

Berechnung des Wärmeeintrags in den Raum aufgrund kurzweiliger Einstrahlung



L. Rouvel, C. Seifert

Einleitung

Die Berechnung der kurzweiligen Einstrahlung auf horizontale, aber auch auf beliebig orientierte und geneigte Bauteile sowie die Durchstrahlung transparenter Bauteile ist in der einschlägigen Literatur (z. B. [1][5][6][9]), teilweise auch in Normen und Richtlinien (z. B. [2][3][4][7]) beschrieben. Die Intensionen dieser Quellen sind unterschiedlich, die Zusammenhänge daher mehr oder weniger detailliert und auf Schwerpunkte, beispielsweise auf die Tageslichtberechnung, ausgerichtet. Die Randbedingungen und Definitionen unterscheiden sich, eine durchgängige und vollständige Darstellung ist nicht gegeben.

Die Neubearbeitung der VDI 2078 („Kühllastregeln“) bot Anlass, die Berechnung der kurzweiligen Einstrahlung auf die Grundlage einheitlicher Definitionen und Randbedingungen zu stellen, auf die notwendige und je nach Berechnungsziel geeignete meteorologische Datenbasis auszurichten und algorithmisch durchgängig sowie rechentechnisch praktikabel verfügbar zu machen.

Der Energieeintrag transparenter Bauteile wird in Abweichung zur noch gültigen VDI 2078 mit Hilfe des Gesamtenergiedurchlassgrades g der Verglasung sowie des g_{tot} - Wertes für Verglasung einschließlich Sonnenschutz bewertet, deren Berechnung Gegenstand der künftigen VDI 6007 Blatt 2 [8] ist.

Grundlagen und Definitionen

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

- Sonnenhöhe γ_s und
- Sonnenazimut a_s

in Abhängigkeit von Tages- und Jahreszeit beschrieben wird.

Die Berechnung des Sonnenstandes 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. Die Uhrzeit ist zu diesem Zeitpunkt aber in Mitteleuropa bereits nach 12:00 Uhr, bei Sommerzeit sogar nach 13:00 Uhr.

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):

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

mit

$SOMZ$:	Zeitverschiebung durch die Sommerzeit:
Winterzeit:	$SOMZ = 0$
Sommerzeit:	$SOMZ = 1$

Der Zusammenhang zwischen mittlerer Ortszeit MOZ für den jeweils betrachteten Ort und der Zeit einer Zeitzone OZ ist eine feste Zeitdifferenz, die durch den Unterschied zwischen dem Längengrad λ des betrachteten Ortes zum zugehörigen Zeitzonenmeridian bestimmt wird:

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

Anmerkung:

Der Zeitzonenmeridian für Mitteleuropa ist der 15. Längengrad. Obige Gleichung ist also für Mitteleuropa gültig, die Ortszeit OZ entspricht der Mitteleuropäischen Zeit MEZ .

Die wahre Ortszeit WOZ beträgt:

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

Die Zeitgleichung Zgl berücksichtigt die Exzentrizität und Schiefe der Ekliptik der Erdbahn im Sonnenumlauf. Zeitgleichung und Sonnendeklination δ 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 $Zgl(J)$ [5]:

$$Zgl(J) = 0,0066 + 7,3525 \cdot \cos(J' + 85,9^\circ) + 9,9359 \cdot \cos(2 \cdot J' + 108,9^\circ) + 0,3387 \cdot \cos(3 \cdot J' + 105,2^\circ) \quad (5)$$

in min

Sonnendeklination $\delta (J)$ [5]:

$$\delta (J) = 0,3948 - 23,2559 \cdot \cos(J' + 9,1^\circ) - 0,3915 \cdot \cos(2 \cdot J' + 5,4^\circ) - 0,1764 \cdot \cos(3 \cdot J' + 26,0^\circ) \quad (6)$$

in Grad

Der für die Berechnung des Sonnenstandes benötigte Stundenwinkel ω wird vom Meridian aus positiv zum Nachmittag und negativ zum Vormittag gezählt. Mit der geographischen Breite des Ortes φ ermittelt sich die Sonnenhöhe γ_S zu:

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

mit

ω : Stundenwinkel
 φ : geographischer Breitengrad des betrachteten Ortes

Der Stundenwinkel ω berechnet sich in Grad wie folgt:

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

Mit der Festlegung der Zählweise für das Sonnenazimut a_S entsprechend **Bild 1** errechnet sich das Sonnenazimut a_S zu:

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

bzw.

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

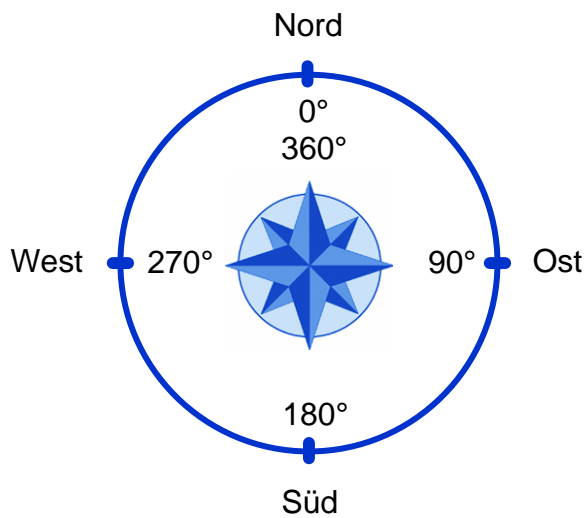


Bild 1: Zählweise für den Sonnenazimut a_S und die Himmelsrichtung a_F

Gültigkeitsbereich: $0^\circ \leq a_S \leq 360^\circ$ sowie $0^\circ \leq a_F \leq 360^\circ$

Für eine beliebig orientierte und beliebig geneigte Fläche ermittelt sich ein Kosinus des Einstrahlwinkels ξ zu:

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

Wenn $\cos \xi = 1$, dann fällt die Einstrahlung senkrecht auf die Fläche, d.h. parallel zur Normale der Fläche.

Die Zählweise für die Himmelsrichtung a_F entspricht Abb. 1 und der Neigung γ_F der betrachteten Fläche ist festgelegt zu:

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

Kurzweilige Einstrahlung auf eine horizontale Fläche

Die kurzweilige Einstrahlung (Sonneneinstrahlung, direkt und diffus) auf die horizontale Fläche errechnet sich in Anlehnung an DIN 5034-2 [2] und VDI 3789-3 [4].

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:

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

Hinweis:

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.

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 $P_{dir,normal}$ bei **wolkenlosem Himmel** auf Normalfläche:

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

mit

T_{Linke} : Trübungsfaktor nach Linke entsprechend DIN 4710, abhängig vom betrachteten Monat, unterschieden nach Monatsmittelwert (i. d. R. für Energiebedarfsberechnungen) und Monatsmittelwert – Standardabweichung (i. d. R. für Auslegungsberechnungen).

H_{Geo} : Geografische Höhe des Standortes in m

H_R : Bezugshöhe = 8000 m

γ_S : Sonnenhöhe in Grad nach Gl. (7)

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

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

Hinweis:

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

Die in [2] und [4] 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.

Direkte Einstrahlung bei **gemischt bewölktem Himmel**:

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

mit

$R_s(SSW)$: Bewertungsfaktor für Bewölkung

Aus dem Vergleich der Nachberechnung für das TRY5 von 1985 (Würzburg) und das TRY 12 von 2004 (Mannheim) [9] ist folgender Bewertungsfaktor $R_s(SSW)$ für die Berücksichtigung der Bewölkung bei der direkten Einstrahlung hergeleitet worden:

$$R_s(SSW) = 0,025 + \cos\left(\left(\left(1 - SSW\right) - 1/8\right) \cdot 90^\circ\right) - 0,4 \cdot \left(1 - \cos\left(\left(\left(1 - SSW\right) \cdot 8/6\right) \cdot 90^\circ\right)\right) + 0,3 \cdot \left(\left(\left(1 - SSW\right) + 1/8\right) \cdot \left(\sin\gamma_s - \sin(30^\circ)\right) + \left(\left(\left(1 - SSW\right) - 2/8\right) \cdot \left(\sin\gamma_s - \sin(30^\circ)\right)\right)\right) \quad (17)$$

wenn $R_s(SSW) > 1$, dann $R_s(SSW) = 1$

wenn $R_s(SSW) < 0$, dann $R_s(SSW) = 0$

mit

γ_s Sonnenhöhe in Grad nach Gl. (7)

Der Zusammenhang zwischen der relativen direkten Einstrahlung auf die horizontale Fläche in Abhängigkeit von der Sonnenwahrscheinlichkeit wird in **Bild 2** dargestellt. Dabei wird unterschieden zwischen dem Ansatz nach Gl. (17) und dem Ansatz nach [2] und [4]. Während nach [2] und [4] ein weitgehend linearer Zusammenhang zwischen der Sonnenwahrscheinlichkeit und der direkten Einstrahlung zugrunde gelegt wird, ist nach Gl. (17) der Zusammenhang stark nichtlinear. Ausgehend vom wolkenlosen Himmel ($SSW=1$) bleibt die direkte Einstrahlung auch bei geringer Bewölkung nahezu unverändert. Dann fällt sie aber mit zunehmender Bewölkung sehr stark ab. Diese Tendenz ist bei niedrigem Sonnenstand i.d.R. mehr ausgeprägt.

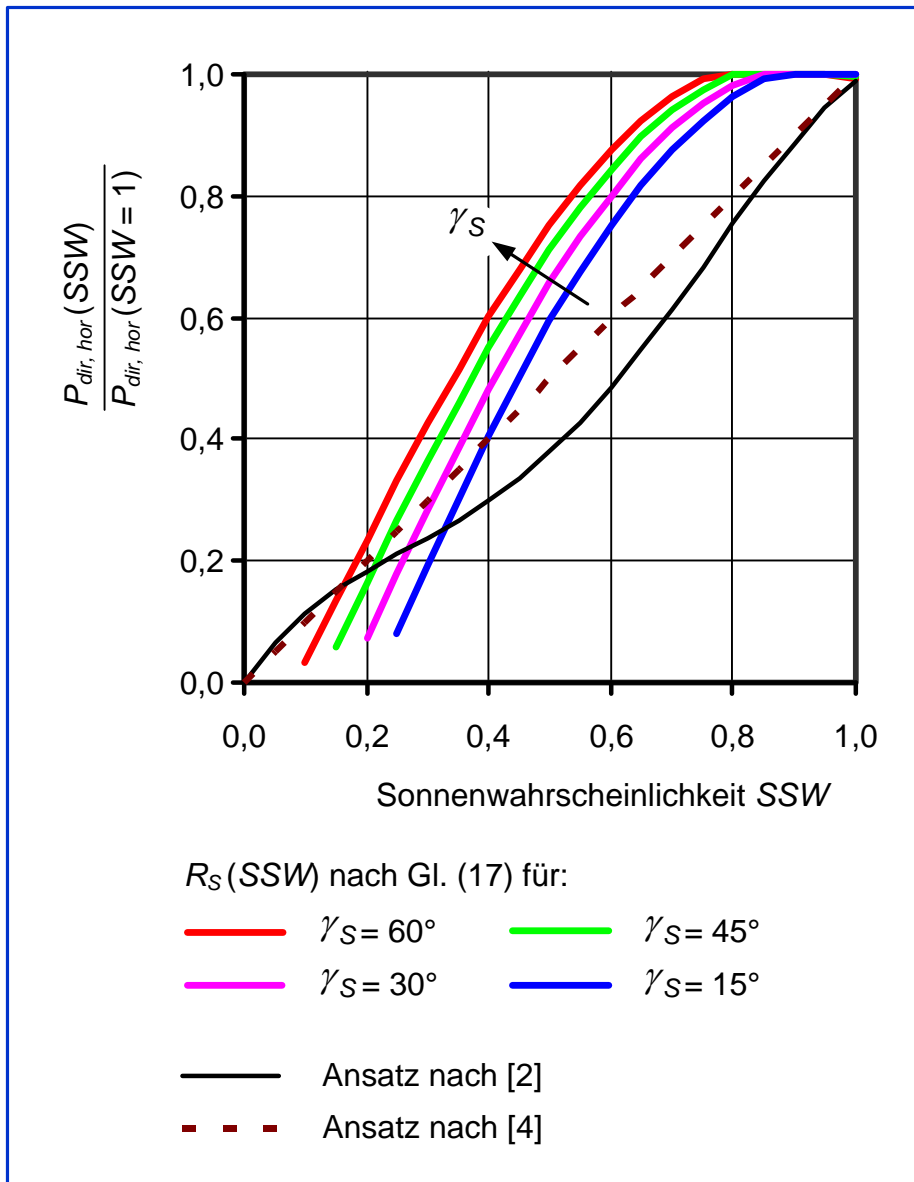


Bild 2: Zusammenhang zwischen der relativen direkten Einstrahlung auf die horizontale Fläche in Abhängigkeit von der Sonnenwahrscheinlichkeit.

Diffuse Einstrahlung auf horizontale Fläche

Die diffuse Einstrahlung auf eine horizontale Fläche bei **wolkenlosem klarem Himmel** beträgt nach [2]:

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

in W/m²

mit dem Transmissionsgrad der Atmosphäre q_{am} :

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

mit:

$$q_{\text{am,atm}} = 1,2940 \cdot \gamma_S^0 + 2,4417 \cdot 10^{-2} \cdot \gamma_S^1 - 3,9730 \cdot 10^{-4} \cdot \gamma_S^2 + 3,8034 \cdot 10^{-6} \cdot \gamma_S^3 - 2,2145 \cdot 10^{-8} \cdot \gamma_S^4 + 5,8332 \cdot 10^{-11} \cdot \gamma_S^5 \quad (20)$$

Die diffuse Einstrahlung auf eine horizontale Fläche bei **vollständig und gleichmäßig bedecktem Himmel** beträgt nach [4]:

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

Die relative diffuse Einstrahlung auf horizontale Fläche bei **gemischt bewölkttem Himmel** berechnet sich ebenfalls in Anlehnung an VDI 3789-3:2001 Gl. (26a) und Gl. (K14) [4]. Allerdings ist bei der Berechnung des Bewertungsfaktors für Bewölkung der Parameter a von 0.72 auf 0.60 geändert (siehe Gl. (22)). Die Änderung ergibt sich aus dem Vergleich der Nachberechnung für das TRY5 von 1985 (Würzburg) und das TRY 12 von 2004 (Mannheim) [9].

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

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

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

mit

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

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

Bild 3 zeigt den Zusammenhang zwischen der relativen diffusen Einstrahlung auf die horizontale Fläche in Abhängigkeit von der Sonnenwahrscheinlichkeit, wobei als Parameter das Verhältnis der diffusen Einstrahlung bei gleichmäßig bedecktem Himmel zum klaren Himmel zusätzlich eingeht. Der Ansatz nach Gl. (22) und Gl. (23) zeigt im Vergleich zum Ansatz nach [4] deutlich niedrige Werte bei gemischter Bewölkung, insbesondere im SSW-Bereich zwischen 0,2 und 0,7.

Dies ist logische Folge des geänderten Ansatzes für die direkte Einstrahlung bei Mischbewölkung nach Gl. (17), siehe auch Bild 2.

Die Gesamteinstrahlung auf eine horizontale Fläche ändert sich bei den Ansätzen der Gl. (17), (22) und (23) gegenüber [2] und [4] im Grundsatz nicht, nur die Aufteilung auf direkte und diffuse Einstrahlung ist unterschiedlich. Dies hat selbstverständlich Auswirkungen auf die Einstrahlung auf senkrechte Flächen.

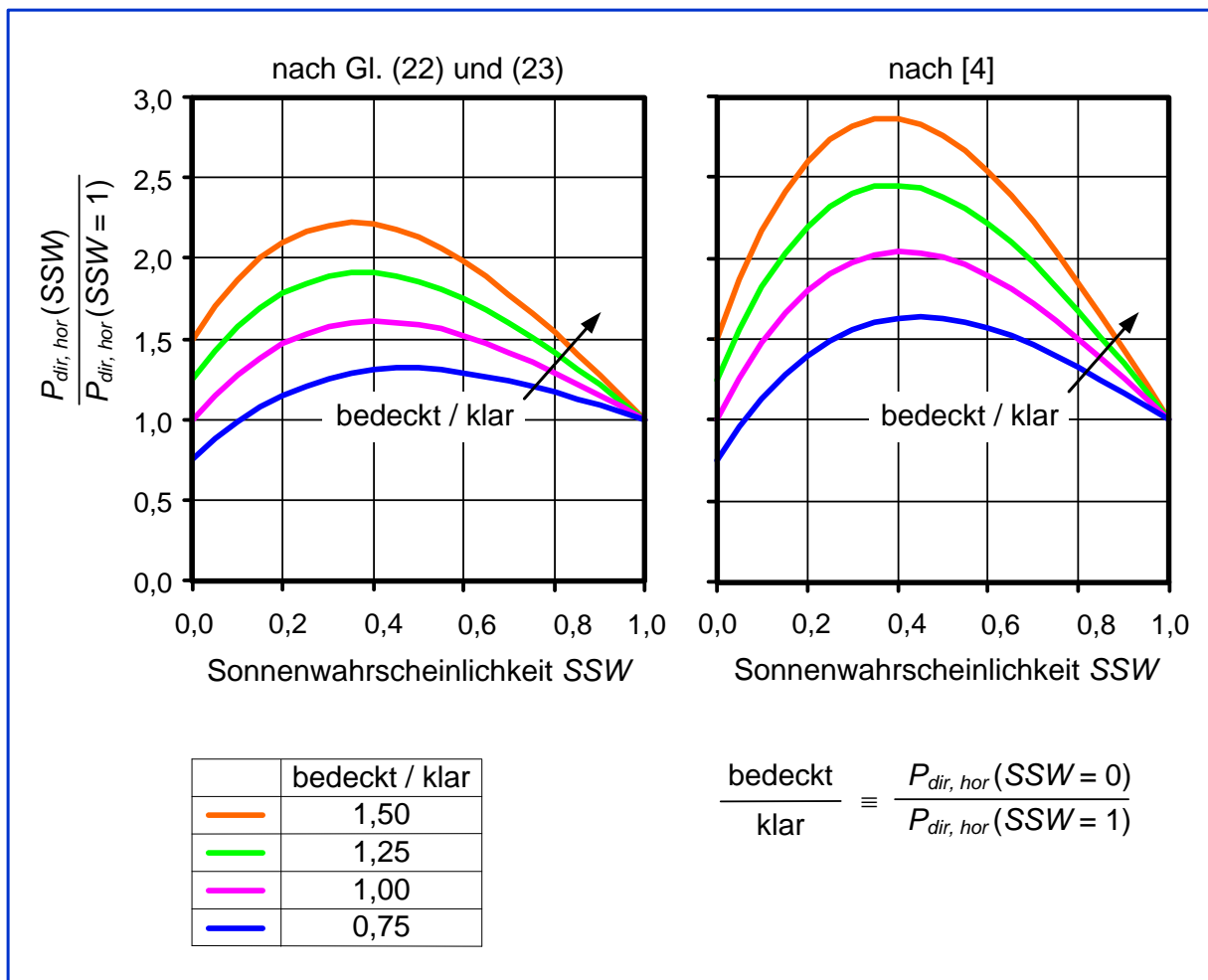


Bild 3: Zusammenhang zwischen der relativen diffusen Einstrahlung auf die horizontale Fläche in Abhängigkeit von der Sonnenwahrscheinlichkeit.
 Parameter: Verhältnis der diffusen Strahlung bei bedecktem Himmel (SSW=0) zur diffusen Strahlung bei klarem Himmel (SSW=1), jeweils bezogen auf die horizontale Fläche.

Kurzweilige Einstrahlung auf eine beliebig orientierte und beliebig geneigte Fläche

Die kurzweilige 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], [5] und [6].

Dabei ist vom Längengrad, Breitengrad und von der Höhe des **betrachteten Ortes** 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 Gl. (15)
- Diffuse Einstrahlung (Anteil wolkenloser klarer Himmel) nach Gl. (18)

- Diffuse Einstrahlung (Anteil gleichmäßig bedeckter Himmel) nach Gl. (21)

Im Testreferenzjahr (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 $P_{dif,hor,TRY}(SSW)$ angegeben ist, also nicht in einen Anteil des wolkenlosen klaren Himmels und einen Anteil des gleichmäßig bedeckten Himmels unterschieden wird, gilt hierfür:

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

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

Direkte Einstrahlung auf die beliebig orientierte und beliebig geneigte Fläche

Bei wolkenlosem und klarem Himmel gilt:

$$P_{dir,F}(SSW = 1) = P_{dir,hor}(SSW = 1) \cdot (\cos \gamma_F + \sin \gamma_F \cdot \cos(\text{abs}(\alpha_F - \alpha_S)) / \tan \gamma_S) \quad \text{in W/m}^2 \quad (28)$$

oder

$$P_{dir,F}(SSW = 1) = (P_{dir,hor}(SSW = 1) / \sin \gamma_S) \cdot \cos \xi \quad \text{in W/m}^2 \quad (29)$$

Anmerkung zur Umrechnung bei Werten aus dem TRY:

Bei Umrechnung von Werten aus dem TRY wird empfohlen, die Umrechnung in 2 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. Begrenzung auf Solarkonstante E_0)

2. Umrechnung auf die gewünschte Flächenneigung

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

Für Stunden mit einer Bedeckung von $0 \leq SSW < 1$, wird die direkte Strahlung für den wolkenlosen klaren Himmel nach Gl. (28) oder Gl. (29) in Abhängigkeit von Bewertungsfaktor $R_S(SSW)$ nach Gl. (17) gewichtet,

$$P_{dir,F}(SSW) = P_{dir,klar,F}(SSW = 1) \cdot R_S(SSW) \quad \text{in W/m}^2 \quad (30)$$

wobei SSW die Sonnenwahrscheinlichkeit für die zu berechnende Stunde ist.

Für Werte aus einem TRY ist diese Bewertung nach Gl. (30) nicht erforderlich, da die im TRY angegebenen Werte bereits die Bewölkung zur jeweiligen Stunde einbeziehen.

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_{diff} .

Bei **gleichmäßig bedecktem Himmel** ist der Umrechnungsfaktor $R_{dif,bed}$ nur von der Neigung der Fläche γ_F abhängig, d.h. er ist rotationssymmetrisch und unabhängig von der Sonnenhöhe γ_S :

$$R_{diff,bed} = 0,182 \cdot \left[1,178 \cdot (1 + \cos \gamma_F) + \left(\pi - \frac{\gamma_F \cdot \pi}{180^\circ} \right) \cdot \cos \gamma_F + \sin \gamma_F \right] \quad (31)$$

Bei **wolkenlosem und klarem Himmel** jedoch ist der Umrechnungsfaktor $R_{diff,klar}$ zusätzlich abhängig von der Azimutdifferenz von Wand und Sonne, also $R_{diff,klar} = f(\gamma_S, \gamma_F, \text{abs}(a_F - a_S))$. $R_{diff,klar}$ – Werte hierfür werden in DIN 5034-2, Tabelle 2 [2] angegeben.

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

Da Tabellenwerte bei einer EDV-Bearbeitung hinderlich sind, ist folgende aus der dreidimensionalen Tabelle in [1] abgeleitete Näherungsfunktion für $R_{diff,klar}$ anzusetzen:

$$R_{diff,klar} = R_{diff,bed} + (R_{180} + R_{WBL} + R_{WBNI} + R_{\xi}) / 100 \quad (32)$$

Es gelten dabei folgende Bedingungen:

$$\text{wenn Neigung der Fläche } \gamma_F = 0 \quad \text{dann } R_{diff,klar} = R_{diff,bed} \quad (33)$$

$$\text{wenn } R_{diff,klar} < 0 \quad \text{dann } R_{diff,klar} = 0 \quad (34)$$

Die Summanden R_{180} , R_{WBL} , R_{WBNI} und R_{ξ} in Gl. (32) werden wie folgt und für die angegebenen Bedingungen berechnet:

R_{180} :

$$R_{180} = -21 \cdot (1 - 4 \cdot \gamma_{S,R} / 90^\circ) \quad (35)$$

mit

$\gamma_{S,R}$:

$$\text{wenn } \gamma_S > 21,5^\circ \quad \text{dann } \gamma_{S,R} = 21,5^\circ \quad (36)$$

$$\text{sonst } \gamma_{S,R} = \gamma_S \quad (37)$$

R_{WBL} :

$$R_{WBL} = (-64,5 \cdot \sqrt{\sin(\text{abs}(\gamma_S))} + R_{WBL,0}) \cdot (1 - \gamma_F / 180^\circ) + R_{WBL,1} \quad (38)$$

mit

$R_{WBL,0}$:

$$\text{wenn } \gamma_S < 30^\circ \quad \text{dann } R_{WBL,0} = 6 \cdot \left(1 - \left((\gamma_S - 15^\circ) / 15^\circ \right)^2 \right) \quad (39)$$

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

$R_{WBL,1}$:

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

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

$$R_{WBNL} : \\ R_{WBNL} = (26/2) \cdot (1 - \cos(2 \cdot \gamma_F)) \quad (41)$$

$$R_{\xi} : \\ R_{\xi} = (126,5 - 60 \cdot \sin \gamma_S) \cdot ((\cos \xi + 0,7)/1,7)^2 \quad (42)$$

mit

ξ : Einstrahlwinkel nach Gl. (11) in Grad

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, Teil 2, Gl. (49) [2]:

$$P_{diff,bed,F}(SSW = 0) = P_{diff,bed,hor}(SSW = 0) \cdot R_{diff,bed} \quad \text{in W/m}^2 \quad (43)$$

und bei **wolkenlosem klarem Himmel**:

$$P_{diff,klar,F}(SSW = 1) = P_{diff,klar,hor}(SSW = 1) \cdot R_{diff,klar} \quad \text{in W/m}^2 \quad (44)$$

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 Gl. (45) und Gl. (46) durchzuführen. Dabei werden die beiden Anteile an der diffusen Strahlung in Abhängigkeit von der Sonnenwahrscheinlichkeit gewichtet.

Anteil vom wolkenlosen klaren Himmel:

$$P_{diff,klar,F}(SSW) = P_{diff,klar,F}(SSW = 1) \cdot SSW \quad \text{in W/m}^2 \quad (45)$$

Anteil vom gleichmäßig bedeckten Himmel:

$$P_{diff,bed,F}(SSW) = P_{diff,bed,F}(SSW = 0) \cdot (1 - SSW) \cdot F_B(SSW) \quad \text{in W/m}^2 \quad (46)$$

Gesamte diffuse Einstrahlung bei gemischt bewölktem Himmel:

$$P_{diff,F}(SSW) = P_{diff,klar,F}(SSW) + P_{diff,bed,F}(SSW) \quad \text{in W/m}^2 \quad (47)$$

SSW ist dabei die Sonnenwahrscheinlichkeit für die zu berechnende Stunde.

In **Bild 4** wird eine Gegenüberstellung der diffusen Einstrahlung auf die Horizontale sowie auf senkrechte Flächen, die in die vier Haupthimmelsrichtungen orientiert sind, vorgenommen.

Dabei wird unterschieden nach nahezu wolkenlosem Himmel ($SSW = 0,9$) und einem gemischt bewölktem Himmel mit $SSW = 0,4$. Dieses Beispiel ist so gewählt, da es Eingang in die „künftige“ VDI 2078 findet. Der nahezu wolkenlose Himmel ist für den Auslegungstag (CoolingDesingDay CDD) gültig. Bewusst ist nicht der Fall des völlig wolkenlosen Himmels ($SSW = 1$) angesetzt, da dafür die diffuse Strahlung z.B. für Nordfassaden zu gering berücksichtigt würde.

Der Fall des gemischt bewölkten Himmels mit $SSW = 0,4$ wird für die Kühllastzone 4 zur sogenannten Anlaufrechnung verwendet.

Deutlich werden die unterschiedlichen Relationen zwischen horizontalen und senkrechten Flächen bei nahezu wolkenlosem Himmel gegenüber gemischt bewölktem Himmel.

Da in der „künftigen“ VDI 2078 die Wirkung des Sonnenschutzes nach direkter und diffuser Einstrahlung differenziert wird, wirkt sich der hohe Diffusanteil morgens bei Ostfassaden und nachmittags bei Westfassaden deutlich auf den Gesamtenergieeintrag in den Raum auch bei betätigtem Sonnenschutz aus.

Bodenreflexion auf die beliebig orientierte und beliebig geneigte Fläche

Für die Bodenreflexion gilt:

$$P_{Umg,F}(SSW) = (P_{dir,hor}(SSW) + P_{diff,hor}(SSW)) \cdot 0,5 \cdot \rho_{Umg} \cdot (1 - \cos \gamma_F) \quad (48)$$

in W/m^2

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

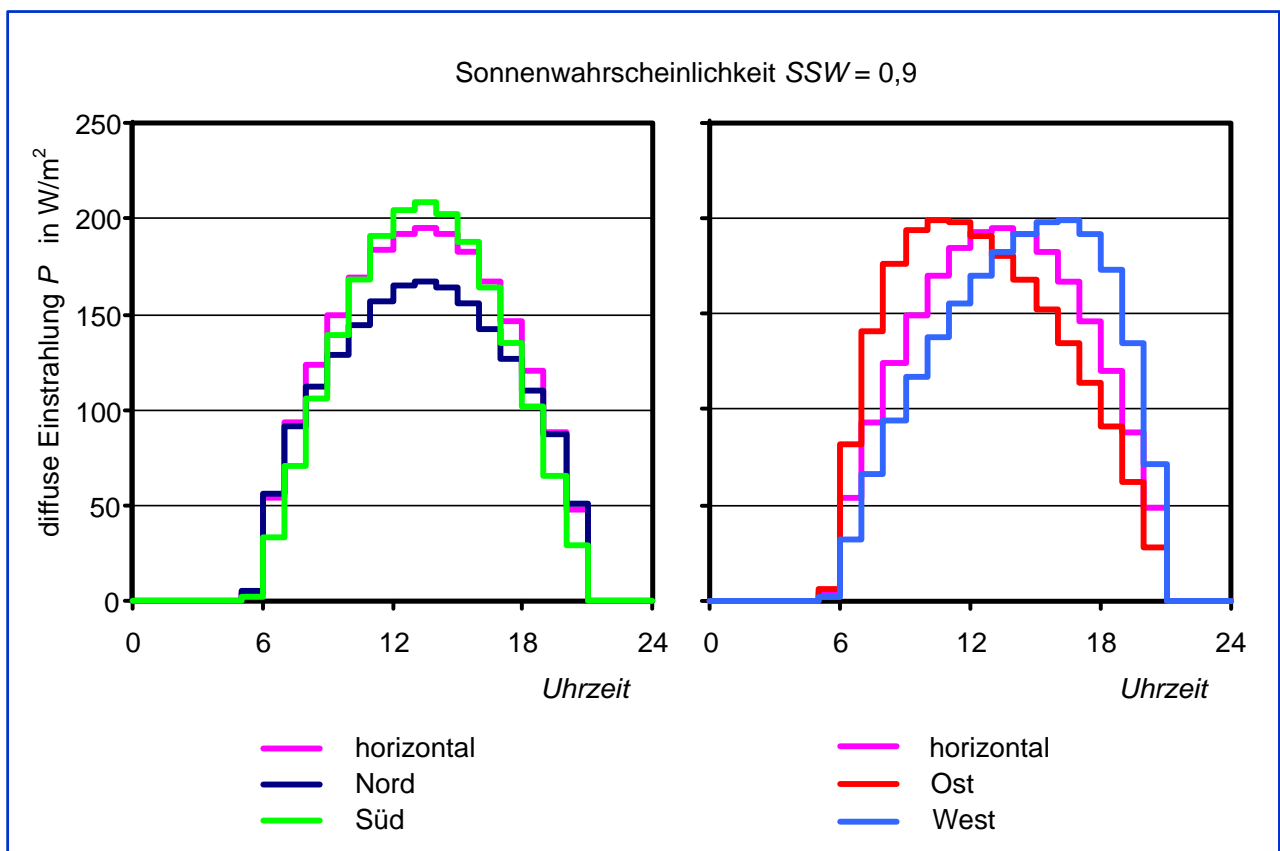


Bild 4a: Tagesgang der diffusen Einstrahlung $P_{diff,F}(SSW)$ einschließlich der Bodenreflexionsstrahlung $P_{Umg,F}(SSW)$ für $\rho_{Umg} = 0,2$;
 Standort Mannheim, 15. Juni
 an einem Tag für die Auslegung nach VDI 2078 neu: $SSW=0,9$, $T_{Linke} = 4,3$

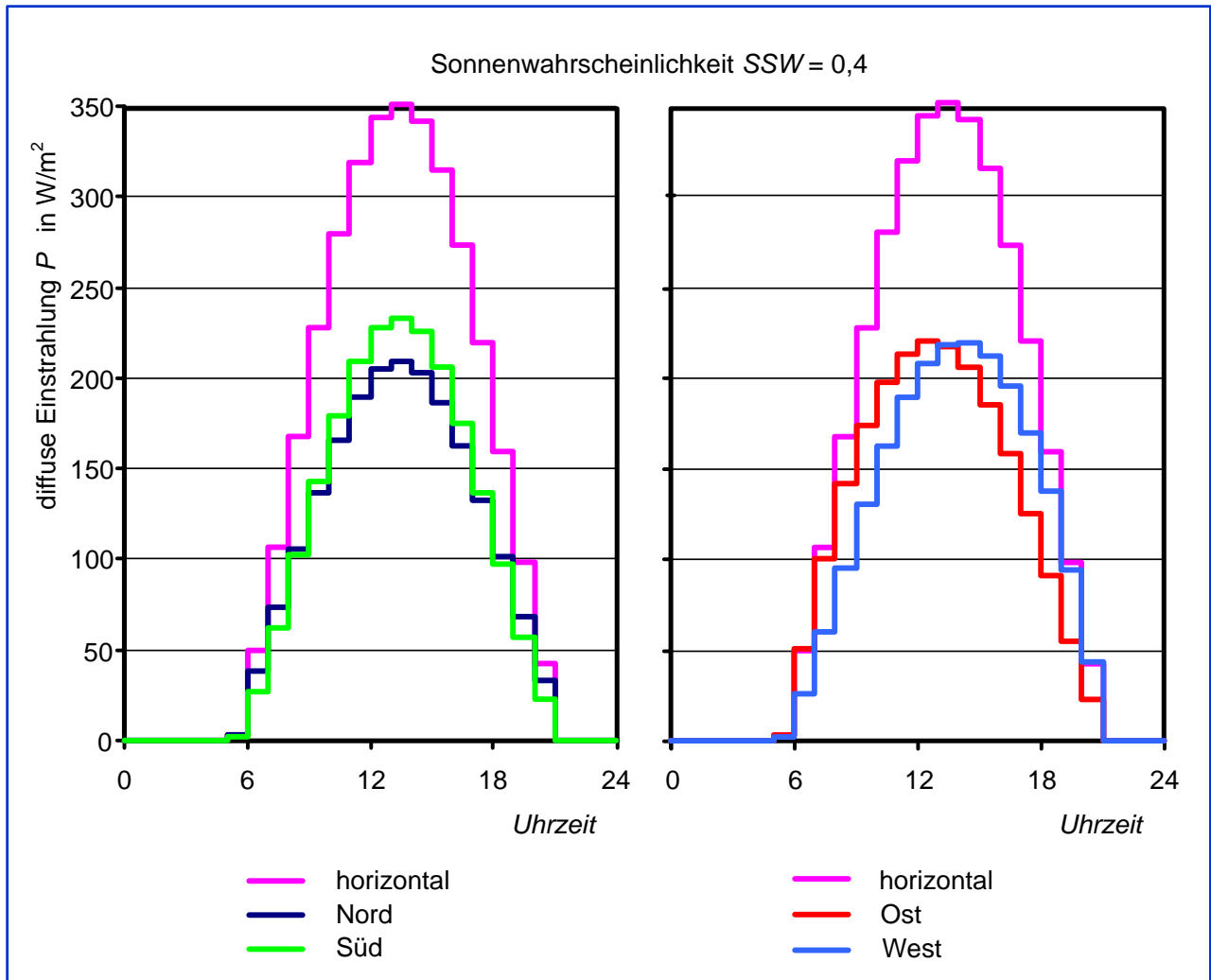


Bild 4b: Tagesgang der diffusen Einstrahlung $P_{diff,F}(SSW)$ einschließlich der Bodenreflexionsstrahlung $P_{Umg,F}(SSW)$ für $\rho_{Umg} = 0,2$; Standort Mannheim, 15. Juni an einem gemischt bewölkten Tag: $SSW=0,4$, $T_{Linke} = 6,1$)

Ermittlung der kurzwelligigen Strahlung durch beliebig orientierte und beliebig geneigte transparente Flächen (einschließlich Sonnenschutz)

Der Wärmeeintrag in den Raum P_{Raum} durch eine transparente Fläche ermittelt sich grundsätzlich nach Gl. (49) bzw. Gl. (50) für jeden der vier Einstrahlungskomponenten auf eine beliebig geneigte und beliebig orientierte Fläche:

- Direkte Einstrahlung $P_{dir,F}$
- Diffuse Einstrahlung (Anteil wolkenloser klarer Himmel) $P_{diff,klar,F}$
- Diffuse Einstrahlung (Anteil gleichmäßig bedeckter Himmel) $P_{diff,bed,F}$
- Bodenreflexionsstrahlung (Umgebung) $P_{Umg,F}$

Für die Fensterkombination bei geöffnetem beweglichen Sonnenschutz gilt:

$$P_{Raum} = P_F \cdot g \cdot kor_g \quad \text{in W/m}^2 \quad (49)$$

Für die Fensterkombination mit geschlossenem beweglichen Sonnenschutz gilt:

$$P_{Raum} = P_F \cdot g_{tot} \cdot kor_g \quad \text{in W/m}^2 \quad (50)$$

mit:

P_F : Einstrahlung auf eine beliebig geneigte und beliebig orientierte Fläche, unterschieden nach den vier Einstrahlungskomponenten:

$$P_{dir, F} \quad \text{nach Gl. (28),} \quad P_{diff, klar, F} \quad \text{nach Gl. (45)}$$

$$P_{diff, bed, F} \quad \text{nach Gl. (46)} \quad P_{Umg, F} \quad \text{nach Gl. (48)}$$

g : Gesamtenergiedurchlassgrad für die Fensterkombination bei geöffnetem beweglichen Sonnenschutz (Anhaltswerte im Anhang A, Werte nach Bundesanzeiger oder Berechnungswerte nach VDI 6007-2 [8])
Der g -Wert ist ermittelt für quasi-parallele senkrechte Einstrahlung.

g_{tot} : Gesamtenergiedurchlassgrad für die Fensterkombination bei geschlossenem beweglichen Sonnenschutz (Anhaltswerte im Anhang A oder Berechnungswerte nach VDI 6007-2 [8])

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

Anmerkung:

Beim g_{tot} -Wert wird unterschieden zwischen der direkten Strahlung

$g_{tot, dir}$ und der diffusen Strahlung $g_{tot, diff}$. Eine weitere Differenzierung

nach Art der diffusen Strahlung wird nicht vorgenommen.

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

$$P_{dir, F} \quad \text{nach Gl. (28),} \quad P_{diff, klar, F} \quad \text{nach Gl. (45)}$$

$$P_{diff, bed, F} \quad \text{nach Gl. (46)} \quad P_{Umg, F} \quad \text{nach Gl. (48)}$$

sowie unterschieden nach Zustand des Sonnenschutzes:

geöffneter beweglicher Sonnenschutz

geschlossener beweglicher Sonnenschutz

bei außenliegendem oder bei innenliegendem (bzw. zwischenliegendem) Sonnenschutz

Korrekturwerte kor_g

Nachfolgend wird die Ermittlung des Korrekturwertes kor_g für den Gesamtenergiedurchlassgrad g bei nicht senkrechten und nicht parallelen Strahlungseinfall beschrieben.

Da bei der **direkten Sonneneinstrahlung** zwar paralleler, jedoch i. d. R. kein senkrechter Strahlungseinfall vorhanden ist, muss dies durch den Einstrahlwinkel ξ nach Gl. (11) berücksichtigt werden:

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

Die **diffuse Sonneneinstrahlung** (einschl. 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 in

- $kor_{g,diff,klar}$ Korrekturfaktor diffuse Strahlung für den wolkenlosen Himmel
- $kor_{g,diff,bed}$ Korrekturfaktor diffuse Strahlung für den bedeckten Himmel
- $kor_{g,Umg}$ 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 direkte Sonneneinstrahlung zur Verfügung, aber für die drei Anteile der diffusen Strahlung gibt es i. d. R. keine Angaben.

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

- eine Glasscheibe
- zwei Glasscheiben
- drei und mehr Glasscheiben

Die Berechnung des Korrekturwertes kor_g erfolgt nach dem Berechnungsverfahren von Aydinli [1] und [5].

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 der Randbedingung für den g - und g_{tot} -Wert nach VDI 6007-2 und einschlägiger Normen, u. a. DIN EN 410 [7] usw. gilt:

$$\text{eine Glasscheibe: } g_{dir,0}(1) = 0,8544 \quad (51)$$

$$\text{zwei Glasscheiben: } g_{dir,0}(2) = 0,7537 \quad (52)$$

$$\text{drei und mehr Glasscheiben: } g_{dir,0}(3) = 0,6714 \quad (53)$$

Die Größen $g_{dir,0}(1)$ bis $g_{dir,0}(3)$ können auch entsprechend der nachfolgenden Gleichungen Gl. (54) und Gl. (58) bis Gl. (66) für **direkte** Strahlung bei $\xi = 0^\circ$ berechnet werden.

Der Transmissionsgrad τ wird unterschieden für die direkte (parallele) Sonneneinstrahlung τ_{dir} und die diffuse (gestreute) Sonneneinstrahlung τ_{diff} .

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

$$\tau_{dir} = \left(\left(\left(\left(\left(A_6 \cdot \xi + A_5 \right) \cdot \xi + A_4 \right) \cdot \xi + A_3 \right) \cdot \xi + A_2 \right) \cdot \xi + A_1 \right) \cdot \xi + A_0 \quad (54)$$

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

mit

$$A_0 = 0,918$$

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

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

$$\begin{aligned}
A_3 &= -3,82 \cdot 10^{-7} \\
A_4 &= 5,83 \cdot 10^{-8} \\
A_5 &= -1,15 \cdot 10^{-9} \\
A_6 &= 4,74 \cdot 10^{-12}
\end{aligned}$$

und für diffuse Strahlung bei wolkenlosem klarem Himmel $\tau_{diff,klar}$ nach [4]:

$$\begin{aligned}
\tau_{diff,klar} &= 0,83 - 0,075 \cdot (\gamma_F/70^\circ - 1)^2 + (0,052 + 0,033 \cdot (\gamma_F/90^\circ - 1)^2) \cdot (\cos \xi + 0,15)^2 \\
\text{wenn } \tau_{diff,klar} &< 0 & \text{dann } \tau_{diff,klar} &= 0
\end{aligned} \quad (55)$$

mit:

γ_F Neigung der betrachteten Fläche in Grad
 ξ : Einstrahlwinkel nach Gl. (11) in Grad

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

$$\tau_{diff,bed} = 0,84 \quad (56)$$

sowie für Bodenreflexionsstrahlung τ_{Umg} :

$$\tau_{Umg} = 0,84 \cdot \left((\sin \gamma_F)^{0,88 \cdot (1 - 0,5 \cdot \text{abs}(\sin(2 \cdot \gamma_F)))} \right) \quad (57)$$

mit:

γ_F Neigung der betrachteten Fläche in Grad

Der Reintransmissionsgrad τ_i berechnet sich für Einfach-Klarglas für direkte Strahlung zu:

$$\tau_{i,dir} = 0,907^{\left(\frac{1}{\sqrt{1 - (\sin \xi / 1,515)^2}} \right)} \quad (58)$$

und für diffuse Strahlung:

$$\tau_{i,diff} = 0,903 \quad (59)$$

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

Transmissionsgrad für Einfach-Klarglas:

$$\tau_1 = \tau \cdot \tau_i \quad (60)$$

mit:

τ sowie τ_i : alternativ: τ_{dir} nach Gl. (54) sowie $\tau_{i,dir}$ nach Gl. (58)
oder $\tau_{diff,klar}$ nach Gl. (55) sowie $\tau_{i,diff}$ nach Gl. (59)
oder $\tau_{diff,bed}$ nach Gl. (56) sowie $\tau_{i,diff}$ nach Gl. (59)
oder τ_{Umg} nach Gl. (57) sowie $\tau_{i,diff}$ nach Gl. (59)

Reflexionsgrad für Einfach-Klarglas:

$$\rho_1 = \rho_{11} + \left(\left((1 - \rho_{11}) \cdot \tau_i \right)^2 \cdot \rho_{11} \right) / \left(1 - (\rho_{11} \cdot \tau_i)^2 \right) \quad (61)$$

mit

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

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

Absorptionsgrad für Einfach-Klarglas:

$$\alpha_1 = 1 - \tau_1 - \rho_1 \quad (62)$$

Man erhält damit nun die Korrekturwerte kor_g für ein, zwei und mehr Scheiben für Einfach-Klarglas:

$$kor_g = (\tau_1 + Q_{sek,1}) / g_{dir,0} (1) \quad (63)$$

mit

$$Q_{sek,1} = \alpha_1 \cdot (7,7 / (7,7 + 25)) \quad (64)$$

für Zweifach-Klarglas:

$$kor_g = (\tau_2 + Q_{sek,2}) / g_{dir,0} (2) \quad (65)$$

mit

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

$$Q_{21} = \alpha_1 \cdot (1 + (\tau_1 \cdot \rho_1 / X_{N2})) \cdot U / 25$$

$$Q_{22} = \alpha_1 \cdot (\tau_1 / X_{N2}) \cdot (1 - U / 7,7)$$

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

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

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

U Wärmedurchgangskoeffizient des Fensters

für Dreifach-Klarglas oder mehr Scheiben:

$$kor_g = (\tau_3 + Q_{sek,3}) / g_{dir,0} (3) \quad (66)$$

mit

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

$$Q_{31} = \alpha_1 \cdot (1 + (\tau_1 \cdot \rho_1 \cdot (X_{N2} + \tau_1^2))) / X_{N3} \cdot U / 25$$

$$Q_{32} = \alpha_1 \cdot (\tau_1 \cdot (X_{N2} + \tau_1 \cdot \rho_1) / X_{N3}) \cdot 0,5 \cdot (1 - U / 7,7 + U / 25)$$

$$Q_{33} = \alpha_1 \cdot (\tau_1^2 / X_{N3}) \cdot (1 - U / 7,7)$$

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

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

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

U Wärmedurchgangskoeffizient des Fensters

Um einen Überblick über den Einfluss der kor_g -Werte auf den Strahlungseintrag in den Raum zu erhalten, sind in **Bild 5** die Werte für direkte und diffuse Einstrahlung am Beispiel von Zweifach-Verglasung in Abhängigkeit vom Einstrahlwinkel ξ angegeben. Dabei wird bei der diffusen Strahlung noch unterschieden zwischen bedecktem und klarem Himmel.

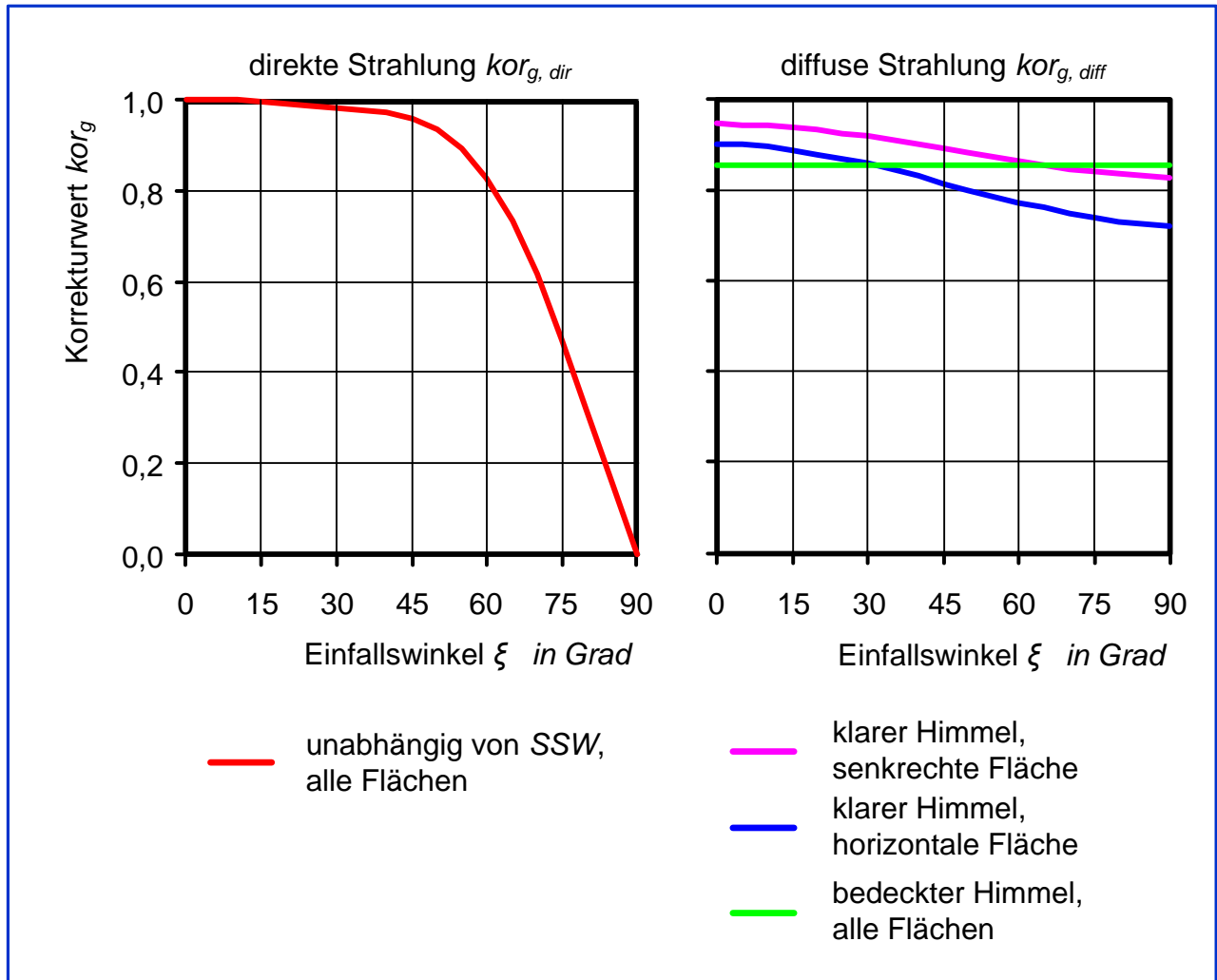


Bild 5: kor_g -Werte für die direkte und diffuse Einstrahlung in Abhängigkeit vom Einstrahlwinkel ξ bei Zweifachverglasung

Da der g -Wert den Strahlungsdurchgang für quasi-parallele senkrechte Einstrahlung bewertet, ist eine Korrektur mittels $kor_{g, dir}$ abhängig vom Einstrahlwinkel ξ einleuchtend. Vernachlässigt wurde bisher häufig die Reduktion bei diffuser Einstrahlung (einschließlich der Bodenreflexionsstrahlung). Insbesondere der Einfluss des Einstrahlwinkels bei klarem – und damit auch bei gemischt bewölktem Himmel – aufgrund der ungleichmäßigen Leuchtdichteverteilung des Himmels ist vielfach nicht bedacht worden.

PROF. DR.-ING. HABIL. LOTHAR ROUVEL
FACHGEBIET ENERGIETECHNIK UND -VERSORGUNG · THERMISCHE GEBÄUDESIMULATION

SÄULINGSTRASSE 4
80686 MÜNCHEN

TEL.: 089-576804 FAX: 089-5706641
ROUVEL@GEBSIMU.DE WWW.GEBSIMU.DE

