

- Ionen auf die Dispersion der Lichtbrechung der Alkalihalogenide. Fortschr. Mineralog. **39** (1961) S. 79–81.
- KORDES, E.: Über eine einfache Beziehung zwischen den Radien bzw. Kernladungen der Ionen und der Wellenlänge der ersten ultravioletten Eigenschwingung der isoelektronischen Alkalihalogenide. Naturwiss. **48** (1961) S. 642–643.
- KORDES, E.: Beziehungen zwischen dem ultravioletten Absorptionsspektrum der kristallisierten Alkali-Hydride und -Halogenide und den Radien sowie den Kernladungen der Ionen. I. Mitt. Die Verbindung mit isoelektronischen Ionenpaaren. Z. phys. Chem. (NF) **33** (1962) S. 1–14.
- [6] GEFFCKEN, W.: Bedeutung und Gültigkeitsbereich der ABESCHEN Gleichung für die Teildispersion von Gläsern. In: E. SCHOTT: Beiträge zur angewandten Glasforschung. Stuttgart: Wiss. Verlagsges. 1959. S. 255 bis 268. [Ref. Glastechn. Ber. **35** (1962) S. 147.]
- [7] KORDES, E.: Die Dispersion der Lichtbrechung. Z. phys. Chem. (NF) **8** (1956) S. 318–341.
- [8] HANDTKE und MARTENS, F. F.: Zit. in: LANDOLT-BÖRNSTEIN: Physikalisch-chemische Tabellen. 5. Aufl. Bd. 2. S. 911, Tab. 167: Optische Konstanten ausgewählter Kristalle. Berlin: Springer 1923.
- [9] GYULAI, Z.: Die Dispersion einiger Alkalihalogenide im Ultravioletten. Z. Phys. **46** (1927) S. 80–87.
- [10] DENNIS, L. M. und LAUBENGAYER, A. W.: Germanium XVII. Fused germanium dioxide and some germanium glasses. J. phys. Chem. **30** (1926) S. 1510–1526.
- [11] KORDES, E., VOGEL, W. und FETEROWSKY, R.: Physikalisch-chemische Untersuchungen über die Eigenschaften und den Feinbau von Phosphatgläsern. Z. Elektrochem. **57** (1963) S. 282–289. [Ref. Glastechn. Ber. **27** (1954) S. 470.]
- VOGEL, W.: Untersuchungen an binären Phosphatgläsern. Diss. Univ. Jena 1952.
- [12] MARTENS, F. F.: Zit. in: LANDOLT-BÖRNSTEIN: Zahlenwerte und Funktionen. 5. Aufl. Bd. 2. S. 915. Berlin: Springer 1923.
- [13] POCH, W.: Vollständige Entwässerung einer B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Schmelze und einige Eigenschaftswerte des daraus erhaltenen Glases. Glastechn. Ber. **37** (1964) S. 533–535.
- [14] MCSWAIN, B. D., BORRELLI, N. F. und SU, G.-J.: The effect of composition and temperature on the ultraviolet absorption of glass. Phys. and Chem. Glasses **4** (1963) S. 1–10. [Ref. Glastechn. Ber. **38** (1965) S. 64.]
- [15] STEVELS, J.M.: Les propriétés du verre en rapport avec sa structure. Verr. et Réfract. **2** (1948) S. 4–14. [Ref. Glastechn. Ber. **22** (1948/49) S. 429.] (41739)

DK 535.345.1:666.151

## Über die Transmission von Fensterglas

Von JÜRGEN KROCHMANN, Berlin

(Mitteilung aus dem Institut für Lichttechnik der Technischen Universität Berlin)

(Eingegangen am 18. September 1964)

Die für Tageslichtberechnungen wichtigen Stoffkennzahlen für die Lichttransmission von Fensterglas werden definiert. Für verschiedene Verhältnisse werden die Transmissionsgrade berechnet und danach Zahlenwerte für vereinfachte Tageslichtberechnungsmethoden vorgeschlagen.

Die Lichttransmission von Fensterglas [1] interessiert bei der Berechnung der Beleuchtung von Innenräumen durch Tageslicht. Dabei ist besonders die Leuchtdichteverteilung des das jeweilige Fenster beleuchtenden Himmelausschnittes und die Lage des Fensters von Einfluß. Hier sollen die verschiedenen Begriffe für die Lichttransmission von Fensterglas im Zusammenhang mit der Tageslichtberechnung untersucht werden.

### 1. Tageslichttechnische Begriffe

Um bei der Planung der Beleuchtung von Innenräumen mit Tageslicht unabhängig vom Beleuchtungsniveau zu sein, bezieht man die im Rauminnern vorhandene Beleuchtungsstärke  $E_p$  auf die im Freien durch den gesamten Himmel erzeugte Beleuchtungsstärke  $E_a$ . Dieses Verhältnis wird als Tageslichtquotient  $T$  bezeichnet [2].

$$T = \frac{E_p}{E_a} \cdot 100\% \quad (1)$$

Der Tageslichtquotient setzt sich aus drei Anteilen, dem Himmelslichtanteil  $T_H$ , dem Außenreflexionsanteil  $T_V$  und dem Innenreflexionsanteil  $T_R$  zusammen [2] (Bild 1):

$$T = T_H + T_V + T_R \quad (2)$$

Bei der Definition des Tageslichtquotienten und seiner Komponenten ist die Lichtschwächung durch die Verglasung ( $\tau$ ), Versprossung ( $k_1$ ) und Verschmutzung ( $k_2$ ) des Fensters bereits enthalten. Im allgemeinen wird angenommen, daß die Faktoren  $k_1$  und  $k_2$  nicht von der Richtung des Lichtdurchganges durch das Fenster

und von der spektralen Zusammensetzung der Strahlung abhängen. Dann ergibt sich der Himmelslichtanteil  $T_H$  zu:

$$T_H = k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{K_m}{E_{a(\lambda)}(\omega_F)} \iint (L_{e\lambda})_{d\omega} \cdot \tau(\lambda)_\xi \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \cdot \cos \varepsilon_2 \cdot d\omega \quad (3)$$

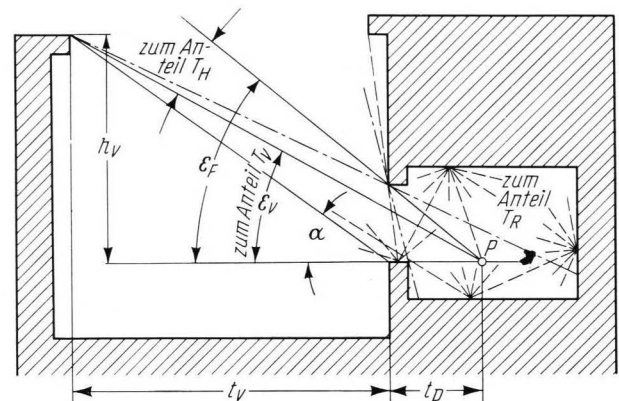


Bild 1. Zusammensetzung des Tageslichtquotienten in einem Punkt der Meße Ebene im einseitig befensterten Innenraum.

- $K_m$  Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalentes,
- $E_a$  Horizontalbeleuchtungsstärke im Freien,
- $(L_{e\lambda})_{d\omega}$  im Raumwinkelement  $d\omega$  vorhandene Strahldichte,
- $\tau(\lambda)_\xi$  spektraler Transmissionsgrad der Verglasung beim Lichteinfallswinkel  $\xi$  auf das Glas (siehe Abschnitt 2),

- V(λ) spektraler Hellempfindlichkeitsgrad für Tagessehen,
- ε<sub>2</sub> Lichteinfallswinkel auf der Bezugsebene, gemessen gegen ihre Normale,
- ω<sub>F</sub> Raumwinkel, den das Fenster vom Bezugspunkt aus einnimmt.

Dementsprechend wurden Diagramme zur Berechnung von T<sub>H</sub> unter Berücksichtigung der Lichttransmission von Fensterglas aufgestellt [3]. Auch der Außenreflexionsanteil T<sub>V</sub> kann so mit Berücksichtigung der Verglasung berechnet werden.

Für den Innenreflexionsanteil T<sub>R</sub> wird angesetzt [4]:

$$T_R = \tau \cdot k_1 \cdot k_2 \frac{A_F}{A} \frac{1}{1 - \varrho_m} (f_o \cdot \varrho_{BW} + f_u \cdot \varrho_{DW}) \quad (4)$$

- A<sub>F</sub> Fensterfläche (Maueröffnung),
- A Raumbegrenzungsfläche,
- ϱ<sub>m</sub> mittlerer Reflexionsgrad der Raumbegrenzungsflächen,
- ϱ<sub>BW</sub> mittlerer Reflexionsgrad von Boden und Wandunterteil (ohne Fensterwand),
- ϱ<sub>DW</sub> mittlerer Reflexionsgrad von Decke und Wandoberteil (ohne Fensterwand),
- f<sub>o</sub> Fensterfaktor durch aus dem oberen Halbraum einfallenden Lichtstrom,
- f<sub>u</sub> Fensterfaktor durch aus dem unteren Halbraum einfallenden Lichtstrom,
- f Fensterfaktor, das Verhältnis der vertikalen Beleuchtungsstärke auf der Fensterebene zur Horizontalbeleuchtungsstärke im Freien, Summe von f<sub>o</sub> und f<sub>u</sub>.

Dabei ist τ das Verhältnis des vom Glas durchgelassenen (Φ<sub>τ</sub>) zum auffallenden (Φ) Lichtstrom.

$$\tau = \frac{\Phi_\tau}{\Phi} \quad (5)$$

In Deutschland berechnet man statt dessen die Komponenten des Tageslichtquotienten zunächst für die Rohbauöffnung des Fensters (T<sub>HR</sub>, T<sub>VR</sub> und T<sub>RR</sub>) und berücksichtigt die Lichtverluste durch Verglasung, Versprossung und Verschmutzung nachträglich [5].

$$T = \tau \cdot k_1 \cdot k_2 (T_{HR} + T_{VR} + T_{RR}) \quad (6)$$

Dabei wird vorausgesetzt, daß die Lichtschwächung für die drei Komponenten des Tageslichtquotienten gleich groß ist. Das trifft genau genommen für die Lichttransmission nicht zu.

Besonders bei der vereinfachten Planung der Tagesbeleuchtung [6] ist dieses Verfahren jedoch zweckmäßig, weil nur dann eine Umrechnung von einer Verglasung auf eine andere mit größerem oder kleinerem Transmissionsgrad einfach ist.

## 2. Begriffe für die Lichttransmission von Fensterglas

Bei quasiparallelem gerichteten Lichteinfall unter dem Winkel ξ läßt sich der spektrale Transmissionsgrad τ(λ)<sub>ξ</sub> von Fensterglas, das als optisch klarer Stoff betrachtet werden kann, berechnen [7] (Bild 2):

$$\tau(\lambda)_\xi = \frac{(1 - \varrho_1(\lambda)_\xi)(1 - \varrho_2(\lambda)_\xi)}{1 - \varrho_1(\lambda)_\xi \cdot \varrho_2(\lambda)_\xi} \cdot \vartheta(\lambda)_\xi \quad (7)$$

Die Größen ϱ<sub>1</sub>(λ)<sub>ξ</sub> und ϱ<sub>2</sub>(λ)<sub>ξ</sub> hängen nur von der Brechzahl des Glases, vom Lichteinfallswinkel ξ und vom Polarisationszustand der Strahlung ab. Für die Lichtstromanteile, die von der parallel bzw. senkrecht

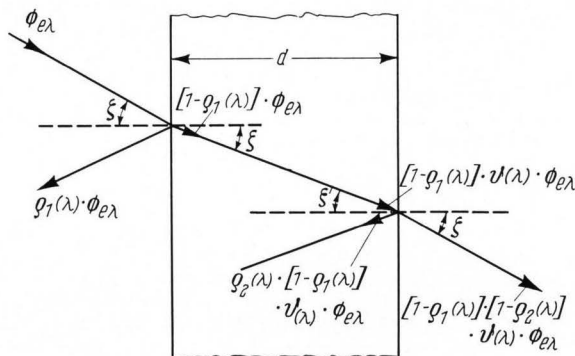


Bild 2. Lichtdurchgang durch einen optisch klaren Stoff.

zur Einfallsebene schwingenden elektrischen Feldstärke herrühren, gilt:

$$\varrho_1(\lambda)_p = \frac{\tan^2(\xi - \xi')}{\tan^2(\xi + \xi')} \quad (8)$$

$$\varrho_1(\lambda)_s = \frac{\sin^2(\xi - \xi')}{\sin^2(\xi + \xi')} \quad (9)$$

Für ϱ<sub>2</sub>(λ)<sub>ξ</sub> gelten entsprechende Gleichungen mit vertauschten Winkeln. Der Zusammenhang zwischen den Winkeln ξ und ξ' (Bild 2) ist gegeben durch:

$$\sin \xi = n \cdot \sin \xi' \quad (10)$$

Der spektrale Reintransmissionsgrad ϑ(λ)<sub>ξ</sub> nimmt (nach LAMBERT) mit wachsender Schichtdicke des Glases ab.

$$\vartheta(\lambda)_\xi = \delta(\lambda) \frac{d}{d_0 \sqrt{1 - \sin^2 \xi / n^2}} \quad (11)$$

- δ(λ) spektraler Reintransmissionsgrad für die Einheit der Schichtdicke d<sub>0</sub>,
- d Schichtdicke des Glases.

Für doppelte Verglasung ergibt sich bei unendlich großen Glasflächen:

$$\tau(\lambda)_\xi \text{ doppelt} = \tau^2(\lambda)_\xi \text{ einfach} \cdot \frac{1}{1 - \varrho^2(\lambda)_\xi \text{ einfach}} \quad (12)$$

ϱ(λ)<sub>ξ</sub> einfach spektraler Reflexionsgrad beim Lichteinfallswinkel ξ für einfache Verglasung.

In Bild 3 ist der spektrale Transmissionsgrad von Fensterglas (n = 1,52) bei quasiparallelem Lichteinfall für einfache Verglasung für verschiedene Reintransmissionsgrade ϑ(λ)<sub>±</sub> — gemessen senkrecht zur Glasfläche — in Abhängigkeit vom Lichteinfallswinkel ξ dargestellt.

Mit Hilfe der Gleichung (7) läßt sich der Lichttransmissionsgrad als Verhältnis des von einem Körper durchgelassenen Lichtstromes Φ<sub>τ</sub> zu dem auffallenden Lichtstrom Φ berechnen [8].

$$\tau_\omega = \frac{\Phi_\tau}{\Phi} = \frac{\int_{(\lambda)} \int_{(2\pi)} (L_{e\lambda})_{d\omega} \cdot \tau(\lambda)_\xi \cdot V(\lambda) d\lambda \cos \xi d\omega}{\int_{(\lambda)} \int_{(2\pi)} (L_{e\lambda})_{d\omega} \cdot V(\lambda) d\lambda \cos \xi d\omega} \quad (13)$$

τ<sub>ω</sub> Lichttransmissionsgrad bei Lichteinfall aus dem Raumwinkel ω,

- $(L_{e\lambda})_{d\omega}$  spektrale Strahldichte im Raumwinkelement  $d\omega$ ,
- $\tau(\lambda)_\xi$  spektraler Transmissionsgrad nach Gleichung (7),
- $V(\lambda)$  spektraler Hellempfindlichkeitsgrad für Tagessehen,
- $\xi$  Lichteinfallswinkel für das Raumwinkelement  $d\omega$  auf der Glasfläche.

Der in Gleichung (13) definierte Begriff ist identisch mit dem in den Gleichungen (4) und (5) verwendeten. Bei der Beleuchtung durch Tageslicht hängt er damit ab von:

- a. der Brechzahl des Glases  $n$ ,
- b. dem Verlauf des spektralen Reintransmissionsgrades für die Einheit der Schichtdicke des Glases  $\delta(\lambda)$ ,
- c. der Schichtdicke des Glases  $d$ ,
- d. der Leuchtdichteverteilung im beleuchteten Raumwinkel, damit im allgemeinen auch von
- e. der Lage der Glasfläche in bezug zum Himmel,
- f. der Strahlungsfunktion des Himmelslichtes,
- g. der Polarisation des Himmelslichtes.

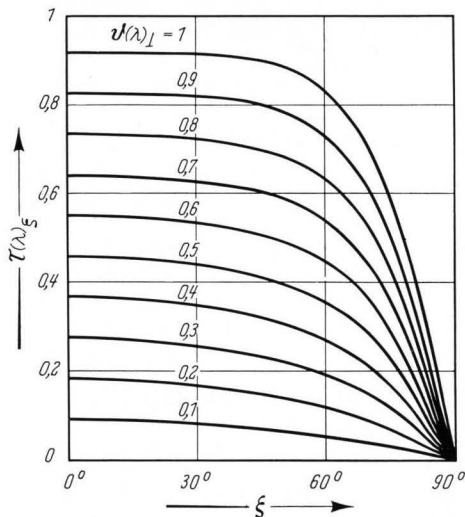


Bild 3. Spektraler Transmissionsgrad von Fensterglas (einfache Verglasung) als Funktion des Lichteinfallswinkels  $\xi$  für verschiedene Reintransmissionsgrade.

Wenn die Strahlungsfunktion im beleuchteten Raumwinkel  $\omega$  konstant ist, so kann der spektrale Transmissionsgrad  $\tau(\lambda)_\omega$  für eine gegebene Leuchtdichteverteilung berechnet werden.

$$\tau(\lambda)_\omega = \frac{\int_{(2\pi)} (L_{e\lambda})_{d\omega} \cdot \tau(\lambda)_\xi \cdot \cos \xi \, d\omega}{\int_{(2\pi)} (L_{e\lambda})_{d\omega} \cos \xi \, d\omega} \quad (14)$$

Dann läßt sich Gleichung (13) schreiben:

$$\tau_\omega = \frac{\int_{(\lambda)} L_{e\lambda \text{ rel}} \tau(\lambda)_\omega \cdot V(\lambda) \, d\lambda}{\int_{(\lambda)} L_{e\lambda \text{ rel}} V(\lambda) \, d\lambda} \quad (15)$$

$L_{e\lambda \text{ rel}}$  relative spektrale Strahldichte der auffallenden Strahlung.

Statt der in Gleichung (13) definierten Größe wird für die Berechnung des Himmelslichtanteiles  $T_H$  und des Außenreflexionsanteiles  $T_V$  nach Gleichung (6) eine Stoffkennzahl benötigt, die sich als Verhältnis der Beleuchtungsstärke mit  $(E_\tau)$  und ohne  $(E)$  Verglasung im

Strahlengang ergibt.

$$\tau'_\omega = \frac{E_\tau}{E} = \frac{\int_{(\lambda)} \int_{(\omega_F)} (L_{e\lambda})_{d\omega} \cdot \tau(\lambda)_\xi \cdot V(\lambda) \, d\lambda \cos \varepsilon_2 \, d\omega}{\int_{(\lambda)} \int_{(\omega_F)} (L_{e\lambda})_{d\omega} V(\lambda) \, d\lambda \cos \varepsilon_2 \, d\omega} \quad (16)$$

- $\tau'_\omega$  Lichttransmissionsgrad bei Lichteinfall aus dem Raumwinkel  $\omega_F$ , den das Fenster vom Bezugspunkt aus einnimmt,
- $\varepsilon_2$  Lichteinfallswinkel auf der Bezugsebene.

Die so definierte Stoffkennzahl  $\tau'_\omega$  hängt außer von den bei der Größe  $\tau_\omega$  angeführten Einflußgrößen auch vom Raumwinkel, den die Fensterfläche vom Bezugspunkt aus einnimmt — damit also vom Fensterhöhenwinkel  $\varepsilon_F$  und Fensterbreitenwinkel  $\beta_F$  — und von der Lage der Bezugsebene im Verhältnis zum Glas und zum Himmel ab. Nur wenn die Bezugsebene parallel zur Glasfläche liegt, stimmen die beiden Stoffkennzahlen  $\tau_\omega$  und  $\tau'_\omega$  überein, sofern es sich um unendlich große Fenster handelt.

Wenn die Strahlungsfunktion im Fensterraumwinkel  $\omega_F$  konstant ist, so kann für eine gegebene Leuchtdichteverteilung gesagt werden:

$$\tau'(\lambda)_\omega = \frac{\int_{(\omega_F)} (L_{e\lambda})_{d\omega} \cdot \tau(\lambda)_\xi \cos \varepsilon_2 \, d\omega}{\int_{(\omega_F)} (L_{e\lambda})_{d\omega} \cos \varepsilon_2 \, d\omega} \quad (17)$$

Dann ist ähnlich Gleichung (15):

$$\tau'_\omega = \frac{\int_{(\lambda)} L_{e\lambda \text{ rel}} \tau'(\lambda)_\omega \cdot V(\lambda) \, d\lambda}{\int_{(\lambda)} L_{e\lambda \text{ rel}} V(\lambda) \, d\lambda} \quad (18)$$

### 3. Rechenwerte für die Lichttransmission

#### 3.1. Spektraler Transmissionsgrad

Um einen Überblick über die die Lichttransmission von Fensterglas kennzeichnenden Zahlenwerte zu er-

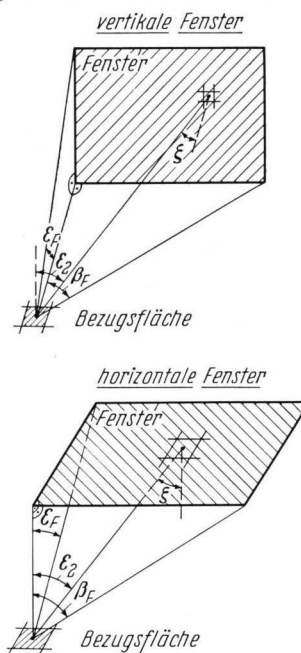


Bild 4. Bezeichnungen für vertikale und horizontale Fenster.

halten, ist für die Brechzahl  $n = 1,52$  die spektrale Stoffkennzahl  $\tau'(\lambda)_\omega$  nach Gleichung (17) für einfache Verglasung bei den für die Tageslichttechnik wichtigen Bedingungen in Abhängigkeit vom Fensterbreitenwinkel  $\beta_F$  und Fensterhöhenwinkel  $\varepsilon_F$  (siehe Bild 4) berechnet

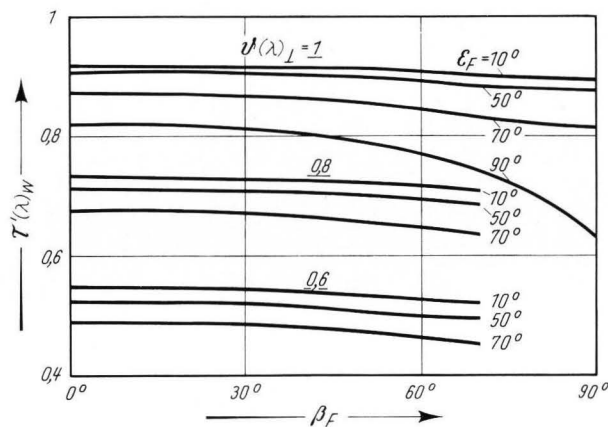
(Tabelle 1). Die Ergebnisse sind entsprechend Tabelle 2 in den Bildern 5a bis 5e dargestellt.

Für die Rechnungen ist bedeckter Himmel mit einer Leuchtdichtevertelung nach MOON und SPENCER vor-

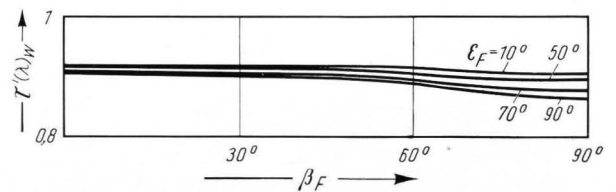
Tabelle 1. Transmissionsgrade von Fensterglas  
( $n = 1,52; \theta = 1$ )

Lage der Glasfläche	Lage der Empfängerfläche	Lichttransmissionsgrad bei Lichteinfall							
		quasiparallel, senkrecht		halbräumlich, diffus mit konstanter Leuchtdichte		halbräumlich, bedeckter Himmel		halbräumlich, oben bedeckter Himmel, unten konstante Verbauungs-Leuchtdichte	
		einfache Verglasung	doppelte Verglasung	einfache Verglasung	doppelte Verglasung	einfache Verglasung	doppelte Verglasung	einfache Verglasung	doppelte Verglasung
horizontal	horizontal			0,839	0,741	0,863	0,770	—	—
	vertikal			0,660	0,543	0,728	0,615	—	—
	horizontal	0,918	0,849	0,660	0,543	0,638	0,520	—	—
vertikal	vertikal, parallel zum Glas			0,839	0,741	0,826	0,724	0,828	0,726
	vertikal, senkrecht zum Glas			0,660	0,543	0,643	0,525	0,645	0,527

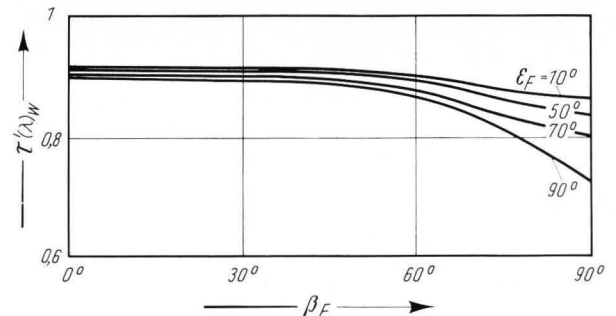
Bilder 5a bis 5e. Lichtdurchlässigkeit  $\tau'(\lambda)_w$  für einfache Verglasung als Funktion des Fensterbreitenwinkels  $\beta_F$  für verschiedene Fensterhöhenwinkel  $\epsilon_F$ .



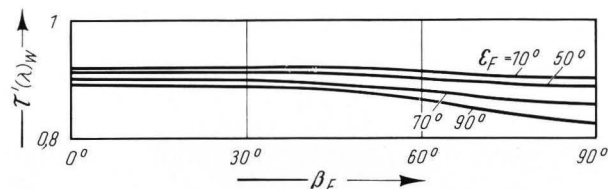
a) Glasfläche vertikal, Bezugsebene horizontal,  $n = 1,52$ ;



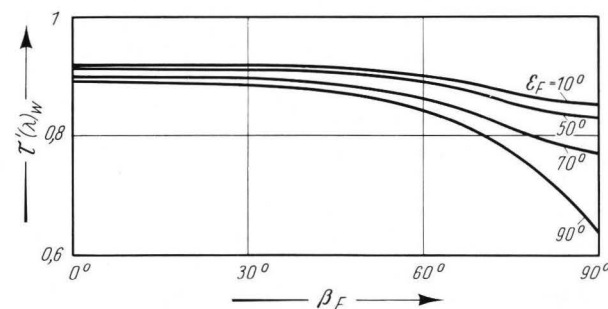
d) Glas horizontal, Bezugsebene parallel zum Glas,  $n = 1,52, \theta(\lambda) = 1$ ;



e) Glas horizontal, Bezugsebene vertikal,  $n = 1,52; \theta(\lambda) = 1$ .



b) Glas vertikal, Bezugsebene parallel zum Glas,  $n = 1,52, \theta(\lambda) = 1$ ;



c) Glas vertikal, Bezugsebene vertikal, senkrecht zum Glas,  $n = 1,52, \theta(\lambda) = 1$ ;

Tabelle 2. Darstellung von  $\tau'(\lambda)_w$  für bedeckten Himmel

Bild Nr.	Verglasung	Lage der Glasfläche	Lage der Bezugsebene
4	einfach	vertikal	horizontal
5	einfach	vertikal	vertikal, parallel zum Glas
6	einfach	vertikal	vertikal, senkrecht zum Glas
7	einfach	horizontal	horizontal
8	einfach	horizontal	vertikal

ausgesetzt [2]:

$$L_\epsilon = L_0 \frac{1 + 2 \cos \epsilon}{3} \quad (19)$$

$L_\epsilon$  Leuchtdichte unter dem Winkel  $\epsilon$ , gemessen gegen den Zenit,  
 $L_0$  Zenitleuchtdichte.

Die in Tabelle 1 für  $\tau'(\lambda)_\omega$  für eine zur Glasfläche parallel liegende Bezugsebene angegebenen Zahlenwerte stimmen mit den früher von LEGER [9] ermittelten überein.

Von LEGER [9] wird empirisch ein direkter Zusammenhang zwischen dem spektralen Transmissionsgrad  $\tau(\lambda)_\perp$  bei senkrechtem quasiparallelem Lichteinfall und dem spektralen Transmissionsgrad bei Lichteinfall vom bedeckten Himmel für horizontale und vertikale Verglasung angegeben. Es ist danach für

- a. vertikale Verglasung:  $\tau(\lambda)_\omega \text{ vertikal} = 0,902 \cdot \tau(\lambda)_\perp^{1,14}$  (20).
- b. horizontale Verglasung:  $\tau(\lambda)_\omega \text{ horizontal} = 0,943 \cdot \tau(\lambda)_\perp^{1,11}$  (20a)

Ähnliche Zusammenhänge könnten auch zwischen  $\tau'(\lambda)_\omega$  und  $\tau(\lambda)_\perp$  für definierte Werte von  $\epsilon_F$  und  $\beta_F$  bei gegebenen übrigen Parametern (Lage der Glasfläche, Lage der Bezugsebene) bestehen.

### 3.2. Lichttransmissionsgrad

Bei konstanter Strahlungsfunktion im beleuchteten Raumwinkel lassen sich die Lichttransmissionsgrade  $\tau_\omega$  und  $\tau'_\omega$  nach den Gleichungen (13) und (16) berechnen, wenn die Strahlungsfunktion des Tageslichtes und der spektrale Transmissionsgrad  $\tau(\lambda)_\perp$  bekannt sind.

Nach Untersuchungen von JUDD u. a. [11] besteht unabhängig von der Größe des beobachteten Himmelsausschnittes ein direkter Zusammenhang zwischen der ähnlichsten Farbtemperatur  $T_n$  und der Strahlungsfunktion des Tageslichtes. Die für  $T_n$  gemessenen Werte liegen nach den Messungen von HERDERSON und HODGKISS [12], die von JUDD [11] mit verwendet wurden, bei:

- a. bedecktem Himmel zwischen  $T_n = 4600$  und  $7200$  °K
- b. klarem Himmel zwischen  $T_n = 8000$  und  $> 40000$  °K.

Die meisten Meßwerte liegen zwischen  $5000$  und  $7000$  °K. Danach scheint es zweckmäßig, für bedeckten Himmel eine ähnlichste Farbtemperatur von  $5500$  °K und für das mittlere Tageslicht (Mittelwert über alle vorkommenden Fälle) eine ähnlichste Farbtemperatur von  $6500$  °K anzunehmen. Die Strahlungsfunktionen dieser beiden ähnlichsten Farbtemperaturen sind in Bild 6 dargestellt.

Für Fensterglas (mittlere Dicke = MD-Fensterglas) ist der spektrale Transmissionsgrad  $\tau(\lambda)_\perp$  bei senkrechtem quasiparallelem Lichteinfall innerhalb des Bereiches der sichtbaren Strahlung ( $\lambda = 380$  nm bis  $780$  nm) praktisch unabhängig von der Wellenlänge [10] (Bild 7). Es scheint danach nicht nötig zu sein, bei der Berechnung der Lichttransmission die Strahlungsfunktion des Himmelslichtes und die Lichtabsorption im Glasinnern zu berücksichtigen. Die in den Bildern 5a bis 5e angegebenen Kurven können daher als kennzeichnend für MD-Fensterglas bei bedecktem Himmel angesehen werden. Das geht auch aus den ausführlichen Untersuchungen von PLEIJEL [13] an 45 verschiedenen Fenstergläsern hervor, bei denen nur die „wärmeabsorbierenden“ Gläser auch im sichtbaren Spektralbereich stärkere Absorption zeigen.

### 4. Vorschläge für Vereinbarungen zur Angabe von Zahlenwerten für die Lichttransmission von Fensterglas

Nach dem vorher Gesagten scheint es zweckmäßig, die folgenden Empfehlungen für die Angabe von

Zahlenwerten für die Lichttransmission von Fensterglas zu geben:

- a. Brechungsanzahl n: Die Brechungsanzahl n kann mit Hilfe von üblichen Refraktometern gemessen werden.
- b. Spektraler Reintransmissionsgrad für die Einheit der Schichtdicke: Der spektrale Reintransmissionsgrad für die Einheit der Schichtdicke  $\delta(\lambda)$  kann dadurch ermittelt werden, daß der spektrale Transmissionsgrad  $\tau(\lambda)$  bei quasiparallelem senkrechtem Lichteinfall gemessen wird und  $\delta(\lambda)$  mit Hilfe der Brechungsanzahl n über die Gleichungen (7) bis (11) berechnet wird.

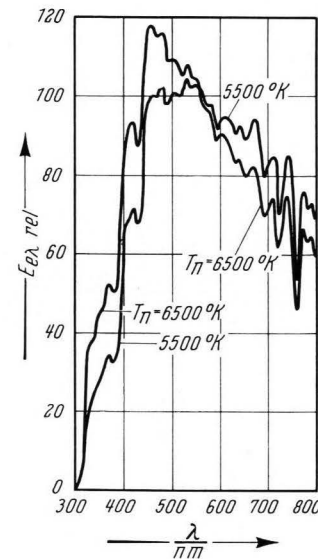


Bild 6. Relative spektrale Bestrahlungsstärke durch Tageslicht für  $T_n = 5500$  °K und  $6500$  °K.

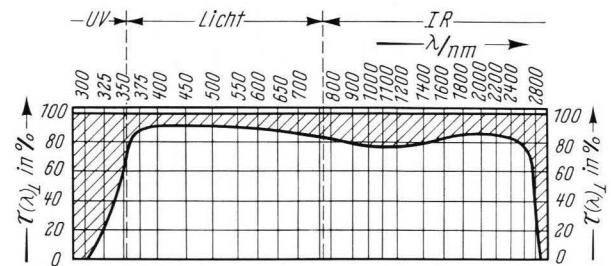


Bild 7. Spektraler Transmissionsgrad von MD-Fensterglas bei senkrechtem Lichteinfall.

- c. Schichtdicke des Glases: Die Schichtdicke des Glases sollte für MD-Fensterglas mit  $d = 2,8$  mm angenommen werden, für die übrigen stärker absorbierenden Fenstergläser müsste d mit angegeben werden.
- d. Leuchtdichteverteilung des Himmels: Zahlenwerte für die Lichttransmission von Fensterglas sollten zunächst für bedeckten Himmel angegeben werden. Für den bedeckten Himmel ist die Leuchtdichteverteilung entsprechend Gleichung (19) international festgelegt.
- e. Lage der Glasfläche: Die Lage der Glasfläche bestimmt die Lichttransmission wesentlich. Für Seitenfenster ist sie vertikal, für Oberlichter sollten vertikale und horizontale Lage sowie Neigungswinkel von  $30^\circ$  und  $60^\circ$  berücksichtigt werden.

- f. Strahlungsfunktion des Himmelslichtes: Für das Licht des bedeckten Himmels sollte eine ähnlichste Farbtemperatur von  $T_n = 5500^\circ\text{K}$  unabhängig vom Lichteinfallswinkel angenommen werden.
- g. Polarisation des Himmelslichtes: Die Strahlung des bedeckten Himmels kann als nicht polarisiert betrachtet werden.
- h. Raumwinkel, den das Fenster vom Meßpunkt aus einnimmt: Für die Winkel, die das Fenster vom Meßpunkt aus einnimmt, wird für Räume mit Seitenfenstern vorgeschlagen:  $\varepsilon_F = 40^\circ$ ,  $\beta_F = 2 \times 70^\circ$ . Diese Zahlenwerte dürften mittleren Verhältnissen entsprechen. Für die im allgemeinen großen Räume mit Oberlichtern kann angenommen werden:  $\varepsilon_F = \beta_F = 90^\circ$  (siehe Bild 4).
- i. Lage der Bezugsfläche: Im allgemeinen wird die horizontale Bezugsfläche als besonders wichtig angesehen. Daher sollte sie den Rechnungen zugrunde gelegt werden.

Für vertikale Seitenfenster sind in Tabelle 3 die für  $\varepsilon_F = 40^\circ$  und  $\beta_F = 70^\circ$  bei  $\vartheta = 1$  errechneten Zahlen-

werte zusammengestellt. Danach lassen sich die in der Tabelle 3 mit eingetragenen Zahlenwerte für MD-Fensterglas vorschlagen. Für den Himmelslichtanteil  $T_H$  und den Außenreflexionsanteil  $T_V$  ergeben sich Zahlenwerte, mit denen schon heute gerechnet wird [2]. Die für den Innenreflexionsanteil  $T_R$  maßgebenden Zahlenwerte sind etwas niedriger gewählt als die Rechenwerte, da sich entsprechend Gleichung (20) die Abweichung von  $\vartheta = 1$  stärker bemerkbar macht, wenn der beleuchtende Raumwinkel größer wird. Soll mit einem gemeinsamen Faktor für die Lichttransmission bei der Berechnung des Tageslichtquotienten  $T$  gerechnet werden, so sind Zahlenwerte zu wählen, die zwischen denen für  $T_H$  und für  $T_R$  liegen. In vielen Fällen kann man annehmen, daß die Anteile  $T_H$  und  $T_R$  etwa gleich groß sind. Auf diese Weise kommt man zu einem Schwächungsfaktor durch die Verglasung, der wesentlich kleiner ist als bisher angenommen [2].

Für Oberlichter, die mit MD-Fensterglas verglast sind, sind Zahlenwerte in Tabelle 4 vorgeschlagen. (Die Zahlenwerte für Oberlichtneigungen von  $30^\circ$  und  $60^\circ$

Tabelle 3. Lichttransmission bei Seitenfenstern

Lage der Bezugsfläche	Transmissionsgrade für $\varepsilon_F = 40^\circ$ ; $\beta_F = 70^\circ$ bei $\vartheta = 1$									
	(errechnet)				(Vorschlag für Mittelwert)					
	$T_H$ Verglasung		$T_R$ Verglasung		$T_H$ und $T_V$ Verglasung		$T_R$ Verglasung		$T$ Verglasung	
	einfach	doppelt	einfach	doppelt	einfach	doppelt	einfach	doppelt	einfach	doppelt
horizontal	0,898	0,816								
vertikal, parallel zur Glasfläche	0,901	0,821	0,638	0,520	0,9	0,8	0,6	0,5	0,75	0,65
vertikal, senkrecht zur Glasfläche	0,874	0,781								

Tabelle 4. Lichttransmission bei Oberlichtern

Neigungswinkel der Glasfläche gegen die Horizontale	Transmissionsgrad für Verglasung	
	einfach	doppelt
$0^\circ$ (horizontal)	0,85	0,75
$60^\circ$	0,80	0,70
$30^\circ$	0,70	0,60
$90^\circ$ (vertikal)	0,60	0,50

sind als Zwischenwerte geschätzt.) Die Beleuchtung durch Oberlichter ist vor allem in großen Industriebauten (Hallen) wichtig, so daß praktisch mit halbräumlichem Lichteinfall ( $\varepsilon_F \approx \beta_F \approx 90^\circ$ ) gerechnet werden kann. Die vorgeschlagenen Zahlen sind gegenüber den Rechenwerten nach unten abgerundet, weil tatsächlich  $\vartheta < 1$  ist und weil bei vertikalen Fenstern das mit größerem Winkel einfallende Licht wichtiger ist, für das kleinere Werte von  $\tau$  gelten.

### 5. Schrifttum

- [1] Normblatt DIN 1249 (August 1952): Tafelglas. Dicken, Sorten, Prüfung, Maßangaben. Berlin u. Köln: Beuth-Vertr. 1952. [Ref. Glastechn. Ber. 24 (1952) S. 293.]
- [2] Normblatt DIN 5034 (November 1959): Innenraumbeleuchtung mit Tageslicht. Leitsätze. Berlin u. Köln: Beuth-Vertr. 1959.
- [3] PETHERBRIDGE, P.: Entwurf eines CIE-Leitfadens zur Berechnung der Beleuchtung mit Tageslicht. Überarb. Entwurf März 1959. Unveröffentlicht.
- [4] KROCHMANN, J.: Über die Bestimmung des Innenreflexionsanteils des Tageslichtquotienten. Lichttechn. 14 (1962) S. 105–109.
- [5] Normblatt DIN 5034, Bbl. 1 (November 1963): Innenraumbeleuchtung mit Tageslicht. Berechnung und Messung. Berlin u. Köln: Beuth-Vertr. 1963. [Ref. Glastechn. Ber. 37 (1964) S. 224.]
- [6] KROCHMANN, J.: Zur Frage der vereinfachten Tageslichtberechnung. Gesundheitsing. 85 (1964) S. 47–52.
- [7] Normblatt DIN 1349 (Februar 1955): Lichtabsorption in optisch klaren Stoffen. Größen und Bezeichnungen. Berlin u. Köln: Beuth-Vertr. 1955.
- [8] Normblatt DIN 5036, Bl. 2 (August 1962): Bewertung und Messung der lichttechnischen Eigenschaften von Werkstoffen. Lichttechnische Stoffkennzahlen, Begriffsbestimmungen. Berlin u. Köln: Beuth-Vertr. 1962.
- [9] LEGER, L.: Détermination des caractéristiques optiques des vitrages. Manuskript nach einem Vortrag in Lausanne freundlichst überlassen von der Firma Glaverbel, Gilly, Belgien.
- [10] VÖLCKERS, O.: Tafelglas-Daten. 2. Aufl. Schorndorf: Hofmann 1958.
- [11] JUDD, B., MAC ADAM, L. und WYSZECKI, G.: Spectral distribution of typical daylight as a function of correlated temperature. J. opt. Soc. Amer. 54 (1964) S. 1031 bis 1040.
- [12] HENDERSON, S. T. und HODGKISS, D.: The spectral energy distribution of daylight. Brit. J. appl. Phys. 14 (1963) S. 125–131.
- [13] PLEIJEL, G.: Fönsterglasens transmission av stralming från sol och himmel. T. Värme-, Ventil.-, Sanit.-Kyltekn. (Stockholm) 32 (1961) S. 67–72. (41295)