

VEREIN  
DEUTSCHER  
INGENIEURE

Berechnung des instationären thermischen  
Verhaltens von Räumen und Gebäuden  
Modell der solaren Einstrahlung  
Calculation of transient thermal response  
of rooms and buildings  
Modelling of solar radiation

VDI 6007  
Blatt 3 / Part 3

Ausg. deutsch/englisch  
Issue German/English

Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.

The German version of this standard shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.



Inhalt	Seite
Vorbemerkung .....	2
Einleitung .....	2
<b>1 Anwendungsbereich .....</b>	<b>4</b>
<b>2 Normative Verweise .....</b>	<b>4</b>
<b>3 Begriffe .....</b>	<b>5</b>
<b>4 Abkürzungen .....</b>	<b>5</b>
<b>5 Grundlagen und Definitionen .....</b>	<b>5</b>
<b>6 Kurzwellige Einstrahlung auf eine horizontale Fläche .....</b>	<b>8</b>
6.1 Direkte Einstrahlung auf horizontale Fläche .....	8
6.2 Diffuse Einstrahlung auf horizontale Fläche .....	9
<b>7 Kurzwellige Einstrahlung auf eine beliebig orientierte und beliebig geneigte Fläche .....</b>	<b>11</b>
7.1 Direkte Einstrahlung auf die beliebig orientierte und beliebig geneigte Fläche .....	12
7.2 Diffuse Einstrahlung auf die beliebig orientierte und beliebig geneigte Fläche .....	13
7.3 Bodenreflexion auf die beliebig orientierte und beliebig geneigte Fläche .....	15
7.4 Berücksichtigung einer Horizontüberhöhung bei der diffusen Einstrahlung .....	15
<b>8 Ermittlung der kurzwelligen Strahlung durch beliebig orientierte und beliebig geneigte transparente Flächen (einschließlich Sonnenschutz) .....</b>	<b>16</b>
8.1 Korrekturwerte $kor_g$ und $kor_{\tau_e}$ bei nicht senkrechtem und nicht parallelem Strahlungseinfall .....	18
8.2 Rückwirkung eines außen liegenden Sonnenschutzes auf $kor_g$ und $kor_{\tau_e}$ .....	22

Contents	Page
Preliminary note .....	2
Introduction .....	2
<b>1 Scope .....</b>	<b>4</b>
<b>2 Normative references .....</b>	<b>4</b>
<b>3 Terms and definitions .....</b>	<b>5</b>
<b>4 Abbreviations .....</b>	<b>5</b>
<b>5 Basic principles and definitions .....</b>	<b>5</b>
<b>6 Short-wave irradiation on a horizontal surface area .....</b>	<b>8</b>
6.1 Direct irradiation onto horizontal surface area .....	8
6.2 Diffuse irradiation onto horizontal surface area .....	9
<b>7 Short-wave irradiation on a surface area with any orientation and inclination .....</b>	<b>11</b>
7.1 Direct irradiation onto the surface area with any orientation and inclination .....	12
7.2 Diffuse irradiation onto the surface area with any orientation and inclination .....	13
7.3 Ground reflexion onto the surface area with any orientation and inclination .....	15
7.4 Consideration of horizon vertical exaggeration for diffuse irradiation .....	15
<b>8 Determination of the short-wave radiation due to transparent surface areas with any orientation and inclination (including solar protection) .....</b>	<b>16</b>
8.1 Correction values $kor_g$ and $kor_{\tau_e}$ for non-vertical and non-parallel radiation incidence .....	18
8.2 Repercussion of external solar protection on $kor_g$ and $kor_{\tau_e}$ .....	22

VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG)  
Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung

VDI-Handbuch Wärme-/Heiztechnik  
VDI-Handbuch Elektrotechnik und Gebäudeautomation  
VDI-Handbuch Raumluftechnik

Vervielfältigung – auch für innerbetriebliche Zwecke – nicht gestattet / Reproduction – even for internal use – not permitted

	Seite
<b>9 Zusätzlicher Wärmeeintrag bei Fensterlüftung und gleichzeitig geschlossenem außen liegendem Sonnenschutz</b> .....	23
<b>10 Berechnung der langwelligen Ein- und Ausstrahlung während der Cooling Design Period (CDP)</b> .....	24
<b>11 Ermittlung der Grenzwerte der Einstrahlung für das Ein- und Ausschalten der Beleuchtung</b> .....	25
11.1 Natürliche Beleuchtung .....	26
11.2 Tageslichtberechnung nach DIN 5034 .....	26
11.3 Tageslichtsimulation .....	26
11.4 Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Ein- und Ausschalzeitpunkte der Beleuchtung .....	27
<b>12 Sonneneinstrahlung und Beschattung</b> .....	31
12.1 Eigenbeschattung durch Vorsprünge bei direkter Strahlung .....	31
12.2 Fremdbeschattung durch Horizontüberhöhung und/oder Verbauung bei direkter Strahlung .....	33
12.3 Horizontüberhöhung und Beschattung bei diffuser Strahlung .....	35
<b>13 Validierung</b> .....	36
Schrifttum .....	36

	Page
<b>9 Additional heat input in the event of window ventilation and simultaneously closed external solar protection</b> .....	23
<b>10 Calculation of the long-wave irradiation and radiation during the cooling design period (CDP)</b> .....	24
<b>11 Determination of the thresholds for irradiation regarding activation and deactivation of the illumination</b> .....	25
11.1 Natural illumination .....	26
11.2 Daylight calculation according to DIN 5034 .....	26
11.3 Daylight simulation .....	26
11.4 Calculation procedures for determining the activation and deactivation times of the illumination .....	27
<b>12 Solar irradiation and shadowing</b> .....	31
12.1 Self-shadowing due to projections for direct radiation .....	31
12.2 Third party shadowing due to horizon vertical exaggeration and/or obstruction for direct radiation .....	33
12.3 Horizon vertical exaggeration and shadowing for diffuse radiation .....	35
<b>13 Validation</b> .....	36
Bibliography .....	36

## Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen ([www.vdi.de/richtlinien](http://www.vdi.de/richtlinien)), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Eine Liste der aktuell verfügbaren Blätter dieser Richtlinienreihe ist im Internet abrufbar unter [www.vdi.de/6007](http://www.vdi.de/6007).

## Einleitung

Diese Richtlinie dient als weiterer Baustein in der Neuordnung der Rechenverfahren zur Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden. Zweck dieser Neuordnung ist die Trennung der Richtlinien entsprechend ihrem Aufgabenbereich. So enthalten die neuen

## Preliminary note

The content of this standard has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the standard VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this standard without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions specified in the VDI Notices ([www.vdi.de/richtlinien](http://www.vdi.de/richtlinien)).

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this standard.

A catalogue of all available parts of this series of standards can be accessed on the internet at [www.vdi.de/6007](http://www.vdi.de/6007).

## Introduction

This standard serves as a further component in the reorganisation of the calculation procedures regarding the calculation of transient thermal response of rooms and buildings. The purpose of this reorganisation is to separate the standards in accordance with their field of functions. This way, the new

Kühllastregeln VDI 2078 die Definitionen und Festlegungen der Parameter und Randbedingungen, unter denen die Kühllast zu bestimmen ist. Die Verfahren für die thermisch energetische Berechnung (Rechenmodelle) sind getrennt nach ihrer Aufgabenstellung in VDI 6007 eingeordnet.

VDI 6007 Blatt 1 enthält das Raummodell als Rechenkern, Blatt 2 das Fenstermodell und Blatt 3 das Modell für die solare Einstrahlung.

Diese Zentralisierung der Rechenverfahren in VDI 6007 hat den Vorteil, dass andere Richtlinien auf diese Verfahren verweisen und mehrfache Bearbeitungen vermieden werden. So wird z.B. in VDI 2067 auf die VDI 6007 verwiesen. Abgesehen von einer besseren Übersichtlichkeit wird auch noch eine Vereinheitlichung der wichtigsten Rechenverfahren erreicht.

Die in VDI 6020:2001 enthaltene Berechnung der solaren Einstrahlung und der Tageslichtsimulation waren speziell auf die Anforderungen einer Ganzjahressimulation auf der Basis der Testreferenzjahre (TRY) aufgebaut. Aufgabe war es, die Umrechnung der Strahlungsdaten aus dem TRY und das Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Ein- und Ausschaltzeitpunkte der Beleuchtung zu vereinheitlichen.

Die vorliegende Richtlinie erweitert diese Aufgabenstellung erheblich:

- kurzwellige Einstrahlung auf eine horizontale Fläche
- kurzwellige Einstrahlung auf eine beliebig orientierte und beliebig geneigte Fläche
- Ermittlung der kurzwelligen Strahlung durch beliebig orientierte und beliebig geneigte transparente Flächen (einschließlich Sonnenschutz)
- zusätzlicher Wärmeeintrag bei Fensterlüftung und gleichzeitig geschlossenem außen liegendem Sonnenschutz
- Berechnung der langwelligen Ein- und Ausstrahlung während der CDP (Cooling Design Period)
- Ermittlung der Grenzwerte der Einstrahlung für das Ein- und Ausschalten der Beleuchtung
- Sonneneinstrahlung und Beschattung

Damit sind alle relevanten Berechnungen für die solare Einstrahlung an einer Stelle definiert. Völlig neu ist die Definition der Strahlungsbedingungen am CDD (Cooling Design Day) und in der CDP.

VDI 6007 Blatt 3 stellt einen großen Fortschritt bei der Berechnung des diffusen Anteils der Sonneneinstrahlung dar.

Das Maximum nach VDI 2078:1996 lag bei  $160 \text{ W/m}^2$  auf eine horizontale Fläche bei einem

cooling load rules VDI 2078 include the definitions and specifications of the parameters and boundary conditions to be used to determine the cooling load. The procedures for thermal-energetic calculation (calculation models) are classified within VDI 6007 separated in accordance with their field of functions.

VDI 6007 Part 1 comprises the room model as main focus of the calculation, Part 2 the window model, and Part 3 the model for solar irradiation.

This centralisation of the calculation procedures in VDI 6007 provides for the advantage that other standards refer to these procedures and multiple processing is avoided. This way, VDI 2067 contains reference to VDI 6007, e.g. Apart from a better clarity, a standardisation of the most important calculation procedures can be achieved.

The calculation of the solar irradiation and the daylight simulation contained in VDI 6020:2001 were build specifically upon the requirements of an all-year simulation on the basis of the test reference years (TRY). The assignment was to standardise the conversion of the radiation data from the TRY and the calculation procedure for the determination of the times the illumination must be switched on and off.

The present standard significantly expands this assignment:

- short-wave irradiation on a horizontal surface area
- short-wave irradiation on a surface area with any orientation and inclination
- determination of the short-wave radiation through transparent surface areas with any orientation and inclination (including solar protection)
- additional heat input in the event of window ventilation and simultaneously closed external solar protection
- calculation of the long-wave irradiation and radiation during CDP (cooling design period)
- determination of the thresholds for irradiation regarding activation and deactivation of the illumination
- solar irradiation and shadowing

This way, all relevant calculations for solar irradiation onto a location are defined. The definition of the radiation conditions on the CDD (cooling design day) and in the CDP is completely new.

VDI 6007 Part 3 constitutes a huge progress regarding the calculation of the diffuse share of solar irradiation.

The maximum according to VDI 2078:1996 was  $160 \text{ W/m}^2$  on a horizontal surface area at a turbidi-

Trübungsfaktor von 6,1 im Juli. Sowohl in den derzeit gültigen TRY nach DIN 4710 als auch in den alten TRY konnte man an vielen Stunden wesentlich höhere Werte finden. Diese höheren Werte der Diffusstrahlung sind nicht nur vom Trübungsfaktor, sondern auch von der Bewölkung abhängig. Die durch den Kulisseneffekt leichter Wolken reflektierte Direktstrahlung führt z.B. zu einer erheblichen Erhöhung der Diffusstrahlung an einer der Sonne abgewandten Fassade.

In dieser Richtlinie wurde deshalb ein Verfahren für die Berechnung der langwelligen Ein- und Ausstrahlung während der CDP angegeben. Das Verfahren wurde so konzipiert, dass die Datenstruktur mit der der TRY übereinstimmt, sodass mit den gleichen Algorithmen TRY und CDP berechnet werden können.

## 1 Anwendungsbereich

Die in dieser Richtlinie definierten Rechenverfahren dienen als Bausteine für Rechenverfahren zur Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden und sind Teil des Raummodells der Richtlinie VDI 6007 Blatt 1.

Im Gegensatz zu den übrigen Verfahren ist die Berechnung der langwelligen Ein- und Ausstrahlung während der CDP auf den Einsatz im Sinne der VDI 2078 zur Berechnung von Kühllast bzw. von Raumtemperaturen beschränkt. Sie hat aber ebenfalls Gültigkeit für eine HDP (heating design period) bei instationärer Heizlastberechnung.

ty factor of 6,1 in July. Both in the currently applicable TRY according to DIN 4710 and in the old TRY, significantly higher values could be found for many hours. These higher values of the diffuse radiation do not only depend on the turbidity factor, but also on the cloudiness. The direct radiation reflected by the set effect of minor clouds results in a significant increase of the diffuse radiation at a facade on the shadow side, e.g.

Thus, a procedure for calculating the long-wave irradiation and radiation during the CDP was specified within the framework of this standard. The procedure was designed in a way that the data structure corresponds to the data structure of TRY so that the same algorithms TRY and CDP can be used for calculation purposes.

## 1 Scope

The calculation procedures defined within this standard serve as components for calculation procedures for the calculation of the transient thermal response of rooms and buildings, and are parts of the room model of standard VDI 6007 Part 1.

As opposed to the other procedures, the calculation of the long-wave irradiation and radiation during the CDP is limited to the use within the meaning of VDI 2078 regarding the calculation of cooling load or room temperatures. However, it is also applicable to an HDP (heating design period) in the event of transient heating load calculation.

## 2 Normative Verweise / Normative references

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieser Richtlinie erforderlich: /

The following referenced documents are indispensable for the application of this standard:

DIN 5034-2:1985-02 Tageslicht in Innenräumen; Grundlagen (Daylight in interiors; Principles)

DIN 5034-3:2007-02 Tageslicht in Innenräumen; Teil 3: Berechnung (Daylight in interiors; Part 3: Calculation)

DIN EN 410:2011-04 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)

VDI 3789 Blatt 3:2001-10 Umweltmeteorologie; Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen; Berechnung der spektralen Bestrahlungsstärken im solaren Wellenlängenbereich (Environmental meteorology; Interactions between atmosphere and surfaces; Calculation of spectral irradiances in the solar wavelength range)

VDI 6007 Blatt 2:2012-03 Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden; Fenstermodell (Calculation of transient thermal response of rooms and buildings; Modelling of windows)

VDI 6020 Anforderungen an thermisch-energetische Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation (Requirements on methods of calculation to thermal and energy simulation of buildings and plants)

### 3 Begriffe

Für die Anwendung dieser Richtlinie gelten die folgenden Begriffe:

**CDD** (Cooling Design Day)

Auslegungstag für die Berechnung der Kühllast mit vordefinierten Wetterdaten.

**CDP** (Cooling Design Period)

Auslegungsperiode für die Berechnung der Kühllast mit vordefinierten Wetterdaten.

**HDD** (Heating Design Day)

Auslegungstag für die Berechnung der Heizlast mit vordefinierten Wetterdaten.

**HDP** (Heating Design Period)

Auslegungsperiode für die Berechnung der Heizlast mit vordefinierten Wetterdaten.

### 4 Abkürzungen

#### Abkürzungen

In dieser Richtlinie wird die nachfolgend aufgeführte Abkürzung verwendet:

TRY Testreferenzjahr

### 5 Grundlagen und Definitionen

Die Sonneneinstrahlung wird durch den Sonnenstand bestimmt, der für den jeweiligen Ort durch

- Sonnenhöhe  $\gamma_s$  und
- Sonnenazimut  $\alpha_s$

in Abhängigkeit von Tages- und Jahreszeit beschrieben wird.

Die Berechnung des Sonnenstands erfolgt mit der wahren Ortszeit *WOZ* (wenn die Sonne im Meridian steht – also exakt im astronomischen Süden –, beträgt die wahre Ortszeit 12:00 Uhr – Meridiandurchgang).

Für eine konkrete *Uhrzeit* sind zunächst die Ortszeit *OZ* (Zeit einer Zeitzone) und die mittlere Ortszeit *MOZ* zu bestimmen. Unter Berücksichtigung der Sommerzeit *SOMZ* beträgt die Ortszeit *OZ* (Zeit einer Zeitzone, z.B. in Mitteleuropa die Mitteleuropäische Zeit *MEZ*):

$$OZ = \text{Uhrzeit} - \text{SOMZ} \quad (1)$$

Dabei ist

*SOMZ* Zeitverschiebung durch die Sommerzeit

Winterzeit:  $\text{SOMZ} = 0$

Sommerzeit:  $\text{SOMZ} = 1$

Der Zusammenhang zwischen mittlerer Ortszeit *MOZ* und Zeit einer Zeitzone *OZ* ist eine feste Zeitdifferenz, die durch den Unterschied zwischen dem Längengrad  $\lambda$  des betrachteten Orts zum zugehörigen Zeitzone Meridian bestimmt wird:

### 3 Terms and definitions

For the purposes of this standard, the following terms and definitions apply:

**CDD** (cooling design day)

Design day for the calculation of the cooling load with pre-defined weather data.

**CDP** (cooling design period)

Design period for the calculation of the cooling load with pre-defined weather data.

**HDD** (heating design day)

Design day for the calculation of the heating load with pre-defined weather data.

**HDP** (heating design period)

Design period for the calculation of the heating load with pre-defined weather data.

### 4 Abbreviations

#### Abbreviations

The following abbreviation is used throughout this standard:

TRY test reference year

### 5 Basic principles and definitions

The solar irradiation depends on the solar altitude that is described for each location by means of

- solar height  $\gamma_s$  and
- solar azimuth  $\alpha_s$

depending on the time of day and the time of year.

The calculation of the solar altitude is implemented with the local apparent time *WOZ* (when the sun is in the meridian – i.e. exactly in the astronomical south –, the local apparent time is 12:00 a.m. – meridian passage).

Regarding the concrete *time* the local time *OZ* (time of a time zone) and the local mean time *MOZ* must be determined initially. Taking into consideration the daylight saving time *SOMZ*, the local time *OZ* (time of a time zone, e.g. in Central Europe the Central European Time *MEZ*) is:

$$OZ = \text{time} - \text{SOMZ} \quad (1)$$

where

*SOMZ* time shifting due to daylight saving time

winter time:  $\text{SOMZ} = 0$

daylight saving time:  $\text{SOMZ} = 1$

The connection between local mean time *MOZ* and time of a time zone *OZ* is a fix time difference that is determined by the difference between the longitude  $\lambda$  of the treated location and the related time zone meridian:

$$MOZ = OZ - 4 \frac{\text{min}}{\text{Grad}} \cdot (15^\circ - \lambda) / \left( 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \right) \quad (2)$$

**Anmerkung:** Der Zeitonenmeridian für Mitteleuropa ist der 15. Längengrad. Obige Gleichung ist also für Mitteleuropa gültig, die Ortszeit  $OZ$  entspricht der Mitteleuropäischen Zeit  $MEZ$ .

**Hinweis zum einzusetzenden Längengrad  $\lambda$  für ein TRY:** Bei der Berechnung der CDP bzw. HDP ist der Längengrad  $\lambda$  und der Breitengrad  $\varphi$  des betrachteten Standorts anzusetzen. Bei Verwendung eines TRY ist dagegen der Längen- und Breitengrad des Referenzorts des TRY zu verwenden, da sich darauf die ausgewiesenen Einstrahlwerte im Zeitgang beziehen. Ansonsten würde die Umrechnung der Einstrahlwerte von der horizontalen Fläche auf beliebig orientierte und geneigte Flächen zu erheblichen Fehlern führen.

Die wahre Ortszeit  $WOZ$  beträgt:

$$WOZ = MOZ + Zgl/60 \quad (3)$$

Die Zeitgleichung  $Zgl$  berücksichtigt die Exzentrizität und Schiefe der Ekliptik der Erdbahn im Sonnenlauf. Zeitgleichung und Sonnendeklination  $\delta$  ändern sich während des Jahres. Mit  $J$  als Kalendertag des Jahres gilt für ein Jahr mit 365 Tagen:

$$J' = 360 \cdot \frac{J}{365} \quad \text{in Grad} \quad (4)$$

Zeitgleichung  $Zgl(J)$  [3]:

$$\begin{aligned} Zgl(J) = & 0,0066 + 7,3525 \cdot \cos(J' + 85,9^\circ) \\ & + 9,9359 \cdot \cos(2 \cdot J' + 108,9^\circ) \quad \text{in min} \quad (5) \\ & + 0,3387 \cdot \cos(3 \cdot J' + 105,2^\circ) \end{aligned}$$

Sonnendeklination  $\delta(J)$  [3]

$$\begin{aligned} \delta(J) = & 0,3948 - 23,2559 \cdot \cos(J' + 9,1^\circ) \\ & - 0,3915 \cdot \cos(2 \cdot J' + 5,4^\circ) \\ & - 0,1764 \cdot \cos(3 \cdot J' + 26,0^\circ) \end{aligned} \quad \text{in Grad} \quad (6)$$

**Anmerkung:** Es kann für eine Programmierung erforderlich sein, das Argument der Winkelfunktionen im Bogenmaß zu notieren. Die Umwandlung von Grad in Bogenmaß und zurück erfolgt durch Multiplikation bzw. Division mit  $\pi/180^\circ$ .

Der für die Berechnung des Sonnenstands benötigte Stundenwinkel  $\omega$  wird vom Meridian aus positiv zum Nachmittag und negativ zum Vormittag gezählt. Mit der geografischen Breite des Orts  $\varphi$  ermittelt sich die Sonnenhöhe  $\gamma_s$  zu:

$$\gamma_s = \arcsin(\cos \omega \cdot \cos \varphi \cdot \cos \delta + \sin \varphi \cdot \sin \delta) \quad \text{in Grad} \quad (7)$$

Dabei ist

$\omega$  Stundenwinkel  
 $\varphi$  geografischer Breitengrad des betrachteten Orts

$$MOZ = OZ - 4 \frac{\text{min}}{\text{Grad}} \cdot (15^\circ - \lambda) / \left( 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \right) \quad (2)$$

**Note:** The time zone meridian for Central Europe is the 15<sup>th</sup> longitude. Thus, the equation mentioned above is applicable to Central Europe, the local time  $OZ$  corresponds to the Central European Time  $MEZ$ .

**Note on the longitude  $\lambda$  to be used for a TRY:** When calculating the CDP or HDP, the longitude  $\lambda$  and the latitude  $\varphi$  of the treated location must be used. On the contrary, when using a TRY, the longitude and latitude of the reference location of the TRY must be used, since the specified irradiation values refer to the aforementioned in the course of time. Otherwise, the conversion of the irradiation values from the horizontal surface area to surface areas with any orientation and inclination would result in significant errors.

The local apparent time  $WOZ$  is:

$$WOZ = MOZ + Zgl/60 \quad (3)$$

The time equation  $Zgl$  considers the eccentricity and inclination of the ecliptic of the earth's orbit around the sun. Time equation and solar declination  $\delta$  change in the course of one year. Using  $J$  as calendar day of the year, the following is applicable to a year with 365 days:

$$J' = 360 \cdot \frac{J}{365} \quad \text{in degrees} \quad (4)$$

Time equation  $Zgl(J)$  [3]:

$$\begin{aligned} Zgl(J) = & 0,0066 + 7,3525 \cdot \cos(J' + 85,9^\circ) \\ & + 9,9359 \cdot \cos(2 \cdot J' + 108,9^\circ) \quad \text{in min} \quad (5) \\ & + 0,3387 \cdot \cos(3 \cdot J' + 105,2^\circ) \end{aligned}$$

Solar declination  $\delta(J)$  [3]:

$$\begin{aligned} \delta(J) = & 0,3948 - 23,2559 \cdot \cos(J' + 9,1^\circ) \\ & - 0,3915 \cdot \cos(2 \cdot J' + 5,4^\circ) \\ & - 0,1764 \cdot \cos(3 \cdot J' + 26,0^\circ) \end{aligned} \quad \text{in degrees} \quad (6)$$

**Note:** For programming it may be required to note the argument of the angular functions in radian measure. The conversion from degrees to radian measure and vice versa is implemented by multiplication or division with  $\pi/180^\circ$ .

The hour angle  $\omega$  required for calculating the solar altitude is counted from the meridian positively for afternoon and negatively for forenoon. Using the latitude of the location  $\varphi$  the solar height  $\gamma_s$  can be determined with:

$$\gamma_s = \arcsin(\cos \omega \cdot \cos \varphi \cdot \cos \delta + \sin \varphi \cdot \sin \delta) \quad \text{in degrees} \quad (7)$$

where

$\omega$  hour angle  
 $\varphi$  latitude of the treated location

**Anmerkung:** Wenn  $\gamma_S < 0$  ist, dann ist in der Regel der Sonnenstand unterhalb des Horizonts. Dies ist bei der Ermittlung der Einstrahlung zu berücksichtigen.

Der Stundenwinkel  $\omega$  berechnet sich in Grad wie folgt:

$$\omega = (12 \text{ h} - WOZ) \cdot 15 \quad \text{in Grad} \quad (8)$$

Mit der Festlegung der Zählweise für das Sonnenazimuts  $\alpha_S$ :

Norden:  $\alpha_S = 0^\circ$

Osten:  $\alpha_S = 90^\circ$

Süden:  $\alpha_S = 180^\circ$

Westen:  $\alpha_S = 270^\circ$

Gültigkeit:  $0^\circ \leq \alpha_S \leq 360^\circ$

ergibt sich der Sonnenazimuts  $\alpha_S$  zu:

$$\alpha_S = 180^\circ - \arccos \frac{\sin \gamma_S \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_S \cdot \cos \varphi} \quad \text{für } WOZ \leq 12 \text{ h} \quad (9)$$

bzw.

$$\alpha_S = 180^\circ + \arccos \frac{\sin \gamma_S \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_S \cdot \cos \varphi} \quad \text{für } WOZ > 12 \text{ h} \quad (10)$$

Für eine beliebig orientierte und beliebig geneigte Fläche ergibt sich mit der Festlegung der Zählweise für die Himmelsrichtung  $\alpha_F$

Norden:  $\alpha_F = 0^\circ$

Osten:  $\alpha_F = 90^\circ$

Süden:  $\alpha_F = 180^\circ$

Westen:  $\alpha_F = 270^\circ$

Gültigkeit:  $0^\circ \leq \alpha_F \leq 360^\circ$

und der Festlegung der Neigung  $\gamma_F$  der betrachteten Fläche

- waagrecht (nach oben, z.B. Flachdach):  $\gamma_F = 0^\circ$
- senkrecht:  $\gamma_F = 90^\circ$
- waagrecht (nach unten, z.B. Decke einer Tor-einfahrt):  $\gamma_F = 180^\circ$
- Gültigkeit:  $0^\circ \leq \gamma_F \leq 180^\circ$

ein Cosinus des Einstrahlwinkels  $\zeta$  auf eine beliebig orientierte und beliebig geneigte Fläche von

$$\cos \zeta = \sin \gamma_S \cdot \cos \gamma_F + \cos \gamma_S \cdot \sin \gamma_F \cdot \cos(\text{abs}(\alpha_F - \alpha_S)) \quad (11)$$

Wenn  $\cos \zeta = 1$ , dann fällt die Einstrahlung senkrecht auf die Fläche, das heißt parallel zur Normale der Fläche.

**Anmerkung 1:** Wenn  $\cos \zeta < 1$  ist, fällt keine direkte Einstrahlung auf die Fläche, weil die Sonne dann hinter der Fläche steht. Da es keine negative kurzwellige Einstrahlung gibt, kann dies bei der Berechnung gegebenenfalls durch die Abfrage abgefangen werden:

wenn  $\cos \zeta < 0$ , dann  $P_{\text{dir},F} = 0$

(siehe Gleichung (29) bis Gleichung (32)).

**Note:** If  $\gamma_S < 0$  than the solar altitude normally is below the horizon. This must be taken into consideration when determining the irradiation.

The hour angle  $\omega$  is calculated in degrees as follows:

$$\omega = (12 \text{ h} - WOZ) \cdot 15 \quad \text{in degrees} \quad (8)$$

With the specification of the counting method for the solar azimuth  $\alpha_S$ :

North:  $\alpha_S = 0^\circ$

East:  $\alpha_S = 90^\circ$

South:  $\alpha_S = 180^\circ$

West:  $\alpha_S = 270^\circ$

applicability:  $0^\circ \leq \alpha_S \leq 360^\circ$

The solar azimuth  $\alpha_S$  results from:

$$\alpha_S = 180^\circ - \arccos \frac{\sin \gamma_S \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_S \cdot \cos \varphi} \quad \text{for } WOZ \leq 12 \text{ h} \quad (9)$$

or

$$\alpha_S = 180^\circ + \arccos \frac{\sin \gamma_S \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_S \cdot \cos \varphi} \quad \text{for } WOZ > 12 \text{ h} \quad (10)$$

This results in the following for a surface area with any orientation and inclination, with the specification of the counting method for the cardinal direction  $\alpha_F$

North:  $\alpha_F = 0^\circ$

East:  $\alpha_F = 90^\circ$

South:  $\alpha_F = 180^\circ$

West:  $\alpha_F = 270^\circ$

applicability:  $0^\circ \leq \alpha_F \leq 360^\circ$

and the specification of the inclination  $\gamma_F$  of the treated surface area

- horizontally (upwards, e.g. flat roof):  $\gamma_F = 0^\circ$
- vertically:  $\gamma_F = 90^\circ$
- horizontally (downwards, e.g. ceiling of a gateway):  $\gamma_F = 180^\circ$
- applicability:  $0^\circ \leq \gamma_F \leq 180^\circ$

a cosine of the incidence angle  $\zeta$  on a surface area with any orientation and any inclination of

$$\cos \zeta = \sin \gamma_S \cdot \cos \gamma_F + \cos \gamma_S \cdot \sin \gamma_F \cdot \cos(\text{abs}(\alpha_F - \alpha_S)) \quad (11)$$

If  $\cos \zeta = 1$ , irradiation falls vertically onto the surface area, i.e. parallel to the normal of the surface area.

**Note 1:** If  $\cos \zeta < 1$  there is no direct irradiation onto the surface area, because the sun is behind the surface area in this case. As there is no negative short-wave irradiation, this can be compensated by the survey during the calculation, if required:

if  $\cos \zeta < 0$ , then  $P_{\text{dir},F} = 0$

(see Equation (29) to Equation (32)).

**Anmerkung 2:** Gleichung (5) bis Gleichung (11) gelten nur für Orte auf der nördlichen Hemisphäre der Erde.

**Note 2:** Equation (5) to Equation (11) are only applicable for locations on the northern hemisphere of the earth.

## 6 Kurzwellige Einstrahlung auf eine horizontale Fläche

Die kurzwellige Einstrahlung (Sonneneinstrahlung, direkt und diffus) auf die horizontale Fläche errechnet sich in Anlehnung an DIN 5034-2 und VDI 3789 Blatt 3.

Die Bewölkung hat einen erheblichen Einfluss auf die Sonnenstrahlung. Bei der Ermittlung der Strahlungswerte werden daher zwischen drei Zuständen des Himmels unterschieden:

- wolkenloser klarer Himmel
- völlig und gleichmäßig bedeckter Himmel
- gemischt bewölkter Himmel

Als Kennwerte für die Bewölkung des Himmels werden zwei Parameter verwendet:

- Sonnenwahrscheinlichkeit  $SSW$   
(Werte zwischen 0 und 1)
- Bedeckungsgrad  $BED$   
(Werte zwischen 0 und 1)

Beide Kennwerte sind für die rechnerische Ermittlung der Sonneneinstrahlung gleichwertig und können ineinander überführt werden:

$$SSW = (1 - BED) \quad (12)$$

**Anmerkung:** In der Meteorologie wird der Bedeckungsgrad häufig in 0 bis 8 Achtel bewertet. In dieser Richtlinie ist der Bedeckungsgrad  $BED$  für Werte zwischen 0 und 1 definiert.

### 6.1 Direkte Einstrahlung auf horizontale Fläche

Als Solarkonstante  $E_0$  wird die Strahlungsleistung der Sonne an der Grenzschicht der Atmosphäre bezeichnet. Sie beträgt mit  $J$  als Kalendertag:

$$E_0 = 1370 \cdot \left[ 1 + 0,033 \cdot \cos(360^\circ \cdot (J/365)) \right] \quad \text{in W/m}^2 \quad (13)$$

Damit beträgt die direkte Einstrahlung  $P_{\text{dir,normal}}$  bei **wolkenlosem Himmel** auf Normalfläche:

$$P_{\text{dir,normal}}(SSW = 1) = E_0 \cdot \left[ \exp(-T_{\text{Linke}} / (0,9 + 9,4 \cdot \sin \gamma_s)) \cdot \exp(-H_{\text{Geo}} / H_R) \right] \quad \text{in W/m}^2 \quad (14)$$

Dabei ist

$T_{\text{Linke}}$  Trübungsfaktor nach *Linke* entsprechend DIN 4710 (abhängig vom betrachteten Monat, unterschieden nach *Monatsmittelwert* und *Monatsmittelwert – Standardabweichung*, siehe Tabelle 1)

$H_{\text{Geo}}$  geografische Höhe des Standorts in m

$H_R$  Bezugshöhe,  $H_R = 8000$  m

## 6 Short-wave irradiation on a horizontal surface area

The short-wave irradiation (solar irradiation, direct and diffuse) onto the horizontal surface area is calculated in accordance with DIN 5034-2 and VDI 3789 Part 3.

The cloudiness has significant influence on the solar radiation. Thus, three conditions of the sky are differentiated when determining the radiation values:

- cloudless clear sky
- completely and uniformly overcast sky
- sky with mixed clouds

Two parameters are used as characteristic values for the cloudiness of the sky:

- solar probability  $SSW$   
(values between 0 and 1)
- degree of cloudiness  $BED$   
(values between 0 and 1)

Both characteristic values are equivalent regarding the mathematical determination of solar irradiation and can be converted into each other.

$$SSW = (1 - BED) \quad (12)$$

**Note:** In the field of meteorology the degree of cloudiness is often rated in 0 to 8 eighths. Within the framework of this standard, the degree of cloudiness  $BED$  is defined for values between 0 and 1.

### 6.1 Direct irradiation onto horizontal surface area

The radiated power of the sun at the boundary layer of the atmosphere is called solar constant  $E_0$ . With  $J$  as calendar day, it is:

$$E_0 = 1370 \cdot \left[ 1 + 0,033 \cdot \cos(360^\circ \cdot (J/365)) \right] \quad \text{in W/m}^2 \quad (13)$$

This way, the direct irradiation  $P_{\text{dir,normal}}$  on normal surface area is the following for **cloudless skies**:

where

$T_{\text{Linke}}$  turbidity factor according to *Linke* according to DIN 4710 (depending on the treated month, differentiated according to *monthly average value* and *monthly average value – standard deviation*, see Table 1)

$H_{\text{Geo}}$  geographic height of the location, in m

$H_R$  reference height,  $H_R = 8000$  m



$\gamma_S$  Sonnhöhe in Grad nach Gleichung (7)

und die direkte Einstrahlung  $P_{\text{dir,hor}}$  bei **wolkenlosem Himmel** auf Horizontalfläche:

$$P_{\text{dir,hor}}(SSW=1) = P_{\text{dir,normal}}(SSW=1) \cdot \sin \gamma_S \quad \text{in W/m}^2 \quad (15)$$

**Anmerkung:** Bei  $P_{\text{dir,normal}}$  ist die Empfangsfläche so ausgerichtet, dass die direkte Sonneneinstrahlung senkrecht auftrifft, also parallel zur Flächennormalen.

Die in DIN 5034-2 und VDI 3789 Blatt 3 angegebenen Formeln führen für die relative direkte Einstrahlung auf horizontale Fläche bei **gemischt bewölktem Himmel** nicht zu einer befriedigenden Übereinstimmung der Ergebnisse bei Nachberechnung der TRY-Daten. Daher wird ein anderer Zusammenhang zugrunde gelegt [2].

Direkte Einstrahlung bei **gemischt bewölktem Himmel**:

$$P_{\text{dir,hor}}(SSW) = P_{\text{dir,hor}}(SSW=1) \cdot R_S(SSW) \quad \text{in W/m}^2 \quad (16)$$

Dabei ist

$R_S(SSW)$  Bewertungsfaktor für Bewölkung nach [2]

Der Bewertungsfaktor für die Berücksichtigung der Bewölkung bei der direkten Einstrahlung wird wie folgt berechnet:

$$R_S(SSW) = 0,025 + \cos\left(\left((1 - SSW) - 1/8\right) \cdot 90^\circ\right) - 0,4 \cdot \left(1 - \cos\left(\left((1 - SSW) \cdot 8/6\right) \cdot 90^\circ\right)\right) + 0,3 \cdot \left(\left((1 - SSW) + 1/8\right) \cdot (\sin \gamma_S - \sin(30^\circ)) + \left(\left((1 - SSW) - 2/8\right) \cdot (\sin \gamma_S - \sin(30^\circ))\right)\right) \\ \text{wenn } R_S(SSW) > 1, \text{ dann } R_S(SSW) = 1 \\ \text{wenn } R_S(SSW) > 0, \text{ dann } R_S(SSW) = 0 \quad (17)$$

Dabei ist

$\gamma_S$  Sonnhöhe in Grad nach Gleichung (7)

## 6.2 Diffuse Einstrahlung auf horizontale Fläche

Die diffuse Einstrahlung auf eine horizontale Fläche bei **wolkenlosem klarem Himmel** errechnet sich nach DIN 5034-2 zu:

$$P_{\text{diff,hor}}(SSW=1) = 0,5 \cdot E_0 \cdot \sin \gamma_S \cdot \left[ q_{\text{am}} - \exp(-T_{\text{Linke}} / (0,9 + 9,4 \cdot \sin \gamma_S)) \cdot \exp(-H_{\text{Geo}}/H_R) \right] \quad \text{in W/m}^2 \quad (18)$$

Dabei ist

$T_{\text{Linke}}$  Trübungs faktor nach Linke entsprechend DIN 4710 (abhängig vom betrachteten Monat, unterschieden nach Monatsmittelwert und Monatsmittelwert – Standardabweichung, siehe Tabelle 1)

$\gamma_S$  solar height in degrees according to Equation (7)

and the direct irradiation  $P_{\text{dir,hor}}$  on the horizontal surface area is as follows for **cloudless skies**:

$$P_{\text{dir,hor}}(SSW=1) = P_{\text{dir,normal}}(SSW=1) \cdot \sin \gamma_S \quad \text{in W/m}^2 \quad (15)$$

**Note:** For  $P_{\text{dir,normal}}$  the receiving area is oriented in a way that the direct solar irradiation arrives vertically, i.e. parallel to the area normal.

Regarding the relative direct irradiation onto horizontal surface areas at **skies with mixed clouds** the formulas specified in DIN 5034-2 and VDI 3789 Part 3 do not result in a satisfactory correspondence of the results when re-calculating the TRY data. Thus, a different context will be used as the basis [2].

Direct irradiation at **skies with mixed clouds**:

$$P_{\text{dir,hor}}(SSW) = P_{\text{dir,hor}}(SSW=1) \cdot R_S(SSW) \quad \text{in W/m}^2 \quad (16)$$

where

$R_S(SSW)$  evaluation factor for the cloudiness according to [2]

The evaluation factor for taking into consideration the cloudiness for direct irradiation is calculated as follows.

$$R_S(SSW) = 0,025 + \cos\left(\left((1 - SSW) - 1/8\right) \cdot 90^\circ\right) - 0,4 \cdot \left(1 - \cos\left(\left((1 - SSW) \cdot 8/6\right) \cdot 90^\circ\right)\right) + 0,3 \cdot \left(\left((1 - SSW) + 1/8\right) \cdot (\sin \gamma_S - \sin(30^\circ)) + \left(\left((1 - SSW) - 2/8\right) \cdot (\sin \gamma_S - \sin(30^\circ))\right)\right) \\ \text{if } R_S(SSW) > 1, \text{ then } R_S(SSW) = 1 \\ \text{if } R_S(SSW) > 0, \text{ then } R_S(SSW) = 0 \quad (17)$$

where

$\gamma_S$  solar height in degrees according to Equation (7)

## 6.2 Diffuse irradiation onto horizontal surface area

The diffuse irradiation onto a horizontal surface area at **cloudless clear sky** is calculated according to DIN 5034-2 with:

where

$T_{\text{Linke}}$  turbidity factor according to Linke according to DIN 4710 (depending on the treated month, differentiated according to monthly average value and monthly average value – standard deviation, see Table 1)

$H_{\text{Geo}}$  geografische Höhe des Standorts in m  
 $H_{\text{R}}$  Bezugshöhe,  $H_{\text{R}} = 8000$  m  
 $\gamma_{\text{S}}$  Sonnenhöhe in Grad nach Gleichung (7)

sowie dem Transmissionsgrad der Atmosphäre

$$q_{\text{am}} = q_{\text{am,atm}} \cdot (0,506 - 0,010788 \cdot T_{\text{Linke}}) \quad (19)$$

Dabei ist

$$\begin{aligned} q_{\text{am,atm}} = & 1,2940 + 2,4417 \cdot 10^{-2} \cdot \gamma_{\text{S}}^1 \\ & - 3,9730 \cdot 10^{-4} \cdot \gamma_{\text{S}}^2 + 3,8034 \cdot 10^{-6} \cdot \gamma_{\text{S}}^3 \quad (20) \\ & - 2,2145 \cdot 10^{-8} \cdot \gamma_{\text{S}}^4 + 5,8332 \cdot 10^{-11} \cdot \gamma_{\text{S}}^5 \end{aligned}$$

Die diffuse Einstrahlung auf eine horizontale Fläche bei **vollständig und gleichmäßig bedecktem Himmel** beträgt nach VDI 3789 Blatt 3:

$$\begin{aligned} P_{\text{diff,hor}}(SSW = 0) \\ = \left[ P_{\text{dir,hor}}(SSW = 1) + P_{\text{diff,hor}}(SSW = 1) \right] \cdot (1 - 0,72) \\ \text{in W/m}^2 \quad (21) \end{aligned}$$

Die relative diffuse Einstrahlung auf eine horizontale Fläche bei **gemischt bewölktem Himmel** berechnet sich ebenfalls in Anlehnung an Richtlinie VDI 3789 Blatt 3, Gleichung (26a) und Gleichung (K14). Allerdings ist bei der Berechnung des Bewertungsfaktors für Bewölkung der Parameter  $a$  von 0,72 auf 0,60 geändert, siehe [2]:

$$F_{\text{B}}(SSW) = \left[ 1 - 0,60 \cdot (1 - SSW)^{(3,2-1)} \right] / (1 - 0,60) \quad (22)$$

Die diffuse Einstrahlung bei **gemischt bewölktem Himmel** ergibt sich aus dem Anteil wolkenloser klarer Himmelsbereiche und aus dem Anteil gleichmäßig bedeckter Himmelsteile zu:

$$\begin{aligned} P_{\text{diff,hor}}(SSW) = & P_{\text{diff,klar,hor}}(SSW) \\ & + P_{\text{diff,bed,hor}}(SSW) \quad \text{in W/m}^2 \quad (23) \end{aligned}$$

mit

$$P_{\text{diff,klar,hor}}(SSW) = P_{\text{diff,hor}}(SSW = 1) \cdot SSW \quad \text{in W/m}^2 \quad (24)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{diff,bed,hor}}(SSW) = \\ P_{\text{diff,hor}}(SSW = 0) \cdot (1 - SSW) \cdot F_{\text{B}}(SSW) \\ \text{in W/m}^2 \quad (25) \end{aligned}$$

$H_{\text{Geo}}$  geographic height of the location, in m  
 $H_{\text{R}}$  reference height,  $H_{\text{R}} = 8000$  m  
 $\gamma_{\text{S}}$  solar height in degrees according to Equation (7)

as well as the degree of transmission of the atmosphere

$$q_{\text{am}} = q_{\text{am,atm}} \cdot (0,506 - 0,010788 \cdot T_{\text{Linke}}) \quad (19)$$

where

$$\begin{aligned} q_{\text{am,atm}} = & 1,2940 + 2,4417 \cdot 10^{-2} \cdot \gamma_{\text{S}}^1 \\ & - 3,9730 \cdot 10^{-4} \cdot \gamma_{\text{S}}^2 + 3,8034 \cdot 10^{-6} \cdot \gamma_{\text{S}}^3 \quad (20) \\ & - 2,2145 \cdot 10^{-8} \cdot \gamma_{\text{S}}^4 + 5,8332 \cdot 10^{-11} \cdot \gamma_{\text{S}}^5 \end{aligned}$$

The diffuse irradiation onto a horizontal surface area at **completely and uniformly overcast sky** is the following according to VDI 3789 Part 3:

$$\begin{aligned} P_{\text{diff,hor}}(SSW = 0) \\ = \left[ P_{\text{dir,hor}}(SSW = 1) + P_{\text{diff,hor}}(SSW = 1) \right] \cdot (1 - 0,72) \\ \text{in W/m}^2 \quad (21) \end{aligned}$$

The relative diffuse irradiation onto a horizontal surface area at **skies with mixed clouds** is also calculated according to standard VDI 3789 Part 3, Equation (26a) and Equation (K14). However, when calculating the evaluation factor for cloudiness the parameter  $a$  is changed from 0,72 to 0,60, see [2]:

$$F_{\text{B}}(SSW) = \left[ 1 - 0,60 \cdot (1 - SSW)^{(3,2-1)} \right] / (1 - 0,60) \quad (22)$$

The diffuse irradiation at **skies with mixed clouds** results from the share of cloudless clear parts of the sky and the share of uniformly overcast parts of the sky with:

$$\begin{aligned} P_{\text{diff,hor}}(SSW) = & P_{\text{diff,klar,hor}}(SSW) \\ & + P_{\text{diff,bed,hor}}(SSW) \quad \text{in W/m}^2 \quad (23) \end{aligned}$$

with

$$P_{\text{diff,klar,hor}}(SSW) = P_{\text{diff,hor}}(SSW = 1) \cdot SSW \quad \text{in W/m}^2 \quad (24)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{diff,bed,hor}}(SSW) = \\ P_{\text{diff,hor}}(SSW = 0) \cdot (1 - SSW) \cdot F_{\text{B}}(SSW) \\ \text{in W/m}^2 \quad (25) \end{aligned}$$

## 7 Kurzzeitige Einstrahlung auf eine beliebig orientierte und beliebig geneigte Fläche

Die kurzzeitige Strahlung auf eine beliebig orientierte und beliebig geneigte Fläche besteht aus den Komponenten direkt und diffus sowie der Bodenreflexionsstrahlung.

Die Umrechnung der Sonneneinstrahlung von Einstrahlung auf horizontaler Fläche auf Einstrahlung auf beliebig orientierte und beliebig geneigte Flächen erfolgt nach dem Berechnungsverfahren von *Aydinli* und *Krochmann* [1; 3; 4].

Dabei ist vom Längengrad, Breitengrad und von der Höhe des **betrachteten Orts** unter Berücksichtigung der Sommerzeit auszugehen.

Da die Stundenmittelwerte für die Berechnung der Kühllast bzw. Raumtemperatur erforderlich sind, wird die Ermittlung für die Stundenmitte durchgeführt.

**Beispiel:** Für die 11. Stunde ist  $t = 10,5$  (10:30 Uhr).

Ausgangswerte für die Ermittlung der Einstrahlwerte auf eine beliebig geneigte und beliebig orientierte Fläche sind die drei Einstrahlungskomponenten auf die horizontale Fläche:

- direkte Einstrahlung nach Gleichung (15)
- diffuse Einstrahlung (Anteil wolkenloser klarer Himmel) nach Gleichung (18)
- diffuse Einstrahlung (Anteil gleichmäßig bedeckter Himmel) nach Gleichung (21)

Im TRY werden die direkte und die diffuse Strahlung auf horizontale Flächen bereitgestellt. Diese Strahlungswerte können ebenfalls mit dem nachstehend beschriebenen Verfahren auf beliebig orientierte Flächen umgerechnet werden. Da allerdings im TRY nur ein Wert für die diffuse Einstrahlung  $P_{\text{diff,hor,TRY}}(SSW)$  angegeben ist, also nicht in einen Anteil des wolkenlosen klaren Himmels und einen Anteil des gleichmäßig bedeckten Himmels unterschieden wird, gilt hierfür:

$$P_{\text{diff,klar,hor}}(SSW = 1) = P_{\text{diff,TRY,hor}}(SSW) \quad \text{in W/m}^2 \quad (26)$$

$$P_{\text{diff,bed,hor}}(SSW = 0) = P_{\text{diff,TRY,hor}}(SSW) \quad \text{in W/m}^2 \quad (27)$$

Für Werte aus einem TRY ist außerdem die Bewertung mit dem Bewertungsfaktor  $F_B(SSW)$  nach Gleichung (22) nicht erforderlich, da die im TRY angegebenen Werte bereits die Bewölkung zur jeweiligen Stunde einbeziehen. Somit gilt für das TRY:

$$F_B(SSW) = 1 \quad \text{in W/m}^2 \quad (28)$$

## 7 Short-wave irradiation on a surface area with any orientation and inclination

The short-wave radiation on a surface area with any orientation and inclination consists of the components direct and diffuse, and the ground reflexion radiation.

The conversion of the solar irradiation from irradiation onto horizontal surface areas to irradiation onto surface areas with any orientation and inclination is implemented according to the calculation procedure of *Aydinli* and *Krochmann* [1; 3; 4].

In this, the longitude, the latitude, and the height of the **treated location** must be taken as the basis taking into consideration the daylight saving time.

As the hourly average values are required for the calculation of the cooling load or room temperature, the determination of the hourly average is implemented.

**Example:** For the 11<sup>th</sup> hour,  $t = 10,5$  (10:30 am).

The three irradiation components onto the horizontal surface area are the initial values for determining the irradiation values onto a surface area with any orientation and any inclination:

- direct irradiation according to Equation (15)
- diffuse irradiation (share of cloudless clear sky) according to Equation (18)
- diffuse irradiation (share of uniformly overcast sky) according to Equation (21)

Within TRY, the direct and the diffuse radiation on horizontal surface areas are provided. These radiation values can also be converted to surface areas with any orientation using the procedure described in the following. However, as only a value for diffuse irradiation  $P_{\text{diff,hor,TRY}}(SSW)$  is specified in TRY, i.e. no differentiation in a share of cloudless clear sky and a share of uniformly overcast sky, the following is applicable to:

$$P_{\text{diff,klar,hor}}(SSW = 1) = P_{\text{diff,TRY,hor}}(SSW) \quad \text{in W/m}^2 \quad (26)$$

$$P_{\text{diff,bed,hor}}(SSW = 0) = P_{\text{diff,TRY,hor}}(SSW) \quad \text{in W/m}^2 \quad (27)$$

Furthermore, regarding values from a TRY, evaluation with the evaluation factor  $F_B(SSW)$  according to Equation (22) is not required, because the values specified for the TRY already include the cloudiness at the corresponding hour. Thus, the following is applicable to the TRY:

$$F_B(SSW) = 1 \quad \text{in W/m}^2 \quad (28)$$

## 7.1 Direkte Einstrahlung auf die beliebig orientierte und beliebig geneigte Fläche

Bei wolkenlosem und klarem Himmel gilt:

$$P_{\text{dir},F}(SSW=1) = P_{\text{dir},\text{hor}}(SSW=1) \cdot (\cos \gamma_F + \sin \gamma_F \cdot \cos(\text{abs}(\alpha_F - \alpha_S)) / \tan \gamma_S) \quad \text{in W/m}^2 \quad (29)$$

oder

$$P_{\text{dir},F}(SSW=1) = (P_{\text{dir},\text{hor}}(SSW=1) / \sin \gamma_S) \cdot \cos \xi \quad \text{in W/m}^2 \quad (30)$$

### Anmerkung zur Umrechnung bei Werten aus dem TRY

Bei Umrechnung von Werten aus dem TRY wird empfohlen, die Umrechnung in zwei Schritten vorzunehmen:

- 1) Umrechnung auf Einfallswinkel  $\xi = 0^\circ$  (Fläche senkrecht zur direkten Einstrahlung) und Begrenzung der Strahlung auf einen sinnvollen Maximalwert bei Normalstrahlung, z.B. direkte Einstrahlung  $P_{\text{dir},\text{normal}}$  bei **wolkenlosem Himmel** auf Normalfläche nach Gleichung (14)

Um diese Begrenzung nur in Ausnahmefällen bei offensichtlich unrealistisch großen Strahlungswerten vorzunehmen, ist für diesen Sonderfall in Gleichung (14) als Trübungsfaktor  $T_{\text{Linke}}$  nach Linke der Wert „Monatsmittelwert –  $2 \times \text{Standardabweichung}$ “ einzusetzen. In Anlehnung an DIN 4710 ergeben sich dann folgende Werte für  $T_{\text{Linke}}$  (abhängig vom betrachteten Monat) nach Tabelle 1.

- 2) Umrechnung auf die gewünschte Flächenneigung

Mit dieser Vorgehensweise werden die Probleme unrealistisch großer Strahlungswerte wegen des großen Tangens bei geringer Sonnenhöhe  $\gamma_S$  vermieden.

Für Stunden mit einer Bedeckung von  $0 \leq SSW < 1$ , wird die direkte Strahlung für den wolkenlosen klaren Himmel nach Gleichung (29) oder Gleichung (30) in Abhängig-

## 7.1 Direct irradiation onto the surface area with any orientation and inclination

The following is applicable in the event of cloudless and clear sky:

$$P_{\text{dir},F}(SSW=1) = P_{\text{dir},\text{hor}}(SSW=1) \cdot (\cos \gamma_F + \sin \gamma_F \cdot \cos(\text{abs}(\alpha_F - \alpha_S)) / \tan \gamma_S) \quad \text{in W/m}^2 \quad (29)$$

or

$$P_{\text{dir},F}(SSW=1) = (P_{\text{dir},\text{hor}}(SSW=1) / \sin \gamma_S) \cdot \cos \xi \quad \text{in W/m}^2 \quad (30)$$

### Note on the conversion regarding values from the TRY

When converting values from the TRY it is recommended to convert these in two steps:

- 1) conversion to angle of incidence  $\xi = 0^\circ$  (surface area perpendicular to direct irradiation) and limitation of the radiation to a reasonable maximum value at normal radiation, e.g. direct irradiation  $P_{\text{dir},\text{normal}}$  at **cloudless sky** onto normal surface area according to Equation (14)

In order to make this limitation in exceptional cases at obviously unrealistically high radiation values only, the value “*monthly average value –  $2 \times \text{standard deviation}$* ” must be used for this special case in Equation (14) as turbidity factor  $T_{\text{Linke}}$  according to Linke. In accordance with DIN 4710, the aforementioned results in the following values for  $T_{\text{Linke}}$  (depending on the treated month) according to Table 1:

- 2) conversion to the desired inclination of the surface area

This procedure helps avoiding the issues of unrealistically high radiation values due to the large tangent at low solar height  $\gamma_S$ .

Regarding hours with a cloudiness of  $0 \leq SSW < 1$ , the direct radiation for cloudless clear sky according to Equation (29) or Equation (30) is weighted depending on the evalua-

Tabelle 1. Trübungsfaktor nach Linke (nach DIN 4710 für Deutschland)

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Monatsmittel	3,7	4,1	4,6	5,1	5,3	6,1	6,1	5,9	5,4	4,2	3,6	3,5
Monatsmittel – Standardabweichung	2,7	3,1	3,3	3,5	3,7	4,3	4,3	4,1	3,9	3,0	2,9	2,7
Monatsmittel – $2 \times \text{Standardabweichung}$	1,7	2,1	2,0	1,9	2,1	2,5	2,5	2,3	2,4	1,8	2,2	1,9

keit von Bewertungsfaktor  $R_S(SSW)$  nach Gleichung (17) gewichtet,

$$P_{\text{dir},F}(SSW) = P_{\text{dir},\text{klar},F}(SSW = 1) \cdot R_S(SSW) \quad \text{in W/m}^2 \quad (31)$$

wobei  $SSW$  die Sonnenwahrscheinlichkeit für die zu berechnende Stunde ist.

Für Werte aus einem TRY ist diese Bewertung nach Gleichung (31) nicht erforderlich, da die im TRY angegebenen Werte bereits die Bewölkung zur jeweiligen Stunde einbeziehen. Somit gilt für das TRY:

$$P_{\text{dir},\text{hor}}(SSW) = P_{\text{dir},\text{TRY},\text{hor}}(SSW) \quad \text{in W/m}^2 \quad (32)$$

#### Anmerkung zu Gleichung (29) bis Gleichung (32)

$$P_{\text{dir},F} = 0, \text{ wenn } P_{\text{dir},F} < 0 \text{ oder} \\ \cos \zeta < 0 \text{ oder} \\ \gamma_S \leq 0 \text{ bzw. } \gamma_S \leq \chi$$

Dabei ist

$\chi$  Horizont-Überhöhungswinkel

#### 7.2 Diffuse Einstrahlung auf die beliebig orientierte und beliebig geneigte Fläche

Für die diffuse Einstrahlung erfolgt die Umrechnung der Einstrahlung auf die Horizontale auf beliebig orientierte und beliebig geneigte Fläche mittels eines Umrechnungsfaktors  $R_{\text{diff}}$ .

##### Gleichmäßig bedeckter Himmel

Bei gleichmäßig bedecktem Himmel ist der Umrechnungsfaktor  $R_{\text{diff},\text{bed}}$  nur von der Neigung der Fläche  $\gamma_F$  abhängig, das heißt, er ist rotationssymmetrisch und unabhängig von der Sonnenhöhe  $\gamma_S$  (Gleichung 33).

$$R_{\text{diff},\text{bed}} = 0,182 \cdot \left[ 1,178 \cdot (1 + \cos \gamma_F) + \left( \pi - \frac{\gamma_F \cdot \pi}{180^\circ} \right) \cdot \cos \gamma_F + \sin \gamma_F \right] \quad (33)$$

##### Wolkenloser und klarer Himmel

Bei wolkenlosem und klarem Himmel jedoch ist der Umrechnungsfaktor  $R_{\text{diff},\text{klar}}$  zusätzlich abhängig von der Azimutdifferenz von Wand und Sonne, also  $R_{\text{diff},\text{klar}} = f(\gamma_S, \gamma_F, \text{abs}(\alpha_F - \alpha_S))$ .  $R_{\text{diff},\text{klar}}$ -Werte

tion factor  $R_S(SSW)$  according to Equation (17),

$$P_{\text{dir},F}(SSW) = P_{\text{dir},\text{klar},F}(SSW = 1) \cdot R_S(SSW) \quad \text{in W/m}^2 \quad (31)$$

where  $SSW$  is the solar probability for the hour to be calculated.

Regarding values from a TRY, this evaluation according to Equation (31) is not required, because the values specified for the TRY already include the cloudiness at the corresponding hour. Thus, the following is applicable to the TRY:

$$P_{\text{dir},\text{hor}}(SSW) = P_{\text{dir},\text{TRY},\text{hor}}(SSW) \quad \text{in W/m}^2 \quad (32)$$

#### Note on Equation (29) to Equation (32)

$$P_{\text{dir},F} = 0, \text{ if } P_{\text{dir},F} < 0 \text{ or} \\ \cos \zeta < 0 \text{ or} \\ \gamma_S \leq 0 \text{ and/or } \gamma_S \leq \chi$$

where

$\chi$  horizon vertical exaggeration angle

#### 7.2 Diffuse irradiation onto the surface area with any orientation and inclination

Regarding diffuse irradiation, conversion of the irradiation to the horizontal onto a surface area with any orientation and inclination is implemented by means of a conversion factor  $R_{\text{diff}}$ .

##### Uniformly overcast sky

Regarding uniformly overcast skies, the conversion factor  $R_{\text{diff},\text{bed}}$  only depends on the inclination of the surface area  $\gamma_F$ , i.e. it is rotationally symmetric and does not depend on the solar height  $\gamma_S$  (Equation 33).

##### Cloudless and clear sky

However, regarding cloudless and clear sky the conversion factor  $R_{\text{diff},\text{klar}}$  additionally depends on the azimuth difference of wall and sun, i.e.  $R_{\text{diff},\text{klar}} = f(\gamma_S, \gamma_F, \text{abs}(\alpha_F - \alpha_S))$ .  $R_{\text{diff},\text{klar}}$  values for this are

Table 1. Turbidity factor according to Linke (according to DIN 4710 for Germany)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Monthly average	3,7	4,1	4,6	5,1	5,3	6,1	6,1	5,9	5,4	4,2	3,6	3,5
Monthly average – standard deviation	2,7	3,1	3,3	3,5	3,7	4,3	4,3	4,1	3,9	3,0	2,9	2,7
Monthly average – 2 x standard deviation	1,7	2,1	2,0	1,9	2,1	2,5	2,5	2,3	2,4	1,8	2,2	1,9

hierfür werden in DIN 5034-2, Tabelle 2 angegeben.

Die in DIN 5034-2 enthaltene Tabelle für die  $R$ -Werte ist aufgrund ihrer lichttechnischen Zielsetzung mit anderen Trübungsfaktoren berechnet worden, sodass die Ergebnisse (Strahlungswerte) nicht mit denen der VDI 2078 vergleichbar sind. Um zu den Strahlungswerten der VDI 2078 zu gelangen, sind die  $R_{\text{diff,klar}}$ -Werte nach [1] zu verwenden.

Da Tabellenwerte bei einer EDV-Bearbeitung hinderlich sind, ist folgende aus der dreidimensionalen Tabelle in [1] abgeleiteten Näherungsfunktion nach [2] anzusetzen:

$$R_{\text{diff,klar}} = R_{\text{diff,bed}} + (R_{180} + R_{\text{WBL}} + R_{\text{WBNL}} + R_{\xi}) / 100 \quad (34)$$

Es gelten dabei folgende Bedingungen:

wenn Neigung der Fläche  $\gamma_F = 0$ , dann

$$R_{\text{diff,klar}} = R_{\text{diff,bed}} \quad (35)$$

wenn

$$R_{\text{diff,klar}} < 0, \text{ dann } R_{\text{diff,klar}} = 0 \quad (36)$$

Die Summanden  $R_{180}$ ,  $R_{\text{WBL}}$ ,  $R_{\text{WBNL}}$  und  $R_{\xi}$ , in Gleichung (34) werden wie folgt und für die angegebenen Bedingungen berechnet:

$$R_{180} = -21 \cdot (1 - 4 \cdot \gamma_{\text{S,R}} / 90^\circ) \quad (37)$$

mit  $\gamma_{\text{S,R}}$ :

$$\text{wenn } \gamma_{\text{S}} > 21,5^\circ, \text{ dann } \gamma_{\text{S,R}} = 21,5^\circ \quad (38)$$

$$\text{sonst } \gamma_{\text{S,R}} = \gamma_{\text{S}} \quad (39)$$

$$R_{\text{WBL}} = \left( -64,5 \cdot \sqrt{\sin(\text{abs}(\gamma_{\text{S}}))} + R_{\text{WBL},0} \right) \cdot (1 - \gamma_F / 180^\circ) + R_{\text{WBL},1} \quad (40)$$

mit  $R_{\text{WBL},0}$ : wenn  $\gamma_{\text{S}} < 30^\circ$ , dann

$$R_{\text{WBL},0} = 6 \cdot \left( 1 - ((\gamma_{\text{S}} - 15^\circ) / 15^\circ)^2 \right) \quad (41)$$

sonst  $R_{\text{WBL},0} = 0$

$$R_{\text{WBL},1} = -6,5 \cdot \left( 1 - ((\gamma_F - 40^\circ) / 45^\circ)^2 \right) \quad (42)$$

wenn  $R_{\text{WBL},1} > 0$ , dann  $R_{\text{WBL},1} = 0$

$$R_{\text{WBNL}} = (26/2) \cdot (1 - \cos(2 \cdot \gamma_F)) \quad (43)$$

$$R_{\xi} = (126,5 - 60 \cdot \sin \gamma_{\text{S}}) \cdot ((\cos \xi + 0,7) / 1,7)^2 \quad (44)$$

Dabei ist

$\xi$  Einstrahlwinkel nach Gleichung (11)  
in Grad

specified in DIN 5034-2, Table 2.

On the basis of its light-related objective, the table for the  $R$  values in DIN 5034-2 was calculated with different turbidity factors so that the results (radiation values) cannot be compared to those of VDI 2078. In order to get the radiation values of VDI 2078, the  $R_{\text{diff,klar}}$  values according to [1] must be used.

As the table values are obstructive during EDP processing, the following approximation function according to [1] derived from the three-dimensional table in [2] must be used:

$$R_{\text{diff,klar}} = R_{\text{diff,bed}} + (R_{180} + R_{\text{WBL}} + R_{\text{WBNL}} + R_{\xi}) / 100 \quad (34)$$

In this, the following conditions are applicable:

if inclination of the surface area  $\gamma_F = 0$ , then

$$R_{\text{diff,klar}} = R_{\text{diff,bed}} \quad (35)$$

if

$$R_{\text{diff,klar}} < 0, \text{ then } R_{\text{diff,klar}} = 0 \quad (36)$$

The terms of the sum  $R_{180}$ ,  $R_{\text{WBL}}$ ,  $R_{\text{WBNL}}$ , and  $R_{\xi}$ , in Equation (34) are calculated as follows and for the specified conditions:

$$R_{180} = -21 \cdot (1 - 4 \cdot \gamma_{\text{S,R}} / 90^\circ) \quad (37)$$

with  $\gamma_{\text{S,R}}$ :

$$\text{if } \gamma_{\text{S}} > 21,5^\circ, \text{ then } \gamma_{\text{S,R}} = 21,5^\circ \quad (38)$$

$$\text{otherwise } \gamma_{\text{S,R}} = \gamma_{\text{S}} \quad (39)$$

$$R_{\text{WBL}} = \left( -64,5 \cdot \sqrt{\sin(\text{abs}(\gamma_{\text{S}}))} + R_{\text{WBL},0} \right) \cdot (1 - \gamma_F / 180^\circ) + R_{\text{WBL},1} \quad (40)$$

with  $R_{\text{WBL},0}$ : if  $\gamma_{\text{S}} < 30^\circ$ , then

$$R_{\text{WBL},0} = 6 \cdot \left( 1 - ((\gamma_{\text{S}} - 15^\circ) / 15^\circ)^2 \right) \quad (41)$$

otherwise  $R_{\text{WBL},0} = 0$

$$R_{\text{WBL},1} = -6,5 \cdot \left( 1 - ((\gamma_F - 40^\circ) / 45^\circ)^2 \right) \quad (42)$$

if  $R_{\text{WBL},1} > 0$ , then  $R_{\text{WBL},1} = 0$

$$R_{\text{WBNL}} = (26/2) \cdot (1 - \cos(2 \cdot \gamma_F)) \quad (43)$$

$$R_{\xi} = (126,5 - 60 \cdot \sin \gamma_{\text{S}}) \cdot ((\cos \xi + 0,7) / 1,7)^2 \quad (44)$$

where

$\xi$  irradiation angle according to Equation (11),  
in degrees

### Umrechnung auf beliebig orientierte und beliebig geneigte Fläche

Die Umrechnung der diffusen Strahlung von der horizontalen Fläche auf die beliebig orientierte und beliebig geneigte Fläche erfolgt dann bei **gleichmäßig bedecktem Himmel** in Analogie zur Tageslichtberechnung nach DIN 5034-2, Gleichung (49):

$$\begin{aligned} P_{\text{diff,bed,F}}(SSW = 0) \\ = P_{\text{diff,bed,hor}}(SSW = 0) \cdot R_{\text{diff,bed}} \end{aligned} \quad \text{in W/m}^2 \quad (45)$$

und bei **wolkenlosem klarem Himmel**:

$$\begin{aligned} P_{\text{diff,klar,F}}(SSW = 1) \\ = P_{\text{diff,klar,hor}}(SSW = 1) \cdot R_{\text{diff,klar}} \end{aligned} \quad \text{in W/m}^2 \quad (46)$$

Bei **gemischt bewölktem Himmel** mit einer Bedeckung von  $0 \leq SSW < 1$  sind für die Umrechnung der diffusen Strahlung je eine Berechnung für den bedeckten und den wolkenlosen klaren Himmel nach Gleichung (47) und Gleichung (48) durchzuführen. Dabei werden die beiden Anteile an der diffusen Strahlung in Abhängigkeit von der Sonnenwahrscheinlichkeit gewichtet.

Anteil vom wolkenlosen klaren Himmel:

$$\begin{aligned} P_{\text{diff,klar,F}}(SSW) \\ = P_{\text{diff,klar,F}}(SSW = 1) \cdot SSW \end{aligned} \quad \text{in W/m}^2 \quad (47)$$

Anteil vom gleichmäßig bedeckten Himmel:

$$\begin{aligned} P_{\text{diff,bed,F}}(SSW) &= P_{\text{diff,bed,F}}(SSW = 0) \\ &\quad \cdot (1 - SSW) \cdot F_B(SSW) \end{aligned} \quad \text{in W/m}^2 \quad (48)$$

Gesamte diffuse Einstrahlung bei gemischt bewölktem Himmel:

$$\begin{aligned} P_{\text{diff,F}}(SSW) &= P_{\text{diff,klar,F}}(SSW) \\ &\quad + P_{\text{diff,bed,F}}(SSW) \end{aligned} \quad \text{in W/m}^2 \quad (49)$$

$SSW$  ist dabei die Sonnenwahrscheinlichkeit für die zu berechnende Stunde.

### 7.3 Bodenreflexion auf die beliebig orientierte und beliebig geneigte Fläche

Für die Bodenreflexion gilt:

$$\begin{aligned} P_{\text{Umg,F}}(SSW) &= (P_{\text{diff,hor}}(SSW) + P_{\text{dir,hor}}(SSW)) \\ &\quad \cdot 0,5 \cdot \rho_{\text{Umg}} \cdot (1 - \cos \gamma_F) \end{aligned} \quad \text{in W/m}^2 \quad (50)$$

wobei in der Regel mit einem Bodenreflexionsgrad  $\rho_{\text{Umg}} = 0,2$  gerechnet wird, sofern keine detaillierten Angaben vorhanden und notwendig sind.

### 7.4 Berücksichtigung einer Horizontüberhöhung bei der diffusen Einstrahlung

Bei der Ermittlung der diffusen Einstrahlung mit Gleichung (33), Gleichung (34) und Gleichung (50)

### Conversion to surface area with any orientation and any inclination

The calculation of the diffuse radiation from the horizontal surface area to the surface area with any orientation and inclination at **uniformly overcast sky** is then implemented in analogy to the daylight calculation according to DIN 5034-2, Equation (49):

$$\begin{aligned} P_{\text{diff,bed,F}}(SSW = 0) \\ = P_{\text{diff,bed,hor}}(SSW = 0) \cdot R_{\text{diff,bed}} \end{aligned} \quad \text{in W/m}^2 \quad (45)$$

and at **cloudless and clear sky**:

$$\begin{aligned} P_{\text{diff,klar,F}}(SSW = 1) \\ = P_{\text{diff,klar,hor}}(SSW = 1) \cdot R_{\text{diff,klar}} \end{aligned} \quad \text{in W/m}^2 \quad (46)$$

In the event of **skies with mixed clouds** with a cloudiness of  $0 \leq SSW < 1$ , one calculation for the overcast and one calculation for the cloudless sky must be implemented in each case according to Equation (47) and Equation (48) for the conversion of the diffuse radiation. In this, the two shares in the diffuse radiation are weighted depending on the solar probability.

Share of cloudless, clear sky:

$$\begin{aligned} P_{\text{diff,klar,F}}(SSW) \\ = P_{\text{diff,klar,F}}(SSW = 1) \cdot SSW \end{aligned} \quad \text{in W/m}^2 \quad (47)$$

Share of uniformly overcast sky:

$$\begin{aligned} P_{\text{diff,bed,F}}(SSW) &= P_{\text{diff,bed,F}}(SSW = 0) \\ &\quad \cdot (1 - SSW) \cdot F_B(SSW) \end{aligned} \quad \text{in W/m}^2 \quad (48)$$

Overall diffuse irradiation at skies with mixed clouds:

$$\begin{aligned} P_{\text{diff,F}}(SSW) &= P_{\text{diff,klar,F}}(SSW) \\ &\quad + P_{\text{diff,bed,F}}(SSW) \end{aligned} \quad \text{in W/m}^2 \quad (49)$$

In this,  $SSW$  is the solar probability for the hour to be calculated.

### 7.3 Ground reflexion onto the surface area with any orientation and inclination

The following is applicable to ground reflexion:

$$\begin{aligned} P_{\text{Umg,F}}(SSW) &= (P_{\text{diff,hor}}(SSW) + P_{\text{dir,hor}}(SSW)) \\ &\quad \cdot 0,5 \cdot \rho_{\text{Umg}} \cdot (1 - \cos \gamma_F) \end{aligned} \quad \text{in W/m}^2 \quad (50)$$

whereby normally calculations are implemented with a degree of ground reflexion  $\rho_{\text{Umg}} = 0,2$ , unless detailed information is available and required.

### 7.4 Consideration of horizon vertical exaggeration for diffuse irradiation

When determining the diffuse irradiation with Equation (33), Equation (34), and Equation (50) no

ist keine Horizontüberhöhung (bzw. Verbauung) berücksichtigt.

Soll eine Horizontüberhöhung einbezogen werden, lässt sich dies für den Fall einer nahezu gleichmäßigen Horizontüberhöhung durch Berücksichtigung des Überhöhungswinkels  $\chi$  erreichen.

Anstelle des Neigungswinkels  $\gamma_F$  wird hierzu in Gleichung (33) und Gleichung (50) der Winkel  $\alpha_\chi$  eingesetzt:

$$\begin{aligned} \alpha_\chi &= \gamma_F + \chi \\ \text{wenn } \gamma_F - \chi < 0^\circ, & \text{ dann } \alpha_\chi = 2 \cdot \chi \\ \text{wenn } \alpha_\chi < 0^\circ, & \text{ dann } \alpha_\chi = 0^\circ \\ \text{wenn } \alpha_\chi > 180^\circ, & \text{ dann } \alpha_\chi = 180^\circ \end{aligned} \quad (51)$$

Der Überhöhungswinkel  $\chi$  kann grundsätzlich einen Wert zwischen  $-90^\circ$  und  $90^\circ$  annehmen, in der Praxis treten in der Regel keine negativen Werte auf.

Somit wird entsprechend Gleichung (33) der Umrechnungsfaktor  $R_{\text{diff,bed}}(\chi)$  verallgemeinert zu:

$$R_{\text{diff,bed}}(\chi) = 0,182 \cdot \left[ 1,178 \cdot (1 + \cos \alpha_\chi) + \left( \pi - \frac{\alpha_\chi \cdot \pi}{180^\circ} \right) \cdot \cos \alpha_\chi + \sin \alpha_\chi \right] \quad (52)$$

Die Bodenreflexionsstrahlung nach Gleichung (50) wird verallgemeinert zu:

$$P_{\text{Umg,F}}(SSW, \chi) = (P_{\text{diff,hor}}(SSW) + P_{\text{dir,hor}}(SSW)) \cdot 0,5 \cdot \rho_{\text{Umg}} \cdot (1 - \cos \alpha_\chi) \quad \text{in W/m}^2 \quad (53)$$

Der Umrechnungsfaktor  $R_{\text{diff,klar}}(\chi)$  lässt sich dann näherungsweise aus dem Wert  $R_{\text{diff,klar}}(\chi = 0^\circ)$  nach Gleichung (34) ermitteln zu:

$$R_{\text{diff,klar}}(\chi) = R_{\text{diff,bed}}(\chi) + \left( (R_{180} + R_{\text{WBL}} + R_{\text{WBNL}} + R_\xi) / 100 \right) \cdot \frac{R_{\text{diff,bed}}(\chi)}{R_{\text{diff,bed}}(\chi = 0)} \quad (54)$$

**Anmerkung:** Die Horizontüberhöhung  $\chi$  wird ebenfalls bei der Berechnung des Transmissionsgrades für Umgebungsstrahlung  $\tau_{\text{Umg}}$  in Gleichung (65) berücksichtigt.

## 8 Ermittlung der kurzwelligen Strahlung durch beliebig orientierte und beliebig geneigte transparente Flächen (einschließlich Sonnenschutz)

Der Wärmeeintrag in den Raum  $P_{\text{Raum}}$  durch eine transparente Fläche ermittelt sich grundsätzlich nach Gleichung (55) bzw. Gleichung (56) für jeden der vier Einstrahlungskomponenten auf eine beliebig geneigte und beliebig orientierte Fläche:

- direkte Einstrahlung  $P_{\text{dir,F}}$
- diffuse Einstrahlung (Anteil wolkenloser klarer Himmel)  $P_{\text{diff,klar,F}}$
- diffuse Einstrahlung (Anteil gleichmäßig bedeckter Himmel)  $P_{\text{diff,bed,F}}$
- Bodenreflexionsstrahlung (Umgebung)  $P_{\text{Umg,F}}$

horizon vertical exaggeration (or obstruction) is taken into consideration.

If additional horizon vertical exaggeration is to be taken into consideration, this can be achieved for the case of a virtually uniform horizon vertical exaggeration by taking into consideration the vertical exaggeration angle  $\chi$ .

Instead of angle of inclination  $\gamma_F$  angle  $\alpha_\chi$  is set in Equation (33) and Equation (50):

$$\begin{aligned} \alpha_\chi &= \gamma_F + \chi \\ \text{if } \gamma_F - \chi < 0^\circ, & \text{ then } \alpha_\chi = 2 \cdot \chi \\ \text{if } \alpha_\chi < 0^\circ, & \text{ then } \alpha_\chi = 0^\circ \\ \text{if } \alpha_\chi > 180^\circ, & \text{ then } \alpha_\chi = 180^\circ \end{aligned} \quad (51)$$

The vertical exaggeration angle  $\chi$  basically can be a value between  $-90^\circ$  and  $90^\circ$ ; in practice no negative values can be found normally.

Thus, according to Equation (33) the conversion factor  $R_{\text{diff,bed}}(\chi)$  is generalised to become:

The ground reflexion radiation according to (50) is generalised to become:

The conversion factor  $R_{\text{diff,klar}}(\chi)$  can then be determined by approximation from the value  $R_{\text{diff,klar}}(\chi = 0^\circ)$  according to Equation (34) with:

**Note:** The horizon elevation  $\chi$  is also taken into consideration in Equation (65) when calculating the transmittance for the ambient radiation  $\tau_{\text{Umg}}$ .

## 8 Determination of the short-wave radiation due to transparent surface areas with any orientation and inclination (including solar protection)

The heat input into the room  $P_{\text{Raum}}$  through a transparent surface area is basically determined according to Equation (55) or Equation (56) for each of the four irradiation components onto a surface area with any inclination and any orientation:

- direct irradiation  $P_{\text{dir,F}}$
- diffuse irradiation (share of cloudless clear sky)  $P_{\text{diff,klar,F}}$
- diffuse irradiation (share of uniformly overcast sky)  $P_{\text{diff,bed,F}}$
- ground reflexion radiation (environment)  $P_{\text{Umg,F}}$



Für die Fensterkombination bei geöffnetem beweglichen Sonnenschutz gilt:

$$P_{\text{Raum}} = P_{\text{F}} \cdot g \cdot kor_g \quad \text{in W/m}^2 \quad (55)$$

Für die Fensterkombination mit geschlossenem beweglichen Sonnenschutz gilt:

$$P_{\text{Raum}} = P_{\text{F}} \cdot g_{\text{tot}} \cdot kor_g \quad \text{in W/m}^2 \quad (56)$$

Dabei ist

$P_{\text{F}}$  Einstrahlung auf eine beliebig geneigte und beliebig orientierte Fläche, unterschieden nach den vier Einstrahlungskomponenten:

$P_{\text{dir},\text{F}}$  nach Gleichung (29)

$P_{\text{diff},\text{klar},\text{F}}$  nach Gleichung (47)

$P_{\text{diff},\text{bed},\text{F}}$  nach Gleichung (48)

$P_{\text{Umg},\text{F}}$  nach Gleichung (50)

$g$  Gesamtenergiedurchlassgrad für die Fensterkombination bei geöffnetem beweglichen Sonnenschutz (Werte nach Bundesanzeiger oder VDI 6007 Blatt 2)

Der  $g$ -Wert ist ermittelt für quasi-parallele senkrechte Einstrahlung.

$g_{\text{tot}}$  Gesamtenergiedurchlassgrad für die Fensterkombination bei geschlossenem beweglichen Sonnenschutz (Werte nach VDI 6007 Blatt 2)

Der  $g_{\text{tot}}$ -Wert ist ermittelt für quasi-parallele (senkrechte) Einstrahlung.

**Anmerkung:** Beim  $g_{\text{tot}}$ -Wert wird unterschieden zwischen

- der direkten Strahlung  $g_{\text{tot},\text{dir}}$  und
- der diffusen Strahlung  $g_{\text{tot},\text{diff}}$ .

Eine weitere Differenzierung nach Art der diffusen Strahlung wird nicht vorgenommen.

$kor_g$  Korrektur des  $g$ -Werts bzw. des  $g_{\text{tot}}$ -Werts für nicht senkrechten und nicht parallelen Strahlungseinfall auf die transparente Fläche, unterschieden nach den vier Einstrahlungskomponenten:

$P_{\text{dir},\text{F}}$  nach Gleichung (29)

$P_{\text{diff},\text{klar},\text{F}}$  nach Gleichung (47)

$P_{\text{diff},\text{bed},\text{F}}$  nach Gleichung (48)

$P_{\text{Umg},\text{F}}$  nach Gleichung (50)

sowie unterschieden nach Zustand des Sonnenschutzes,

- geöffneter beweglicher Sonnenschutz oder
- geschlossener beweglicher Sonnenschutz,

bei außen liegendem oder bei innen liegendem (bzw. zwischen liegendem) Sonnenschutz

The following is applicable for window combination with open moving solar protection:

$$P_{\text{Raum}} = P_{\text{F}} \cdot g \cdot kor_g \quad \text{in W/m}^2 \quad (55)$$

The following is applicable for window combination with closed moving solar protection:

$$P_{\text{Raum}} = P_{\text{F}} \cdot g_{\text{tot}} \cdot kor_g \quad \text{in W/m}^2 \quad (56)$$

where

$P_{\text{F}}$  irradiation onto a surface area with any orientation and inclination, differentiated according to the four irradiation components:

$P_{\text{dir},\text{F}}$  according to Equation (29)

$P_{\text{diff},\text{klar},\text{F}}$  according to Equation (47)

$P_{\text{diff},\text{bed},\text{F}}$  according to Equation (48)

$P_{\text{Umg},\text{F}}$  according to Equation (50)

$g$  total energy transmittance for the window combination with open moving solar protection (values according to Federal Gazette or VDI 6007 Part 2).

The  $g$  value is determined for the quasi-parallel vertical irradiation.

$g_{\text{tot}}$  total energy transmittance for the window combination with closed moving solar protection (values according to VDI 6007 Part 2).

The  $g_{\text{tot}}$  value is determined for the quasi-parallel (vertical) irradiation.

**Note:** Regarding the  $g_{\text{tot}}$  value the differentiation is made between

- direct radiation  $g_{\text{tot},\text{dir}}$  and
- diffuse radiation  $g_{\text{tot},\text{diff}}$ .

There is no further differentiation regarding the type of diffuse radiation.

$kor_g$  correction of the  $g$  value or the  $g_{\text{tot}}$  value for non-vertical and non-parallel radiation incidence onto the transparent surface area, differentiated according to the four radiation components:

$P_{\text{dir},\text{F}}$  according to Equation (29)

$P_{\text{diff},\text{klar},\text{F}}$  according to Equation (47)

$P_{\text{diff},\text{bed},\text{F}}$  according to Equation (48)

$P_{\text{Umg},\text{F}}$  according to Equation (50)

as well as differentiated according to the condition of the solar protection,

- open moving solar protection or
- closed moving solar protection;

with external or internal (e.g. intermediate) solar protection.

Der Wärmeeintrag  $P_{\text{Raum}}$  einer transparenten Fläche besteht zum Teil aus Konvektion, zum Teil aus Strahlung. Das Verhältnis dieser Anteile wird durch den Parameter Konvektivanteil  $a_{\text{kon}}$  beschrieben (Werte nach VDI 6007 Blatt 2)

Aus den Berechnungswerten der VDI 6007 Blatt 2 kann mit guter Näherung gelten:

$$a_{\text{kon}} = (q_{i,c} + q_{i,v}) / g \quad (57)$$

bzw.

$$a_{\text{kon}} = (q_{i,c} + q_{i,v})_{\text{tot}} / g_{\text{tot}} \quad (58)$$

Dabei ist

- $q_{i,c}$  konvektiver Anteil des sekundären Wärmeabgabegrads  
 $q_{i,v}$  ein durch Hinterlüftung bedingter Anteil des sekundären Wärmeabgabegrads

### 8.1 Korrekturwerte $kor_g$ und $kor_{\tau_e}$ bei nicht senkrechtem und nicht parallelem Strahlungseinfall

Nachfolgend wird die Ermittlung des Korrekturwerts  $kor_g$  für den Gesamtenergiedurchlassgrad  $g$  und des Korrekturwerts für die Lichtdurchlässigkeit  $kor_{\tau_e}$  bei nicht senkrechten und nicht parallelen Strahlungseinfall beschrieben.

Da bei der **direkten Sonneneinstrahlung** zwar paralleler, jedoch in der Regel kein senkrechter Strahlungseinfall vorhanden ist, muss dies durch den Einstrahlwinkel  $\zeta$  nach Gleichung (11) berücksichtigt werden:

$$kor_{g,\text{dir}} = f(\zeta)$$

Die **diffuse Sonneneinstrahlung** (einschließlich der **Bodenreflexionsstrahlung**) trifft nicht parallel und damit auch nicht senkrecht auf die betrachtete transparente Fläche auf. Daher muss dies durch ein  $kor_g$  berücksichtigt werden, wobei zu unterscheiden ist nach

- $kor_{g,\text{diff,klar}}$  Korrekturfaktor diffuse Strahlung für den wolkenlosen Himmel,
- $kor_{g,\text{diff,bed}}$  Korrekturfaktor diffuse Strahlung für den bedeckten Himmel und
- $kor_{g,\text{Umg}}$  Korrekturfaktor diffuse Strahlung für Bodenreflexion,

da die räumliche Strahlungsverteilung für alle drei Fälle unterschiedlich ist.

Die Korrekturwerte  $kor_g$  werden im Folgenden für Klarglas angegeben und sind auch mit ausreichender Genauigkeit für andere Glasarten zu verwenden. Zwar stehen für Reflexionsgläser zum Teil Angaben für die Winkelabhängigkeit für die direk-

The heat input  $P_{\text{Raum}}$  of a transparent surface area partly consists of convection and partly of radiation. The ratio of these shares is described by the parameter convective share  $a_{\text{kon}}$  (values according to VDI 6007 Part 2)

On the basis of the calculation values of VDI 6007 Part 2 the following is applicable with good approximation:

$$a_{\text{kon}} = (q_{i,c} + q_{i,v}) / g \quad (57)$$

or

$$a_{\text{kon}} = (q_{i,c} + q_{i,v})_{\text{tot}} / g_{\text{tot}} \quad (58)$$

where

- $q_{i,c}$  convective share of the secondary degree of heat dissipation  
 $q_{i,v}$  a share of secondary degree of heat dissipation contingent on back ventilation

### 8.1 Correction values $kor_g$ and $kor_{\tau_e}$ for non-vertical and non-parallel radiation incidence

In the following you will find a description of the determination of the correction value  $kor_g$  for the overall degree of energy passage  $g$  and of the correction value for translucence  $kor_{\tau_e}$  in the case of non-vertical and non-parallel radiation incidence.

As parallel, but normally no vertical radiation incidence exists in the event of **direct solar irradiation**, this must be taken into consideration by means of the irradiation angle  $\zeta$  according to Equation (11):

$$kor_{g,\text{dir}} = f(\zeta)$$

The **diffuse solar irradiation** (including the **ground reflexion radiation**) does not impinge parallel and, thus, no vertically either, on the treated transparent surface area. Therefore, this must be taken into consideration by a  $kor_g$ , whereby the following must be differentiated

- $kor_{g,\text{diff,klar}}$  correction factor diffuse radiation for cloudless skies,
- $kor_{g,\text{diff,bed}}$  correction factor diffuse radiation for overcast skies and
- $kor_{g,\text{Umg}}$  correction factor diffuse radiation for ground reflexion,

because the spatial distribution of radiation is different for all three cases.

The correction values  $kor_g$  are specified in the following for clear glass and can also be used for other types of glass with sufficient accuracy. Details for the angular dependency regarding direct solar irradiation partially are available for reflexion

te Sonneneinstrahlung zur Verfügung, aber für die drei Anteile der diffusen Strahlung gibt es in der Regel keine Angaben.

Es wird bezüglich des Einflusses der Scheibenzahl auf den  $kor_g$ -Wert nach drei Fällen unterschieden:

- eine Glasscheibe
- zwei Glasscheiben
- drei und mehr Glasscheiben

Die Berechnung des Korrekturwerts  $kor_g$  (sowie von  $kor_{\tau_e}$ ) erfolgt nach dem Berechnungsverfahren von Aydinli [1; 3].

**Anmerkung:** Bei dem Wert  $\tau_e$  handelt es sich um den energetischen Transmissionsgrad für die Verglasung. Dieser wird in VDI 6007 Blatt 2 noch unterschieden in  $\tau_{e,V}$  für den sichtbaren Bereich und in  $\tau_{e,NV}$  für den nicht sichtbaren Bereich des Sonnenspektrums. Der  $\tau_{e,V}$ -Wert darf nicht verwechselt werden mit dem Lichttransmissionsgrad (Lichtdurchlässigkeit)  $T_L$  – in VDI 6007 Blatt 2, DIN EN 13363-2 usw. auch als  $\tau_V$  bezeichnet. Beim Lichttransmissionsgrad  $T_L$  wird die Durchlässigkeit der Verglasung mit der spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges bewertet. Der Lichttransmissionsgrad  $T_L$  wird benötigt bei der Bewertung der Helligkeit im Raum – siehe Abschnitt 11.

Die Bezugsgröße zur Ermittlung aller vier  $kor_g$ -Werte ist der Wert  $g_{dir,0}$  (senkrechter paralleler Strahlungseinfall auf das Klarglas), wie er auch als Randbedingung für den  $g$ - und  $g_{tot}$ -Wert nach VDI 6007 Blatt 2 und einschlägiger Normen, u.a. DIN EN 410 usw. gilt:

*eine Glasscheibe*

$$\begin{aligned} g_{dir,0}(1) &= 0,8544 \\ \tau_{e,dir,0}(1) &= 0,8326 \end{aligned} \quad (59)$$

*zwei Glasscheiben*

$$\begin{aligned} g_{dir,0}(2) &= 0,7537 \\ \tau_{e,dir,0}(2) &= 0,6972 \end{aligned} \quad (60)$$

*drei und mehr Glasscheiben*

$$\begin{aligned} g_{dir,0}(3) &= 0,6714 \\ \tau_{e,dir,0}(3) &= 0,5861 \end{aligned} \quad (61)$$

**Anmerkung:** Die Bezugsgröße  $\tau_{e,dir,0}()$  zur Ermittlung aller vier  $kor_{\tau_e}$ -Werte wird für die Ermittlung des Grenzwerts der Einstrahlung für das Ein- bzw. Ausschalten der künstlichen Beleuchtung nach Abschnitt 11 benötigt.

Die Größen  $g_{dir,0}()$  und  $\tau_{e,dir,0}()$  können auch entsprechend Gleichung (62) und Gleichung (66) bis Gleichung (77) für **direkte** Strahlung bei  $\zeta = 0$  berechnet werden.

Der Transmissionsgrad  $\tau$  wird unterschieden für die direkte (parallele) Sonneneinstrahlung  $\tau_{dir}$  und die diffuse (gestreute) Sonneneinstrahlung  $\tau_{diff}$ .

Für Einfachglas wird der Transmissionsgrad  $\tau_{dir}$  für direkte Strahlung bei einem Reintransmissionsgrad von  $\tau_i = 1$  berechnet zu:

glasses, but normally there are no details regarding the three shares of diffuse radiation.

Regarding the influence of the number of glass panels on the  $kor_g$  value, a differentiation according to three cases is made:

- one glass panel
- two glass panels
- three and more glass panels

The calculation of the correction value  $kor_g$  (as well as  $kor_{\tau_e}$ ) is implemented according to the calculation procedure of Aydinli [1; 3].

**Note:** The value  $\tau_e$  is the energetic degree of transmission for the glazing. Within the framework of VDI 6007 Part 2 this value is differentiated into  $\tau_{e,V}$  for the visible area and into  $\tau_{e,NV}$  for the invisible area of the solar spectrum. The  $\tau_{e,V}$  value must not be confused with the degree of light transmission (translucence)  $T_L$  – in VDI 6007 Part 2, DIN EN 13363-2, etc. also called  $\tau_V$ . Regarding the degree of light transmission  $T_L$ , the permeability of the glazing is evaluated with the spectral sensitivity of the human eye. The degree of light transmission  $T_L$  is required when evaluating the brightness within a room – see Section 11.

The reference variable for determining all four  $kor_g$  values is the value  $g_{dir,0}$  (vertical parallel radiation incidence on clear glass), as it is also applicable as boundary condition for the  $g$  and  $g_{tot}$  value according to VDI 6007 Part 2 and relevant standards, DIN EN 410, etc.:

*one glass panel*

$$\begin{aligned} g_{dir,0}(1) &= 0,8544 \\ \tau_{e,dir,0}(1) &= 0,8326 \end{aligned} \quad (59)$$

*two glass panels*

$$\begin{aligned} g_{dir,0}(2) &= 0,7537 \\ \tau_{e,dir,0}(2) &= 0,6972 \end{aligned} \quad (60)$$

*three and more glass panels*

$$\begin{aligned} g_{dir,0}(3) &= 0,6714 \\ \tau_{e,dir,0}(3) &= 0,5861 \end{aligned} \quad (61)$$

**Note:** The reference variable  $\tau_{e,dir,0}()$  for determining all four  $kor_{\tau_e}$  values is required for determining the threshold of irradiation regarding the processes of activating and deactivating the artificial illumination according to Section 11.

The variables  $g_{dir,0}()$  and  $\tau_{e,dir,0}()$  can also be calculated according to Equation (62) and Equation (66) to Equation (77) for **direct** radiation at  $\zeta = 0$ .

The degree of transmission  $\tau$  is differentiated for direct (parallel) solar irradiation  $\tau_{dir}$  and diffuse (scattered) solar irradiation  $\tau_{diff}$ .

Regarding single-panel glass, the degree of transmission  $\tau_{dir}$  is calculated as follows for direct radiation with a pure degree of transmission of  $\tau_i = 1$ :

$$\tau_{\text{dir}} = \left( \left( \left( \left( A_6 \cdot \xi + A_5 \right) \cdot \xi + A_4 \right) \cdot \xi + A_3 \right) \cdot \xi + A_2 \right) \cdot \xi + A_1 \right) \cdot \xi + A_0 \quad (62)$$

wenn  $\tau_{\text{dir}} < 0$ , dann  $\tau_{\text{dir}} = 0$

mit

$$A_0 = 0,918$$

$$A_1 = 2,21 \cdot 10^{-4}$$

$$A_2 = -2,75 \cdot 10^{-5}$$

$$A_3 = -3,82 \cdot 10^{-7}$$

$$A_4 = 5,83 \cdot 10^{-8}$$

$$A_5 = -1,15 \cdot 10^{-9}$$

$$A_6 = 4,74 \cdot 10^{-12}$$

und für diffuse Strahlung bei wolkenlosem klarem Himmel  $\tau_{\text{diff,klar}}$  nach VDI 3789 Blatt 3:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{diff,klar}} = & 0,83 - 0,075 \cdot (\gamma_F / 70^\circ - 1)^2 \\ & + \left( 0,052 + 0,033 \cdot (\gamma_F / 90^\circ - 1)^2 \right) \\ & \cdot (\cos \xi + 0,15)^2 \end{aligned} \quad (63)$$

wenn  $\tau_{\text{diff,klar}} < 0$ , dann  $\tau_{\text{diff,klar}} = 0$

Dabei ist

$\gamma_F$  Neigung der betrachteten Fläche in Grad

$\xi$  Einstrahlwinkel nach Gleichung (11) in Grad

und für diffuse Strahlung gleichmäßig bedeckter Himmel  $\tau_{\text{diff,bed}}$ :

$$\tau_{\text{diff,bed}} = 0,84 \quad (64)$$

sowie für Bodenreflexionsstrahlung  $\tau_{\text{Umg}}$ :

$$\tau_{\text{Umg}} = 0,84 \cdot \left( \left( \sin \gamma_\chi \right)^{0,88 \cdot \left( 1 - 0,5 \cdot \text{abs}(\sin(2 \cdot \gamma_\chi)) \right)} \right) \quad (65)$$

Dabei ist mit  $\gamma_\chi = \gamma_F + \chi$  die Neigung der betrachteten Fläche  $\gamma_F$  und der Überhöhungswinkel  $\chi$  (beide in Grad) berücksichtigt. Für  $\gamma_\chi$  gelten folgende Grenzen:

wenn  $\gamma_\chi > 90^\circ$ , dann  $\gamma_\chi = 90^\circ$

wenn  $\gamma_\chi < 0^\circ$ , dann  $\gamma_\chi = 0^\circ$

Der Reintransmissionsgrad  $\tau_i$  berechnet sich für Einfach-Klarglas für direkte Strahlung zu:

$$\tau_{i,\text{dir}} = 0,907 \left( 1 / \left( \sqrt{1 - (\sin \xi / 1,515)^2} \right) \right) \quad (66)$$

und für diffuse Strahlung:

$$\tau_{i,\text{diff}} = 0,903 \quad (67)$$

Damit können Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrad für Einfach-Klarglas berechnet werden.

if  $\tau_{\text{dir}} < 0$ , then  $\tau_{\text{dir}} = 0$

with

$$A_0 = 0,918$$

$$A_1 = 2,21 \cdot 10^{-4}$$

$$A_2 = -2,75 \cdot 10^{-5}$$

$$A_3 = -3,82 \cdot 10^{-7}$$

$$A_4 = 5,83 \cdot 10^{-8}$$

$$A_5 = -1,15 \cdot 10^{-9}$$

$$A_6 = 4,74 \cdot 10^{-12}$$

and for diffuse radiation at cloudless clear sky  $\tau_{\text{diff,klar}}$  according to VDI 3789 Part 3:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{diff,klar}} = & 0,83 - 0,075 \cdot (\gamma_F / 70^\circ - 1)^2 \\ & + \left( 0,052 + 0,033 \cdot (\gamma_F / 90^\circ - 1)^2 \right) \\ & \cdot (\cos \xi + 0,15)^2 \end{aligned} \quad (63)$$

if  $\tau_{\text{diff,klar}} < 0$ , then  $\tau_{\text{diff,klar}} = 0$

where

$\gamma_F$  inclination of the treated surface area, in degrees

$\xi$  irradiation angle according to Equation (11), in degrees

and for diffuse radiation with uniformly overcast sky  $\tau_{\text{diff,bed}}$ :

$$\tau_{\text{diff,bed}} = 0,84 \quad (64)$$

as well as for ground reflexion radiation  $\tau_{\text{Umg}}$ :

$$\tau_{\text{Umg}} = 0,84 \cdot \left( \left( \sin \gamma_\chi \right)^{0,88 \cdot \left( 1 - 0,5 \cdot \text{abs}(\sin(2 \cdot \gamma_\chi)) \right)} \right) \quad (65)$$

where  $\gamma_\chi = \gamma_F + \chi$  takes into account the inclination of the surface  $\gamma_F$  and the elevation angle  $\chi$  (both in degrees). The following limits apply to  $\gamma_\chi$ :

if  $\gamma_\chi > 90^\circ$ , then  $\gamma_\chi = 90^\circ$

if  $\gamma_\chi < 0^\circ$ , then  $\gamma_\chi = 0^\circ$

The pure degree of transmission  $\tau_i$  is calculated as follows for single-panel clear glass for direct radiation:

$$\tau_{i,\text{dir}} = 0,907 \left( 1 / \left( \sqrt{1 - (\sin \xi / 1,515)^2} \right) \right) \quad (66)$$

and for diffuse radiation:

$$\tau_{i,\text{diff}} = 0,903 \quad (67)$$

This way, the degrees of transmission, reflexion, and absorption can be calculated for single-panel clear glass.

Transmissionsgrad für Einfach-Klarglas:

$$\tau_1 = \tau \cdot \tau_i \quad (68)$$

mit  $\tau$  sowie  $\tau_i$ :

alternativ:  $\tau_{\text{dir}}$  nach Gleichung (62) sowie  $\tau_{i,\text{dir}}$  nach Gleichung (66) oder

$\tau_{\text{diff,klar}}$  nach Gleichung (63) sowie  $\tau_{i,\text{diff}}$  nach Gleichung (67) oder

$\tau_{\text{diff,bed}}$  nach Gleichung (64) sowie  $\tau_{i,\text{diff}}$  nach Gleichung (67) oder

$\tau_{\text{Umg}}$  nach Gleichung (65) sowie  $\tau_{i,\text{diff}}$  nach Gleichung (67)

Reflexionsgrad für Einfach-Klarglas:

$$\rho_1 = \rho_{11} + \left( \left( (1 - \rho_{11}) \cdot \tau_i \right)^2 \cdot \rho_{11} \right) / \left( 1 - (\rho_{11} \cdot \tau_i)^2 \right) \quad (69)$$

mit

$$\rho_{T1} = 1 - \tau$$

$$\rho_{11} = \rho_{T1} / (2 - \rho_{T1})$$

Absorptionsgrad für Einfach-Klarglas:

$$a_1 = 1 - \tau_1 - \rho_1 \quad (70)$$

Man erhält damit nun die Korrekturwerte  $kor_g$  und  $kor_{\tau_e}$  für ein, zwei und mehr Scheiben.

Die Unterscheidung nach Strahlungsart von  $kor_g$  in  $kor_{g,\text{dir}}$ ,  $kor_{g,\text{diff,bed}}$ ,  $kor_{g,\text{diff,klar}}$  und  $kor_{g,\text{diff,Umg}}$  erfolgt durch Einsetzen des entsprechenden Werts für  $\tau_e$ , nämlich  $\tau_{e,\text{dir}}$ ,  $\tau_{e,\text{diff,klar}}$  und  $\tau_{e,\text{diff,Umg}}$ . Entsprechend ist bei der Berechnung von  $kor_{\tau_e}$  zu verfahren, das heißt berechnet wird jeweils  $kor_{\tau_e,\text{dir}}$ ,  $kor_{\tau_e,\text{diff,bed}}$ ,  $kor_{\tau_e,\text{diff,klar}}$  und  $kor_{\tau_e,\text{diff,Umg}}$ .

**$kor_g$  und  $kor_{\tau_e}$  für Einfach-Klarglas**

$$kor_g = (\tau_1 + Q_{\text{sek},1}) / g_{\text{dir},0} \quad (1) \quad (71)$$

und

$$kor_{\tau_e} = \tau_1 / \tau_{e,\text{dir},0} \quad (1) \quad (72)$$

mit

$$Q_{\text{sek},1} = a_1 \cdot (7,7 / (7,7 + 25)) \quad (73)$$

**$kor_g$  und  $kor_{\tau_e}$  für Zweifach-Klarglas**

$$kor_g = (\tau_2 + Q_{\text{sek},2}) / g_{\text{dir},0} \quad (2) \quad (74)$$

und

$$kor_{\tau_e} = \tau_2 / \tau_{e,\text{dir},0} \quad (2) \quad (75)$$

mit

$$Q_{\text{sek},2} = Q_{21} + Q_{22}$$

$$Q_{21} = a_1 \cdot (1 + (\tau_1 \cdot \rho_1 / X_{N2})) \cdot U / 25$$

$$Q_{22} = a_1 \cdot (\tau_1 / X_{N2}) \cdot (1 - U / 7,7)$$

Degree of transmission for single-panel clear glass:

$$\tau_1 = \tau \cdot \tau_i \quad (68)$$

with  $\tau$  and  $\tau_i$ :

alternatively:  $\tau_{\text{dir}}$  according to Equation (62) and  $\tau_{i,\text{dir}}$  according to Equation (66) or

$\tau_{\text{diff,klar}}$  according to Equation (63) and  $\tau_{i,\text{diff}}$  according to Equation (67) or

$\tau_{\text{diff,bed}}$  according to Equation (64) and  $\tau_{i,\text{diff}}$  according to Equation (67) or

$\tau_{\text{Umg}}$  according to Equation (65) and  $\tau_{i,\text{diff}}$  according to Equation (67)

Degree of reflexion for single-panel clear glass:

$$\rho_1 = \rho_{11} + \left( \left( (1 - \rho_{11}) \cdot \tau_i \right)^2 \cdot \rho_{11} \right) / \left( 1 - (\rho_{11} \cdot \tau_i)^2 \right) \quad (69)$$

with

$$\rho_{T1} = 1 - \tau$$

$$\rho_{11} = \rho_{T1} / (2 - \rho_{T1})$$

Degree of absorption for single-panel clear glass:

$$a_1 = 1 - \tau_1 - \rho_1 \quad (70)$$

On the basis of the aforementioned you now have the correction values  $kor_g$  and  $kor_{\tau_e}$  for one, two, and more glass panels.

The differentiation of  $kor_g$  by radiation type in  $kor_{g,\text{dir}}$ ,  $kor_{g,\text{diff,bed}}$ ,  $kor_{g,\text{diff,klar}}$  and  $kor_{g,\text{diff,Umg}}$  takes place by substituting the appropriate value for  $\tau_e$ , i.e.  $\tau_{e,\text{dir}}$ ,  $\tau_{e,\text{diff,klar}}$  and  $\tau_{e,\text{diff,Umg}}$ . The same approach should be taken when calculating  $kor_{\tau_e}$ , i.e.  $kor_{\tau_e,\text{dir}}$ ,  $kor_{\tau_e,\text{diff,bed}}$ ,  $kor_{\tau_e,\text{diff,klar}}$  and  $kor_{\tau_e,\text{diff,Umg}}$  are calculated as relevant.

**$kor_g$  and  $kor_{\tau_e}$  for single-panel clear glass**

$$kor_g = (\tau_1 + Q_{\text{sek},1}) / g_{\text{dir},0} \quad (1) \quad (71)$$

and

$$kor_{\tau_e} = \tau_1 / \tau_{e,\text{dir},0} \quad (1) \quad (72)$$

with

$$Q_{\text{sek},1} = a_1 \cdot (7,7 / (7,7 + 25)) \quad (73)$$

**$kor_g$  and  $kor_{\tau_e}$  for two-panel clear glass**

$$kor_g = (\tau_2 + Q_{\text{sek},2}) / g_{\text{dir},0} \quad (2) \quad (74)$$

and

$$kor_{\tau_e} = \tau_2 / \tau_{e,\text{dir},0} \quad (2) \quad (75)$$

with

$$Q_{\text{sek},2} = Q_{21} + Q_{22}$$

$$Q_{21} = a_1 \cdot (1 + (\tau_1 \cdot \rho_1 / X_{N2})) \cdot U / 25$$

$$Q_{22} = a_1 \cdot (\tau_1 / X_{N2}) \cdot (1 - U / 7,7)$$

$$\tau_2 = \tau_1^2 / X_{N2}$$

$$X_{N2} = 1 - \rho_1^2$$

wenn  $X_{N2} = 0$ , dann  $X_{N2} = 10^{-20}$

Dabei ist

$U$  Wärmedurchgangskoeffizient des Fensters

**$kor_g$  und  $kor_{\tau_e}$  für Dreifach-Klarglas oder mehr Scheiben**

$$kor_g = (\tau_3 + Q_{\text{sek},3}) / g_{\text{dir},0} (3) \quad (76)$$

und

$$kor_{\tau_e} = \tau_3 / \tau_{e,\text{dir},0} (3) \quad (77)$$

mit

$$Q_{\text{sek},3} = Q_{31} + Q_{32} + Q_{33}$$

$$Q_{31} = a_1 \cdot \left( 1 + \left( \tau_1 \cdot \rho_1 \cdot (X_{N2} + \tau_1^2) \right) \right) / X_{N3} \cdot U / 25$$

$$Q_{32} = a_1 \cdot \left( \tau_1 \cdot (X_{N2} + \tau_1 \cdot \rho_1) / X_{N3} \right) \cdot 0,5 \cdot (1 - U / 7,7 + U / 25)$$

$$Q_{33} = a_1 \cdot \left( \tau_1^2 / X_{N3} \right) \cdot (1 - U / 7,7)$$

$$X_{N3} = X_{N2}^2 - (\tau_1 \cdot \rho_1)^2$$

wenn  $X_{N3} = 0$ , dann  $X_{N3} = 10^{-20}$

$$\tau_3 = \tau_1^3 / X_{N3}$$

Dabei ist

$U$  Wärmedurchgangskoeffizient des Fensters

## 8.2 Rückwirkung eines außen liegenden Sonnenschutzes auf $kor_g$ und $kor_{\tau_e}$

Bei einem geschlossenen außen liegenden beweglichen Sonnenschutz wird die direkte (parallele) Sonneneinstrahlung voll ausgeblendet. Es fällt nur noch diffuse und gestreute Sonneneinstrahlung auf die Verglasung. Daher wird für den Fall „geschlossener außen liegender beweglicher Sonnenschutz“ für alle vier Strahlungsarten  $kor_{g,\text{diff},\text{bed}}$  verwendet.

Es gilt damit:

$$kor_{g,*} = kor_{g,\text{diff},\text{bed}} \quad (78)$$

Entsprechendes gilt für  $kor_{\tau_e}$ :

$$kor_{\tau_e,*} = kor_{\tau_e,\text{diff},\text{bed}} \quad (79)$$

Bei innen liegendem (und auch bei zwischen den Scheiben liegendem) beweglichem Sonnenschutz sind auch im Fall des geschlossenen Sonnenschutzes die  $kor_g$ -Werte (und entsprechend auch die  $kor_{\tau_e}$ -Werte) nach Gleichung (62) bis Gleichung (77) zu verwenden.

$$\tau_2 = \tau_1^2 / X_{N2}$$

$$X_{N2} = 1 - \rho_1^2$$

if  $X_{N2} = 0$ , then  $X_{N2} = 10^{-20}$

where

$U$  heat transfer coefficient of the window

**$kor_g$  and  $kor_{\tau_e}$  for three-panel clear glass or more glass panels**

$$kor_g = (\tau_3 + Q_{\text{sek},3}) / g_{\text{dir},0} (3) \quad (76)$$

and

$$kor_{\tau_e} = \tau_3 / \tau_{e,\text{dir},0} (3) \quad (77)$$

with

$$Q_{\text{sek},3} = Q_{31} + Q_{32} + Q_{33}$$

$$Q_{31} = a_1 \cdot \left( 1 + \left( \tau_1 \cdot \rho_1 \cdot (X_{N2} + \tau_1^2) \right) \right) / X_{N3} \cdot U / 25$$

$$Q_{32} = a_1 \cdot \left( \tau_1 \cdot (X_{N2} + \tau_1 \cdot \rho_1) / X_{N3} \right) \cdot 0,5 \cdot (1 - U / 7,7 + U / 25)$$

$$Q_{33} = a_1 \cdot \left( \tau_1^2 / X_{N3} \right) \cdot (1 - U / 7,7)$$

$$X_{N3} = X_{N2}^2 - (\tau_1 \cdot \rho_1)^2$$

if  $X_{N3} = 0$ , then  $X_{N3} = 10^{-20}$

$$\tau_3 = \tau_1^3 / X_{N3}$$

where

$U$  heat transfer coefficient of the window

## 8.2 Repercussion of external solar protection on $kor_g$ and $kor_{\tau_e}$

For a closed external moving solar protection the direct (parallel) solar irradiation is dismissed completely. Only diffuse and scattered solar irradiation impinges on the glazing. Therefore,  $kor_{g,\text{diff},\text{bed}}$  is used for the case “closed external moving solar protection” for all four types of radiation.

Therefore, the following is applicable:

$$kor_{g,*} = kor_{g,\text{diff},\text{bed}} \quad (78)$$

The corresponding is applicable to  $kor_{\tau_e}$ :

$$kor_{\tau_e,*} = kor_{\tau_e,\text{diff},\text{bed}} \quad (79)$$

Regarding internal moving solar protection (and also regarding solar protection between the glass panels) the  $kor_g$  values (and correspondingly the  $kor_{\tau_e}$  values as well) according to Equation (62) to Equation (77) must also be used in the case of closed solar protection.

## 9 Zusätzlicher Wärmeeintrag bei Fensterlüftung und gleichzeitig geschlossenem außen liegendem Sonnenschutz

Am geschlossenen außen liegenden Sonnenschutz wird ein Teil der Sonneneinstrahlung absorbiert und die Wärme wird mit der den Sonnenschutz umströmenden Luft abtransportiert.

Wird der dahinterliegende Raum durch eine Fensterlüftung belüftet, so wird ein Teil dieser am außen liegenden Sonnenschutz absorbierten Wärme durch die Fensterlüftung in den Raum transportiert. Dieser zusätzliche Wärmeeintrag mit der Fensterlüftung bei geschlossenem außen liegendem Sonnenschutz wird durch einen  $\Delta g_V$ -Wert berücksichtigt.

Der zusätzliche Wärmeeintrag in den Raum  $\Delta P_{\text{Raum,V}}$  mit Fensterlüftung, bezogen auf einen Quadratmeter transparente Fläche, ermittelt sich nach Gleichung (80) für die Gesamteinstrahlung auf eine beliebig geneigte und beliebig orientierte Fläche zu:

$$\Delta P_{\text{Raum,V}} = P_F \cdot \Delta g_V \quad \text{in W/m}^2 \quad (80)$$

Dabei ist

- $P_F$  gesamte Einstrahlung auf eine beliebig geneigte und beliebig orientierte Fläche
- $\Delta g_V$  Gesamtenergieeintragsgrad für die Fensterkombination bei geschlossenem beweglichen außen liegendem Sonnenschutz aufgrund einer Fensterlüftung

Anhaltswerte für den Gesamtenergieeintragsgrad  $\Delta g_V$  für die Fensterkombination bei geschlossenem beweglichen außen liegendem Sonnenschutz aufgrund einer Fensterlüftung zur Bestimmung des zusätzlichen Wärmeeintrags in den Raum ermitteln sich nach Gleichung (81).

$$\Delta g_V = a_e \cdot \text{Faktor}_{\Delta g_V} \cdot \text{Anteil\_Fläche}_{\Delta g_V} \quad (81)$$

mit

$$a_e = 1 - \rho_e - \tau_e \quad (82)$$

Dabei ist

- $a_e$  Absorptionsgrad (energetisch) des Sonnenschutzes
- $\rho_e$  Reflexionsgrad (energetisch) des Sonnenschutzes
- $\tau_e$  Transmissionsgrad (energetisch) des Sonnenschutzes
- $\rho_e$  und  $\tau_e$  nach VDI 6007 Blatt 2
- Anhaltswerte für  $\text{Faktor}_{\Delta g_V}$  entsprechend Tabelle 2

$\text{Anteil\_Fläche}_{\Delta g_V}$  wenn ein Fenster, das geöffnet/angekippt wird oder mehrere ge

## 9 Additional heat input in the event of window ventilation and simultaneously closed external solar protection

At the closed external solar protection a part of the solar irradiation is absorbed and the heat is transported together with the air flowing around the solar protection.

If the room located behind is ventilated by window ventilation, a part of the heat absorbed on the external solar protection will be transported into the room through the window ventilation. This additional heat input due to window ventilation at closed external solar protection is taken into consideration by means of a  $\Delta g_V$  value.

The additional heat input into the room  $\Delta P_{\text{Raum,V}}$  by means of window ventilation referred to one square metre of transparent surface area is determined according to Equation (80) for the overall irradiation onto a surface area with any orientation and any inclination with:

$$\Delta P_{\text{Raum,V}} = P_F \cdot \Delta g_V \quad \text{in W/m}^2 \quad (80)$$

where

- $P_F$  overall irradiation onto a surface area with any orientation and inclination
- $\Delta g_V$  overall degree of energy input for the window combination at closed moving external solar protection on the basis of window ventilation

Reference values for the overall degree of energy input  $\Delta g_V$  for the window combination at closed moving external solar protection on the basis of window ventilation regarding the determination of the additional heat input into the room can be determined according to Equation (81).

$$\Delta g_V = a_e \cdot \text{Faktor}_{\Delta g_V} \cdot \text{Anteil\_Fläche}_{\Delta g_V} \quad (81)$$

with

$$a_e = 1 - \rho_e - \tau_e \quad (82)$$

where

- $a_e$  degree of absorption (energetic) of the solar protection
- $\rho_e$  degree of reflexion (energetic) of the solar protection
- $\tau_e$  degree of transmission (energetic) of the solar protection
- $\rho_e$  and  $\tau_e$  according to VDI 6007 Part 2
- Reference values for  $\text{Faktor}_{\Delta g_V}$  according to Table 2

$\text{Anteil\_Fläche}_{\Delta g_V}$  when a window is opened/tilted or when several windows treated col

meinsam betrachtete Fenster alle gemeinsam geöffnet/angekippt werden:

$$\text{Anteil}_{\text{Fläche}}_{\Delta g_v} = 1,00$$

wenn von mehreren gemeinsam betrachteten Fenstern nur ein Teil geöffnet wird oder in einer größeren Glasfront nur ein Teil zum Lüften geöffnet werden kann:

$$\text{Anteil}_{\text{Fläche}}_{\Delta g_v} < 1,00$$

Der Wärmeeintrag  $\Delta P_{\text{Raum},V}$  ist rein konvektiv. Der gesamte Wärmeeintrag in den Raum ermittelt sich mit den Ergebnissen nach Gleichung (55) bzw. Gleichung (56) und Gleichung (80) im Moment der Fensterlüftung:

$$P_{\text{Raum,ges}} = P_{\text{Raum}} + \Delta P_{\text{Raum},V} \quad \text{in W/m}^2 \quad (83)$$

Tabelle 2. Anhaltswerte für  $\text{Faktor}_{\Delta g_v}$  [7]

Sonnen-schutz	Abstand zur Scheibe in m	$\text{Faktor}_{\Delta g_v}$
Außen-jalousie	$\leq 0,15$	0,2
Außen-jalousie	$> 0,15$ und $\leq 0,4$	0,1
Außen-jalousie	$> 0,4$	0
Screen	$\leq 0,15$	0,35
Screen	$> 0,15$ und $\leq 0,4$	0,17
Screen	$> 0,4$ m	0

## 10 Berechnung der langwelligen Ein- und Ausstrahlung während der Cooling Design Period (CDP)

In den TRY-Dateien des Deutschen Wetterdienstes (DWD) ist die langwellige Ein- und Ausstrahlung bereits enthalten. Dagegen ist die langwellige Ein- und Ausstrahlung für die Auslegungsberechnung bisher weder für eine CDP noch nach DIN 4710 festgelegt.

Die Berechnung der langwelligen Ein- und Ausstrahlung für die CDP erfolgt nach VDI 3789 Blatt 2 unter Einbezug der in [5] genannten Näherungsformeln für die TRY-Dateien des DWD. Die langwellige Ein- und Ausstrahlung wird dabei in Abhängigkeit von der Außentemperatur (Stundenwert) und dem Bewölkungsgrad (im CCD als Tagesmittelwert) berechnet. Es wird die Vorgehensregelung des DWD [5] für die TRY-Dateien gewählt:

Die detaillierte Beschreibung der langwelligen Einstrahlung des Himmels bzw. der Atmosphäre  $A$  und der langwelligen Ausstrahlung der Erdoberfläche  $E$  findet sich in [5].

lectively are opened/tilted together:

$$\text{Anteil}_{\text{Fläche}}_{\Delta g_v} = 1,00$$

when, out of several windows treated together, only a part is opened or when only a part can be opened for ventilation purposes in a larger glass facade:

$$\text{Anteil}_{\text{Fläche}}_{\Delta g_v} < 1,00$$

The heat input  $\Delta P_{\text{Raum},V}$  is purely convective. The entire heat input into the room is determined on the basis of the results according to Equation (55) or Equation (56) and Equation (80) at the moment of window ventilation:

$$P_{\text{Raum,ges}} = P_{\text{Raum}} + \Delta P_{\text{Raum},V} \quad \text{in W/m}^2 \quad (83)$$

Table 2. Reference values for  $\text{Faktor}_{\Delta g_v}$  [7]

Solar protection	Distance to the glass panel, in m	$\text{Faktor}_{\Delta g_v}$
External window blind	$\leq 0,15$	0,2
External window blind	$> 0,15$ und $\leq 0,4$	0,1
External window blind	$> 0,4$	0
Screen	$\leq 0,15$	0,35
Screen	$> 0,15$ und $\leq 0,4$	0,17
Screen	$> 0,4$ m	0

## 10 Calculation of the long-wave irradiation and radiation during the cooling design period (CDP)

The TRY files of the German Meteorological Service already contain the long-wave irradiation and radiation. On the contrary, the long-wave irradiation and radiation for the design calculation is neither specified for a CDP nor according to DIN 4710 up to this point in time.

The calculation of the long-wave irradiation and radiation for the CDP is implemented according to VDI 3789 Part 2 taking into consideration the approximation formulae for the TRY files of the German Meteorological Service mentioned in [5]. In this, the long-wave irradiation and radiation is calculated depending on the external temperature (hourly value) and the degree of cloudiness (in the CCD as daily average value). The rule of signs of the German Meteorological Service [5] is selected for the TRY files:

The detailed description of the long-wave radiation of the sky and the atmosphere  $A$  and the long-wave radiation emitted by the earth's surface  $E$  can be found in [5].



Anmerkung: In der VDI 6007 Blatt 1 werden  $A$  und  $E$  als  $E_A$  und  $E_E$  bezeichnet.

Die langwellige Einstrahlung  $A$  beträgt für den wolkenlosen klaren Himmel:

$$A(SSW=1) = 9,9 \cdot 5,671 \cdot 10^{-14} \cdot (273,15 + \vartheta_a)^6 \quad \text{in W/m}^2 \quad (84)$$

und für gemischt bewölkten und für vollständig bedeckten Himmel:

$$A(SSW) = A(SSW=1) \cdot \left[ 1 + \left( \alpha_L + (1 - (1 - SSW)/3) \cdot \alpha_M + (1 - (1 - SSW)/3)^2 \cdot \alpha_H \right) \cdot ((1 - SSW)/3)^{2,5} \right] \quad \text{in W/m}^2 \quad (85)$$

mit

$$\alpha_L = 2,30 - 7,37 \cdot 10^{-3} \cdot (273,15 + \vartheta_a) \quad (86)$$

$$\alpha_M = 2,48 - 8,23 \cdot 10^{-3} \cdot (273,15 + \vartheta_a) \quad (87)$$

$$\alpha_H = 2,89 - 1,00 \cdot 10^{-2} \cdot (273,15 + \vartheta_a) \quad (88)$$

Die langwellige Ausstrahlung der Erdoberfläche  $E$  inklusive der langwelligen Reflexionsstrahlung der Atmosphäre beträgt:

$$E = - \left[ 0,93 \cdot 5,671 \cdot 10^{-8} \cdot (273,15 + \vartheta_a)^4 + (1 - 0,93) \cdot A(SSW) \right] \quad \text{in W/m}^2 \quad (89)$$

## 11 Ermittlung der Grenzwerte der Einstrahlung für das Ein- und Ausschalten der Beleuchtung

Die Anforderungen an die Helligkeit am Arbeitsplatz ergeben sich nach DIN 5035 bzw. aus speziellen Anforderungen an den Arbeitsplatz. Auf der Basis der lichttechnischen Berechnung<sup>1)</sup> können die Nennbelastungen durch Beleuchtung ermittelt werden. Im Vorplanungsstadium können Erfahrungswerte (Mittelwerte in W/m<sup>2</sup>) verwendet werden.

Mittels Berechnung des Tageslichtquotienten<sup>2)</sup> nach DIN 5034 und dem in Folgenden angegebenen Verfahren sind die Zeitpunkte für das Ein- bzw. Ausschalten der künstlichen Beleuchtung zu berechnen.

Das im Folgenden beschriebene Berechnungsverfahren entspricht den Vorgaben für die Anforderungen an die Tageslichtsimulation nach Richtlinie VDI 6020.

Die Wärmebelastung durch Beleuchtung hat einen erheblichen Einfluss auf die Kühllast bzw. Raumtemperatur und ist für die Auslegungsberechnung zu berücksichtigen. Eine Vereinbarung mit dem Auftraggeber über einen Tagesgang der Beleuch-

Note: VDI 6007 Part 1 denotes  $A$  and  $E$  by  $E_A$  and  $E_E$ .

The long-wave irradiation  $A$  is the following for cloudless clear skies:

$$A(SSW=1) = 9,9 \cdot 5,671 \cdot 10^{-14} \cdot (273,15 + \vartheta_a)^6 \quad \text{in W/m}^2 \quad (84)$$

and for the skies with mixed clouds and for completely overcast skies:

$$A(SSW) = A(SSW=1) \cdot \left[ 1 + \left( \alpha_L + (1 - (1 - SSW)/3) \cdot \alpha_M + (1 - (1 - SSW)/3)^2 \cdot \alpha_H \right) \cdot ((1 - SSW)/3)^{2,5} \right] \quad \text{in W/m}^2 \quad (85)$$

with

$$\alpha_L = 2,30 - 7,37 \cdot 10^{-3} \cdot (273,15 + \vartheta_a) \quad (86)$$

$$\alpha_M = 2,48 - 8,23 \cdot 10^{-3} \cdot (273,15 + \vartheta_a) \quad (87)$$

$$\alpha_H = 2,89 - 1,00 \cdot 10^{-2} \cdot (273,15 + \vartheta_a) \quad (88)$$

The long-wave radiation emitted by the earth's surface  $E$  including the long-wave reflected radiation of the atmosphere is:

$$E = - \left[ 0,93 \cdot 5,671 \cdot 10^{-8} \cdot (273,15 + \vartheta_a)^4 + (1 - 0,93) \cdot A(SSW) \right] \quad \text{in W/m}^2 \quad (89)$$

## 11 Determination of the thresholds for irradiation regarding activation and deactivation of the illumination

The requirements for brightness at the workplace result from DIN 5035 or from specific requirements for the workplace. On the basis of the light-related calculation<sup>1)</sup> the nominal loads due to illumination can be determined. In the preliminary planning stage empirical values (average values in W/m<sup>2</sup>) can be used.

By means of calculating the daylight quotient<sup>2)</sup> according to DIN 5034 and the procedure specified in the following, the times for activating and deactivating the artificial illumination can be calculated.

The calculation procedure described in the following corresponds to the specifications for the requirements regarding the daylight simulation according to standard VDI 6020.

The thermal load on the basis of illumination has significant influence on the cooling load or the room temperature and must be taken into consideration for the design calculation. Concluding an agreement with the customer regarding the daily course

<sup>1)</sup> Liegen keine Berechnungen vor, können auch die Mindestbeleuchtungsstärken nach DIN V 18599-10 verwendet werden. / If there are no calculations, it is also possible to use the minimum illuminance according to DIN V 18599-10.

<sup>2)</sup> Eine Berechnung nach DIN V 18599-4 ist für Standardfälle in der Regel ausreichend. / Calculation according to DIN V 18599-4 is normally sufficient for standard cases.

tung nach Gebäudenutzung ist zulässig.

### 11.1 Natürliche Beleuchtung

Einer Tätigkeit des Menschen bei natürlicher Beleuchtung ist gegenüber künstlicher Beleuchtung in jedem Falle der Vorzug zu geben. Diese Forderung ist auch in den Bauordnungen der Länder verankert. Hinzu kommt, dass die künstliche Beleuchtung einen nicht unwesentlichen Teil des Energiebedarfs von Gebäuden ausmacht.

Das Rechenverfahren für die Ermittlung der Kühl-lasten muss deshalb in der Lage sein, den Einfluss der natürlichen Beleuchtung und damit die Ein- bzw. Ausschaltzeitpunkte der künstlichen Beleuchtung bei gegebenen Helligkeitsanforderungen zu berechnen. Entsprechendes gilt auch für die Berechnung mit einem TRY.

Alle erforderlichen Daten über Eigen- und Fremdbeschattung liegen bereits für die Berechnung der solaren Lasten vor. Um eine Tageslichtberechnung nach DIN 5034 durchzuführen, sind neben den baulichen Abmessungen nur noch die Daten für die Berechnung des Raumwirkungsgrades (Reflexionsgrade der Raumumschließungsflächen liegen bereits für die Berechnung der künstlichen Beleuchtung nach DIN 5035 vor) und die Lichtdurchlässigkeitskoeffizienten der transparenten Bauteile und des Sonnenschutzes zu erfassen.

### 11.2 Tageslichtberechnung nach DIN 5034

Der Tageslichtquotient  $D$  ist nach DIN 5034 definiert als das Verhältnis der Beleuchtungsstärke auf einem Punkt der Nutzebene im Raum  $E_p$  zur Horizontalbeleuchtungsstärke im Freien bei unverbaute Himmelskugel  $E_a$ :

$$D = E_p/E_a \quad (90)$$

Richtwerte für den Tageslichtquotienten können Architekturhandbüchern, Planungs-, aber auch Arbeitsschutz- bzw. Arbeitsstättenrichtlinien entnommen werden. Diese Richtwerte sind im Allgemeinen hier im Zusammenhang ausreichend. Eine detaillierte Berechnung kann nach DIN 5034-3 erfolgen.

**Anmerkung:** Wird der Tageslichtquotient nach DIN 5034-3 berechnet, kann für den dort verwendeten Parameter  $\tau_{65}$  der Parameter  $\tau_e$  (Herstellerangabe oder Berechnung nach VDI 6007 Blatt 2) eingesetzt werden.

### 11.3 Tageslichtsimulation

Der zeitliche Verlauf des Tageslichts auf eine horizontale Fläche im Freien aufgrund von direkter und diffuser Strahlung ist sowohl in den TRY-Daten als auch für CDP bekannt und gilt ebenso für eine HDP. Dabei ist bei gleichmäßig bedecktem Himmel die Leuchtdichteverteilung rotations-

symmetrisch. Die Berechnung der Leuchtdichte ist nach der Gebäudenutzung zulässig.

### 11.1 Natural illumination

An activity of a person at natural illumination must be preferred in any case to artificial illumination. This requirement is also established in the building regulations of the German Länder. There is also the fact that artificial illumination constitutes a significant share of the energy consumption of buildings.

Therefore, the calculation method for determining the cooling loads must be able to calculate the influence of natural illumination and, thus, the activation or deactivation times of artificial illumination at given brightness requirements. The same is applicable to the calculation using a TRY.

All required data on self-shadowing and third party shadowing are already present for the calculation of the solar loads. In order to calculate the daylight in accordance with DIN 5034, only the data for calculating the room utilisation factor (degrees of reflexion of the total enclosing wall area of a room are already present for calculating the artificial illumination according to DIN 5035) and the transmittance coefficients of the transparent components and of the solar protection must be collected, along with the structural dimensions.

### 11.2 Daylight calculation according to DIN 5034

According to DIN 5034, the daylight quotient  $D$  is defined as the ratio of the illuminance on a point of the utilisation level within the room  $E_p$  to the horizontal illuminance outdoors at unspoiled hemisphere  $E_a$ :

$$D = E_p/E_a \quad (90)$$

The reference values for the daylight quotient can be found in architecture manuals, and in planning, industrial safety, and workplaces standards. These reference values are sufficient in this context in general. A detailed calculation can be implemented according to DIN 5034-3.

**Note:** If the daylight quotient is calculated according to DIN 5034-3, parameter  $\tau_e$  (manufacturer information or calculation according to VDI 6007 Part 2) can be used for the parameter  $\tau_{65}$  used there.

### 11.3 Daylight simulation

The chronological sequence of daylight on a horizontal outdoor surface area on the basis of direct and diffuse radiation is known both in the TRY data and for the CDP and is also applicable to an HDP. In this, the distribution of the light density is rotationally symmetrical at uniformly overcast

symmetrisch. Die Beleuchtungsstärke im Raum kann für diesen Fall über den Tageslichtquotienten berechnet werden. Bei wolkenlosem bzw. bei gemischt bewölktem Himmel hingegen, ist für unterschiedlich orientierte Flächen die diffuse Einstrahlung abhängig von der Winkeldifferenz zwischen Flächen- und Sonnenazimut ( $\text{abs}(\alpha_F - \alpha_S)$ ). Selbst bei gleicher Flächenneigung differieren diese Werte bis zum Faktor 3. Damit sind auch die im TRY angegebenen Beleuchtungsstärken auf die Horizontale nicht umrechenbar auf unterschiedlich orientierte und geneigte Flächen. Hinzu kommt noch eine zusätzliche Ungenauigkeit durch die zufällig über den Himmel verteilte Bedeckung und die damit veränderte Leuchtdichtevertelung.

Grundsätzlich ist es möglich, eine Mischrechnung zwischen der im Raum wirksamen Beleuchtungsstärke bei gleichmäßig bedecktem Himmel (Berechnung über den Tageslichtquotienten) und der in einer getrennten Berechnung im Raum ermittelten Beleuchtungsstärke aufgrund diffuser Strahlung bei wolkenlosem klarem Himmel (unter Berücksichtigung von  $|\alpha_F - \alpha_S|$  nach DIN 5034) durchzuführen. Dabei müssen die Ergebnisse gewichtet werden. Danach ist die im Raum wirksame Beleuchtungsstärke aufgrund direkter Strahlung nach DIN 5034 sowie der Bodenreflexion (Umgebung) für alle Fensterflächen zu ermitteln und zu summieren.

#### 11.4 Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Ein- und Ausschaltzeitpunkte der Beleuchtung

Die Berechnung nach der vorstehend genannten Vorgehensweise ist sehr aufwendig und hat keine höhere Genauigkeit als die folgende Vereinfachung. Daher wird folgende Vorgehensweise vorgesehen:

- 1) Bestimmung Tageslichtquotienten  $D$ , entweder als Richtwert bzw. nach DIN 5034-3
- 2) Berechnung eines Grenzwerts  $E_{a,\text{grenz}}$  der Beleuchtungsstärke außen aufgrund der im Bezugspunkt im Raum gewünschten inneren Beleuchtungsstärke  $E_{i,\text{grenz}}$ :

$$E_{a,\text{grenz}} = \frac{E_{i,\text{grenz}} \cdot 100}{D} \quad \text{in lx} \quad (91)$$

- 3) Berechnung der äquivalenten Bestrahlungsstärke  $E_{\text{hor,grenz,außen}}$  in  $\text{W/m}^2$  auf eine horizontale Fläche bei gleichmäßig bedecktem Himmel mit  $E_{a,\text{grenz}}$  und dem Strahlungsäquivalent nach DIN 5034-2 für gleichmäßig bedeckten Himmel:

$$P_{\text{hor,grenz,außen}} = E_{a,\text{grenz}} / K_{\text{m,diff,bed}} \quad \text{in W/m}^2 \quad (92)$$

skies. The illuminance within the room can be calculated using the daylight quotient for this case. However, in the case of cloudless skies or skies with mixed clouds the diffuse irradiation for differently oriented surface areas depends on the angular difference between surface area and solar azimuth ( $\text{abs}(\alpha_F - \alpha_S)$ ). Even if the surface area inclination is identical, these values differ by a factor of up to 3. This way, the illuminance values on the horizontal specified within the TRY cannot be converted to differently oriented and inclined surface areas either. There is also an additional uncertainty due to the overcast spread randomly in the sky and the related changed distribution of light density.

Basically, it is possible to implement a mixed calculation between the illuminance effective within the room at uniformly overcast skies (calculation using the daylight quotient) and the illuminance within the room determined by means of a separate calculation on the basis of diffuse radiation at cloudless clear skies (taking into consideration  $|\alpha_F - \alpha_S|$  according to DIN 5034). In doing so, the results must be weighted. Afterwards, the illuminance effective within the room on the basis of direct radiation according to DIN 5034, as well as the ground reflexion (environment) must be determined and added for all window areas.

#### 11.4 Calculation procedures for determining the activation and deactivation times of the illumination

The calculation according to the approach mentioned above is very time-consuming and is not more accurate than the following simplified procedure. Therefore, the following procedure is recommended:

- 1) determination of the daylight quotient  $D$ , either as reference value or according to DIN 5034-3
- 2) calculation of a threshold  $E_{a,\text{grenz}}$  for the external illuminance on the basis of the internal illuminance  $E_{i,\text{grenz}}$  required in the reference point within the room:

$$E_{a,\text{grenz}} = \frac{E_{i,\text{grenz}} \cdot 100}{D} \quad \text{in lx} \quad (91)$$

- 3) calculation of the equivalent irradiance  $E_{\text{hor,grenz,außen}}$  in  $\text{W/m}^2$  onto a horizontal surface area at uniformly overcast skies with  $E_{a,\text{grenz}}$  and the radiation equivalent according to DIN 5034-2 for uniformly overcast skies:

$$P_{\text{hor,grenz,außen}} = E_{a,\text{grenz}} / K_{\text{m,diff,bed}} \quad \text{in W/m}^2 \quad (92)$$

Dabei ist

$K_{m,diff,bed}$  Strahlungsäquivalent für gleichmäßig bedeckten Himmel;  
 $K_{m,diff,bed} = 115 \text{ lm/W}$

Dieser Wert  $P_{hor,grenz,außen}$  entspricht dem Wert für die diffuse Einstrahlung auf eine horizontale Fläche bei **vollständig und gleichmäßig bedecktem Himmel**  $P_{diff,hor}(SSW=0)$  nach Gleichung (21) für den Grenzwert  $E_{a,grenz}$ .

- 4) Die Berechnung des in den Raum – aufgrund der äußeren Einstrahlungsstärke  $P_{hor,grenz,außen}$  bei gleichmäßig bedecktem Himmel – über alle Fenster bei geöffnetem beweglichem Sonnenschutz wirksamen Sonnenenergieeintrag im sichtbaren Bereich  $P_{Raum,diff,bed,T_L}$  erfolgt nach Gleichung (45) und nach Gleichung (50) sowie analog zu Gleichung (55).

In Gleichung (55) sind jedoch an Stelle von  $g$  und  $kor_g$  die Werte für die Lichtdurchlässigkeit  $T_L$  und  $kor_{\tau_e}$  einzusetzen.

$$P_{Raum,diff,bed,T_L} = \sum_{i=1}^n \left[ \left( P_{diff,bed,F,i}(SSW=0) \cdot T_{L,i} \cdot kor_{\tau_e,diff,bed,i} + P_{diff,bed,hor,i}(SSW=0) \cdot 0,5 \cdot \rho_{Umg,i} \cdot (1 - \cos \gamma_{F,i}) \cdot T_{L,i} \cdot kor_{\tau_e,Umg,i} \right) \cdot (1 - r_i) \cdot A_i \right] \quad \text{in W} \quad (93)$$

Dabei ist

$(1 - r_i) \cdot A_i$  Glasflächen des Raums (Fensterflächen  $A_i$  unter Berücksichtigung des Rahmenanteils  $r_i$ )

Gleichung (93) lässt sich auch wie folgt schreiben zu:

$$P_{Raum,diff,bed,T_L} = P_{hor,grenz,außen} \cdot \sum_{i=1}^n \left[ \left( R_{diff,bed,i} \cdot T_{L,i} \cdot kor_{\tau_e,diff,bed,i} + 0,5 \cdot \rho_{Umg,i} \cdot (1 - \cos \gamma_{F,i}) \cdot T_{L,i} \cdot kor_{\tau_e,Umg,i} \right) \cdot (1 - r_i) \cdot A_i \right] \quad \text{in W} \quad (94)$$

Dieser Wert  $P_{Raum,diff,bed,T_L}$  nach Gleichung (93) bzw. Gleichung (94) ist gleich dem Grenzwert im Raum  $P_{grenz,innen}$  in W (als Gesamtsolarenergieeintrag im sichtbaren Bereich bei gleichmäßig bedecktem Himmel, das heißt als Summe der Solarenergieeinträge über alle Fensterflächen) bei einer Außenbestrahlungsstärke auf die Horizontale von  $P_{hor,grenz,außen}$ . Es gilt also:

Grenzwert im Raum:

$$P_{grenz,innen} = P_{Raum,diff,bed,T_L} \quad \text{in W} \quad (95)$$

**Anmerkung:** Beim Lichttransmissionsgrad (Lichtdurchlässigkeit)  $T_L$  – in VDI 6007 Blatt 2, DIN EN 13363-2 usw. auch als  $\tau_v$  bezeichnet – wird die Durchlässigkeit der Verglasung mit der spektralen Empfindlichkeit des

where

$K_{m,diff,bed}$  radiation equivalent for uniformly overcast skies;  
 $K_{m,diff,bed} = 115 \text{ lm/W}$

This value  $P_{hor,grenz,außen}$  corresponds to the value for diffuse irradiation onto a horizontal surface area at **completely and uniformly overcast skies**  $P_{diff,hor}(SSW=0)$  according to Equation (21) for the threshold  $E_{a,grenz}$ .

- 4) The solar energy input in the visible area  $P_{Raum,diff,bed,T_L}$  effective within the room – on the basis of the external irradiance  $P_{hor,grenz,außen}$  at uniformly overcast skies – over all windows when the moving solar protection is open is calculated according to Equation (45) and according to Equation (50), as well as in analogy to Equation (55).

However, the values for translucence  $T_L$  and  $kor_{\tau_e}$  must be used for Equation (55) instead of  $g$  and  $kor_g$ .

where

$(1 - r_i) \cdot A_i$  glass surface areas of the room (window surface areas  $A_i$  taking into consideration the frame share  $r_i$ )

Equation (93) can also be converted as follows:

This value  $P_{Raum,diff,bed,T_L}$  according to Equation (93) or Equation (94) corresponds to the threshold within the room  $P_{grenz,innen}$  in W (as overall solar energy input in the visible area at uniformly overcast skies, i.e. the sum of the solar energy inputs for all window surface areas) at an external irradiance onto the horizontal of  $P_{hor,grenz,außen}$ . Therefore, the following is applicable:

Threshold within the room:

$$P_{grenz,innen} = P_{Raum,diff,bed,T_L} \quad \text{in W} \quad (95)$$

**Note:** Regarding the degree of light transmittance (translucence)  $T_L$  – in VDI 6007 Part 2, DIN EN 13363-2, etc. also called  $\tau_v$  – the permeability of the glazing is assessed with the spectral sensitivity of the human eye. The degree

menschlichen Auges bewertet. Der Lichttransmissionsgrad  $T_L$  wird benötigt bei der Bewertung der Helligkeit im Raum.

Der Lichttransmissionsgrad  $T_L$  bzw.  $\tau_V$  darf nicht mit dem  $\tau_{e,V}$ -Wert für den energetischen Transmissionsgrad im sichtbaren Bereich nach VDI 6007 Blatt 2 verwechselt werden.

- 5) Für jede zu betrachtende Stunde ist die gesamte in den Raum eintretende Solarenergie im sichtbaren Bereich  $P_{\text{Raum,L}}$  in W zu berechnen. In Gleichung (55) und Gleichung (56) sind jedoch an Stelle von  $g$ ,  $g_{\text{tot}}$  und  $kor_g$  die Werte für die Lichtdurchlässigkeit  $T_L$ ,  $T_{L,\text{tot}}$  und  $kor_{\tau_e}$  sowie zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Strahlungsäquivalente der drei Anteile der kurzwelligen Einstrahlung  $kor_{K_m,*}$  einzusetzen.

Für den sichtbaren Bereich gilt unter Berücksichtigung des jeweiligen Öffnungszustands des beweglichen Sonnenschutzes:

$$P_{\text{Raum,L}} = \sum_{i=1}^n \left[ \begin{aligned} &P_{\text{dir,F,i}}(SSW) \cdot T_{L,*,\text{dir,i}} \cdot kor_{\tau_e,\text{dir,i}} \cdot kor_{K_m,\text{dir}} \\ &+ P_{\text{diff,klar,F,i}}(SSW) \cdot T_{L,*,\text{diff,i}} \cdot kor_{\tau_e,\text{diff,klar,i}} \cdot kor_{K_m,\text{diff,klar}} \\ &+ P_{\text{diff,bed,F,i}}(SSW) \cdot T_{L,*,\text{diff,i}} \cdot kor_{\tau_e,\text{diff,bed,i}} \cdot kor_{K_m,\text{diff,bed}} \\ &+ P_{\text{bew,hor,i}}(SSW) \cdot 0,5 \cdot \rho_{\text{Umg,i}} \cdot (1 - \cos \gamma_{F,i}) \cdot kor_{\tau_e,\text{Umg,i}} \end{aligned} \right] \cdot (1 - r_i) \cdot A_i \quad \text{in W} \quad (96)$$

Dabei ist

$T_{L,*,\text{dir,i}}$  Lichttransmissionsgrad für die direkte Einstrahlung bei:  
geöffnetem beweglichem Sonnenschutz:  $T_{L,*,\text{dir,i}} = T_{L,i}$   
geschlossenem beweglichem Sonnenschutz:  $T_{L,*,\text{dir,i}} = T_{L,\text{tot,dir,i}}$

$T_{L,*,\text{diff,i}}$  Lichttransmissionsgrad für die diffuse Einstrahlung bei:  
geöffnetem beweglichem Sonnenschutz:  $T_{L,*,\text{diff,i}} = T_{L,i}$   
geschlossenem beweglichem Sonnenschutz:  $T_{L,*,\text{diff,i}} = T_{L,\text{tot,diff,i}}$

$P_{\text{bew,hor,i}}$  bewertete Sonneneinstrahlung auf die Horizontale zur Ermittlung der Bodenreflexionsstrahlung:

where

$T_{L,*,\text{dir,i}}$  degree of light transmission for direct irradiation at:  
open moving solar protection:  
 $T_{L,*,\text{dir,i}} = T_{L,i}$   
closed moving solar protection:  
 $T_{L,*,\text{dir,i}} = T_{L,\text{tot,dir,i}}$

$T_{L,*,\text{diff,i}}$  degree of light transmission for diffuse irradiation at:  
open moving solar protection:  
 $T_{L,*,\text{diff,i}} = T_{L,i}$   
closed moving solar protection:  
 $T_{L,*,\text{diff,i}} = T_{L,\text{tot,diff,i}}$

$P_{\text{bew,hor,i}}$  evaluated solar irradiation onto the horizontal for determining the ground reflexion radiation:

$$P_{\text{bew,hor,i}} = \left[ \begin{aligned} &P_{\text{dir,hor,i}}(SSW) \cdot kor_{K_m,\text{dir}} \\ &+ P_{\text{diff,klar,hor,i}}(SSW) \cdot kor_{K_m,\text{diff,klar}} \\ &+ P_{\text{diff,bed,hor,i}}(SSW) \cdot kor_{K_m,\text{diff,bed}} \end{aligned} \right] \cdot T_{L,*,\text{diff,i}} \quad \text{in W} \quad (97)$$

$kor_{K_m,\text{dir}}$  Korrekturfaktor für direkte Sonneneinstrahlung nach DIN 5034-2:

$kor_{K_m,\text{dir}}$  correction factor for direct solar irradiation according to DIN 5034-2:

$$kor_{K_m,\text{dir}} = (17,72 + 4,4585 \cdot \gamma_S^1 - 0,087563 \cdot \gamma_S^2 + 7,39487 \cdot 10^{-4} \cdot \gamma_S^3 - 2,167 \cdot 10^{-6} \cdot \gamma_S^4 - 8,4132 \cdot 10^{-10} \cdot \gamma_S^5) / 115 \quad (98)$$

$kor_{K_m, \text{diff}, \text{klar}}$  Korrekturfaktor für diffuse Einstrahlung bei wolkenlosem klarem Himmel nach DIN 5034-2:  
 $kor_{K_m, \text{diff}, \text{klar}} = 125,4/115$  (99)

Alternativ nach [6]:

$$kor_{K_m, \text{diff}, \text{klar}} = \left( \frac{15,1 + 3,1076 \cdot \gamma_S^1 + 0,0048 \cdot \gamma_S^2 - 0,0014 \cdot \gamma_S^3}{+ 2,04 \cdot 10^{-5} \cdot \gamma_S^4 - 8,91 \cdot 10^{-8} \cdot \gamma_S^5} \right) / 115 \quad (100)$$

Obige Gleichung bringt bei dem Testbeispiel 12 der VDI 6020 gegenüber dem Wert nach Gleichung (99) ca. 10% mehr Beleuchtungsbedarf. Diese Alternative nach Gleichung (100) wird für die VDI 2078 zugrunde gelegt, da sie die realen Verhältnisse besser beschreibt.

$kor_{K_m, \text{diff}, \text{bed}}$  Korrekturfaktor für diffuse Einstrahlung bei gleichmäßig bewölktem Himmel nach DIN 5034-2:  
 $kor_{K_m, \text{diff}, \text{bed}} = 115/115 = 1$  (101)

Bei geschlossenem beweglichem Sonnenschutz ist in Gleichung (96) anstelle von  $T_L$  dann  $T_{L, \text{tot}}$  einzusetzen. Bei außen liegendem Sonnenschutz ist der Zusammenhang nach Gleichung (79) zu beachten.

**Anmerkung:** Wenn der Lichttransmissionsgrad (Lichtdurchlässigkeit)  $T_L$  für die vorgesehene Verglasung (erheblich) von dem Wert nach VDI 6007 Blatt 2 abweicht, kann der dazu korrespondierende Wert  $T_{L, \text{tot}}$  (mit geschlossenem Sonnenschutz) mit ausreichender Genauigkeit nach Gleichung (102) oder Gleichung (103) ermittelt werden:

$$T_{L, \text{tot}} = T_L \cdot \frac{T_{L, \text{tot}, \text{Tabelle}}}{T_{L, \text{Tabelle}}} \quad (102)$$

bzw.

$$T_{L, \text{tot}} = T_L \cdot \frac{T_{L, \text{tot}, \text{VDI6007 Bl. 2}}}{T_{L, \text{VDI6007 Bl. 2}}} \quad (103)$$

- 6) Der Vergleich von  $P_{\text{Raum}, L}$  mit  $P_{\text{grenz}, \text{innen}}$  für jede Stunde dient als Kriterium für das Ein- bzw. Ausschalten der Beleuchtung.

Diese Vereinfachung ist unter dem Gesichtspunkt zulässig, dass die Winkelabhängigkeit der direkten Strahlung sowie der Bedeckungsgrad der diffusen Strahlung bei deren Berechnung bereits berücksichtigt werden und im Raum im Wesentlichen nur noch diffuse Strahlung ankommt, wobei die Anteile von UV- und langwelliger Strahlung durch die Verglasung reduziert werden.

Das Berechnungsverfahren sollte in der Lage sein, bei verstellbarem Sonnenschutz die Notwendigkeit des Einschaltens der künstlichen

$kor_{K_m, \text{diff}, \text{klar}}$  correction factor for diffuse irradiation at cloudless clear skies according to DIN 5034-2:  
 $kor_{K_m, \text{diff}, \text{klar}} = 125,4/115$  (99)

Alternatively according to [6]:

Regarding test example 12 of VDI 6020, the equation above results in an increase of the illumination demand by approx. 10% when compared to the value according to Equation (99). This alternative according to Equation (100) is used as the basis for VDI 2078, because it better describes the real circumstances.

$kor_{K_m, \text{diff}, \text{bed}}$  correction factor for diffuse irradiation at uniformly overcast skies according to DIN 5034-2:  
 $kor_{K_m, \text{diff}, \text{bed}} = 115/115 = 1$  (101)

When the moving solar protection is closed,  $T_{L, \text{tot}}$  must be used for Equation (96) instead of  $T_L$ . Regarding external solar protection, the context according to Equation (79) must be observed.

**Note:** If the degree of light transmittance (translucence)  $T_L$  for the designed glazing deviates (significantly) from the value according to VDI 6007 Part 2, the corresponding value  $T_{L, \text{tot}}$  (with closed solar protection) can be determined with sufficient accuracy in accordance with Equation (102) or Equation (103):

$$T_{L, \text{tot}} = T_L \cdot \frac{T_{L, \text{tot}, \text{table}}}{T_{L, \text{table}}} \quad (102)$$

or

$$T_{L, \text{tot}} = T_L \cdot \frac{T_{L, \text{tot}, \text{VDI6007 Part 2}}}{T_{L, \text{VDI6007 Part 2}}} \quad (103)$$

- 6) The comparison of  $P_{\text{Raum}, L}$  and  $P_{\text{grenz}, \text{innen}}$  for each hour serves as criterion for the activation and deactivation of the illumination.

This simplification is admissible given the fact that the angular dependency of the direct radiation, as well as the degree of overcast of the diffuse radiation are already taken into consideration during the calculation procedures and only diffuse radiation predominantly arrives in the room, whereby the shares of UV and long-wave radiation are reduced by the glazing.

In the presence of an adjustable solar protection, the calculation procedure should be able to check the necessity of activating the artificial il-

Beleuchtung zu überprüfen und das Einschalten z.B. durch Verstellen der Sonnenschutzlamellen (angepasstes Öffnen) zu vermeiden.

Die Mindestanforderungen an das Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Zeitpunkte für das Ein- bzw. Ausschalten der künstlichen Beleuchtung sind auch dann erfüllt, wenn ein anderes Verfahren gleichwertige Ergebnisse liefert.

## 12 Sonneneinstrahlung und Beschattung

Die Berechnung der kurzwelligen Einstrahlung auf beliebig orientierte und geneigte Bauteile sowie die Durchstrahlung transparenter Bauteile ist in Abschnitt 7 und Abschnitt 8 beschrieben. Nachfolgend werden Hinweise und Algorithmen für die Bewertung der Beschattung von Bauteilen gegeben. Dabei werden die Eigenbeschattung und die Fremdbeschattung für die direkte Strahlung nach Abschnitt 12.1 und Abschnitt 12.2 berücksichtigt. Der Einfluss der Horizontüberhöhung auf die diffuse Strahlung erfolgt nach Abschnitt 12.3.

### 12.1 Eigenbeschattung durch Vorsprünge bei direkter Strahlung

Bei gegliederten Fassaden bzw. zurückgesetzten Fenstern ist oft nicht die gesamte Fläche  $A$  der Sonnenstrahlung ausgesetzt. Durch wenige geometrische Größen kann die besonnte Fläche  $A_s$  bestimmt werden. Bild 1 zeigt die Zusammenhänge für den Sonderfall einer senkrechten Fläche.

**Berechnung der Fläche  $A_s$ , die bei Eigenbeschattung von der direkten Sonneneinstrahlung bestrahlt wird (beliebige orientierte und beliebig geneigte Fläche)**

Winkelbezeichnung (siehe Abschnitt 5):

- Sonnenazimut  $\alpha_s$
- Himmelsrichtung der Fläche  $\alpha_F$
- Neigung der Fläche  $\gamma_F$
- Einstrahlwinkel auf die Fläche (zur Flächen-Normalen)  $\xi$

#### Definition der Bezeichnung der Beschattung

Damit direkte Sonneneinstrahlung auf eine betrachtete Fläche möglich ist, muss gelten:

$$\cos \xi > 0$$

$\cos \xi$  errechnet sich nach Gleichung (11),

wenn  $\cos \xi \leq 0$ , dann:

$$\bullet \quad e_{h,N} = 10^{20} \quad (104)$$

$$\bullet \quad e_{v,N} = 10^{20} \quad (105)$$

$$\text{sonst} \quad e_{h,N} = \sin(\alpha_F - \alpha_s) \cdot \cos \gamma_s / \cos \xi \quad (106)$$

$$e_{v,N} = (\sin \gamma_s \cdot \sin \gamma_F - \cos \gamma_s \cdot \cos \gamma_F \cdot \cos(\alpha_F - \alpha_s)) / \cos \xi \quad (107)$$

lumination and to avoid activation by adjusting the solar protection lamellae (adapted opening), e.g.

The minimum requirements for the calculation procedure for determining the times for activating or deactivating the artificial illumination are also complied with if a different procedure provides for equivalent results.

## 12 Solar irradiation and shadowing

A description of the calculation of the short-wave irradiation onto components with any orientation and inclination, as well as the penetration of transparent components can be found in Section 7 and Section 8. In the following you will find notes and algorithms for evaluating the shadowing of components. In this, self-shadowing and third party shadowing for direct radiation according to Section 12.1 and Section 12.2 are taken into consideration. The influence of the horizon vertical exaggeration on the diffuse radiation is implemented according to Section 12.3.

### 12.1 Self-shadowing due to projections for direct radiation

Regarding segmented facades or recessed windows, it often is not the entire surface area  $A$  that is exposed to solar radiation. The surface area  $A_s$  exposed to the sun can be determined by a few geometric variables. Figure 1 shows the connections for the special case of a vertical surface area.

**Calculation of the surface area  $A_s$  exposed to direct sunlight in the event of self-shadowing (surface area with any orientation and any inclination)**

Angle denomination (see Section 5):

- solar azimuth  $\alpha_s$
- cardinal direction of the surface area  $\alpha_F$
- inclination of the surface area  $\gamma_F$
- irradiation angle onto the surface area (regarding the surface area normal)  $\xi$

#### Definition of the denomination shadowing

For direct solar irradiation onto a treated surface area being possible, the following must be applicable:

$$\cos \xi > 0$$

$\cos \xi$  is calculated according to Equation (11),

if  $\cos \xi \leq 0$ , then:

$$\bullet \quad e_{h,N} = 10^{20} \quad (104)$$

$$\bullet \quad e_{v,N} = 10^{20} \quad (105)$$

$$\text{otherwise} \quad e_{h,N} = \sin(\alpha_F - \alpha_s) \cdot \cos \gamma_s / \cos \xi \quad (106)$$

$$e_{v,N} = (\sin \gamma_s \cdot \sin \gamma_F - \cos \gamma_s \cdot \cos \gamma_F \cdot \cos(\alpha_F - \alpha_s)) / \cos \xi \quad (107)$$

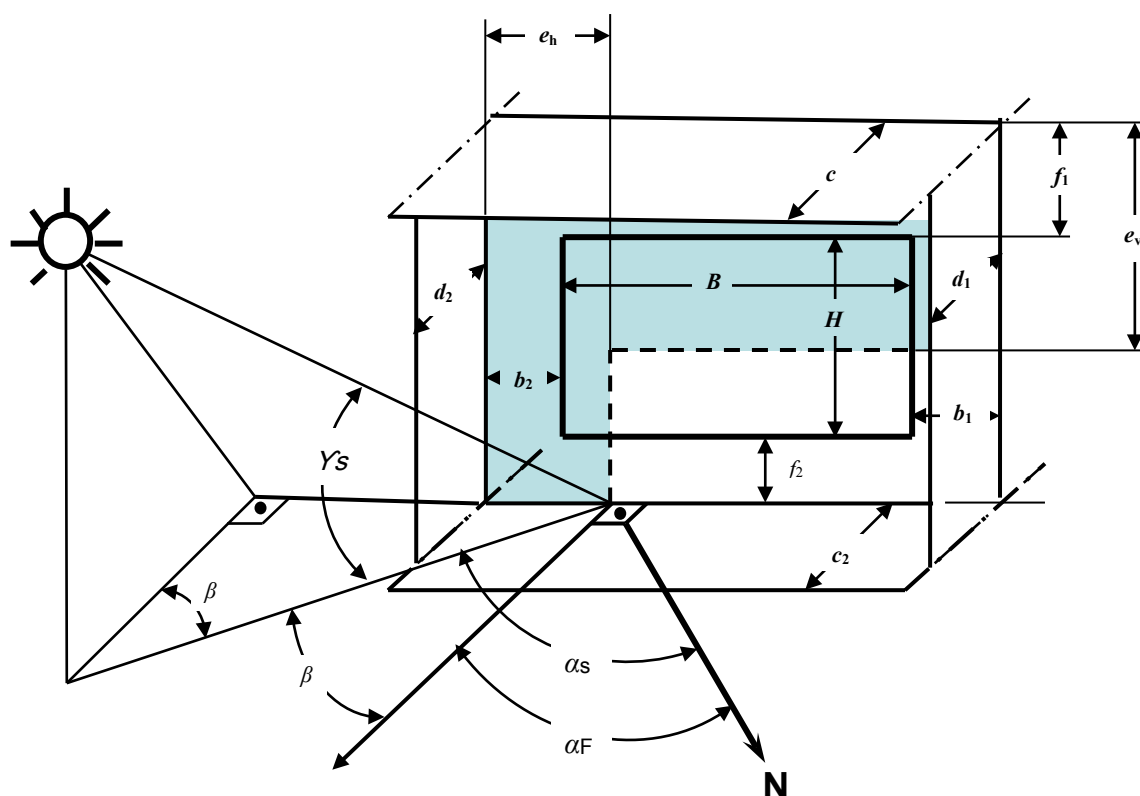


Bild 1. Geometriedaten bei Eigenbeschattung

Da die Abstände  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $f_1$  und  $f_2$  sowohl positiv (Regelfall) als auch negativ (z.B. Balkonbrüstung) sein können, ist bei der Beschattung immer eine Abfrage für beide Seiten der Beschattung erforderlich.

### Horizontale Beschattung

Wenn  $e_{h,N} \geq 0$ , dann Beschattung von links (Vorsprung  $d_1$ ):

$$s_h = e_{h,N} \cdot d_1 - b_1 \quad (108)$$

wenn  $s_h < 0$ , dann  $s_h = 0$

wenn  $e_{h,N} \cdot d_2 + b_2 < 0$ , dann  $s_h = s_h - e_{h,N} \cdot d_2 - b_2$

sonst Beschattung von rechts (Vorsprung  $d_2$ ):

$$s_h = -e_{h,N} \cdot d_2 - b_2 \quad (109)$$

wenn  $s_h < 0$ , dann  $s_h = 0$

wenn  $-e_{h,N} \cdot d_1 + b_1 < 0$ , dann  $s_h = s_h + e_{h,N} \cdot d_1 - b_1$

### Vertikale Beschattung

Wenn  $e_{v,N} \geq 0$ , dann Beschattung von oben:

$$s_v = e_{v,N} \cdot c_1 - f_1 \quad (110)$$

wenn  $s_v < 0$ , dann  $s_v = 0$

wenn  $e_{v,N} \cdot c_2 + f_2 < 0$ , dann  $s_v = s_v - e_{v,N} \cdot c_2 - f_2$

sonst Beschattung von unten:

$$s_v = e_{v,N} \cdot c_2 - f_2 \quad (111)$$

wenn  $s_v < 0$ , dann  $s_v = 0$

wenn  $-e_{v,N} \cdot c_1 + f_1 < 0$ , dann  $s_v = s_v - e_{v,N} \cdot c_1 - f_1$

Fläche  $A_S$ , die von der direkten Sonneneinstrahlung bestrahlt wird:

Figure 1. Geometry data for self-shadowing

As the distances  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $f_1$ , and  $f_2$  may be both positive (normally) and negative (e.g. balcony parapet), both sides of the shadowing must always be queried regarding the shadowing.

### Horizontal shadowing

If  $e_{h,N} \geq 0$ , then shadowing from the left side (projection  $d_1$ ):

$$s_h = e_{h,N} \cdot d_1 - b_1 \quad (108)$$

if  $s_h < 0$ , then  $s_h = 0$

if  $e_{h,N} \cdot d_2 + b_2 < 0$ , then  $s_h = s_h - e_{h,N} \cdot d_2 - b_2$

otherwise shadowing from the right (projection  $d_2$ ):

$$s_h = -e_{h,N} \cdot d_2 - b_2 \quad (109)$$

if  $s_h < 0$ , then  $s_h = 0$

if  $-e_{h,N} \cdot d_1 + b_1 < 0$ , then  $s_h = s_h + e_{h,N} \cdot d_1 - b_1$

### Vertical shadowing

If  $e_{v,N} \geq 0$ , then shading from above:

$$s_v = e_{v,N} \cdot c_1 - f_1 \quad (110)$$

if  $s_v < 0$ , then  $s_v = 0$

if  $e_{v,N} \cdot c_2 + f_2 < 0$ , then  $s_v = s_v - e_{v,N} \cdot c_2 - f_2$

otherwise shadowing from below

$$s_v = e_{v,N} \cdot c_2 - f_2 \quad (111)$$

if  $s_v < 0$ , then  $s_v = 0$

if  $-e_{v,N} \cdot c_1 + f_1 < 0$ , then  $s_v = s_v - e_{v,N} \cdot c_1 - f_1$

Surface area  $A_S$  that is exposed to direct solar irradiation:



$$A_S = (B - s_h) \cdot (H - s_v) \quad (112)$$

wenn  $(B - s_h) < 0$ , dann  $A_S = 0$

wenn  $(H - s_v) < 0$ , dann  $A_S = 0$

Bei transparenter bzw. transluzenter Eigenbeschattung sind die Werte der Direktstrahlung und der Diffusstrahlung für die beschattete Fläche mit den entsprechenden  $\tau$ -Werten zu korrigieren.

## 12.2 Fremdbeschattung durch Horizontüberhöhung und/oder Verbauung bei direkter Strahlung

Beschattungen durch Horizontüberhöhung und/oder Verbauung können durch eine minimal wirk-same Sonnenhöhe bei einem zugeordneten Sonnenazimut berechnet werden. Deren Berücksichtigung ist mit dem Auftraggeber zu vereinbaren. Bei geringfügiger Beschattung sollte diese nicht berücksichtigt werden. Das gleiche gilt für Bepflanzungen mit jahreszeitlich veränderlicher Belaubung, ausgenommen bei in Gebäudenähe liegender starker Bewaldung.

Nach Ermittlung der Geometriedaten der Verbauung (Bild 2) ist die Fremdbeschattung durch umliegende Gebäude mittels einer Skyline mit Azimut und Höhenwinkel der Gebäudekanten zu beschreiben.

Aufgrund der normalerweise großen Abstände zwischen Fenster und Verbauung und der damit verbundenen kurzen Zeiten im Beschattungsverlauf genügt es, die Winkel auf die Fenstermitte zu beziehen.

Sind die Abmessungen der betrachteten Fläche in Relation zum Abstand und zur Geometrie der Verbauung relativ groß, sodass über die Fläche während längerer Zeit (deutlich länger als eine Stunde) ein Schatten wandert (Teilbeschattung), kann eine deutliche Verbesserung der Genauigkeit der Berechnung der Verschattung durch geeignete Unterteilung der betrachteten Fläche erreicht werden. Ist ein wirksamer beweglicher Sonnenschutz vorhanden, erübrigt sich in der Regel eine solche Unterteilung.

Kriterien für die Unterteilung einer Fläche  $i$  können sein:

- horizontale Unterteilung, wenn Azimutwinkel-differenz (FK – Flächenkante)  
( $\alpha_i(\text{rechte FK}) - \alpha_i(\text{linke FK})$ )  $> 15^\circ$
- vertikale Unterteilung, wenn Höhenwinkel-winkeldifferenz  
( $\gamma_i(\text{untere FK}) - \gamma_i(\text{obere FK})$ )  $> 10^\circ$

Es ist zu jeder Stunde zu prüfen, ob die Bedingung

$$\gamma_S \leq \gamma_{S,\text{grenz}} \quad (113)$$

erfüllt ist. Für  $\gamma_S > \gamma_{S,\text{grenz}}$  findet keine Beschattung statt.

$$A_S = (B - s_h) \cdot (H - s_v) \quad (112)$$

if  $(B - s_h) < 0$ , then  $A_S = 0$

if  $(H - s_v) < 0$ , then  $A_S = 0$

In the event of transparent or translucent self-shadowing the values for direct radiation and diffuse radiation for the shaded surface area must be corrected with the corresponding  $\tau$  values.

## 12.2 Third party shadowing due to horizon vertical exaggeration and/or obstruction for direct radiation

Shadowings by means of horizon vertical exaggeration and/or obstruction can be calculated by a minimum efficient solar height at an assigned solar azimuth. The consideration of the aforementioned must be agreed upon with the customer. The aforementioned should not be considered in the event of minor shadowing. The same is applicable to plants with foliage differing depending on the season, except for buildings near strong forest vegetation.

After having determined the geometry data of the obstruction (Figure 2), the third party shadowing by surrounding buildings must be described by means of a skyline with azimuth and elevation angle of the building edges.

On the basis of the normally large distances between window and obstruction and the related short time in the course of shadowing, it is sufficient to refer the angles to the window centres.

If the dimensions of the treated surface area are relatively large when compared to the distance and the geometry of the obstruction so that a shadow is drifting over the window (partial shadowing) over an extended period of time (significantly longer than one hour), the accuracy of the calculation of the shadowing can be improved significantly by means of a suitable division of the treated surface area. If efficient moving solar protection exists, such a division normally is no longer applicable.

The following are criteria for dividing a surface area  $i$ :

- horizontal division, if azimuth angular difference (FK – area edge)  
( $\alpha_i(\text{right FK}) - \alpha_i(\text{left FK})$ )  $> 15^\circ$
- vertical division, if elevation angle difference  
( $\gamma_i(\text{lower FK}) - \gamma_i(\text{upper FK})$ )  $> 10^\circ$

It must be checked every hour whether the condition

$$\gamma_S \leq \gamma_{S,\text{grenz}} \quad (113)$$

is met. There is no shadowing for  $\gamma_S > \gamma_{S,\text{grenz}}$ .

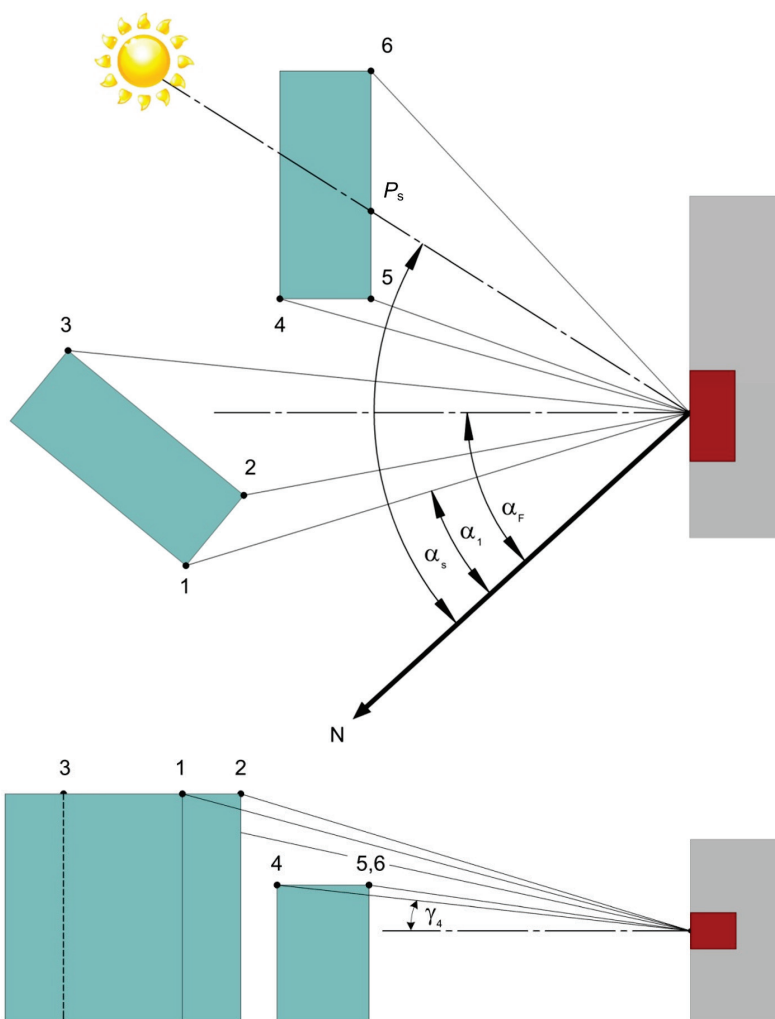


Bild 2. Geometriedaten der Verbauung

Figure 2. Geometry data for obstruction

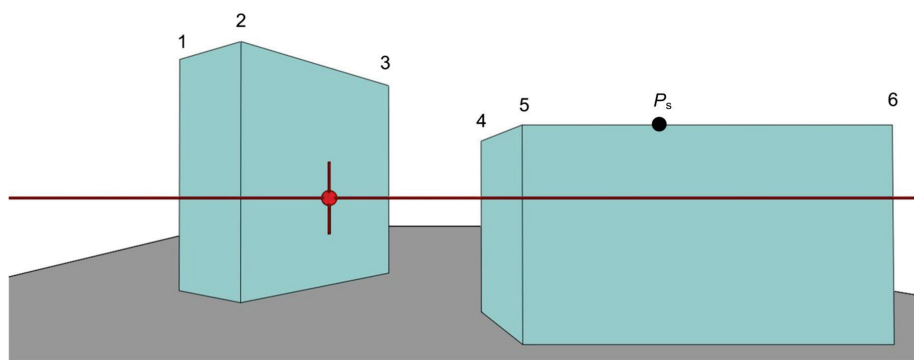


Bild 3. Skyline der Verbauung  
(Blickrichtung = Fassadennormale)

Figure 3. Skyline of the obstruction (direction of view = facade normal)

**Berechnung des Grenzhöhenwinkels für die Beschattung durch eine Skyline (für direkte Sonneneinstrahlung) – beliebige orientierte und beliebig geneigte Fläche**

Gesucht wird der Grenzwert der Sonnenhöhe  $\gamma_{S,grenz}$  (für den jeweils betrachteten Sonnenazimut  $\alpha_S$ ).

Vorgabe von zwei Eckpunkten für die Verbauung (Skyline), zwischen denen der jeweilige Grenzwert  $\gamma_{S,grenz}$  der Sonnenhöhe abhängig vom Azimut der Sonneneinstrahlung gesucht wird:

**Calculation of the limit elevation angle for shadowing by a skyline (for direct solar irradiation) – surface area with any orientation and inclination**

The threshold of solar height  $\gamma_{S,grenz}$  is to be determined (for the solar azimuth  $\alpha_S$  treated in each case).

Specification of two corners for the obstruction (skyline), between which the corresponding threshold  $\gamma_{S,grenz}$  of the solar height is sought depending on the azimuth of solar irradiation:

Eckpunkt  $i$ : Azimut:  $\alpha_i$  Höhenwinkel:  $\gamma_i$   
 Eckpunkt  $i + 1$ : Azimut:  $\alpha_{i+1}$  Höhenwinkel:  $\gamma_{i+1}$   
 mit der Bedingung:  $\alpha_{i+1} > \alpha_i$

**Anmerkung:** Die vier erforderlichen Winkel lassen sich (unter Berücksichtigung des Fensterazimuts) ermitteln

- aus den Koordinaten der Eckpunkte und den Koordinaten der Fenstermitte,
- der Höhenwinkel aus dem horizontalen Abstand von Eckpunkt und Fensterazimut sowie der Höhendifferenz zwischen Eckpunkt und Fenstermitte, und
- aus der Winkelmessung in den Plänen.

Der Höhenwinkel der Verbauung für den Punkt  $i$  ergibt sich zu:

$$\tan \gamma_i = \frac{\Delta H_i}{s_i} \quad (114)$$

Dabei ist

$\Delta H_i$  Differenz zwischen Höhe der Verbauung im Punkt  $i$  und Fenstermitte

$s_i$  horizontaler Abstand der Verbauung im Punkt  $i$  zur Fenstermitte

Randbedingungen

$$0 < \gamma_i < 90^\circ \text{ und } 0 < \gamma_{i+1} < 90^\circ$$

$$0 < (\alpha_{i+1} - \alpha_i) < 180^\circ$$

Grenzwert der Sonnenhöhe  $\gamma_{S,\text{grenz}}$  in Abhängigkeit vom Sonnenazimut  $\alpha_S$ :

$$\gamma_{S,\text{grenz}} = \arctan \left( \frac{(\sin \gamma_i / \cos \gamma_i)}{(\sin(180 - X - (\alpha_S - \alpha_i)) / \sin X)} \right) \quad (115)$$

mit

$$X = 180 - Y - (\alpha_{i+1} - \alpha_i) \quad (116)$$

$$Y = \arctan \frac{\tan \gamma_{i+1} \cdot \sin(\alpha_{i+1} - \alpha_i)}{\tan \gamma_i - \tan \gamma_{i+1} \cdot \cos(\alpha_{i+1} - \alpha_i)} \quad (117)$$

### 12.3 Horizontüberhöhung und Beschattung bei diffuser Strahlung

Entsprechend Abschnitt 7.4 und Gleichung (65) wird eine Horizontüberhöhung bei der Ermittlung der diffusen Strahlung berücksichtigt. Wird eine Horizontüberhöhung nach Abschnitt 12.2 vorgesehen, ist in Gleichung (33), Gleichung (34), Gleichung (50) und Gleichung (65) für den Winkel  $\chi$  der Horizontüberhöhung der Mittelwert (Integralwert) über den Azimutbereich zwischen  $\alpha_F - 180^\circ + \gamma_F$  und  $\alpha_F + 180^\circ - \gamma_F$  anzusetzen. Da sich Werte zwischen  $-360^\circ$  und  $720^\circ$  ergeben können, ist eine Transformation des Winkels in den gültigen Bereich zwischen  $0^\circ$  und  $360^\circ$  erforderlich.

Auf eine Korrektur der Anteile der diffusen Strahlung infolge seitlicher oder oberer Beschattungselemente wird bewusst wegen des hohen Rechen-

corner point  $i$ : azimuth:  $\alpha_i$  elevation angle:  $\gamma_i$   
 corner point  $i + 1$ : azimuth:  $\alpha_{i+1}$  elevation angle:  $\gamma_{i+1}$   
 with the condition:  $\alpha_{i+1} > \alpha_i$

**Note:** The four required angles can be determined (taking into consideration the window azimuth)

- from the coordinates of the corner points and the coordinates of the window centre,
- the elevation angle from the horizontal distance of corner point and window azimuth, as well as the height differential between corner point and window centre, and
- by measuring the angles in the plans.

The elevation angle of the obstruction for point  $i$  results from:

$$\tan \gamma_i = \frac{\Delta H_i}{s_i} \quad (114)$$

where

$\Delta H_i$  difference between height of obstruction in point  $i$  and window centre

$s_i$  horizontal distance of the obstruction in point  $i$  regarding the window centre

Boundary conditions

$$0 < \gamma_i < 90^\circ \text{ und } 0 < \gamma_{i+1} < 90^\circ$$

$$0 < (\alpha_{i+1} - \alpha_i) < 180^\circ$$

Threshold of the solar height  $\gamma_{S,\text{grenz}}$  depending on the solar azimuth  $\alpha_S$ :

$$\gamma_{S,\text{grenz}} = \arctan \left( \frac{(\sin \gamma_i / \cos \gamma_i)}{(\sin(180 - X - (\alpha_S - \alpha_i)) / \sin X)} \right) \quad (115)$$

with

$$X = 180 - Y - (\alpha_{i+1} - \alpha_i) \quad (116)$$

$$Y = \arctan \frac{\tan \gamma_{i+1} \cdot \sin(\alpha_{i+1} - \alpha_i)}{\tan \gamma_i - \tan \gamma_{i+1} \cdot \cos(\alpha_{i+1} - \alpha_i)} \quad (117)$$

### 12.3 Horizon vertical exaggeration and shadowing for diffuse radiation

According to Section 7.4 and Equation (65) a horizon vertical exaggeration is taken into consideration when determining the diffuse radiation. If a horizon elevation as discussed in Section 12.2 is envisaged, then the mean (integral value) over the azimuthal range between  $\alpha_F - 180^\circ + \gamma_F$  and  $\alpha_F + 180^\circ - \gamma_F$  should be substituted in Equation (33), Equation (34), Equation (50) and Equation (65) for the angle  $\chi$  of the horizon elevation. Since this may result in values between  $-360^\circ$  and  $720^\circ$ , a transformation of the angle into the valid range between  $0^\circ$  and  $360^\circ$  is required.

Any correction of the shares of diffuse radiation due to lateral or top shadowing elements is relinquished deliberately on the basis of the elaborate

aufwands und der trotzdem noch vertretbaren Genauigkeit verzichtet.

Aufgrund der Abhängigkeit der diffusen Strahlung von Himmelsrichtung, Höhenwinkel und Tagesart (gleichmäßig bedeckt, leicht bewölkt etc.) ergeben sich bei beliebig orientierten und beliebig geneigten Flächen eine außerordentlich hohe Zahl von Fallunterscheidungen und ein damit verbundener hoher Programmieraufwand.

### 13 Validierung

Software, die auf den Gleichungen dieser Richtlinie basiert, kann anhand der Testbeispiele 7 bis 10 der VDI 2078 bzw. der Testbeispiele 8 bis 10 der VDI 6020 getestet und validiert werden.

calculation and the nevertheless still reasonable accuracy.

The dependency of diffuse radiation from cardinal direction, elevation angle, and type of day (uniformly overcast, slightly clouded, etc.) results in an extremely high number of case differentiations and related high programming efforts regarding surface areas with any orientation and inclination.

### 13 Validation

Software based on the equations of this standard can be tested and validated with the help of the test examples 7 to 10 of VDI 2078 or the test examples 8 to 10 of VDI 6020.

## Schrifttum / Bibliography

### Technische Regeln / Technical rules

DIN 4710:2003-01 Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen in Deutschland (Statistics on German meteorological data for calculating the energy requirements for heating and air conditioning equipment). Berlin: Beuth Verlag

DIN 5034-2:1985-02 Tageslicht in Innenräumen; Grundlagen (Daylight in interiors; principles). Berlin: Beuth Verlag

DIN 5034-3:2007-02 Tageslicht in Innenräumen; Teil 3: Berechnung (Daylight in interiors; Part 3: Calculation). Berlin: Beuth Verlag

DIN 5035 Beleuchtung mit künstlichem Licht (Artificial lighting). Berlin: Beuth Verlag

DIN EN 410:2011-04 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). Berlin: Beuth Verlag

DIN EN 13363-2:2005-06 Sonnenschutzeinrichtungen in Kombination mit Verglasungen; Berechnung der Solarstrahlung und des Lichttransmissionsgrades; Teil 2: Detailliertes Berechnungsverfahren; Deutsche Fassung EN 13363-2:2005 (Solar protection devices combined with glazing; Calculation of total solar energy transmittance and light transmittance; Part 2: Detailed calculation method; German version EN 13363-2:2005). Berlin: Beuth Verlag

DIN V 18599-4:2011-12 Energetische Bewertung von Gebäuden; Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung; Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung (Energy efficiency of buildings; Calculation of the net, final and primary energy demand for heating, cooling, ventilation, domestic hot water and lighting; Part 4: Net and final energy demand for lighting). Berlin: Beuth Verlag

DIN V 18599-10:2011-12 Energetische Bewertung von Gebäuden; Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung; Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten (Energy efficiency of buildings; Calculation of the net, final and primary energy demand for heating, cooling, ventilation, domestic hot water and lighting; Part 10: Boundary conditions of use, climatic data). Berlin: Beuth Verlag

VDI 1000:2010-06 VDI-Richtlinienarbeit; Grundsätze und Anleitungen (VDI Standard Work; Principles and procedures). Berlin: Beuth Verlag

VDI 2078:2015-06 Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation) (Calculation of thermal loads and indoor temperatures (design cooling load and annual simulation)). Berlin: Beuth Verlag

VDI 3789 Blatt 3:2001-10 Umweltmeteorologie; Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen; Berechnung der spektralen Bestrahlungsstärken im solaren Wellenlängenbereich (Environmental meteorology; Interactions between atmosphere and surfaces; Calculation of spectral irradiances in the solar wavelength range). Berlin: Beuth Verlag

VDI 6007 Blatt 1:2015-06 Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden; Raummodell (Calculation of transient thermal response of rooms and buildings; Modelling of rooms). Berlin: Beuth Verlag

VDI 6007 Blatt 2:2012-03 Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden; Fenstermodell (Calculation of transient thermal response of rooms and buildings; Modelling of windows). Berlin: Beuth Verlag

VDI 6020 Anforderungen an thermisch-energetische Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation (Requirements on methods of calculation to thermal and energy simulation of buildings and plants). Berlin: Beuth Verlag

## Literatur / Literature

- [1] Krochmann, J.; Özver, Z.; Orlowski, P.: Über die Bestrahlungsstärke durch Sonne und klaren Himmel auf geneigter Fläche. Mitteilung aus dem Institut für Lichttechnik der Technischen Universität Berlin, veröffentlicht in TAB 6/75 Solare Wärmegevinne
- [2] Rouvel, L.; Seifert, C.: Wärmeeintrag in den Raum aufgrund kurzweiliger Einstrahlung. KI Kälte – Luft – Klimatechnik (2007) 7/8, S. 24–26, und (2007) 9, S. 34–38
- [3] Aydinli, S.: Über die Berechnung der zur Verfügung stehenden Solarenergie und des Tageslichtes. Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 6, Nr. 79, Düsseldorf: VDI Verlag, 1981
- [4] Krochmann, J.; Aydinli, S.: Gutachten über Strahlungsdaten in Deutschland. Unveröffentlichte Studie für den VDI, Düsseldorf, 1983
- [5] Christoffer, J.; Deutschländer, T.; Webs, M.: Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse TRY. Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 2004
- [6] Mathis, W.: Tageslicht-Technik. Schweizerische Technische Zeitschrift SRZ, Sondernummer; Tageslicht, 1966
- [7] Zimmermann, F.: Fluidodynamische Untersuchungen bei Fensterlüftung mit außen liegenden Sonnenschutz. Untersuchungsbericht, Zimmermann und Becker GmbH, Heilbronn, 2006