Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 85 (1967)
Heft: 46

Artikel: Über die Tageslichtbeleuchtung von Industriehallen durch Oberlichter
Autor: Szerdahelyi, D.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-69576

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

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

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

Download PDF: 10.10.2025

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

HERAUSGEGEBEN VON DER VERLAGS-AKTIENGESELLSCHAFT DER AKADEMISCHEN TECHNISCHEN VEREINE, ZÜRICH

Über die Tageslichtbeleuchtung von Industriehallen durch Oberlichter

DK 628.928.1

Von **D. Szerdahelyi**, dipl. Bauing. ETH, Ingenieurbüro Emch & Berger, Bern

1. Einleitung

Die richtige Beleuchtung der Arbeitsräume schafft günstige psychologische Voraussetzungen, erhöht die Arbeitsqualität, vermeidet vorzeitige Ermüdung und verhütet Unfälle. Gutes Licht ist ebenso wichtig wie ein gutes Werkzeug.

Es sind grundsätzlich zwei Arten zu unterscheiden: Tageslicht und künstliche Beleuchtung. Während vor allem in den Vereinigten Staaten die künstliche Beleuchtung üblich ist [7], wird in Europa im allgemeinen das Tageslicht bevorzugt; für Fabrikationsbetriebe in der Schweiz schreiben es die Behörden sogar meistens vor. Innerhalb wirtschaftlicher Grenzen ist es in der Regel nicht möglich, während der Arbeitszeit die erforderliche Beleuchtung über das ganze Jahr allein durch Tageslicht zu decken. Vielmehr muss während der Wintermonate in den Morgen- und Abendstunden durch künstliches Licht nachgeholfen werden.

Hier soll das Problem der Tageslichtbeleuchtung durch Oberlichter näher betrachtet werden. Diese Beleuchtungsart kann bei grossflächigen Bauten nur durch Oberlichter verwirklicht werden, wobei die Anordnung von Shedfenstern die beste Lösung darstellt. Es wird eine neue Methode zur schnellen Bestimmung des Tageslichtkoeffizienten bei langen Oberlichtern, im besondern bei Shedhallen, vorgeschlagen. Dabei kann der Einfluss der wichtigsten lichttechnischen Parameter verfolgt werden.

2. Anforderungen an die Tageslichtbeleuchtung

Diese sind bei Industriebauten:

a) genügende Beleuchtungsstärke

b) möglichst gleichmässige Lichtverteilung

c) keine Schlagschatten

d) keine Blendung durch direkten Sonneneinfall oder durch spiegelnde Flächen

e) niedrige Erwärmung der Innenräume durch Sonneneinstrahlung

Die Forderung a) lässt sich hauptsächlich durch richtige Bemessung der Oberlichter erfüllen. Die Lichtverteilung hingegen hängt von mehreren Faktoren ab, auf die im Falle der Shedfenster noch näher eingegangen wird. Während die Forderungen c) bis e) bei gewöhnlichen Oberlichtern meistens nur durch Spezialverglasung oder Sonnenblenden erfüllt werden können, genügt bei Shedfenstern in der Regel die Orientierung gegen Norden. Auf diesbezügliche Probleme wird in diesem Aufsatz nicht näher eingegangen [5].

Die erforderliche Beleuchtungsstärke hängt von der Feinheit der durchzuführenden Arbeit ab (Tabelle 1).

3. Definition des Tageslichtkoeffizienten

Die Tageslichtbeleuchtung auf einem Punkt der Arbeitsebene [1]) ist der gleichzeitig vorhandenen Beleuchtungsstärke im Freien proportional. Der Proportionalitätsfaktor T wird als Tageslichtkoeffizient bezeichnet; es ist

$$(1) \qquad T = \frac{\text{Beleuchtungsstärke am Messpunkt, innen}}{\text{Horizontalbeleuchtungsstärke im Freien}} = \frac{E_i}{E_a}.$$

T nimmt in der Regel für jeden Punkt der Arbeitsebene verschiedene Werte an. Deren Verlauf ist für die Güte der Fensteranordnung bezeichnend. Als Bezugswert der Horizontalbeleuchtungs-

[1]) Je nach Anwendungsfall kann die Beleuchtungsstärke auf eine horizontale oder geneigte Arbeitsebene bezogen werden. Im folgenden Fall wird eine horizontale Ebene vorausgesetzt.

Tabelle 1. Empfohlene Betriebswerte der Beleuchtungsstärke [1])

Anforderungen	mässig			mittel			erhöht			hoch bis sehr hoch		
Beleuchtungsstärken in lx	120	**175**	250	250	**350**	500	500	**700**	1000	1000	**1500**	2000 und mehr
	Pressen *			Stanzen *								
							Arbeitsunterlagen lesen					
							Anreissen					
							Einrichten von Werkzeugmaschinen					
	Schruppen			Sägen, Hobeln, Fräsen, Drehen, Bohren *			Schaben *					
							Schleifen					
				Werkbankarbeiten *			Werkzeug- und Vorrichtungsbau			Feinmechanische Arbeiten *		
	Grobe Blecharbeiten *			Feine Blecharbeiten								
				Schweissen, Löten *			Verdrahten					
	Gross- und Grobmontage *			Mittelmontage von Schaltern, Motoren, Transformatoren *			Feinmontage von Telefonapparaten, Radioapparaten, Schreibmaschinen *			Montage von Uhren, Instrumenten *		
	Herstellung v. elektrischen Leitern, Kabeln, Drahtseilen *											
	Wickeln grosser Spulen *			Wickeln mittlerer Spulen *			Wickeln feiner Spulen					
	Imprägnieren von Spulen											
				Schalttafelbau *								
				Versuchswerkstatt *			Kontroll- und Prüfplätze					
										Justieren und Prüfen von Instrumenten und Uhren *		

* empfohlene Beleuchtungsstärken liegen über dem Mittelwert der Kolonne

[1]) Auszug aus «Allgemeine Leitsätze für Beleuchtung» der Schweizerischen Beleuchtungskommission für Metall- und Maschinenindustrie, Apparate- und Instrumentenbau

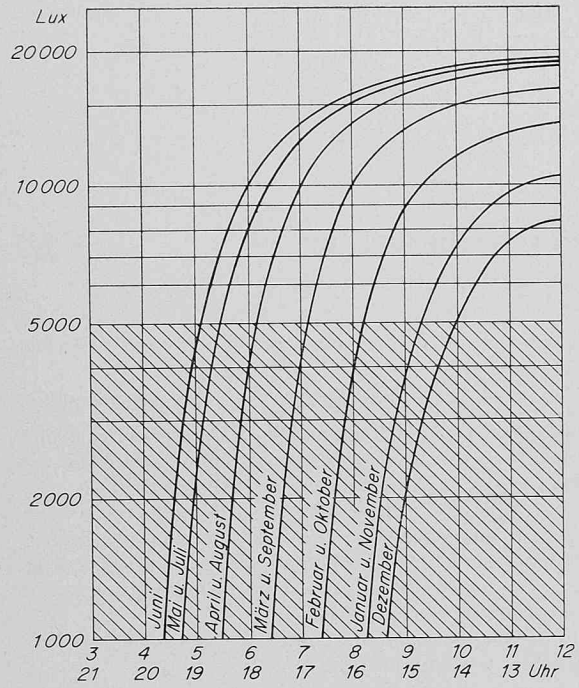

Bild 1. Horizontal-Beleuchtungsstärke im Freien bei gleichmässig bedecktem Himmel nach DIN 5034. Täglicher und jahreszeitlicher Verlauf (Geogr. Breite 51 °)

stärke im Freien nimmt man in Westeuropa $E_a = 5000$ Lux an. Bild 1 zeigt den täglichen und den jährlichen Verlauf der Beleuchtungsstärke, gemessen auf einer vom gleichmässig bedeckten Himmel beleuchteten horizontalen Ebene. Wie ersichtlich, wird der Wert $E_a = 5000$ Lux während sechs Monaten von rund 7 bis 17h überschritten. Im übrigen kann der tägliche und der jährliche Verlauf der Beleuchtungsstärke bei bedecktem Himmel auf dem entsprechenden Punkt der Arbeitsebene aus Bild 1 bestimmt werden, indem man die Ordinatenwerte mit dem Tageslichtkoeffizienten multipliziert.

Der Tageslichtkoeffizient setzt sich zusammen aus dem Himmelslichtanteil T_H, dem Aussen-Reflexionsanteil T_V und dem Innen-Reflexionsanteil T_R. Es ist

$$T = k\,(T_H + T_H + T_R). \tag{2}$$

Der Aussen-Reflexionsanteil (von der Verbauung reflektiertes Licht) kann bei durch Oberlichter beleuchteten Hallen im allgemeinen

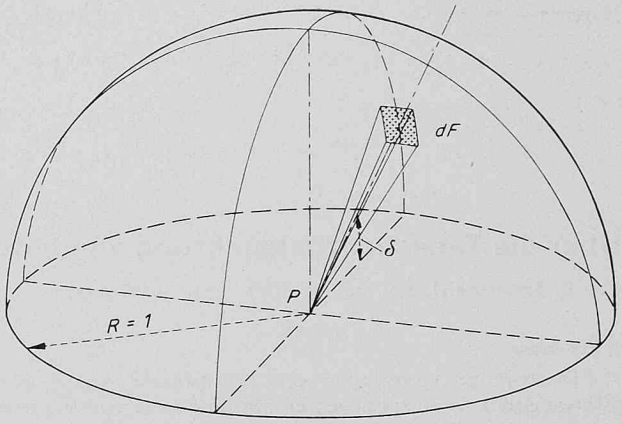

Bild 2. Zur Definition der Beleuchtungsstärke

vernachlässigt werden. Der Innen-Reflexionsanteil wird in den Tageslicht-Berechnungen von Industriebauten meistens nicht berücksichtigt, da dessen Berechnung etwas kompliziert ist, obwohl diese Vernachlässigung nicht ganz begründet ist [8]. Durch diese Vernachlässigung ist man auf jeden Fall «auf der sicheren Seite».

Der Koeffizient k tritt infolge von Lichtverlusten am Fensterband auf und wird nach der Gleichung

$$k = \tau\, k_1\, k_2 \tag{3}$$

berechnet, wobei bedeuten:

τ die Lichtdurchlässigkeit des Glases,

k_1 den Schwächungsfaktor infolge Pfosten und Sprossen,

k_2 den Schwächungsfaktor indolge Verschmutzung.

Der Wert von τ hängt von der verwendeten Glassorte ab. Als Richtwerte gelten: Drahtspiegelglas: τ = rd. 0,9: Doppelverglasung τ = rd. 0,8. Für weitere τ-Werte von verschiedenen Materialien siehe [8].

Für den Schwächungsfaktor k_1 gilt die Gleichung[2]):

$$k_1 = 1 - \frac{\text{Fläche der Pfosten und Sprossen}}{\text{totale Fensterfläche}}. \tag{4}$$

Werte des Schwächungsfaktors k_2 sind nach [1] in Tabelle 2 zusammengestellt.

[2]) In Wirklichkeit ist k_1 nicht konstant, sondern hängt von der Einfallrichtung der Lichtstrahlen ab.

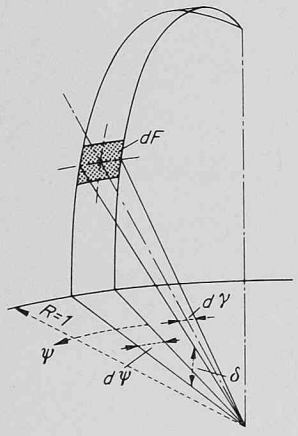

Bild 3. Zur Ableitung der Gleichung (7)
$d\gamma = d\psi \cdot \cos\delta$
$dF = d\delta \cdot d\gamma =$
$= \cos\delta \cdot d\delta \cdot d\psi$

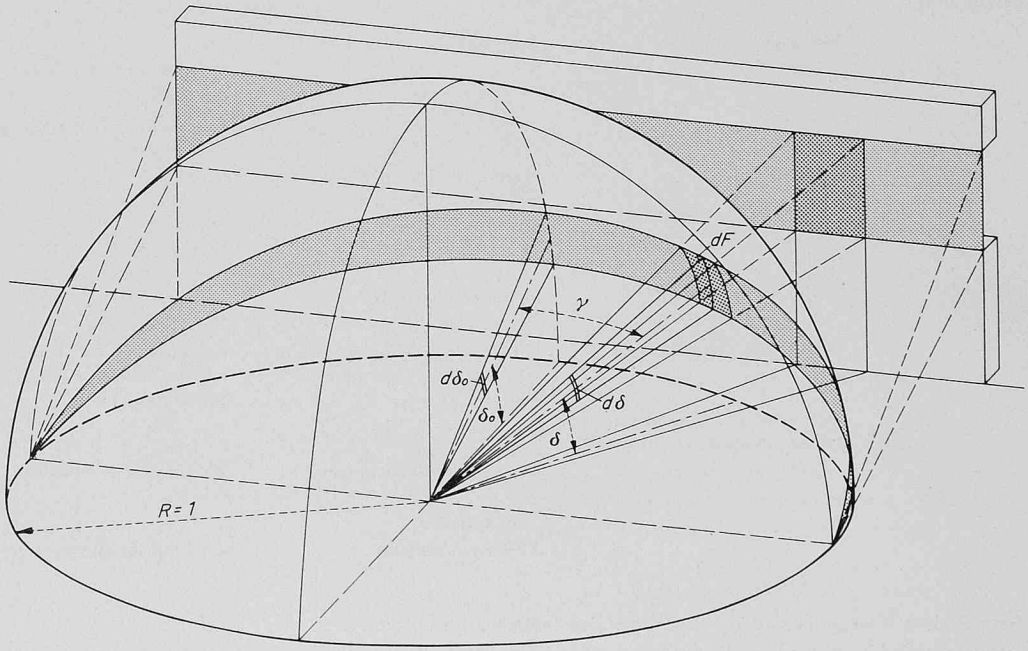

Bild 4. Projektion eines schmalen, parallelen Lichtbandes auf die Einheitskugel. $dF = d\delta \cdot d\gamma = d\omega$

Tabelle 2. Schwächungsfaktoren k_2 nach DIN 5034

Verschmutzung auf der		Neigung der Glasfläche		
Fenster-aussenfläche	Fenster-innenfläche	90°	60°	30°
gering	gering	0,90	0,85	0,80
	stark	0,70	0,60	0,55
mittel	gering	0,80	0,75	0,70
	stark	0,60	0,50	0,40
stark	gering	0,70	0,63	0,55
	stark	0,50	0,33	0,25

4. Berechnung des Himmelslichtanteils des Tageslichtkoeffizienten

4.1 *Grundlegende Beziehungen*

Die Beleuchtungsstärke E in einem Punkt P einer Ebene kann nach [1] wie folgt angeschrieben werden, Bild 2:

$$E = \int B_\delta \sin\delta \, d\omega \,. \tag{5}$$

Dabei bedeuten:

- E die Beleuchtungsstärke (Einheit : Lux)
- B_δ die Leuchtdichte innerhalb des zugehörigen Raumwinkels (Einheit: Stilb)
- δ den Winkel zwischen Lichtstrahl und seiner Horizontalprojektion
- $d\omega$ den Raumwinkel, der durch die Randstrahlen der Fläche dF eingeschlossen wird; dabei liegt dF auf einer Kugel mit Radius $R = 1$ um den Punkt P.

In einem Punkt der Arbeitsebene lässt sich also die Beleuchtungsstärke bei beliebig geformten Fenstern oder Oberlichtern durch räumliche Integration der Gleichung (5) bestimmen, vorausgesetzt, dass B_δ bekannt ist.

Die Leuchtdichte des gleichmässig bedeckten Himmels (B_δ) fällt vom Zenit zum Horizont nach dem Gesetz [1] ab:

$$B_\delta = B_Z \frac{1 + 2\sin\delta}{3} \tag{6}$$

wobei B_Z die Leuchtdichte des Himmels im Zenit bedeutet:

In einem Punkt im Freien, der durch das gesamte, gleichmässig bedeckte Himmelsgewölbe beleuchtet ist, kann die Beleuchtungsstärke durch Integration der Gleichung (5) über die ganze Halbkugel bestimmt werden:

$$E_a = \int_{\delta=0}^{\delta=\frac{\pi}{2}} \int_{\psi=0}^{\psi=2\pi} B_Z \frac{1 + 2\sin\delta}{3} \sin\delta\cos\delta \, d\delta \, d\psi$$

wobei $d\omega$ ($= dF$ bei $R = 1$) durch den Ausdruck $\cos\delta \, d\delta \, d\psi$ ersetzt wird, Bild 3. Nach Ausführung der Integration erhält man:

$$E_a = 2{,}44 \, B_Z \,. \tag{7}$$

Setzt man (5) und (7) in (1) ein, so ergibt sich:

$$T_H = \frac{1}{2{,}44} \int \frac{B_\delta}{B_Z} \sin\delta \, d\omega$$

und weiter nach (6):

$$T_H = \frac{1}{2{,}44} \int \frac{1 + 2\sin\delta}{3} \sin\delta \, d\omega \,. \tag{8}$$

Die Berechnung von (8) stösst bei beliebig geformten Lichtöffnungen oft auf Schwierigkeiten.

4.2 *Die bestehenden Näherungsverfahren*

In DIN-Norm 5034 [1] wird die Gleichung (8) in Form von Netz-Diagrammen ausgewertet. Man erhält den Wert von T_H, indem man die Netzeinheiten abzählt, die durch den Höhen- bzw. Breitenwinkel der Eckstrahlen abgegrenzt sind. Das Verfahren gibt gute Näherungswerte für einzelne, rechteckige Lichtöffnungen; für langgezogene Oberlichter wird aber dessen Anwendung mühsam und ungenau.

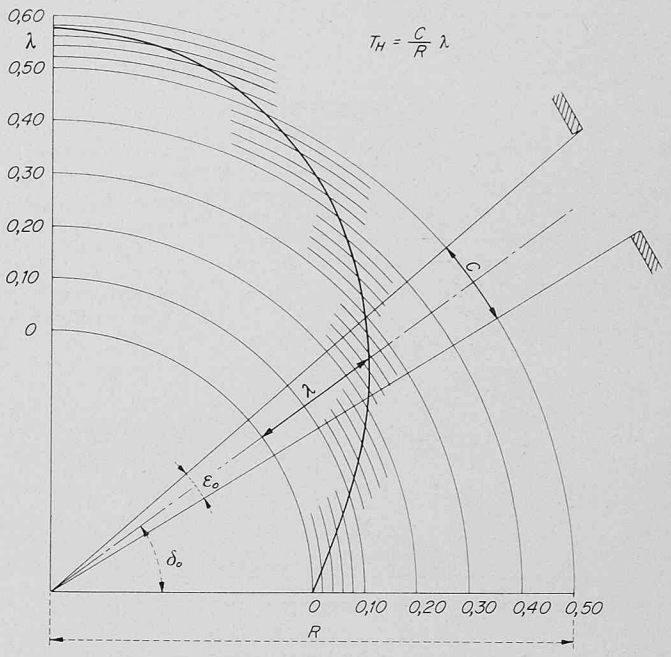

Bild 5. Diagramm zur Bestimmung des Himmelslichtanteils des Tageslichtkoeffizienten bei unendlich langen, parallelen Lichtbändern, berechnet nach Gl. (10)

Grün [2] entwickelte für solche Fälle (die in der Praxis sehr häufig vorkommen) eine halbgraphische Methode, die unter dem Namen «Grosskreisverfahren» bekannt wurde. Sie ist sehr einfach, ergibt aber ungenaue Werte, da die Leuchtdichte des Himmelsgewölbes (Gl. 6) als konstant angenommen wird. Eine weitere Ungenauigkeit folgt aus der graphischen Konstruktion, bei welcher relativ kleine Strecken ausgemessen werden müssen. Rossbach [3] verwendet das Grosskreisverfahren mit Korrekturen. Ein Vergleich der verschiedenen Verfahren findet sich unter 4.4.

4.3. *Eine neue Methode zur Bestimmung des Himmelslichtanteils des Tageslichtkoeffizienten bei langgezogenen, parallelen Lichtbändern.*

Mit den Bezeichnungen von Bild 4 ergibt sich nach Gl. (5) und (6):

$$E = B_Z \int \frac{1 + 2\sin\delta}{3} \sin\delta \, d\omega \,.$$

Weiter sind:

$$\sin\delta = \sin\delta_0 \cos\gamma \,, \quad d\delta = d\delta_0 \cos\gamma \,.$$

Setzen wir für

$$d\omega = dF = d\delta \, d\gamma = \cos\gamma \, d\delta_0 \, d\gamma$$

dann wird:

$$E_i = B_Z \int_{\delta_0 - \frac{\varepsilon_0}{2}}^{\delta_0 + \frac{\varepsilon_0}{2}} \int_{\gamma=-\frac{\pi}{2}}^{\gamma=+\frac{\pi}{2}} \frac{1 + 2\sin\delta_0\cos\gamma}{3} \sin\delta_0 \cos^2\gamma \, d\delta_0 \, d\gamma \,.$$

Nach Ausführung der Integration und Einsetzen der Grenzen erhalten wir:

$$E_i = B_Z \left[\frac{4}{9}\varepsilon_0 + \frac{\pi}{3} \sin\delta_0 \sin\frac{\varepsilon_0}{2} - \frac{4}{9}\cos 2\delta_0 \sin\varepsilon_0 \right]$$

und:

$$T_H = 0{,}182\,\varepsilon_0 + 0{,}428 \sin\delta_0 \sin\frac{\varepsilon_0}{2} - 0{,}182\cos 2\delta_0 \sin\varepsilon_0 \,. \tag{9}$$

Damit wird der Wert von T_H nur von den beiden Winkeln δ_0 und ε_0

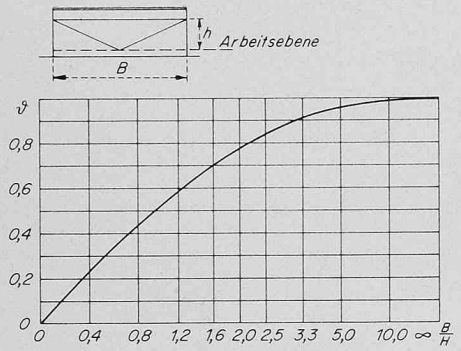

Bild 6 (links). Reduktionsfaktor ϑ bei endlich langen Lichtbändern: $\vartheta = T_\infty / T$

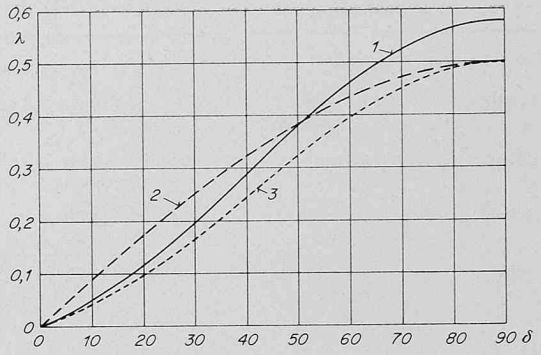

Bild 7 (rechts). Vergleich der Verfahren zur Berechnung des Wertes $T_H = \varepsilon_0 \lambda$
Kurve 1 (Gl. 10):
$\lambda = 0{,}214 \sin\delta + 0{,}364 \sin^2\delta$
Kurve 2: $\lambda = 0{,}5 \sin\delta$ (Grosskreisverfahren)
Kurve 3 (Rossbach):
$\lambda = 0{,}167 \sin\delta + 0{,}333 \sin^2\delta$

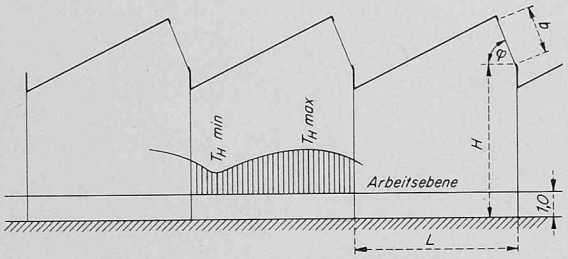

Bild 8. Bezeichnungen, die bei der Untersuchung der Shedhalle verwendet wurden

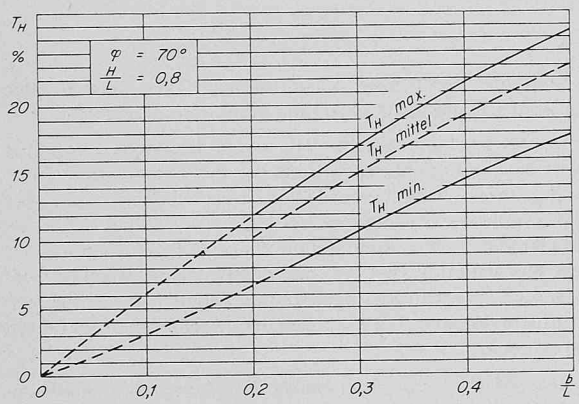

Bild 9. Verlauf der Funktion T_H für $\varphi = 70^0$; $H/L = 0{,}8$

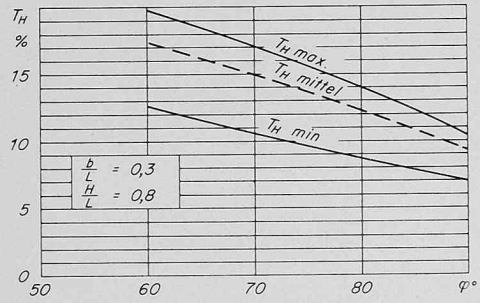

Bild 10. Verlauf der Funktion T_H für $b/L = 0{,}3$; $H/L = 0{,}8$

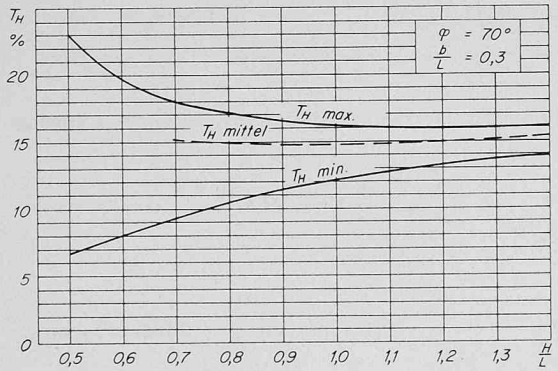

Bild 11. Verlauf der Funktion T_H für $\varphi = 70^0$; $b/L = 0{,}3$

abhängig. Diese liegen in der zum Lichtband senkrechten Ebene, Bild 5. Die Formel (9) wird für kleine Winkel ε_0 einfacher, indem gesetzt werden kann: $\sin\varepsilon_0 \approx \varepsilon_0$ und $\sin\frac{\varepsilon_0}{2} \approx \frac{\varepsilon_0}{2}$.

(10) $$T_H \approx \varepsilon_0 (0{,}214 \sin\delta_0 + 0{,}364 \sin^2\delta_0).$$

Der durch die Näherung begangene Fehler wird bei $\varepsilon_0 = 10°$ etwa 1%, bei $\varepsilon_0 = 15°$ etwa 3%. Grössere Lichtwinkel teilt man in Teilwinkel auf, wobei immer mit dem zugehörigen δ_0 (Steigungswinkel der Winkelhalbierenden) gerechnet wird. Mit der Funktion:

$$\lambda = 0{,}214 \sin\delta_0 + 0{,}364 \sin^2\delta_0$$

wird:

(11) $$T_H \approx \varepsilon_0 \lambda .$$

Wenn wir die Funktion λ in Polarkoordinaten auftragen, erhalten wir das Diagramm Bild 5, mit dessen Hilfe T_H rasch bestimmt werden kann:

(12) $$T_H \approx \frac{c}{R} \lambda .$$

Bei mehreren Lichtöffnungen wird:

(13) $$T_H \approx \frac{1}{R} \sum c \lambda .$$

Damit ist eine Methode gefunden, welche die Bestimmung des Tageslichtkoeffizienten bei parallelen, langgezogenen Lichtbändern mit genügender Genauigkeit erlaubt. Man zeichnet einen auf die Lichtbänder senkrechten Schnitt durch die Halle auf und legt das in Bild 5 wiedergegebene Diagramm auf die Zeichnung so auf, dass die Abszisse mit der Arbeitsebene und der Punkt P des Diagrammes mit dem Bezugspunkt, in welchem der Tageslichtkoeffizient zu bestimmen ist, übereinstimmen. Durch Ausmessen der Werte c und λ erhält man nach Gl. (13) den Wert T_H im Bezugspunkt und nach Gl. (2) den Wert des Tageslichtkoeffizienten.

Der so erhaltene Wert gilt für unendlich lange Lichtbänder. Bei endlicher Länge kann ein Reduktionsfaktor ϑ eingeführt werden, der in Bild 6, nach [1] wiedergegeben ist.

(14) $$T \cong T_\infty \vartheta .$$

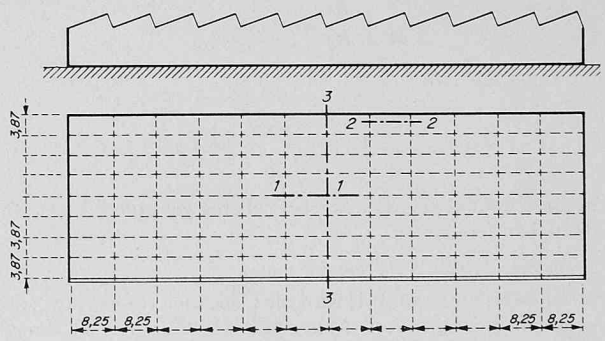

Bild 12. Abmessungen der untersuchten Shedhalle mit Angaben der Messtellen

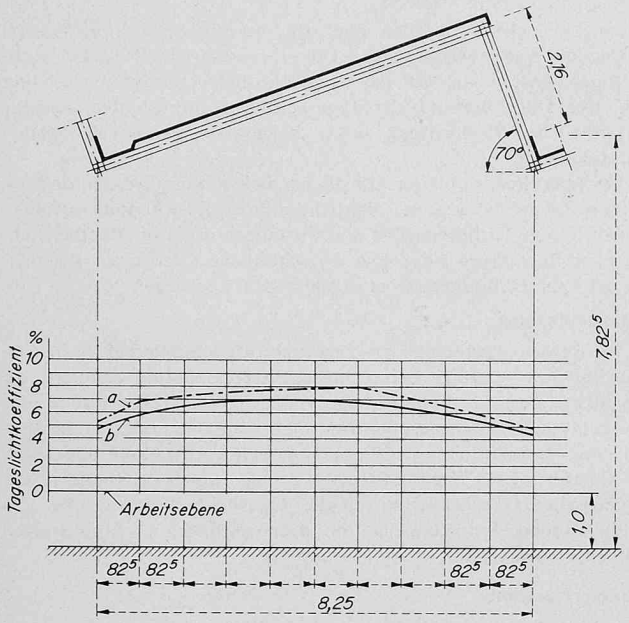

Bild 13. Werte des Tageslichtkoeffizienten im Schnitt 1—1; Vergleich der gemessenen Werte (Kurve a) mit den gerechneten Werten (Kurve b). Bei der Berechnung wurden die Verluste und der Einfluss der Fassadenfenster berücksichtigt.

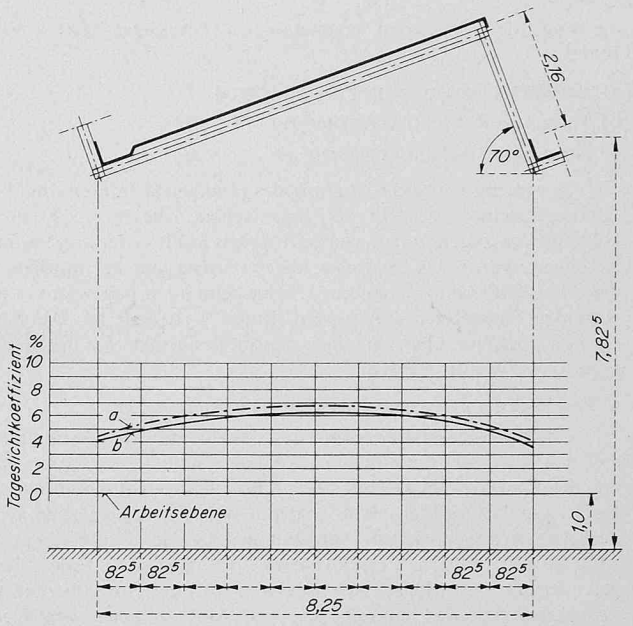

Bild 14. Werte des Tageslichtkoeffizienten im Schnitt 2—2; Vergleich der gemessenen Werte (Kurve a) mit den gerechneten Werten (Kurve b). Bei der Berechnung wurden die Verluste und der Einfluss der Fassadenfenster berücksichtigt.

Der Faktor ϑ bezieht sich auf die Mitte der Halle. Bei Hallen, deren Breite mindestens der 5fachen Hallenhöhe entspricht, beträgt die Reduktion weniger als 4 %.

4.4. *Vergleich der Berechnungsverfahren*

Beim Grosskreisverfahren erhält man den Wert von T_H aus der Formel:

$$T'_H = \frac{s}{D} ,$$

wobei s die horizontale Projektion eines Kreisbogens, welcher durch die begrenzenden Lichtstrahlen auf einem Kreis von Durchmesser D ausgeschnitten wird, bedeutet.

$$ds = \frac{D}{2} \sin \delta_0 \, d\delta_0 ,$$

somit:

$$T'_H = \int_{\delta_0 - \frac{\varepsilon_0}{2}}^{\delta_0 + \frac{\varepsilon_0}{2}} \frac{1}{2} \sin \delta_0 \, d\delta_0 = \sin \delta_0 \sin \frac{\varepsilon_0}{2} .$$

Für kleine Winkel ε_0 wird

$$\sin \varepsilon_0/2 \approx \varepsilon_0/2 \quad \text{und} \quad T'_H \approx \varepsilon_0 \frac{\sin \delta_0}{2} .$$

Rossbach multipliziert die mit dem Grosskreisverfahren erhaltenen Werte mit dem willkürlichen Korrekturfaktor

$$\frac{B_\delta}{B_Z} = \frac{1 + 2 \sin \delta}{3} .$$

Für kleine Winkel ε_0 ergibt sich somit:

$$T''_H \approx \varepsilon_0 \left(\frac{\sin \delta_0}{6} + \frac{\sin^2 \delta_0}{3} \right) .$$

Wenn wir allgemein schreiben $T_H \approx \varepsilon_0 \, \lambda$, so unterscheiden sich die verschiedenen Verfahren im wesentlichen durch den Verlauf der Funktion λ, Bild 7.

Das Grosskreisverfahren vernachlässigt die Abnahme der Beleuchtungsdichte vom Zenit zum Horizont und rechnet mit deren Mittelwert, wodurch Fehler von maximum +37 % und —13 % (bei $\delta_0 = 25°$ bzw. $\delta_0 = 90°$) entstehen. Die Werte nach Rossbach bleiben durchwegs um etwa 13 bis 15 % unterhalb den abgeleiteten Werten. Rossbach führt aber eine weitere willkürliche Korrektur ein: er ersetzt den Stellungswinkel δ_0 durch den Stellungswinkel des oberen Grenzstrahles ($\delta_0 + \varepsilon_0/2$) und erhält damit höhere Werte. Je nach Öffnungswinkel ε_0 kann somit dieses Verfahren zufällig zu richtigen Werten führen.

5. Einfluss der massgebenden lichttechnischen Parameter bei Shedhallen

Shedoberlichter stellen die beste Lösung der Tageslichtversorgung dar, da diese am weitgehendsten den unter 2 aufgeführten Anforderungen entsprechen. Um die Eigenschaften der Beleuchtung in diesem wichtigen Sonderfall zu analysieren, wurde der Einfluss der massgebenden lichttechnischen Parameter untersucht.

Bei ausgedehnten Hallen ist der Einfluss der Raumbreite, wie im vorigen Kapitel gezeigt, gering. Der Lichtverlust wird durch einen konstanten Faktor k berücksichtigt. Die unverglaste, pfostenlose, unendlich ausgedehnte Shedhalle ($k = 1$) wird lichttechnisch durch

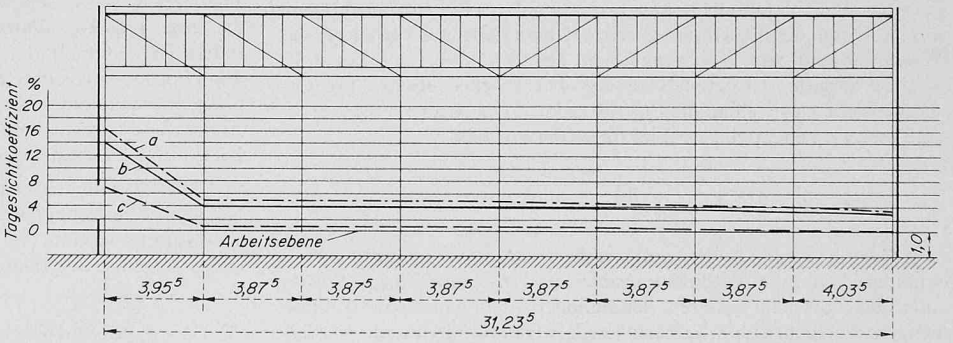

Bild 15 (rechts). Werte des Tageslichtkoeffizienten im Schnitt 3—3; Vergleich der gemessenen Werte (Kurve a) mit den gerechneten Werten (Kurve b). Bei der Berechnung wurden die Verluste und der Einfluss der Fassadenfenster berücksichtigt. Kurve c zeigt den gerechneten Einfluss der Fassadenfenster allein.

die folgenden drei, rein geometrischen Parameter charakterisiert, Bild 8:

a) Verhältnis Fensterbreite/Fensterabstand b/L

b) Verhältnis Raumhöhe/Fensterabstand H/L

c) Neigungswinkel der Fensterebene φ

Uns interessiert die Verteilung des Himmelslichtanteils des Tageslichtkoeffizienten T_H auf der Arbeitsebene, die hier 1,00 m über Hallenboden angenommen wurde. Um den Einfluss der drei Parameter zu zeigen, wurde der maximale, der minimale und der mittlere Wert des Tageslichtkoeffizienten auf Arbeitsebene in Abhängigkeit von den einzelnen Parametern aufgetragen, Bilder 9, 10 und 11. Die Kurven können auch zur überschlägigen Bestimmung von T_H durch Extrapolation verwendet werden.

6. Vergleich der gerechneten Werte mit Lichtmessungen

Um die theoretisch ermittelten Werte mit Messresultaten vergleichen zu können, sind in einer kürzlich erstellten, im Betrieb stehenden Shedhalle der Schwerindustrie Lichtmessungen ausgeführt worden. Dach und Wände der Halle sind mit weissen Isolierplatten verkleidet. Die lichttechnischen Abmessungen, sowie die Messergebnisse sind in den Bildern 12, 13, 14 und 15 dargestellt. Die Messungen wurden im März 1967 zwischen 15 und 16 Uhr bei stark bedecktem Himmel mittels eines Messinstrumentes der General Electric ausgeführt. Die Beleuchtungsstärke aussen variierte während den Messungen zwischen 3000 und 6000 Lux. Während die Lichtverluste infolge Pfosten und Sprossen (k_1) rechnerisch ermittelt worden sind, wurde die Lichtdurchlässigkeit des Glases (τ), sowie der Schwächungsfaktor infolge Verschmutzung (k_2) direkt an den Fensterbändern gemessen. Die Werte $\tau\ k_2$ betrugen bei den Shedfenstern 0,67 (einfache Drahtverglasung, bereits mittlere Verschmutzung nach einer Betriebszeit von etwa 8 Monaten), bei den Fassadenfenstern 0,75 (einfache Klarverglasung, etwas geringere Verschmutzung).

Wie aus den Bildern ersichtlich, ergaben die Messungen um etwa 10 bis 15% höhere Werte, als die Berechnung. Der (erwartete) Unterschied ist dem in der Berechnung nicht berücksichtigten Reflexionsanteil (hauptsächlich Innenreflexion T_R) zuzuschreiben.

Es ist von Interesse, zu bemerken, dass während den Messungen die Beleuchtungskörper ausgeschaltet werden mussten. Sonst standen sie voll im Betrieb, obwohl die mittlere Tageslicht-Beleuchtungsstärke um 250 Lux schwankte, also einen für die mittelgrobe Fabrikation genügenden Wert aufwies. Diese Tatsache entspricht früheren Beobachtungen, gemäss welchen die künstliche Beleuchtung eingeschaltet wird, sobald die Intensität der Tageslichtbeleuchtung unter diejenige der künstlichen Beleuchtung sinkt, die gewissermassen als normal empfunden wird.

Bei überdimensionierter künstlicher Beleuchtung werden deshalb auch grosszügig bemessene Oberlichter ihren Zweck nicht erfüllen. Bei sehr hohem Lichtbedarf ist das Ausnutzen der Tageslichtbeleuchtung überhaupt fragwürdig. Die wirtschaftliche Grenze der Beleuchtung mit Tageslicht dürfte bei etwa 500 bis 600 Lux liegen.

Zusammenfassung

Es werden Probleme der Tageslichtbeleuchtung bei Industriehallen erörtert, wichtige lichttechnische Grundbegriffe definiert, ein Überblick über die bestehenden Methoden zur Berechnung des Tageslichtkoeffizienten gegeben und eine neue Methode zur Bestimmung des Himmelslichtanteils des Tageslichtkoeffizienten abgeleitet. Die Auswertung für Shedhallen wird gezeigt, wobei die Einflüsse der geometrischen Gegebenheiten auf die Tageslichtbeleuchtung berücksichtigt werden. Ein Vergleich mit durchgeführten Lichtmessungen ergibt eine befriedigende Übereinstimmung.

Literaturverzeichnis

[1] Deutsche Normen: DIN 5034: Innenraumbeleuchtung mit Tageslicht. Leitsätze (Ausgabe Nov. 1959).

[2] *Grün, A.:* Gutes Licht im Industriebau. «Abhandlungen aus dem Stahlbau» (Sonderdruck). 1953, Heft 14.

[3] *Rossbach, R.:* Tageslicht im Industriebau. «Zentralblatt für Industriebau» 6. Jg. (1960) H. 3, S. 103–118; H. 4, S. 159–170.

[4] *Krochmann, J.:* Die ausreichende Versorgung von Innenräumen durch Tageslicht. «Zentralblatt für Industriebau» 9. Jg. (1963) Heft 12, S. 575–580.

[5] *Farner, M.:* Die Bedeutung der Fensterorientierung bei Industriebauten. Sonderdruck aus «Modernes Bauen», Band 2, Okt./Nov. 1960.

[6] *Schweiz. Beleuchtungs-Kommission:* Allgemeine Leitsätze für Beleuchtung. Publikation SEV 4014, 1965.

[7] *Danzeisen, H.:* Industriebau in Amerika. «Schweiz. Bauzeitung» 83. Jg. (1965), H. 18, S. 293–303.

[8] Sonderheft: Tageslicht. «Schweiz. Technische Zeitschrift», 63. Jg. (1966), H. 38/39, S. 785–854.

Die Bemessung von Trockenbeeten für Klärschlamm

DK 628.336

Von **John H. Nebiker,** Dr. sc. techn., und **Walter Munz,** dipl. Ing., EAWAG, Zürich

Heute, da der Absatz von flüssigem Faulschlamm an die Landwirtschaft je länger je weniger gewährleistet werden kann, ist es wohl angebracht, nicht nur die künstlich beschleunigte Trocknung, sondern auch den natürlichen Vorgang auf Trockenbeeten etwas näher zu untersuchen. Zwar sind schon einige Versuche in dieser Richtung unternommen worden. Gerade die wichtigen Einflüsse auf die Verdunstung – die Witterung und der Wassergehalt – wurden aber nicht zusammenwirkend erfasst. Zur Abklärung der sich dabei stellenden Fragen wurden deshalb in der EAWAG einige Versuchsreihen durchgeführt. Für die theoretischen Grundlagen, die Versuchsdurchführung und -ergebnisse sei auf die diesbezügliche Dissertation verwiesen [1]. Hier soll nun versucht werden, die Ergebnisse den Bedürfnissen der Praxis anzupassen.

1. Aus der Theorie der Trocknung

In der Trocknungstechnik wird der Verlauf der Trocknung mit einer Kurve dargestellt, die die Verdunstungsintensität I_S des Trockengutes (hier: Schlamm) in Abhängigkeit von der Schlamm-Feuchtigkeit u zeigt. Unter der Feuchtigkeit versteht man dabei das Verhältnis des Wassergewichts zum Trockengewicht der Feststoffe. Der Feststoffgehalt f hingegen ist definiert als Gewicht Trockensubstanz pro Gesamtgewicht des Schlammes (in Prozent). Die Umrechnung Feststoffgehalt – Feuchtigkeit erfolgt nach den Formeln:

$$u = 100 \left(\frac{100}{f} - 1 \right) \qquad \text{und} \qquad f = 100 \frac{100}{100 + u} .$$

Um die Einflüsse der wechselnden Umweltbedingungen auszuschalten, kann die Verdunstungsintensität I_W von reinem Wasser unter den gleichen äusseren Bedingungen (dies wurde bei den bisherigen Versuchen oft vernachlässigt) ebenfalls gemessen werden. Erst das Verhältnis I_S/I_W, das als Verdunstungs-Verhältnis e bezeichnet wird, stellt den Verlauf der Trocknungsintensität in alleiniger Abhängigkeit von der Feuchtigkeit dar. Dieser Verlauf ist in Bild 1 dargestellt. Für den praktischen Gebrauch genügt es, die Kurve im Gebiet des abnehmenden Verdunstungs-Verhältnisses (Abschnitt fallender Trocknungsintensität) durch eine Gerade zu ersetzen, die durch den Koordinatennullpunkt geht. Ihr Schnittpunkt mit der horizontalen Geraden im Abschnitt «konstanter» Trocknungsintensität wird als reduzierter kritischer Punkt u_{Kr} bezeichnet.

Dass die Trocknung bis zum Punkt u_{Kr} von der Schlammfeuchtigkeit unabhängig ist, wird erklärt mit dem Umstand, dass die Feuchtigkeit an der Schlammoberfläche in der Hauptsache durch Kapillarkräfte laufend nachgespiesen wird. Die Versuche der EAWAG haben ergeben, dass das Verdunstungs-Verhältnis e für gut ausgefaulten Schlamm in diesem Abschnitt um 105% liegt. Die Verdunstung des Schlammwassers geht also schneller vor sich als diejenige an einer freien Wasseroberfläche, was zum Teil auf die dunklere Farbe, die eine grössere Wärmestrahlungsabsorption bewirkt, zurückzuführen ist. Der Punkt u_{Kr} kennzeichnet den Anfang einer Verzögerung des Feuchtigkeitsnachschubes, die durch die allmähliche Austrocknung des Schlammes bedingt ist. Die Verdunstung an der Luft geht zurück, und es treten an der Schlammoberfläche trockene Stellen auf. Die Verdunstungszone zieht sich ins Schlamminnere zurück.

Die Feuchtigkeit beim Punkt u_{Kr} ist nicht konstant, sondern abhängig von der Schlammtiefe und der Trocknungsintensität, was wegen der Kapillarwirkung verständlich ist. Die Versuche der EAWAG haben folgende Beziehung ergeben:

$$(1) \qquad u_{Kr} = 18^{1/2} \left(I_{S,K}\, g_{TS} \right)^{1/2} = \sqrt{360\, I_W\, g_{TS}} \qquad [\%]$$