

2.2. Strahlungsberechnung

2.2.1. Die extraterrestrische Strahlung

Quelle der Solarenergie ist ein in der Sonne stattfindender Kernfusionsprozeß. Die Sonne hat an der Oberfläche eine Leistung von 60 MW/m^2 . Da sie 150 Mio. km von der Erde entfernt ist, erreicht nur ein Bruchteil die Erde. Die Strahlung in Erdentfernung, aber außerhalb der Atmosphäre, beträgt im Mittel 1356 W/m^2 . Die Erdbahn ist exzentrisch, so daß diese Größe einer jahreszeitlichen Schwankung unterworfen ist. Im Januar wird ein Maximum von 1405 W/m^2 und im Juli ein Minimum von 1308 W/m^2 erreicht /38/. Ergebnis ist eine Vergleichmäßigung des Klimas in der nördlichen Klimazone und eine Extremierung des Klimas der südlichen Halbkugel (siehe Bild 10). Da die hohen Solarkonstanten bei steilem Sonnenstand besser genutzt werden können, haben Orte auf der Südhalbkugel höhere Jahressummen der extraterrestrischen Strahlung als Orte gleicher Breite auf der Nordhalbkugel.

Der Jahresgang der Solarkonstante ergibt sich mit der Tagesnummer n zu:

$$S = 1356,5 + 48,5 \cdot \cos[0,01721 \cdot (n-15)] \quad /38/$$

Als extraterrestrische Strahlung wird jene Strahlung bezeichnet, die sich auf der horizontalen Erdoberfläche einstellen würde, wenn die Atmosphäre die Strahlung weder schwächen noch streuen würde. Sie ist damit von der geographischen Lage, der Uhrzeit und der Jahreszeit abhängig. Für ihre Bestimmung muß zunächst die wahre Sonnenhöhe ermittelt werden. Für alle Berechnungen muß die wahre Ortszeit angesetzt werden. Diese unterscheidet sich aufgrund der Abweichung vom Definitionslängengrad, gegebenenfalls Sommerzeit und durch die variable Bahngeschwindigkeit der Erde von der Zonenzeit. Die entsprechende Einflußgröße z schwankt im Jahresverlauf zwischen -14 und $+17$ Minuten

$$\tau = \bar{\tau} + z - \frac{\lambda_0 - \lambda}{15} + SZK \quad \psi = 0,9863(n-2,8749) + 1,9137 \sin[0,09863(n-2,8749)] + 102,06$$

$$z = 0,0132 \text{ min} + 7,3525 \text{ min} \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{365} + 1,4989\right) + 9,9359 \text{ min} \cdot \cos\left(\frac{4\pi n}{365} + 1,9006\right) + 0,3387 \text{ min} \cdot \cos\left(\frac{6\pi n}{365} + 1,836\right) \quad /39/$$

$$\sin \delta = -0,3979 \sin \psi \quad ; \quad \sin h = \sin \varphi \sin \delta - \cos \varphi \cos \delta \cos (\omega \tau) \quad /40/$$

Bei Strahlungsberechnungen wird die ekliptische Länge nur selten benötigt. Die Deklination kann dann direkt mit einer genaueren Gleichung bestimmt werden:

$$\delta = 0,7896^\circ - 23,2559^\circ \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{365} + 0,1582\right) - 0,3915 \cdot \cos\left(\frac{4\pi n}{365} + 0,0934\right) - 0,1764 \cdot \cos\left(\frac{6\pi n}{365} + 0,4539\right) \quad /39/$$

τ	wahre Ortszeit in Stunden	$\bar{\tau}$	Zonenzeit
z	Summand Sonnentagslänge	SZK	Sommerzeitkorrektur: -1 h

λ_0	Definitions­längengrad (15°)	λ	tatsächlicher Längengrad
ψ	e­kliptische Länge	ω	Stundenwinkel $\omega = 2\pi/24h$
δ	Deklination		
φ	geographische Breite	h	wahre Sonnenhöhe

Die Sonnenstrahlung wird auf ihrem Weg durch die Atmosphäre gebrochen, so daß sich eine leicht veränderte scheinbare Sonnenhöhe ergibt, aus der dann die extraterrestrische Strahlung errechnet werden kann.

$$\hat{h} = h + \frac{1,4705}{3,0427+h} - 0,0158 \quad ; \quad I_{ex} = S \cdot \sin \hat{h} \quad /40/$$

Der Unterschied zwischen wahrer und scheinbarer Sonnenhöhe ist sehr gering. Er beträgt für die Zeit um Sonnenauf- und -untergang etwa $0,5^\circ$ und sinkt bei größerer Sonnenhöhe schnell ab. Dieser Einfluß kann mit guter Näherung vernachlässigt werden.

Das Azimut γ , also die Richtung der Sonne, kann gemäß folgender Gleichung errechnet werden:

$$\sin \gamma = - \frac{\cos \delta \cdot \sin(\omega \cdot \tau)}{\cosh} \quad /41/$$

In Bild 9 ist der Tagesgang der wahren Sonnenhöhe für unterschiedliche Tage in Dresden dargestellt. Die maximale Höhe liegt zwischen $15,6^\circ$ am 22. Dezember und $62,4^\circ$ am 21. Juni. Auch im Sommer ist die Sonne also noch weit vom Zenit entfernt, so daß in unseren Breiten nach Möglichkeit geneigte Sonnenkollektoren einzusetzen sind.

Ebenfalls dargestellt sind die wahren Ortszeiten. Deutlich erkennbar wird, daß die Sonnenrichtung nicht nur eine Funktion der Tages-, sondern auch der Jahreszeit ist. Die Abweichung beträgt im Jahresverlauf bis zu 30° .

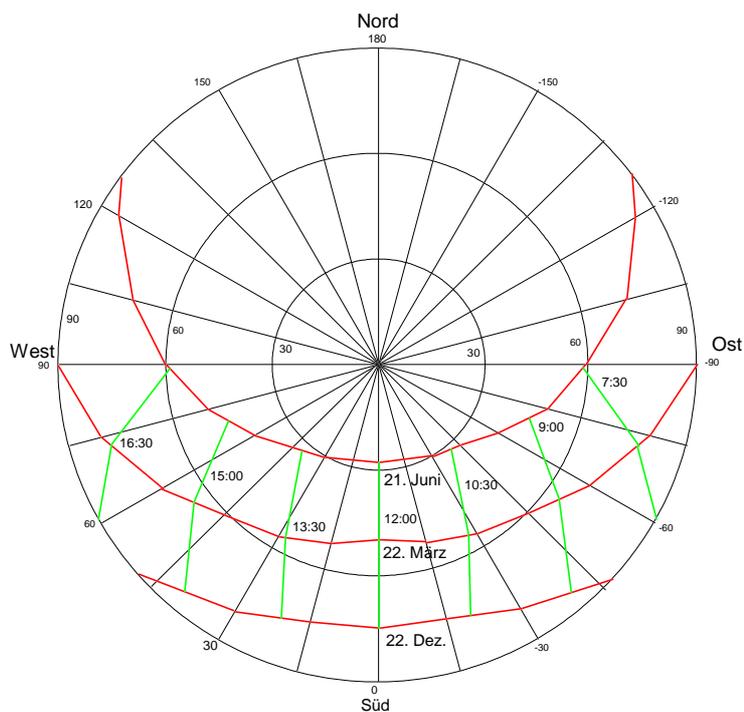


Bild 9: Sonnenhöhe und -richtung im Tages- und Jahresverlauf in Dresden

In Bild 10 ist der Jahresverlauf der Tagesdurchschnittswerte der extraterrestrischen Strahlung für unterschiedliche Orte dargestellt. In Dresden (51° nördlicher Breite) wird das Maximum im Juni und das Minimum im Dezember erreicht, auf den Falklandinseln (51° südlicher Breite) ist es genau umgekehrt. Am Äquator ist der Verlauf relativ ausgeglichen. Es treten dort zwei Maxima im Jahresverlauf auf.

Die Jahressumme beträgt in Dresden 2409 kWh. Am Äquator ist sie mit 3629 kWh nur 51 % größer. Auf den Falklandinseln ist sie mit 2469 kWh etwa 2 % größer - ein Ergebnis des Jahresverlaufs der Solarkonstante.

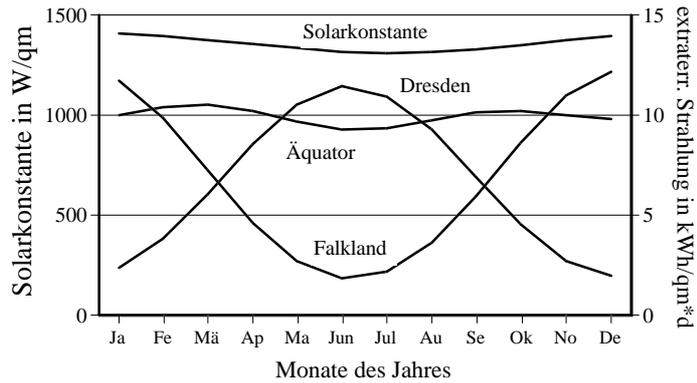


Bild 10: Jahresverläufe

2.2.2. Trübungshypothese

Auf der Erdoberfläche trifft nur ein Bruchteil der extraterrestrischen Strahlung ein. Je nach geographischer Lage werden etwa 30 bis 70 % in der Atmosphäre absorbiert. Ein weiterer Teil wird gestreut. Er liegt dann nicht mehr als konzentrierbare direkte Strahlung, sondern als diffuse Strahlung vor.

An wolkenlosen Tagen entspricht der Verlauf der direkten Strahlung relativ gut der Trübungshypothese. Diese geht davon aus, daß die direkte Strahlung logarithmisch proportional zu einem Mächtigkeitkoeffizienten der durchstrahlten Luftmasse geschwächt wird. Der Proportionalitätsfaktor wurde Trübungsfaktor genannt. Die Berechnung erfolgt gemäß folgenden Gleichungen:

$$Q = \frac{9,38076 \left(\sin \hat{h} + \sqrt{0,003 + \sin^2 \hat{h}} \right)}{2,0015(1-H \cdot 10^{-4})} + 0,91202$$

$$I_b = I_{ex} \cdot e^{-\frac{T}{Q}} \quad /40/$$

Q: Faktor zur Berücksichtigung des Einflusses der Mächtigkeit der durchstrahlten Luftmasse

T: Trübungsfaktor

H: geodätische Höhe in m

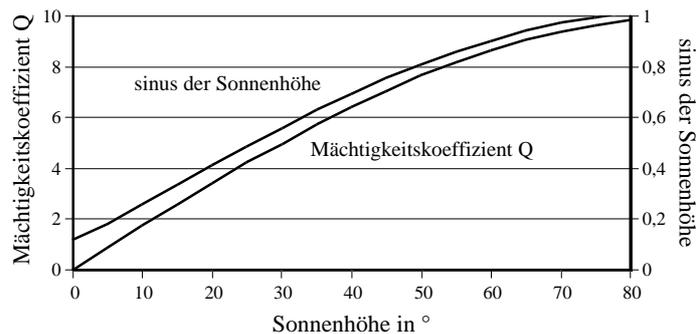


Bild 11: Mächtigkeitkoeffizient Q

Es ist zu beachten, daß der Mächtigkeitkoeffizient nicht umgekehrt proportional zur Weglänge der Strahlung in der Atmosphäre ist. Er wäre dann proportional zum Sinus der Sonnenhöhe, was entsprechend Bild 11 nicht der Fall ist. Die Ursache ist in der weitestgehenden Totalabsorption einzelner Strahlungsbestandteile, unabhängig von der durchstrahlten Luftmenge zu sehen. Dies betrifft zum Beispiel die UVA-Strahlung.

Der Trübungsfaktor hat für eine reine Atmosphäre, die nur aus den Idealgasen der Luft besteht, den Wert 1. Durch in der Luft stets enthaltenen Wasserdampf und Staub wird der Trübungsfaktor erhöht. Er liegt je nach Location und Jahreszeit zwischen 1,5 und 5,8 /42/. Im Winter ist er grundsätzlich niedriger als im Sommer und auf dem Lande niedriger als in der Großstadt. In Bild 12 ist der Jahresverlauf dargestellt.

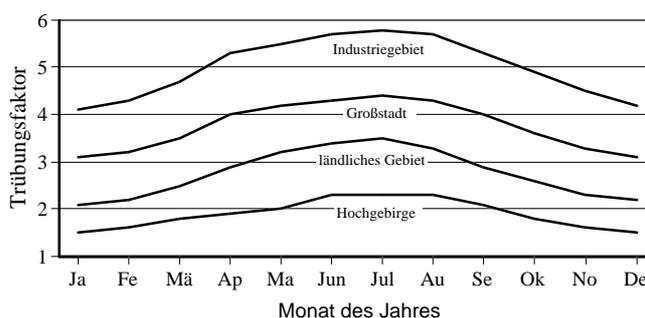


Bild 12: Trübungs Faktoren im Jahresverlauf

Der Trübungsfaktor ist im Tagesverlauf relativ ausgeglichen. Für die vom deutschen Wetterdienst 1994 in Chemnitz gemessenen /43/ Strahlungswerte wurde der Tagesverlauf betrachtet. Untersuchungsgegenstand waren die wolkenlosen Tage im Januar (5) und Juli (13). Als wolkenlose Tage gelten diejenigen Tage, an denen der Trübungsfaktor nie den Wert 10 überschreitet. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Tagesverlauf des Trübungs faktors

Monat	7.00	9.30	12.00	14.30	17.00
Januar		4,8	4,1	5,3	
Juli	3,7	4,1	5,1	4,2	4,3

Die Werte deuten auf einen charakteristischen Tagesgang hin, der im Winter zu den Mittagsstunden abfällt und im Sommer ansteigt. Die Winterwerte sind jedoch aufgrund der geringen Menge wolkenloser Tage nicht repräsentativ genug. Es fällt weiterhin auf, daß die mittleren Trübungs faktoren im Winter nicht deutlich niedriger als im Sommer waren. Hierbei ist noch zu ergänzen, daß im Januar tatsächlich Trübungs faktoren unter 2 auftraten, jedoch sehr selten. Im Juli betrug der minimale Trübungs faktor 3,4.

Ist die direkte Strahlung aus der Trübungs faktorenrechnung bekannt, kann mit üblichen Korrelations- und Diffusstrahlungsmodellen (siehe Seite 19 f.) die Strahlung auf beliebig geneigte Flächen errechnet werden.

In Bild 13 ist die horizontale Direktstrahlung für unterschiedliche Trübungs faktoren dargestellt. Die Direktstrahlung erreicht für eine Sonnenhöhe von 45 ° Werte von 433 bis 736 W/m².

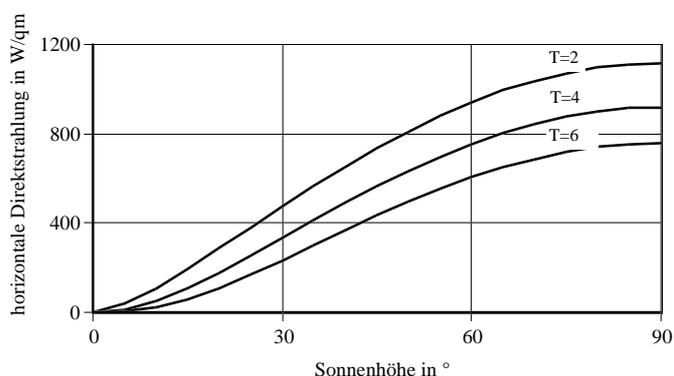


Bild 13: Horizontale Direktstrahlung

Wolkenlose Tage können mit Trübungs faktoren gut behandelt werden; an bewölkten Tagen, welche in Deutschland die überwältigende Mehrheit aller Tage darstellen, versagt das Modell.

2.2.3. Direkte und diffuse Strahlung

Ist die direkte Strahlung aus einer Trübungsrechnung oder die Globalstrahlung aus Meßwerten bekannt, besteht die Notwendigkeit einer Berechnung der diffusen Strahlung. Nur wenn mindestens zwei Strahlungsarten aus Meßwerten bekannt sind, kann sich diese erübrigen.

Die Ermittlung erfolgt zumeist mittels einer Korrelation für horizontale Strahlungen:

$$\frac{\text{Diffusstrahlung}}{\text{Globalstrahlung}} = f\left(\frac{\text{Globalstrahlung}}{\text{extraterrestrische Strahlung}}\right),$$

In Bild 14 sind entsprechende Meßwerte nach den 1994 in Chemnitz gemessenen Strahlungsdaten dargestellt. Die Meßwerte streuen in einem relativ weiten Bereich, aber nicht alle Sektoren sind von gleicher Bedeutung. Durch Multiplikation von Werthäufigkeit und Globalstrahlung wurde ein Gewicht ermittelt, das in Bild 15 neben anderen Größen graphisch dargestellt ist.

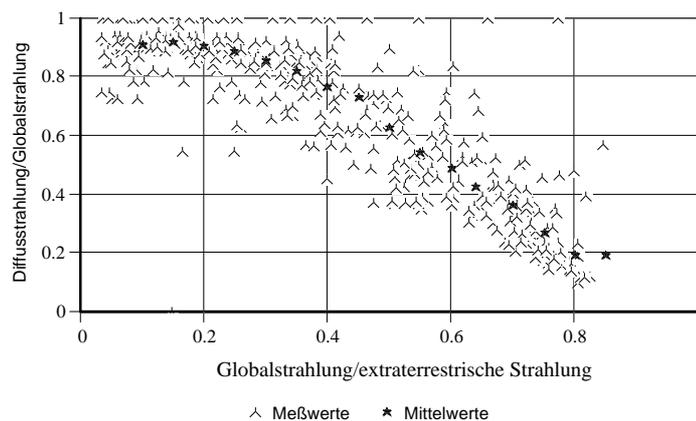


Bild 14: Korrelationszusammenhang

Es steht nun die Aufgabe, eine an diese Mittelwertkurve angepaßte mathematische Funktion zu entwickeln, um eine Berechnung mit dem Computer zu ermöglichen. Aus der Literatur sind eine Reihe von Funktionen bekannt. Betrachtet wurden nur Funktionen einfachen Typus. Funktionen, die zum Beispiel eine zusätzliche Abhängigkeit von der Luftfeuchte aufweisen, wurden ausgeschieden, da diese oft unbekannt ist.

In Bild 15 sind einige Korrelationen dargestellt. Die Liu-Jordan-Korrelation erzeugt in weiten Bereichen zu niedrige Diffusstrahlungswerte. Die Erbs-Korrelation führt bei niedrigen Strahlungswerten zu höheren und bei hohen Strahlungswerten zu niedrigeren Diffusstrahlungen als zulässig. Zudem ist die Funktion nicht stetig, sondern aus drei Teilabschnitten aufgebaut, was die Berechnung verkompliziert. In der entsprechenden Quelle /41/ wurde sie zudem falsch angegeben.

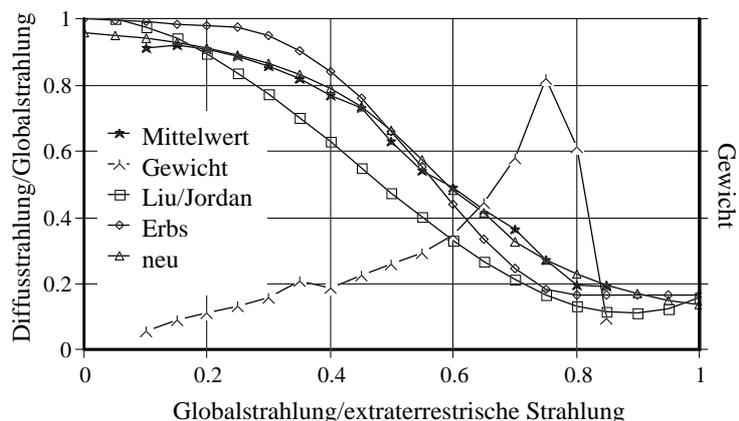


Bild 15: Korrelationsfunktionen

Um die Korrelationsrechnung zu verbessern, wurde eine neue Korrelation gesucht. Neben einer guten Annäherung an die Mittelwertkurve muß sie stetig sein und auch außerhalb des

Definitionsbereichs der Mittelwertkurve keine physikalisch unsinnigen Werte annehmen. Gerade letztere Forderung wird von einem Polynom nicht erfüllt, da höhere Polynome ein ausgeprägtes Schwingungsverhalten aufweisen. Eine optimale Annäherung wurde mit einer Arcustangensfunktion erreicht:

$$\frac{I_d}{I} = 0,53 - 0,34 \cdot \arctan\left(5,5 \cdot \frac{I}{I_{ex}} - 3,16\right)$$

In Bild 15 ist die neue Funktion mit der Bezeichnung "neu" dargestellt. Sie legt sich gut an die Mittelwertkurve an. Im gesamten Bereich treten nur sehr geringe Abweichungen auf.

In Bild 16 sind nun die mittels dieser Korrelation aus den Direktstrahlungen gemäß Bild 13 ermittelten Globalstrahlungen dargestellt. Bei einer Sonnenhöhe von 45° liegen die Globalstrahlungen zwischen 652 und 905 W/m^2 .

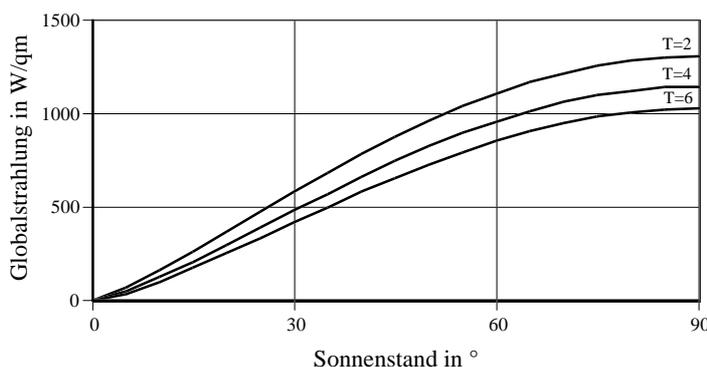


Bild 16: Globalstrahlung

In Bild 16 treten Globalstrahlungswerte über 1200 W/m^2 auf. In Deutschland sind jedoch aus zwei Gründen nur Maximalwerte von 1000 W/m^2 möglich:

1. Der maximale Sonnenstand liegt nur wenig über 60°
2. Bei hohem Sonnenstand, also im Sommer, sind auch die Trübungsfaktoren hoch.

An Stelle der Korrelationsfunktionen wird in der Literatur /39/40/ folgende Funktion angegeben:

$$I_b = \chi(I_{ex} - I_{glob})$$

Die Größe χ wird üblicherweise mit $1/3$ angegeben. Es wurde versucht, die angegebene Funktion anhand der Wetterdaten von Chemnitz nachzuweisen. Dabei stellte sich heraus, daß χ keine Konstante, sondern eine im Bereich von 0 bis 1,5 schwankende Größe ist. Sie korreliert mit dem Quotienten I_{glob}/I_{ex} , besitzt jedoch eine wesentlich größere Streuung als I_{diff}/I_{glob} . Die Berechnung mit der Größe χ ist also nicht sinnvoll.

2.2.4. Strahlung auf geneigte Flächen

Sind aus vorangegangenen Rechnungen oder aus Meßwerten die Strahlungsbestandteile horizontale Direkt- und Diffusstrahlung bekannt, kann die Strahlung auf beliebig geneigte Flächen bestimmt werden. Diese setzt sich aus direkter, diffuser und Umgebungsreflexionsstrahlung zusammen.

Die direkte Strahlung kann gemäß folgender Formel aus der horizontalen Direktstrahlung exakt bestimmt werden:

$$I_{bT} = I_b \cdot \frac{\sin \theta}{\sin h} \quad ; \quad \sin \theta = \sinh \cos \beta + \cosh \cdot \cos(\gamma_s - \gamma) \sin \beta \quad /41/$$

- I_{bT} Direktstrahlung auf eine geneigte Oberfläche
- θ Einstrahlungswinkel auf eine geneigte Oberfläche
- β Neigung der Oberfläche (senkrecht = 90°)
- γ_s Richtung der Oberfläche (Süden = 0° ; Westen = $+90^\circ$)

Die Berechnung der diffusen Strahlung ist komplizierter. Es existieren zwei Hypothesen.

Das isotrope Modell geht davon aus, daß die diffuse Strahlung gleichmäßig über den gesamten Himmel verteilt ist. Geneigte Flächen empfangen dann denjenigen Anteil der diffusen Horizontalstrahlung, der von ihnen einsehbaren Himmelsfläche entspricht. Die Berechnung erfolgt dann gemäß folgender Formel:

$$I_{dT} = I_d \frac{1 + \cos \beta}{2}$$

Das anisotrope Modell geht von einer Bevorzugung des sonnennahen Winkelbereichs aus. Diese ist bei klarem Himmel besonders ausgeprägt. Es gibt mehrere Rechenmodelle. Beispielrechnungen des Verfassers ergaben beim Modell nach Perez et. al. /28/ eine unzulässige Strahlungsüberhöhung an sehr klaren Tagen. Die Modelle nach Hay and Davis /29/ und Reindl /27/ lieferten fast identische Ergebnisse. Aufgrund des einfacheren Berechnungsablaufs ist das Modell nach Hay and Davis zu bevorzugen.

Dieses Verfahren nimmt eine Unterscheidung zwischen isotroper und zirkumsolarer diffuser Strahlung vor. Bei klarem Himmel steigt die Intensität der diffusen Strahlung in Richtung der Sonne an (zirkumsolarer Anteil). Hay und Davis wichten diesen Anteil durch Einführung eines Anisotropieindex A_I . Letzterer definiert die als zirkumsolar zu betrachtende Komponente, während der Rest demnach als isotrop diffus betrachtet wird. Das Modell läßt sich folgendermaßen ausdrücken:

$$A_I = \frac{I_b}{I_{ex}} \quad ; \quad I_{dT} = I_d \left[0,5(1 - A_I)(1 + \cos \beta) + A_I \frac{\sin \theta}{\sin h} \right]$$

Die Reflexion der Umgebung als dritter Strahlungsbestandteil ergibt sich aus dem von der geneigten Fläche einsehbaren Abschnitt der Umgebung, der Globalstrahlung und dem Albedo ρ_g , dem Rückstrahlungsvermögen der Umgebung:

$$I_{gT} = 0,5 \cdot I \cdot (1 - \cos\beta) \cdot \rho_g$$

Das Albedo liegt üblicherweise zwischen 0,2 und 0,4. An Seen und an hangabgewandten Seiten ist es etwas größer anzusetzen. Liegt Schnee, können hohe Werte bis 0,7 erreicht werden.

In Bild 17 sind die Ergebnisse der Strahlungsberechnung für die geographische Breite Dresdens dargestellt. Es handelt sich um die Einstrahlungswerte um 12.00 Uhr wahrer Ortszeit für eine nach Süden ausgerichtete Fläche. Sie ist für unterschiedliche Neigungswinkel und Trübungsfaktoren im Jahresverlauf dargestellt.

Bei einer relativ geringen Dachneigung von 30° ergibt sich ein sinusförmiger Strahlungsverlauf, wobei der Maximalwert zur Sommersonnenwende erreicht wird. Solch flache Kollektorneigungen sind besonders für sommerliche Versorgungsaufgaben geeignet, wie die Warmwasserbereitung und die Klimatisierung. Der Maximalwert beträgt im Sommer 1100 W/m^2 .

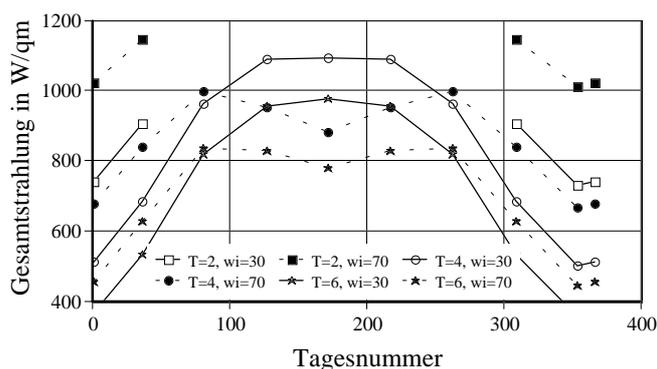


Bild 17: Jahresgang der mittäglichen Globalstrahlung

Bei einem sehr steilen, mit 70° geneigten Dach, ergeben sich zwei Strahlungsmaxima jeweils zu den Tag- und Nachtgleichen, den "Äquinoktien". Sonnenkollektoren wird man so steil anordnen, wenn Versorgungsaufgaben im Winter und in der Übergangsperiode zu bedienen sind, zum Beispiel Heizungsanlagen ohne saisonale Speicherung. Bei dieser großen Neigung wird mit 1140 W/m^2 auch die maximal mögliche Einstrahlung realisiert. Dies ergibt sich aus dem nur im Winter möglichen sehr niedrigen Trübungsfaktor von 2 sowie der dann fast senkrechten Sonneneinstrahlung auf die stark geneigte Fläche.

2.2.5. Strahlungsrückrechnung

Nicht immer sind horizontale Strahlungswerte bekannt. Speziell bei Meßprogrammen ist es sinnvoll, das Strahlungsmeßgerät in Kollektorebene auszurichten, um die Ergebnisse nicht mit den Fehlern der Strahlungsumrechnung zu belasten. Dies war auch in Oederan der Fall. Von den dort befindlichen sieben Solaranlagen ist nur eine mit einem Strahlungsmeßgerät ausgestattet. Die Ausrichtung der Kollektorfelder unterscheidet sich wesentlich. Um die Meßwerte übertragen und sie mit Daten des Deutschen Wetterdienstes vergleichen zu können, mußte ein Algorithmus für die Umrechnung der Werte von einer geneigten auf eine horizontale Fläche geschaffen werden.

Zielstellung ist es, für jeden gemessenen Feldstrahlungswert (Einstrahlung auf das Kollektorfeld) einen Globalstrahlungswert zu bestimmen, der bei der Vorwärtsrechnung wieder den Meßwert ergibt. Das in diesem Kapitel bisher aufgeführte Formelwerk ist nicht explizit auflösbar. Daher mußte ein numerischer Algorithmus gefunden werden.

Zum besseren Verständnis des Problems sind die sich aus unterschiedlichen Globalstrahlungen und Feldwinkeln ergebenden Feldstrahlungen in Bild 18 aufgetragen. Die Darstellung gilt für die Felddausrichtung des Meßblocks in Oederan (8° West und 37° Neigung) und den Tag des höchsten Sonnenstandes, also die am 22. Juni erfolgende Sommersonnenwende.

Wenn in den Mittagsstunden die Sonne fast senkrecht auf das Kollektorfeld scheint, steigt die Feldstrahlung mit der Globalstrahlung monoton an. In den Morgen- und Abendstunden, wenn die Sonne hinter dem Kollektorfeld steht, steigt die Feldstrahlung nur bis zu einem bestimmten Grenzwert an, um danach wieder abzufallen.

Geringe Globalstrahlungswerte bestehen nur aus Diffusstrahlung, die entsprechend der einsehbaren Himmelsfläche dem Kollektorfeld zugute kommt. Mittlere Globalstrahlungen bestehen in zunehmenden Maße aus Direktstrahlung, die nicht auf das Kollektorfeld trifft. Bei weiterer Erhöhung der Globalstrahlung verlagert sich der Schwerpunkt der Diffusstrahlung zum zirkumsolaren Anteil, der ebenfalls nicht auf das Kollektorfeld trifft, so daß dann die Feldstrahlung mit steigender Globalstrahlung absinkt.

Mit steigendem Feldwinkel (Einstrahlungswinkel auf das Kollektorfeld, senkrecht = 90°) geht dieser Funktionsverlauf langsam in den bereits erwähnten Verlauf für hohe Feldwinkel über. Es existiert ein Feldwinkel, bei dem die Funktion in einen Grenzwert der Feldstrahlung ausläuft. Dieser Winkel soll als kritischer Feldwinkel bezeichnet werden.

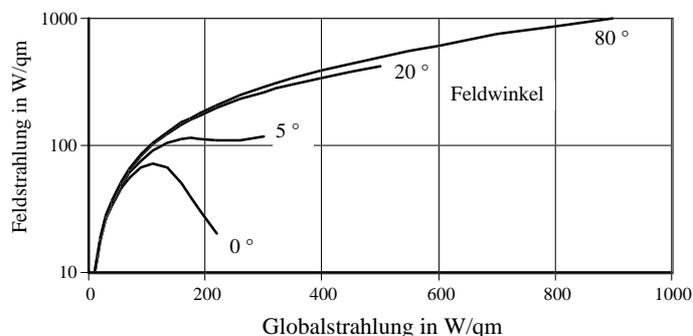


Bild 18: Strahlungsfunktionen zur Sommersonnenwende

Wesentlich für die Strahlungsrückrechnung ist, daß bei Feldwinkeln unterhalb des kritischen Feldwinkels für eine Feldstrahlung zwei unterschiedliche Globalstrahlungen korrekt sein können. Beim kritischen Feldwinkel kann die Feldstrahlung vollständig unbestimmt sein. Diese Unsicherheit führt zu einer Unschärfe der Strahlungsrückrechnung. Sie kann näherungsweise dadurch überbrückt werden, daß für den Zeitpunkt des kritischen Feldwinkels und Grenzwertnähe die Strahlung, die dem mittleren Trübungsfaktor der eindeutig definierten Tagesabschnitte entspricht, verwendet wird. Bei kleinen Feldwinkeln wird derjenige Wert eingesetzt, dessen Trübungsfaktor am besten mit den eindeutigen Werten korrespondiert.

Mit kürzer werdenden Tagen nimmt die Bedeutung des Problems ab, da kleine Feldwinkel seltener auftreten und sich der kritische Feldwinkel verringert. In Bild 19 ist der Sachverhalt für das Äquinoktium, also den 22.3 bzw. 22.9. dargestellt. Der kritische Feldwinkel ist auf 2° abgesunken. In Bild 20 ist die Situation bei der Wintersonnenwende (22.12.) erkennbar. Doppel- und Vieldeutigkeiten liegen nicht mehr vor.

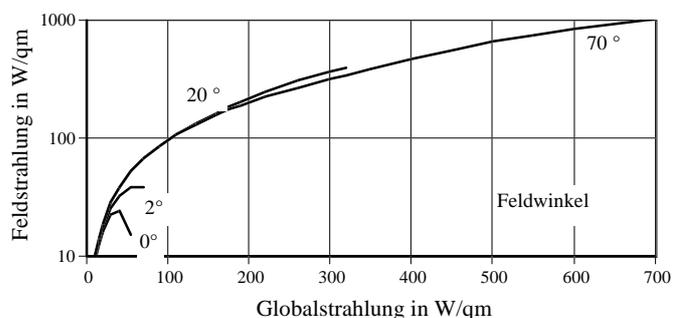


Bild 19: Strahlungsfunktionen zum Äquinoktium

Auffällig ist, daß im Winter bei gleicher Globalstrahlung die Feldstrahlung mit dem Feldwinkel absinkt, im Sommer jedoch ansteigt. Im Äquinoktium ist nur eine geringe Abhängigkeit vom Feldwinkel feststellbar. Ursache ist, daß zur Wintersonnenwende zu gleichen Sonnenhöhen wesentlich größere Feldwinkel gehören als zur Sommersonnenwende. Dies ist in Bild 21 dokumentiert.

Die Doppel- und Vieldeutigkeiten der Strahlungsrückrechnung gelten mit den genannten Zahlenwerten für die in Oederan vorliegende Feldausrichtung. Prinzipiell treten die Probleme immer dann auf, wenn die Sonne zeitweilig hinter dem Kollektorfeld liegt, also bei fast allen von der Horizontale abweichenden Ausrichtungen. Die Bestimmung von kritischem Feldwinkel und Größe der Unschärfe für andere Ausrichtungen als in Oederan wäre sehr aufwendig und sollte zukünftigen Untersuchungen vorbehalten bleiben.

Sind alle diese Effekte berücksichtigt, kann die numerische Berechnung der Globalstrahlung aus der Feldstrahlung mit dem Sekantenverfahren erfolgen:

$$I_{glob,n+1} = I_{glob,n} - [I_{feld,me\beta} - I_{feld}((I_{glob,n}))] \left(\frac{\Delta I_{feld}}{\Delta I_{glob}} \right)_n$$

Die Startwerte sind bestimmbar durch einen Ansatz der Form:

$$I_{glob,0} = I_{feld,me\beta} * \left(\frac{dI_{glob}}{dI_{feld}} \right)_{mittel}$$

Erfolgt die Mittelung nur nach der Jahreszeit, aber nicht nach dem Feldwinkel getrennt, lautet die Startwertgleichung wie folgt:

$$I_{glob,0} = I_{feld,me\beta} * (313970 - 2844 * n + 8,2 * n^2) * 10^{-5} \quad n: \text{Tagesnummer}$$

Der Algorithmus wurde beispielhaft auf den 2. Juli 1994, einen wolkenlosen Sommertag, angewendet und in Bild 22 dokumentiert. Ausgangspunkt waren die Meßwerte der Gesamtstrahlung für das Kollektorfeld in Oederan (37° Neigung, Südabweichung 8° West). Diese Funktion ist am größten Teil des Tages sinusförmig, eine Abweichung tritt in den Morgen- und Abendstunden auf, wenn die Sonne hinter dem Kollektorfeld steht.

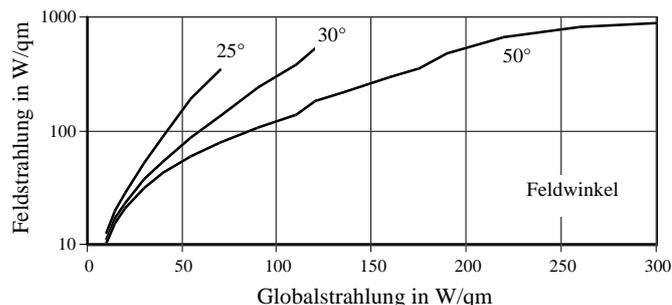


Bild 20: Strahlungsfunktionen zur Wintersonnenwende

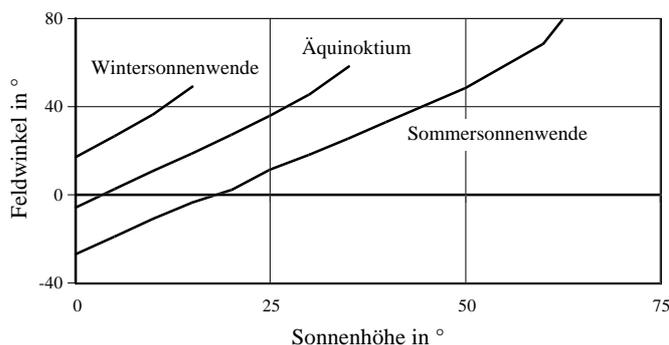


Bild 21: Abhängigkeit von Sonnenhöhe und Feldwinkel

Aus diesen Werten konnte die Globalstrahlung nicht immer eindeutig berechnet werden. Einige Werte mußten ergänzt werden, wobei vom Tagesverlauf des Trübungsfaktors ausgegangen wurde. Dies betraf zum einen die Zeiten, in denen der Einstrahlungswinkel in der Nähe des kritischen Feldwinkels um ca. 5° lag, gemäß Bild 18 ist die Strahlungsfunktion dann vieldeutig.

Zum anderen gab es in den frühen Morgenstunden vor 5.00 Uhr WOZ (ca. 6.10 Uhr ZZ) Schwierigkeiten, weil mit keinem sinnvollen Globalstrahlungswert (unter Einhaltung von $T > 2$) die Meßwerte abgebildet werden konnten. Mit allen anderen Werten, die in Zeiten des unterkritischen Feldwinkels lagen (Dauer etwa 2,5 h), gab es keine Probleme. Gemäß Bild 18 ist die Strahlungsfunktion zu dieser Zeit zweideutig. Angesichts des wolkenlosen Tages konnten jeweils die größeren Globalstrahlungswerte verwendet werden.

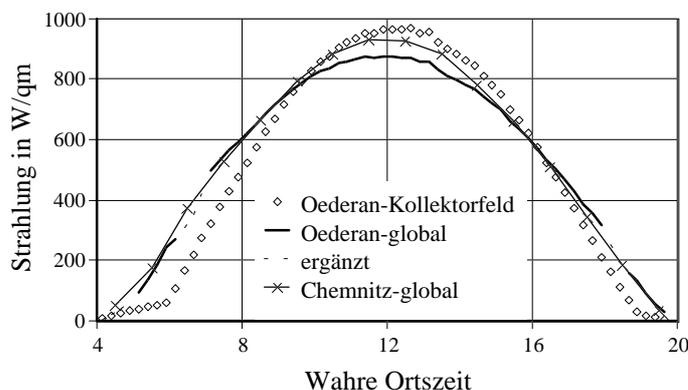


Bild 22: Strahlungsrückrechnung für den 2.7. 94

Zum Vergleich enthält das Diagramm die vom deutschen Wetterdienst im 15 km entfernten Chemnitz gemessenen Globalstrahlungsdaten /43/. Mit Ausnahme der Mittagsstunden sind die Meßkurve von Chemnitz und die Rechenkurve von Oederan fast identisch. Zur Mittagszeit lagen in Chemnitz um bis zu 6 % höhere Strahlungswerte vor als in Oederan. Dafür sind zwei Erklärungen denkbar:

1. In Chemnitz war es am Mittag klarer als in Oederan. Dies ist relativ unwahrscheinlich, da die Station tiefer und großstadtnäher liegt als Oederan.
2. Die Korrelationsfunktion gemäß Bild 15 beschreibt das Verhalten am 2.7.94 relativ schlecht. Dies konnte anhand der Chemnitzer Wetterdaten nachgewiesen werden, da sie aus Global- und Diffusstrahlungswerten bestehen. Der Tag ist dank wolkenlosen Wetters dem rechten Bereich des Streufeldes nach Bild 14 einzuordnen. Eine genaue Überprüfung ergab, daß die Werte unterhalb der Mittelwertkurve lagen. Diese Abweichung vom Berechnungsalgorithmus erklärt auch das Rechenproblem in den frühen Morgenstunden.

Als Ergebnis der beispielhaften Strahlungsrückrechnung ist festzuhalten:

1. Die Strahlungsrückrechnung ist prinzipiell möglich und kann zeitweise gute Ergebnisse liefern.
2. Zeitweise Zwei- und Vieldeutigkeiten der Umkehrfunktionen führen zu Unsicherheiten der Strahlungsberechnung.
3. Die Korrelationsfunktion widerspiegelt nur ein stochastisches Feld von Strahlungswerten, so daß die Strahlungsrückrechnung zu bestimmten Zeiten fehlerhafte Werte liefert.

Weiterhin ist festzustellen, daß die Strahlungsrückrechnung ein sehr weites Feld ist und hinsichtlich des Jahresverlaufs und verschiedener Ausgangsorientierungen weiter untersucht werden muß.

2.2.6. Isoheliendiagramm

Mit dem Isoheliendiagramm nach Bild 23 wird ein Verfahren für die Visualisierung der Ergebnisse der Strahlungsberechnung angewendet. Dort sind Neigung und Richtung von Gebäudeflächen als Polarkoordinatendiagramm aufgetragen. Das Zentrum symbolisiert eine horizontale Ebene und der äußerste Kreis senkrechte Wände unterschiedlicher Richtung. In diesem Ausrichtungskreis wurden Isolinien der jährlichen Gesamtstrahlung eingetragen. Die konkreten Zahlen gelten für die Wetterdatei Dresden-Wahnsdorf und wurden mit TRNSYS berechnet. Die Bestimmung ist sehr zeitaufwendig und wurde erst durch den TRNSYS-Variator gemäß Kapitel 2.3.5 möglich.

Optimal ausgerichtet ist ein Süddach mit einer Neigung von 46° . Es empfängt eine Strahlung von $1370 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, also 27 % mehr als eine ebene Fläche mit $1083 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Je mehr die Ausrichtung von diesem Optimalwert abweicht, desto geringer wird die Strahlung. In einem relativ großen Bereich um das Optimum sind die Abweichungen jedoch gering. Dies betrifft alle Dächer zwischen Südost und Südwest mit einer Neigung zwischen 30° und 60° . Beträgt die Südabweichung weniger als 15° , erhalten auch alle Dächer zwischen 15° und 75° Neigung gute Strahlungsmengen.

Der geringsten Strahlung unterliegt eine Nordwand, die mit $430 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, nur 31 % der Strahlungsmenge wie die begünstigste Fläche erhält.

Die Rechenwerte decken sich nicht mit den Meßergebnissen des 1000-Dächer-Programms (Markteinführungsprogramm Photovoltaik). Dort wurden zwischen Feldstrahlung und Globalstrahlung Unterschiede von maximal 20 % festgestellt, also 6 % weniger, als mit TRNSYS errechnet wurde.

Mittels Nachrechnung einzelner Tage mit einem Tabellenkalkulationsprogramm konnte nachgewiesen werden, daß das Formelwerk der Strahlungsberechnung korrekt programmiert ist

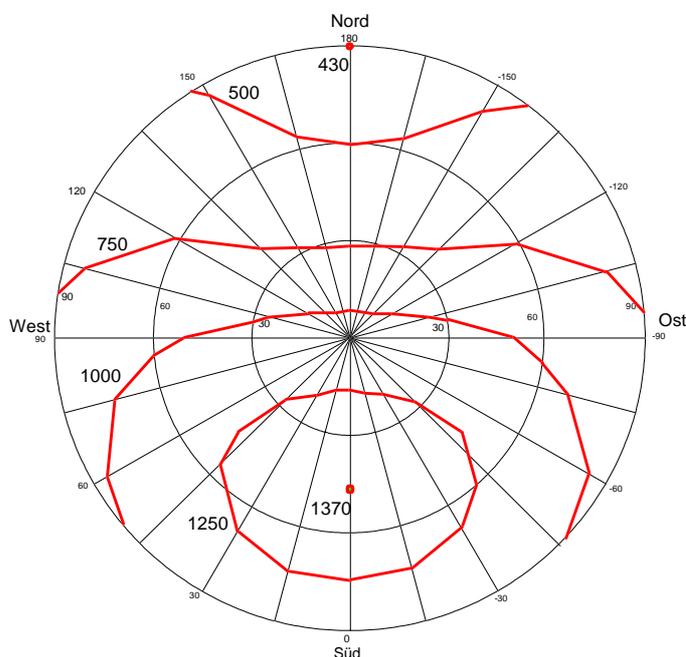


Bild 23: Isoheliendiagramm

Eine weitere Proberechnung ergab, daß die Meßwerte besser mit dem isotropen Modell als mit dem Modell nach Hay and Davis nachvollzogen werden konnten.. Es besteht Forschungsbedarf zur Vermessung der Diffusstrahlungsverteilung und der Weiterentwicklung der Rechenmodelle.

