

Teil I

Physikalische Grundlagen zur Berechnung von Flachkollektoren

Von Dr. Ulf Bossel, Göttingen

In der derzeitigen Phase der Nutzung von Sonnenenergie für die Erzeugung von Wärme auf niedrigem Temperaturniveau spielt der Flachkollektor eine dominierende Rolle. Ein solches Gerät ist in Bild 1 schematisch dargestellt. Es gestattet die Umwandlung von Strahlungsenergie in nutzbare Wärme.

Flachkollektoren sind, da sie Umweltenergie für die technische Nutzung einsammeln sollen, notwendigerweise verschiedenen Umwelteinflüssen ausgesetzt. Zwar kann man diese kaum beeinflussen; man muß sie jedoch bei allen Leistungsrechnungen berücksichtigen, um praxisnahe Voraussagen treffen zu können.

Als wesentliche Umweltfaktoren erkennen wir:

1. die Richtungsabhängigkeit der Sonneneinstrahlung im täglichen und jahreszeitlichen Ablauf,
2. die spektrale Zusammensetzung des einfallenden Lichtes, d.h. die Abhängigkeit der Strahlungsintensitätsverteilung von der Wellenlänge der den Kollektor treffenden Strahlung,
3. den Anteil von diffuser Himmelsstrahlung an der Gesamt- oder Globalstrahlung,
4. alle atmosphärischen und meteorologischen Bedingungen, die in irgendeiner Weise die Leistungsabgabe des Kollektors beeinflussen können. Hierzu zählen Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung, Luftfeuchtigkeit, Bewölkung, atmosphärische Trübung durch Dunst oder Aerosole, rasche Klimaänderungen usw.

Neben diesen Umweltfaktoren stehen dem Ingenieur viele Möglichkeiten offen, durch konstruktive Gestaltung des Kollektors, durch geeignete Materialwahl, durch günstige Platzierung des Sammlers und durch geschickten Betrieb der Gesamtanlage die Energieabgabe des Gerätes durch Verbesserung des Wirkungsgrades der Energiewandlung zu steigern. Im einzelnen lassen sich die folgenden Kollektorfaktoren aufzählen, deren Erfassung in dieser Arbeit angestrebt wird:

5. Physikalische Eigenschaften und Abmessungen aller Bauelemente des Flachkollektors,
6. rückwärtige Wärmeisolation des Kollektors,
7. Wärmespeicherverhalten des Kollektors,
8. Aufbau der Absorberplatte,

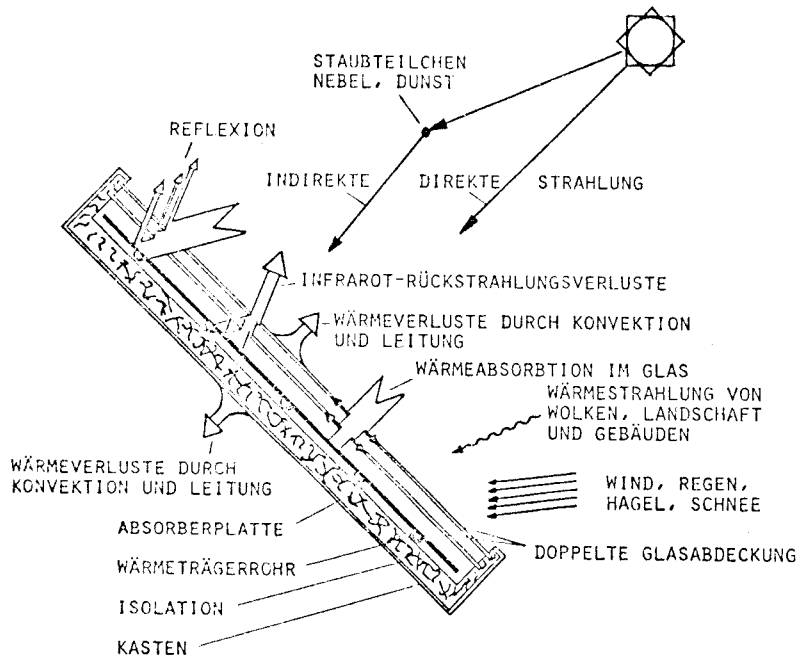


Bild 1: Schematische Darstellung eines Flachkollektors, der auf ihn einwirkenden Umweltfaktoren und der wesentlichen physikalischen Vorgänge

9. Anzahl, Abstand, Aufbau und Material der lichtdurchlässigen Abdeckschichten,
10. Strahlungseigenschaften des Absorbers und der Abdeckungen,
11. Eintrittstemperatur und Durchflußmenge des Wärmeträgers sowie dessen physikalische Eigenschaften,
12. Aufstellung und Orientierung des Kollektors.

Es soll im folgenden versucht werden, die heute bekannten physikalischen Grundlagen zu diesen zwölf Punkten unter Angabe von Quellen so darzustellen, daß sie für Laie und Fachmann gleichermaßen verständlich sind. Darüber hinaus aber sollen die aufgeführten Formeln, Daten und Kurven dem Solartechniker die Möglichkeit zur Berechnung eigener Entwicklungen an die Hand geben. Da nicht alle aufgeführten Punkte in dieser Ausgabe der *Sonnenenergie* behandelt werden können, wird dieser Aufsatz in den nächsten Hefen fortgesetzt.

1. Die Richtungsabhängigkeit der Sonneneinstrahlung im täglichen und jahreszeitlichen Ablauf

Für die Eintrittsebene eines Flachkollektors, wie ganz allgemein für jeden Punkt einer Fläche, kann man

die Flächennormale als diejenige Gerade definieren, die im gewählten Punkt auf der Ebene senkrecht steht. Für alle Berechnungen der Sonneneinstrahlung auf den Kollektor muß man den Winkel Θ zwischen einem direkten Sonnenstrahl und der Flächennormalen kennen. Bild 2 veranschaulicht die Definition dieses Winkels. Häufig wird auch der Komplementärwinkel α benutzt, wobei die Relation

$$(1) \quad \alpha = 90^\circ - \Theta$$

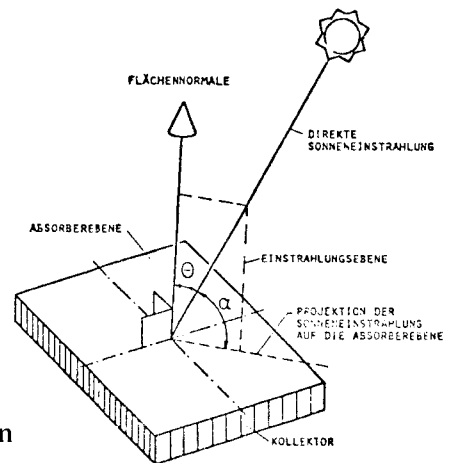


Bild 2: Zur Definition der Flächennormalen und des Winkels Θ zwischen ihr und der direkten Sonneneinstrahlung

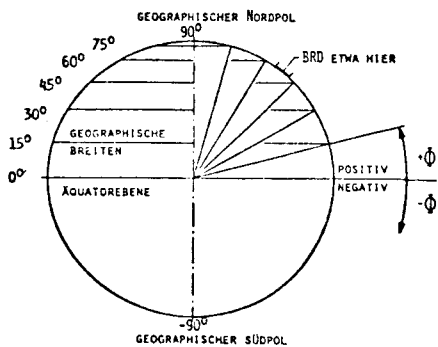


Bild 3: Zur Definition des geographischen Breitenwinkels Φ

Gültigkeit besitzt. In der Darstellung des Einstrahlungswinkels wird dieser Winkel α in dieser Arbeit später verwendet.

Wegen der Drehung der Erde um die eigene Achse (Tageszeiten) und wegen ihres Umlaufs um die Sonne (Jahreszeiten) ist die Voraussage des Winkels Θ für einen beliebig aufgestellten Flachkollektor für alle Stunden des Jahres nicht gerade einfach.

Man benötigt nach der in J.A. Duffie und W.A. Beckmann¹⁾ zitierten Arbeit von F. Benford und J.E. Bock²⁾ die folgenden Angaben zur Berechnung von Θ :

Geographische Breite

Die geographische Breite Φ in Grad, wobei nördliche Breiten als positiv und südliche als negativ angenommen werden. Bild 3 verdeutlicht die hier getroffene Vereinbarung.

Näherungsweise lassen sich die in Tabelle 1 aufgeführten Städte der BRD den angegebenen Breitengraden zuordnen³⁾.

Tabelle 1: Zuordnung deutscher Städte zu den Breitengraden

Φ	Stadt
+ 48°	Freiburg, Tuttlingen, Landshut, München
+ 49°	Karlsruhe, Bäcknang, Eilwangen, Weißenburg, Regensburg
+ 50°	Wittlich, Mainz, Offenbach, Schweinfurt, Bayreuth
+ 51°	Köln, Olpe, Rotenburg (Fulda)
+ 52°	Münster, Bielefeld, Bad Pyrmont, Salzgitter
+ 53°	Odenburg, Bremen, Uelzen
+ 54°	Neumünster
+ 55°	Flensburg

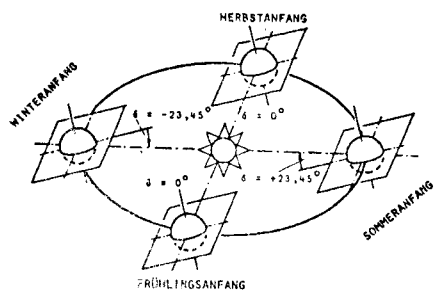


Bild 4: Zur Definition des Inklinationswinkels δ

Deklination

Die Deklination δ , d.h. der jahreszeitlich variierende Sonnenhöchststand zur Mittagszeit, wird wiederum vom Äquator aus gemessen, positiv gen Norden, negativ gen Süden, wie in Bild 4 dargestellt ist.

Die Deklination δ kann näherungsweise mittels der Gleichung

$$(2) \quad \delta = 23,45^\circ \sin \left[360^\circ \left(\frac{284+n}{365} \right) \right]$$

ermittelt werden⁴⁾, wobei n hier der jeweilige Tag des Jahres ist. Für das Normaljahr gelten z.B. die Angaben in Tabelle 2.

Tabelle 2: Tage n für die Deklination

$n = 1$	1. Januar
$n = 81$	21. März (Frühlingsanfang)
$n = 172$	21. Juni (Sommeranfang)
$n = 264$	21. September (Herbstanfang)
$n = 355$	21. Dezember (Winteranfang)
$n = 365$	31. Dezember

Steilheit

Die Steilheit s ist der Winkel zwischen der Horizontalen und der Eintrittsebene des Kollektors. Dieser Winkel wird in Bild 5 gezeigt. So würde z.B. die Steilheit eines Flachdachs 0° , die eines Steildachs 60° und die einer senkrechten Wand 90° betragen.

Winkel

Der Winkel γ wird in Bild 6 dargestellt. Er mißt die Abweichung der Projektion der Flächennormalen auf die Horizontalebene von der geographischen Südrichtung. Alle Abweichungen nach Osten werden als positiv, die nach Westen als negativ angenommen. Die Südrichtung selbst entspricht demnach $\gamma = 0$.

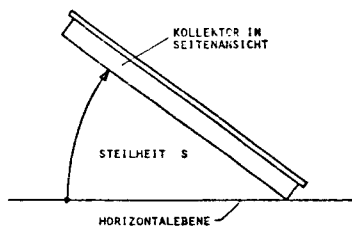


Bild 5: Zur Definition der Steilheit s

Stundenwinkel

Der Stundenwinkel ω zählt jeweils von dem Zeitpunkt des höchsten Sonnenstandes, also von 12^{00} mittags der Sonnenzeit, die nur in Ausnahmefällen mit der Ortszeit übereinstimmt.

Da die mitteleuropäische Zeit (MEZ) durch den Sonnenstand in Görlitz (15° östliche Länge) bestimmt wird, erreicht die Sonnenbahn bei uns erst später ihren Höchststand.

Tabelle 3 gibt hierüber Aufschluß. Der Stundenwinkel ω errechnet man als von 12^{00} ausgehend mittels der Gleichung

$$(3) \quad \omega = 15^\circ \cdot (t_0 - t)$$

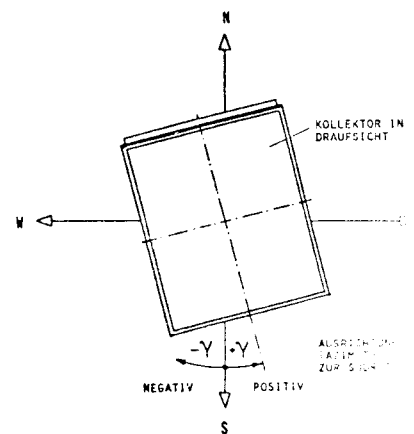


Bild 6: Zur Definition der Ausrichtung des Kollektors

wobei t_0 der Sonnenmittag und die jeweilige Uhrzeit ist. Für jede Stunde verändert sich ω also um 15° . Vormittagsstunden ergeben positive, Nachmittagsstunden negative Stundenwinkel.

Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang noch, daß auch Unregelmäßigkeiten der Erdrotation und des Erdumlaufs um die Sonne erstaunlich große Abweichungen zwischen Sonnen- und Standardzeit hervorrufen können.

Aus den Größen Φ , δ , s , γ und ω kann man nun mit Hilfe der Gleichungen

$$(4) \quad \cos \Theta = \sin \delta \sin \Phi \cos s - \sin \delta \cos \Phi \sin s \cos \gamma + \cos \delta \cos \Phi \cos s \cos \omega + \cos \delta \sin \Phi \sin s \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin s \sin \gamma \sin \omega$$

und

$$(5) \quad \Theta = \arccos \Theta$$

den Winkel Θ für jeden beliebigen Ort (Φ , ω), für jeden Tag (n , δ) jede Tageszeit (t , ω) und jede beliebige Kollektoraufstellung (s , γ) ermitteln.

Tabelle 3: Breitengrad und Sonnenmittag deutscher Städte

Breite λ	Sonnenmittag t_0 MEZ	Stadt
13,5°	1206	Berlin
13°	1208	Berchtesgaden, Degendorf
12°	1212	Rosenheim, Regensburg, Bayreuth
11,5°	1214	München
11°	1216	Augsburg, Nürnberg, Coburg, Bannenberg, Fehmarn
10°	1220	Ulm, Würzburg, Eschwege, Hildesheim, Hannover, Hamburg, Kiel
9°	1224	Tuttlingen, Stuttgart, Hanau, Altenbeeken, Minden, Bremen, Husum
8°	1228	Freiburg, Bingen, Limburg, Neheim, Osnabrück, Wilhelmshaven, Wangerode
7°	1232	Saarbrücken, Köln, Essen, Gronau, Juist
6°	1236	Aachen

Aus Gleichung (4) kann man für die folgenden Sonderfälle einfachere Ausdrücke ableiten:

a) Horizontale Fläche ($s = 0^\circ$)

$$(6) \quad \cos \Theta = \sin \delta \sin \Phi + \cos \delta \cos \Phi \cos \omega$$

b) Vertikale Fläche ($s = 90^\circ$)

$$(7) \quad \cos \Theta = -\sin \delta \cos \Phi \cos \gamma + \cos \delta \sin \Phi \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \gamma \sin \omega$$

c) Vertikale Südfläche ($s = 90^\circ, \gamma = 0^\circ$)

$$(8) \quad \cos \Theta = -\sin \delta \cos \Phi + \cos \delta \sin \Phi \cos \omega$$

Ferner läßt sich aus Gleichung (6) der Zeitpunkt des Sonnenaufgangs bzw. -untergangs ermitteln. In dem Augenblick, in dem die Sonne auf der horizontalen Fläche erscheint, ist $\Theta = 90^\circ$ bzw. $\cos \Theta = 0$. Damit ergibt sich für den Sonnenaufgang

$$(9) \quad \cos \omega_{SA} = -\frac{\sin \delta \sin \Phi}{\cos \delta \cos \Phi} = -\tan \delta \tan \Phi$$

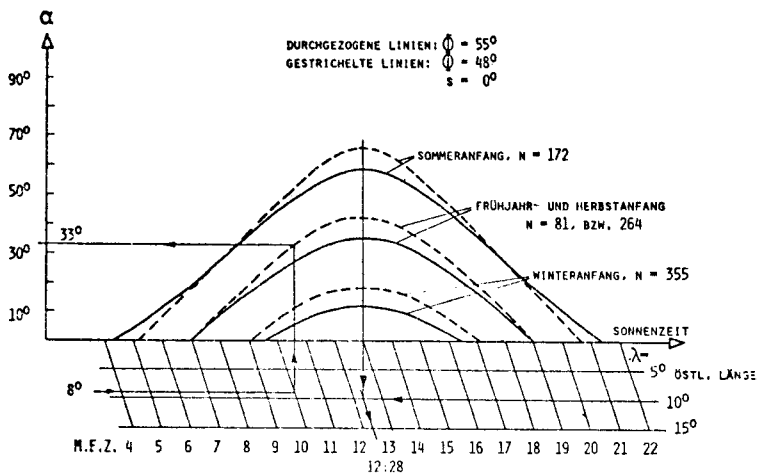


Bild 7: Einstrahlungswinkel auf horizontale Flächen für verschiedene Breiten und Jahreszeiten

Bild 7 zeigt den täglichen Sonnenlauf für die vier Anfangstage der Jahreszeiten. Verglichen werden die Breiten von 48° (Freiburg-München) und 55° (Flensburg). Der Sonnenstand zur Mittagszeit ist in Süddeutschland zu jeder Jahreszeit höher als im Norden. Andererseits sind die Tage im Sommer in Flensburg länger als in München. Im Winter trifft das Gegenteil zu. Sonnenauf- und -untergang sind durch den Schnitt der Kurven mit der Horizontalen bestimmt.

Die Kurven sind über der Sonnenzeit aufgetragen. Zur Ermittlung des Sonnenlaufs in Abhängigkeit von der mitteleuropäischen Zeit (MEZ) muß man für den gewünschten Längengrad wie in Bild 7 angedeutet, die Uhrzeit wählen und über dem ermittelten Schnittpunkt die Sonnenhöhe ablesen. Das eingetragene Beispiel zeigt, daß die Sonne in Flensburg ($\Phi = 55^\circ, \lambda = 10^\circ$) erst um 12²⁰ MEZ ihren Höchststand erreicht bzw., daß sie am 21. März in Freiburg ($\Phi = 48^\circ, \lambda = 8^\circ$) um 10⁰⁰ MEZ 33° über dem Horizont steht.

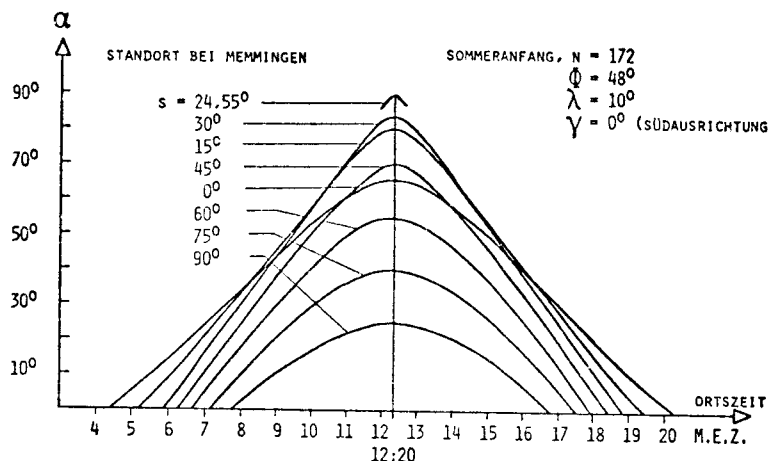


Bild 8: Einstrahlungswinkel auf verschiedene geneigte Südflächen in Memmingen am 21. Juni

Hieraus läßt sich wiederum mittels Gleichung (5) der Winkel ω_{SA}^0 ermitteln.

Aus Gleichung (3) leitet man die Relation

$$(10) \quad t_{SA/SU} = t_0 \pm \omega_{SA}^0 / 15^\circ$$

her, die bei Verwendung des Minuszeichens den Sonnenaufgang t_{SA} , bei Verwendung des Pluszeichens den Sonnenuntergang t_{SU} angibt.

2. Darstellung der Ergebnisse von Abschnitt 1

Gleichung (4) hängt von fünf veränderlichen Größen ab. Man könnte nun alle parametrisch variieren und eine Fülle von Kurvenblättern konstruieren, aus denen sich jeder Benutzer seinen Spezialfall herausuchen kann. Mit dem umfangreichen Werk "Meteoplan" von P. Valko⁵⁾ steht dem Nutzer eine Datensammlung für vertikale Flächen zur Verfügung. Hier sollen deshalb nur einige Ergebnisse dargestellt werden.

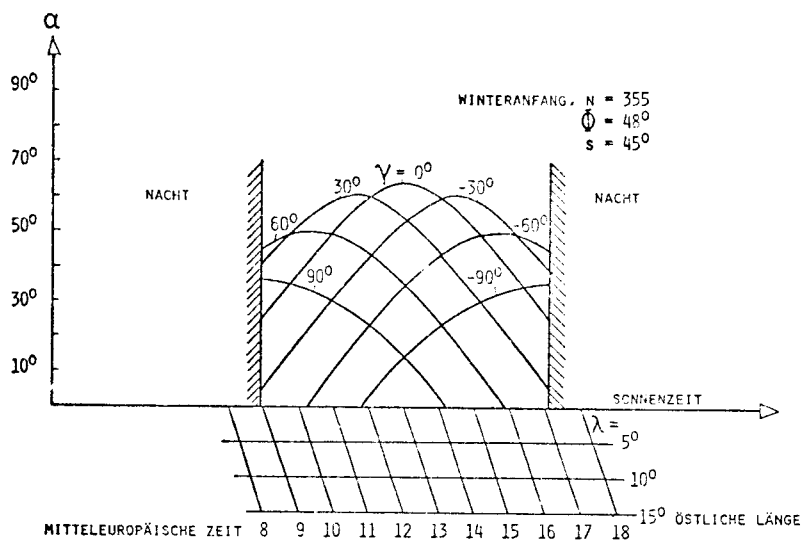


Bild 9: Einstrahlungswinkel auf 45-Grad-Fläche am 21. Dezember

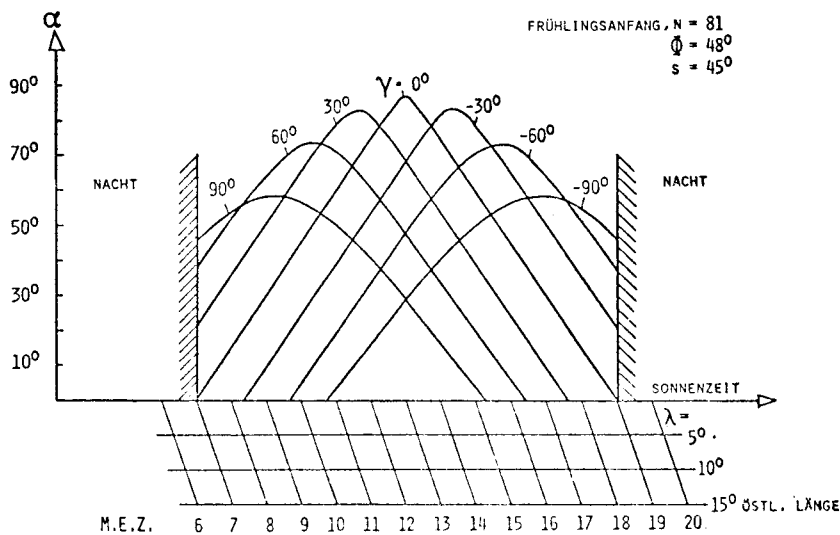


Bild 10: Einstrahlungswinkel auf 45°-Fläche am 21. März und 21. September

In Bild 8 wird für Standort Memmingen ($\Phi = 48^\circ$, $\lambda = 10^\circ$) am 21. Juni die Steilheit s eines nach Süden ausgerichteten Kollektors ($\gamma = 0^\circ$) geändert. In horizontaler Stellung sieht der Kollektor die Sonne von Sonnenauf- bis -untergang von 428 bis 2012 MEZ. Beim höchsten Sonnenstand um 1220 MEZ wird dieser Kollektor mit

$$\alpha_{\max 0} = 90^\circ - \delta_{\max} = 90^\circ = 23,45^\circ$$

$$= 66,55^\circ$$

angestrahlt.

Nur der mit einer Steilheit von

$$s = \Phi - \delta_{\max} = 48^\circ - 23,45^\circ = 24,55^\circ$$

angestellte Kollektor wird bei Sonnenhöchststand senkrecht angestrahlt. Stärker geneigte Flächen werden bei kleineren Einfallswinkeln α und kürzer werdenden Einstrahlzeiten besonnt.

Für die vertikale Fläche ermittelt man für den längsten Tag nur eine

Einstrahlung zwischen 748 und 1648 MEZ bei einem maximalen Einstrahlungswinkel von 24,55° um 1220 MEZ.

Die Bilder 9, 10 und 11 zeigen den täglichen Verlauf des Einstrahlungswinkels für ein mit Steilheit $s = 45^\circ$ auf der Breite von Freiburg - München ($\Phi = 48^\circ$) aufgestellte Flachkollektor in Abhängigkeit seiner Ausrichtung γ . Die für den 21. Dezember (Bild 9), 21. März bzw. 21. September (Bild 10) und 21. Juni (Bild 11) ermittelten Kurven werden jeweils von den Sonnenauf- bzw. -untergangszeiten begrenzt. Im Gegensatz zu der horizontalen Fläche, die den Sonnenaufgang "mitemlebt", kann die angestellte Fläche beim Erscheinen des strahlenden Himmelskörpers über dem Horizont bereits unter einem endlichen Winkel angestrahlt werden. Bei Ausrichtung nach Süden ($\gamma = 0^\circ$) erreicht der mit 45° zur horizontalen angestellte Kollektor einen maximalen Einstrahlungswinkel von

$$\alpha_{\max} = s + 90^\circ - \Phi + \delta_{\min}$$

$$= 45^\circ + 90^\circ - 48^\circ - 23,45^\circ$$

$$= 63,55^\circ$$

Eine steilere Anstellung würde diesen Winkel verbessern. Für $s = 66,55^\circ$ ergäbe sich am 21. Dezember auf Breite 48° zum Sonnenmittag gerade eine senkrechte Einstrahlung. Jede Drehung des Kollektors führt zu einer zeitlichen Verschiebung und zu einer Abnahme des Winkelmaximums. Bei zu starker Drehung wird der Kollektor nicht mehr während aller Tagesstunden bestrahlt.

Bei Frühlings- und Herbstanfang erlebt, wie Bild 10 zeigt, die nach Süden ausgerichtete Fläche Sonnenauf- und -untergang jeweils bei einem Einstrahlungswinkel von $\alpha = 0^\circ$. Gegenüber dem Winterbild 9 haben sowohl Einstrahlungswinkel als auch Einstrahldauer merklich zugenommen.

Die Situation zu Sommeranfang ist in Bild 11 dargestellt. Im Gegensatz zu den beiden vorangegangenen Darstellungen sind hier auch nach Norden zeigende Flächenausrichtungen aufgetragen. Zu Sommeranfang werden also auf Breite $\Phi = 48^\circ$ die maximalen Einstrahlungswinkel für den mit $s = 45^\circ$ angestellten Kollektor nicht bei Südausrichtung, sondern bei OSO- bzw. WSW-Orientierung erreicht. Die Einstrahlung auf eine um 45° geneigte Ost- bzw. Westfläche ist zum untersuchten Zeitpunkt erheblich, was die Vermutung erlaubt, daß sich solche Flächen gut für die Warmwassergewinnung im Sommer eignen. Auch eine mit 45° gen Norden geneigte Fläche empfängt am längsten Tag ganztägig direktes Sonnenlicht. Der Einfallswinkel α beträgt bei geringfügigen täglichen Schwankungen im Mittel nur etwa 23°, was den 45°-Nordkollektor auf Breite 48° uninteressant macht. Auf höheren Breiten könnte ein flacher angestelltes Gerät im Sommer jedoch schon einen nennenswerten Beitrag zur Warmwassererzeugung leisten.

Die angegebenen Gleichungen erlauben die Bestimmung des Einfallswinkels für alle sich in der Praxis ergebenden Situationen. Für weitere Auskünfte sei der Leser auf die Literatur verwiesen.

Literaturhinweise

- 1) Duffie, J. A. und Beckmann, W. A.: "Solar Energy Thermal Processes" New York, 1974
- 2) Benford, F. und Bock, J. E.: "A Time Analysis of Sunshine" Trans. Am. Illum. Eng. Soc. 34, 200, 1939
- 3) Jeder gute Atlas
- 4) Cooper, P. I.: "The Absorption of Solar Radiation in Solar Stills" Solar Energy, 12, 3, 1969
- 5) Valko P.: "Meteoplan I - Meteorologische Planungsunterlagen. Sonnenbestrahlung von Gebäuden." Bern und Stuttgart, 1975

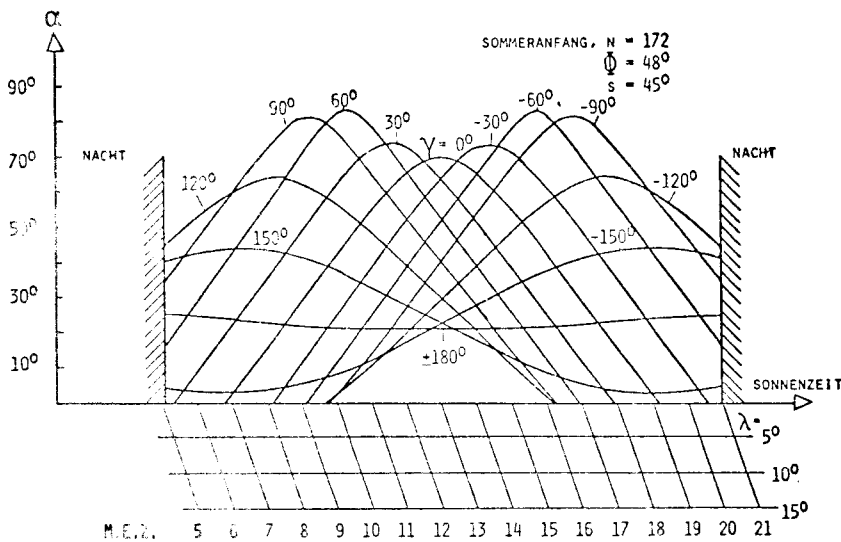


Bild 11: Einstrahlungswinkel auf 45°-Fläche am 21. Juni