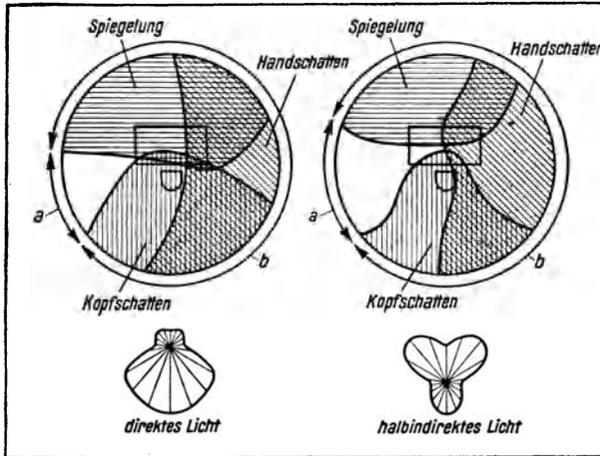


Abb. 104. Lage der nichtschattengebenden Lichtquelle zum Arbeitsplatz

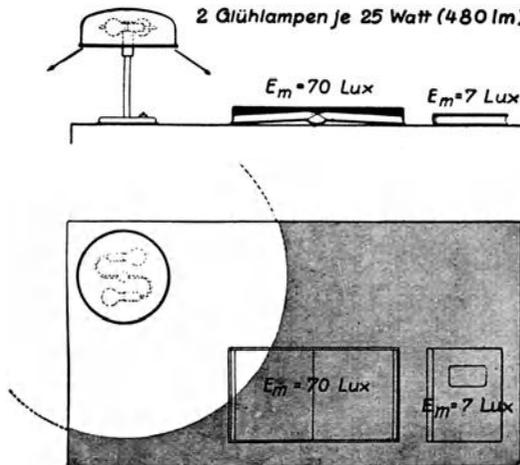


Abb. 105. Schlechte Schreibtischbeleuchtung

stift stark spiegelt, soll die Lichtquelle nie so liegen, daß Auge—Lichtquelle—Lese- bzw. Schreibfläche auf einer Richtung liegen; denn sonst tritt Spiegelblendung ein, die beim Lesen und Schreiben auf die Dauer ermüdend wirkt. Die Lichtquelle soll immer links von der Verbindenden Auge—Schfläche sein.

Daß nur ganz gewisse Stellen des Lichtpunktes für eine ganz und gar fehlerlose Schreibtischbeleuchtung in Frage kommen, zeigen die Darstellungen Abb. 104. Nur in Punkten über dem weißen Felde ist die Lichtquelle bestimmt nicht blendend und verursacht nicht Kopf- oder Handschatten. Je nach der Beleuchtungsart sind die zulässigen Felder noch verschieden; der erste Kreis gehört zu vorwiegend unmittelbarer, der zweite zu halbmittelbarer Beleuchtung. Mit letzter Beleuchtungsart ist offenbar leichter fehlerfrei zu beleuchten.

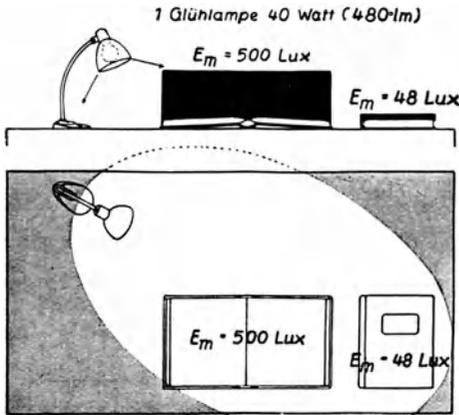


Abb. 106. Gute Schreibtischbeleuchtung

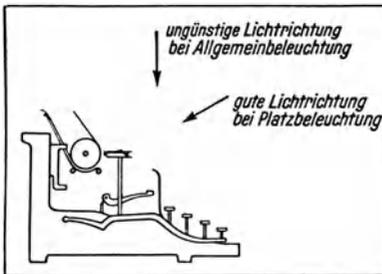


Abb. 107. Lichteinfall bei Schreibmaschinen

wegen der größeren Kopffentfernung weniger bedeutsam, um so mehr aber die Spiegelung auf den Tasten. Das fehlerfreie Feld liegt hier betont rückwärts-links, wie aus Abb. 107 zu entnehmen (11).

In Vortragsräumen und Klassen darf auf der Wandtafel weder eine Spiegelung für Tageslicht noch für künstliches vorliegen. Die Anleuchtung der Tafel muß so erfolgen, daß das Licht derart steil einfällt, daß gespiegeltes Licht zu keinem Hörerplatz gelangen kann (12).

12. Wirtschaftlichkeit von Arbeitsplatzbeleuchtung. Jede Arbeit hat einen wirtschaftlichen Hintergrund. Daher ist die Wirtschaftlich-

Diese Kurven gelten für arbeitsplatzgebundene Allgemeinbeleuchtung. Doch läßt sich daraus mit Sicherheit schließen, daß auch eine Schreibtischleuchte so weit links-rückwärts stehen muß wie möglich (10).

Daß eine Schreibtischleuchte, deren Fuß in der Mitte des von ihr erzeugten Beleuchtungsfeldes liegt (Abb. 105), für derartige Beleuchtung von der Seite her nie ausreichen kann, ist klar. Sie wird die Gebiete, auf die es ankommt, meist nicht mehr erfassen. Man wird also für eine gute Schreibtischleuchte immer die Form (Abb. 106) verlangen, bei der der Leuchtenfuß am Rande des Lichtkreises steht. Gelenkigkeit an Fuß und Schirm sind notwendig. Die Höhe des Schreibtischleuchtenlichtpunktes muß bei der letzten Aufstellungsart mindestens die Hälfte betragen vom Durchmesser der Fläche, die sie beleuchten soll. Schreibtischleuchten werden daher fast durchweg zu niedrigentworfen. Für Schreibmaschinenbeleuchtung ist der Kopfschatten

keit einer Arbeitsbeleuchtung eine unmittelbare Angelegenheit der Beleuchtung. Es sind zur Beurteilung die folgenden Gesichtspunkte heranzuziehen.

1. Zusatzbeleuchtung ist wirtschaftlicher als Allgemeinbeleuchtung. Denn sie gestattet, die hohen Beleuchtungsstärken nur auf beschränkte Bereiche zu erstrecken und damit für die weniger wichtigen Stellen am Licht zu sparen. Dadurch wird aber auch erst ermöglicht, einem anspruchsvollen Arbeitsfeld die hohen Beleuchtungsstärken zuzuführen, die es benötigt, sonst nie erhalten könnte und die erst die volle Steigerung der Arbeitsleistung ergeben.

2. Zusatzbeleuchtung ist für viele Arbeitszwecke wirtschaftlicher, weil sie unter Umständen teilweise ausgeschaltet werden kann, während die Allgemeinbeleuchtung nicht bei einem Arbeitsgangausfall mit Rücksicht auf die anderen Arbeitsplätze ausgeschaltet werden darf.

3. Gute Arbeitsplatzbeleuchtung ist aber deshalb wirtschaftlicher als schlechte, weil bei gleicher Anstrengung des Arbeitenden die Arbeitsleistung wächst. Die Steigerung der Leistung äußert sich in Zunahme der Arbeitsgeschwindigkeit sowie in Abnahme der Arbeitsfehler, wie sie in der Abb. 108 für Setzer angegeben sind. Bei wachsender Beleuchtungsstärke nimmt die Setzleistung zu, nehmen die Lohn- und Beleuchtungskosten ab, und zwar um so mehr, je geringer der Preis der kWh ist. Da die Arbeitszeit und der Ausfall von Fehlern in die Lohnkosten eingehen, so liegt in einer Zeitverkürzung ein wirtschaftlicher Gewinn. Diesem steht der wirtschaftliche Verlust durch die Erhöhung der Kosten der Beleuchtungsenergie gegenüber. Die wesentliche Erfahrungstatsache ist nun, daß bei Steigerung der Beleuchtungsstärke von geringen Werten aus zunächst die Abnahme der Lohnkosten größer ist als die Zunahme der Energiekosten. Innerhalb dieses Bereichs liegt Abb. 108. Erst bei erheblicher Überschreitung der für die Arbeit geforderten Beleuchtungsstärke be-

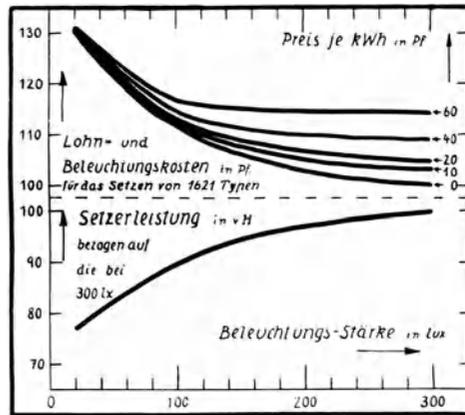


Abb. 108. Beleuchtungskosten und Beleuchtungsstärken

Zeitverkürzung ein wirtschaftlicher Gewinn. Diesem steht der wirtschaftliche Verlust durch die Erhöhung der Kosten der Beleuchtungsenergie gegenüber. Die wesentliche Erfahrungstatsache ist nun, daß bei Steigerung der Beleuchtungsstärke von geringen Werten aus zunächst die Abnahme der Lohnkosten größer ist als die Zunahme der Energiekosten. Innerhalb dieses Bereichs liegt Abb. 108. Erst bei erheblicher Überschreitung der für die Arbeit geforderten Beleuchtungsstärke be-

ginnt die Zunahme der Energiekosten die Abnahme der Lohnkosten zu übertreffen. Von da ab wird die Verbesserung der Beleuchtungsstärke sich rein wirtschaftlich nicht mehr nutzbringend auswirken. Hier erkennt man den Einfluß der Tatsache, daß gleichen Beleuchtungsstärkezunahmen nicht gleiche Leistungszunahmen entsprechen; das Zustreben der Leistung zu einem Grenzwert trotz weiterer Steigerung der Beleuchtungsstärke ist der Grund für das Vorhandensein eines Höchstwertes der Wirtschaftlichkeit. Vom reinen Wirtschaftlichkeitsstandpunkt aus sollte also das Anstreben der verlangten Beleuchtungsstärken von Arbeitsplätzen unterstützt

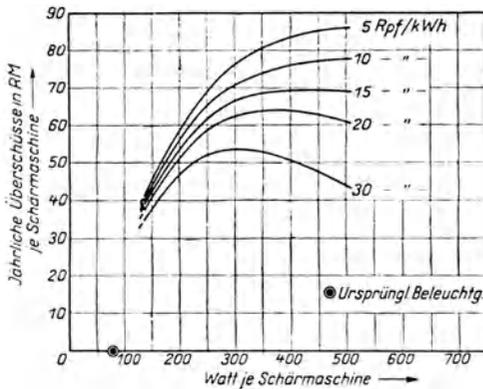


Abb. 109. Höchstwertkurven der Wirtschaftlichkeit von Beleuchtungen im engeren Sinne

werden; erreicht sind sie nämlich zur Zeit nur in einem allzu geringen Teil der vorhandenen Arbeitsbeleuchtungsanlagen (13).

Durch Senkung der Energiepreise — eine Gelegenheit der Elektrizitätswerke — verschiebt sich der Bestwert der Wirtschaftlichkeit zu immer höheren Beleuchtungsstärken. Abb. 109 zeigt dieses für die jährlichen Überschüsse je

Schärmaschine bei Steigerung der elektrischen Leistung zu Zwecken der Beleuchtung für verschiedene Preise der kWh. Je teurer die kWh, um so eher wird der wirtschaftlich günstigste Beleuchtungswert erreicht (14).

Selbst unter Berücksichtigung der Amortisationskosten einer Beleuchtungsanlage ergibt sich zunächst immer eine Ertragssteigerung. Nur bei hohen Arbeitsbeleuchtungsstärken holen die Mehrausgaben die Mehreinnahmen wieder ein. Es gibt also immer eine hohe und eine niedere Beleuchtungsstärke, die hinsichtlich der Gesamtwirtschaftlichkeit gleichwertig sind. Sie schließen den Bestwert, der immer erstrebt werden sollte, ein.

Daß ein Betrieb zwar an sich oft hohe Beträge für Beleuchtung aufwenden muß, daß diese aber im Vergleich zu den Lohnkosten gering sind, zeigt eine Aufstellung, die für kleine, mittlere und große Betriebe ergeben hat, daß die Beleuchtungskosten 0,35 v. H. der Lohnkosten betragen; im Kohlenbergbau 2,5 v. H.; im Mittel also 1 v. H. (15).

Die Vermehrung des Arbeitsertrages durch Steigerung der Beleuchtung erweist sich aber auch als abhängig von der Art des Betriebes. So ergab eine Steigerung der Beleuchtung auf das Doppelte, im Steinkohlenbergbau eine Steigerung der Förderung um 25 v. H.; also einen weit größeren Wertgewinn als Wertaufwand (16).

4. Selbst wenn die Steigerung der Beleuchtungsstärke keinen Anstieg der nutzbringenden Leistung der Arbeitenden hervorbrächte, so wäre sie doch unerlässlich, solange durch sie eine Zunahme der Arbeitsfreudigkeit und der Gesundheit sowie eine Abnahme der Gefährdung durch unmittelbare und mittelbare Schädigung im Arbeitsbetrieb erwirkt würde. Wo aber durch Steigerung der Beleuchtungsstärke infolge der Eigenart der Arbeit eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit nicht eintritt, sollten Erwägungen, die das Ergehen des Arbeitenden selbst betreffen, allein schon ausreichen, um eine Vermehrung der Beleuchtungsstärke im Sinne einer Verbesserung von Arbeitsbedingungen anzustreben. Denn ebenso sehr, wie ein Betrieb der Verbesserung seiner Maschinen Werte zukommen läßt, sollte er der Schonung und Leistungssteigerung der Arbeitenden entsprechende Mittel zuwenden. Daher gebührt immer der hohen Beleuchtungsstärke vor der niederen mit gleicher Wirtschaftlichkeit der Vorrang.

Abschließend kann gesagt werden, „daß schlechte Beleuchtung, gemessen am Arbeitsertrag, teurer ist als gute“ (17).

13. Farbiges Arbeitslicht. Da fast jede Arbeitsleistung durch Steigerung der Beleuchtungsstärke erhöht werden kann, so wird die größere Lichtausbeute der Hochleistungsdampflampen in der Lage sein, ohne Kostenvermehrung die Arbeitsleistung zu steigern. Die auf gleiche Beleuchtungsstärke bezogene Leistungsverbesserung wird aber noch dadurch erhöht, daß die Sehschärfe bei Sehen mit einfarbigem Licht größer ist als mit weißem. Den Höchstwert erreicht die Sehschärfe bei einfarbig gelbem Licht (Abb. 110). Beides ist der Grund dafür, warum seit Einsatz der Dampflampen diese in be-

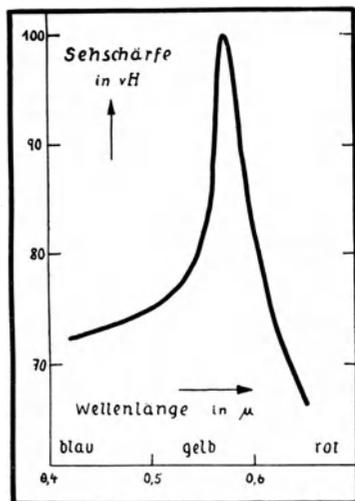


Abb. 110. Einfluß der Lichtfarbe auf die Sehschärfe

trächtlichem Maße als Lichtquellen zu Arbeitsbeleuchtung herangezogen werden (17).

Allerdings gibt es viele Arbeitsarten, für die farbiges Licht nicht in Frage kommt. So einmal für alle Bearbeitungen von farbigem Arbeitsgut, dessen Farbe erkannt werden muß; aber auch für die Arbeitsarten, bei denen die Beeinträchtigung der Gesichtsfarben als Störung empfunden würde, wie in allen Geschäften und Büros. Denen stehen aber andere gegenüber, für die sich farbiges Licht,

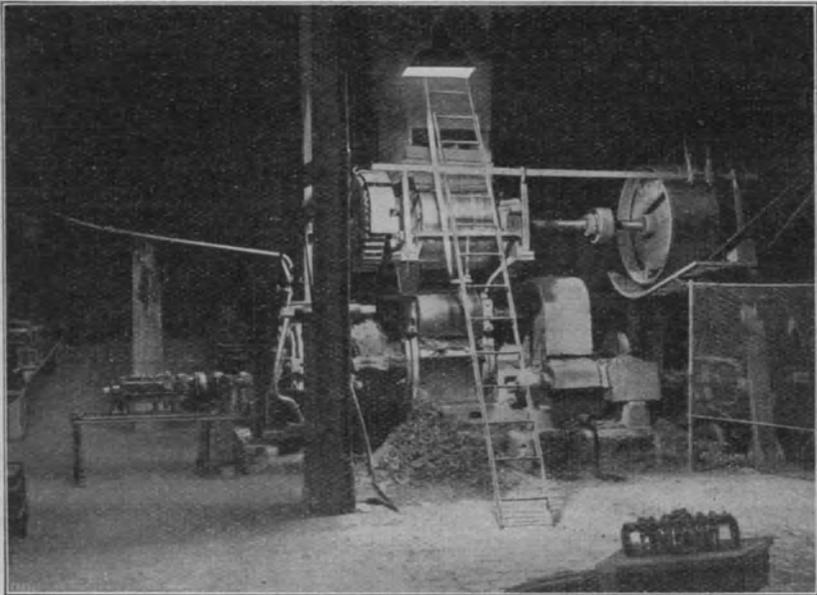


Abb. 111. Arbeitsplatzbeleuchtung an einer Ziegelpresse mit Farblicht (Natriumdampf)

insonderheit das der Natriumdampflampe, ganz vorzüglich eignet. Erstens sind das grobe Arbeiten, wie Verlade-, Bagger-, Hütten-, Grobmontagearbeiten, bei denen die Störungen durch gelbes Licht nichts ausmachen, bei denen aber trotz geringen Aufwandes erträgliche Beleuchtungsstärken erstellt werden können (Beispiel Abb. 111). Zweitens sind es aber gerade sehr feine Arbeiten, wie das Beobachten von Haarrissen oder Schlieren auf polierten Flächen oder in Gläsern, die besonders gut bei farbigem Licht ausführbar sind. Man wird also immer, wenn es auf höchste Sehschärfe ankommt, Lichtquellen mit einfarbigem Licht zum Einsatz bringen (18).

Wo das Glühlampenlicht zu unwirtschaftlich und das Dampf-lampenlicht zu farbenstehend wirkt, wird man Mischlicht verwenden. Je anspruchsvoller die Arbeit, um so mehr muß ein Mischungsverhältnis 1:1 erstrebt werden; bei anspruchsloseren Anlagen darf das Quecksilberlicht überwiegen. Mischlichtgeleuchte für Arbeitsplätze sind vielfach geschaffen (Abschn. IX, 5 u. X, 5).

Schriftumsnachweis

(1) DIN 5035. Leitsätze für Beleuchtung mit künstlichem Licht DLTG. — (2) Neuesten Bewertungen wird weniger die Sehschärfe, sondern das Produkt aus Kontrastgeschwindigkeit und kritische Reizgeschwindigkeit zugrunde gelegt werden. H. Lux, *Das Licht* **7**, 54, 1937. — (3) H. Lux, *ZS. f. Beleuchtungswesen* **26**, 28, 1920. — (4) A. Holy, *Das Licht* **7**, 65, 1937. — (5) N. A. Halbertma, *Fabrikbeleuchtung*. München 1918; Heyk u. Högner, *Projektierung von Beleuchtungs-Anlagen*; W. Kircher, *Werkstattbeleuchtung* (Bäckerei: Osram-Lichtheft S 13; Metzgerei: ebenda S 14; Schneiderei: ebenda S 15); N. Goldstern u. F. Putnocky, *Webstuhlbeleuchtung*: *Li. La.* **20**, Heft 1 u. 2, 1931 (Osram-Lichtheft S 11); Dieselben, *Industr. Psychotechn.* **8**, 9. Heft, 1931 (Osram-Lichtheft S 14); Flenter, *Werkplatzbeleuchtung, Der Anschluß*, Nr. 12, 1935; *Kandem-Hausmitteilungen*: Heft 7/8, 1931 (*Industriebeleuchtung*); Heft 1, 1935 (*Helle Arbeitsräume*); Heft 2, 1935 (*Werkzeugmaschinenbeleuchtung*, Heft 1, 1937 (*Fabrikbeleuchtung*). — (6) W. Kircher, *Licht und Arbeit*, *Das Licht* **4**, Heft 10, 1934 (Osram-Lichtheft S 27). — (7) K. Norden, *Grundlagen der Schattentechnik*. Berlin 1933. — (8) J. Ondracek, *Das Licht* **7**, 97, 1937. — (9) Anregung zu dem Druck dieses Abschnitts gab: L. Schneider, *Osram-Lichtheft* S 18. — (10) G. Nilson, *Das Licht* **4**, 44, 1934. — (11) *Kandem-Hausmitteilungen*, Heft 1, 1937. — (12) H. Lux in Bloch, *Lichttechnik*, S. 395. — (13) W. Kircher u. L. Schneider, *Das Licht* **1**, Heft 1, 1931 (Osram-Lichtheft S 7). — (14) N. Goldstern u. F. Putnocky (*Webstuhlbel.*), *Li. La.*, Heft 1 u. 2, 1931 (Osram-Lichtheft S 11). — (15) J. Schaer, *Das Licht* **6**, 176, 1936. — (16) Gaertner u. Schneider, *Elektr. im Bergb.* **4**, Heft 12 (Osram-Lichtheft S 3). — (17) W. Arndt, *Das Licht* **3**, 213, 1933 u. **4**, 64, 1934; W. Arndt u. A. Dresler, *Das Licht* **3**, 231, 1933; H. Lingenfelter u. M. Reger, *Das Licht* **3**, 26, 49, 1933; C. G. Klein, *Das Licht* **4**, 81 1934; R. G. Weigel, *Das Licht* **5**, 211, 1935. — (18) W. Köhler u. R. Rompe, *Die elektrischen Leuchtröhren*. Braunschweig 1933; H. Krefft u. E. Summerer, *Das Licht* **4**, 105, 1934 (Osram-Lichtheft S 23); H. Lingenfelter, *ETZ.* **55**, Heft 24 (Osram-Lichtheft S 24); H. Sick, *ZS. d. VDI.* **79**, Heft 51, 1935 (Osram-Lichtheft S 32); Osram, *Anwendungsbeispiele der Dampf lampen*. — (19) Zeiss-Ikon, *Spiegellichtblätter* **3**, 38, 1929. — (20) *Mi-gard-Druckschrift*, Auma, 1935.

XIV. Platz- und Hallenbeleuchtung

1. Allgemeine Voraussetzungen. So wie sich Lichtstrom und Lichtstärke als gleichwertige Größen gegenüberstehen, gibt es zwei Beleuchtungsberechnungsarten, deren eine auf dem Lichtstrom, deren andere auf der Lichtstärke aufbaut. Das Lichtstromverfahren eignet sich für ge-

schlossene Räume, in denen der verwandte Lichtstrom durch den wiederholten Rückwurf an Wänden eine mittlere Beleuchtungsstärke hervorruft, von der bei guter Rückstrahlung die Werte an den einzelnen Stellen nicht allzusehr abweichen. Das Lichtstärkenverfahren ist für offene, freie Flächen angebracht, bei denen eine Beleuchtungsstärke nur durch das Auftreffen eines Teillichtstromes entsteht, bei denen daher die E -Werte Punkt für Punkt berechnet werden müssen. Da eine Berechnungsart, die Punkt für Punkt erfaßt, mühsamer ist als eine solche, die Mittelwerte gewinnt, so liegt es nahe, daß für besondere Fälle der Beleuchtungsanlagen, die mit dem Lichtstärkenverfahren behandelt werden müßten, zur Vereinfachung auch ein Verfahren hergeleitet wird, das mit dem Lichtstrom arbeitet. Dies ist das Zonenlichtstromverfahren. Seiner Zwischenstellung entsprechend wird es für Hallen und Plätze angewandt, kann aber unter Umständen auch einerseits für Räume, andererseits für Straßen verwandt werden (1).

Der Unterschied von „Hallen“ und „Räumen“ ist darin zu sehen, daß entweder die Wände und Decken einer „Halle“ so wenig rückstrahlend sind, daß sie für Lichtrückwurf nicht in Betracht kommen; oder daß die Ausdehnung einer „Halle“ so groß ist, daß für die meisten Stellen ihrer Lichtnutzfläche das Vorhandensein der Begrenzungen beleuchtungsmäßig wirkungslos sind. Der Unterschied von „Plätzen“ und „Straßen“ hingegen ist darin zu sehen, daß bei einem Platz die Größenordnung von Länge und Breite nicht so verschieden ist wie meist bei Straßen. Auf Räume wird man das Zonenlichtstromverfahren anwenden, wenn man auf die Wirkung der Wände verzichten will; auf Straßen, wenn nur an Mittelwerten der Beleuchtungsstärke gelegen ist. Das Zonenlichtstromverfahren rechnet also nur mit dem unmittelbar die Fläche treffenden Licht und verzichtet auf Berücksichtigung der Wirkung rückstrahlender Flächen. Die Zonenlichtstromverteilungen (IV, 5 und X, 6) bilden die Grundlage für den Entwurf der Hallen- und Platzbeleuchtung.

2. Die Anzahl der Lichtpunkte. Es sei die Lichtnutzfläche F_0 einer Halle oder eines Platzes zu beleuchten. Man zerlegt die Fläche derart in Quadrate oder in quadratähnliche Rechtecke, daß diese

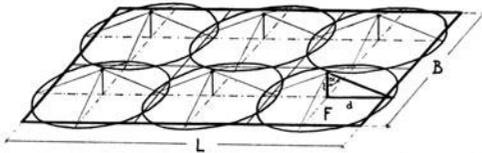


Abb. 112. Teilflächen je Geleucht

die Fläche ganz erfüllen (Abb. 112). Jedes Quadrat ersetzt man durch einen Kreis gleichen Flächeninhalts. Über der Mitte jeder Kreisfläche sei eine Lichtquelle angebracht in der Höhe l . Der

Kreishalbmesser betrage d . Dann gehört zum Kreisrand ein größter Ausstrahlungswinkel α . Aus dem Zonenlichtstromschaubild läßt sich für irgendein Geleucht der Teillichtstrom entnehmen, der in diesen Winkelbereich gelangt. Dieser trägt zur Beleuchtung der Kreisfläche und praktisch der Quadratfläche bei, die er ersetzt.

Die Anzahl der Lichtpunkte ist offenbar durch die Größe der Teilflächen F gegeben gemäß $n_0 = F_0/F$, wenn F_0 die Gesamtfläche ist. Da F eine Kreisfläche vom Halbmesser d ist, läßt sich schreiben:

$$n_0 = \frac{F_0}{d^2 \pi} = \frac{F_0}{\pi} \cdot \frac{l^2}{d^2} \cdot \frac{1}{l^2} = \frac{F_0}{\pi} \cdot \frac{1}{l^2} \cdot \cotg^2 \alpha$$

oder

$$n_0 \cdot l^2 \cdot \tg^2 \alpha = \frac{F_0}{\pi} \quad [32]$$

Es sind also die Anzahl der Lichtpunkte, die Lichtpunkthöhe und der Grenzwinkel der benutzten Ausstrahlung durcheinander bedingt.

Wählt man z. B. α und n_0 , so liegt l fest. Es steht immer frei, zwei von den drei Größen zu wählen und die dritte zu bestimmen. Da jedoch n_0 immer eine ganze Zahl sein muß, so bringt nicht jede Wahl von l und α eine mögliche Lösung. Von α wird man aber zweckmäßig deshalb ausgehen, weil man seine Größe nach dem Verlauf des Zonenlichtstromschaubildes wählen muß. α wird man so festlegen, daß der Hauptteil des Lichtstromes in dem Winkelbereich 0 bis α liegt. Gewinnt man aber doch aus n_0 und l den Wert α , so kann das zur Wahl der Geleuchtart dienlich sein. Man wird das Geleucht wählen, welches in dem Winkelbereich 0 bis α den Hauptteil des Lichtstromes aus-

sendet. Voraussetzung für diese Angaben ist, daß man bestrebt ist, möglichst viel Licht der Lichtnutzfläche zuzuleiten.

Neben der obigen Gleichung gelten natürlich die Gleichungen, deren Produkt die Hauptgleichung ist,

$$n_L \cdot l \cdot \tg \alpha = \frac{L}{\sqrt{\pi}}, \quad n_B \cdot l \cdot \tg \alpha = \frac{B}{\sqrt{\pi}} \quad \text{mit } n_B \cdot n_L = n_0,$$

worin L und B Länge und Breite, n_L und n_B die Anzahlen in Länge und Breite darstellen. Die Auswertung dieser Ausdrücke, die wegen der trigonometrischen Funktionen gern umgangen wird, geschieht am einfachsten mit dem Rechenblatt Abb. 113.

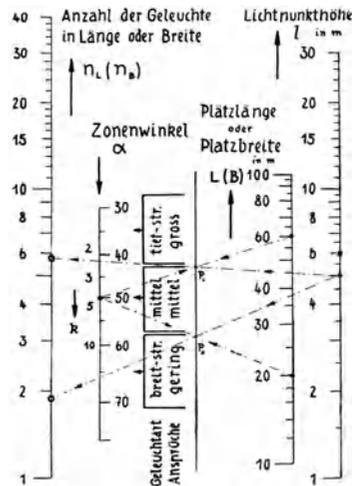


Abb. 113. Rechenblatt zur Bestimmung der Lichtpunktzahl für Platzbeleuchtung

Es ist sowohl für die Länge als auch für die Breite des Platzes nacheinander anwendbar. Von den vier Größen L (B), l , α , n_L (n_B) findet man durch zwei Geraden die jeweils fehlende vierte.

Beispiel. Geleuchtart: Die für Platzbeleuchtung übliche mittlere Art; Winkel α aus dem Zonenlichtstromschaubild des Geleuchts = 50° ; Lichtpunkthöhe $l = 5$ m; Länge $L = 60$ m; Breite $B = 20$ m. Verbindung von α mit L gibt P_L . Verbindung von P_L mit l gibt $n_L = 6$. Verbindung von α mit B gibt P_B . Verbindung von P_B mit l gibt $n_B = 2$. Also Gesamtzahl $n = 12$.

Geht man von der Gesamtzahl n_0 aus, so wird man n_0 (XII, 13) an Hand einer Skizze bestimmen, so daß eine möglichst gute Aufteilung zustande



Abb. 114. Hallenbeleuchtung mit großer Lichtpunkthöhe

kommt. Bei Hallen hat die Lichtpunkthöhe naturgemäß eine Grenze durch die Höhe der Halle. Es ist ratsam, in hohen Hallen l groß zu wählen; dadurch treten die Lichtquellen zurück und man erreicht leichter hohe Gleichmäßigkeit (Abb. 114).

Neben der obigen Anzahlgleichung gilt auch die früher hergeleitete:

$$n = F : k \cdot l^2.$$

Gleichsetzung beider Ausdrücke liefert:

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{\frac{k}{\pi}} = 0,565 \sqrt{k}.$$

Entsprechend dieser Beziehung sind im Rechenblatt zu den Werten k , je nach den Ansprüchen, die Winkel eingetragen. Hat man zum Entwurf ein bestimmtes Geleucht noch nicht gewählt, so geht man gemäß „Geleuchtart“ und „Ansprüche“ in die Winkelleiter ein.

Zur schnellen Feststellung der bei festliegender Lichtpunkthöhe zu einer gegebenen Kreisfläche oder einem sonstigen Flächenstück gehörenden Raumwinkelgröße dient das Lichtstrompapier nach Teichmüller (2), das das Schattenbild der Längen- und Breitenkreise einer durchsichtigen Kugel auf einer Ebene darstellt, welches eine in Kugelmittle angebrachte Punktlichtquelle hervorruft, wenn die Kugel auf der Fläche ruht. Die auch zur Beleuchtungsplanung bestimmte Kugel heißt Teichmüllersche Lichtstromkugel.

3. Der Lichtstrombedarf. Anzahl und Lichtpunkthöhe seien festgelegt. Aus ihnen folgt mit der Gesamtfläche der Grenzwinkel α . Zu diesem liefert das Zonenlichtstromschaubild den auf 1000 lm bezogenen Lichtstrom Φ_α , den das Geleucht in ihm aussendet. Besteckt mit einer Lampe von Φ lm besitzt das Geleucht im Winkelbereich den Lichtstrom

$$\Phi' = \Phi \cdot \frac{\Phi_\alpha}{1000}.$$

Dieser ruft auf der Teilfläche F die Beleuchtungsstärke

$$E_m = \frac{\Phi'}{F} = \frac{\Phi}{F} \cdot \frac{\Phi_\alpha}{1000}$$

hervor. Das einzelne Geleucht braucht dann die elektrische Leistung N , die einer Lampe des Lichtstromes Φ entspricht. Die gesamte Fläche F_0 benötigt dann die Leistung $N_0 = N \cdot \eta_0$. Wird eine bestimmte Beleuchtungsstärke E_m verlangt, so ist demgemäß in jedem Geleucht der Lichtstrom Φ aufzubringen:

$$\Phi = \frac{1000}{\Phi_\alpha} \cdot E_m \cdot F. \quad [33]$$

Dadurch, daß durch den Zonenlichtstrom derjenige Lichtstrom erfaßt wird, der der Lichtnutzfläche zugute kommt, handelt es sich also auch beim Zonenlichtstromverfahren um ein Wirkungsgradverfahren. Der Ausdruck $\Phi_\alpha/1000$ ist genau einem Wirkungsgrad gleichwertig, und zwar ist er im Gegensatz zu η , dem räumlichen Wirkungsgrad, ein Flächenwirkungsgrad.

Wegen seiner großen Einfachheit wird dies Verfahren nicht nur auf Hallen und Plätze, sondern auch auf Straßen und Räume angewandt. Es muß aber darauf hingewiesen werden, daß die Hallenbeleuchtung auch nach der Wirkungsgradmethode für Räume behandelt werden kann; wegen meist nicht hohen Wandrückwurfs wird man dann meist auf die unmittelbare Beleuchtung greifen. Andererseits kann das Lichtstärkenverfahren (Abschnitt XV) auch für Plätze benutzt werden. Man wird auch dann nur einen Ausschnitt des Platzes durchrechnen, der sich beleuchtungsmäßig wiederholt.

4. Zusammenfassung und Beispiel. Das Zonenlichtstromverfahren besteht aus acht Schritten. Nachdem die Beleuchtungsstärke und die Geleuchtart festgelegt worden ist, bestehen diese aus:

1. Wahl der Lichtpunkthöhe l .
2. Festlegung des Geleuchtwinkels α nach Geleuchtart und nach Ansprüchen.
3. Ermittlung des Zonenlichtstromes $\Phi_{\alpha,0}$.
4. Ermittlung der Anzahl n_0 mit Rechenblatt.
5. Bestimmung der Teilfläche $F = F_0 : n_0$ je Geleucht.
6. Berechnung des erforderlichen Einzellichtstromes der Lampen mit $\Phi = \frac{1000}{\Phi_{\alpha}} \cdot E \cdot F$.
7. Festlegung der Einzellampenleistung N .
8. Berechnung der Gesamtleistung $N_0 = n_0 \cdot N$.

Die Rechnung kann auch in anderer Reihenfolge ausgeführt werden.

Beispiel: Vorhanden sei ein Platz von der Länge 300 m, Breite 80 m, der hervorragend mit 30 lx beleuchtet werden soll, so daß sehr gute Gleichmäßigkeit erreicht wird ($U = 110$ Volt). — Gewählt wird $l = 15$ m. Als Geleuchte kommen Tiefstrahler mit dem Grenzwinkel 45° zur Anwendung. Gewählt wird $\alpha = 35^\circ$, da das Zonenlichtstrombild jenseits 35° den schärfsten Knick aufweist. Da die Beleuchtung sich auf 100 m wiederholen wird, wird gerechnet mit $L' = 100$, $B = 80$. Das Rechenblatt liefert: $n'_L = 5,3$, $n_B = 4,3$. Gewählt werden $n_L = 3 \cdot n'_L = 16$, $n_B = 4$. Also $n_0 = 64$. Die Einzelfläche je Geleucht wird daher $F = F_0 : 64 = 24000 : 64 = 375 \text{ m}^2$. Der zu $\alpha = 35^\circ$ gehörende Lichtstrom beträgt $\Phi_{\alpha,0} = 600 \text{ lm}$. Jedes Geleucht muß daher aufnehmen: $\Phi = \frac{1}{600} \cdot 1000 \cdot 30 \cdot 375 = 19750 \text{ lm}$. Gewählt werden 32 Lampen zu 1000, 32 zu 750 Watt, die letzten für die beiden äußeren Reihen. Der mittlere Lichtstrom beträgt dann: $(16500 + 23500) \cdot 0,5 = 20000 \text{ lm}$. Die Gesamtleistung ist $N_0 = 32 \cdot 1000 + 32 \cdot 750 = 56 \text{ kW}$.

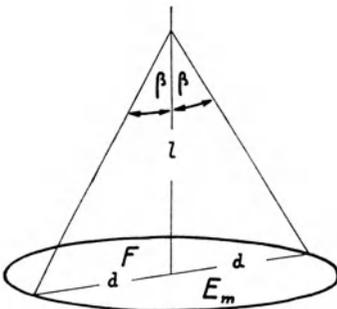


Abb. 115. Geometrische Zusammenhänge

5. Mittlere Beleuchtungsstärke.

Mit dem Zonenlichtstrom läßt sich eine Gesetzmäßigkeit für die mittlere Beleuchtungsstärke herleiten; nämlich der Wert E_m , der auf einer Kreisscheibe vom Halbmesser d gilt, wenn über ihrer Mitte sich in Höhe l eine Punktlichtquelle mit der Lichtstärke J befindet (Abb. 115). Dann trifft nur der Lichtstrom Φ_β auf die Fläche; der Zonenwinkel β ergibt sich aus $d : l = \text{tg } \beta$. Also ist

$$E_m = \Phi_\beta / F = \frac{\eta \cdot \Phi_0}{F}$$

Die Zahl η gibt die durch die geometrischen Gegebenheiten bedingte Ausnutzung des unteren Lichtstromes an. Daher ist $\eta = \Phi_\beta : \Phi_\ominus$. Diese beiden Lichtströme verhalten sich aber, wie die zugehörigen Zonenhöhen, also (1)

$$\eta = \frac{h_z}{d} = \frac{d(1 - \cos \beta)}{d} = 1 - \cos \beta = 1 - \frac{l}{\sqrt{l^2 + d^2}}$$

$$= 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{d}{l}\right)^2}} = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{F}{\pi l^2}}}$$

das letzte, weil die Kreisfläche $F = d^2 \cdot \pi$ ist. Setzt man η in den Ausdruck für E_m ein, so erhält man:

$$E_m = \frac{\Phi_\ominus}{F} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{F}{\pi l^2}}} \right] = \frac{\Phi_0}{2F} \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{F}{\pi l^2}}} \right].$$

Ersetzt man darin Φ_\ominus durch $2 \cdot \pi \cdot J_0$, und F durch $\pi \cdot d^2$, so folgt der gleichwertige Ausdruck:

$$E_m = \frac{2 J_0}{d^2} \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{d}{l}\right)^2}} \right] = \frac{2 \cdot J_0}{d^2} \cdot (1 - \sqrt[3]{f}). \quad [34]$$

Er ist deshalb so bedeutungsvoll, weil man aus ihm den Einfluß der Lichtpunkthöhe auf die mittlere Beleuchtungsstärke ersehen kann. Man erkennt, daß sie abnimmt, wenn Scheibengröße und Lichtpunkthöhe zunehmen.

Wenn $d \gg l$ ist, also $d/l \gg 1$, so ergibt sich: $E_m = (d - l) \cdot 2 J_0/d^3$. Bei verhältnismäßig kleiner Lichtpunkthöhe nimmt also E_m in dem Maße ab, wie l zunimmt. f ist die beleuchtungstechnische Grundfunktion (II, 3).

6. Die Wirkungsgradformel von Bloch. Von L. Bloch ist es unternommen, das Zonenlichtstromverfahren auch für Raumbeleuchtungsberechnungen im Sinne der Wirkungsgradmethode zu gestalten. Er hat zu der Grundformel $\Phi = E \cdot F : \eta$ den Ausdruck für den Wirkungsgrad η angegeben. Dieser lautet (1):

$$\eta = \psi \cdot \chi \quad \text{mit} \quad \chi = u \cdot k \cdot \frac{\Phi_\beta}{1000}. \quad [35]$$

Darin sind ψ der lichttechnische Wirkungsgrad des Gelechts und χ der reine beleuchtungstechnische Wirkungsgrad des Raumes. Die Hauptgröße ist Φ_β , das ist der zu der Lichtnutzfläche gehörende Zonenlichtstrom. Ist das Zonenlichtstromschaubild vorhanden, so kann Φ_β unmittelbar aus ihm mit β entnommen werden. Um aber

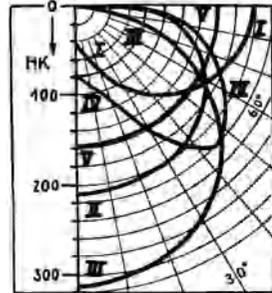


Abb. 116. Grundlichtverteilungen nach Bloch

auch ohne ein solches rechnerisch vorgehen zu können, sind von Bloch Formeln für Φ_β je nach den häufigsten Lichtstromverteilungen gebildet worden. Für die in Abb. 116 angegebenen Lichtverteilungen (für die der Lichtstrom im unteren Halbraum 1000 lm ist), die den häufigsten Lichtstromverteilungen zugehören, lauten sie der Reihe nach:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= 1000 \cdot \sqrt[3]{(1 - \cos \beta)^4}, & \Phi_2 &= 1000 \cdot (1 - \sqrt[3]{\cos^4 \beta}), \\ \Phi_3 &= 1000 \cdot \sin^3 \beta, & \Phi_4 &= 1000 (1 - \cos^{1,15} \beta), \\ \Phi_5 &= 1000 (1 - \cos \beta). \end{aligned} \quad [36]$$

Der letzte Ausdruck ist im vorigen Abschnitt hergeleitet. Da für die Ebene $k = 1$, die Punktlichtquelle $\psi = 1$, $u = \frac{1}{2}$ ist, so folgt

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos \beta) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{F}{\pi l^2}}} \right)$$

als Wirkungsgrad der Ebene.

Die Zahl k ist eine Größe, die durch die Beschaffenheit des Raumes bedingt ist. Sie soll von Dunkel nach Hell zwischen 1,0 und 1,4 liegen (Aufstellung 33). Der Faktor u gibt den Anteil des Licht-

Aufstellung 33

Wand- bekleidung	Deckenbekleidung		
	Hell	Mittel	Dunkel
Dunkel . .	1,2	1,1	1,0
Mittel . . .	1,3	1,2	1,1
Hell	1,4	1,3	1,2

stromes an, den das Geleucht nach unten sendet, kann also von 1 auf 0 schwanken je nach unmittelbarer oder mittelbarer Beleuchtung. Die Raumabmessungen werden also in Φ_β erfaßt. Für voll mittelbare Beleuchtung versagt diese Formel; sie ist ganz auf unmittelbare Beleuchtung zugeschnitten. Da diese Formel die Kenntnis des lichttechnischen Wirkungsgrades sowie der Lichtverteilung voraussetzt, da ferner die Zahl k nur geschätzt wird, für Φ_β nur ein Durchschnittsausdruck verwendet wird, in dem die Raumform nur genähert berücksichtigt wird, so wird die Leistung dieser Formel für Innenräume hinter der im Abschn. XII, 11 beschriebenen zurückstehen. Sie hat aber den großen Vorteil, auf Räume, Hallen und Straßen zugleich anwendbar zu sein.

7. Sportplatzbeleuchtung. Während häufig große Stadtplätze nur auf den Straßenzügen, die dem Verkehr dienen, gute Beleuchtung aufweisen müssen; während man an die Beleuchtung von großen Versammlungsplätzen zu Gemeinschaftsfeiern keine hohen Anforderungen zu stellen pflegt (die

Beleuchtungsaufgabe zieht sich dann meist auf den Teil wirksamer Aufbauten in Blickrichtung zusammen), so benötigen die Beleuchtungen von Sportplätzen erhöhte Aufmerksamkeit.

Die Bedeutung des Sports im Volksleben läßt es nicht mehr zu, die sportlichen Veranstaltungen auf Hellstunden zu beschränken. Ebenso wie die Sporthallen müssen die freien Plätze im Dunkeln beleuchtet werden. Die Anforderungen, die an die Beleuchtung gestellt werden, sind besonders hohe, sowohl was Stärke wie was Gleichmäßigkeit angeht. Für Fußballplätze sollte ein Mittelwert von 75 lx, bei Kunsteisbahnen von 150 lx und mehr — der Lichtrückwurf von Eis und damit die Leuchtdichte der Eisfläche ist verhältnismäßig gering! — erreicht werden; die Gleichmäßigkeit sollte

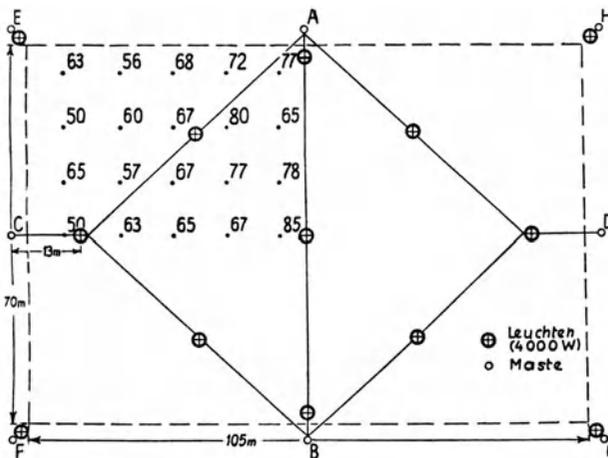


Abb. 117. Zweckmäßige Sportplatzleuchten aufhängen

nicht kleiner als 1 : 5 sein, besser um 1 : 2. Ebenso wichtig ist, daß Blendung völlig ausgeschlossen ist, eine Forderung, die für Tageslicht häufig nicht erfüllt ist. Der Platz muß frei von Geleuchtträgern sein. Die heute beschriebenen Sportplatzbeleuchtungsarten sind die folgenden: 1. Auf mindestens 4 hohen Masten an den Ecken des Platzes befinden sich Halter mit Scheinwerfergruppen, die den Platz so gleichmäßig wie möglich ausleuchten; eine gute Anlage wird hier nur durch umfangreiches Versuchen und Nachmessen zu erstellen sein. Nachteil: Trotz hoher Masten (etwa 30 m) ist die Blendung nicht für alle Blickrichtungen ausgeschlossen; die hohe Gleichmäßigkeit, die verlangt wird, ist schwer zu erreichen; der Leistungsaufwand ist, wegen geringer Scheinwerferwirkungsgrade, ziemlich hoch. 2. Der ganze Platz wird von einer Menge von blendungsfreien Tiefstrahlern mit schmalen Ausstrahlungswinkel beleuchtet, die an einer netzartigen Überspannungsvorrichtung hängen; diese selbst werden von vier Masten getragen, welche an den Mitten der Platzseiten aufgestellt sind (Abb. 117). Die Masten müssen (bei Fußballplätzen) um 25 m Höhe haben, damit die Lichtpunkthöhe an 20 m beträgt; die Ermittlung von Anzahl und Leistung erfolgt genau nach dem Lichtstromverfahren unter Zugrundelegung hoher Ansprüche ($D = 1,5 l$);

es lassen sich so un schwer hohe Werte für E und G_{lm} erzielen. Damit der Ball auf seiner Bahn nie den durchleuchteten Raum verläßt, muß der obere Raum noch durch Scheinwerfer, die mit etwa 30° schräg aufwärts gerichtet sind, durchleuchtet werden, da außerhalb der schmalen Lichtkegel der Tiefstrahler lichtundurchflutete Räume sind. Blendung kann so ganz ausgeschaltet werden. Die zweite Anlagenart hat sich als wirtschaftlicher erwiesen; so läßt sich ein Fußballplatz mit 9 Watt/m^2 und 75 lx bei $1 : 2$ Gleichmäßigkeit nach der zweiten Art beleuchten, während die erste Anlage bei geringerer Gleichmäßigkeit und sonst gleichen Werten 13 Watt/m^2 erfordert. Rein beleuchtungstechnisch ist daher die zweite Art vorzuziehen. Abb. 118 zeigt die Wirkung einer solchen Anlage (Kunsteislaufbahn Hamburg, 81 kW ,



Abb. 118. Beleuchtete Hamburger Kunsteislaufbahn

175 lx , 3860 m^2 , 45 Leuchten, Starktiefstrahler). Bei Tennishallenbeleuchtung ist der Eigenart dieses Sports dadurch Rechnung zu tragen, daß einerseits eine gewisse Schattigkeit vorhanden bleiben muß, die das Erkennen des Balles erleichtert; daß andererseits die Leuchtdichte der Wände durch Anstrich oder Beleuchtung nicht zu groß gewählt werden darf, um den hellen Ball durch Hellgegensatz gegen die Raumbegrenzungen gut erkennbar zu lassen. So bedarf jede Sportplatzbeleuchtung eine Anpassung an die jeweiligen Bedürfnisse (3).

Schriftumsnachweis

(1) L. Bloch, *Lichttechnik*, S. 255. — (2) J. Teichmüller, *Journ. f. Gasbel.* Nr. 20, 1918. — (3) B. Schmelzle, *Das Licht* 5, 140, 1935; Körting u. Mathiesen, *Hausmitteilungen*, Heft 3, 1936; J. Guanter, *Das Licht* 3, 156, 1933.

XV. Straßenbeleuchtung

1. Die technischen Geleuchte. Als Geleuchte für Straßenbeleuchtung pflegen alle Arten von den Tiefstrahlern bis zu den Breitstrahlern in Betracht zu kommen. Auf Straßen werden Breitstrahler noch bevorzugt, weil nur sie bei großen Abständen die der Punktlichtquelle eigenen Ungleichmäßigkeiten ausgleichen können. Daß dem Tiefstrahler selbst auf Straßen grundsätzlich der Vorzug gebührt, wird später bei Betrachtung der Blendung (Abschnitt 12) deutlich (1).

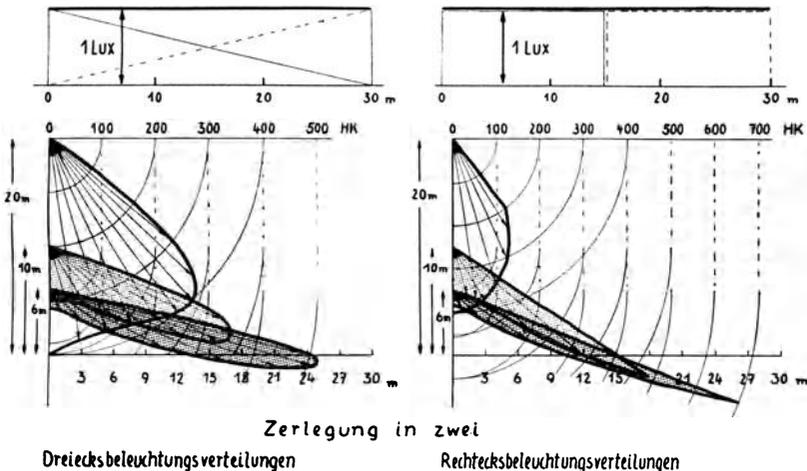


Abb. 119. Lichtverteilungen zu bestimmten Beleuchtungsverteilungen

Die Lichtverteilungen der Breitstrahler können so gewählt werden, daß sie selbst bei Abständen, die die Halbwertsbreite weit überschreiten, die Ungleichmäßigkeitswirkung der Waagrechtbeleuchtung aufheben. Verlangt man z. B. auf der Verbindenden zweier Nachbargeleuchte eine gleichbleibende Beleuchtungsstärke, so kann man diese nach Abb. 119 oben als Summe zweier dreieckiger oder zweier rechteckiger Beleuchtungsverteilungen auffassen, die sich ergänzen. Die dafür notwendigen Lichtverteilungen lassen sich mit der Umformung des Beleuchtungsgesetzes (Formeln [7] und [8], S. 10)

$$J_a = \left(1 - \frac{d}{D}\right) \cdot \frac{l^2}{f}$$

berechnen, worin D der Abstand beider Lichtquellen, d der Abstand des Punktes zwischen beiden, auf den J_a wirkt, l Lichtpunkthöhe und f die Grundfunktion sind. Das Ergebnis sind dann Lichtverteilungen, die Abb. 119 unten zeigt. Es sind Lichtverteilungen vom Breitstrahlertyp, in einem Fall sogar vom Starkbreitstrahler. Derartig scharfe Lichtlenkungen sind nur mit best durchkonstruierten Geleuchten möglich, bisweilen technisch kaum durchführbar.

Mit Tiefstrahlern oder Schwachbreitstrahlern sind daher offensichtlich gute Gleichmäßigkeiten nur bei geringen Abständen zu erreichen, oder durch beträchtliche Lichtpunkthöhen, durch die aber die Streuverluste außerhalb der Straßenfläche leicht wachsen. Große Abstände sind bei guter Gleichmäßigkeit nur durch Breitstrahler zu überbrücken. Dabei stellen sich immer Nachteile in Hinsicht der Blendungsfreiheit heraus. In dem Maße, wie man auf hohe Gleichmäßigkeit verzichten darf (Abschn. 4), dürfen auch für größere Abstände Tiefstrahler eingesetzt werden. Geleuchtart, Lichtpunkthöhe, Abstand und Gleichmäßigkeitsforderung stehen immer in untrennbarem Zusammenhang.

2. Die Grundbeleuchtung des Gelechts. Die Hauptaufgabe der Straßenbeleuchtungsbearbeitung besteht darin, aus der Lichtverteilung und der Lichtpunkthöhe die Beleuchtungsverteilung zu bestimmen; zunächst auf der Verbindung zweier Nachbargeleuchte, also die „Streckenbeleuchtung“; ferner aber auf der Fläche zwischen beiden Geleuchten, also die „Flächenbeleuchtung“ (26).

Das Beleuchtungsgesetz lautet (II, 3):

$$E = J \cdot \frac{1}{l^2} \cdot f.$$

Es ist nun zweckmäßig, zunächst nur das Produkt $J \cdot f$ zu bilden; man nennt es die „Grundbeleuchtung des Gelechts“ E_G . Der Wert dieser Grundbeleuchtung besteht darin, daß sie gemäß der Gleichung für f zwar vom Verhältnis d/l , jedoch nicht vom Wert l der Lichtpunkthöhe selbst bestimmt ist; die Grundbeleuchtung eines Gelechts ist also eine Werteverteilung, die für ein Geleucht allemal eindeutig festliegt, ohne daß die Lichtpunkthöhe bekannt zu sein braucht.

Aufstellung 34

d/l	f_{wa}	f_{lo}	d/l	f_{wa}	f_{lo}	d/l	f_{wa}	f_{lo}
0,0	1,00	0,00	1,0	0,354	0,354	3,0	0,032	0,096
0,1	0,987	0,0987	1,2	0,262	0,314	3,2	0,027	0,087
0,2	0,945	0,189	1,4	0,197	0,276	3,4	0,023	0,078
0,3	0,878	0,262	1,6	0,148	0,237	3,6	0,019	0,068
0,4	0,807	0,322	1,8	0,114	0,205	3,8	0,016	0,061
0,5	0,715	0,357	2,0	0,089	0,178	4,0	0,014	0,056
0,6	0,634	0,381	2,2	0,071	0,156	4,2	0,012	0,051
0,7	0,550	0,385	2,4	0,057	0,137	4,4	0,011	0,048
0,8	0,477	0,382	2,6	0,046	0,119	4,6	0,010	0,044
0,9	0,412	0,370	2,8	0,038	0,106	4,8	0,009	0,041
1,0	0,354	0,354	3,0	0,032	0,096	5,0	0,008	0,038

Die Grundbeleuchtung wird Punkt für Punkt als Produkt aus jeweils zusammengehörigen Wertepaaren gewonnen. Dazu geht man von der f -Kurve aus (die zu genauerer Ableseung tunlichst in logarithmischem Maßstabe aufgetragen ist). Den Mittelpunkt der Lichtverteilung des Gelechts bringt man über dem Nullpunkt der f -Kurve in einer Höhe an, die gleich der Länge

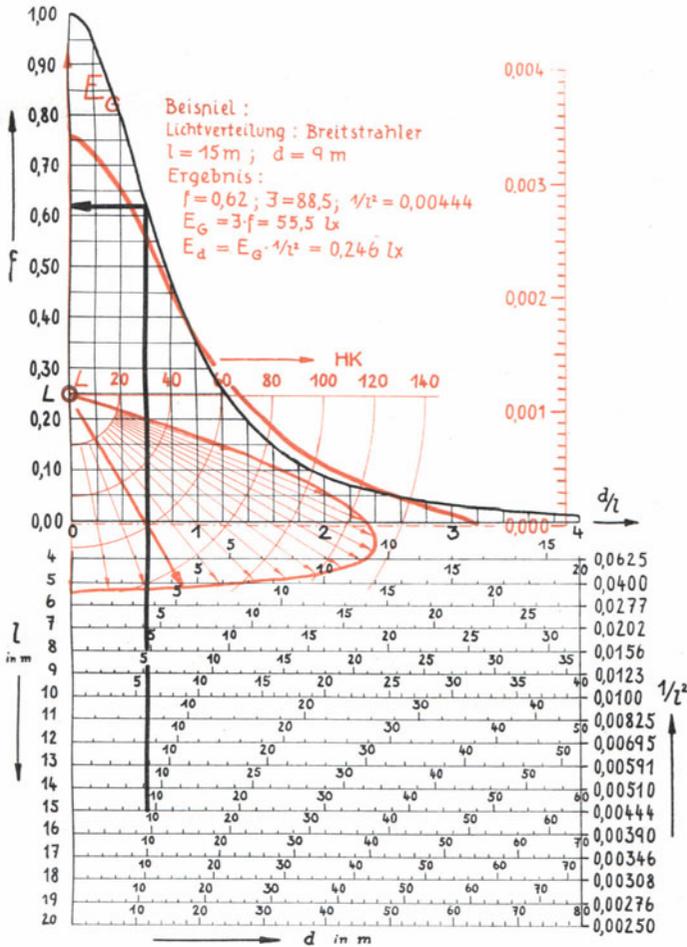


Abb. 120. Von der Lichtverteilung zur Grundbeleuchtung

$d/l = 1$ ist (Abb. 120). Dann läßt sich zu jedem d/l jedes zugehörige Wertepaar $J_{dl} - f_{dl}$ ablesen. Multiplikation dieser Paare ergibt Werte, die bildlich aufgetragen die E_G -Kurve liefern. Abgesehen von der Lichtpunkthöhe ist der E_G -Verlauf auch von der noch zu wählenden Lampenleistung unabhängig. Abb. 121 zeigt Grundbeleuchtungskurven für bezeichnete Geleuchtarten für Straßenbeleuchtungen. Es wäre im Sinne beträchtlicher Verein-

fachung der Arbeit des Beleuchtungstechnikers, wenn zu Geleuchten für Straßenbeleuchtungen an Stelle der Lichtverteilungen als das brauchbarere die Grundbeleuchtungen angegeben würden. Zur sicheren Herstellung der E_G -Kurven sind in Aufstellung 34 die f -Werte genau bis $d/l = 5$ aufgeführt.

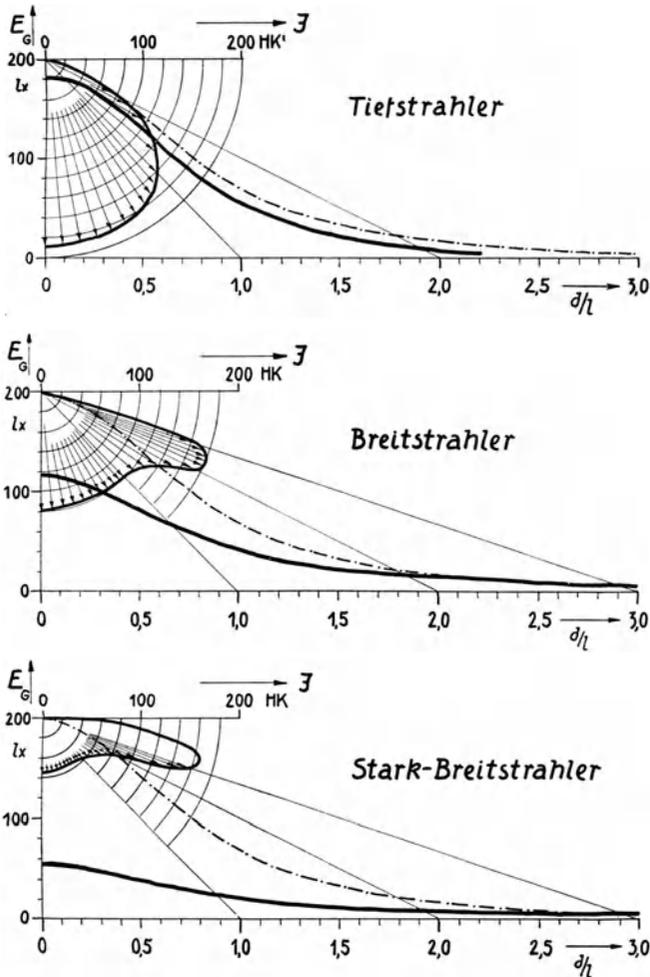


Abb. 121. Kennzeichnende Grundbeleuchtungen von Geleuchten

3. Gleichmäßigkeit und Schattigkeit. Eine Straße muß den Bedürfnissen ihres Verkehrs entsprechend möglichst gleichmäßig beleuchtet werden. Die erforderlichen Werte für Glm sind der Aufstellung 35 zu entnehmen, und zwar für verschiedene Straßenarten.

Aufstellung 35

Art der Anlage	Mittlere Beleuchtungsstärke		Beleuchtungsstärke der ungünstigsten Stelle		Gleichmäßigkeit <i>Glm</i>
	Mindestwert lx	Empfohlener Wert lx	Mindestwert lx	Empfohlener Wert lx	
a) Straßen und Plätze					
mit schwachem Verkehr	1	3	0,2	0,5	1 : 15
„ mittlerem „	3	8	0,5	2	1 : 10
„ starkem „	8	15	2	4	1 : 10
„ stärkstem Verkehr in Großstädten	15	30	4	8	1 : 10
b) Bahnanlagen					
Gleisfelder mit schwachem Verkehr	0,5	1,5	0,2	0,5	} 1 : 6
Gleisfelder mit starkem Verkehr	2	5	0,5	2	
Bahnsteige, Verladestellen, Durchgänge u. Treppen mit schwachem Verkehr	5	15	2	5	
„ starkem „	10	30	5	10	
c) Wasserverkehrsanlagen, Kaianlagen, Landestellen, Schleusen					
mit schwachem Verkehr	1	3	0,3	1	
„ starkem „	5	15	2	5	

Abb. 130 gibt an, wie praktisch auftretende Ungleichmäßigkeitswerte einzuschätzen sind, wenn sie die geforderten Beträge überschreiten. (Rechte Leiter unter *UG*.) Man trifft heute bei Straßen durchaus noch $Glm = 1 : 1000$ an; als anzustrebender guter Durchschnitt hat zu gelten $Glm = 1 : 10$. Dies liegt weit über den heute durchschnittlich eingehaltenen Werte (2).

Da *Glm* oder *UG* durch Höchst- und Geringstwert von *E* bestimmt sind, lassen sie sich beim Entwurf vorher bestimmen. Dies sei an dem Fall einer fortlaufenden Lichtquellenreihe gezeigt.

Der Höchstwert E_{\max} herrscht unter der Lichtquelle. Vernachlässigt man den Anteil der Nachbarlichtquelle, was um so weniger ausmacht, je größer die Abstände werden, so gilt $E_{\max} = J_0 : l^2$ mit *l* als Lichtpunkthöhe. Der Geringstwert herrscht in der Mitte zwischen beiden Lichtquellen am Rande der Lichtnutzfläche, also bei $D/2$ und $B/2$, wenn *D* und *B* Lichtquellenabstand und Straßenbreite sind. Da der Waagerechtabstand *d* dieses Punktes bis zur Lichtquelle $d = \frac{1}{2} \sqrt{D^2 + B^2}$ beträgt, so gilt:

$$E_{\min} = \frac{J_{d/l}}{l^2} \cdot f_{d/l} \cdot 2,$$

und damit für die Ungleichmäßigkeit

$$UG = \frac{1}{2} \frac{J_0}{J_{d/l}} \cdot \left[1 + \frac{D^2 + B^2}{4 l^2} \right]^{3/2}. \quad [37]$$

Nimmt man richtungsunabhängige Lichtstärken an, also $J_0 = J_d$, so wird

$$UG = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{D^2 + B^2}{4l^2} \right]^{3/2}.$$

Danach nimmt die Ungleichmäßigkeit mit wachsendem Abstand, wachsender Straßenbreite und abnehmender Höhe zu. Abb. 122 zeigt, wie UG für den Fall $B = 10$ m und $l = 10$ m zunimmt, wenn das Verhältnis Abstand zu Lichtpunkthöhe wächst. Dieses Bild vertieft also die Einsichten, die Abb. 10 lieferte, bei dem nur die Glm -Werte auf der Verbindenden der Lichtquellen herangezogen wurden.

Die Schattigkeitsbetrachtungen von Abschn. III, 6 sind uneingeschränkt auf Straßen zu übertragen; denn der Einfluß der Häuserwände wird in den meisten Fällen so gering sein, daß er die größte Teil-

schattigkeit, auf die es ankommt, nicht wesentlich beeinflusst. Anhalte über Lichtverteilungsformen zu Schattigkeitsforderungen liegen vor (3).

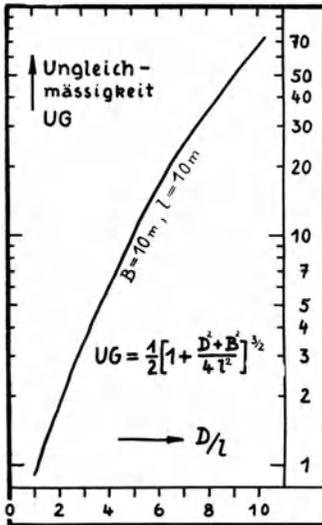


Abb. 122. Einfluß des Geleucht Abstandes auf die Ungleichmäßigkeit

4. Höhen, Abstände und Anordnungen der Lichtpunkte.

Derjenige Lampenabstand, der für die Punktlichtquelle eine hochwertige Gleichmäßigkeit entstehen läßt, ist das $1^{1/2}$ -fache der Lichtpunkthöhe. Bis auf äußerst anspruchsvolle Anlagen wird aber bei Straßenbeleuchtungen auf derartig hohe Werte verzichtet. Im nächsten Abschnitt wird gezeigt, wie man zu einer verlangten Gleichmäßigkeit den richtigen Abstand findet.

Soweit man aber auf diese genaue

Abstandsbestimmung verzichtet, wird man die Anhaltswerte heranziehen, die auf Grund von Erfahrungen in den Aufstellungen 36 und 37 erfaßt sind.

Aufstellung 36 gibt das Verhältnis von Abstand zu Lichtpunkthöhe an, das für die üblichen Geleuchtarten ratsam ist, sofern durchschnittliche Ansprüche gestellt werden. Über die Lichtpunkthöhe selbst, die je nach Straßenart verschieden zu wählen ist, gibt Aufstellung 37 Auskunft.

Nach L. Bloch läßt sich auf die Blendung dadurch Rücksicht nehmen, daß man die Lichtpunkthöhe aus der mittleren Lichtstärke des Gelechts

Aufstellung 36

Geleuchtart	Abstand zu Lichtpunkthöhe (D/l)
Tiefstrahler	
stark	2,5
schwach	3,5
breit	4,0
Breitstrahler	
tief	4,0
schwach	5,0
stark	6,0

Aufstellung 37

Straßenart	Lichtpunkthöhe in m
Wohnstraße	4,5—5,5
Landstraße	6,5—10
Verkehrsstraße	
mit starkem Verkehr	6—9
„ mittlerem „	6—9
„ schwachem „	6—7
Gleisfelder	25

berechnet nach (4)

$$l = 3,5 + \frac{\sqrt{J}}{10}. \quad [38]$$

Die Wertepaare, die sich so ergeben, sind aus Abb. 123 abzulesen. G. Laue gibt für den Geringstwert der Lichtpunkthöhe, der bei der Straßenbreite b und der Geleuchtzeilenanzahl n zulässig ist, an (27)

$$l_{\min} = b : 3n.$$

Man sollte besonders bei großer Straßenbreite diese Faustformel heranziehen.

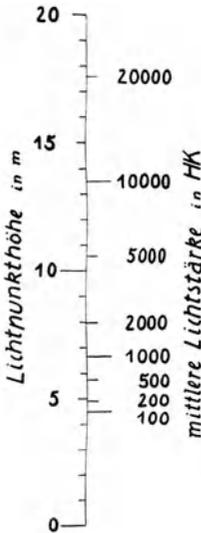


Abb. 123. J - l -Doppelleiter

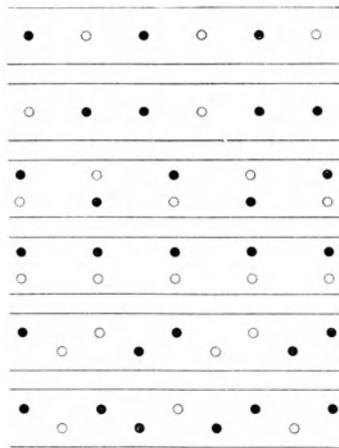


Abb. 124. Lichtpunktanordnungen

Die Arten der Lichtpunktanordnungen zeigt Abb. 124. Man sieht die Einfachreihe, die Zickzackanordnung und die Doppelreihe. Je größer die Lichtpunktdichte, um so größer die Gleichmäßigkeit.

Abb. 124 zeigt auch, wie Sparschaltungen vorgenommen werden können. Die hellen Kreise sollen Ganznachtslampen, die dunklen Halbnachtslampen sein. Solche Sparschaltungen sind wichtig, weil erst sie es in vielen Fällen wirtschaftlich tragbar machen, für die Hauptverkehrszeiten wirklich ausreichende Beleuchtungen zu erstellen. Sparschaltungen sind auch dadurch möglich, daß jedes Geleucht mehr als eine Lichtquelle erhält, die unabhängig geschaltet werden können (5).

5. Die Abstandsbestimmung. Die Abstandswerte des letzten Abschnitts können nur grobe Anhaltswerte sein. Sobald eine bestimmte Gleichmäßigkeit verlangt wird, müssen zu einer bestimmten Geleuchtart die Abstände genauer festgelegt werden. Hierfür hat Anderson das Verfahren angegeben. Man hat danach von den unterschiedlichen Anordnungsarten der Lichtpunkte auszugehen (Abb. 125). Entweder befindet sich in Straßennitte nur eine Lampenreihe (1), oder die Lampen werden in Zickzackform abwechselnd diesseits und jenseits der Straße angeordnet (2). Oder die Straße erhält zwei Lampenreihen zu beiden Seiten, so daß sich immer zwei Lampen gegenüberstehen (3). Dann ist immer ein bestimmter Punkt M da, in dem die Summe der Beleuchtungsstärken am geringsten ist (6).

Hat man nun die Grundbeleuchtungskurve E_G des Geleuchts und tragen zu der Beleuchtung des Punktes M n Lichtpunkte aus nächster Nähe bei (n ist meist gleich 2, nur im dritten Anordnungsfall gleich 4) und ist die Gleichmäßigkeit Glm der Anlage gegeben, so läßt sich der Abstand d zur Grundbeleuchtungskurve angeben, bei dem diese die Gleichmäßigkeit Glm/n erreicht; man zeichnet in Höhe von $E_{\min} = E_0 \cdot Glm/n$ eine horizontale Gerade (Abb. 126), die diesen E -Wert abschneidet und dadurch das Höchstabstandsverhältnis festlegt. E_0 herrscht im Leuchtenfußpunkt. Aus d/l findet man mit l dann d . (Ist schon mit l die E -Kurve aus der E_G -Kurve gewonnen, so erhält man unmittelbar den Wert d .) Aus diesem Abstand $d = LM$ des Lichtpunktes vom schlechtest beleuchteten Punkt der Fläche kann man den Lichtquellenabstand D in Straßenrichtung zeichnerisch und rechnerisch gewinnen; zeichnerisch gemäß der Abb. 125, rechnerisch mit Hilfe der drei Ausdrücke (7)

$$D \text{ (bzw. } \Delta) = \sqrt{4d^2 - A} \text{ mit } \begin{cases} 1. A = b^2, \\ 2. A = b^2 \text{ (ungenau); } = \frac{b^2}{1 - \left(\frac{c}{\Delta}\right)^2} \text{ (genau),} \\ 3. A = b^2 + 2bc - 3c^2, \end{cases} \quad [39]$$

die der Reihe nach zu den drei Straßenanordnungen gehören. Zu dem zweiten Ausdruck ist zu bemerken, daß er selbst, soweit man die genaue Form benutzt, die Größe D enthält, die man erst bestimmen will. Deshalb wird man immer erst die „ungenau“ Näherungsform verwenden und mit dem Näherungswert in die „genaue“ Formel eingehen. Die so erreichte Genauigkeit reicht praktisch immer aus.

Aber auch den Grundabstand d , der in diesen Ausdrücken gebraucht wird und zu dem schlechtest beleuchteten Punkt gehört, kann man berechnen. Das leistet der Ausdruck (7)

$$d^2 = l^2 \cdot \left[\left(\frac{n}{Glm} \cdot \frac{J_d}{J_0} \right)^{2/3} - 1 \right], \quad [40]$$

der rechnerisch das leistet, was die Abb. 126 zeichnerisch tut. Darin sind J_0 die Lichtstärke des Geleuchts zum Leuchtenfußpunkt, J_d die Lichtstärke zu dem Abstand d , Glm die verlangte Gleichmäßigkeit, n die Anzahl der

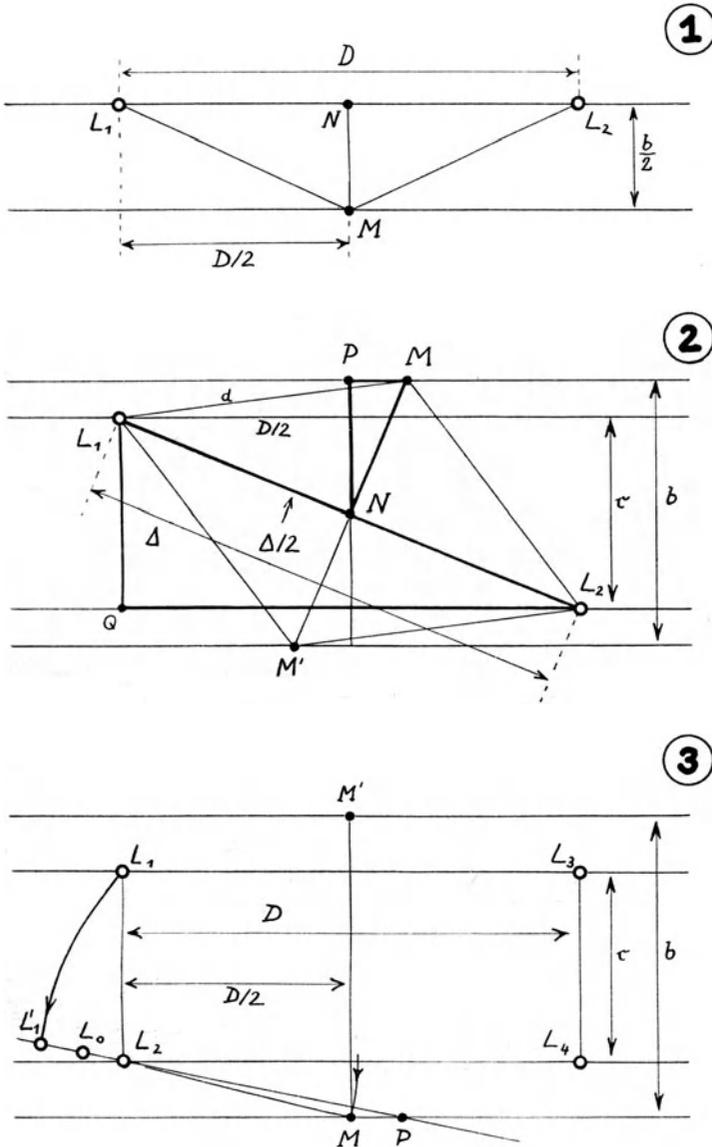


Abb. 125. Zeichnerische Abstandsbestimmung

Lichtquellen, die in unmittelbarer Nähe des Punktes M liegen und l die Lichtpunkthöhe. Unsicher ist darin nur J_d , weil d selbst noch unbekannt ist. Doch hat man meist schon einen groben Näherungswert für d aus einer Abschätzung der Lichtverteilung und gemäß der Lichtpunkthöhe. Hier können die Anhaltswerte (Aufstellung 36) gute Dienste tun. Man wird dann zu diesem geschätzten d' das zugehörige $J_{d'}$ aus der Lichtverteilung nehmen und d berechnen. Weicht dann d sehr von d' ab, so wird man die Rechnung noch einmal mit dem neu gewonnenen d wiederholen und dadurch einen hinreichend guten neuen Wert für d erhalten. In vielen Fällen wird schon die erste Berechnung von d genügen. Wesentlich für diese Rechnung ist, daß nicht schon die Lampenleistung bekannt zu sein braucht; denn es kommt nur das Verhältnis J_d/J_0 vor.

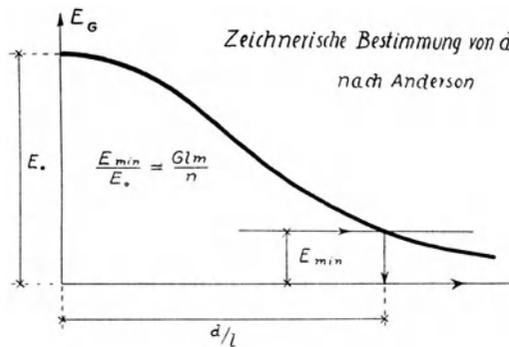


Abb. 126

Da die Lichtpunkthöhe für die Abstandsberechnung bekannt sein muß, so ergibt sich, daß zur Erledigung einer Straßenbeleuchtungsberechnung mindestens bekannt sein müssen: 1. Lichtpunkthöhe, 2. Gleichmäßigkeit, 3. Geleuchtart, 4. Straßenbreite, 5. Abstand der Lichtpunktzeilen.

Für nicht achsenspiegelbildliche Geleuchte wird man die Abstandsbestimmung nach demjenigen Schnitt des Lichtverteilungskörpers vornehmen, der in Richtung der Straße liegt. In der Abstandsbestimmung ändert sich also nichts. Wenn die Nichtachsenspiegelbildlichkeit sehr groß ist, d. h. ist das Geleucht für sehr große Abstände bestimmt, dann werden die Lichtstärken der Querverteilung kaum für die Längsrichtung der Straße wirksam. Ist sie aber klein, so wird man hierbei auf die Unterschiede in Längs- und Querverteilung verzichten können.

6. Streckenbeleuchtung. Als solche bezeichnet man die Beleuchtungsverteilung längs der Verbindungsstrecke zweier Nachbargeleuchte, soweit sie entweder nur von einem der Geleuchte oder von beiden stammt. Für den Beleuchtungsentwurf ist nur die erste Art brauchbar.

Man gewinnt sie unmittelbar aus der Grundbeleuchtung des Geleuchte. Als Rechtswerte dienen bei dieser die Verhältnisse d/l , als Hochwerte die zugehörigen E_G -Beträge. Zwei einfache Maßnahmen führen von ihr zur Streckenbeleuchtung:

1. Man zieht eine Gleichgerichtete unter der d/l -Geraden und versieht sie mit einer solchen Teilung, daß unter jedem d/l -Wert der wirkliche Abstand steht; der sich also ergibt, wenn man d/l mit dem gewählten l_0 der Lichtpunkthöhe erweitert; also $d = l_0 \cdot d/l$. So kommt unter $d/l = 2$ bei $l_0 = 10$ m der Wert $d = 20$ m. Diese neue d -Achse ordnet von selbst die richtigen E_G -Werte den wahren Abständen zu. Man führt dies aus bis zu Abstandswerten $d = \sqrt{D^2 + B^2}$.

2. Man erweitert alle E_G -Werte mit $1/l^2$ gemäß $E = \frac{1}{l^2} \cdot E_G$.

Die so entstehenden Zahlen sind die Beleuchtungsstärken, die zu den wahren Abständen gehören, noch bezogen auf 1 klm (Abb. 120).

Man wird tunlichst die E - d -Kurve der Streckenbeleuchtung bildlich auftragen. Offensichtlich ist bei Veränderung der Lichtpunkthöhe eine neue Streckenbeleuchtung ebenso schnell aus der Grundbeleuchtung zu gewinnen.

Für häufige Verwertung eines Geleuchts wird man unter der E_G -Kurve, wie das in Abb. 120 geschehen ist, von vornherein eine Reihe von Geraden zeichnen, die zu den in Frage kommenden Lichtpunkthöhen gehören und die entsprechenden Abstandsteilungen tragen; neben ihnen wird man die zu ihnen gehörenden Werte $1/l^2$ angeben, so daß jede gewünschte Streckenbeleuchtung allein durch die Erweiterung der E_G -Werte mit $1/l^2$ gewonnen werden kann. Liegt die Kurve der Grundbeleuchtung nicht vor, so wird man ebenso vorgehen wie bei ihrer Herstellung und das Produkt $J \cdot f$ sogleich mit $1/l^2$ erweitern. An Stelle der Multiplikation mit $1/l^2$ kann man auch auf der Hochwertachse der E_G -Kurve eine neue Teilung anbringen derart, daß bei $E_G = 1$ die neue Teilung den Wert $1/l^2$ annimmt; dann lassen sich die E_G -Werte unmittelbar mit der neuen Leiter als E -Werte ablesen.

7. Die Flächenbeleuchtung. Erforderlich ist nun die Kenntnis der Beleuchtungsverteilung über der ganzen Fläche, also die „Flächenbeleuchtung“. Diese läßt sich auf verschiedene Weise finden. Als Fläche wählt man dazu das Stück der Straße, das zwischen zwei Nachbarlichtquellen liegt; man nennt es „Grundstreifen“.

Der erste Weg ist nur anwendbar bei achsenspiegelbildlicher Lichtverteilung. Man entwirft einen Grundriß der Straßenfläche und legt auf ihm die Punkte fest, für die die E -Werte ermittelt werden sollen. Die Punkte, die man wählt, sind zweckmäßig die Ecken von Quadraten, die die Fläche überdecken. Die Größe der Quadrate dieses Netzes wird durch Länge und Breite des Straßensstückes sowie durch die Genauigkeit bestimmt sein, mit der die Straßenbeleuchtungsberechnung durchgeführt werden muß. Infolge Achsenspiegelbildlichkeit der Lichtverteilung geht durch jeden

Punkt eine auch durch den Leuchtenfußpunkt gehende Strecke, über der die Streckenbeleuchtung Gültigkeit hat. Man überträgt (Abb. 127) den wahren Abstand eines jeden Punktes, gerechnet vom Lichtquellenfußpunkt, auf die Abstandsbachse der Beleuchtungskurve, liest den zugehörigen E -Wert ab und trägt ihn in den betreffenden Flächenpunkt ein. So erhält man die Flächenbeleuchtung.

Der Grundstreifen erhält seine Beleuchtung von mindestens zwei Lichtquellen. In Abb. 127 sind sie in 45 m Abstand angenommen.

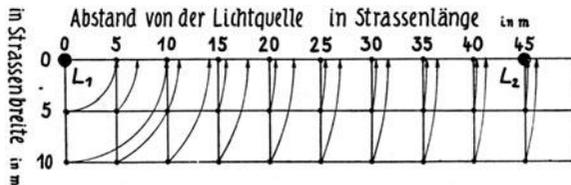


Abb. 127. Von der Flächen- zur Streckenbeleuchtung

Beide Geleuchte liefern die gleiche Flächenbeleuchtung, nur in entgegengesetzter Richtung. Man hat daher die Flächenbeleuchtungen beider Geleuchte punktweise zu addieren. Das erst liefert die Flächenbeleuchtung im Grundstreifen von beiden Geleuchten, bezogen auf 1 km je Geleucht.

8. Verlangte Werte und Lampenleistung. Durch Din-Blatt 5035 sind die Beleuchtungsstärken, die für Straßen empfehlenswert sind, festgesetzt. Die Beträge gibt Aufstellung 35 wieder. Sie enthält Mindestwert und empfohlenen Wert sowohl der mittleren Beleuchtungsstärke wie derjenigen an der ungünstigsten Stelle.

Die Notwendigkeit dieser E -Werte erhellt aus der Abnahme des Grenzkontrasts und der Zunahme der Sehschärfe sowie der Geschwindigkeit der Leuchtdichte- und Formwahrnehmung (Abb. 65, 92, 93). Die Sehschärfe ist überdies durch die Bewegung des Wahrnehmenden bestimmt: so betrug bei gleichbleibendem $E = 25 \text{ lx}$ die Sehschärfe in Ruhe 85 v. H., in fahrender Straßenbahn 66 v. H. und von fahrendem Kraftwagen aus nur 52 v. H. des erreichbaren Höchstwertes (8).

Im Gegensatz zu denjenigen Beobachtern, die dem Gefährdungsgegenstand bei Beleuchtungsprüfung ihre volle Aufmerksamkeit widmen, kommt für den unvoreingenommenen Verkehrsstreckenbenutzer die durch den Verkehr selbst belastete Aufmerksamkeit als erschwerend hinzu; diese läßt ihn Warnungszeichen oder Gefahrenquellen erst erkennen, wenn sie sich der Aufmerksamkeit grob aufdrängen, also den möglichen Schwellenwert erkennbarer Leuchtdichten weit überschreiten. Die richtige Einschätzung dessen, wie Gefahrwahrnehmung möglich ist, macht es verständlich, weshalb auf verkehrsreichen Straßen höhere Beleuchtungsstärken einzuhalten sind als auf solchen mit schwachem, aufmerksamkeitschonenden Verkehr (9).

Die Beleuchtungsstärken bedingen die Größe der Lampenleistungen, die je Geleucht aufzuwenden sind. Bildet man für die (auf 1 klm bezogene) Flächenbeleuchtung die mittlere Beleuchtungsstärke, so möge sich $E_{m,0}$ ergeben. Verlangt sei aber E_m . Dann ist eine Lampe solcher Leistung nötig, daß ihr Lichtstrom den Wert

$$\Phi = \frac{E_m}{E_{m,0}} \text{ (in klm)}$$

hat. Man wird die Lampe wählen, deren Lichtstrom Φ^* diesem Betrag Φ am nächsten kommt (Aufstellungen 7 bis 9). Ihre Leistung sei N^* .

Waren alle bisherigen Bestimmungen genau oder genähert, so tritt hier die größte Willkür ein, indem man auf ganz bestimmte Lampenleistungen angewiesen ist. Im allgemeinen wird man eine Überbeleuchtung vorziehen, um Verstaubungs- und Alterungswirkungen auszuschalten, soweit nicht wirtschaftliche Grenzen gesetzt sind. Eine gewisse Anpassung an verlangte Lichtströme wird bisweilen auch dadurch möglich sein, daß man die Geleuchte abwechselnd mit Lampen verschiedener Leistung besteckt.

Die gesamte elektrische Leistung einer Straße der Länge L ergibt sich als

$$N_0 = N^* \cdot L/\delta,$$

wobei δ der mittlere Abstand zweier Nachbarlichtquellen in Straßenrichtung ist. Bei Doppelreihe ist $\delta = D/2$, mit D als Paarabstand.

Sagt die gefundene Lösung nicht zu, so steht es frei, zunächst die Lichtpunkthöhe zu verändern oder die Lichtpunktanordnung oder eine andere Geleuchtart zu wählen. Was eine Abänderung der Forderungen angeht, so wird man möglichst zunächst nur die Beleuchtungsstärken, dann auch die Gleichmäßigkeiten verändern.

Das endgültige Beleuchtungsfeld gewinnt man, indem man alle Zahlwerte der auf 1 klm bezogenen Flächenbeleuchtung mit dem Wert Φ^* (in klm) erweitert. Zwecks Veranschaulichung pflegt man diese Verteilung isometrisch aufzutragen; oder man bildet das Isoluxenfeld (vgl. Abb. 6).

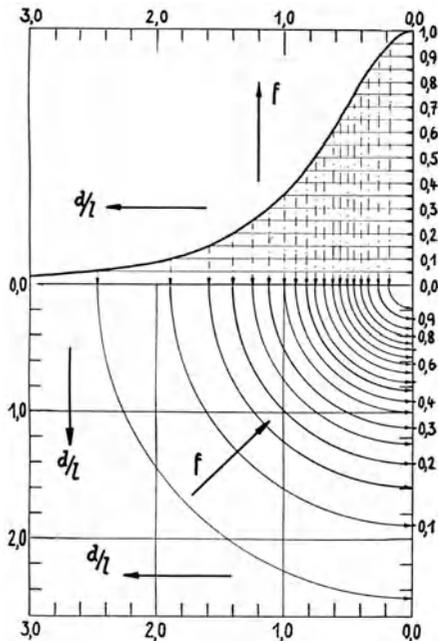


Abb. 128. Isoluxenfeld der Punktlichtquelle

9. Der übliche Rechnungsgang. Der Übersicht halber sei der geschilderte Weg noch einmal kurz zusammengefaßt. Man wird festsetzen E_m und Glm . Gegeben ist ferner die Straßenbreite b . Man wählt frei eine Lichtpunkthöhe l ; ferner, soweit erforderlich, den Reihenabstand c . Ferner wählt man eine Geleuchtart an Hand der Lichtverteilung und entschließt sich zu einer Lichtpunktanordnung. Dann beginnt die eigentliche Bearbeitung. Mit der f -Kurve ermittelt man die Grundbeleuchtung E_G des Geleuchts. Mit dieser und der Gleichmäßigkeit gewinnt man den Lichtpunktabstand. Aus der Grundbeleuchtung des Geleuchts stellt man (für achsenspiegelbildliche Lichtquellen) aus der Lichtpunkthöhe die wahre Beleuchtungsverteilung und aus dieser die Flächenbeleuchtung eines Lichtpunktes fest. Nun bildet man die Gesamtflächenbeleuchtung für mehrere Lichtpunkte und berechnet mit ihr und der verlangten Beleuchtungsstärke die erforderliche Lampenleistung.

Die Beleuchtungsbestimmungen können auch auf ganz anderen Wegen durchgeführt werden. Es sei auf das Rechenblatt zur Bodenbeleuchtung von Nitzsche (10) und auf eine Rechentafel (11) verwiesen.

10. Bearbeitung bei nichtachsenspiegelbildlichen Geleuchten.

Man macht von der „Grundbeleuchtung“ keinen Gebrauch. Man bildet zunächst — ein für alle Mal — die „Flächenbeleuchtung“ der Punktlicht-

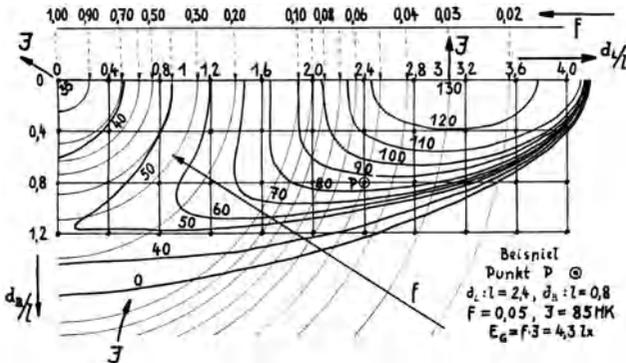


Abb. 129. Überlagerung von Isoluxenfeld, Lichtverteilungsfeld und Straßennetz

quelle. Sie entsteht dadurch, daß man das Schaubild der Waagrechtbeleuchtung um die Achse Lichtquelle—Lichtquellenfußpunkt dreht. Die Kurve beschreibt dann die gesuchte Fläche. Aus der f -Kurve wird so die f -Fläche. Man verwandelt nun die räumliche Darstellung in eine ebene, indem man die Höhenlinien dieses Beleuchtungsgebirges auf einer Ebene aufträgt. So gelangt man zum Isoluxenfeld der Punktlichtquelle (Abb. 128). Es besteht aus mittelpunktsgeichen Kreisen. Die Kreisringbreiten sind je nach dem Gefälle des Gebirges verschieden.

Man überlagert nun diesem Feld ein rechtwinkliges Achsenfeld, das als Längen- und Breitendarstellung der Straße dient. An Stelle der Lichtverteilung nimmt man das Lichtverteilungsfeld des Geleuchts zweckmäßig auf Durchsichtpapier. Dieses Feld muß auf die Längeneinheit der Lichtpunkthöhe bezogen sein. Man bringt die Anfangspunkte aller Felder zur Deckung. Abb. 129 zeigt die Überlagerung eines Lichtverteilungsfeldes eines nichtachsenspiegelbildlichen Geleuchts (dicke, krumme Linien), des Isoluxenfeldes (Kreisbogen) und des Straßennetzes (Gerade).

Für diejenigen Punkte des Straßennetzes, für die es erwünscht erscheint, multipliziert man die Werte f und J . Dazu müssen die Werte meist durch Einschalten zwischen den angegebenen Kurvenwerten gewonnen werden. Das bereitet bei zweckmäßiger Werteeinteilung der Felder keine Schwierigkeiten. Geringfügige Fehleinschaltungen heben sich meist heraus (26).

Die gewonnenen Wertefelder sind solche der Grundbeleuchtung des Geleuchts. Die wirklichen, zunächst auf 1000 lm bezogenen Beleuchtungsfelder erhält man wiederum durch Erweiterung der E_G -Werte mit $1/l^2$ und Umwandlung der Achsen in Länge und Breite aus dem Verhältnismaßstab d/l in wahre Längen und Breiten mit

$$d_L = d_L/l \cdot l_0 \quad \text{und} \quad d_B = d_B/l \cdot l_0.$$

Der weitere Weg ist genau der bei Achsenspiegelbildlichkeit. Es kann dies Verfahren auch auf achsenspiegelbildliche Geleuchte angewandt werden.

11. Blochs Formel für E_m . Die Bestimmung von E_m ist bei vorhandenen Anlagen (durch Messung) und bei geplanten Anlagen (durch Berechnung) immer eine mühsame Arbeit. Daher hat die von L. Bloch auf Grund umfangreicher Erfahrungen aufgestellte Formel zur näherungsweise Berechnung der mittleren Beleuchtungsstärke für den Beleuchtungstechniker beträchtliche Bedeutung. Sie lautet (12):

$$E_m = \frac{E_{\max}}{0,55 + 0,45\sqrt[3]{(UG_1)^2}}. \quad [41]$$

Sie gestattet also, aus den Grenzwerten E_{\max} und E_{\min} , die ja UG bestimmen, die mittlere Beleuchtungsstärke zu bestimmen. Zur Ersparung der FormelAuswertung dient das Rechenblatt Abb. 130, eine Fluchtentafel, bei der erstens die Verbindung von E_{\min} und E_{\max} die Zahl UG (die drei inneren Leitern) liefert, zweitens die Verbindung von UG (rechte äußere Leiter) und E_{\max} den gesuchten Wert E_m (linke äußere Leiter). Die beiden UG -Leitern enthalten noch Angaben über die Beurteilung von Ungleichmäßigkeitswerten, sowohl für Innen- wie für Außenbeleuchtungen. Die Formel von Bloch setzt voraus, daß die Beleuchtungsverteilung einen gleichmäßigen Abfall zeigt, daß sie also zwischen Gipfel und Tal nicht noch Nebengipfel und Täler besitzt (28).

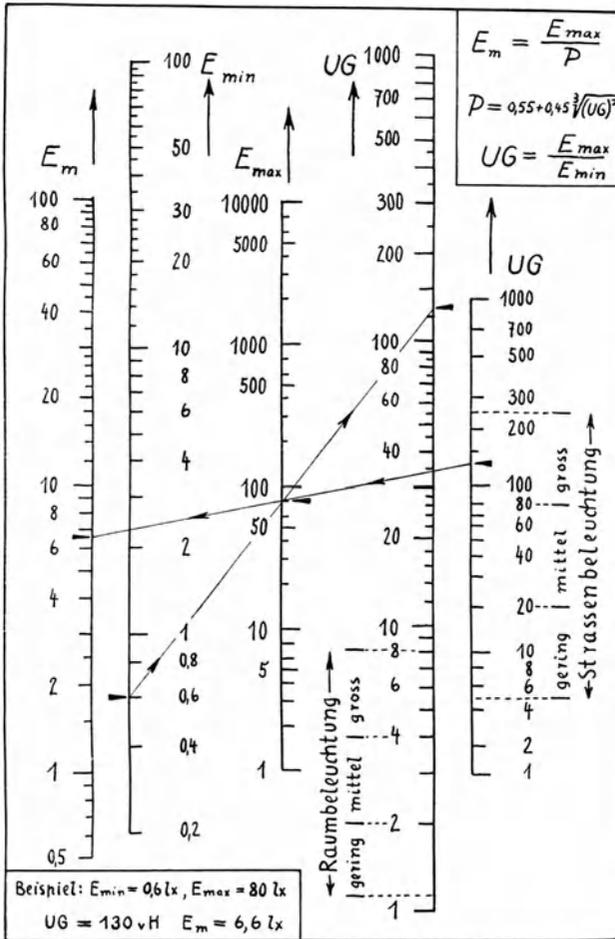


Abb. 130. Rechenblatt für E_m

12. Blendung und Blendungslichtstärke. Bei keiner Beleuchtungsanlage ist die Blendung durchweg so wenig ausgeschaltet wie bei der Straßenbeleuchtung. Durch das Bestreben, große Gleichmäßigkeit zu erhalten, werden Breitstrahler verwendet, die in hohe Winkelbereiche mit beträchtlichen Lichtstrahlen strahlen. Da die Sichtflächen der Geleuchte nicht gerade groß im Vergleich zur Lichtstärke zu sein pflegen, so fallen die Abstrahlungsleuchtdichten durchschnittlich ganz erheblich aus. Es kommt hinzu, daß die bei durchschnittlichen Ansprüchen erreichten Beleuchtungsstärken

ihrem Vollwert nach sehr gering sind, so daß die Leuchtdichten aller beleuchteten Flächen recht gering sind. Die Anpaßleuchtdichte ist also klein, die Blendungsleuchtdichte groß; daher tritt notwendig Blendung auf (15).

Man kann sagen, daß nur die mit Tiefstrahlern versehenen Straßen eine blendungsfreie Beleuchtung besitzen. In allen anderen Fällen liegt ein grundsätzlicher, bis jetzt in keiner Weise behobener Mangel der Straßenbeleuchtung vor. Gleichmäßigkeit und Blendungsfreiheit stellen bei Breitstrahlern Widersprüche dar, die mit den zur

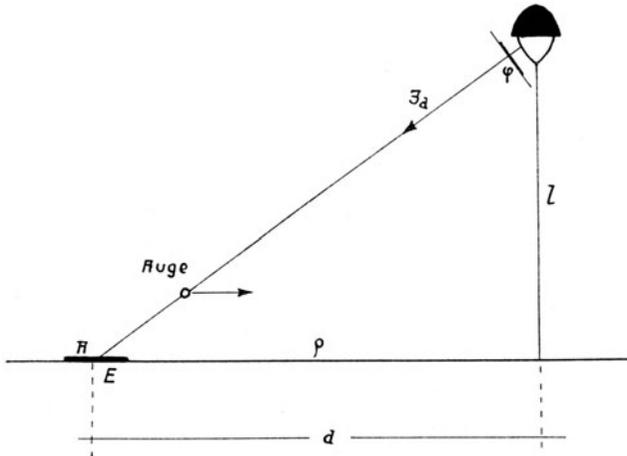


Abb. 131. Zur Formel der Blendlichtstärke

Zeit für Straßenbeleuchtungen angesetzten Mitteln nur schwer zum Ausgleich gebracht werden können. Man kann immer wieder feststellen, daß viele Straßenbeleuchtungen schlechteres Sehen ermöglichen als etwa der Vollmond mit 0,26 lx, obgleich dann die E -Werte erheblich geringer sind, als auf der künstlich beleuchteten Straße. Bei Vollmond herrscht eben vorzügliche Gleichmäßigkeit und Blendungsfreiheit (1), (7).

Die Leitsätze für Beleuchtung (2) geben den Hinweis, daß bei Straßenbeleuchtung im Bereiche 60 bis 90° die Leuchtdichte $2 sb$ nicht überschritten werden soll.

Die Gesichtspunkte, nach denen Blendungsfreiheit anzustreben ist, können zur Zeit durch den Näherungsausdruck (13)

$$J_d = 5 \cdot \frac{l \cdot \varphi}{d} \cdot \sqrt[3]{e} \quad [42]$$

angegeben werden. Darin ist (Abb. 131) J_d die höchste Lichtstärke in Richtung auf den Abstand d , die zulässig ist, ohne daß Blendung eintritt; d ist der

Abstand des Punktes, zu dem die Lichtstärke strahlt, die untersucht werden soll; ρ ist der Rückwurfwert der Straßendecke und φ die Sichtfläche des Gelechts. Die Beziehung besagt: Die nicht blendende Lichtstärke darf um so größer sein, je größer die Lichtpunkthöhe, die Sichtfläche und der Lichtrückwurf ist und je kleiner der Abstand wird.

Zur schnellen Auswertung der Beziehung dient das Rechenblatt Abb. 132. Man geht darin z. B. von l ($= 10$ m) über d ($= 30$ m) auf die mittlere Leiter; von dem gewonnenen Punkt über den Rückwurf ρ ($= 0,2$) zur Leuchtdichten-

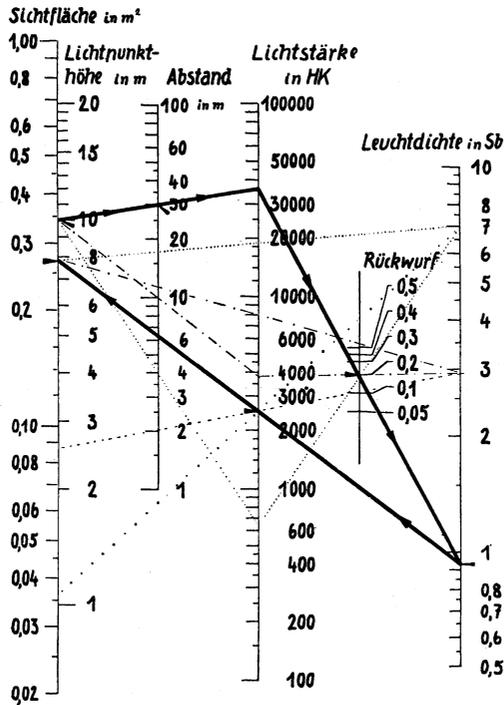


Abb. 132. Rechenblatt für Gelechtsichtflächen

leiter B ($= 0,93$ Sb). Von hier geht man über die Lichtstärke J ($= 2500$ HK) zur notwendigen Sichtfläche φ ($= 0,27$ m^2). Man findet so z. B. zu $d = 30$, 10 und 4 m zu 2500 HK die Sichtflächen 0,27, 0,087 und 0,037 m^2 . Oder zu den gleichen Richtungen bei gleicher Sichtfläche $\varphi = 0,27$ m^2 die zulässigen Lichtstärken 2500, 8000 und 19000 HK. Die Lichtverteilung, die sich so ergibt, ist die eines ausgesprochenen Tiefstrahlers, falls gleiche Sichtflächen nach allen Seiten angenommen werden. Ein Breitstrahler muß hiernach völlig verworfen werden, sofern seine großen Lichtstärken nicht durch hinreichend große Sichtflächen unwirksam gemacht werden. — Dem gleichen Ziel der Feststellung, ob eine Lichtquelle im Rahmen ihrer Beleuchtung blendet, dient auch die bedeutsame graphische Ermittlungstafel von C. G. Klein (14).

Für die Entwicklung blendungsfreier Geleuchte sind die Hochleistungsdampflampen zweifellos von Vorteil, nämlich auf Grund ihrer geringeren Leuchtdichte. Doch kommt es bei Beleuchtungsanlagen auf die Sichtfläche des Geleuchts und nicht der Lichtquelle an; allerdings werden sich mit den Dampf lampen größerer Ausdehnung auch größere Leuchtflächen besser ausleuchten lassen.

Wirkliche Blendungsfreiheit läßt sich voraussichtlich entweder nur durch beträchtliche Vergrößerung der Geleuchtsichtflächen (vgl. Abb. 131) im Verein mit einer derartigen Erhöhung der mittleren Be-

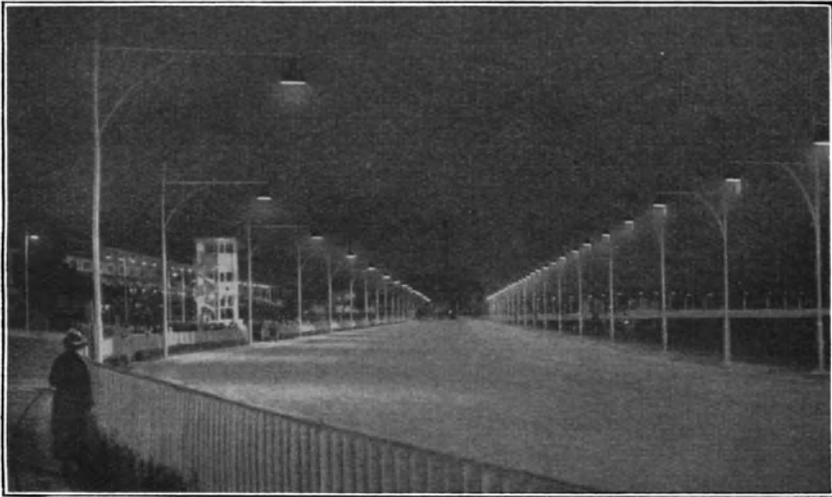


Abb. 133. Blendungsfreie Tiefstrahlerbeleuchtung (Rennbahn Ruhleben)

leuchtungsstärke erreichen, daß die Umfeldleuchtdichten die Blendungsleuchtdichten unwirksam machen; also durch ganz erhebliche Steigerung des Energiebedarfs, wie er zur Zeit noch nicht allgemein tragbar erscheint. Oder durch folgerichtige Verwendung von Tiefstrahlern, die aber in solcher Zahl angebracht werden müßten, daß ebenfalls eine Kostenerhöhung aufträte (Abb. 133).

Einsatz von reinen Tiefstrahlern würde die Aufhellung der Häuserfronten allerdings nicht zustande kommen lassen. Diese wird aber immer wieder für bewohnte Straßen — oft zum Leidwesen der Anwohner — verlangt, um den Straßenraum zu betonen und aus allgemeinen Sicherheitsgründen. Eine Frontenaufhellung ließe sich aber mit Tiefstrahlern erzielen durch Lichtauslässe an den den Häusern zugewandten Geleuchtseiten. Zur vollen Ausnutzung dieses Lichtes wäre helle Häuserbekleidung (wie für Tageslichtbeleuchtung) zu fordern. Besser aber als die Zulassung der Blendung durch Verwendung von Starkbreitstrahlern dürfte eine Hausfrontaufhellung mit Hilfe von Sondergeleuchten sein.

Für den Befahrer einer Straße kommen als beleuchtungsmäßig umgestaltend die Kraftwagenscheinwerfer hinzu. Sie verursachen häufig Blendungen, welche die der Anlage weit überschreiten. Hier ist aber die Aussicht für Abhilfe gegeben durch Verwendung von polarisiertem Scheinwerferlicht, das dem entgegenblickenden Auge dadurch unsichtbar gemacht wird, daß die Windschutzscheibe ebenfalls als Polarisator verwandt wird. Durchlaßebenen von Scheinwerfer und Scheibe müssen senkrecht aufeinander stehen. Diese Sache gehört aber nicht der reinen Beleuchtungstechnik an, sondern der Lichttechnik (16), (20), (22).

Für die Art der Beleuchtung, welche die Kraftfahrzeugscheinwerfer hervorzurufen haben, liegen eingehende Bestimmungen vor (21).

Den Berechnungen über die Blendlichtstärke liegt die Voraussetzung zugrunde, daß die Leuchtdichte auf der ganzen Straßenfläche der Beleuchtungsstärke verhältnisgleich ist. Die Erfahrung hat gezeigt, daß dies nicht der Fall ist, daß vielmehr jede Straßendecke ihre eigene Leuchtdichteverteilung zeigt zu derselben Beleuchtungsverteilung. Für Beleuchtungsbewertungen, die nicht von der Beleuchtung, sondern von der Leuchtdichte ausgehen sollen, sind also diese Verteilungen, die in Kurvenform vorliegen, heranzuziehen. Die Betondecke zeigt am meisten eine Übereinstimmung von *E*- und *B*-Verteilung (17), (24).

13. Farbige Straßenbeleuchtung. Der Vorzug farbiger Beleuchtung gilt heute auf Grund der Forschungen über die günstigen Wahrnehmungsbedingungen bei farbigem Licht (25), XIII (17) und auf Grund der praktischen Erfahrungen als sichergestellt, ganz abgesehen von der größeren Betriebswirtschaftlichkeit trotz höherer Beschaffungskosten. Reinfarbige Beleuchtung, wie durch Quecksilber- oder Natriumlicht, bewährt sich aber nur auf Fernverkehrs- oder Ausfallsstraßen, nicht aber auf städtischen Hauptstraßen.

Bei den letzten tritt dann infolge von Schaufensterlicht ein Durcheinander von Glüh- und Dampflichten ein, das sich stört. Licht gilt nicht als „Mischlicht“, wenn es von Lichtquellen ausgeht, die an verschiedenen Stellen angeordnet sind. Auch würde auf Straßen mit starkem Verkehr die Änderung des Farbeindrucks, nicht zuletzt des Gesichts, von Nachteil sein. Wenn aber, so sollte das Dampflicht nicht nur stellenweise, sondern durchgängig angeordnet werden, denn der Wechsel von Lichtfarben je nach Straßen beeinträchtigt die Wahrnehmung. Auf Wohnstraßen ohne Schaufenster und starken Verkehr dürfte das Natriumlicht aber wohl angebracht sein. Für das Sehen bei blauem Licht tritt bei geringeren Beleuchtungsstärken der Vorteil der Farbe dadurch hervor, daß das Sehen als Stäbesehen beginnt, für das höhere Blauempfindlichkeit vorliegt; die Ansprüche sinken also, oder die Wahrnehmungsbedingungen sind besser. Wohl 90 v. H. aller Straßenbeleuchtungswahrnehmung erfolgt bei Stäbesehen (18).

Um die hohe Wirtschaftlichkeit des Dampflichtes auszunutzen und trotzdem eine Farbverzerrung zu vermeiden, wendet man neuestens mit Erfolg auch auf Straßen Mischlicht an, das im Ver-

hältnis 1 : 1 bis 1 : 10 je nach hohen oder geringen Unverzerrungsansprüchen eingehalten werden soll. Mischlichtgeleuchte sind überall herausgebracht.

Der eigentliche Entwurf wird durch die Verwendung von farbigem Licht nicht berührt.

14. Lotrechtbeleuchtung. Im Abschnitt II. 7 ist nachgewiesen, daß die Lotrechtbeleuchtung aus der Waagrechtbeleuchtung durch Multiplikation mit d/l gewonnen werden kann. Hier von kann jederzeit Gebrauch gemacht werden, wenn die Waagrechtbeleuchtung bekannt ist. Die Multiplikation darf aber nur mit den E -Werten vorgenommen werden, die von einer einzigen Lichtquelle stammen; denn die Lotrechtbeleuchtung zwischen zwei Lichtquellen stammt nur von der einen. Man hat an jeder Stelle zwei Lotrechtbeleuchtungen in den Hauptrichtungen der Straße zu unterscheiden (Abb. 134). Bei Blickrichtung von links nach rechts nimmt man eine Beleuchtungsverteilung wahr, die der dick ausgezogenen Kurve entspricht, in umgekehrter Blickrichtung die dünn ausgezogene. Es ist nur jeweils die Wirkung eines Lichtpunktes bis zum zweitnächsten berücksichtigt. Zu der strichgepunkteten Kurve ist also das geschraffte Stück addiert.

Einem Punkte kommen je nach den Hauptblickrichtungen zwei Hauptwerte von E_{10} zu. Eine gesamte Flächenbeleuchtung für Lotrechtbeleuchtung bestimmt man daher so, daß man nur die auf einer Seite benachbarter Lichtquellen liegenden Lot-

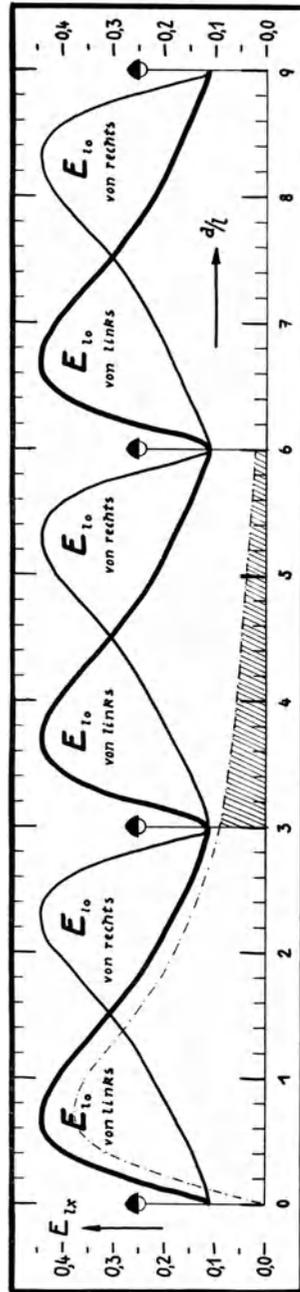


Abb. 134. Die beiden Lotrechtbeleuchtungsverteilungen zu den Hauptblickrichtungen

rechtbeleuchtungen addiert. Man kann dann aber eine Straßenbeleuchtung ebenso auf Lotrechtbeleuchtung hin bearbeiten.

Man legt aber heutzutage immer die Waagrechtbeleuchtung allen Bewertungen zugrunde. Alle E - und Glm -Werte sind für waagerechte Beleuchtung gegeben. Man kann zwar auch allein aus der Lotrechtbeleuchtung Abstandsberechnungen vornehmen, ganz entsprechend der mitgeteilten Art für E_w . Da aber derartige Auswertungen bisher in der Praxis kaum üblich sind, sollen sie hier nicht dargestellt werden. Hervorgehoben werden soll aber, daß von allen Vertretern der Internationalen Beleuchtungskommission die Ansicht vertreten wird, daß zu einer vollen Bewertung der Beleuchtungsgüte einer Straße nicht nur die waagerechte, sondern auch die lotrechte Beleuchtung herangezogen werden muß. Der Grund hierfür ist, daß das Erkennen von Fahrzeugen auf Straßen dadurch erleichtert wird, daß die lotrechten Flächen von ihnen gut erhellt werden. Es wird aber auch die Auffassung vertreten, daß es auf hohe Lotrechtbeleuchtung nicht ankomme, da das Erkennen von Fahrzeugen gerade durch den Hellgegensatz der geringen Leuchtdichte der lotrechten Fahrzeugflächen und der hohen Leuchtdichte der waagerechten Straßenbeleuchtung zu erfolgen hätte (19), (1).

Die Lotrechtbeleuchtung wird infolge des steilen Anstieges von E_{10} hinter einer Lichtquelle immer starken Schwankungen unterworfen sein. Daher zeigt ein fahrendes Fahrzeug auf künstlich beleuchteter Straße zeitlich sehr starke Schwankungen der Helligkeit seiner lotrechten Flächen. Das wird meist das Sehen stören, kann aber auch durch die Helligkeitswechsel des Auges Aufmerksamkeit auf sich lenken. Auf ein sich bewegendes Fahrzeug wird das Auge daher leichter aufmerksam als auf ein nicht bewegtes. Diese Ungleichmäßigkeit läßt sich nicht ohne anderen Nachteil durch sehr hohe Lichtstärken bei großen Abstrahlwinkeln (Breitstrahler) verringern, denn dadurch würde die Blendung wieder verstärkt; oder durch geringe Abstände der Lichtpunkte, wodurch allerdings die Anlagekosten hoch würden.

In Hinsicht auf Gleichmäßigkeit ist die Lotrechtbeleuchtung von Natur nicht günstig geartet. Bringt man zwei Lichtquellen in den dreifachen Abstand der Lichtpunkthöhe, so erhält man für punktförmige Lichtverteilung für $J = 1$ HK bei Waagrechtbeleuchtung im Höchstfall $E_{\max} = 1,00 + 0,032$, also $1,032$ lx, im Geringstfall $E_{\min} = 2 \cdot 0,17$, = also $0,34$ lx; die Gleichmäßigkeit ist also $Glm = 0,330$. Bei Lotrechtbeleuchtung ergibt sich entsprechend im Höchstfall $E_{\max} = 0,385 + 0,067$ lx, also = $0,452$ lx, im Geringstfall $E_{\min} = 0,09 + 0,02 = 0,11$, also $Glm = 0,244$, also rund zwei Drittel vom obigen Wert! Abstandsverringern hat bei Lotrechtbeleuchtung nur geringe verbessernde Wirkung; denn bei ihr tritt im Geringstwert immer nur eine Beleuchtungsstärke auf, die von zwei Lichtquellen kommt, deren eine den Abstand $d = 3l$, deren andere den Abstand $d = 6l$ (!) vom Punkt mit E_{\min} hat. Die Ungleichmäßigkeiten werden also meist bei Lotrechtbeleuchtungen schlechter sein als bei Waagerechter. Da man aber noch meist weit davon entfernt ist, auch nur bei Waagrechtbeleuchtung in Gleichmäßigkeits Hinsicht ausreichende Verhältnisse zu erhalten, so werden Gleichmäßigkeitsforderungen für Lotrechtbeleuchtung zur Zeit noch zurückgestellt. Da sich das Auge aber leichter einer Leuchtdichtezunahme als einer gleich starken Abnahme anpaßt, so ist es vorteilhaft, daß die Lotrechtbeleuchtung langsamer abfällt als ansteigt.

Die Erfahrung hat gezeigt, daß eine Lotrechtbeleuchtung dann als gut gelten konnte, wenn die waagerechte es war. Daher ist ein Verzicht auf eine gleich gründliche Bearbeitung berechtigt.

15. Fernverkehrsstraßenbeleuchtung. Für Fernverkehrsstraßen ergibt sich trotz der sonst so besonders schwierigen Beleuchtung einer Straße eine vollkommene Beleuchtungsart, sofern die Straße in zwei völlig getrennte Teilstraßen für je eine Fahrtrichtung zerfällt. Die sonst so lästige Blendung — durch feste und bewegliche Lichtquellen — wird dadurch ausgeschaltet, daß jede Strecke nur eine einseitig gerichtete Beleuchtung erhält, die in Blick- und Fahrt-

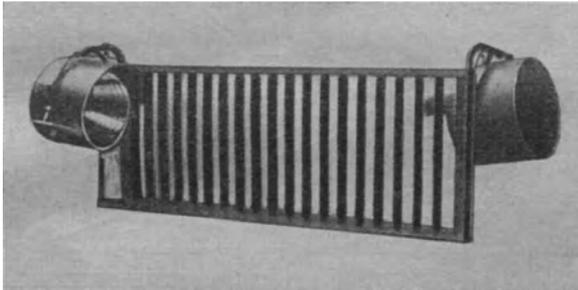


Abb. 135. Scheinwerfergruppe für gerichtete Teilbeleuchtung von Fernstraßen

richtung verläuft. Auf der Trennlinie zwischen beiden Fahrbahnen stehen die Masten für Scheinwerfer (Abb. 135), die die Straßenfläche schräg anleuchten. Schutzgitter sorgen dafür, daß Licht der Scheinwerfer einer Fahrbahn nicht auf die andere gelangt. So sieht der Fahrer selbst in keine Lichtquelle hinein; er hat vor sich eine blendungsfreie Straßenbeleuchtung (23).

Eine solche ist für die hohe Geschwindigkeit auf Fernverkehrsstraßen auch unerlässlich. Um im Wagen selbst die Wirkung der stark gerichteten, schattenreichen Beleuchtung aufzuheben, ist eine gewisse Aufhellung des Wageninnern erforderlich. Die Scheinwerferbeleuchtung kann aber auch nicht ganz entbehrt werden, um die Schatten, die vor dem Wagen liegen, aufzuhellen.

Die Planung ergibt grundsätzlich nichts Besonderes. Die Lichtverteilung des Scheinwerfers in der beabsichtigten Schrägstrahlage wird behandelt wie eine gewöhnliche Lichtverteilung. Geeignet sind Scheinwerfer mit schmalen kreisförmigen Lichtkegeln, deren Hauptachse auf einen Abstand $D = 3$ bis $5 l$ eingestellt wird, so daß der Lichtkegel eine lange Ellipse auf der Straßenfläche ausleuchtet. Diese Tatsache läßt noch eine Sonderbestimmung der Abstände zu.

Die größtzulässigen Abstände der Scheinwerfer lassen sich nämlich aus dem Hauptausstrahlwinkel β des Scheinwerfers, der Lichtpunkthöhe l und

der Straßenbreite B bestimmen (Abb. 136). Der Scheinwerfer muß eine Ellipse ausleuchten von der Breite der Straße. Daraus folgt für den Abstand W näherungsweise

$$W = \sqrt{\frac{B^2}{4 \operatorname{tg}^2 \beta} - l^2}.$$

Für die Ellipsenhauptachse in Straßenrichtung gilt dann:

$$A = l \cdot \left[\frac{\frac{W}{l} - \operatorname{tg} \beta}{1 + \frac{W}{l} \operatorname{tg} \beta} + \frac{\frac{W}{l} + \operatorname{tg} \beta}{1 - \frac{W}{l} \operatorname{tg} \beta} \right].$$

Da sich Ellipse an Ellipse anschließen muß — die außerhalb der Ellipsen liegenden Flächen müssen als mit Streulicht beleuchtet gelten, sonst muß

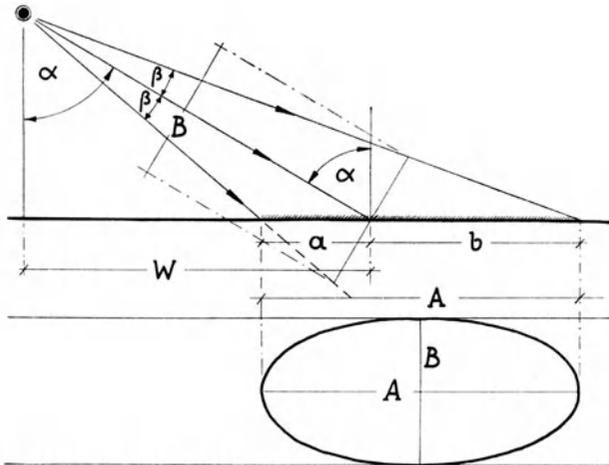


Abb. 136. Gerichtete Scheinwerferbeleuchtung

ein Verringerungsfaktor q angebracht werden, der um so kleiner ist, je höher die Ansprüche werden —, so ist A auch der höchstzulässige Abstand, in dem die Scheinwerfer anzubringen sind.

Ist z. B. $B = 10$ m, $l = 10$ m, $\beta = 15^\circ$, so wird $W = 15,5$ m, $A = 40$ m.

Soll die mittlere Beleuchtungsstärke E_m erzielt werden, so ist der Scheinwerfer mit solcher Lichtquelle zu bestücken, daß für den Lichtstrom der Zone β gilt: $\Phi_\beta = E_m \cdot A \cdot B$. Die geringste Beleuchtungsstärke liegt am äußersten Ellipsenpunkt. Ob die größte Beleuchtungsstärke in der Mitte des Lichtkegels liegt oder am vorderen Ellipsenrand, hängt von der Größe von α und β , sowie von der Form der Lichtverteilung innerhalb β ab.

Schrifttumsnachweis

(1) L. Schneider, ZS. f. techn. Phys. **5**, 469, 1924. — (2) DIN 5035, Leitsätze für Beleuchtung. — (3) E. Meyer, Li. La. **26**, 162, 1937. —

(4) L. Bloch, *Lichttechnik*, S. 285. — (5) R. G. Mylo in Bloch, *Lichttechnik*, S. 311. — (6) E. R. Anderson, *Li. La.* **22**, 92, 1933. — (7) E. Meyer, *Li. La.* **25**, 395, 1936. — (8) Osram, *TWL.* 17966, 1927. — (9) H. Lossagk, *Das Licht* **7**, 12, 1937. — (10) F. Nitsche, *Li. La.* **21**, 195, 1932. — (11) E. Meyer, *Das Licht* **3**, 176, 1933. — (12) L. Bloch, *Journ. f. Gasbel.* 1907, S. 152. — (13) In weiterer Vervollständigung und Vereinfachung des in (7) gegebenen Ausdrucks. — (14) C. G. Klein, *Li. La.* **20**, 163, 191, 1931. — (15) J. Schaer, *Das Licht* **4**, 225, 1934. — (16) W. Heller, *Das Licht* **7**, 87, 109, 1937. — (17) R. G. Weigel u. P. Schlüssler, *Das Licht* **5**, 161, 237, 1935. — (18) J. Teichmüller, *Li. La.* **22**, 510, 1933. — (19) L. Schneider, *Das Licht* **5**, 232, 1935. — (20) R. G. Weigel u. O. H. Knoll, *Das Licht* **6**, 157, 221, 1936; **7**, 17, 33, 59, 1937. — (21) F. Born, *Das Licht* **4**, 216, 1934; O. Höpke, *Das Licht* **6**, 150, 213, 1936. — (22) F. Born, *Das Licht* **3**, 31, 1933; **4**, 141, 1934. — (23) W. Hagemann, *Das Licht* **4**, 7, 1934. — (24) L. Schneider, *Das Licht* **5**, 82, 1935; E. v. d. Trappen, *Das Licht* **5**, 246, 1935. — (25) R. G. Weigel, *Das Licht* **5**, 211, 1935. — (26) E. Meyer, *Das Licht*, November 1937. — (27) G. Laue, *Einführung in die Lichttechnik*, Leipzig 1937. — (28) E. Meyer, *Li. La.* **25**, 584, 1936.

XVI. Schönheit der Beleuchtung

1. Allgemeine Richtlinien. Der Mensch, insonderheit der nordische, hat eine innere Beziehung zum Licht, die durch dessen technische Verwendung nicht gestört und verflacht werden darf. „Licht“ ist nicht nur Mittel zu einem Zweck, sondern ein Hochwert selber. Licht: die einzige Energieform, die der Mensch als Sinnbild für Heiliges und für die gestaltenden und erhaltenden Kräfte des Lebens gewählt hat. Hinweis darauf sind sinnbildliche Bräuche, wie Sonnenwendfeuer, Lebenslichter, oder auch Kerzen auf Altar und Weihnachtsbaum, und volksverbundene Zeichen, wie das Sonnenrad. Aber auch Ausdrucksweisen des Volksmundes wie: „das Licht der Welt erblicken“ oder „nicht sehen und doch glauben“, die das Licht zur höchsten sinnlichen Wahrnehmungsform erheben. Licht ist aber nach neuester Forschung nicht nur die Energie, die zur Entstehung und Erhaltung des Lebens am unentbehrlichsten erscheint, sondern auch der tiefgreifendste Schlüssel der forschenden Erkenntnis, „das Einigende von Ich und Welt“, dem das Unerfaßliche und Überallwirkende, wie keiner Form sonst, eigen ist (1), auch (6).

Der Beleuchtungstechniker hat sich daher immer der Verantwortung bewußt zu sein, die ihm daraus erwächst, daß er „Licht“ technisch verwendet. Er muß wissen, daß die Beleuchtungsaufgabe nur in seltenen reinen Zweckfällen da endet, wo die beleuchtungstechnische Lösung gewonnen ist. In den meisten Fällen bedarf der Beleuchtungsentwurf einer künstlerischen Krönung. Wenn der Beleuchtungstechniker diese auch oft nicht selbst schafft, so darf sein technisches Gestalten eine solche nicht verhindern oder erschweren. Die Unvollkommenheit vieler Beleuchtungsanlagen rührt daher, daß sie entweder nur rein beleuchtungstechnisch oder nur

rein schönheitsgemäß-künstlerisch gestaltet wurde. Lebensnahe Schöpfungen sind immer technisch-künstlerische Leistungen zugleich. Der Beleuchtungsentwurf im engeren Sinne ist der konstruktiv technische Teil einer Gesamtaufgabe, deren anderer Teil die schönheits- und gesundheitsgemäße Ausführung darstellt. Konstruktive und ästhetische Gestaltung entsprechen und ergänzen sich erst zum vollkommenen Ganzen. Der einwandfreie Beleuchtungsentwurf stellt erst die Voraussetzungen für eine schönheitsgerechte Ausgestaltung dar. Wo irgend möglich, darf aber die Ausgestaltung und Formgebung, die den Schönheitssinn befriedigt, nicht fehlen.

2. Schönheitwirkung verschiedener Lichter. Die Wirkung von Tageslicht, von freien, offenen Lichtquellen, von Glühlampenlicht und von Farblicht auf das Schönheitsempfinden ist verschieden. Kennzeichnend ist für Tageslicht ein gewisser Wechsel, der im Verlauf eines Tages die Außenwelt sehr verschieden wirken läßt. Eine ständige natürliche Beleuchtung in der Art der Mittagswirkung des Sonnenlichtes wäre unerträglich, da die Mittagsbeleuchtung eine ermüdende und lähmende Wirkung hat und die Natur mit krassen Schatten in lotrechter Richtung erscheinen läßt, die unschön wirken. Das morgendliche und abendliche Licht ist reicher an gelben, rötlichen Tönen und wirft Schatten in seitlicher Richtung; Landschaft und Menschen erscheinen freundlicher. Dem Tageslicht ist der starke Wechsel im Anteil zwischen gerichtetem und ungerichtetem Licht eigen. Es ist betont blauweiß gefärbt. Zu allen Jahreszeiten ist die Wirkung des Tageslichtes eine verschiedene. Die freien offenen Lichter wie Kerzen, Flammen, Fackeln haben als ästhetische Eigenart neben der warmen Färbung die natürliche, unbestimmte Bewegung, die das Flackern verursacht. Das bewegliche Licht wirft bewegliche Schatten, die z. B. im Fackelzug durch die Bewegung der Träger noch zu gesteigerter Wirkung gebracht wird. Das künstliche Licht hat als Merkmal die Ruhe, die beliebige Stärke und die Gleichmäßigkeit. Für farblichtsendende Lichtquellen ist jeweils die Farbe das ästhetische Kennzeichen. Im allgemeinen gilt grün als wohltuend, organgegelb als erheitern, rot als aufregend, blau als beruhigend.

Wesentlich ist nun, daß keine Lichtart, auch nicht die des Tageslichtes, „das“ Lichtideal darstellt. Vielmehr ist jede Art erwünscht; denn gerade erst aus dem Wechsel der Beleuchtungsarten bleibt die Freude am Licht erhalten. Auch hat jede Art ihren natürlichen oder künstlichen Anwendungsbereich. Wenn auch sicherlich die künstliche Beleuchtung von der natürlichen beträchtlich lernen kann, so ist es für das Schönheitsempfinden völlig verfehlt, gerade die Art des Tageslichtes als erstrebenswert für alle Lichtarten hinzustellen. Abgesehen davon, daß künstliches Tageslicht deshalb nicht wirken kann, wenn es von einer räumlich meist sehr begrenzten Lichtquelle gegeben wird, weil zu ihm der diffuse Himmel, ein beständiger Wechsel und eine künstlich nur schwer zu erreichende Beleuchtungsstärke gehört (ohne die es nur dürrtig wirkt), ist es verfehlt, in Räumen künstliches Tageslicht anzustreben, weil die Schönheitssinne des Menschen des Wechsels bedürfen und daher in Räumen nach etwas anderem verlangen. Tageslicht ist gar nicht immer schön, nur da jedoch „schön“, wo es von der Sonne selbst kommt.

Noch unsinniger ist es, das Tageslicht in Räumen einfarbig zu machen, indem man es durch Gläser filtert (Veranden mit bunten Gläsern!); denn zum Tageslicht gehört die ihm eigene Farbe; und wo es sich bietet, sollte man es nicht noch künstlich schwächen (mit Ausnahme von Bildwirkungen in Kunstglasfenstern). Daher ergibt sich: Mit jeder Lichtart soll man gerade das erstreben, was man mit den anderen nicht erreichen kann und das vermeiden, was man mit einer anderen besser kann. Die Fähigkeiten der künstlichen Lichtquellen, wie der Glühlampen, bestehen darin, ganz bestimmte Gleichmäßigkeiten und Ungleichmäßigkeiten zu erreichen, die Beleuchtung auf bestimmte Bereiche zu beschränken, dem Lichteinfall ganz bestimmte Richtungen zu geben.

Deshalb sollte man auch die freie Flamme weder verwerfen noch nachahmen. „Die offene Flamme besitzt eine ästhetische Unzerstörbarkeit“ (2). Durch den ihnen eigenen regellosen Wechsel der Helligkeiten und Schatten bei Fackeln, Kerzen und Flammen ist eine Überlegenheit dieser Lichtquellen gewährleistet, wo eine genußbietende Wirkung erstrebt wird. Es ist aber gänzlich verfehlt, mit künstlichen Lichtquellen diesen Wechsel nachahmen zu wollen. Der Lichtstärken- und Lichtortwechsel muß in der Natur der Sache liegen (Flackern, Tageszeit) und außerhalb der Macht des Menschen stehen. Jede bewußt auf Gemütswirkungen ausgehende künstliche Regelung und Schaltung zerstört die beabsichtigte Wirkung vollends. Während die wohl höchsten ästhetischen Kunstgenüsse dem Menschen in der Musik durch künstlerische (also künstliche) Tonsymphonien geschaffen wurden, ohne daß natürliche Tongebilde einen Hochgenuß darstellten, sind ästhetisch wirklich nachhaltige Wirkungen des Lichtes fast nur durch die Lichtsymphonien der Natur (im Gebirge oder am Meer) möglich; die künstlichen „Lichtsymphonien“ oder „Lichtorchester“ in ihrer heutigen Form sind oft mehr effektiv und banal als schön, sie eignen sich daher mehr nur für Werbezwecke. Deshalb aber auch die bezaubernde Wirkung, die durchleuchtetes strömendes oder sprühendes Wasser hervorruft. Das eine Zwischenstellung einnehmende Feuerwerk soll einen Lichttausch hervorrufen. Hier zeigt sich, daß das Licht nur dann überwältigend wirkt, wenn es in nicht mehr faßlicher Fülle auftritt (4).

Wie die Verschwendung das Kennzeichen echter Lebenskräfte ist, so muß auch das Lebensinnbild Licht verschwenderisch eingesetzt werden, wenn es wirken soll. In diesem Einsatz beruht der ungeheure Eindruck des Lichtdoms der Parteitage.

3. Schönheit der Raumbeleuchtung. Raumbeleuchtung bleibt in der beabsichtigten Wirkung zunächst immer eine Sache des künstlerischen Architekten. Er hat frei nach seinem Gestaltungswillen die Wirkung des Lichtes zu fordern. Der Beleuchtungstechniker hat mit Hilfe der Gesetze diesen Forderungen soweit wie möglich zu genügen. Die architektonischen Pläne können beleuchtungstechnisch undurchführbar sein; dann hat eine neue architektonische Planung zu geschehen. Der beleuchtungstechnische Berechnungsgang (XII, 12—15) enthält in Lichtpunkthöhe oder Lichtpunktanzahl die erforderliche Freiheit für die Gestaltung.

Wichtig ist, daß die Geleuchte nie als Selbstzweck da sind, sondern nur das Mittel zu einer guten und schönen Beleuchtung.

Der Zweck des Raumes ist nun entscheidend. Hat der Raum keine betont ästhetische Aufgabe, so wird man sich mit einer beleuchtungstechnisch richtigen Beleuchtung durch technische Geleuchte begnügen. Liegt ein größerer Raum mit Schönheitsansprüchen vor, so wird man den technischen Geleuchten eine ansprechende Verkleidung geben, die deren lichttechnische Wirkung nicht wesentlich beeinträchtigt. Sind die ästhetischen Ansprüche sehr hoch, so wird entweder der Künstler in Verbindung mit dem Lichttechniker

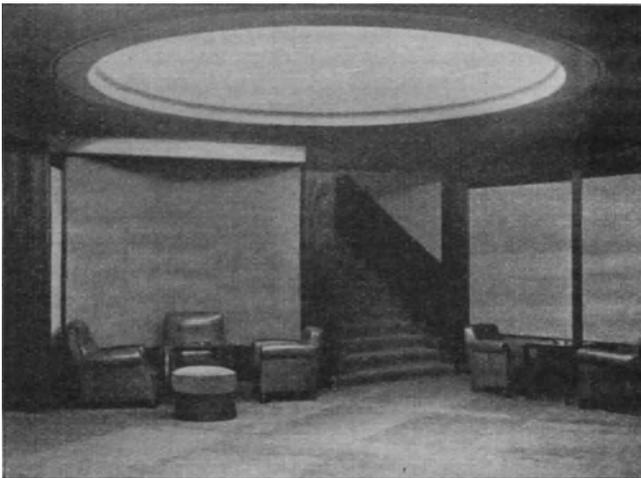


Abb. 137. Deckenausschnitt als Großflächengeleucht

Sondergeleuchte entwerfen; oder man wird durch vollmittelbare Beleuchtung die Lichtquellen aus dem Sehbereich entfernen. Die vollmittelbare Beleuchtung kann zu den schönsten Raumwirkungen führen, zumal wenn Ausschnitte aus der Decke als Teilgewölbe beleuchtet werden und dann als Großflächengeleuchte wirken (Abb. 137). — In kleineren Räumen, etwa Wohnräumen, wird man vom reinen Zweckgeleucht möglichst abgehen und ein der Bestimmung des Raumes entsprechendes stimmungschaffendes Geleucht mit möglichst guter lichttechnischer Wirkung verwenden. Der letzten Forderung zu genügen ist nicht immer leicht; man sollte die erste darum nicht vernachlässigen.

Unter den ästhetisch betonten Raumbeleuchtungen hat man zu unterscheiden: festliche, feierliche, sammelnde, gemütliche, stimmende und an-

regende Beleuchtung. Es lassen sich in ganz großen Zügen Richtlinien für diese Beleuchtungsarten angeben. 1. „Festliche Beleuchtung“ soll nie reine mittelbare blendungslose Beleuchtung sein; sie braucht Glanz und etwas Blendung, wenn möglich, Spiegelung. Viele Lichtpunkte gut verteilt, sollen kräftige Schatten nicht auftreten lassen; doch sollen ein oder mehrere größere Geleuchte etwa in der Wirkung von Kronleuchtern Lichtzentren des Raumes bilden, die der Veranstaltung einen Lichtmittelpunkt geben. Bei einem Kronleuchter für derartige Zwecke dürfen lichttechnische Gesichtspunkte nicht einzig im Vordergrund stehen. 2. Bei der „feierlichen Beleuchtung“ steht meist ein Raumteil im Vordergrund der Betrachtung. Man wird diesen entweder durch Kerzen auf kunstvollen Leuchtern oder durch unsichtbar angebrachte Geleuchte besonders hervorheben. Die mittelbar leuchtenden Pilzleuchten werden sich hierfür auch bisweilen eignen. Die bevorzugte Beleuchtung des Raumteils lenkt die Blicke auf diesen. 3. Die „sammelnde Beleuchtung“ soll dem Einzelnen oder einer Gruppe innere Sammlung vermitteln. Sie kommt daher z. B. für Kirchen in Betracht, oder für Schreibtische zu geistig produktiver Arbeit. In Kirchen sollen möglichst Lichtquellen von nicht zu großer Stärke verwandt werden, die fast Blendung hervorrufen. Die beste Lichtquelle für die Kirche bleibt daher die offene Kerze. (Für erforderliche Lesebeleuchtung muß zusätzlich gesorgt werden.) Das Auge soll durch den Lichtpunkt im nicht zu sehr erhellten Raum gefangen werden. Bei neuerdings oft angewandter vollmittelbarer Beleuchtung von Kirchen tritt eine starke Aufhellung der Wände ein. Das Auge wird abgelenkt, das Sehen in wahren und übertragenem Sinne oberflächlich. Findet aber das Auge unvermerkt Ruhepunkte im sonst nicht zu hellen Raum an den Lichtpunkten selber, so wird das Sehen zum transzendenten Schauen, es entsteht die seelische Sammlung. Auch für den geistig arbeitenden erleichtert das Halbdunkel des Raumes im Gegensatz zu der Helle der Arbeitsfläche die Sammlung (Konzentration). 4. Die „gemütliche Beleuchtung“ kommt für Wohn- und Aufenthaltsräume in Betracht. Sie vermeide mittelbare Beleuchtung, sowie allzu starke Beleuchtung der Wände und äußerster Ecken. Daher braucht der Wirkungsgrad für Aufenthaltsräume nicht sehr hoch zu sein; helle Wände sind aber für Tagesbeleuchtung angebracht. Am besten sind ein oder mehrere Lichtzentren, die als Sammelstellen für die Mitglieder der Hausgemeinschaft anziehend wirken. Eine geeignete Lichtquelle kann die Wirkung des Kamins auf die Gemeinschaft haben und ihn daher ersetzen helfen. Hier wird die Ungleichmäßigkeit zum bewußten ästhetischen Ziel. 5. Für „stimmende Beleuchtung“ kommt vornehmlich die offene Flamme der Kerze in Betracht. Das elektrische Licht sollte das Kerzenlicht daher aus Wohnhäusern nicht ganz verdrängen. 6. Die „anregende bis aufregende Beleuchtung“ ist hauptsächlich für Belustigungsstätten (z. B. Varietés) gedacht. Hier kommen alle Effekte zur Geltung. In dem krassesten Wechsel liegt die rechte Wirkung. Vom gedämpftesten Rot bis zur grellsten Blendung wird Gebrauch gemacht. Nur sei die Beleuchtung nie lange weiß vollmittelbar, weil das die Gesichter und die Gemüter müde macht — wie reine mittelbare Beleuchtung auf die Dauer immer (5), (7).

4. Lichtarchitektur. Das Licht hat bei einer seiner schönsten Anwendungen, der Anleuchtung von Gebäuden, die Aufgabe, die vorhandene Architektur zur vollen Wirkung zu bringen. Man spricht daher von Archi-

tekturlicht. Das Licht kann aber auch als gestaltende Kraft verwendet werden. Wird das Licht so zu architektonischem Stoff, so spricht man mit Teichmüller von „Lichtarchitektur“ (8).

Die reinste Form von Lichtarchitektur ist da erreicht, wo das Licht, völlig losgelöst vom Stoff, selbst Baustoff wird; wo z. B. über einer festlich versammelten Menschenmenge ein Lichtdom geschaffen wird, der sich durch die in der Luft sichtbaren Lichtkegel starker Scheinwerfer wölbt [Parteitag 1936 und 1937 (9)]. Hier liegt aber schon ein rein lichttechnisches Problem vor. Beleuchtungstechnische Lichtarchitektur setzt immer das Vorhandensein von Flächen und Räumen zur Beleuchtung voraus. Wesentlich ist, daß der

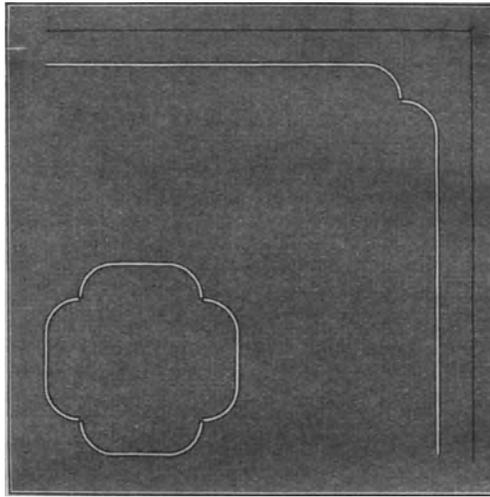


Abb. 138. Deckenschmuck mit Wolframröhren

Beleuchtungsgegenstand mit dem Licht zusammen eine untrennbare künstlerische Einheit bildet. Der Grad der Vollkommenheit der Lichtarchitektur ist daher überall verschieden.

Anfänge von Lichtarchitektur sind vorhanden, wenn bei Raumbeleuchtung die Leuchtkörper in die bauliche Architektur eingeordnet und aus ihr gestaltet sind; wenn das Geleucht nicht nur einen lichttechnisch notwendigen, sondern auch künstlerisch zwingenden Platz erhält; etwa als Säulenkopf (Abb. 139), wenn das Geleucht ein Teil von Schmuckformen der Wände bildete; wenn erst der Einbau von Geleuchten in eine Kassettendecke dieser ihre volle Wirkung geben.

Ein beleuchtungstechnisch höherer Grad wird erreicht, wenn die Fächeranzahl einer Kassettendecke der Anzahl der erforderlichen Lichtpunkte angepaßt ist; oder wenn die Balkenverzierungen einer Decke die über den Balken befindlichen Lichtquellen tragen und abschirmen, die z. B. die Decke anleuchten, oder wenn die Decke derartig mit körperlichen Mustern versehen ist, daß erst durch eine genau hierzu eingerichtete Beleuchtung ein Spiel von Licht und Schatten entsteht, das beabsichtigt war, oder wenn die Decke

selbst etwa als Gewölbe über dem ganzen Raum oder als kleinere Kuppel mit Hilfe vollmittelbarer Beleuchtung zum Geleucht des Raumes wird. Solche Anlagen vermag weder der Lichttechniker noch der Architekt allein in vollkommener Weise zu schaffen; sie kann nur aus gemeinsamer Arbeit beider Zuständigen kommen (vgl. Abb. 77).

5. Lichtarchitektur mit Wolframröhren. Nicht immer werden da, wo es an sich gewollt wird, die Kräfte und die Mittel da sein, Lichtarchitektur durch Schöpfung schöner raumentsprechender Geleuchte zu schaffen. Die Lichttechnik hat hier in den Wolfram-Linearstrahl-Röhren ein Element zu lichtarchitektonischer Gestaltung geschaffen, mit dem in vielen Fällen ausgezeichnete, ausdrücklich raumentsprechende Beleuchtung ge-

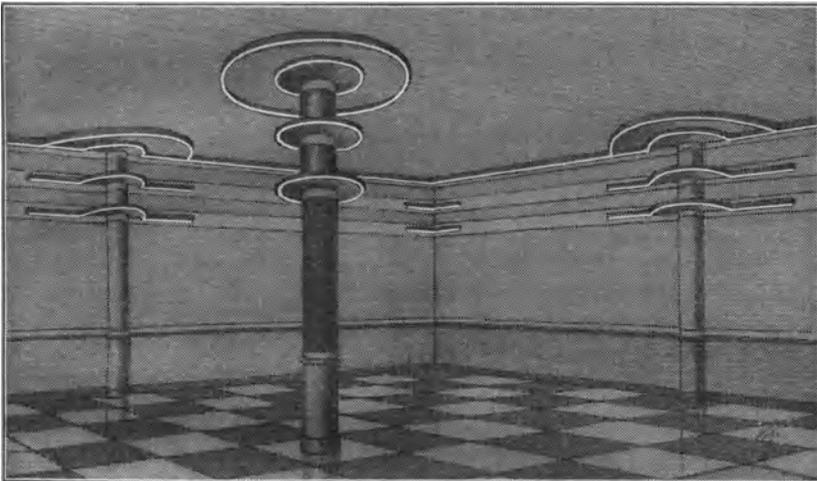


Abb. 139. Betonung der baulichen Formen durch Linearstrahlröhren

schaffen werden kann. Mit den Röhren lassen sich z. B. Deckenmusterungen ausführen, durch die nicht nur gewissen Geleuchten, sondern der ganzen Decke die Leuchtaufgabe übertragen wird und die zugleich durch die Schönheit der Anordnung das ästhetische Bedürfnis befriedigen (Abb. 138). Die Röhren lassen sich auch so anordnen, daß erst durch sie Linien und Kanten, die für den Raum kennzeichnend sein sollen, zur Geltung kommen (Abb. 139). Es lassen sich aber auch aus den in allen Formen lieferbaren Röhren Leuchtkörpergebilde schaffen, die weitgehenden Schönheitsbedürfnissen entsprechen können. Die in langen Linienzügen oder großen Flächen angeordneten Linearstrahl-Röhren haben den beleuchtungstechnischen Vorzug, daß sie eine hohe Gleichmäßigkeit zu liefern in der Lage sind.

6. Schönheit der Straßenbeleuchtung. Auch die Straße soll nicht nur richtig, sondern auch schön beleuchtet sein. An ihrer

Beleuchtung sind drei Faktoren beteiligt: die Straßenbeleuchtung selbst, die Schaufensterbeleuchtung und die Werbebeleuchtung durch Rückscheiner, Durchscheiner und Leuchtbuchstaben. Bis jetzt herrscht meist ein unschönes Lichtdurcheinander, in dem die eine Lichtart die andere übertreffen will. Es herrscht mehr „Lärm“ als Harmonie. Es könnte aber die gesamte Straßenbeleuchtung einer Schönheitsaufsicht unterstellt werden; in gemeinsamer guter Wirkung gewänne der einzelne mehr als im Gegeneinander. Es ist zweifellos eine einheitliche Beleuchtung einer Straße möglich, bei der alle mitwirkenden Lichterarten zu einheitlicher Wirkung zusammengefaßt werden. Ansätze dazu sind in großzügigen Weihnachtsbeleuchtungen ganzer Großstadtstraßen nach einheitlichen Gesichtspunkten vorhanden.

Besonders müßten manche sehr aufdringliche Leuchtröhrenfarbtöne fortfallen, die zwar auffallen, aber z. B. durch ein kaltes grelles Grün mehr abstoßen als anziehend wirken. Auch ist es sinnlos, auf Straßen, an deren Beleuchtung diejenige durch Schaufensterlicht beträchtlichen Anteil hat, durch einfarbiges Dampfampenlicht zu beleuchten, da sich verschiedenfarbiges Licht, wenn es nicht völlig zu Mischlicht gemacht wird, nicht nur physiologisch, sondern auch ästhetisch stört. Licht erfüllt seinen technisch gewollten Dienst nur, wenn es ästhetisch nicht verletzt. Darauf muß auch der Lichttechniker der Straße achten.

7. Schöne Geleuchte. Ist ein Raum zu beleuchten, der ausschließlich der Arbeit dienen soll, so sind die Geleuchte in erster Linie danach zu wählen, ob sie den hohen lichttechnischen Forderungen genügen, die an sie zu stellen sind. Damit wird aber in vielen Fällen den ästhetischen Bedürfnissen auch schon Genüge getan: in Stätten der Arbeit herrscht notwendig eine Schönheit der Zweckmäßigkeit; wenn die Geleuchte also wirklich zweckmäßig sind, so wirken sie in diesem Rahmen als schön. An Straßengeleuchte selbst Schönheitsforderungen zu stellen, sind wir noch kaum gewohnt, so sehr steht noch die Notwendigkeit im Vordergrund, daß sie überhaupt erst ausreichende Beleuchtung zu schaffen haben. Es ist aber um so mehr als vorbildlich zu bezeichnen, wenn über die Erfüllung beleuchtungstechnischer Forderungen hinaus schon mancherorts, z. B. auf größeren schöneren Plätzen, eine dem Stil dieser Plätze angepaßte Verkleidung der technischen Außengeleuchte vorgenommen wird (Abb. 140).

Das schwierigste Problem bleibt das Geleucht für den Raum, besonders für den größeren. Denn für den kleineren Wohnraum stehen heute Wohnraumleuchten von ausnehmender Schönheit zur Verfügung. Ihre Schaffung war möglich, weil bei ihnen, trotz lichttechnisch oft recht guter Gesichtspunkte, wie Blendungslosigkeit, durch schöne und lichttechnisch gute Schirmstoffe oder durch Verwendung des Großflächenleuchterprinzips in Form der großen weißen seidenen Durchlaßflächen, immer die Schönheit der Ausführung als maßgebend anerkannt wurde. Die zu Raumbeleuchtung dienende Zweckleuchte ist das Sorgenkind der Raumbeleuchtungstechniker. Das Geleucht, welches beleuchtungstechnisch die vorliegende Aufgabe oft hervor-

ragend lösen würde, kann den berechtigten Schönheitsansprüchen nicht genügen. Hier sind zwei Formen zu nennen: Das rein lichttechnisch entworfene Geleucht, bei dem sich spiegelnde, mehr oder weniger gut lichtdurchlassende Bereiche deutlich unterscheiden, und die reine als charakterlos wirkende Glaskugel aus Streuglas. Das letzte stellt einen unbefriedigenden Geringstwert, das andere einen störenden Höchstwert an lichttechnischer Gestaltung dar. Es gibt Geleuchte, die zwischen diesen Grenzwerten liegen und sowohl lichttechnisch wie schönheitsmäßig hohen Anforderungen genügen. Es ist im übrigen kein Grund vorhanden, daß beides sich widersprechen müsse! Hier wird aber erst das Kunstgewerbe im Verein mit der Lichttechnik die allgemeine und notwendig erstrebenswerte Lösung schaffen. Die mit dem Ausbau der elektrischen Beleuchtung und der erhöhten Industrialisierung einsetzende starke und schnelle Entwicklung des technischen Geleuchts hat das künstlerische Handwerk nur mit wenigen Ausnahmen in die Lage versetzt, der ästhetischen Ausgestaltung der Geleuchtentwicklung gerecht zu werden. Hierzu trug ebensowohl die im Zuge des Zeitgeistes liegende allgemeine Zurückdrängung des Kunsthandwerks zugunsten einer Massenfabrikation wie die plötzlich nicht ausreichend vorhandene Vertrautheit dieses um seine Existenz ringenden Handwerks mit den Gesichtspunkten der modernen Lichttechnik bei. Die heute beginnende Abwendung von der bisherigen Überbewertung massenweise hergestellter schönheitsbestimmter Leuchtgeräte wird das künstlerische Handwerk seiner neuen großen Aufgabe auf beleuchtungstechnischem Gebiete zuführen, macht aber auch eine Vertrautheit der Künstler mit licht- und beleuchtungstechnischen Dingen notwendig. Ist diese vorhanden, dann wird es gelingen, Geleuchte zu schaffen, die, geboren aus einem beleuchtungstechnischen Ziel, geformt nach lichttechnischen Grundsätzen, jedoch endgültig gestaltet aus echtem volkstümlichem Schönheitsempfinden, das sind, was wir oft noch vermissen und gebrauchen. Als Richtlinien können hier nur wenige gegeben werden: Nicht die wie bei der Kugel auf das äußerste getriebene Schlichtheit ist „schön“. Eine gewisse Gestaltung wirkt schöner. Nicht die Verwendung von nur einem Baustoff erzeugt Schönheit; „schön“ sind vielmehr Leuchten, in denen sich verschiedene Werkstoffe zu einer zweckmäßigen harmonischen Einheit verbinden (Holz, Metall, Glas). Die aus einem Werkstoff geblasene Form ist zwar die am billigsten und schnellsten herstellbare; dem nordischen Schönheitsgefühl entsprechen aber immer mehr Formen mit ebenen Flächen und Kanten, die reiche Ansätze für künstlerische Gestaltung geben. Mit Rücksicht auf die schon dargestellten Mängel ästhetischer vollmittelbarer Beleuchtung wäre es aber falsch, wollte man der schönen Gestaltung von Geleuchten; etwa als einer Unmöglichkeit, dadurch entgegengehen, daß man



Abb. 140.
Schöne Formgebung
bei Straßenleuchten

sichtbar angebrachte Geleuchte ganz aus Räumen verbannte; denn das Licht stellt offenbar die für unser Empfinden unentbehrlichen Sammelpunkte des Raumes her. Darin liegt auch die große Wirkung eines Kronleuchters, die sich die heutige Beleuchtung nicht entgehen lassen sollte; durch ihn entsteht Glanz und wegen der vielen Lichtpunkte eine gegenseitige Herabsetzung der Blendung. In dem Sonderfall der vorgeschlagenen Durchleuchtung der bunten Kirchenfenster von außen dürfte eine ausgezeichnete Wirkung allerdings bei Verzicht auf sichtbare Geleuchte erreichbar sein. Abschließend sei gesagt: Das uns angebotene Schönheitsempfinden ist so unzerstörbar, daß wir nicht erwarten dürfen, uns im Laufe der Zeit an eine rein technische Schönheit gewöhnen zu können (10).

8. Schönheit der Arbeit. Daß richtige Beleuchtung eines der wichtigsten Hilfsmittel auf dem Wege zur Schönheit der Arbeit ist, findet schon allgemeine Anerkennung. „Schönheit der Arbeit“ ist aber ein viel umfassenderer Begriff als der einer guten Arbeitsplatzbeleuchtung. Alle Anlagen, die einer Beleuchtung bedürfen, sollen in einem Betriebe gut und einwandfrei beleuchtet sein. Dies aber nicht aus beleuchtungstechnischen und hygienischen und physiologischen und ästhetischen und sonstigen Notwendigkeiten, oder gar aus rein wirtschaftlichen Erwägungen! Sondern deshalb, weil die Arbeit ein Wert des Lebens des Deutschen Volkes ist, dessen Bedeutung und Würde auf keine Weise zu stark hervorgehoben werden kann. Die Liebe zum Schaffen, die Freude an der Arbeit als Lebenssinn gilt es zu wecken und zu stärken (11).

Wenn aber bei den Anlagen der Arbeitsbeleuchtung nachweisbar ist, daß die Verbesserung der Beleuchtung auch wirtschaftlich eine Verbesserung ist, so erwächst daraus die Pflicht, den von Wirtschaftlichkeitserwägungen völlig freien Gedanken der Schönheit der Arbeit um so mehr zu fördern.

Im weitesten Sinne gehört zur Beleuchtung entsprechend der Schönheit der Arbeit aber auch die Beleuchtung der Festveranstaltungen des Volkes, da diese immer als Gemeinschaftsfeiern des ganzen schaffenden Volkes zu denken sind. Der Lichttechniker hat hier einen wesentlichen Beitrag der NS.-Volksfeste zu geben; er mag sich stolz dessen bewußt sein, daß er an einer Stelle fachmännisch verantwortlich mitzuarbeiten hat, bei der es sich nicht um Wirtschaftlichkeit, sondern um die Gestaltung seelischer Werte handelt (12).

Schrifttumsnachweis

(1) M. Quasebarth, *Das Licht* 6, 170, 1936. — (2) W. Hellpach, in (3). — (3) J. Teichmüller, *Die physiologischen, psychologischen und ästhetischen Grundlagen der Lichttechnik und ihre kulturellen Ziele*, Berlin.

-
- (4) F. Ernst, *Das Licht* 7, 129, 1937. — (5) F. Freese in (3). — (6) B. Seeger, *Das Licht* 4, 30, 1934. — (7) Über Kirchenbeleuchtung u. a., H. Lux in Bloch, *Lichttechnik*; A. Pahl, *Spiegellichtblätter* 9, 139, 1931; *Kadem-Monatsschrift*, Heft 1, 1933. — (8) J. Teichmüller, *Moderne Lichttechnik*, Berlin. — (9) Ph. Schmitt, *Das Licht* 7, 61, 1937. — (10) G. Schmidt, *Beleuchtungskörperstilkunde*, Berlin; E. Meyer, *Li. La.* 20, 259, 1931; F. Haegele, *Das Licht* 3, 234, 1933 (diese Arbeit sei besonders empfohlen). — (11) J. Schaer, *Das Licht* 6, 175, 1936; K. Kretschmer, *Das Licht* 5, 77, 1935. — (12) E. v. d. Trappen, *Das Licht* 7, 5, 23, 1937.

Stichwortverzeichnis

mit Seitenangabe

- A** Abendlicht 188.
Abstände 83, 168, 185.
Abstandsbestimmung 170.
Achsenfeld = Koordinatensystem.
Achsen Spiegelbildliche Lichtverteilung 173.
Adaption = Anpassung.
A. E. G. 130.
Allgemeinbeleuchtung 98, 131, 141.
Allgemeines Beleuchtungsgesetz 6.
Allseitstrahler 69.
Anderson 106, 130, 170, 187.
Anpassung 47.
Anpaßleuchtdichten 44, 179.
Anpaßschonung 47.
Anpaßzeiten 136.
Anregende Beleuchtung 191.
Ansprüche 96, 97, 156.
Anstriche 107.
Anzahl der Lichtpunkte 118, 154.
Apostill 35.
Architekt 75, 189.
Architekturlicht 191.
Arbeitsarten 95, 96, 152.
Arbeitsfreudigkeit 151, 196.
Arbeitsplatz 84.
Arbeitsplatzbeleuchtung 98, 130, 141.
Arbeitsplatzgeleuchte 137.
Arndt 48, 94, 97, 130, 153, Vorwort.
Auge 49.
Augenschädigungen 146.
Ausfallstraßen 182.
Ausgedehnte Lichtquellen 67, 145, 190, 194.
B aas 48.
Baustoff 55.
Baustoff Licht 192.
Bedienungskosten 62.
Beispiele 51, 129, 158.
Beleuchtungsarten 98.
Beleuchtungsbaustoffe 55.
Beleuchtungsentwurf 5.
Beleuchtungs Kontrast 42.
Beleuchtungslichtrichtung 115.
Beleuchtungsmesser 53, 139.
Beleuchtungsstärke 1, 7, 49, 94, 132, 158, 175, 177.
Beleuchtungsvergleich 65.
Beleuchtungsverteilungen 9, 76.
Beleuchtung der Waagrechtgeraden 9.
Beleuchtungstechnische Grundfunktion 11, 164.
Berechnungsgang 116.
Berührungskreiswinkelfeld 29, 32.
Besser 130.
Bewegte Schatten 188.
Bewertung 184.
Bezogene Lichtverteilung 27.
Blendung 43, 49, 136, 178.
Blendgrenzwinkel 74.
Blendleuchtdichten 43, 179.
Blendstörungskreis 45.
Blendungsfreiheit 179, 185.
Blendwinkel 73.
Bloch 38, 67, 74, 159, 162, 168, 177, 187.
Bogenlampen 59.
Born 187.
Breitstrahler 69, 163, 179.
Brennspannung 63.
Brodhun 130.
Burchard 79, 82, 83, 92, 94.
Büning 79, 94.
Büroflächen 114.
D ampflampen 59.
Dekalumen 1.

- DIN-Blätter 38, 49, 67, 73, 94, 130,
153, 179, 187, Vorwort.
Direkt = unmittelbar.
Doppelfenster 35, 87.
Doppelschatten 18, 22.
Dornstrahlung 50, 58.
Dreirichtungsleuchte 70.
Dresler 53, 55, 153.
Dunkelstunden 98.
Durchlaßstoffe 55.
Durchquerende = Diagonale.
- Einfachschatten** 18.
Einfallswinkel 85.
Einfarbig 48.
Einheitlichkeit der Beleuchtung 194.
Einschalten = Interpolieren.
Emailleleuchte 137.
Energiebedarf 150, 181.
Erhebungswinkel 85.
Ernst 197.
- Fackeln** 188.
Fahrzeuge 184.
Farbabhebung 43.
Farbangabe 7.
Farbenentstellung 48.
Farbgegensatz 43.
Farbiges Licht 151, 182.
Farbkontrast 43.
Faustformel 118, 126.
Fechner 39, 48.
Feierbeleuchtung 191.
Fensteranordnung 78.
Fensterbeiwert 81, 82, 92.
Fensterbreite 85.
Fensterfläche 86, 88.
Fensterform 83, 89.
Fensterhöhe 84.
Fensterlage 83.
Fensterleibung 92.
Fensterrahmen 92.
Fenstervorhang 92.
Fernverkehrsstraßenbeleuchtung 182,
185.
Festbeleuchtung 191, 196.
Feuerwerk 189.
Firstdach 90.
Flammen 188.
- Flächenbeleuchtung 173, 183.
Fleischer 55.
Flentner 153.
Formwahrnehmungsgeschwindigkeit
134.
Fresnel 38.
Frühling 79, 91, 92, 94, 204.
Freese 197.
Fußballplatzbeleuchtung 162.
- Ganznachtlampen** 170.
Gaslampen 59.
Gärtner 153.
Gefahrverhütung 47, 151.
Gefahrwahrnehmung 174.
Gelenklampen 138.
Geleuchte 67, 194.
Geleuchtausdehnung 145.
Geleuchtzeichnung 69.
Geleuchtsichtflächen 180.
Geleuchttafeln 140.
Gemischtsehen 39.
Gemütliche Beleuchtung 191.
Gegenstandscontrast 42.
Gesamtschattigkeit 21, 120.
Gesichtsfeld 39.
Gesamtlichtstrom 2, 31.
Gesundheit 49, 151.
Gewölbeleuchtung 103.
Gewölbebestform 103.
Glasdeckenbeleuchtung 122.
Glasdeckenwirkungsgrad 123.
Glasöffnung 86.
Glassilberspiegel 137.
Glanz 146.
Gleichmäßigkeit 12, 76, 92, 102, 104,
124, 135, 166, 178, 184.
Gleichörtlichkeitscontrast 42.
Gleichzeitigkeitscontrast 42.
Glühlampen 59.
Goldstern 153.
Grenzcontrast 79, 134, 137.
Grenzwinkel 173.
Groher 67.
Großflächengeleucht 67, 190, 194.
Grundabstand 14.
Grundbeleuchtung des Geleuchts 164,
177.
Grundbeleuchtung der Waagerechten
11.

- Grundgesetz der Beleuchtung 2, 81.
 Guanter 162.
- H**ägele 130, 197.
 Hagemann 187.
 Halbertsma 73, 74, 153.
 Halbnachtlampen 170.
 Halbschatten 18.
 Halbschattenausdehnung 20.
 Halbschattenringbreite 20.
 Hallen 154.
 Hallenbeleuchtung 153.
 Halbwertsbreite 11.
 Handwerksbeleuchtung 142.
 Harrison 106, 110, 124.
 Hasenkämper 111, 130.
 Hauptstraße 182.
 Häuserabstand 83, 85.
 Hausfrontaufhellung 181.
 Haushaltbeleuchtung 142.
 Hefner-Alteneck 7.
 Hefnerkerze 3.
 Heimbeleuchtung 125.
 Hellabhebung 18, 43.
 Heller 187.
 Hellempfindlichkeit 39.
 Hellgegensatz 42.
 Hellpach 196.
 Heyck 119, 130, 153.
 Himmelslicht 75.
 Hochleistungsdampflampe 59, 181.
 Högner 119, 130, 153.
 Höpke 119, 187.
 Hoffensterbeiwert 82.
 Holy 153.
 Horizontalbeleuchtung = Waage-
 rechtbeleuchtung.
- I**ndirekt = mittelbar.
 Isoluxenfeld 9, 175, 176.
 Isometrische Beleuchtungsdarstellung 8, 102, 175.
- J**ahresbrennstunden 64.
- K**andem 204.
 Kandemleuchte 138.
 Kernschatten 18, 145.
 Kernschattenausdehnung 19.
 Kerzen 188.
 Kilolumen 1.
 Kirchenbeleuchtung 196.
 Kircher 153.
 Klarglaslampen 60.
 Klassenraumbelichtung 148.
 Klein 153, 180, 187.
 Knoll 130, 187.
 Köhler 56, 67, 153.
 König 48, 130.
 Körting 162, 204.
 Körperliches Erkennen 18.
 Kontrast 42.
 Kosten der Beleuchtung 149.
 Kraftwagenscheinwerfer 182.
 Krefft 153.
 Kubelka 130.
 Kugelleuchte 195.
 Kunstgewerbe 195.
 Künstliche Hellabhebung 18.
 Künstlerisches 187.
 Kretschmer 197.
 Kronleuchter 196.
- L**ambert 7.
 Landoltscher Ring 134, 169.
 Langfeldeuchte 143.
 Laue 130, 187, 204.
 Lebensdauer 63.
 Lehrsäle 115.
 Leitsätze für Beleuchtung 94, 130,
 153, 179, 186.
 Leistung, elektrische 106, 139, 174.
 Lenklampen 138.
 Lesen 146.
 Lesebeleuchtung 147.
 Leuchtdichte 35, 65, 72, 97, 132, 179.
 Leuchtdichtenempfindungsgeschwindigkeit 134.
 Leuchtdichtenmesser 54.
 Leuchtdichteverteilung 72, 182.
 Leuchtröhrenfarbe 194.
 Licht 39.
 Licht als Sinnbild 187.
 Lichtarchitektur 192.
 Lichtausbeute 61.
 Lichtdurchlaß 33.
 Lichtempfindung 39.
 Lichtfarbe 65.

- Lichtfülle 189.
 Lichtkennlinien 63.
 Lichtideal 188.
 Lichtleistung 1.
 Lichtlenkung 67.
 Lichtmenge 1.
 Lichtmeßtechnik: Vorwort.
 Lichtorchester 189.
 Lichtpunktabstand 168.
 Lichtpunktanzahl 112, 117, 154.
 Lichtpunkthöhen 10, 14, 112, 113,
 117, 168.
 Lichtpunkthöhenregel 118.
 Lichtquellen 59.
 Lichtquellenanordnung 113, 122, 168.
 Lichtquellenleuchtdichten 65.
 Lichtrückwurf 33.
 Lichtstärke 3, 4.
 Lichtstärken-Abstands-Gesetz 5.
 Lichtstärkeverfahren 159.
 Lichtstrom 1, 59.
 Lichtstromausdruck 28.
 Lichtstrombedarf 157.
 Lichtstrom-Flächen-Gesetz 5.
 Lichtstromformel 106.
 Lichtstromkugel 157.
 Lichtstrompapier 157.
 Lichtstromschattigkeitsformel 121.
 Lichtstromverfahren 153.
 Lichtverteilung 27, 68, 173, 176.
 Lichtverteilungsfeld 31, 71.
 Lichtverteilungskörper 27, 31.
 Lichtverteilungskurve 27, 104.
 Lichtwirtschaftlichkeit 64.
 Lichtzerstreuung 36.
 Liebenthal 7, 38, 55.
 Linestra-Röhren 110, 192.
 Lingenfelder 153.
 Lossagk 48, 51, 187.
 Lotrechtbeleuchtung 15, 183.
 Lummer 48.
 Lumen 1.
 Luminophore 59.
 Luminophorlampen 59.
 Lux 94, 130, 153, 197.
 Lux (lx) 1.
 Lux auf Weiß 35.
 Luxferprismen 57, 204.
Mansarddach 90.
 Mathiesen 162, 204.
 Mattglasfenster 87.
 Mattglaslampen 60.
 Maueröffnung 86.
 Meyer, A. R. 38, 67.
 Meyer, E. 17, 26, 31, 38, 48, 74, 94,
 118, 130, 186, 187, 197.
 Meßfeldwiedergabe 9.
 Meßregel für Beleuchtungsmessung
 55.
 Midgard-Leuchte 138, 153.
 Mischlicht 48, 66, 153, 182.
 Mischlichtgeleuchte 71, 183.
 Mittagslicht 188.
 Mittelbar = indirekt.
 Mittelbare Beleuchtung 69.
 Mittlere Beleuchtungsstärke 7.
 Mittlere Lichtstärke 32.
 Mittlere Schattigkeit 25.
 Monochromatisch = einfarbig.
 Morgenlicht 188.
 Munck 130.
 Muschelwinkelfeld 31, 32, 68.
 Mylo 187.
Näherungsausdrücke 32.
 Nennspannung 63.
 Nichtachsenspiegelbildliche Licht-
 verteilung 176.
 Nilson 130, 153.
 Nitsche 176, 187.
 Norden 17, 21, 26, 55, 130, 153.
Oberlichter 58, 90.
 Oberlichtergröße 91.
 Öffnungswinkel 85.
 Ondracek 26, 121, 145, 153.
 Opalglasfenster 87.
 Opalglaslampen 60.
 Osram 119, 153, 187, 204.
Pahl 124, 130, 197.
 Panchromatisch = allfarbig.
 Photozelle 53.
 Planimeter 31.
 Plätze 154.
 Platzbeleuchtung 153.
 Pohle 74.
 Polarisiertes Licht 182.

- Polarschaubildpapier 29.
 Polarwinkelfeld 27.
 Polychromatisch = mehrfarbig.
 Probebeleuchtung 139.
 Punktlichtquelle 4, 18, 26, 32, 103,
 176.
 Putnocky 153.
- Qu**asebarth 196.
- R**äume 154.
 Raumbekleidung 107.
 Raumbekleidungsänderung 108.
 Raumbestimmung 95, 116, 190.
 Raumwinkel 3.
 Rechenblatt 87, 88, 89, 114, 155,
 178, 180.
 Rechenschieber für Beleuchtung 119.
 Rechnungsgang 176.
 Reduziert = bezogen.
 Reflexion = Rückwurf.
 Regeln 118, 125, 189.
 Reger 153.
 Richter 55, 67, 204.
 Richtungslichtstärke 4.
 Rinnenbeleuchtung 105.
 Rompe 67, 153.
 Rückwurfstoffe 56, 180.
 Russelverfahren 29, 38.
- S**ammelnde Beleuchtung 191.
 Satteldach 90.
 Schaco-Nomograf 119.
 Schaer 153, 187, 197.
 Schanzenbach 119.
 Schatten 17, 18.
 Schattengeometrie 18.
 Schattenhelle 20.
 Schattenmesser 53.
 Schattenregeln 22.
 Schattentechnik 17, Vorwort.
 Schattentiefe 20.
 Schatter 17.
 Schatterfläche 55.
 Schattigkeit 20, 25, 92, 104, 119,
 124, 143, 145, 168.
 Schattigkeitsfestsetzung 22.
 Schattigkeitsformel 21.
 Schattigkeitsgrenzwerte 24.
- Schaufensterlicht 182, 194.
 Scheinwerfer 185.
 Schering 67, 74.
 Schlüssler 58, 187.
 Schmelzle 162.
 Schmidt, G. 197.
 Schmidt, W. 51, 130.
 Schmidt und Haensch 29.
 Schmitt 197.
 Schneider 48, 74, 130, 153, 186,
 187.
 Schöne Geleuchte 194.
 Schönheit der Arbeit 196.
 Schönheit von Beleuchtung 193.
 Schönheit von Lichtern 188.
 Schrägbeleuchtung 17.
 Schräger Lichteinfall 5, 34, 57.
 Schreibbeleuchtung 147.
 Schreibleuchtenhöhe 148.
 Schreibmaschinenbeleuchtung 148.
 Schröder 48.
 Schulbeleuchtung 95.
 Schwarz 34.
 Seeger 59, 197.
 Sehschärfe 134, 151.
 Sehtüchtigkeit 48.
 Sehwinkel 134.
 Senkrechtbeleuchtung 17.
 Sewig 29, 38, 55.
 Sheddach 90.
 Sick 153.
 Sichtfläche 36, 180, 181.
 Sichtflächenverteilung 172.
 Sofortkontrast 47.
 Sonderbeleuchtung 98, 131.
 Sondergeleuchte 70, 143, 190.
 Sonderwerte 31.
 Sonnenlicht 75, 188.
 Spannungsschwankung 64.
 Sparschaltungen 170.
 Spektralfarben 6.
 Sperrschichtzelle 53.
 Spiegelung 35, 143.
 Sportplatzbeleuchtung 160.
 Stäbe 38.
 Stäbesehen 38, 182.
 Stege 130.
 Stimmungsbeleuchtung 191.
 Stöckel 130.
 Straßen 154.

- Straßenbeleuchtung 163ff.
Straßendecke 180.
Straßenfensterbeiwert 82.
Straßengeleuchte 163.
Streckenbeleuchtung 172.
Streuglasdecken 122.
Streulichtverteilungen 36.
Streuvermögen 37.
Summerer 58, 94, 119, 130, 153.
Symmetrisch = spiegelbildlich.
- T**ageslicht 75, 188.
Tageslichtkennzahl 78.
Tageslichtkennzahlverteilung 79.
Tageslichtzusatz 94.
Tapeten 107.
Teichmann 55.
Teichmüller 130, 157, 162, 187,
189, 196, 197.
Teillichtstrom 2, 30, 69.
Teilschattigkeit 21, 120.
Tennishallenbeleuchtung 162.
Tiefstrahler 69, 163, 179.
v. d. Trappen 187, 197.
Treppenbekleidung 128.
Treppenbeleuchtung 127.
- U**ltraviolett 50.
Umfeldleuchtdichten 44.
Unfallverhütung 50.
Unfallverursachung 46.
Ungleichmäßigkeit 12, 28, 49, 77,
177, 184.
Unmittelbare Beleuchtung 69.
Uviolglas 50, 58.
- V**erkaufsflächen 114.
Verstaubung 50.
Vierrichtungsleuchte 70.
Voege 54, 55.
- Volksgesundheit 51.
Vollmond 179.
Vortragsraum 148.
- W**aagerechtbeleuchtung 9, 164ff.
Wandbekleidung 77, 107, 127.
Wandtafelbeleuchtung 148.
Wartung der Beleuchtung 50.
Wattformel 118.
Wattregel 118.
Weber 39.
Weigel 37, 38, 58, 153, 187.
Weiß 34.
Wellenlänge 7.
Winter 56.
Wirkungsgrad, beleuchtungstechnischer 80, 81, 91, 106, 109, 111,
160.
Wirkungsgrad, lichttechnischer 68,
106.
Wirkungsgradformel 106, 159.
Wirtschaftlichkeit 148, 150.
Wittig 130, 204.
Wohnen 95.
Wohnstraßen 182.
Wolfram-Röhren 110, 193.
- Z**apfen 38.
Zapfensehen 38.
Zeiss-Ikon 119, 153, 204.
Zerstreuung 36.
Zerstretheit 22.
Zonenlichtstrom 32.
Zonenlichtstromverfahren 154.
Zonenlichtstromverteilung 32, 33, 71,
140.
Zusammenfassung 158.
Zusatzbeleuchtung 98, 131.
Zweckmäßige Geleuchte 194.
Zwei richtungsleuchten 70.
Zwielicht 48.

Bildquellennachweis

- Deutsche Luxferprismen G. m. b. H., Berlin-Weißensee: Abb. 38.
- Francksche Verlagshandlung, Berlin-Stuttgart.
Aus „Das Licht“: Abb. 66: 1936; Abb. 117: 1935; Abb. 135: 1934.
- Industriewerk Auma, Ronneberger & Fischer, Auma i. Thür.: Abb. 98.
- Körting & Mathiesen A. G., Leipzig-Leutzsch.
Aus „Hausmitteilungen“: Abb. 32, 33 und 96: 1934; Abb. 46, 105 und 106: 1937; Abb. 50: 1935; Abb. 97: 1931; Abb. 101.
Aus G. Laue, Einführung in die Lichttechnik: Abb. 34 und 43.
- A. Krüss, Hamburg: Abb. 36.
- Osram G. m. b. H., Berlin.
Aus „Osram Lichtheft“: Abb. 28, 31, 87, 94, 102, 138, 139.
Aus Bildreihe Osram: Abb. 51, 55, 57.
Osram-Photos: Abb. 118 und 133.
Aus Wernicke, Beleuchtungsrezepte: Abb. 88, 114; (Abb. 68—72 nach entsprechenden Änderungen).
Aus Druckschrift: Natriumdampflampe: Abb. 111.
- Architekt Roselius, Bremen: Abb. 140.
- Moritz Schäfer, Verlag, Leipzig.
Aus A. Richter, Beleuchtungstechnik: Abb. 5 und 86.
- Siemens-Schuckertwerke A. G. Berlin.
Aus Indirektbeleuchtung: Abb. 137.
Aus Wittig, Bürobeleuchtung: Abb. 73, 84, 89, 104 und 107.
- Unlon Deutsche Verlagsgesellschaft, Berlin-Stuttgart.
Aus Arndt, Raumbelichtungstechnik: Abb. 90.
Aus Frühling, Beleuchtung von Räumen durch Tageslicht: Abb. 64.
Aus „Licht und Lampe“: Abb. 109: 1933. — Aus Arbeiten des Verfassers: Abb. 9, 125, 126, 130, 131: 1936; Abb. 15: 1937.
Aus Norden, Schattentechnik: Abb. 103.
- VDI-Verlag G. m. b. H., Berlin.
Aus „Technik und Wirtschaft“ 1936: Abb. 52.
- Zelss-Ikon-Goerz-Werk, Berlin-Zehlendorf: Abb. 82 und 85.

Schrifttumsnachweis

für Abbildungen des Verfassers auf Grund fremden Schrifttums

- Abb. 35: Bohn-Koelle, Leitfaden der Physik 1930, Abb. 238.
- Abb. 39: Uviolglasdruckschrift der Jenaer Glaswerke Schott u. Gen.
- Abb. 40: Osram-Kurvenblätter HWV, 16 — 501 und 433.
- Abb. 47: Siemens-Druckschrift Schuckert, J 14, 1930.
- Abb. 48: Pohle, ETZ, Heft 15, 363, 1932.
- Abb. 56: Frühling, Beleuchtung mit Tageslicht, Tafel 4.
- Abb. 61: DIN 5034, Abb. 3 bis 6.
- Abb. 65: Schröder, Z. f. Sinnesphys. 57, 195, 1926.
- Abb. 92: Hefe, Oberlicht.
- Abb. 93 und 95: Schneider, Osram-Lichtheft A 1.
- Abb. 108: Kirchner-Schneider, Osram-Lichtheft S 7.
- Abb. 116: Bloch, Lichttechnik.