

DIN EN 410



ICS 81.040.20

Ersatz für  
DIN EN 410:1998-12

**Glas im Bauwesen –  
Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen  
Kenngrößen von Verglasungen;  
Deutsche Fassung EN 410:2011**

Glass in building –  
Determination of luminous and solar characteristics of glazing;  
German version EN 410:2011

Verre dans la construction –  
Détermination des caractéristiques lumineuses et solaires des vitrages;  
Version allemande EN 410:2011

Gesamtumfang 62 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN  
Normenausschuss Lichttechnik (FNL) im DIN

## Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 410:2011) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 129 „Glas im Bauwesen“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom NBN, Belgien, gehalten wird.

Das zuständige deutsche Gremium ist der Arbeitsausschuss NA 005-09-91 AA „Prüfung von Beschichtungen auf Glas“ im Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN.

### Änderungen

Gegenüber DIN EN 410:1998-12 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) komplette fachliche und redaktionelle Überarbeitung;
- b) Teilung und Überarbeitung des früheren Abschnittes 3 „Symbole und Definitionen“ in zwei Abschnitte, Abschnitt 3 „Begriffe“ und Abschnitt 4 „Symbole“;
- c) Einführung des Durchlassfaktors SC in einem neuen Abschnitt 5.7 „Durchlassfaktor“;
- d) Überarbeitung von Tabelle 3 „Normierte relative spektrale Verteilung des UV-Bereichs der Globalstrahlung  $U_{\lambda}$ , multipliziert mit dem Wellenlängenintervall  $\Delta\lambda$ “;
- e) Anhang A (normativ) „Verfahren für die Berechnung der spektralen Kenngrößen von Glasscheiben mit verschiedener Dicke und/oder Einfärbung“ redaktionell geringfügig überarbeitet;
- f) neuer Anhang B (normativ) „Verfahren zur Berechnung der spektralen Kenngrößen von Verbundglas“ aufgenommen;
- g) neuer Anhang C (informativ) „Verfahren zur Berechnung der spektralen Kenngrößen von Siebdruckglas“ aufgenommen;
- h) früherer informativer Anhang B inhaltlich unverändert in Anhang D (informativ) „Beispiel für die Berechnung des Farbwiedergabeindex“ geändert.

### Frühere Ausgaben

DIN 67507: 1980-06  
DIN EN 410: 1998-12

Deutsche Fassung

Glas im Bauwesen —  
Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen  
Kenngrößen von Verglasungen

Glass in building —  
Determination of luminous and solar characteristics of  
glazing

Verre dans la construction —  
Détermination des caractéristiques lumineuses et solaires  
des vitrages

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 2. Januar 2011 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum des CEN-CENELEC oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG  
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION  
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

## Inhalt

	Seite
<b>Vorwort</b> .....	<b>3</b>
<b>Einleitung</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Anwendungsbereich</b> .....	<b>5</b>
<b>2 Normative Verweisungen</b> .....	<b>5</b>
<b>3 Begriffe</b> .....	<b>5</b>
<b>4 Symbole</b> .....	<b>7</b>
<b>5 Bestimmung der Kenngrößen</b> .....	<b>8</b>
5.1 Allgemeines .....	8
5.2 Lichttransmissionsgrad .....	9
5.3 Lichtreflexionsgrad .....	11
5.4 Gesamtenergiedurchlassgrad .....	12
5.4.1 Berechnung .....	12
5.4.2 Aufteilung der Strahlungsleistung .....	12
5.4.3 Direkter Strahlungstransmissionsgrad .....	13
5.4.4 Direkter Strahlungsreflexionsgrad .....	14
5.4.5 Direkter Strahlungsabsorptionsgrad .....	14
5.4.6 Sekundärer Wärmeabgabegrad nach innen .....	14
5.5 UV-Transmissionsgrad .....	19
5.6 Farbwiedergabe .....	19
5.7 Durchlassfaktor .....	22
<b>6 Auswertung</b> .....	<b>22</b>
<b>7 Prüfbericht</b> .....	<b>22</b>
<b>Anhang A (normativ) Verfahren für die Berechnung der spektralen Kenngrößen von Glasscheiben mit verschiedener Dicke und/oder Einfärbung</b> .....	<b>30</b>
<b>Anhang B (normativ) Verfahren zur Berechnung der spektralen Kenngrößen von Verbundglas</b> .....	<b>35</b>
<b>Anhang C (informativ) Verfahren zur Berechnung der spektralen Kenngrößen von Siebdruckglas</b> .....	<b>56</b>
<b>Anhang D (informativ) Beispiel für die Berechnung des Farbwiedergabeindex</b> .....	<b>57</b>
<b>Literaturhinweise</b> .....	<b>60</b>

## Vorwort

Dieses Dokument (EN 410:2011) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 129 „Glas im Bauwesen“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom NBN gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis August 2011, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis August 2011 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN [und/oder CENELEC] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Dieses Dokument ersetzt EN 410:1998.

Die wichtigsten Änderungen im Vergleich zu der vorherigen Ausgabe sind:

- a) Es wird ein Verfahren für die Berechnung der spektralen Eigenschaften von Verbundglas bereitgestellt.
- b) Eine Formel zur Bestimmung des Durchlassfaktors wurde eingeführt.
- c) Tabelle 3 wurde aktualisiert, um sie praktikabler zu gestalten.
- d) Tabelle 6 wurde an die Veröffentlichung CIE Nr. 15, Ausgabe 2004 angepasst.
- e) Die externen und internen Wärmeübergangskoeffizienten wurden geringfügig geändert und an EN 673 angepasst.
- f) Es gibt jetzt eine Anleitung dazu, wie die spektralen Eigenschaften von Glas mit Siebdruck zu bestimmen sind.
- g) Es wurden neue Bilder, die den CEN-Regeln entsprechen, für eine bessere Übersichtlichkeit aufgenommen.

Dieses Dokument wurde unter einem Mandat erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelszone dem CEN erteilt haben, und unterstützt grundlegende Anforderungen der EU-Richtlinien.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

## **Einleitung**

Während die vorliegende Europäische Norm Gleichungen für die exakten Berechnungen der spektralen Kenngrößen der Verglasung vorlegt, wird die Unsicherheit der Messungen nicht berücksichtigt, die zur Bestimmung der für die Berechnungen verwendeten spektralen Kenngrößen notwendig sind. Es sollte angemerkt werden, dass für Systeme mit einer Einfachverglasung, für die nur wenige Messungen erforderlich sind, die Ergebnisunsicherheit dann zufrieden stellend ist, wenn die Messverfahren vorschriftsmäßig durchgeführt wurden. Bei komplizierten Verglasungssystemen, für die eine große Anzahl von Messungen zur Bestimmung der spektralen Kenngrößen notwendig ist, zeigt die Unsicherheit einen kumulativen Zusammenhang mit der Anzahl der Messungen und sollte bei Angabe der Endergebnisse berücksichtigt werden.

Die in dieser Europäischen Norm verwendete Benennung „Grenzfläche“ (interface) ist als eine Oberfläche zu verstehen, die durch den Transmissionsgrad und die Reflexionsgrade für die Lichtstärke charakterisiert wird. Das bedeutet, die Interaktion mit Licht ist inkohärent, und alle Phaseninformationen gehen verloren. Im Fall dünner Schichten/Filme (in dieser Europäischen Norm nicht beschrieben), werden die Grenzflächen durch den Transmissionsgrad und die Reflexionsgrade für die Lichtamplituden charakterisiert, d. h. die Interaktion mit Licht ist kohärent, und Phaseninformationen sind verfügbar. Schließlich kann vereinfachend eine beschichtete Grenzfläche als eine Fläche beschrieben werden, auf der sich ein dünner Film oder mehrere dünne Filme befinden, wobei die gesamte Anordnung der dünnen Filme durch die sich ergebende Transmission und Reflexion der Lichtstärken charakterisiert wird.

In Anhang B wird das Verfahren zur Berechnung der spektralen Kenngrößen von Verbundglas unter spezifischem Bezug auf beschichtetes Glas angegeben. Das gleiche Verfahren kann für die Anwendung auf Glas mit dünnen Schichten (Filmen) übernommen werden (z. B. Glas mit selbstklebender Polymerfolie).

## 1 Anwendungsbereich

Diese Europäische Norm legt Verfahren zur Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen von Gebäuden fest. Diese Kenngrößen können als Grundlage für licht-, heizungs- und klimatechnische Berechnungen dienen. Sie ermöglichen den Vergleich zwischen unterschiedlichen Verglasungen.

Diese Europäische Norm ist sowohl anwendbar auf übliche Verglasungen als auch auf absorbierende oder reflektierende Sonnenschutzgläser, eingesetzt in senkrechten oder waagerechten Lichtöffnungen. Die geeigneten Gleichungen für Einfach-, Doppel- und Dreifachverglasungen sind angegeben.

Diese Europäische Norm ist für sämtliche lichtdurchlässige Materialien entsprechend anwendbar, ausgenommen solche, die eine nennenswerte Transmission im Wellenlängenbereich von 5 µm bis 50 µm von Strahlung bei Raumtemperatur aufweisen, wie z. B. gewisse Kunststoffe.

Materialien mit lichtstreuenden Eigenschaften für die auftreffende Strahlung werden grundsätzlich wie normale lichtdurchlässige Stoffe unter Beachtung bestimmter Bedingungen (siehe 5.2) behandelt.

Die Eigenschaften von schrägem Licht und die Strahlungseigenschaften von Glas in Gebäuden werden in dieser Norm nicht erfasst. Forschungsarbeiten, die in diese Richtung gehen, werden jedoch zusammenfassend in [1], [2] und [3] dargestellt.

## 2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 673, *Glas im Bauwesen — Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) — Berechnungsverfahren*

EN 674, *Glas im Bauwesen — Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) — Verfahren mit dem Plattengerät*

EN 675, *Glas im Bauwesen — Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) — Wärmestrommesser-Verfahren*

EN 12898, *Glas im Bauwesen — Bestimmung des Emissionsgrades*

## 3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

### 3.1

#### **Lichttransmissionsgrad**

Anteil des auftreffenden Lichts, der vom Glas hindurch gelassen wird

### 3.2

#### **Lichtreflexionsgrad**

Anteil des auftreffenden Lichts, der vom Glas reflektiert wird

### 3.3

#### **Gesamtenergiedurchlassgrad**

Anteil der auftreffenden Strahlung, der vom Glas insgesamt hindurch gelassen wird

**3.4**  
**direkter Strahlungsreflexionsgrad**

Anteil der auftreffenden Sonnenstrahlung, der direkt vom Glas hindurch gelassen wird

**3.5**  
**normaler Emissionsgrad**  
**normales Emissionsvermögen**

in einer Richtung senkrecht zur Oberfläche das Verhältnis der Emissionsstärke der Oberfläche des Glases zur Emissionsstärke eines schwarzen Körpers

ANMERKUNG Der normale Emissionsgrad wird in Übereinstimmung mit EN 12898 festgelegt.

**3.6**  
**direkter Strahlungsreflexionsgrad**

Anteil der auftreffenden Sonnenstrahlung, der vom Glas reflektiert wird

**3.7**  
**ultravioletter Transmissionsgrad**

Anteil der auftreffenden UV-Komponenten der Strahlung, der vom Glas hindurch gelassen wird

**3.8**  
**Farbwiedergabeindex (bei der Transmission)**

Änderung der Farbe eines Objekts als Folge des Lichts, das vom Glas hindurch gelassen wird

**3.9**  
**Durchlassfaktor**

Verhältnis des Energiedurchlassgrads des Glases zum Energiedurchlassgrad eines Referenzglases (klares Floatglas)

## 4 Symbole

Sym.	Deutsch/ German/ Allemand	Englisch/ English/ Anglais	Französisch/ French/ Français
D65	Normlichtart D65	standard illuminant D65	illuminant normalisé D65
UV	ultravioletter Strahlungsbereich	ultraviolet radiation	rayonnement ultraviolet
$\tau_{UV}$	ultravioletter Transmissionsgrad	ultraviolet transmittance	facteur de transmission de l'ultraviolet
$\tau(\lambda)$	spektraler Transmissionsgrad	spectral transmittance	facteur de transmission spectrale
$\rho(\lambda)$	spektraler Reflexionsgrad	spectral reflectance	facteur de réflexion spectrale
$\tau_v$	Lichttransmissionsgrad	light transmittance	facteur de transmission lumineuse
$\rho_v$	Lichtreflexionsgrad	light reflectance	facteur de réflexion lumineuse
$\tau_e$	direkter Strahlungstransmissionsgrad	solar direct transmittance	facteur de transmission directe de l'énergie solaire
$\rho_e$	direkter Strahlungsreflexionsgrad	solar direct reflectance	facteur de réflexion directe de l'énergie solaire
$g$	Gesamtenergiedurchlassgrad	total solar energy transmittance (solar factor)	facteur de transmission totale de l'énergie solaire ou facteur solaire
$R_a$	allgemeiner Farbwiedergabeindex	general colour rendering index	indice général de rendu des couleurs
$D_\lambda$	relative spektrale Verteilung der Normlichtart D65	relative spectral distribution of illuminant D65	répartition spectrale relative de l'illuminant normalisé D65
$V(\lambda)$	spektraler Hellempfindlichkeitsgrad	spectral luminous efficiency	efficacité lumineuse relative spectrale
$\alpha_e$	direkter Strahlungsabsorptionsgrad	solar direct absorptance	facteur d'absorption directe de l'énergie solaire
$\phi_e$	Strahlungsleistung (Strahlungsfluss)	incident solar radiant flux	flux énergétique solaire incident
$q_i$	sekundärer Wärmeabgabegrad nach innen	secondary internal heat transfer factor	facteur de réémission thermique vers l'intérieur
$q_e$	sekundärer Wärmeabgabegrad nach außen	secondary external heat transfer factor	facteur de réémission thermique vers l'extérieur
$S_\lambda$	relative spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung	relative spectral distribution of solar radiation	répartition spectrale relative du rayonnement solaire
$h_e$	Wärmeübergangskoeffizient nach außen	external heat transfer coefficient	coefficient d'échange thermique extérieur
$h_i$	Wärmeübergangskoeffizient nach innen	internal heat transfer coefficient	coefficient d'échange thermique intérieur
$\varepsilon$	korrigierter Emissionsgrad	corrected emissivity	émissivité corrigée
$\varepsilon_n$	Normaler Emissionsgrad	normal emissivity	émissivité normale
$\Lambda$	Wärmedurchlasskoeffizient	thermal conductance	conductance thermique

(fortgesetzt)

Sym.	Deutsch/ German/ Allemand	Englisch/ English/ Anglais	Französisch/ French/ Français
$\lambda$	Wellenlänge	wavelength	longueur d'onde
$\Delta\lambda$	Wellenlängenintervall	wavelength interval	intervalle de longueur d'onde
$U_{\lambda}$	relative spektrale Verteilung der UV-Strahlung der Sonne	relative spectral distribution of UV in solar radiation	répartition spectrale relative du rayonnement ultraviolet solaire
SC	Durchlassfaktor	shading coefficient	coefficient d'ombrage

## 5 Bestimmung der Kenngrößen

### 5.1 Allgemeines

Die Kenngrößen werden bei quasi-parallelem, beinahe senkrechtem Strahlungseinfall (siehe [4]) der Strahlungsverteilung der Normlichtart D65 (siehe Tabelle 1), der Globalstrahlung nach Tabelle 2 und der UV-Strahlung nach Tabelle 3 bestimmt.

Die Kenngrößen sind:

- spektraler Transmissionsgrad  $\tau(\lambda)$  und spektraler Reflexionsgrad  $\rho(\lambda)$  im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 2 500 nm;
- Lichttransmissionsgrad  $\tau_v$  und Lichtreflexionsgrad  $\rho_v$  für die Normlichtart D65;
- direkter Strahlungstransmissionsgrad  $\tau_e$  und direkter Strahlungsreflexionsgrad  $\rho_e$ ;
- Gesamtenergiedurchlassgrad  $g$ ;
- UV-Transmissionsgrad  $\tau_{UV}$ ;
- allgemeiner Farbwiedergabeindex  $R_a$ ;
- Gesamt-Durchlassfaktor, SC.

Die für die Kennzeichnung von Verglasungen entscheidenden Kenngrößen sind  $\tau_v$  und  $g$ ; die anderen Kenngrößen liefern wahlweise ergänzende Informationen.

Wenn der Wert einer vorgegebenen Kenngröße für verschiedene Glasdicken (im Fall unbeschichteten Glases) oder für die gleiche Schicht auf unterschiedlichen Substraten benötigt wird, kann dieser Wert (nach Anhang A) berechnet werden.

Ein Verfahren zur Berechnung spektraler Kenngrößen für Verbundglas wird in Anhang B angegeben.

Richtlinien zur Bestimmung spektraler Kenngrößen von siebbedrucktem Glas werden in Anhang C angegeben.

## 5.2 Lichttransmissionsgrad

Der Lichttransmissionsgrad  $\tau_v$  der Verglasung wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\tau_v = \frac{\sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} D_\lambda \tau(\lambda) V(\lambda) \Delta \lambda}{\sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} D_\lambda V(\lambda) \Delta \lambda} \quad (1)$$

Dabei ist

- $D_\lambda$  die relative spektrale Verteilung der Normlichtart D65 (siehe [5]);
- $\tau(\lambda)$  der spektrale Transmissionsgrad der Verglasung;
- $V(\lambda)$  der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad für phototopisches Sehen des Normalbeobachters (siehe [5]),
- $\Delta \lambda$  das Wellenlängenintervall.

Tabelle 1 enthält die Werte für  $D_\lambda V(\lambda) \Delta \lambda$  für Wellenlängenintervalle von 10 nm. Die Tabelle ist so aufgestellt worden, dass  $\sum D_\lambda V(\lambda) \Delta \lambda = 1$  ist.

Bei Mehrfachverglasungen lässt sich der spektrale Transmissionsgrad  $\tau(\lambda)$  aus den spektralen Transmissionsgraden und den spektralen Reflexionsgraden der einzelnen Scheiben wie folgt berechnen:

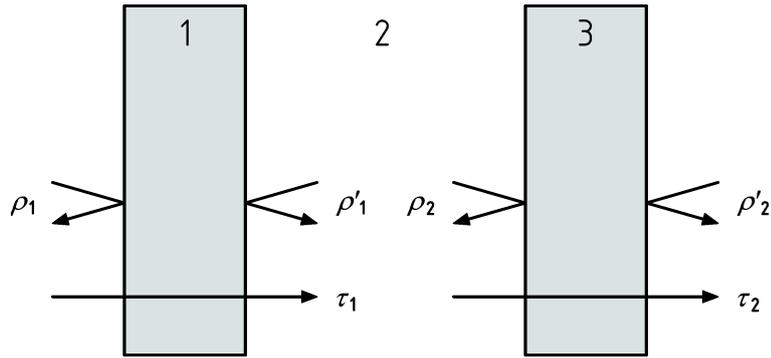
Für Doppelverglasung:

$$\tau(\lambda) = \frac{\tau_1(\lambda) \tau_2(\lambda)}{1 - \rho_1'(\lambda) \rho_2(\lambda)} \quad (2)$$

Dabei ist

- $\tau_1(\lambda)$  der spektrale Transmissionsgrad der ersten (äußeren) Scheibe;
- $\tau_2(\lambda)$  der spektrale Transmissionsgrad der zweiten Scheibe;
- $\rho_1'(\lambda)$  der spektrale Reflexionsgrad der ersten (äußeren) Scheibe, gemessen gegen die Richtung der auftreffenden Strahlung;
- $\rho_2(\lambda)$  der spektrale Reflexionsgrad der zweiten Scheibe, gemessen in Richtung der auftreffenden Strahlung.

Der spektrale Transmissionsgrad für Doppelverglasungen wird in Bild 1 dargestellt.



**Legende**

- 1 Schreibe 1
- 2 Hohlraum
- 3 Scheibe 2

**Bild 1 — Lichttransmission und Lichtreflexion in einer Isolierglaseinheit mit Doppelverglasung**

Für Dreifachverglasung:

$$\tau(\lambda) = \frac{\tau_1(\lambda) \tau_2(\lambda) \tau_3(\lambda)}{[1 - \rho'_1(\lambda) \rho_2(\lambda)][1 - \rho'_2(\lambda) \rho_3(\lambda)] - \tau_2^2(\lambda) \rho'_1(\lambda) \rho_3(\lambda)} \quad (3)$$

Dabei ist

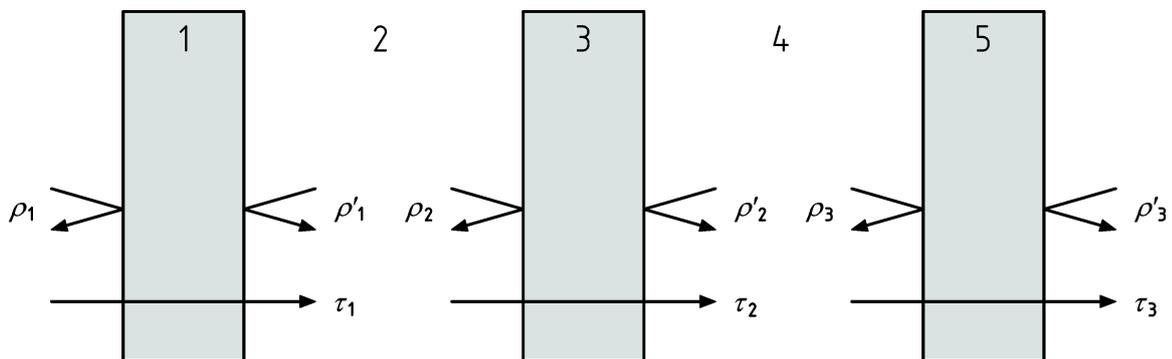
$\tau_1(\lambda)$ ,  $\tau_2(\lambda)$ ,  $\rho'_1(\lambda)$  und  $\rho_2(\lambda)$  wie in Gleichung (2) angegeben;

$\tau_3(\lambda)$  der spektrale Transmissionsgrad der dritten Scheibe;

$\rho'_2(\lambda)$  der spektrale Reflexionsgrad der zweiten Scheibe, gemessen gegen die Richtung der auftreffenden Strahlung;

$\rho_3(\lambda)$  der spektrale Reflexionsgrad der dritten Scheibe, gemessen in Richtung der auftreffenden Strahlung.

Der spektrale Transmissionsgrad für Dreifachverglasungen wird in Bild 2 dargestellt.



**Legende**

- 1 Schreibe 1
- 2 Hohlraum 1
- 3 Scheibe 2
- 4 Hohlraum 2
- 5 Scheibe 3

**Bild 2 — Lichttransmission und Lichtreflexion in einer Isolierglaseinheit mit Dreifachverglasung**

Für Verglasungen aus mehr als drei Scheiben bestehen für die Berechnung des spektralen Transmissionsgrades  $\tau(\lambda)$  solcher Verglasungen aus den spektralen Koeffizienten einzelner Scheiben ähnliche Zusammenhänge wie bei den Gleichungen (2) und (3). Zum Beispiel: Eine Verglasung bestehend aus fünf Einzelscheiben darf wie folgt berechnet werden:

- zuerst werden die drei Einzelscheiben als Dreifachverglasung betrachtet und die spektralen Eigenschaften dieser Kombination berechnet;
- dann wird die gleiche Berechnung für zwei weitere Scheiben als Doppelverglasung durchgeführt;
- schließlich wird  $\tau(\lambda)$  für die Fünffachverglasung berechnet, indem sie als Kombination einer Dreifach- und einer Doppelverglasung betrachtet wird.

**ANMERKUNG 1** Die Verwendung einer Ulbricht-Kugel ist notwendig, wenn lichtstreuende Materialien untersucht werden. In diesem Fall müssen die Kugel und deren Öffnung groß genug sein, damit alles Streulicht erfasst und bei ungleichmäßiger Oberflächenstruktur der Verglasung eine ausreichende Mittelwertbildung für den Messwert erhalten werden.

**ANMERKUNG 2** Die Messung von lichtstreuenden Produkten ist Gegenstand eines Ringversuchs, für den die Internationale Kommission des Technischen Komitees 10 für Glas verantwortlich ist. Es wird erwartet, dass sich aus den Ergebnissen dieses Ringversuchs Vorschläge für Verbesserungen der Mess- und der Vorhersagetechniken ableiten lassen.

### 5.3 Lichtreflexionsgrad

Der Lichtreflexionsgrad der Verglasung  $\rho_V$  wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\rho_V = \frac{\sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} D_\lambda \rho(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda} \quad (4)$$

Dabei ist

$D_\lambda$ ,  $V(\lambda)$  und  $\Delta\lambda$  wie in 5.2 angegeben;

$\rho(\lambda)$  der spektrale Reflexionsgrad der Verglasung.

Bei Mehrfachverglasungen lässt sich der spektrale Reflexionsgrad  $\rho(\lambda)$  aus den spektralen Transmissionsgraden und den spektralen Reflexionsgraden der einzelnen Scheiben wie folgt berechnen:

Für Doppelverglasung wird der Lichtreflexionsgrad der Verglasung nach außen wie folgt berechnet:

$$\rho(\lambda) = \rho_1(\lambda) + \frac{\tau_1^2(\lambda) \rho_2(\lambda)}{1 - \rho_1(\lambda) \rho_2(\lambda)} \quad (5)$$

Dabei ist

$\tau_1(\lambda)$ ,  $\rho_2(\lambda)$  und  $\rho_1'(\lambda)$  wie in 5.2 angegeben;

$\rho_1(\lambda)$  der spektrale Reflexionsgrad der ersten (äußeren) Scheibe, gemessen in Richtung der auftreffenden Strahlung.

Eine entsprechende Gleichung kann auch zur Berechnung des Reflexionsgrads der Verglasung nach innen abgeleitet werden.

Für Dreifachverglasung wird der Lichtreflexionsgrad der Verglasung nach außen wie folgt berechnet:

$$\rho(\lambda) = \rho_1(\lambda) + \frac{\tau_1^2(\lambda) \rho_2(\lambda) [1 - \rho_2'(\lambda) \rho_3(\lambda)] + \tau_1^2(\lambda) \tau_2^2(\lambda) \rho_3(\lambda)}{[1 - \rho_1'(\lambda) \rho_2(\lambda)] [1 - \rho_2'(\lambda) \rho_3(\lambda)] - \tau_2^2(\lambda) \rho_1'(\lambda) \rho_3(\lambda)} \quad (6)$$

Dabei ist

$\rho_3(\lambda)$  der spektrale Reflexionsgrad der dritten Scheibe, gemessen in Richtung der auftreffenden Strahlung;

$\tau_1(\lambda)$ ,  $\tau_2(\lambda)$ ,  $\rho_1(\lambda)$ ,  $\rho_2(\lambda)$ ,  $\rho_1'(\lambda)$  und  $\rho_2'(\lambda)$  wie in 5.2 und 5.3 angegeben.

Eine entsprechende Gleichung für den Lichtreflexionsgrad einer Dreifachverglasung nach innen kann auch abgeleitet werden.

Für Verglasungen mit mehr als drei Scheiben wird das gleiche Verfahren angewendet, das in 5.2 angegeben ist.

## 5.4 Gesamtenergiedurchlassgrad

### 5.4.1 Berechnung

Der Gesamtenergiedurchlassgrad  $g$  ist die Summe des direkten Strahlungstransmissionsgrads  $\tau_e$  und des sekundären Wärmeabgabegrads  $q_i$  der Verglasung nach innen (siehe 5.4.3 und 5.4.6), letzterer bedingt durch den Wärmetransport infolge Konvektion und langwelliger IR-Strahlung des Anteils der auftreffenden Strahlung, der von der Verglasung absorbiert wird:

$$g = \tau_e + q_i \quad (7)$$

### 5.4.2 Aufteilung der Strahlungsleistung

Die Strahlungsleistung  $\phi_e$  wird in die folgenden drei Anteile aufgespaltet (siehe Bild 3):

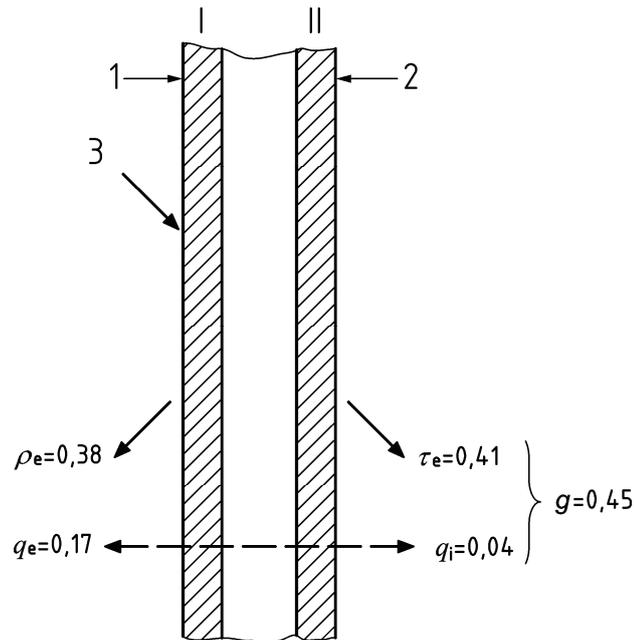
- den hindurch gelassenen Anteil,  $\tau_e \phi_e$ ;
- den reflektierten Anteil,  $\rho_e \phi_e$ ;
- den absorbierten Anteil,  $\alpha_e \phi_e$ .

Dabei ist

$\tau_e$  der direkte Strahlungstransmissionsgrad (siehe 5.4.3);

$\rho_e$  der direkte Strahlungsreflexionsgrad (siehe 5.4.4);

$\alpha_e$  der direkte Strahlungsabsorptionsgrad (siehe 5.4.5).



**Legende**

- 1 äußere Scheibe
- 2 zweite innere Scheibe
- 3 Strahlungsleistung

$$\rho_e = 0,38$$

$$\tau_e = 0,41$$

$$q_e = 0,17$$

$$\frac{q_i = 0,04}{g = 0,45}$$

**Bild 3 — Beispiel für die Darstellung der Aufteilung der Strahlungsleistung**

Zwischen den drei Anteilen besteht der folgende Zusammenhang:

$$\tau_e + \rho_e + \alpha_e = 1 \tag{8}$$

Der absorbierte Anteil  $\alpha_e \phi_e$  wird weiterhin in die Anteile  $q_i \phi_e$  und  $q_e \phi_e$  aufgespaltet. Das sind die Energieanteile, die nach innen bzw. außen abgegeben werden:

$$\alpha_e = q_i + q_e \tag{9}$$

Dabei ist

$q_i$  der sekundäre Wärmeabgabegrad der Verglasung nach innen;

$q_e$  der sekundäre Wärmeabgabegrad der Verglasung nach außen.

**5.4.3 Direkter Strahlungstransmissionsgrad**

Der direkte Strahlungstransmissionsgrad  $\tau_e$  der Verglasung wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\tau_e = \frac{\sum_{\lambda=300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S_{\lambda} \tau(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S_{\lambda} \Delta\lambda} \tag{10}$$

Dabei ist

- $S_\lambda$  die relative spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung (siehe Tabelle 2);
- $\tau(\lambda)$  der spektrale Transmissionsgrad der Verglasung;
- $\Delta\lambda$  das Wellenlängenintervall.

Bei Mehrfachverglasungen wird der spektrale Transmissionsgrad  $\tau(\lambda)$  nach 5.2 berechnet.

Die relative spektrale Verteilung,  $S_\lambda$ , die für die Berechnung des direkten Strahlungstransmissionsgrads benötigt wird, ist aus CIE 85 [6] abzuleiten.

Die entsprechenden Werte  $S_\lambda \Delta\lambda$  sind in Tabelle 2 angegeben. Die Tabelle ist so aufgestellt worden, dass  $\sum S_\lambda \Delta\lambda = 1$  ist.

ANMERKUNG Abweichend von den tatsächlichen Verhältnissen wird stets vereinfachend angenommen, dass die Spektralverteilung der Sonnenstrahlung (siehe Tabelle 2) unabhängig vom Sonnenstand und den atmosphärischen Bedingungen (z. B. Staub, Dunst, Wasserdampfgehalt) ist und dass die Sonnenstrahlung gerichtet und nahezu senkrecht auf die Verglasung auftrifft. Die dabei entstehenden Fehler sind sehr gering.

#### 5.4.4 Direkter Strahlungsreflexionsgrad

Der direkte Strahlungsreflexionsgrad  $\rho_e$  der Verglasung wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\rho_e = \frac{\sum_{\lambda=300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S_\lambda \rho(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S_\lambda \Delta\lambda} \quad (11)$$

Dabei ist

- $S_\lambda$  die relative spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung (siehe Tabelle 2);
- $\rho(\lambda)$  der spektrale Reflexionsgrad der Verglasung;
- $\Delta\lambda$  das Wellenlängenintervall.

Bei Mehrfachverglasungen wird der spektrale Reflexionsgrad  $\rho(\lambda)$  nach 5.3 berechnet.

#### 5.4.5 Direkter Strahlungsabsorptionsgrad

Der direkte Strahlungsabsorptionsgrad  $\alpha_e$  wird nach Gleichung (8) in 5.4.2 berechnet.

#### 5.4.6 Sekundärer Wärmeabgabegrad nach innen

##### 5.4.6.1 Randbedingungen

Für die Berechnung des sekundären Wärmeabgabegrades nach innen,  $q_i$ , werden die Wärmeübergangskoeffizienten nach außen,  $h_e$ , und nach innen,  $h_i$ , benötigt. Diese Werte sind im Wesentlichen abhängig von der Lage der Verglasung, der Windgeschwindigkeit, den Innen- und Außentemperaturen und außerdem von den Temperaturen der beiden äußeren Glasoberflächen.

Da es Zielsetzung dieser Norm ist, grundlegende Informationen über die Eigenschaften der Verglasung zu geben, wurden aus Gründen der Vereinfachung übliche Randbedingungen festgelegt:

- a) Lage der Verglasung: senkrecht;
- b) äußere Oberfläche: Windgeschwindigkeit etwa 4 m/s, korrigierter Emissionsgrad = 0,837;
- c) innere Oberfläche: natürliche Konvektion, Emissionsgrad wählbar;
- d) Luftzwischenräume sind nicht belüftet.

Mit diesen vereinbarten durchschnittlichen Bedingungen werden für  $h_e$  und  $h_i$  Durchschnittswerte erhalten:

$$h_e = 25 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

$$h_i = 3,6 + \frac{4,1 \varepsilon_i}{0,837} \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

Dabei ist

$\varepsilon_i$  der korrigierte Emissionsgrad der inneren Oberfläche.

Für unbeschichtetes Kalk-Natronsilicatglas und Borosilicatglas ist  $\varepsilon_i = 0,837$  und  $h_i = 7,7 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ .

Der korrigierte Emissionsgrad wird nach EN 12898 definiert und gemessen.

ANMERKUNG Niedrigere Werte als 0,837 für  $\varepsilon_i$  (aufgrund von Oberflächenbeschichtungen mit höherem Reflexionsgrad im fernen Infrarot) werden nur dann bei der Berechnung berücksichtigt, wenn Bildung von Kondensat auf der beschichteten Scheibenoberfläche ausgeschlossen werden kann.

#### 5.4.6.2 Einfachverglasung

Der sekundäre Wärmeabgabegrad einer Einfachverglasung nach innen,  $q_i$ , wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$q_i = \alpha_e \frac{h_i}{h_e + h_i} \quad (12)$$

Dabei ist

$\alpha_e$  der solare Absorptionsgrad nach 5.4.5;

$h_e$  und  $h_i$  die Wärmeübergangskoeffizienten nach außen bzw. innen nach 5.4.6.1.

### 5.4.6.3 Doppelverglasung

Der sekundäre Wärmeabgabegrad einer Doppelverglasung nach innen,  $q_i$ , wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$q_i = \frac{\left[ \frac{\alpha_{e1} + \alpha_{e2}}{h_e} + \frac{\alpha_{e2}}{\Lambda} \right]}{\left[ \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{\Lambda} \right]} \quad (13)$$

Dabei ist

- $h_e$  und  $h_i$  die Wärmeübergangskoeffizienten nach außen bzw. innen nach 5.4.6.1;
- $\alpha_{e1}$  der direkte Strahlungsabsorptionsgrad der äußeren Scheibe in der Doppelverglasung;
- $\alpha_{e2}$  der direkte Strahlungsabsorptionsgrad der zweiten Scheibe in der Doppelverglasung;
- $\Lambda$  der Wärmedurchlasskoeffizient zwischen der äußeren Oberfläche und der innersten Oberfläche der Doppelverglasung (siehe Bild 4).

$\alpha_{e1}$  und  $\alpha_{e2}$  werden wie folgt berechnet:

$$\alpha_{e1} = \frac{\sum_{\lambda=300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S_{\lambda} \left\{ \alpha_1(\lambda) + \frac{\alpha'_1(\lambda)\tau_1(\lambda)\rho_2(\lambda)}{1-\rho'_1(\lambda)\rho_2(\lambda)} \right\} \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S_{\lambda} \Delta\lambda} \quad (14)$$

$$\alpha_{e2} = \frac{\sum_{\lambda=300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S_{\lambda} \left\{ \alpha_2(\lambda)\tau_1(\lambda) \right\} \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S_{\lambda} \Delta\lambda} \quad (15)$$

Dabei ist

- $\alpha_1(\lambda)$  der direkte Strahlungsabsorptionsgrad der äußeren Scheibe, gemessen in Richtung der auftreffenden Strahlung und nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$\alpha_1(\lambda) = 1 - \tau_1(\lambda) - \rho_1(\lambda) \quad (16)$$

- $\alpha'_1(\lambda)$  der direkte spektrale Absorptionsgrad der äußeren Schiebe, gemessen gegen die Richtung der auftreffenden Strahlung und nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$\alpha'_1(\lambda) = 1 - \tau_1(\lambda) - \rho'_1(\lambda) \quad (17)$$

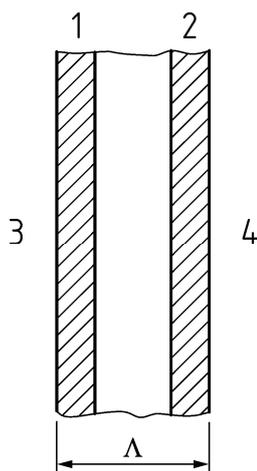
- $\alpha_2(\lambda)$  der direkte spektrale Absorptionsgrad der zweiten Scheibe, gemessen in Richtung der auftreffenden Strahlung und nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$\alpha_2(\lambda) = 1 - \tau_2(\lambda) - \rho_2(\lambda) \quad (18)$$

$S_{\lambda}$  und  $\Delta\lambda$  wie in 5.4.3 angegeben;

$\tau_1(\lambda)$ ,  $\rho_2(\lambda)$  und  $\rho'_1(\lambda)$  wie in 5.2 angegeben.

Der Wärmedurchlasskoeffizient  $\Lambda$  wird nach dem Berechnungsverfahren nach EN 673 bestimmt, soweit möglich, oder durch Messung nach EN 674 oder EN 675.



**Legende**

- 1 Scheibe 1
- 2 Scheibe 2
- 3 außen
- 4 innen

**Bild 4 — Darstellung der Bedeutung des Wärmedurchlasskoeffizienten  $\Lambda$**

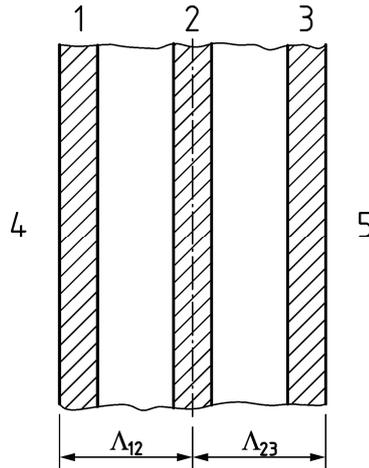
**5.4.6.4 Dreifachverglasung**

Der sekundäre Wärmeabgabegrad einer Dreifachverglasung nach innen,  $q_i$ , wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$q_i = \frac{\left[ \frac{\alpha_{e3}}{\Lambda_{23}} + \frac{\alpha_{e3} + \alpha_{e2}}{\Lambda_{12}} + \frac{\alpha_{e3} + \alpha_{e2} + \alpha_{e1}}{h_e} \right]}{\left[ \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{\Lambda_{12}} + \frac{1}{\Lambda_{23}} \right]} \quad (19)$$

Dabei ist

- $\alpha_{e1}$  der direkte Strahlungsabsorptionsgrad der äußeren Scheibe in der Dreifachverglasung;
- $\alpha_{e2}$  der direkte Strahlungsabsorptionsgrad der zweiten Scheibe in der Dreifachverglasung;
- $\alpha_{e3}$  der direkte Strahlungsabsorptionsgrad der dritten Scheibe in der Dreifachverglasung;
- $h_e$  und  $h_i$  die Wärmeübergangskoeffizienten nach außen bzw. innen nach 5.4.6.1;
- $\Lambda_{12}$  der Wärmedurchlasskoeffizient zwischen der äußeren Oberfläche der ersten Scheibe und der Mittellinie der zweiten Scheibe (siehe Bild 5);
- $\Lambda_{23}$  der Wärmedurchlasskoeffizient zwischen der Mittellinie der zweiten Scheibe und der innersten Oberfläche der dritten Scheibe (siehe Bild 5).



**Legende**

- 1 Schreibe 1
- 2 Scheibe 2
- 3 Scheibe 3
- 4 außen
- 5 innen

**Bild 5 — Darstellung der Bedeutung der Wärmedurchlasskoeffizienten  $\Lambda_{12}$  und  $\Lambda_{23}$**

$\alpha_{e1}$ ,  $\alpha_{e2}$  und  $\alpha_{e3}$  werden wie folgt berechnet:

$$\alpha_{e1} = \frac{\sum_{\lambda = 300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S_{\lambda} \left\{ \alpha_1(\lambda) + \frac{\tau_1(\lambda) \alpha'_1(\lambda) \rho_2(\lambda) [1 - \rho'_2(\lambda) \rho_3(\lambda)] + \tau_1(\lambda) \tau_2^2(\lambda) \alpha'_1(\lambda) \rho_3(\lambda)}{[1 - \rho'_1(\lambda) \rho_2(\lambda)] \times [1 - \rho'_2(\lambda) \rho_3(\lambda)] - \tau_2^2(\lambda) \rho'_1(\lambda) \rho_3(\lambda)} \right\} \Delta\lambda}{\sum_{\lambda = 300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S_{\lambda} \Delta\lambda} \quad (20)$$

$$\alpha_{e2} = \frac{\sum_{\lambda = 300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S_{\lambda} \left\{ \frac{\tau_1(\lambda) \alpha_2(\lambda) [1 - \rho'_2(\lambda) \rho_3(\lambda)] + \tau_1(\lambda) \tau_2(\lambda) \alpha'_2(\lambda) \rho_3(\lambda)}{[1 - \rho'_1(\lambda) \rho_2(\lambda)] \times [1 - \rho'_2(\lambda) \rho_3(\lambda)] - \tau_2^2(\lambda) \rho'_1(\lambda) \rho_3(\lambda)} \right\} \Delta\lambda}{\sum_{\lambda = 300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S_{\lambda} \Delta\lambda} \quad (21)$$

$$\alpha_{e3} = \frac{\sum_{\lambda = 300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S_{\lambda} \left\{ \frac{\tau_1(\lambda) \tau_2(\lambda) \alpha_3(\lambda)}{[1 - \rho'_1(\lambda) \rho_2(\lambda)] \times [1 - \rho'_2(\lambda) \rho_3(\lambda)] - \tau_2^2(\lambda) \rho'_1(\lambda) \rho_3(\lambda)} \right\} \Delta\lambda}{\sum_{\lambda = 300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S_{\lambda} \Delta\lambda} \quad (22)$$

Dabei ist

$\alpha_1(\lambda)$ ,  $\alpha'_1(\lambda)$  und  $\alpha_2(\lambda)$  wie in 5.4.6.3 definiert;

$\alpha'_2(\lambda)$  der direkt spektrale Absorptionsgrad der zweiten Scheibe, gemessen gegen die Richtung der auftreffenden Strahlung und nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$\alpha'_2(\lambda) = 1 - \tau_2(\lambda) - \rho'_2(\lambda) \quad (23)$$

$\alpha_3(\lambda)$  der direkte spektrale Absorptionsgrad der dritten Scheibe, gemessen in Richtung der auftreffenden Strahlung und nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$\alpha_3(\lambda) = 1 - \tau_3(\lambda) - \rho_3(\lambda) \quad (24)$$

$S_\lambda$  und  $\Delta\lambda$  wie in 5.4.3 definiert.

Die Wärmedurchlasskoeffizienten  $A_{12}$  und  $A_{23}$  werden nach 5.4.6.3 bestimmt.

## 5.5 UV-Transmissionsgrad

Im UV-Bereich enthält die Globalstrahlung Anteile im UV-B-Bereich von 280 nm bis 315 nm und im UV-A-Bereich von 315 nm bis 380 nm. Eine genormte relative spektrale Verteilung für den UV-Bereich der Globalstrahlung,  $U_\lambda$ , ist angegeben (siehe [7]). Tabelle 3 enthält die Werte  $U_\lambda \Delta\lambda$  für Wellenlängenintervalle von 5 nm für den UV-Bereich. Die Tabelle ist mit den relativen Werten so aufgestellt, dass  $\sum U_\lambda \Delta\lambda = 1$  für den gesamten UV-Bereich ist.

Der UV-Transmissionsgrad  $\tau_{uv}$  wird wie folgt berechnet:

$$\tau_{uv} = \frac{\sum_{\lambda=280 \text{ nm}}^{380 \text{ nm}} U_\lambda \tau(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=280 \text{ nm}}^{380 \text{ nm}} U_\lambda \Delta\lambda} \quad (25)$$

Dabei ist

$\tau(\lambda)$  der direkte spektrale Transmissionsgrad der Verglasung (siehe 5.2);

$U_\lambda$  die relative Spektralverteilung des UV-Bereichs der Globalstrahlung;

$\Delta\lambda$  das Wellenlängenintervall.

**ANMERKUNG** Wenn Aussagen über die UV-Durchlässigkeit der Verglasung gemacht werden, genügt in den meisten Fällen die Angabe von  $\tau_{uv}$ , dem Transmissionsgrad für die gesamte in der Globalstrahlung enthaltene UV-Strahlung. Lediglich in Sonderfällen besteht Interesse für die Transmissionsgrade in den beiden Teilbereichen UV-A und UV-B.

## 5.6 Farbwiedergabe

Die Farbwiedergabeeigenschaften einer Verglasung bei Transmission werden durch den allgemeinen Farbwiedergabeindex  $R_a$  ausgedrückt. Dieser Index ermöglicht es, eine quantitative Bewertung der Farbunterschiede rechnerisch darzustellen, die sich bei direkter Beleuchtung von acht Testfarben mit der Normlichtart D65 und derselben Lichtart ergeben, wenn diese durch die Verglasung hindurch tritt (siehe [8]).

**ANMERKUNG** Im Literaturhinweis [8] wird vorgeschlagen, den Farbwiedergabeindex mit Hilfe einer Diskette zu bestimmen. Der Anwender sollte sich über die Tatsache im Klaren sein, dass mit dem auf der Diskette befindlichen Programm das durch eine vorgegebene Verglasung gefilterte Licht automatisch mit der Lichtart verglichen wird, welche die ähnlichste Farbtemperatur aufweist und welche von der Normlichtart D65 verschieden sein kann.

Die Testfarben werden durch ihren in Tabelle 4 (siehe [8]) angegebenen spektralen Remissionsgrad  $\beta_i(\lambda)$  ( $i = 1$  bis 8) definiert. Die Strahlungsfunktion der Normlichtart D65 ist in Tabelle 5 (siehe [5]) angegeben.

Der allgemeine Farbwiedergabeindex wird nach folgendem Rechengang bestimmt.

Die Normfarbwerte  $X_t$ ,  $Y_t$  und  $Z_t$  des durch die Verglasung hindurch gelassenen Lichts werden wie folgt berechnet:

$$X_t = \sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \frac{d\phi_e}{d\lambda} \tau(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \quad (26)$$

$$Y_t = \sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \frac{d\phi_e}{d\lambda} \tau(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \quad (27)$$

$$Z_t = \sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \frac{d\phi_e}{d\lambda} \tau(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \quad (28)$$

Dabei ist

$\frac{d\phi_e}{d\lambda} \Delta\lambda$  die relative spektrale Energieverteilung der in Tabelle 5 (siehe [5]) angegebenen Normlichtart D65;

$\tau(\lambda)$  der spektrale Transmissionsgrad der Verglasung;

$\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  die Normspektralwertanteile für den in Tabelle 6 (siehe [5]) angegebenen farbmetrischen Normalbeobachter CIE 1931.

Die Normfarbwerte des durch die Verglasung hindurch gelassenen und des von jeder der acht Testfarben reflektierten Lichts werden nach den folgenden Gleichungen berechnet:

$$X_{t,i} = \sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \frac{d\phi_e}{d\lambda} \tau(\lambda) \beta_i(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \quad (29)$$

$$Y_{t,i} = \sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \frac{d\phi_e}{d\lambda} \tau(\lambda) \beta_i(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \quad (30)$$

$$Z_{t,i} = \sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \frac{d\phi_e}{d\lambda} \tau(\lambda) \beta_i(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \quad (31)$$

Dabei ist

$\beta_i(\lambda)$  der relative Remissionsgrad einer jeden Testfarbe  $i$  ( $i = 1$  bis  $8$ ).

Die trichromatischen Farbkoordinaten in der UCS-Farbtabelle CIE 1960 werden nach den folgenden Gleichungen berechnet:

— für das hindurch gelassene Licht:

$$u_t = \frac{4X_t}{X_t + 15Y_t + 3Z_t} \quad (32)$$

$$v_t = \frac{6Y_t}{X_t + 15Y_t + 3Z_t} \quad (33)$$

— für das hindurch gelassene Licht mit anschließender Reflexion an der Testfarbe  $i$ :

$$u_{t,i} = \frac{4X_{t,i}}{X_{t,i} + 15Y_{t,i} + 3Z_{t,i}} \quad (34)$$

$$v_{t,i} = \frac{6Y_{t,i}}{X_{t,i} + 15Y_{t,i} + 3Z_{t,i}} \quad (35)$$

Für die acht mit dem hindurch gelassenen Licht beleuchteten Testfarben werden die unter Berücksichtigung der Farbwanlung korrigierten Farbkoordinaten nach folgenden Gleichungen berechnet:

$$u'_{t,i} = \frac{10,872 + 0,880 \frac{c_{t,i}}{c_t} - 8,254 \frac{d_{t,i}}{d_t}}{16,518 + 3,226 \frac{c_{t,i}}{c_t} - 2,063 \frac{d_{t,i}}{d_t}} \quad (36)$$

$$v'_{t,i} = \frac{5,520}{16,518 + 3,226 \frac{c_{t,i}}{c_t} - 2,063 \frac{d_{t,i}}{d_t}} \quad (37)$$

mit  $c_t$ ;  $d_t$  für das hindurch gelassene Licht,  $c_{t,i}$ ;  $d_{t,i}$  für jede Testfarbe  $i$ , ausgedrückt durch die Gleichungen:

— für das hindurch gelassene Licht:

$$c_t = \frac{1}{v_t} (4 - u_t - 10v_t) \quad (38)$$

$$d_t = \frac{1}{v_t} (1,708 v_t + 0,404 - 1,48 u_t) \quad (39)$$

— für das hindurch gelassene Licht mit anschließender Reflexion an der Testfarbe  $i$ :

$$c_{t,i} = \frac{1}{v_{t,i}} (4 - u_{t,i} - 10 v_{t,i}) \quad (40)$$

$$d_{t,i} = \frac{1}{v_{t,i}} (1,708 v_{t,i} + 0,404 - 1,48 u_{t,i}) \quad (41)$$

Transformation auf den gleichförmigen Farbenraum nach CIE 1964: für jede der Testfarben wird die Transformation unter Verwendung der folgenden Gleichungen durchgeführt:

$$W_{t,i}^* = 25 \left( \frac{100 Y_{t,i}}{Y_t} \right)^{\frac{1}{3}} - 17 \quad (42)$$

$$U_{t,i}^* = 13 W_{t,i}^* (u'_{t,i} - 0,197 8) \quad (43)$$

$$V_{t,i}^* = 13 W_{t,i}^* (v'_{t,i} - 0,312 2) \quad (44)$$

Die sich insgesamt ergebende Farbverschiebung wird für jede Testfarbe  $i$  nach folgender Gleichung bestimmt:

$$\Delta E_i = \sqrt{(U_{t,i}^* + U_{r,i}^*)^2 + (V_{t,i}^* + V_{r,i}^*)^2 + (W_{t,i}^* + W_{r,i}^*)^2} \quad (45)$$

Die Werte für  $U_{r,i}^*$ ;  $V_{r,i}^*$ ;  $W_{r,i}^*$ , berechnet für die mit Normlichtart D65 beleuchteten Testfarben  $i$ , ohne dazwischen liegende Verglasung, sind in Tabelle 7 angegeben (siehe [8]).

Es wird der spezielle Farbwiedergabeindex für jede Testfarbe  $i$  berechnet:

$$R_i = 100 - 4,6 \Delta E_i \quad (46)$$

Es wird der allgemeine Farbwiedergabeindex berechnet:

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (47)$$

Der allgemeine Farbwiedergabeindex  $R_a$  darf einen maximalen Wert von 100 annehmen. Dies wird bei Verglasungen erreicht, deren spektraler Transmissionsgrad im sichtbaren Spektralbereich vollkommen konstant ist. In der Beleuchtungstechnik kennzeichnen allgemeinen Farbwiedergabeindex-Werte  $R_a > 90$  eine sehr gute und Werte von  $R_a > 80$  eine gute Farbwiedergabe.

In Anhang E ist ein Berechnungsbeispiel für  $R_a$  angegeben.

## 5.7 Durchlassfaktor

Der Durchlassfaktor, SC, wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$SC = \frac{g}{0,87} \quad (48)$$

ANMERKUNG 1 In einigen Ländern darf der SC spezifisch als Gesamt-Durchlassfaktor bezeichnet werden.

ANMERKUNG 2 Der Wert von 0,87 entspricht traditionell dem Gesamtenergiedurchlassgrad von klarem Floatglas, das eine Nennstärke von 3 mm bis 4 mm hat.

## 6 Auswertung

Der allgemeinen Farbwiedergabeindex  $R_a$  ist mit zwei wertanzeigenden Ziffern anzugeben. Alle anderen Kenngrößen sind mit zwei Dezimalen anzugeben. Zwischenwerte dürfen nicht gerundet werden.

## 7 Prüfbericht

Der Prüfbericht muss folgende Angaben enthalten:

- Anzahl und Dicke der Scheiben der Verglasung;
- Art und Lage der Scheiben (im Fall von Mehrfachverglasung), bezeichnet als äußere Scheibe, zweite innere, dritte innere Scheibe usw.;
- Lage der Beschichtung (im Fall eines beschichteten Glases), wobei die Flächen der Scheiben mit 1, 2, 3 usw. bezeichnet werden, beginnend von der äußeren Oberfläche der äußeren Scheibe;

- d) die Ergebnisse für die geforderten Kenngrößen;
- e) Art des verwendeten Geräts (und gegebenenfalls des Reflexionszubehörs oder der Ulbricht-Kugel und des Referenzmaterials für die Reflexion).

**Tabelle 1 — Normierte relative spektrale Strahlungsverteilung  $D_\lambda$  der Normlichtart D65, multipliziert mit dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad  $V(\lambda)$  und dem Wellenlängenintervall  $\Delta\lambda$**

$\lambda$ nm	$D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda \cdot 10^2$
380	0,000 0
390	0,000 5
400	0,003 0
410	0,010 3
420	0,035 2
430	0,094 8
440	0,227 4
450	0,419 2
460	0,666 3
470	0,985 0
480	1,518 9
490	2,133 6
500	3,349 1
510	5,139 3
520	7,052 3
530	8,799 0
540	9,442 7
550	9,807 7
560	9,430 6
570	8,689 1

$\lambda$ nm	$D_\lambda V(\lambda) \Delta\lambda \cdot 10^2$
580	7,899 4
590	6,330 6
600	5,354 2
610	4,249 1
620	3,150 2
630	2,081 2
640	1,381 0
650	0,807 0
660	0,461 2
670	0,248 5
680	0,125 5
690	0,053 6
700	0,027 6
710	0,014 6
720	0,005 7
730	0,003 5
740	0,002 1
750	0,000 8
760	0,000 1
770	0,000 0
780	0,000 0

**Tabelle 2 — Normierte relative spektrale Verteilung der Globalstrahlung  $S_\lambda$ , multipliziert mit dem Wellenlängenintervall  $\Delta\lambda$**

$\lambda$ nm	$S_\lambda \Delta\lambda^a$	$\lambda$ nm	$S_\lambda \Delta\lambda^a$
300	0,000 5	1 000	0,032 9
320	0,006 9	1 050	0,030 6
340	0,012 2	1 100	0,018 5
360	0,014 5	1 150	0,013 6
380	0,017 7	1 200	0,021 0
400	0,023 5	1 250	0,021 1
420	0,026 8	1 300	0,016 6
440	0,029 4	1 350	0,004 2
460	0,034 3	1 400	0,001 0
480	0,033 9	1 450	0,004 4
500	0,032 6	1 500	0,009 5
520	0,031 8	1 550	0,012 3
540	0,032 1	1 600	0,011 0
560	0,031 2	1 650	0,010 6
580	0,029 4	1 700	0,009 3
600	0,028 9	1 750	0,006 8
620	0,028 9	1 800	0,002 4
640	0,028 0	1 850	0,000 5
660	0,027 3	1 900	0,000 2
680	0,024 6	1 950	0,001 2
700	0,023 7	2 000	0,003 0
720	0,022 0	2 050	0,003 7
740	0,023 0	2 100	0,005 7
760	0,019 9	2 200	0,006 6
780	0,021 1	2 300	0,006 0
800	0,033 0	2 400	0,004 1
850	0,045 3	2 500	0,000 6
900	0,038 1		
950	0,022 0		

<sup>a</sup> Die relative spektrale Verteilung der Globalstrahlung (direkt und diffus) wird mit den in Literaturhinweis [6] angegebenen Werten berechnet für Luftmasse = 1; Wassergehalt = 1,42 cm Wasserdampfgehalt; Ozongehalt = 0,34 cm bei Normtemperatur und Normdruck; Albedo der Erdoberfläche = 0,2; spektrale optische Dichte der Aerosol-Extinktion (bei  $\lambda = 500$  nm) = 0,1.

**Tabelle 3 — Normierte relative spektrale Verteilung des UV-Bereichs der Globalstrahlung multipliziert mit dem Wellenlängenintervall  $\Delta\lambda$**

$\lambda$ nm	$U_{\lambda}\Delta\lambda$
300	0,000 63
305	0,005 54
310	0,014 71
315	0,027 50
320	0,039 75
325	0,051 25
330	0,067 57
335	0,068 22
340	0,071 83
345	0,072 42
350	0,076 81
355	0,078 86
360	0,081 42
365	0,090 22
370	0,099 11
375	0,102 23
380	0,051 93

Tabelle 4 — Spektraler Remissionsgrad der für die Berechnung des allgemeinen Farbwiedergabeindex verwendeten acht Testfarben (1 bis 8)

$\lambda$ nm	Nummer der Testfarbe							
	1	2	3	4	5	6	7	8
380	0,219	0,070	0,065	0,074	0,295	0,151	0,378	0,104
390	0,252	0,089	0,070	0,093	0,310	0,265	0,524	0,170
400	0,256	0,111	0,073	0,116	0,313	0,410	0,551	0,319
410	0,252	0,118	0,074	0,124	0,319	0,492	0,559	0,462
420	0,244	0,121	0,074	0,128	0,326	0,517	0,561	0,490
430	0,237	0,122	0,073	0,135	0,334	0,531	0,556	0,482
440	0,230	0,123	0,073	0,144	0,346	0,544	0,544	0,462
450	0,225	0,127	0,074	0,161	0,360	0,556	0,522	0,439
460	0,220	0,131	0,077	0,186	0,381	0,554	0,488	0,413
470	0,216	0,138	0,085	0,229	0,403	0,541	0,448	0,382
480	0,214	0,150	0,109	0,281	0,415	0,519	0,408	0,352
490	0,216	0,174	0,148	0,332	0,419	0,488	0,363	0,325
500	0,223	0,207	0,198	0,370	0,413	0,450	0,324	0,299
510	0,226	0,242	0,241	0,390	0,403	0,414	0,301	0,283
520	0,225	0,260	0,278	0,395	0,389	0,377	0,283	0,270
530	0,227	0,267	0,339	0,385	0,372	0,341	0,265	0,256
540	0,236	0,272	0,392	0,367	0,353	0,309	0,257	0,250
550	0,253	0,282	0,400	0,341	0,331	0,279	0,259	0,254
560	0,272	0,299	0,380	0,312	0,308	0,253	0,260	0,264
570	0,298	0,322	0,349	0,280	0,284	0,234	0,256	0,272
580	0,341	0,335	0,315	0,247	0,260	0,225	0,254	0,278
590	0,390	0,341	0,285	0,214	0,232	0,221	0,270	0,295
600	0,424	0,342	0,264	0,185	0,210	0,220	0,302	0,348
610	0,442	0,342	0,252	0,169	0,194	0,220	0,344	0,434
620	0,450	0,341	0,241	0,160	0,185	0,223	0,377	0,528
630	0,451	0,339	0,229	0,154	0,180	0,233	0,400	0,604
640	0,451	0,338	0,220	0,151	0,176	0,244	0,420	0,648
650	0,450	0,336	0,216	0,148	0,175	0,258	0,438	0,676
660	0,451	0,334	0,219	0,148	0,175	0,268	0,452	0,693
670	0,453	0,332	0,230	0,151	0,180	0,278	0,462	0,705
680	0,455	0,331	0,251	0,158	0,186	0,283	0,468	0,712
690	0,458	0,329	0,288	0,165	0,192	0,291	0,473	0,717
700	0,462	0,328	0,340	0,170	0,199	0,302	0,483	0,721
710	0,464	0,326	0,390	0,170	0,199	0,325	0,496	0,719
720	0,466	0,324	0,431	0,166	0,196	0,351	0,511	0,725
730	0,466	0,324	0,460	0,164	0,195	0,376	0,525	0,729
740	0,467	0,322	0,481	0,168	0,197	0,401	0,539	0,730
750	0,467	0,320	0,493	0,177	0,203	0,425	0,553	0,730
760	0,467	0,316	0,500	0,185	0,208	0,447	0,565	0,730
770	0,467	0,315	0,505	0,192	0,215	0,469	0,575	0,730
780	0,467	0,314	0,516	0,197	0,219	0,485	0,581	0,730

**Tabelle 5 — Relative spektrale Energieverteilung der Normlichtart D65 für Wellenlängen zwischen 380 nm und 780 nm, normiert auf den Wert 100 bei 560 nm**

$\lambda$ nm	Spektralfluss $\frac{d\phi_e}{d\lambda} \Delta\lambda$	$\lambda$ nm	Spektralfluss $\frac{d\phi_e}{d\lambda} \Delta\lambda$
380	50,0	580	95,8
390	54,6	590	88,7
400	82,8	600	90,0
410	91,5	610	89,6
420	93,4	620	87,7
430	86,7	630	83,3
440	104,9	640	83,7
450	117,0	650	80,0
460	117,8	660	80,2
470	114,9	670	82,3
480	115,9	680	78,3
490	108,8	690	69,7
500	109,4	700	71,6
510	107,8	710	74,3
520	104,8	720	61,6
530	107,7	730	69,9
540	104,4	740	75,1
550	104,0	750	63,6
560	100,0	760	46,4
570	96,3	770	66,8
		780	63,4

**Tabelle 6 — Normbeobachter CIE 1931 (2 Grad). Zusammengefasste Wiedergabe der Normspektralwertanteile  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  für den Bereich  $\lambda = 380 \text{ nm}$  bis  $780 \text{ nm}$  in Abständen von  $10 \text{ nm}$**

$\lambda$ nm	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$
380	0,001 368	0,000 039	0,006 450
390	0,004 243	0,000 120	0,020 050
400	0,014 310	0,000 396	0,067 850
410	0,043 510	0,001 210	0,207 400
420	0,134 380	0,004 000	0,645 600
430	0,283 900	0,011 600	1,385 600
440	0,348 280	0,023 000	1,747 060
450	0,336 200	0,038 000	1,772 110
460	0,290 800	0,060 000	1,669 200
470	0,195 360	0,090 980	1,287 640
480	0,095 640	0,139 020	0,812 950
490	0,032 010	0,208 020	0,465 180
500	0,004 900	0,323 000	0,272 000
510	0,009 300	0,503 000	0,158 200
520	0,063 270	0,710 000	0,078 250
530	0,165 500	0,862 000	0,042 160
540	0,290 400	0,954 000	0,020 300
550	0,433 450	0,994 950	0,008 750
560	0,594 500	0,995 000	0,003 900
570	0,762 100	0,952 000	0,002 100
580	0,916 300	0,870 000	0,001 650
590	1,026 300	0,757 000	0,001 100
600	1,062 200	0,631 000	0,000 800
610	1,002 600	0,503 000	0,000 340
620	0,854 450	0,381 000	0,000 190
630	0,642 400	0,265 000	0,000 050
640	0,447 900	0,175 000	0,000 020
650	0,283 500	0,107 000	0,000 000
660	0,164 900	0,061 000	0,000 000
670	0,087 400	0,032 000	0,000 000
680	0,046 770	0,017 000	0,000 000
690	0,022 700	0,008 210	0,000 000
700	0,011 359	0,004 102	0,000 000
710	0,005 790	0,002 091	0,000 000
720	0,002 899	0,001 047	0,000 000
730	0,001 440	0,000 520	0,000 000
740	0,000 690	0,000 249	0,000 000
750	0,000 332	0,000 120	0,000 000
760	0,000 166	0,000 060	0,000 000
770	0,000 083	0,000 030	0,000 000
780	0,000 042	0,000 015	0,000 000

Tabelle 7 — Werte von  $U_{r,i}^*$ ;  $V_{r,i}^*$ ;  $W_{r,i}^*$  für die mit Normlichtart D65 beleuchteten Testfarben

Nummer der Testfarbe	$U_{r,i}^*$	$V_{r,i}^*$	$W_{r,i}^*$
1	31,92	8,41	60,48
2	15,22	23,76	59,73
3	-8,34	36,29	61,08
4	-33,29	18,64	60,25
5	-26,82	-6,55	61,41
6	-18,80	-28,80	60,52
7	9,77	-26,50	60,14
8	28,78	-16,24	61,83

## Anhang A (normativ)

### Verfahren für die Berechnung der spektralen Kenngrößen von Glasscheiben mit verschiedener Dicke und/oder Einfärbung

#### A.1 Verfahren für die Berechnung des spektralen Transmissions- und Reflexionsgrads einer unbeschichteten Glasscheibe der Dicke $y$ aus ihrem bei der Dicke $x$ gemessenen spektralen Transmissionsgrad

Alle Werte der nachfolgenden Transmissions- und Reflexionsgrade müssen als Bruchzahlen (d. h. 0 bis 1) statt in Prozenten (d. h. 0 bis 100) angegeben werden.

Gegeben:

$\tau_x(\lambda)$  spektraler Transmissionsgrad einer Glasscheibe der Dicke  $x$ ;

$n(\lambda)$  Brechzahl des Glases (siehe [9] für Kalk-Natronglas).

Der spektrale Transmissionsgrad für die Dicke  $y$  wird nach der folgenden Gleichung berechnet:

$$\tau_y(\lambda) = \frac{[1 - \rho_s(\lambda)]^2 \tau_{i,y}(\lambda)}{1 - \rho_s^2(\lambda) \tau_{i,y}^2(\lambda)} \quad (\text{A.1})$$

Dabei ist

$\rho_s(\lambda)$  der Reflexionsgrad an der Glas/Luft-Grenzfläche nach der Gleichung:

$$\rho_s(\lambda) = \left[ \frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda) + 1} \right]^2 \quad (\text{A.2})$$

$\tau_{i,y}(\lambda)$  der Reintransmissionsgrad der Glasscheibe einer Dicke  $y$  nach der folgenden Gleichung:

$$\tau_{i,y}(\lambda) = [\tau_{i,x}(\lambda)]^{\frac{y}{x}} \quad (\text{A.3})$$

Dabei ist

$\tau_{i,x}(\lambda)$  der Reintransmissionsgrad der Glasscheibe einer Dicke  $x$ , ermittelt aus ihrem gemessenen Transmissionsgrad nach folgender Gleichung:

$$\tau_{i,x}(\lambda) = \frac{\left\{ [1 - \rho_s(\lambda)]^4 + 4\rho_s^2(\lambda) \tau_x^2(\lambda) \right\}^{\frac{1}{2}} - [1 - \rho_s(\lambda)]^2}{[2\rho_s^2(\lambda) \tau_x(\lambda)]} \quad (\text{A.4})$$

In analoger Weise wird der spektrale Reflexionsgrad für eine Dicke  $y$  nach der folgenden Gleichung berechnet:

$$\rho_y(\lambda) = \rho_s(\lambda) \left\{ 1 + \frac{[1 - \rho_s(\lambda)]^2 \tau_{i,y}^2(\lambda)}{1 - \rho_s^2(\lambda) \tau_{i,y}^2(\lambda)} \right\} \quad (\text{A.5})$$

**BEISPIEL** Eine grüne Glasscheibe ist 3,0 mm dick. Bei 550 nm beträgt der spektrale Transmissionsgrad 0,83, und ihre Brechzahl ist 1,525. Der Transmissionsgrad der gleichen Scheibe wird für eine Dicke von 5 mm berechnet.

Lösung:

$$x = 3,00$$

$$\tau_x = 0,83$$

$$n = 1,525$$

$$y = 5,00$$

Aus Gleichung (A.2) folgt  $\rho_s = 0,043\ 2$

Aus Gleichung (A.4) folgt  $\tau_{i,x} = 0,905\ 3$

Aus Gleichung (A.3) folgt  $\tau_{i,y} = 0,847\ 2$

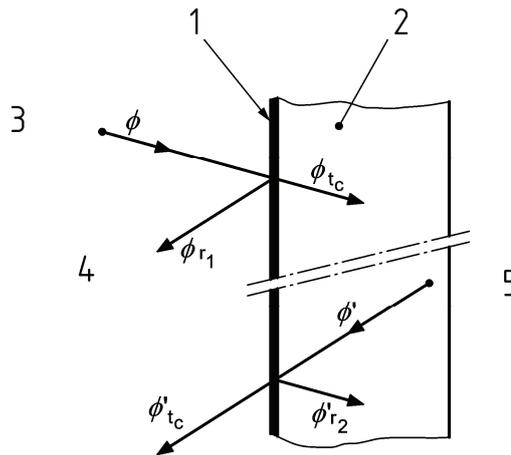
Aus Gleichung (A.1) folgt  $\tau_y = 0,776\ 6$ , gerundet auf 0,78

Aus Gleichung (A.5) folgt  $\rho_y = 0,071\ 7$ , gerundet auf 0,07

## A.2 Verfahren für die Berechnung des spektralen Transmissions- und Reflexionsgrads einer beschichteten Glasscheibe der Dicke $y$ aus den spektralen Transmissions- und Reflexionsgraden einer Glasscheibe aus einem anderen Glas mit der Dicke $x$ und mit der gleichen Beschichtung

### A.2.1 Kenndaten des Aufbaus Luft/Beschichtung/Glas

In den unten angegebenen Gleichungen ist es zweckmäßig, die folgenden Symbole für die Kennzeichnung der photometrischen Eigenschaften der Beschichtung im System Luft/Beschichtung/Glas zu verwenden (siehe Bild A.1):



#### Legende

- 1 Beschichtung
- 2 Glasplatte
- 3 Richtung der Strahlung Luft/Beschichtung
- 4 Luft
- 5 Richtung der Strahlung Glas/Beschichtung/Luft

**Bild A.1 — Darstellung der Bedeutung von  $r_1$ ,  $r_2$  und  $t_c$**

$r_1(\lambda)$ : spektraler Reflexionsgrad der Beschichtung für von der Luftseite auf die Beschichtung auftreffende Strahlung;

$r_2(\lambda)$ : spektraler Reflexionsgrad der Beschichtung für von der Glasseite auf die Beschichtung auftreffende Strahlung;

$t_c(\lambda)$ : spektraler Transmissionsgrad des Systems: Luft/Beschichtung/Substrat.

Die Werte für diese Daten werden aus den gemessenen spektralen Daten  $[\rho_s(\lambda), \tau_i(\lambda)]$  einer Probe eines bekannten Glases, auf dem die Beschichtung aufgebracht worden ist, berechnet. Die folgenden Daten müssen gemessen werden:

$\rho_1(\lambda)$ : spektraler Reflexionsgrad eines beschichteten Glases, gemessen in der Richtung Luft/Schicht/Glas;

$\rho_2(\lambda)$ : spektraler Reflexionsgrad eines beschichteten Glases, gemessen in der Richtung Luft/Glas/Schicht;

$\tau(\lambda)$ : spektraler Transmissionsgrad des beschichteten Glases.

Die folgenden Gleichungen werden angewendet:

$$r_1(\lambda) = \rho_1(\lambda) - \frac{\rho_s(\lambda)\tau^2(\lambda)}{D(\lambda)} \quad (\text{A.6})$$

$$r_2(\lambda) = \frac{\rho_2(\lambda) - \rho_s(\lambda)}{D(\lambda)\tau_i^2(\lambda)} \quad (\text{A.7})$$

$$t_c(\lambda) = \frac{\tau(\lambda)[1 - \rho_s(\lambda)]}{D(\lambda)\tau_i(\lambda)} \quad (\text{A.8})$$

Dabei ist

$$D(\lambda) = \rho_s(\lambda)[\rho_2(\lambda) - \rho_s(\lambda)] + [1 - \rho_s(\lambda)]^2 \quad (\text{A.9})$$

$\rho_s(\lambda)$  and  $\tau_i(\lambda)$  die Spektraldaten des Ausgangsglases, wie in A.1 angegeben.

## A.2.2 Charakteristische Daten mit gleicher Beschichtung auf einem unterschiedlichen Glas

Aus diesen charakteristischen Daten des Systems Luft/Beschichtung/Glas können die spektralen Daten einer anderen beschichteten Scheibe, die aus einem anderen Glas mit der gleichen Beschichtung besteht, berechnet werden, vorausgesetzt, dass die Scheiben die gleiche Brechzahl haben (siehe [9]).

Die folgenden Gleichungen sind gültig:

$$\rho_1(\lambda) = r_1(\lambda) + \frac{\rho_s(\lambda)t_c^2(\lambda)\tau_i^2(\lambda)}{D'(\lambda)} \quad (\text{A.10})$$

$$\rho_2(\lambda) = \rho_s(\lambda) + \frac{r_2(\lambda)[1 - \rho_s(\lambda)]^2\tau_i^2(\lambda)}{D'(\lambda)} \quad (\text{A.11})$$

$$\tau(\lambda) = \frac{[1 - \rho_s(\lambda)]\tau_i(\lambda)t_c(\lambda)}{D'(\lambda)} \quad (\text{A.12})$$

Dabei ist

$$D'(\lambda) = 1 - \rho_s(\lambda)r_2(\lambda)\tau_i^2(\lambda) \quad (\text{A.13})$$

$\tau_i(\lambda)$  und  $\rho_s(\lambda)$  sind der entsprechende innere Transmissionsgrad und Reflexionsgrad der anderen beschichteten Scheibe.

**BEISPIEL** Eine reflektierende Beschichtung ist auf einem Klarglas von 6,00 mm Dicke aufgebracht. Für eine Wellenlänge von 550 nm ergeben sich die optischen Eigenschaften der beschichteten Scheibe wie folgt:

- Transmissionsgrad:  $\tau = 0,377$
- Reflexionsgrad, gemessen gegen die beschichtete Seite:  $\rho_1 = 0,345$
- Reflexionsgrad, gemessen gegen die unbeschichtete Seite:  $\rho_2 = 0,283$

Gesucht sind die Eigenschaften einer beschichteten Scheibe, bestehend aus der gleichen Beschichtung auf einem Grünglas von 4 mm Dicke.

Es wird angenommen, dass das Klar- und das Grünglas die gleiche Brechzahl von z. B.  $n = 1,525$  haben.

Lösung:

Vor Anwendung der Gleichungen (A.6) bis (A.9) ist es notwendig, den inneren Transmissionsgrad,  $\tau_i$ , des Klarglases von 6,00 mm Dicke zu berechnen.

Gegeben ist für Klarglas ein Transmissionsgrad  $\tau_x = 0,894$  bei einer Dicke  $x = 6,00$  mm; die Anwendung der Gleichungen (A.2) und (A.4) führt zu dem folgenden Ergebnis:

$\tau_i = 0,974\ 9$  für Klarglas von 6,00 mm Dicke.

Aus Gleichung (A.9) folgt:  $D = 0,925\ 8$

Aus Gleichung (A.6) folgt:  $r_1 = 0,338\ 4$

Aus Gleichung (A.7) folgt:  $r_2 = 0,272\ 5$

Aus Gleichung (A.8) folgt:  $t_c = 0,399\ 7$

Für die Anwendung der Gleichungen (A.10) bis (A.13) ist es erforderlich, den inneren Transmissionsgrad des Grünglases für eine Dicke von 4 mm zu kennen.

Das Beispiel in A.1 ergibt bei Anwendung der Gleichung (A.3):

$$\tau_i = (0,905\ 3)^{\frac{4}{3}} = 0,875\ 8$$

Aus Gleichung (A.13) folgt:  $D' = 0,991\ 0$

Aus Gleichung (A.10) folgt:  $\rho_1(\lambda) = 0,343\ 7$ , gerundet auf 0,34

Aus Gleichung (A.11) folgt:  $\rho_2(\lambda) = 0,236\ 3$ , gerundet auf 0,24

Aus Gleichung (A.12) folgt:  $\tau = 0,337\ 9$ , gerundet auf 0,34

## Anhang B (normativ)

### Verfahren zur Berechnung der spektralen Kenngrößen von Verbundglas

#### B.1 Einleitung

In diesem Anhang werden die Berechnungen für Transmission und für die Reflexion von beiden Seiten für die Gläser angegeben, bei denen ein Medium zwischen zwei Grenzflächen bzw. zwei Medien zwischen drei Grenzflächen vorhanden ist/sind, wie z. B. bei Verbundglas, bei dem zwischen der Zwischenschicht und einer der Glasscheiben eine Beschichtung vorhanden ist. Es werden sowohl Berechnungsverfahren vorgestellt, nach denen die Gesamttransmission und die Gesamtreflexion aus der Grenzflächentransmission und der Grenzflächenreflexion sowie der Reintransmission der Medien bestimmt werden, als auch Verfahren in der umgekehrten Richtung, d. h. die Bestimmung der Grenzflächentransmissions- und -reflexionsgrade und der Reintransmission der Medien erfolgt ausgehend von der zuvor bestimmten oder gemessenen Gesamttransmission und Gesamtreflexion der Systeme.

Es sollte angemerkt werden, dass alle Kenngrößen wellenlängenabhängig sind. Die folgenden Gleichungen gelten jedoch für alle Wellenlängen. Weiterhin zu beachten ist, dass es in jedem System nur drei messbare Kenngrößen gibt (den Transmissionsgrad und die Reflexionsgrade von beiden Seiten), so dass bei einer Messreihe zur Ermittlung dieser drei Kenngrößen nur eine begrenzte Anzahl Grenzflächen- und Medienkenngrößen bestimmt werden kann.

Dieser Anhang gibt die exakten Gleichungen für die Berechnungen der spektralen Kenngrößen für Einfachverglasungen mit oder ohne Beschichtung und für Verbundverglasungen mit einer Beschichtung auf einer der Grenzflächen an. Außerdem werden diese Berechnungen anhand von Beispielen veranschaulicht. Zahlenmäßige Berechnungsergebnisse werden auf sechs signifikante Stellen angegeben, nicht um darauf hinzuweisen, dass die Ergebnisse dieses Niveau der Präzision erreichen, sondern um eine Verifizierung der Berechnungen zu ermöglichen.

#### B.2 Terminologie

In diesem Anhang wird von folgenden Voraussetzungen ausgegangen: das System besitzt eine bestimmte Anzahl von Grenzflächen, die durch Medien voneinander getrennt sind; als positiv wird die Richtung festgelegt, bei der Licht von links auftritt und sich nach rechts ausbreitet. Sowohl die Medien als auch die Grenzflächen werden von links nach rechts nummeriert.

Für die Grenzflächen wird festgelegt, dass sie eine Transmission sowie eine Reflexion von beiden Seiten ermöglichen. Diese Kenngrößen werden folgendermaßen bezeichnet:

$t_i$  Transmission der  $i$ . Grenzfläche (äquivalent für beide Richtungen)

$r_i$  Reflexion der  $i$ . Grenzfläche für Licht, das aus der positiven Richtung (von links) auftritt

$r_i'$  Reflexion der  $i$ . Grenzfläche für Licht, das aus der negativen Richtung (von rechts) auftritt

Die Kenngrößen für jedes Medium werden folgendermaßen bezeichnet:

$\tau_i$  Reintransmission (innere Transmission) des  $i$ . Mediums (äquivalent für beide Richtungen)

$d_i$  Dicke des  $i$ . Mediums

Gesamttransmission und Gesamtreflexion (einschließlich mehrfacher innerer Reflexionen), die aus den Medien- und Grenzflächenkenngrößen berechnet (oder gemessen) werden, sind folgendermaßen zu bezeichnen:

$\tau_T$  = Gesamttransmission des Systems

$\rho_T$  = Gesamtreflexion des Systems für Licht, das aus der positiven Richtung auftrifft

$\rho'_T$  = Gesamtreflexion des Systems für Licht, das aus der negativen Richtung auftrifft

### B.3 Grundgleichungen

#### B.3.1 Allgemeines

Im vorliegenden Anhang wird eine bestimmte Anzahl grundlegender Beziehungen verwendet.

#### B.3.2 Reintransmissionsgrad für Medien, die den gleichen spektralem dekadischem Absorptionskoeffizienten, aber eine unterschiedliche Dicke haben

Der Reintransmissionsgrad der Medien ist nach Gleichung (B.1) zu bestimmen:

$$\tau = e^{-\frac{4\pi k(\lambda)d}{\lambda}} \quad (\text{B.1})$$

Dabei ist

$k(\lambda)$  der spektrale Absorptionskoeffizient eines Mediums mit der Dicke  $d$  bei der Wellenlänge  $\lambda$

Daher gilt für zwei Medien, die den gleichen spektralen Absorptionskoeffizienten, aber unterschiedliche Dicken haben, die in Gleichung (B.2) dargestellte Beziehung für die Reintransmissionsgrade dieser beiden Medien.

$$\tau_1 = \tau_2^{d_1/d_2} \quad (\text{B.2})$$

Dabei ist

$\tau_1$  bzw.  $d_1$  der Reintransmissionsgrad bzw. die Dicke des ersten Mediums;

$\tau_2$  bzw.  $d_2$  der Reintransmissionsgrad bzw. die Dicke des zweiten Mediums.

Gleichung (B.2) ist dann besonders hilfreich, wenn der Reintransmissionsgrad einer Glasscheibe aus Messungen an einer anderen Scheibe mit gleichem spektralem Absorptionskoeffizienten, aber unterschiedlicher Dicke zu bestimmen ist. Gleichung B.2 kann analog auch auf Zwischenschichten mit unterschiedlichen Dicken angewendet werden.

#### B.3.3 Gesamt-Reintransmissionsgrad zweier benachbarter Medien mit äquivalenten Brechzahlen

Wenn zwei benachbarte Medien äquivalente Brechzahlen haben, hat die Grenzfläche zwischen ihnen einen Reflexionsgrad von 0 und einen Transmissionsgrad von 100 %. In diesem Fall ist der effektive Reintransmissionsgrad von zwei (oder mehr) Medien nach Gleichung (B.3) zu berechnen.

$$\tau = \tau_1\tau_2 \quad (\text{B.3})$$

Dabei ist

$\tau$  der effektive Reintransmissionsgrad für die Kombination von zwei Medien;

$\tau_1$  und  $\tau_2$  die Reintransmissionsgrade der beiden Medien.

Diese Beziehung ist für Verbundverglasungen hilfreich, bei denen die Zwischenschicht die gleiche Brechzahl hat wie die Glasscheibe(n), aber einen unterschiedlichen spektralen Absorptionskoeffizienten.

### B.3.4 Transmission und Reflexion für eine nicht absorbierende Grenzfläche

Für nicht absorbierende Grenzflächen ist es ausreichend, diese Grenzfläche entweder durch ihre Transmission oder Reflexion zu beschreiben. Die Begründung liefern die in Gleichung (B.4) angegebenen Beziehungen.

$$t_i + r_i = 1 \quad \text{und} \quad r_i' = r_i \quad (\text{B.4})$$

Dabei ist

$t_i$ ,  $r_i$  und  $r_i'$  für die  $i$ . Grenzfläche die Transmission und die Reflexionen von beiden Seiten.

## B.4 Systeme mit zwei Grenzflächen

### B.4.1 Berechnungen des Gesamttransmissionsgrades und der Gesamtreflexionsgrade aus den Grenzflächen- und Medienkenngrößen

Bild B.1 zeigt ein System von zwei durch ein Medium voneinander getrennten Grenzflächen.

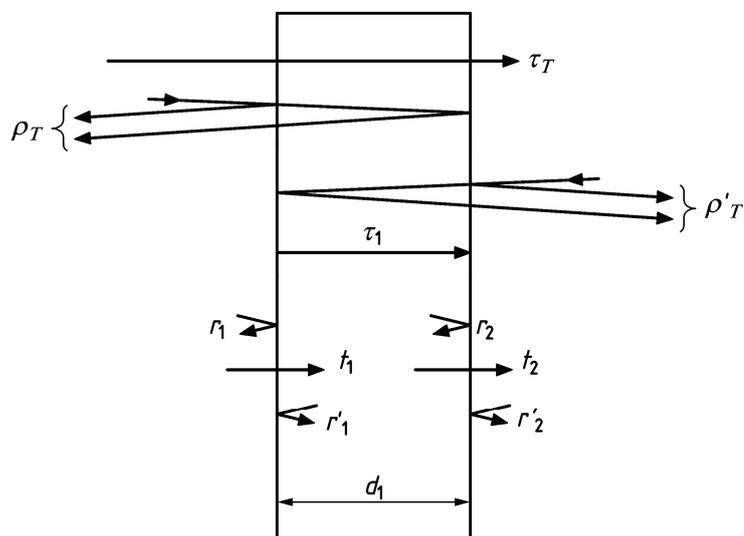


Bild B.1 — System von zwei durch ein Medium voneinander getrennten Grenzflächen

In Bild B.1 können die beiden durch ein Medium voneinander getrennten Grenzflächen durch die folgenden Kenngrößen definiert werden.

$\tau_T$  = der Gesamttransmissionsgrad des Systems einschließlich mehrfacher innerer Reflexionen;

$\rho_T$  = der Gesamtreflexionsgrad des von links auf das System auftreffenden Lichts einschließlich mehrfacher innerer Reflexionen;

$\rho'_T$  = der Gesamtreflexionsgrad des von rechts auf das System auftreffenden Lichts einschließlich mehrfacher innerer Reflexionen;

$t_1$  = Transmissionsgrad der Grenzfläche 1

$r_1$  = Reflexionsgrad der Grenzfläche 1 für von links einfallendes Licht;

$r'_1$  = Reflexion der Grenzfläche 1 für von rechts einfallendes Licht;

$t_2$  = Transmissionsgrad der Grenzfläche 2;

$r_2$  = Reflexionsgrad der Grenzfläche 2 für von links einfallendes Licht;

$r'_2$  = Reflexionsgrad der Grenzfläche 2 für von rechts einfallendes Licht;

$\tau_1$  = Reintransmissionsgrad des Mediums 1;

$d_1$  = Dicke des Mediums 1.

Der Gesamttransmissionsgrad und die Gesamtreflexionsgrade müssen aus den Grenzflächen- und Medienkenngrößen nach den Gleichungen (B.5), (B.6) und (B.7) berechnet werden.

$$\tau_T = \frac{t_1 \tau_1 t_2}{1 - r'_1 \tau_1^2 r_2} \quad (\text{B.5})$$

$$\rho_T = r_1 + \frac{t_1^2 \tau_1^2 r_2}{1 - r'_1 \tau_1^2 r_2} \quad (\text{B.6})$$

$$\rho'_T = r'_2 + \frac{r'_1 \tau_1^2 t_2^2}{1 - r'_1 \tau_1^2 r_2} \quad (\text{B.7})$$

Das Verfahren kann durch das nachfolgend angegebene Zahlenbeispiel veranschaulicht werden.

Gegeben sind:

$$t_1 = 0,600\ 000, r_1 = 0,200\ 000 \text{ und } r'_1 = 0,150\ 000$$

$$\tau_1 = 0,940\ 000$$

$$t_2 = 0,850\ 000, r_2 = 0,070\ 000 \text{ und } r'_2 = 0,090\ 000$$

Der Gesamttransmissionsgrad und die Gesamtreflexionsgrade des Systems sind:

$$\tau_T = 0,483\ 889$$

$$\rho_T = 0,222\ 475$$

$$\rho'_T = 0,186\ 657$$

## B.4.2 Berechnungen der Grenzflächen- und Medienkenngrößen aus dem Gesamttransmissionsgrad und den Gesamtreflexionsgraden

### B.4.2.1 Bestimmung des Reintransmissionsgrads und der Reflexionsgrade der Grenzfläche für unbeschichtetes Glas

Theoretisch können für eine unbeschichtete Glasscheibe die Gleichungen (B.5), (B.6) und (B.7) zur Bestimmung der Reintransmissionsgrads und der Grenzflächenreflexionsgrade angewendet werden. Da die Grenzflächen nicht beschichtet sind, absorbieren sie auch kein Licht, d. h. Gleichung (B.4) kann angewendet werden. Es ist zu beachten, dass das System symmetrisch ist und dass gilt:  $\rho'_T = \rho_T$ .

Um die Grenzflächenreflexionsgrade für eine Glasscheibe zu bestimmen, muss Gleichung (B.8) angewendet werden.

$$r_1 = r_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad a = 2 - \rho_T \quad b = \rho_T^2 - \tau_T^2 - 2\rho_T - 1 \quad c = \rho_T \quad (\text{B.8})$$

Es ist zu beachten, dass die negative Wurzel der Diskriminanten verwendet wird.

Dabei ist

$\tau_1$  der Reintransmissionsgrad der Glasscheibe;

$r_1$  und  $r_2$  die Reflexionsgrade der Grenzflächen;

$\tau_T$  und  $\rho_T$  die gemessenen Werte für Gesamttransmissionsgrad bzw. -reflexionsgrad der Glasscheibe.

Der Reintransmissionsgrad ist nach Gleichung (B.9) zu bestimmen.

$$\tau_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad a = \tau_T \tau_1^2 \quad b = (1,0 - r_1)^2 \quad c = -\tau_T \quad (\text{B.9})$$

In diesem Fall ist zu beachten, dass die positive Wurzel der Diskriminanten anzuwenden ist.

Alternativ kann der Reintransmissionsgrad nach Gleichung (B.10) bestimmt werden.

$$\tau_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad a = 1 \quad b = \frac{1 + \rho_T^2 - \tau_T^2 - 2\rho_T}{\tau_T} \quad c = -1 \quad (\text{B.10})$$

Es ist zu beachten, dass die positive Wurzel der Diskriminanten anzuwenden ist.

Der Reflexionsgrad der Grenzflächen kann dann nach Gleichung (B.11) bestimmt werden.

$$r_1 = r_2 = \frac{\rho_T}{1 + \tau_1 \tau_T} \quad (\text{B.11})$$

Das Verfahren kann durch das nachfolgend angegebene Zahlenbeispiel veranschaulicht werden.

Wenn die folgenden Werte für den Gesamttransmissionsgrad und den Gesamtreflexionsgrad gemessen werden:

$$\tau_T = 0,895\ 300$$

$$\rho_T = 0,074\ 738,$$

dann ergibt sich für den Reintransmissionsgrad  $\tau_1 = 0,970\ 000$  und für die Grenzflächenreflexionsgrade:  $r_1 = r_2 = 0,040\ 000$ .

In der Praxis wird  $r_1$  im Allgemeinen indirekt aus der Bestimmung der komplexen Brechzahl des Glases und durch die Ableitung des Reflexionsgrads aus diesem Wert ermittelt. Bei üblichem Einfall muss der Reflexionsgrad nach Gleichung (B.12) bestimmt werden.

$$r_1 = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \tag{B.12}$$

Dabei ist  $\hat{n} = n - ik$ , wobei  $n$  die Brechzahl und  $k$  der spektrale Absorptionskoeffizient des Glases ist.

Im Strahlungsbereich  $k \ll n$  wird Gleichung (B.12) für Kalk-Natronglas folgendermaßen zu Gleichung (B.13) umgeformt.

$$r_1 = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \tag{B.13}$$

Der Reintransmissionsgrad wird dann nach Gleichung (B.9) bestimmt. Diese Vorgehensweise wird gegenüber der Anwendung von Gleichung (B.8) bevorzugt, sofern nicht besonders genaue Messungen des Reflexionsgrads verfügbar sind.

Das Verfahren wird durch das nachfolgend angegebene Zahlenbeispiel veranschaulicht, bei dem die Brechzahl mit 1,52 bestimmt wurde und der gemessene Gesamttransmissionsgrad 0,89 beträgt.

Die Gleichungen (B.13) und (B.9) ergeben

$$r_1 = 0,042\ 580 \text{ und}$$

$$\tau_1 = 0,969\ 270$$

Wenn der Reintransmissionsgrad für das gleiche Glas, aber für eine andere Dicke zu bestimmen ist, kann Gleichung (B.2) angewendet werden.

**B.4.2.2 Bestimmung der Grenzflächenkenngößen für eine Glasscheibe, die eine Beschichtung auf nur einer Grenzfläche hat und für die bereits zuvor die Kenngößen der zweiten Grenzfläche bestimmt wurden**

Wenn der Transmissionsgrad und die Reflexionsgrade für eine beschichtete Grenzfläche nicht bekannt sind, können sie unter der Voraussetzung bestimmt werden, dass der Reintransmissionsgrad der Glasscheibe zuvor nach dem in B.4.2.1 beschriebenen Verfahren bestimmt wurde und dass die Kenngößen für die gegenüber liegende Grenzfläche ( $t_2$ ,  $r_2$  und  $r'_2$ ) ebenfalls zuvor nach dem in B.4.2.1 beschriebenen Verfahren bestimmt wurden. Wenn sich die absorbierende Schicht auf der Grenzfläche 1 befindet, sind die Transmissions- und Reflexionsgrade nach den Gleichungen (B.14), (B.15) und (B.16) zu bestimmen.

$$t_1 = \frac{\tau_T t_2}{\tau_1(t_2^2 - r_2 r'_2 + \rho'_T r_2)} \tag{B.14}$$

$$r_1 = \frac{\rho_T (t_2^2 - r_2 r_2') - r_2 (\tau_T^2 - \rho_T \rho_T')}{t_2^2 - r_2 r_2' + \rho_T r_2} \quad (\text{B.15})$$

$$r_1' = \frac{\rho_T' - r_2'}{\tau_1^2 (t_2^2 - r_2 r_2' + \rho_T' r_2)} \quad (\text{B.16})$$

Das Verfahren wird durch das nachfolgend angegebene Zahlenbeispiel veranschaulicht (siehe auch oben).

Wenn für den Gesamttransmissionsgrad und den Gesamtreflexionsgrad folgende Werte gemessen wurden:

$$\tau_T = 0,483\ 889$$

$$\rho_T = 0,222\ 475$$

$$\rho_T' = 0,186\ 657$$

und zuvor folgende Werte für den Reintransmissionsgrad des Mediums und für den Transmissionsgrad und die Reflexionsgrade für die zweite Grenzfläche bestimmt wurden:

$$\tau_1 = 0,940\ 000$$

$$t_2 = 0,850\ 000, r_2 = 0,070\ 000 \text{ und } r_2' = 0,090\ 000,$$

dann ergibt sich aus Anwendung der Gleichungen (B.14), (B.15) und (B.16):

$$t_1 = 0,600\ 000, r_1 = 0,200\ 000 \text{ und } r_1' = 0,150\ 000.$$

Während die Gleichungen (B.14), (B.15) und (B.16) diese Berechnungen für die allgemeinen Fälle ermöglichen, ist es im Allgemeinen üblich, die Kenngrößen der beschichteten Seite zu bestimmen, wenn die gegenüber liegende Seite unbeschichtet ist, d. h. die Gleichungen (B.13) und (B.4) können angewendet werden, um die Kenngrößen der unbeschichteten Seite aus der bekannten Brechzahl des Glases nach den Gleichungen (B.17), (B.18) und (B.19) zu bestimmen.

$$t_1 = \frac{\tau_T (1 - r_2)}{\tau_1 (1 - 2 r_2 + \rho_T r_2)} \quad (\text{B.17})$$

$$r_1 = \frac{\rho_T (1 - 2 r_2) - r_2 (\tau_T^2 - \rho_T \rho_T')}{1 - 2 r_2 + \rho_T r_2} \quad (\text{B.18})$$

$$r_1' = \frac{\rho_T' - r_2}{\tau_1^2 (1 - 2 r_2 + \rho_T r_2)} \quad (\text{B.19})$$

Das Verfahren wird durch das folgende Zahlenbeispiel veranschaulicht, bei dem die Brechzahl mit 1,52 ermittelt wurde, wie in dem Beispiel weiter oben, so dass sich  $r_2 = 0,042\ 580$  ergibt.

Wenn gilt:

$$\tau_T = 0,640\ 000$$

$$\rho_T = 0,220\ 000$$

$$\rho'_T = 0,170\ 000,$$

liefern die Gleichungen (B.17), (B.18) und (B.19) die folgenden Ergebnisse:

$$t_1 = 0,692\ 219$$

$$r_1 = 0,201\ 085$$

$$r'_1 = 0,149\ 943$$

### **B.4.2.3 Bestimmung des Reintransmissionsgrads für eine Zwischenschicht zwischen zwei Glasscheiben**

Dieser Abschnitt gilt für den Fall, dass zwischen zwei Glasscheiben eine Zwischenschicht vorhanden ist. In diesem Fall können die Schichten zwischen der Zwischenschicht und dem Glas vernachlässigt werden, da die Brechzahlen der beiden Materialien äquivalent sind, so dass sich für diese Grenzschicht  $r = 0$  und  $t = 1$  ergeben. Grenzfläche 1 kann als äußere Grenzfläche der ersten Scheibe und Grenzfläche 2 als äußere Grenzfläche der zweiten Scheibe angesehen werden. Die Kenngrößen für diese Grenzflächen und die Reintransmissionsgrade für beide Scheiben sind ebenfalls zuvor nach den in B.4.2.1 und B.4.2.2 beschriebenen Verfahren bestimmt worden. Für die Gleichungen (B.5), (B.6) und (B.7) können folgende Überlegungen angestellt werden:

$$\tau_1 = \tau_{G1} \tau_{LAM} \tau_{G2}$$

Dabei ist

$\tau_1$  = der Reintransmissionsgrad des Systems;

$\tau_{G1}$  = der bekannte Reintransmissionsgrad der ersten Glasscheibe;

$\tau_{LAM}$  = der unbekannte Reintransmissionsgrad der Zwischenschicht;

$\tau_{G2}$  = der bekannte Reintransmissionsgrad der zweiten Glasscheibe.

Wenn der Gesamttransmissionsgrad,  $\tau_T$ , für dieses System gemessen wird, kann der Reintransmissionsgrad des Systems unter Anwendung der quadratischen Gleichung abgeleitet werden, die in Gleichung (B.20) angegeben wird.

$$\tau_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad a = 1 \quad b = \frac{t_1 t_2}{r'_1 r_2 \tau_T} \quad c = -\frac{1}{r'_1 r_2} \quad (\text{B.20})$$

Es ist zu beachten, dass die positive Wurzel der Diskriminanten angewendet wird. Der Reintransmissionsgrad ist dann nach der folgenden Gleichung zu bestimmen:

$$\tau_{LAM} = \frac{\tau_1}{\tau_{G1} \tau_{G2}}.$$

Das Verfahren wird durch das nachfolgend angegebene Zahlenbeispiel veranschaulicht.

Wenn für den Gesamttransmissionsgrad der folgende Wert gemessen wird:

$$\tau_T = 0,440\ 312$$

und die zuvor bestimmten Werte für den Reintransmissionsgrad der Glasscheiben und für den Grenzflächen-  
transmissionsgrad und die Grenzflächenreflexionsgrade sind:

$$\tau_{G1} = 0,970\ 000$$

$$\tau_{G2} = 0,960\ 000$$

$$t_1 = 0,600\ 000, r_1 = 0,200\ 000 \text{ und } r'_1 = 0,150\ 000$$

$$t_2 = 0,850\ 000, r_2 = 0,070\ 000 \text{ und } r'_2 = 0,090\ 000,$$

dann ist der Gesamtreintransmissionsgrad des Systems  $\tau_1 = 0,856\ 704$ , aus dem sich  $\tau_{LAM} = 0,920\ 000$  ergibt.

## B.5 Systeme mit drei Grenzflächen

### B.5.1 Berechnungen für den Gesamttransmissionsgrad und die Gesamtreflexionsgrade aus den Grenzflächen- und Medienkenngrößen

Ein System mit drei Grenzflächen, die durch zwei Medien voneinander getrennt sind, wird in Bild B.2 dargestellt.

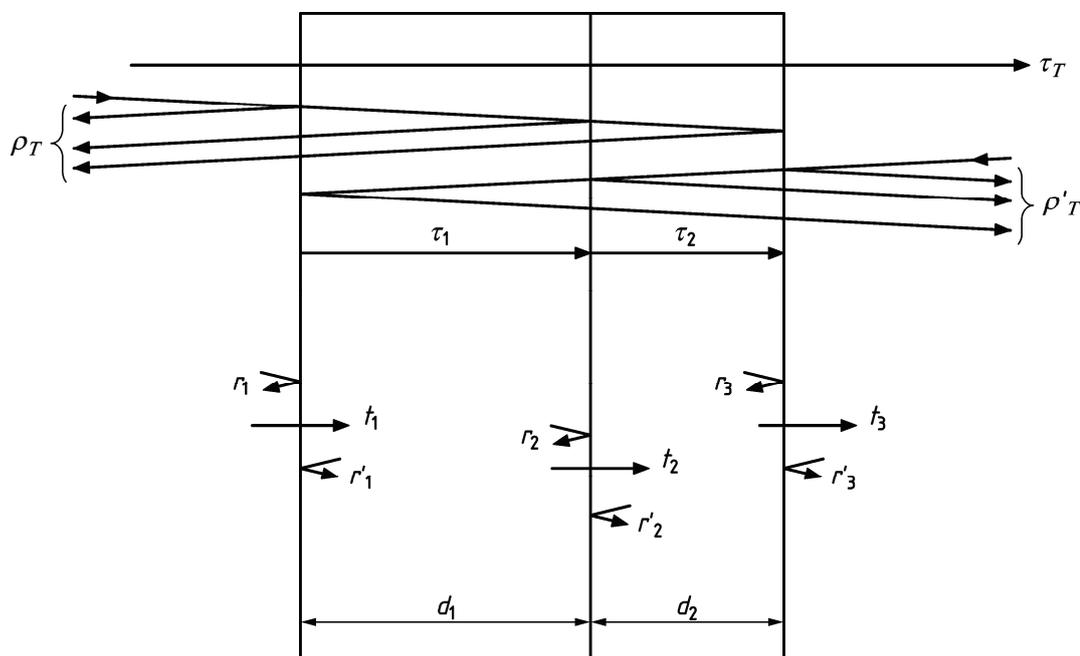


Bild B.2 — System mit drei Grenzflächen, die durch zwei Medien getrennt sind

In diesem System mit drei Grenzflächen, die durch zwei Medien getrennt sind, können definiert werden:

- $\tau_T$  = der Gesamttransmissionsgrad des Systems einschließlich innerer Mehrfachreflexionen;
- $\rho_T$  = der Gesamtreflexionsgrad des von links auf das System auftreffenden Lichts einschließlich innerer Mehrfachreflexionen;
- $\rho'_T$  = der Gesamtreflexionsgrad des von rechts auf das System auftreffenden Lichts einschließlich innerer Mehrfachreflexionen;
- $t_1$  = der Transmissionsgrad der Grenzfläche 1;
- $r_1$  = der Reflexionsgrad der Grenzfläche 1 durch von links auftreffendes Licht;
- $r'_1$  = der Reflexionsgrad der Grenzfläche 1 durch von rechts auftreffendes Licht;
- $t_2$  = der Transmissionsgrad der Grenzfläche 2;
- $r_2$  = der Reflexionsgrad der Grenzfläche 2 durch von links auftreffendes Licht;
- $r'_2$  = der Reflexionsgrad der Grenzfläche 2 durch von rechts auftreffendes Licht;
- $t_3$  = der Transmissionsgrad der Grenzfläche 3;
- $r_3$  = der Reflexionsgrad der Grenzfläche 3 durch von links auftreffendes Licht;
- $r'_3$  = der Reflexionsgrad der Grenzfläche 3 durch von rechts auftreffendes Licht;
- $\tau_1$  = der Reintransmissionsgrad des Mediums 1;
- $d_1$  = die Dicke des Mediums 1;
- $\tau_2$  = der Reintransmissionsgrad des Mediums 2;
- $d_2$  = die Dicke des Mediums 2.

Der Gesamttransmissionsgrad und die Gesamtreflexionsgrade können aus den Grenzflächen- und Medienkenngrößen nach den Gleichungen (B.21), (B.22) und (B.23) berechnet werden.

$$\tau_T = \frac{t_1 \tau_1 t_2 \tau_2 t_3}{(1 - r'_1 \tau_1^2 r_2) \times (1 - r'_2 \tau_2^2 r_3) - r'_1 \tau_1^2 t_2^2 \tau_2^2 r_3} \quad (\text{B.21})$$

$$\rho_T = r_1 + \frac{t_1^2 \tau_1^2 r_2 (1 - r'_2 \tau_2^2 r_3) + t_1^2 \tau_1^2 t_2^2 \tau_2^2 r_3}{(1 - r'_1 \tau_1^2 r_2) \times (1 - r'_2 \tau_2^2 r_3) - r'_1 \tau_1^2 t_2^2 \tau_2^2 r_3} \quad (\text{B.22})$$

$$\rho'_T = r'_3 + \frac{t_3^2 \tau_2^2 r'_2 (1 - r'_1 \tau_1^2 r_1) + t_3^2 \tau_1^2 t_2^2 \tau_2^2 r'_1}{(1 - r'_1 \tau_1^2 r_2) \times (1 - r'_2 \tau_2^2 r_3) - r'_1 \tau_1^2 t_2^2 \tau_2^2 r_3} \quad (\text{B.23})$$

Das Verfahren wird durch das folgende Zahlenbeispiel veranschaulicht:

Gegeben sind:

$$t_1 = 0,600\ 000, r_1 = 0,200\ 000 \text{ und } r'_1 = 0,150\ 000$$

$$\tau_1 = 0,940\ 000$$

$$t_2 = 0,850\ 000, r_2 = 0,070\ 000 \text{ und } r'_2 = 0,090\ 000$$

$$\tau_2 = 0,830\ 000$$

$$t_3 = 0,660\ 000, r_3 = 0,120\ 000 \text{ und } r'_3 = 0,180\ 000$$

Der Gesamttransmissionsgrad und die Gesamtreflexionsgrade des Systems sind:

$$\tau_T = 0,269\ 229$$

$$\rho_T = 0,242\ 135$$

$$\rho'_T = 0,236\ 891$$

### B.5.2 Berechnungen der Grenzflächen- und Medienkenngrößen aus dem Gesamttransmissionsgrad und den Gesamtreflexionsgraden

Der Transmissionsgrad und die Reflexionsgrade für eine Grenzfläche zwischen zwei Medien können bestimmt werden, wenn die Reintransmissionsgrade der beiden Medien zuvor nach dem in B.4.2.1 beschriebenen Verfahren bestimmt wurden und die Kenngrößen der beiden äußeren Grenzflächen ebenfalls zuvor nach dem in B.4.2.1 oder B.4.2.2 bestimmt wurden. Wenn  $\tau_T$ ,  $\rho_T$  und  $\rho'_T$  die gemessenen Werte für dieses System sind, können die Kenngrößen für die innere Grenzfläche mit Hilfe der Gleichungen (B.24), (B.25) und (B.26) abgeleitet werden.

$$t_2 = \frac{t_1 \tau_T t_3}{\tau_1 \tau_2 ((t_1^2 - r_1 r'_1)(t_3^2 - r_3 r'_3) + \rho'_T r_3 (t_1^2 - r_1 r'_1) + \rho_T r'_1 (t_3^2 - r_3 r'_3) - r'_1 r_3 (\tau_T^2 - \rho_T \rho'_T))} \quad (\text{B.24})$$

$$r_2 = \frac{(\rho_T - r_1)(t_3^2 - r_3 r'_3) - r_3 (\tau_T^2 - \rho_T \rho'_T) - r_3 r_1 \rho'_T}{\tau_1^2 ((t_1^2 - r_1 r'_1)(t_3^2 - r_3 r'_3) + \rho'_T r_3 (t_1^2 - r_1 r'_1) + \rho_T r'_1 (t_3^2 - r_3 r'_3) - r'_1 r_3 (\tau_T^2 - \rho_T \rho'_T))} \quad (\text{B.25})$$

$$r'_2 = \frac{(\rho'_T - r'_3)(t_1^2 - r_1 r'_1) - r'_1 (\tau_T^2 - \rho_T \rho'_T) - r'_3 r'_1 \rho_T}{\tau_2^2 ((t_1^2 - r_1 r'_1)(t_3^2 - r_3 r'_3) + \rho'_T r_3 (t_1^2 - r_1 r'_1) + \rho_T r'_1 (t_3^2 - r_3 r'_3) - r'_1 r_3 (\tau_T^2 - \rho_T \rho'_T))} \quad (\text{B.26})$$

Das Verfahren kann durch das folgende Zahlenbeispiel (siehe weiter oben) veranschaulicht werden:

Wenn für den Gesamttransmissionsgrad und die Gesamtreflexionsgrade folgende Werte gemessen wurden:

$$\tau_T = 0,269\ 229$$

$$\rho_T = 0,242\ 135$$

$$\rho'_T = 0,236\ 891$$

und die zuvor bestimmten Werte für den Reintransmissionsgrad der Medien und den Transmissionsgrad und die Reflexionsgrade für die erste und dritte Grenzfläche die folgenden Werte haben:

$$t_1 = 0,600\ 000, r_1 = 0,200\ 000 \text{ und } r'_1 = 0,150\ 000$$

$$\tau_1 = 0,940\ 000$$

$$\tau_2 = 0,830\ 000$$

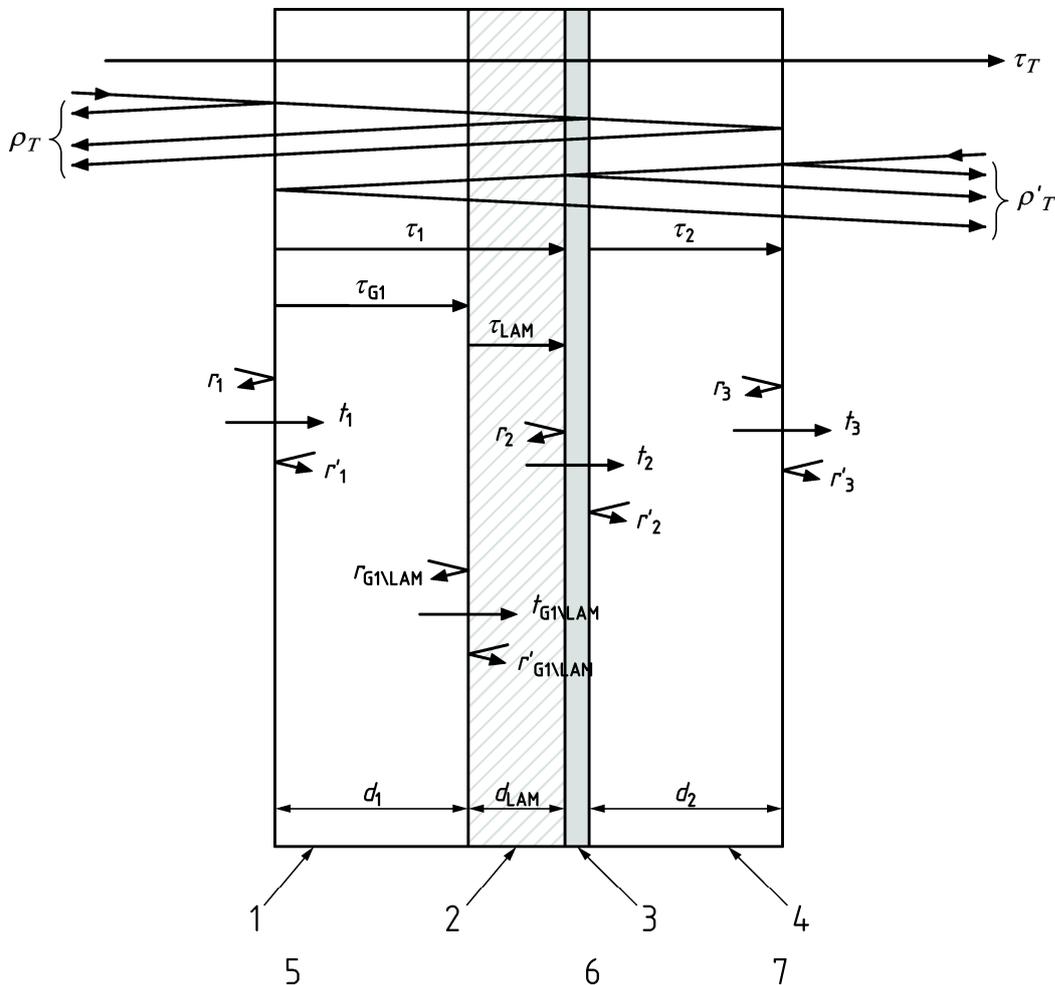
$$t_3 = 0,660\ 000, r_3 = 0,120\ 000 \text{ und } r'_3 = 0,180\ 000,$$

dann ergibt sich mit Hilfe der Gleichungen (B.24), (B.25) und (B.26):

$$t_2 = 0,850\ 000, r_2 = 0,070\ 000 \text{ und } r'_2 = 0,090\ 000.$$

### B.5.3 Beispiel für die Gleichungen (B.24), (B.25) und (B.26): Eine beschichtete Lage zwischen einer Zwischenschicht und einer Glasscheibe

Ein Verbundglassystem mit einer beschichteten Lage zwischen der Zwischenschicht und einer der Glasscheiben wird in Bild B.3 dargestellt.



#### Legende

- 1 Glass
- 2 Zwischenschicht
- 3 Beschichtung
- 4 Glass
- 5 Scheibe 1
- 6 beschichtete Lage
- 7 Scheibe 2

Bild B.3 — Verbundglassystem mit einer beschichteten Lage zwischen der Zwischenschicht und einer der Glasscheiben

Es sollte angemerkt werden, dass für die Zwischenschicht einer Brechzahl ausgewählt wird, die ungefähr der Brechzahl der Glasscheiben entspricht. In diesem Fall hat die unbeschichtete Grenzfläche zwischen der Zwischenschicht und der Glasscheibe eine Reflexion von Null und eine Transmission von 1,0, d. h., für Bild B.3 gilt:

$$r_{G1/LAM} = r'_{G1/LAM} = 0 \quad \text{und} \quad t_{G1/LAM} = 1,0.$$

Um die Reintransmissionsgrade der Medien und die Transmissionsgrade der Grenzfläche sowie die Reflexionsgrade für alle Grenzflächen zu bestimmen, muss das nachfolgend beschriebene Verfahren angewendet werden:

- Die Reintransmissionsgrade der beiden Glasscheiben,  $\tau_{G1}$  und  $\tau_{G2}$ , werden nach den in B.4.2.1 beschriebenen Verfahren an Proben unbeschichteter Einfachscheiben bestimmt.
- Der Reintransmissionsgrad der Zwischenschicht wird nach dem in B.4.2.3 beschriebenen Verfahren an einer Probe bestimmt, die eine Zwischenschicht zwischen zwei Glasscheiben hat und keine Beschichtung zwischen der Zwischenschicht und einer der Glasscheiben.
- Die Transmissionsgrade und Reflexionsgrade der äußeren Grenzflächen (1 und 3) sind nach dem in B.4.2.1 beschriebenen Verfahren an Proben unbeschichteter Einfachscheiben oder nach dem in B.4.2.2 beschriebenen Verfahren an Proben beschichteter Einfachscheiben zu bestimmen.
- Schließlich ist für den oben in Bild B.3 dargestellten Fall (beschichtete Grenzfläche zwischen der Zwischenschicht und der Glasscheibe 2)  $\tau_1 = \tau_{G1} \tau_{LAM}$  und  $\tau_2 = \tau_{G2}$  gegeben. Verfahren B.5.2 (d. h. die Gleichungen (B.24), (B.25) und (B.26)) müssen angewendet werden, um den Transmissionsgrad und die Reflexionsgrade der beschichteten inneren Grenzfläche zu bestimmen. Wenn die beschichtete Grenzfläche zwischen der Zwischenschicht und der Glasscheibe 1 vorhanden ist, gilt  $\tau_1 = \tau_{G1}$  und  $\tau_2 = \tau_{G2} \tau_{LAM}$ , und es muss dasselbe Verfahren angewendet werden.

Das Verfahren kann durch das folgende Zahlenbeispiel (auf Grundlage des Systems in Bild B.3) veranschaulicht werden:

Wenn für den Gesamttransmissionsgrad und den Gesamtreflexionsgrad folgende Werte gemessen wurden:

$$\tau_T = 0,269\ 229$$

$$\rho_T = 0,242\ 135$$

$$\rho'_T = 0,236\ 891$$

und für die Reintransmissionsgrade der Glasscheiben und der Zwischenschicht zuvor folgende Werte bestimmt wurden:

$$\tau_{G1} = 0,980\ 000$$

$$\tau_{LAM} = 0,959\ 184$$

$$\tau_{G2} = 0,830\ 000$$

dann sind:

$$\tau_1 = \tau_{G1} \tau_{LAM} = 0,940\ 000$$

$$\tau_2 = \tau_{G2} = 0,830\ 000,$$

und wenn für die Transmissionsgrade und Reflexionsgrade der äußeren Grenzflächen zuvor folgende Werte bestimmt wurden:

$$t_1 = 0,600\ 000, r_1 = 0,200\ 000 \text{ und } r'_1 = 0,150\ 000$$

$$t_3 = 0,660\ 000, r_3 = 0,120\ 000 \text{ und } r'_3 = 0,180\ 000,$$

dann sind der Transmissionsgrad und die Reflexionsgrade der beschichteten inneren Fläche:

$$t_2 = 0,850\ 000, r_2 = 0,070\ 000 \text{ und } r'_2 = 0,090\ 000$$

## B.6 Beispiele

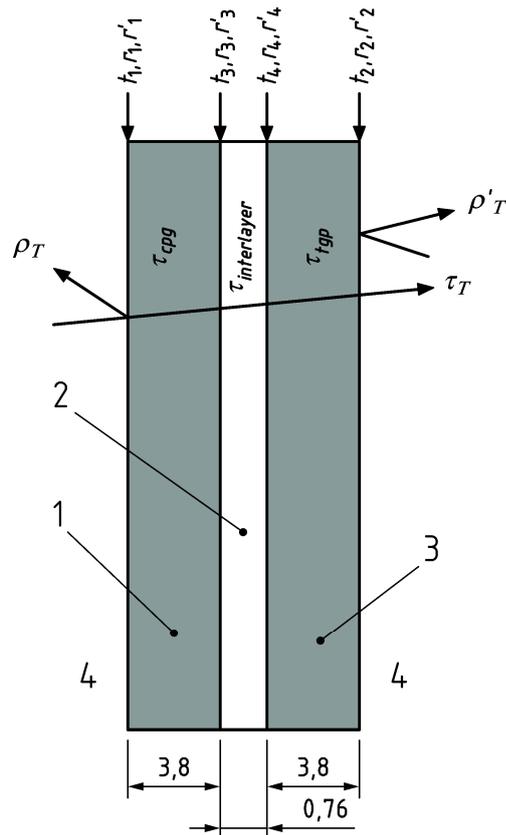
### B.6.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt werden zwei Beispiele angegeben, die zeigen, wie die oben angegebenen Gleichungen angewendet werden. Beispiel 1 (siehe B.6.2) beschreibt ein einzelnes Medium zwischen zwei Grenzflächen. Beispiel 2 (siehe B.6.3) beschreibt eine Zwischenschicht zwischen zwei unterschiedlichen Glasscheiben, deren sämtliche Oberflächen unbeschichtet sind. Es illustriert das in B.4 beschriebene Verfahren und die Anwendung von Gleichung (B.2), wenn der Reintransmissionsgrad für Glasdicken zu bestimmen ist, die eine andere Glasdicke haben als die ausgemessene Glasprobe.

Es könnte ein weiteres Beispiel angegeben werden, das den Fall darstellt, in dem der Reintransmissionsgrad einer Zwischenschicht mit einer Dicke zu bestimmen ist, die von der Dicke der Zwischenlage der ausgemessenen Probe abweicht. In diesem Fall gilt ebenfalls die Gleichung (B.2), und die Berechnungen wären äquivalent zu denen für Glasscheiben mit unterschiedlichen Dicken. Das zweite vorgestellte Beispiel beschreibt zwei Medien, die durch drei (3) Grenzflächen in Form einer Zwischenschicht zwischen zwei Glasscheiben getrennt sind, von denen eine Oberfläche zwischen der Zwischenschicht und einer der Glasscheiben beschichtet ist. Dieses Beispiel stellt das in B.5 beschriebene Verfahren dar und spricht speziell die Berechnungen für diese Art von Proben an.

### B.6.2 Beispiel 1 — Fall mit einfachem Verbundglas (unbeschichtet)

Es sind sämtliche Eigenschaften ( $\tau_T$ ,  $\rho_T$ ,  $\rho_T'$ ) einer Verbundglasprobe (als Probe A bezeichnet) zu bestimmen, die aus einer 0,76 mm dicken Zwischenschicht zwischen einer 3,8 mm dicken klaren Floatglasscheibe und einer 3,8 mm dicken getönten Floatglasscheibe besteht, wobei keine der Grenzflächen der Glasscheiben beschichtet ist. Es wird davon ausgegangen, dass eine derartige Probe gar nicht existiert, dass jedoch ihre sämtlichen Eigenschaften zu bestimmen sind. Bild B.4 stellt diese Probe dar, kombiniert mit den Kenngrößen, die zur Bestimmung aller Eigenschaften notwendig sind.



### Legende

- 1 klare Glasscheibe (3,8 mm) (en: cgp – clear glass pane)
- 2 Zwischenschicht (0,76 mm) (en: interlayer)
- 3 getönte Glasscheibe (3,8 mm) (en: tgp – tinted glass pane)
- 4 Luft

**Bild B.4 — Nicht existierende Probe A, deren Eigenschaften zu bestimmen sind**

Dabei ist

- $t_i, r_i, r_i'$  der Grenzflächentransmissionsgrad und die Grenzflächenreflexionsgrade der angezeigten Grenzfläche;
- $\tau_{\text{klare Scheibe (en: } \tau_{cgp})}$  der Reintransmissionsgrad der klaren Glasscheibe;
- $\tau_{\text{getönte Scheibe (en: } \tau_{tgp})}$  der Reintransmissionsgrad der getönten Glasscheibe;
- $\tau_{\text{Zwischenschicht (} \tau_{interlayer})}$  der Reintransmissionsgrad der Zwischenschicht.

Mehrere Kenngrößen können eliminiert werden, indem die folgenden Grenzflächen-Eigenschaften betrachtet werden:

- 1) Die Grenzflächen Luft/Glas sind unbeschichtet. Gleichung (B.4) kann für diesen Fall wie folgt angepasst werden:

$$r_1 = 1,000\ 000 - t_1 \text{ und } r_1' = r_1$$

$$r_2 = 1,000\ 000 - t_2 \text{ und } r_2' = r_2$$

- 2) Die Brechzahlen der beiden Glasscheiben und der Zwischenschicht sind äquivalent. Das bedeutet, dass diese Grenzflächen ignoriert werden können oder:

$$t_3 = 1,000\ 000 - r_3 \text{ und } r_3 = r_3' = 0,000\ 00$$

$$t_4 = 1,000\ 000 \text{ und } r_4 = r_4' = 0,000\ 000$$

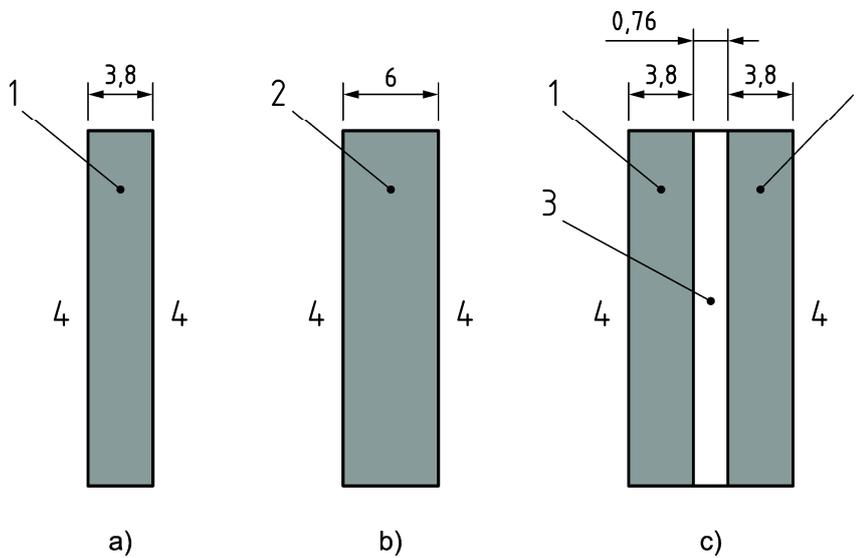
Unter Beachtung der Tatsache, dass die Grenzflächen 3 und 4 ignoriert werden können, kann die Probe als ein System aus zwei Grenzflächen angesehen werden, die durch ein Medium getrennt sind (siehe Bild B.1). Mit Hilfe der Gleichung (B.3) kann der Gesamteintransmissionsgrad folgendermaßen angegeben werden:

$$\tau_{\text{System}} = \tau_{\text{klare Scheibe}} \tau_{\text{Zwischenschicht}} \tau_{\text{getönte Scheibe}}$$

Dabei ist  $\tau_{\text{System}}$  der Reintransmissionsgrad der gesamten Probe A.

Für ein System, das aus zwei durch ein Medium voneinander getrennten Grenzflächen besteht, können die Gleichungen (B.5), (B.6) und (B.7) angewendet werden, um nach Ermittlung der unbekanntenen Kenngrößen ( $\tau_1, \tau_2, \tau_{\text{klare Scheibe}}, \tau_{\text{Zwischenschicht}}$  und  $\tau_{\text{getönte Scheibe}}$ ) sämtliche lichttechnischen Eigenschaften zu berechnen.

Anstelle der fiktiven Probe A existieren jedoch die Proben 1, 2 und 3, die im Bild B.5 beschrieben werden.



**Legende**

- 1 klare Glasscheibe (3,8 mm)
- 2 getönte Glasscheibe (6,0 mm)
- 3 gleiche Zwischenschicht (0,76 mm)
- 4 Luft

**Bild B.5 — Aufbau der Proben 1, 2 und 3**

Für diese Proben werden die gemessenen Werte für die Gesamttransmissionsgrade und Gesamtreflexionsgrade, die zu bestimmenden unbekanntenen Kenngrößen und die relevanten Gleichungen in Tabelle B.1 angegeben. Es ist zu beachten, dass die Reflexion von nur einer Seite angegeben ist, da alle Proben unbeschichtet und symmetrisch sind.

Tabelle B.1 — Beschreibung der Proben 1, 2 und 3

[41] Probe	[42] Zu bestimmende unbekannte Kenngrößen	[43] Anzuwendende Gleichungen	[44] Gemessene Werte für den Transmissionsgrad und den Reflexionsgrad	
			[45] Transmissionsgrad ( $\tau_T$ )	[46] Reflexionsgrad [47] ( $\rho_T$ )
[48] 1	[49] $\tau_{\text{klare Scheibe}}, r_1$	[50] (B.8) und (B.9)	[51] 0,895 300	[52] 0,074 738
[53] 2	[54] $\tau_{\text{getönte Scheibe}}, r_2$	[55] (B.8), (B.9) und (B.2)	[56] 0,719 548	[57] 0,062 450
[58] 3	[59] $\tau_{\text{Zwischenschicht}}$	[60] (B.20)	[61] 0,824 831	[62] Nicht notwendig

Unter Anwendung der entsprechenden Gleichungen können mit den gemessenen Werten die unbekanntes Kenngrößen wie nachfolgend gezeigt bestimmt werden:

— Probe 1

Unter Anwendung der Gleichungen (B.8) und (B.9) ergibt sich das folgende Ergebnis:

$$\tau_{\text{klare Scheibe}} = 0,9700\ 00 \text{ und } r_1 = 0,040\ 000$$

— Probe 2

Unter Anwendung der Gleichungen (B.8) und (B.9) ergibt sich das folgende Ergebnis:

$$\tau_{\text{getönte Scheibe (6 mm)}} = 0,780\ 000 \text{ und } r_2 = 0,040\ 000$$

Gleichung (B.2) kann angewendet werden, um den Reintransmissionsgrad einer 3,8 mm dicken getönten Glasscheibe aus dem Reintransmissionsgrad der 6 mm dicken getönten Glasscheibe zu bestimmen, und daraus folgt:

$$\tau_{\text{getönte Scheibe (3,8 mm)}} = 0,854\ 397$$

— Probe 3

Das in B.4.2.3 beschriebene Verfahren kann zur Bestimmung des Reintransmissionsgrads der Zwischenschicht angewendet werden. Die Reflexionsgrade und Transmissionsgrade der äußeren Grenzfläche und der Reintransmissionsgrad der Probe aus der klaren Glasscheibe wurden an Probe 1 bestimmt. Deshalb kann Gleichung (B.20) zur Bestimmung des Reintransmissionsgrads der Probe 3 angewendet werden, und daraus folgt:

$$\tau_{\text{Probe 3}} = 0,893\ 855 \text{ (es ist zu beachten, dass } \tau_{\text{Probe 3}} \text{ in Gleichung (B.20) gleich } \tau_1 \text{ ist).}$$

Unter Beachtung der Tatsache, dass gilt:  $\tau_{\text{Probe 3}} = \tau_{\text{klare Scheibe}} \tau_{\text{Zwischenschicht}} \tau_{\text{klare Scheibe}}$ , kann schließlich der Reintransmissionsgrad der Zwischenschicht folgendermaßen bestimmt werden:

$$\tau_{\text{Zwischenschicht}} = 0,950\ 000$$

Damit wurden alle Kenngrößen ermittelt, die zur Bestimmung sämtlicher lichttechnischer Eigenschaften der gar nicht existierenden Probe A notwendig sind.

Zusammenfassender Überblick über die bestimmten Kenngrößen:

$$r_1 = r_1' = 0,040\ 000 \text{ und } t_1 = 1,000\ 000 - r_1 = 0,960\ 000$$

$$r_2 = r_2' = 0,040\ 000 \text{ und } t_2 = 1,000\ 000 - r_2 = 0,960\ 000$$

$$\tau_{\text{getönte Scheibe}} = 0,970\ 000$$

$$\tau_{\text{getönte Scheibe}} = 0,854\ 397$$

$$\tau_{\text{Zwischenschicht}} = 0,950\ 000$$

Daraus folgt für den Gesamteintransmissionsgrad der nicht existierenden Probe A:

$$\tau_{\text{System}} = \tau_{\text{klare Scheibe}} \tau_{\text{Zwischenschicht}} \tau_{\text{getönte Scheibe}} = 0,970\ 000 \times 0,950\ 000 \times 0,854\ 397 = 0,787\ 327$$

Aus den Gleichungen (B.5), (B.6) und (B.7) wird folglich:

$$\tau_T = \frac{t_1 \tau_{\text{system}} t_2}{1 - r_1 \tau_{\text{system}}^2 r_2} = \frac{0,960\ 000 \times 0,787\ 327 \times 0,960\ 000}{1 - 0,040\ 000 \times 0,787\ 327^2 \times 0,040\ 000} = 0,726\ 321$$

$$\rho_T = r_1 + \frac{t_1^2 \tau_{\text{system}}^2 r_2}{1 - r_1 \tau_{\text{system}}^2 r_2} = 0,040\ 000 + \frac{0,960\ 000^2 \times 0,787\ 327^2 \times 0,040\ 000}{1 - 0,040\ 000 \times 0,787\ 327^2 \times 0,040\ 000} = 0,062\ 874$$

$$\rho_T' = r_2 + \frac{r_1 \tau_{\text{system}}^2 t_2^2}{1 - r_1 \tau_{\text{system}}^2 r_2} = 0,062\ 874$$

Es ist zu beachten, dass  $\tau_{\text{System}}$  in den Gleichungen (B.5), (B.6), (B.7) gleich  $\tau_1$  ist.

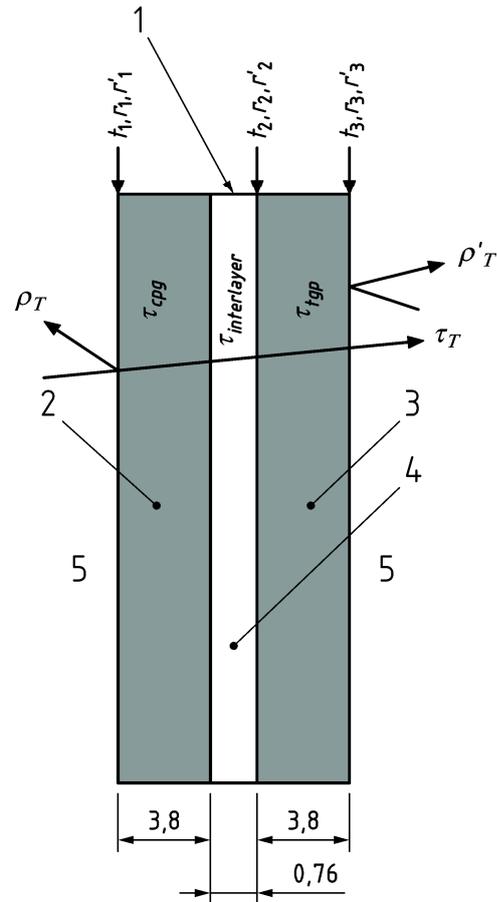
Damit ergeben sich für die nicht existierende Probe A:

$$\tau_T = 0,726\ 321$$

$$\rho_T = \rho_T' = 0,062\ 874$$

### B.6.3 Beispiel 2 — Fall eines Verbundglases mit einer absorbierenden Beschichtung zwischen der Zwischenschicht und der zweiten Glasscheibe mit unbeschichteten äußeren Oberflächen

In diesem Beispiel kann dasselbe System wie bei Beispiel 1 angewendet werden, wobei hier jedoch eine absorbierende Beschichtung zwischen der Zwischenschicht und der getönten Glasscheibe vorhanden ist, d. h. das System besteht aus einer 3,8 mm dicken, klaren Floatglasscheibe, einer 0,76 mm dicken Zwischenschicht, einer absorbierenden Beschichtung und abschließend einer 3,8 mm dicken getönten Glasscheibe. Auch hier wird wieder davon ausgegangen, dass diese Probe physikalisch nicht existiert, ihre sämtlichen lichttechnischen Eigenschaften jedoch benötigt werden. Diese Probe kann als Probe B (siehe Bild B.6) bezeichnet werden. Es ist zu beachten, dass alle Kenngrößen mit Ausnahme von  $t_2$ ,  $r_2$  und  $r_2'$  zuvor unter Verwendung der Proben 1, 2, und 3 bestimmt wurden.

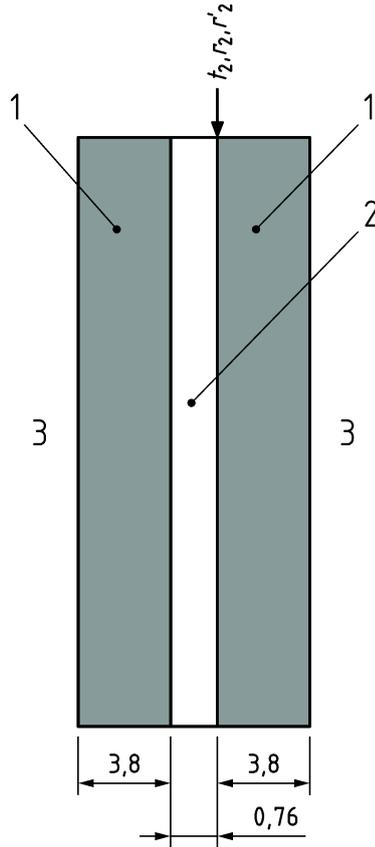


**Legende**

- 1 beschichtete Grenzfläche
- 2 klare Glasscheibe (3,8 mm)
- 3 getönte Glasscheibe (3,8 mm)
- 4 Zwischenschicht (0,76 mm)
- 5 Luft

**Bild B.6 — Nicht existierende Probe B, deren Eigenschaften zu bestimmen sind**

Zur Bestimmung von  $t_2$ ,  $r_2$  und  $r'_2$  wird die physikalisch existierende Probe 4 verwendet, die für die absorbierende Schicht (Grenzfläche 2) die gleichen Eigenschaften hat wie die Probe B. Sie wird in Bild B.7 beschrieben.



**Legende**

- 1 klare Glasscheibe (3,8 mm)
- 2 Zwischenschicht (0,76 mm)
- 3 Luft

**Bild B.7 — Beschreibung der Probe 4**

Aus demselben Grund wie bei Probe A kann die Grenzfläche zwischen der Zwischenschicht und der ersten Glasscheibe ignoriert werden, indem so vorgegangen wird, dass sowohl Probe B als auch Probe 4 für den Fall von 2 Medien zwischen 3 Grenzflächen stehen, wie in B.5 beschrieben und in B.5.3 ausführlich dargestellt.

Für Probe 4 werden die gemessenen Werte für die Gesamttransmissionsgrade und Gesamtreflexionsgrade, die zu bestimmenden unbekanntenen Kenngrößen und die relevanten Gleichungen in Tabelle B.2 angegeben.

**Tabelle B.2 — Beschreibung der Probe 4**

[73] Probe	[74] Zu bestimmende unbekannte Kenngrößen	[75] Anzuwendende Gleichungen	[76] Gemessene Werte für Transmissions- und Reflexionsgrade		
			[77] Transmissionsgrad ( $\tau_T$ )	[78] Reflexionsgrad an der Vorderseite [79] ( $\rho_T$ )	[80] Reflexionsgrad an der Hinterseite [81] ( $\rho'_T$ )
[82] 4	[83] $t_2, r_2,$ und $r'_2$	[84] (B.24), (B.25) und (B.26)	[85] 0,649 055	[86] 0,168 273	[87] 0,162 711

Unter Anwendung der Gleichungen (B.24), (B.25) und (B.26) können ermittelt werden:

$$t_2 = 0,780\ 000$$

$$r_2 = 0,140\ 000$$

$$r'_2 = 0,120\ 000$$

Es ist zu beachten, dass die Ausdrücke  $\tau_1$  und  $\tau_2$  durch  $\tau_{\text{klare Scheibe}} \times \tau_{\text{Zwischenschicht}}$  bzw.  $\tau_{\text{klare Scheibe}}$  ersetzt werden. Die äußere Grenzfläche 3 der Probe 4 ist der äußeren Grenzfläche 2 der Probe A äquivalent.

Damit sind die folgenden Kenngrößen bekannt:

$$r_1 = r'_1 = 0,400\ 00 \text{ und } t_1 = 1,000\ 000 - r_1 = 0,960\ 000$$

$$r_2 = 0,140\ 000, r'_2 = 0,120\ 000 \text{ und } t_2 = 0,780\ 000$$

$$r_3 = r'_3 = 0,040\ 000 \text{ und } t_3 = 1,000\ 000 - r_3 = 0,960\ 000$$

$$\tau_{\text{getönte Scheibe}} = 0,970\ 000$$

$$\tau_{\text{getönte Scheibe}} = 0,854\ 397$$

$$\tau_{\text{Zwischenschicht}} = 0,950\ 000$$

Sämtliche Eigenschaften der Probe B können mit Hilfe der Gleichungen (B.21), (B.22) und (B.23) bestimmt werden. Es ist zu beachten, dass die Ausdrücke  $\tau_1$  und  $\tau_2$  durch  $\tau_{\text{klare Scheibe}} \times \tau_{\text{Zwischenschicht}}$  bzw.  $\tau_{\text{getönte Scheibe}}$  ersetzt werden, und daraus folgt:

$$\tau_T = 0,571\ 020$$

$$\rho_T = 0,164\ 180$$

$$\rho'_T = 0,135\ 092$$

## **Anhang C** (informativ)

### **Verfahren zur Berechnung der spektralen Kenngrößen von Siebdruckglas**

Dieser Anhang enthält eine allgemeine Richtlinie zur Berechnung der spektralen Eigenschaften von Siebdruckglas, d. h. Glas, auf dessen Oberfläche keramische Siebdruckmotive aufgebracht werden.

**ANMERKUNG** In einigen Ländern darf Siebdruckglas auch als Emailleglas oder Schmelzglas bezeichnet werden.

Die Größe der Fläche, die durch diese Oberflächenbehandlung abgedeckt wird, ist als Anteil des gesamten Oberflächenbereichs zu berechnen, indem geeignete geometrische Merkmale der besonders behandelten Oberflächen (z. B. Linien, Punkte, Maschenstrukturen usw.) ausgemessen werden. Gesonderte spektrale Messungen werden auf Glasflächen mit und ohne Oberflächenbehandlung durchgeführt. Abschließend werden die spektralen Kenngrößen bestimmt, indem eine Gewichtung des Mittelwerts auf der Grundlage der durch die spezielle Behandlung abgedeckten Oberfläche durchgeführt wird.

Für Oberflächenausführungen mit komplizierten geometrischen Gestaltungen kann der Anteil der durch die Oberflächenbehandlung abgedeckten Oberflächenbereich möglicherweise bestimmt werden, indem zur Auszählung der Anzahl schwarzer und weißer Pixel in einer Schwarz-Weiß-Photographie des Glases geeignete Computersoftware verwendet wird.

## Anhang D (informativ)

### Beispiel für die Berechnung des Farbwiedergabeindex

Beispiel für die Berechnung des Farbwiedergabeindex von Tageslicht für die Normlichtart D65, das durch ein typisches absorbierendes Glas hindurch tritt.

Schritt 1: Die trichromatischen Werte für Normlichtart D65, das durch die Probe fällt, sind zu berechnen.

Ein Beispiel der spektralen Transmissionsgrad-Daten für typisches grünes, absorbierendes ist in Tabelle D.1 angegeben.

Die berechneten Anteile erhält man nach den Gleichungen (26), (27), (28), (32), (33), (38) und (39):

$$X_t \quad 766,143$$

$$Y_t \quad 814,400$$

$$Z_t \quad 811,715$$

-----

$$u_t \quad 0,199$$

$$v_t \quad 0,317$$

-----

$$c_t \quad 1,993$$

$$d_t \quad 2,054$$

Tabelle D.1 — Spektraler Transmissionsgrad für typisches grünes absorbierendes Glas im Bereich von 380 nm bis 780 nm

$\lambda$ nm	Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$
380	0,592
390	0,652
400	0,678
410	0,683
420	0,684
430	0,687
440	0,690
450	0,699
460	0,709
470	0,717
480	0,726
490	0,735
500	0,744
510	0,752
520	0,760
530	0,766
540	0,773
550	0,779
560	0,782
570	0,784
580	0,784
590	0,784
600	0,783
610	0,779
620	0,776
630	0,771
640	0,766
650	0,761
660	0,755
670	0,749
680	0,743
690	0,734
700	0,726
710	0,717
720	0,707
730	0,698
740	0,686
750	0,676
760	0,665
770	0,654
780	0,642

Schritt 2: Für jede der acht Testfarben sind die folgenden Werte nacheinander nach der Gleichung in 4.6 zu berechnen.

Die berechneten Werte sind in Tabelle D.2 wiedergegeben.

Tabelle D.2 — Berechnete Anteile

Komponente	Nummer der Testfarbe							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$X_{t,i}$	267,531	224,130	195,584	165,682	200,141	223,849	265,824	302,177
$Y_{t,i}$	243,155	236,285	249,106	239,959	250,449	241,346	238,572	255,081
$Z_{t,i}$	182,875	111,807	74,613	159,929	301,437	430,649	394,758	337,279
$u_{t,i}$	0,240	0,218	0,188	0,156	0,165	0,174	0,211	0,235
$v_{t,i}$	0,327	0,345	0,360	0,339	0,309	0,282	0,285	0,298
$c_{t,i}$	1,504	0,946	0,599	1,333	2,407	3,569	3,309	2,645
$d_{t,i}$	1,858	1,941	2,056	2,217	2,226	2,225	2,027	1,895
$u'_{t,i}$	0,238	0,217	0,186	0,155	0,164	0,175	0,211	0,234
$v'_{t,i}$	0,323	0,343	0,358	0,336	0,304	0,275	0,278	0,292
$W^*_{t,i}$	60,557	59,820	61,185	60,216	61,325	60,364	60,067	61,805
$U^*_{t,i}$	31,813	14,725	-9,162	-33,531	-26,607	-18,101	10,321	29,149
$V^*_{t,i}$	8,554	23,845	36,379	18,325	-6,805	-29,044	-26,508	-16,109
$-E_i$	0,196	0,510	0,834	0,398	0,343	0,757	0,556	0,392
$R_i$	99,100	97,653	96,166	98,169	98,422	96,519	97,443	98,195
ANMERKUNG Einige kleine Unstimmigkeiten bei den für die oben angegebenen Ausdrücke berechneten Werten können durch die Anzahl der für die Berechnung benutzten Dezimalstellen entstehen. Jedoch ist der Einfluss auf das Endergebnis vernachlässigbar.								

Der allgemeine Farbwiedergabeindex  $R_a$  ist gegeben durch:

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i = 97,708, \text{ gerundet auf } 98.$$

## Literaturhinweise

- [1] Equivalent models for the prediction of angular glazing properties — M. Rubin, E. Nichelatti and P. Polato
- [2] Measurement and prediction of angle-dependent optical properties of coated glass products: results of an inter-laboratory comparison of spectral transmittance and reflectance — M.G. Hutchins u. a.
- [3] Report on the activities of the ADOPT and ALTSET European projects — A. Maccari and P. Polato
- [4] Publication CIE No. 38 (TC-2.3), Radiometric and photometric characteristics of materials and their measurement (1977)
- [5] Publication CIE No. 15, Colorimetry, 3rd ed (2004)
- [6] Publication CIE No. 85, Solar spectral irradiance, technical report (1989)
- [7] P. Bener, Approximate values of intensity of natural UV radiation for different amounts of atmospheric ozone, Final Technical Report 1972, Contract No. DAJA 37-68 C-1077
- [8] Publication CIE No. 13.3, Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources (1995)
- [9] M. Rubin, Optical properties of soda lime silica glasses, Solar Energy Materials 12 (1985) pp. 275-288