

Anteil der diffusen Himmelsstrahlung an der Gesamt- oder Globalstrahlung

Teil III Physikalische Grundlagen zur Berechnung von Flachkollektoren

Von Dr. Ulf Bossel, Göttingen

Der Beitrag wurde in Heft 4/76 begonnen und in Heft 5/76 fortgesetzt.

Im Bereich der Bundesrepublik empfängt jeder Quadratmeter Bodenfläche jährlich etwa 1 000 Kilowattstunden an Sonnenstrahlung. Die auf die horizontale Fläche einfallende Energiemenge setzt sich aus direkter und indirekter Strahlung zusammen. Der indirekte Anteil wird häufig auch als "diffuser Anteil" oder "Himmelsstrahlung" bezeichnet. Beide Anteile sind einer starken tages- und jahreszeitlichen Schwankung unterworfen.

Für die Berechnung der Leistungsdaten eines Kollektors interessiert jedoch nicht die Strahlung auf eine horizontale Fläche, sondern die Energiemenge, die eine schräg angestellte und in eine südliche Richtung zeigende Fläche im Jahresverlauf empfängt. Mangels geeigneter Meßdaten und Erfahrungen muß im Augenblick noch versucht werden, die Einstrahlung auf eine vorgegebene Fläche aus den vorhandenen Meßergebnissen für horizontale Empfänger zu errechnen. Der hier vorgeschlagene Weg stellt deshalb eine grobe Annäherung an die Wirklichkeit dar. Es ist zu erwarten, daß in nächster Zeit zuverlässige Solardaten in Kurvenblattsammlungen und Tabellen zur Verfügung stehen werden.

Globalstrahlung

Die Jahressumme der auf eine horizontale Fläche einfallenden Strahlungsmenge, die als Summe von direkter und indirekter Strahlung als "Globalstrahlung" bezeichnet wird, variiert von Ort zu Ort. Die Abweichungen von der oben genannten runden Zahl von 1000 kWh/m² · a sind bei uns jedoch relativ gering, wie T a b e l l e 4 zeigt.

Tabelle 4: Mittlere Jahressummen der Globalstrahlung für verschiedene Orte (1) 12)

Hamburg	958	kWh/m ² a
Braunschweig	936	kWh/m ² a
Berlin	1000	kWh/m ² a
Würzburg	1081	kWh/m ² a
Trier	1010	kWh/m ² a
Zürich	1160	kWh/m ² a
Salzburg	1086	kWh/m ² a

Wesentlich ausgeprägter sind die Tagessummen der Globalstrahlung jedoch an den jährlichen Rhythmus gekoppelt. Im Winter steht die Sonne wegen der Deklination der Erdoberfläche nicht nur kürzer über dem Horizont als im Sommer, sondern sie ist auch häufiger durch Bewölkung bedeckt. Beides zu-

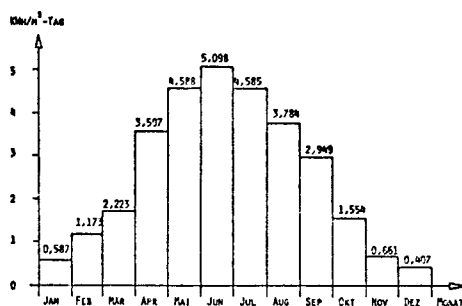


Bild 15: Monatsmittel der täglichen Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche in Hamburg, Mittelwerte der Jahre 1950 bis 1964

sammen erwirkt den in Bild 15 und T a b e l l e 5 dargestellten jährlichen Ablauf der Globalstrahlung in Hamburg (12).

Die Zahlen für die Wintermonate erscheinen in dieser auf die horizontale Fläche bezogenen Darstellung entmutigend gering. Mißt man jedoch die Globalstrahlung, die auf eine zur Sonne senkrecht stehende Fläche auftrifft, so kann man dem "Heizen mit Sonne" zuversichtlicher entgegenblicken. Sommer- und Winterdaten unterscheiden sich dann nämlich, mit Ausnahme der unterschiedlichen Einstrahlungsdauer und der andersgearteten Witterungsbedingungen, nur unwesentlich. Für Zürich beträgt z.B. die Globalstrahlung auf eine zur Sonne senkrechte Fläche am 1. Mai 12:00 Uhr 1080 W/m² und am 21. Dezember 12:00 Uhr 930 W/m² (11). In einer Stunde empfängt der richtig angestellte Kollektor im Dezember also fast doppelt soviel Energie wie die horizontale Fläche während des ganzen Tages unter Voraussetzung günstiger Besonnung.

Sonnenscheindauer

Von den möglichen Sonnenscheinstunden, während denen die Sonne über dem Horizont steht, durchdringt die

Tabelle 5: Globalstrahlung im Monatsmittel in Hamburg (12) aus Messungen von 1950 bis 1964

Monat	pro Tag kWh/m ² -Tag	pro Monat kWh/m ² -Mon.
Januar	0,587	18,2
Februar	1,173	38,8
März	2,223	68,9
April	3,597	107,9
Mai	4,588	142,2
Juni	5,098	152,9
Juli	4,585	142,2
August	3,784	117,3
September	2,949	88,5
Oktober	1,554	48,2
November	0,661	19,8
Dezember	0,407	12,6
Summe		957,6 kWh/m ² a

direkte Strahlung aber nur während eines Bruchteils R (relative Sonnenscheindauer) die Wolkendecke. Die tatsächliche Sonnenscheindauer ist in unserem Klimagebiet wesentlich kürzer als die Zeit zwischen Sonnenauf- und -untergang. Für die drei Städte München, Frankfurt und Hamburg hat Schreitmüller (13) die in Bild 16 dargestellten monatlichen Werte für die relative Sonnenscheindauer R zusammengetragen. Man erkennt, daß im Münchner Raum der September mit R = 0,53 der relativ sonnenreichste Monat ist, während in Hamburg im Mai mit R = 0,43 das Optimum erreicht wird. In Frankfurt sind die Sommermonate bei R = 0,46 ausgeglichen. Im Vergleich zu den Wüstenregionen der Erde, für die R-Werte zwischen 0,9 und 1,0 typisch sind, schneidet das deutsche Wetter schlecht ab. Im Winter sinkt die relative Sonnenscheindauer in Hamburg sogar unter 0,1 ab.

Zur Verdeutlichung der relativen Darstellung in Bild 16 sind in T a b e l l e

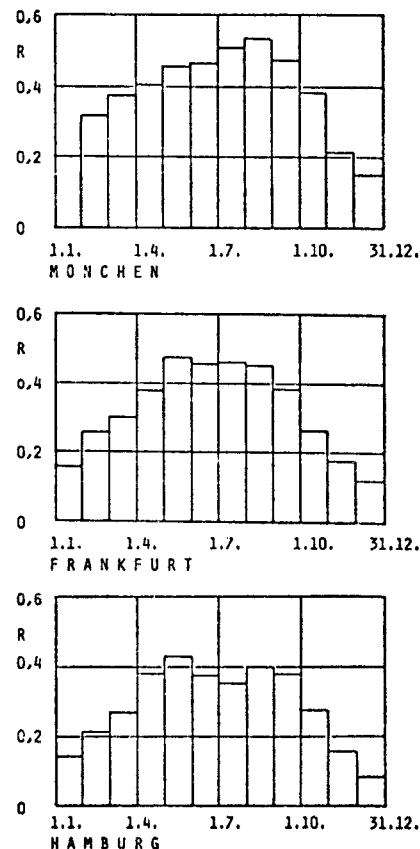


Bild 16: Relative Sonnenscheindauer

Tabelle 6: Sonnenscheindauer in Hamburg

Monat	relative Sonnenscheindauer R	mögliche Sonnenscheindauer pro Monat (Stunden)	tatsächliche Sonnenscheindauer pro Monat (Stunden)	Sonnenscheindauer pro Tag (Stunden)
Januar	0,141	251	36,6	1,18
Februar	0,212	273	57,9	2,07
März	0,268	365	97,8	3,15
April	0,378	416	157,3	5,24
Mai	0,430	488	210,3	6,77
Juni	0,377	503	189,6	6,32
Juli	0,351	505	177,3	5,72
August	0,398	455	181,1	5,84
September	0,380	380	144,4	4,81
Oktober	0,275	328	119,3	3,85
November	0,156	260	40,6	1,35
Dezember	0,083	235	19,5	0,63

6 die Hamburger Werte in Absolutzahlen angegeben.

Auch aus dieser Aufstellung geht hervor, daß ein der Sonne nachgeführter und immer senkrecht zur Strahlungsrichtung blickender Kollektor während der Wintermonate trotz der geringen Sonnenscheinstunden mehr Energie in Form von direkter Strahlung (800 W/m²) empfangen kann, als er in horizontaler Aufstellung an Globalstrahlung registrieren würde. Der Einfluß des Einstrahlwinkels θ kommt also deutlich zum Ausdruck.

Die Sonnenscheindauer variiert natürlich von Ort zu Ort. Dem Buch "Haus & Sonnenkraft" von R. P. Sabady 11) sind die in Tabelle 7 zusammengestellten Angaben entnommen.

Tabelle 7: Jährliche Sonnenscheindauer für verschiedene Orte in Stunden

Berlin	1705	Marseille	2654
Bremen	1657	Paris	1840
Hamburg	1659	Mailand	1906
München	1730	Rom	2491
Stuttgart	1702	Sahara	4000
Basel	1680	Tunis	3200
Bern	1756	Kopenhagen	1680
Genf	2037	Essen	1442
Lugano	2100	Tel-Aviv	3500
Zürich	1694	Nizza	2775
Graz	1903	Genua	2288
Innsbruck	1765	Perpignan	2560
Salzburg	1712	Neapel	2396
Wien	1891	Brindisi	2591

Die schlechten Verhältnisse in Essen sind sicherlich nicht nur meteorologisch bedingt, sondern beinhalten auch eine vermehrte Wolkenbildung im industriell hochentwickelten Ruhrgebiet.

Himmelsstrahlung

Der Anteil der Himmelsstrahlung an der Globalstrahlung wäre dann einfach zu ermitteln, wenn es nur eine einzige "Standardbewölkung" gäbe. Bewölkungen variieren aber vom leichten Dunst bis zur schwarzen Gewitterwand und verdecken außerdem nur selten den ganzen Himmel gleichmäßig und zeitlich unverändert.

Die Energiemenge der Himmelsstrahlung, die sich aus dem diffus an der Wolkendecke und an Dunstpartikeln gebrochenen Sonnenstrahlung, aus reflektierter Strahlung von Objekten in Bodennähe und aus der Eigenstrahlung der Wolken im Infrarotbereich zusammensetzt, ist also nur statistisch zu erfassen.

Hierfür wählt man als Bezugsgröße zur Normierung der Meßergebnisse diejenige Strahlungsmenge, die bei völlig bedecktem Himmel (relative Sonnenscheindauer R = 0) gemessen wird. Für

jeden Bedeckungsgrad läßt sich dann die "relative Globalstrahlung" a mit Hilfe der Gleichung

$$(18) a = \frac{QR=0}{QR=1} = \frac{\text{Strahlungsmenge bei völlig bedecktem Himmel}}{\text{Strahlungsmenge bei wolkenlosem Himmel}}$$

Tabelle 8: Monatsmittelwerte der Globalstrahlung, der Globalstrahlung bei völliger Bedeckung des Himmels und der relativen Globalstrahlung für Zürich-Kloten bezogen auf die horizontale Fläche

Monat	Globalstrahlung Q (kWh/m ² ·d)	Globalstrahlung bei völliger Bedeckung QR=0 (kWh/m ² ·d)	relative Globalstrahlung a
Januar	928	579	0,34
Februar	1682	673	0,24
März	2807	1056	0,23
April	4141	1357	0,22
Mai	5232	1902	0,24
Juni	5730	1369	0,16
Juli	5893	1775	0,21
August	4698	1079	0,15
September	3573	1137	0,22
Oktober	1995	940	0,31
November	882	487	0,27
Dezember	650	452	0,32

definieren. Für Zürich-Kloten 14) sind die statistisch über einen Zeitraum von zehn Jahren gemittelten Werte in Tabelle 8 aufgetragen.

Für den teilweise bedeckten Himmel ergibt sich dann ein Zusammenhang zwischen der relativen Sonnenscheindauer R , der relativen Globalstrahlung a , der errechenbaren idealen Globalstrahlung bei wolkenlosem Himmel $QR=1$ und der zu erwartenden Globalstrahlung QR über die folgende Gleichung 14):

$$(19) QR = QR=1 [(1-a)\sqrt{R} + a]$$

Voraussagen der zu erwartenden Globalstrahlung sind also möglich, wenn die anderen Größen gegeben sind.

Der Anteil der Himmelsstrahlung QH läßt sich aus der gemessenen Globalstrahlung und der direkten Strahlung für jeden vorgegebenen Einstrahlungswinkel berechnen, da

$$(20) QR = R QR=1 + QH$$

und somit

$$(21) QH = QR - R QR=1 = QR=1 [(1-a)R + a] - R QR=1$$

Dieser Ansatz hat natürlich nur überschlägliche Gültigkeit.

Strahlung auf den schräg angestellten Kollektor

Auf den schräg angestellten Kollektor fällt nicht nur direkte und indirekte Strahlung, sondern auch reflektierte

und emittierte Strahlungsenergie von naheliegenden Objekten. Im Gegensatz zur horizontalen Ebene kann der Kollektor nämlich umliegende Gebäude, Bäume und Landschaft, die alle auf ihn einwirken können, "sehen". Einmal vermindert sich durch die Schrägstellung der Anteil der Himmelsstrahlung, da nur ein Teil des Firmaments im Blickfeld des Kollektors liegt, zum anderen kann aber die von den umliegenden Objekten zurückgestreute Strahlung einen spürbaren Beitrag zur Energiebilanz des Kollektors leisten. Besonders im Winter bei schneebedeckter Landschaft bringen Kollektoren bisweilen mehr, als aufgrund der gemessenen Globalstrahlung zu erwarten gewesen wäre.

Vereinfacht soll deshalb in der folgenden Umrechnung der auf horizontaler Fläche gemessenen Globalstrahlung auf diejenige, die eine schräg angestellte Fläche empfangen würde, angenommen werden, daß sich die Himmelsstrahlung bei Neigung des Kollektors nicht verändert.

Da der Kollektor im Regelfall nicht der Sonne nachgeführt wird, müßte man die folgende Umrechnung für vorgegebene Kollektororientierung und -anstellung und für jeden Sonnenstand formelmäßig angeben. Dies ist in diesem Zusammenhang umständlich und würde den Umfang dieser Arbeit übersteigen. Vereinfacht soll deshalb nur der Gedankengang am Spezialfall erläutert werden, wenn die Sonne genau "über" dem Kollektor steht, d.h.,

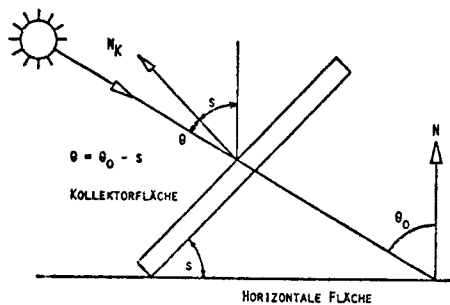


Bild 17: Umrechnung des direkten Strahlungsanteils von der horizontalen auf die Kollektorfläche

wenn die Azimutwinkel von Kollektor und Sonne übereinstimmen. Es ergibt sich dann die in Bild 17 dargestellte Situation mit

$$(22) \theta = \theta_0 - s.$$

Wiederum setzt sich die auf die Kollektorebene eingestrahlte Energiemenge aus einem direkten und einem indirekten Anteil zusammen

$$(23) Q_K = Q_{K, \text{dir.}} + Q_{K, \text{ind.}}$$

Der direkte Anteil läßt sich mit der oben definierten relativen Sonnenstundendauer R und der Wärmemenge Q_0 , die von einer senkrecht zur Strahlungsrichtung angeordneten Fläche unter besten Bedingungen empfangen werden könnten, mit Hilfe des Ansatzes

$$(24) Q_{K, \text{dir.}} = R Q_0 \cos \theta \\ = R Q_0 \cos (\theta_0 - s) \\ = R Q_{R=1} \cos (\theta_0 - s)$$

berechnen, wobei $Q_{R=1}$ der gemessene Beitrag der direkten Strahlung zur Globalstrahlung auf die horizontale Fläche ist.

Da der indirekte Beitrag bereits mit Gleichung (21) ermittelt worden ist, läßt sich Gleichung (23) mit der Abnahme

$$(25) Q_{K, \text{ind.}} = Q_H$$

in der folgenden Form darstellen:

$$(26) Q_K = R Q_{R=1} \cos (\theta_0 - s) - 1 + Q_H$$

$$(26) Q_K = R Q_{R=1} \left(\frac{\cos (\theta_0 - s)}{\cos \theta_0} - 1 \right) + Q_H$$

und mit der Gleichung (19)

$$(27) Q_K \\ = Q_{R=1} \left[R \left(\frac{\cos (\theta_0 - s)}{\cos \theta_0} - 1 \right) + (1-a) \sqrt{R+a} \right]$$

Diese Gleichung gilt, wie bereits angedeutet, nur wenn die Sonne "über" dem Kollektor steht. Anderenfalls sind die Kosinusfunktionen durch kompliziertere Ausdrücke zu ersetzen.

Damit sind für die Kollektorberechnung die meteorologischen Daten soweit aufbereitet, daß mit den physikalischen Eigenschaften des Wärmesammlers selbst begonnen werden kann. In der nächsten Folge dieser Serie soll auf die optischen Eigenschaften der Kollektorabdeckung eingegangen werden.

Literaturhinweise

- 11) P.R. Saby: Haus & Sonnenkraft Zürich, 2. Auflage, 1976
- 12) W. Collmann: Stundensummen der Globalstrahlung von Hamburg Meteorologische Rundschau, 20. Jahrg. 2/1967 S. 36
- 13) K.R. Schreitmüller: Kollektor-Speicher-Optimierung, in "HEIZEN MIT SONNE", Tagungsber. der DGS, 1976



DAS SPEZIALPRODUKT FÜR KREISSYSTEME

Produktprogramm Anwendungstechnik



Spezialprodukt PKL

Frost- und Korrosionsschutzmittel für Kreiswassersysteme wie Warmwasserheizungen, Fußbodenheizungen, Schwimmbadheizungen, Brücken-, Fahrbahn-, Rampen- und Rasenbeheizungen, Hallen- und Kirchenheizungen, Wärmerückgewinnungsanlagen und für Solaranlagen mit Niedertermperatur-Kollektoren.



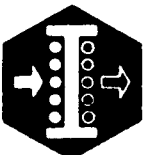
PKL anticorron und PKL anticorron D

Wärmeaustausch- und Schutzflüssigkeit zum Befüllen der Primärkreissysteme von Solar- und Wärmepumpenanlagen. Absorber- und Schutzflüssigkeit (Dispersions mit Schwarzkörpereffekt) für heliostatische und solare Strahlung und Einspeicherung von Sonnenenergie. Anwendungsbezogener Temperaturbereich der Flüssigkeit - 20° C bis + 103° C bei 1 bar. Keine Flammpunkte, nicht brennbar.



Spezialprodukt PKL 90 und 100

Wärmeaustausch- und Schutzflüssigkeit für hocheffiziente Solaranlagen. Speicherflüssigkeit für Solarwärme. Anwendungsbezogener Temperaturbereich der Flüssigkeiten -46° C bis + 140° C bei 1 bar bzw. -67° C bis + 195° C bei 1 bar.



Spezialprodukt PKL 300

Giftfreie und hydrophile Wärmeaustausch- und Schutzflüssigkeit für Kreiswassersysteme von Solar-, Wärmepumpen-, Wärmerückgewinnungs- und Klimaanlage, bei denen über Wärmeaustauscher oder Wärmespeicher die Wärmeaustausch- und Schutzflüssigkeit in die Brauch- oder Trinkwasserversorgung gelangen kann. Anwendungsbezogener Temperaturbereich der Flüssigkeit -38° C bis +106° C bei 1 bar. Keinen Flammpunkt, nicht brennbar.

PKL Anwendungstechnik

Technische Beratung zur Anwendung von PKL Produkten in Kreissystemen zum Schutze gegen Frost, Korrosionen und Alterung. Planen von Anlagen mit PKL-Kreislauf zur Nutzung der Strahlungs-, Erdreich-, Luft- und Wasserwärme und Abwasser-Produktwärme.

Langzeitige und kostenlose Produkt-Überwachung der PKL Produkte von Kreissystemen sowie Lieferung elektronischer Kontroll-, Meß- und Prüfgeräte zur Überwachung des Frost-, Korrosions- und Alterungsschutzes von wäßrigen PKL-Lösungen und PKL Produkten in Kreissystemen.

Alle PKL Produkte sind sofort ab Werk Ludwigshafen/Rhein oder Lager Ellmeney 1 lieferbar.

Für einige Länder des europäischen Raumes vergeben wir noch Exklusivrechte.

Erich Schmarbeck · PKL Produkte · Anwendungstechnik · Ellmeney 1
7970 Leutkirch im Allgäu 3 Telefon (07567) 481
Mitglied der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie e V (DGS)