

Teil II Physikalische Grundlagen zur Berechnung von Flachkollektoren

Von Dr. Ulf Bossel, Göttingen

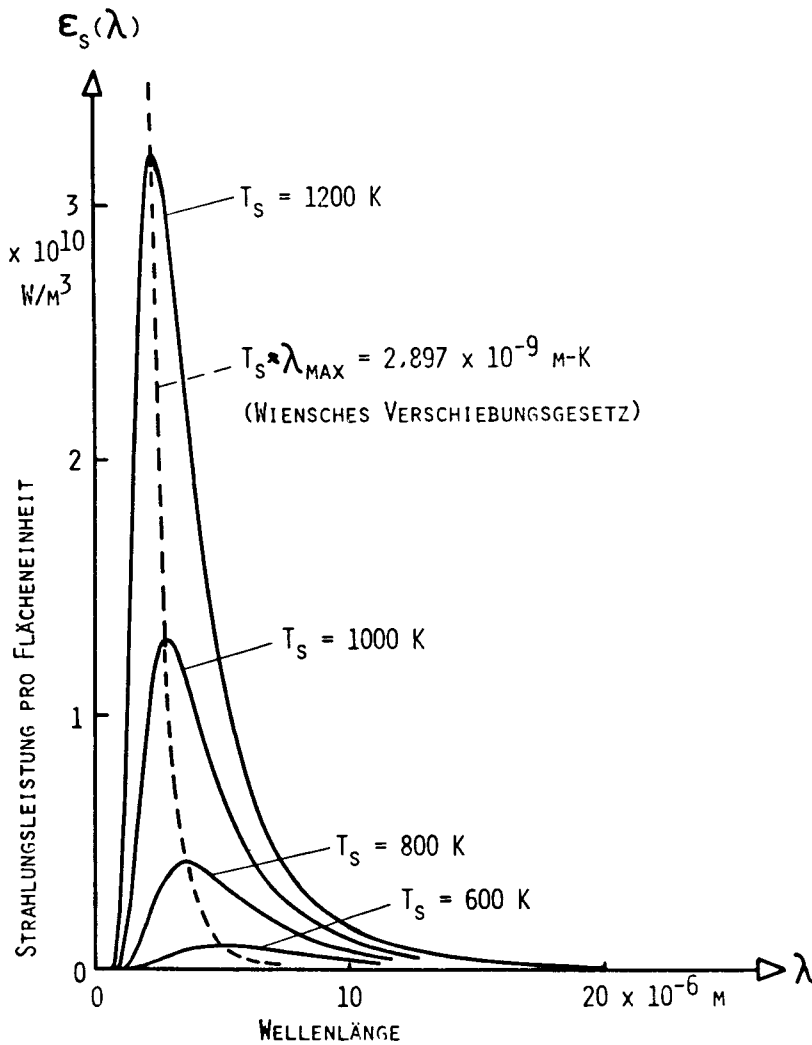


Bild 12: Strahlungsspektren eines "schwarzen Körpers" für unterschiedliche Temperaturen

Der in Heft 4/76 der Sonnenenergie begonnene Beitrag wird hier fortgesetzt. Im ersten Teil ist ein Überblick über die Faktoren, die zur Berechnung von Flachkollektoren erforderlich sind, gegeben und der erste Punkt, die Richtungsabhängigkeit der Sonneneinstrahlung im täglichen und jahreszeitlichen Ablauf, erläutert worden.

2. Die spektrale Verteilung der Strahlung

Jeder warme Körper strahlt Energie ab. Die pro Zeit- und Flächeneinheit abgegebene Energiemenge ist in guter Näherung proportional zur vierten Potenz der absoluten Temperatur des

Strahlers. Eine gegebene Fläche strahlt also bei 600 Kelvin (327°C) 16mal mehr Energie ab als bei 300 Kelvin (27°C). Bemerkenswert ist ferner, daß die Energie nicht auf einer einzigen Wellenlänge abgegeben wird, sondern über einen breiten Wellenlängenbereich. Jeder Wellenlänge läßt sich eine bestimmte Strahlungsleistung zuordnen. Die Abhängigkeit der Strahlungsleistung $\epsilon(\lambda)$ von der Wellenlänge λ wird als Strahlungsspektrum bezeichnet.

Max Planck hat für einen idealen Strahler, den sog. "schwarzen Körper", die heute als "Planck'sches Gesetz" bekannte Beziehung

$$(11) \epsilon_s(\lambda) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T_s}} - 1)} \quad [\text{W/m}^2]$$

hergeleitet, wobei T_s die Temperatur des "schwarzen Körpers" (Index "s") ist und λ die jeweilige Wellenlänge darstellt, für die der spektrale Anteil $\epsilon_s(\lambda)$ ermittelt werden soll. Die beiden Konstanten nehmen die folgenden Werte an:

$$C_1 = 3,7405 \cdot 10^{-16} \quad [\text{Watt} \cdot \text{m}^2]$$

und

$$C_2 = 0,0143879 \quad [\text{m} \cdot \text{Kelvin}]$$

Von den Dimensionen her ist $\epsilon_s(\lambda)$ also ein Energiefluß, also Leistung pro Flächen- und Wellenlängeneinheit. In Bild 12 sind die Strahlungsspektren von idealisierten "schwarzen Körpern" von $T_s = 600, 800, 1000$ und 1200 Kelvin aufgetragen. Die Flächen unter den Kurven entsprechen jeweils der gesamten pro Flächeneinheit abgestrahlten Leistung.

Für zunehmende Temperaturen T_s erkennt man nicht nur eine enorme Zunahme der Strahlungsleistung (mit der vierten Potenz von T_s), sondern auch ein Wandern des Strahlungsspektrums in Richtung auf kürzere Wellenlängen.

Bereits vor Plancks theoretischer Herleitung der Gleichung (11) hat W. Wien experimentell ermittelt, daß das Produkt aus der Temperatur T_s des "schwarzen Körpers" und der Wellenlänge λ_{max} , bei der das emittierte Strahlungsspektrum sein Maximum hat immer den gleichen Wert besitzt. Seine Formulierung

$$(12) T_s \lambda_{\text{max}} = 2,8978 \cdot 10^{-3} \quad [\text{m} \cdot \text{Kelvin}]$$

ist als "Wien'sches Verschiebungsgesetz" bekannt.

Strahlungsintensität

Die gesamte Strahlungsleistung pro Flächeneinheit, auch Strahlungsintensität genannt, entspricht der jeweiligen Fläche unter einer spektralen Verteilungskurve. Solche Kurven sind in Bild 12 dargestellt. Man kann die Fläche bzw. die gesamte Strahlungsleistung pro Flächeneinheit durch Integration

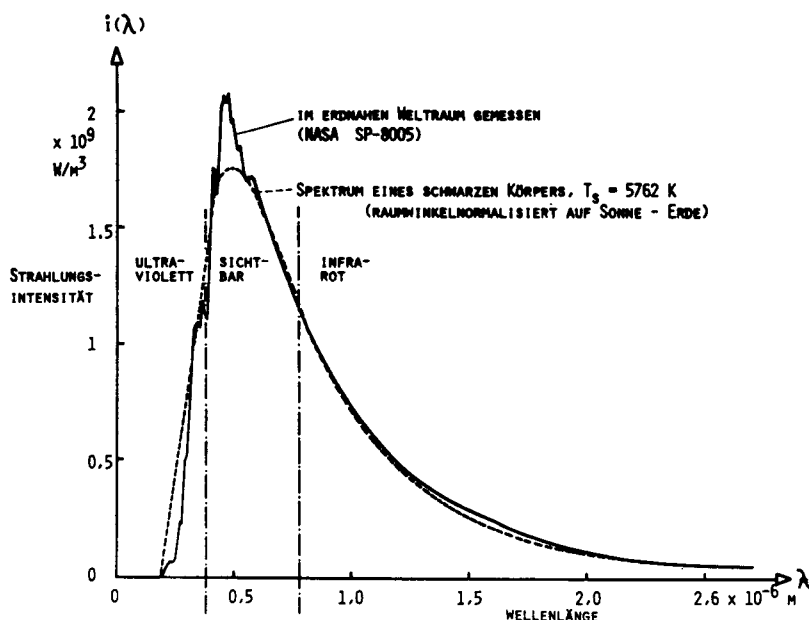


Bild 13: Solarspektrum im erdnahen Weltraum

von Gleichung (11) über alle Wellenlängen ermitteln und erhält mit

$$(13) \epsilon_s = \int_0^\infty \epsilon_s(\lambda) d\lambda = \sigma T_s^4 \quad [\text{W/m}^2]$$

das sog. "Stephan-Boltzmann-Gesetz". Die gesamte Strahlungsleistung pro Flächeneinheit ϵ_s ist also im Idealfall proportional zur vierten Potenz der absoluten Temperatur T_s multipliziert mit der Naturkonstanten

$$\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$$

Gleichung (13) gibt diese Energieabgabe des "schwarzen Körpers" in einer Umgebung an, die entweder keine Strahlung reflektieren kann oder deren Temperatur auf dem absoluten Nullpunkt liegt. Die Sonne selbst ist näherungsweise ein solcher Körper, dessen Temperatur mit 5 762 Kelvin angenommen werden kann.

Leider gibt es in der Natur jedoch keine "schwarzen Körper", denn bei jeder bekannten Substanz wird auf bestimmten Wellenlängen weniger Energie emittiert, als das Planck'sche Gesetz voraussagt. Man spricht deshalb in der Praxis von "grauen Körpern". Die Spektren solcher "grauen Körper" weisen alle mehr oder weniger ausgeprägte Lücken, sog. Resonanzlinien, bei ganz bestimmten Wellenlängen auf. Diese Resonanz-Wellenlängen sind wiederum typisch für die Substanz.

An der gleichen Stelle des Spektrums, an der ein "grauer Körper" keine Energie abstrahlen kann, absorbiert er die auf ihn treffende Strahlung besonders gut. Dies gilt nicht nur für undurchsichtige Oberflächen, sondern auch für transparente Medien wie Glas, Kunststoffe, Glimmer, Eis usw., für Flüssig-

keiten wie Wasser, Öl, Alkohol usw. oder für Gase und Dämpfe. So wird z.B. die Sonnenstrahlung in der Erdatmosphäre durch Strahlungsabsorption an Ozon im ultravioletten und sichtbaren Bereich, an Wasserdampf, Sauerstoff, Kohlendioxid und Stickstoff im infraroten Bereich vermindert. Besonders die Resonanzabsorption an Wassermolekülen (flüssig oder dampfförmig) kann bei trübem Wetterlagen zu einer fast vollständigen Ausblendung des Infrarotanteils führen.

Vergleich mit ermitteltem Spektrum

In Bild 13 wird das im erdnahen Weltraum von der NASA (6) mit

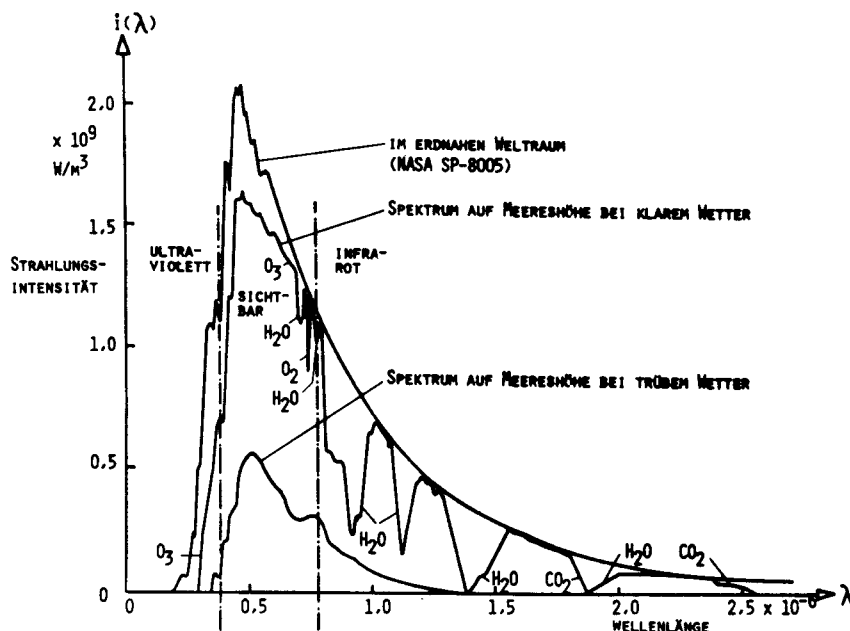


Bild 14: Solarspektren im erdnahen Weltraum, in Erdnähe bei klarem und trübem Wetter

Hilfe von Satelliten ermittelte Strahlungsspektrum der Sonne mit dem nach Gleichung (11) errechneten Spektrum verglichen, wobei die Sonne durch einen 5 762 Kelvin heißen "schwarzen Körper" dargestellt wird. Dabei ist zu berücksichtigen, daß nur ein Teil der emittierten Strahlung einen Punkt der Erdoberfläche erreicht. Um eine quantitative Aussage zu erhalten, muß man also Gleichung (11) mit dem von der Sonnenfläche bestimmten Raumwinkel multiplizieren. Dieser Raumwinkel wird aus dem Sonnenradius $R = 696\,000\text{ km}$ und dem mittleren Abstand $L = 159\,596\,000\text{ km}$ zwischen Sonne und Erde nach der folgenden Gleichung berechnet:

$$(14) \text{Raumwinkel} = \pi R^2 / L^2 = 5,9748 \cdot 10^{-5}$$

In Bild 13 ist demnach die flächenbezogene Intensitätskurve

$$(15) I(\lambda) = \epsilon_s(\lambda) \pi R^2 / L^2$$

aufgetragen. Die Sonnentemperatur $T_s = 5\,672\text{ Kelvin}$ ist gerade so gewählt worden, daß unter beiden Kurven gleichgroße Flächen entstehen, deren Inhalt der gemessenen Solarkonstanten von $1\,353\text{ W/m}^2$ entspricht. Man erkennt, daß nichtideale Bedingungen auf der Sonne und im doch nicht so ganz luftleeren Weltraum die solare Spektralkurve gegenüber dem Ideal verändert haben.

Vergleich mit gemessener Verteilung

In Bild 14 wird nun die Spektralverteilung der Solarstrahlung im erdnahen Weltraum mit der auf Meereshöhe "bei gutem und trübem Wetter gemessene"

nen Verteilung verglichen. Deutlich erkennt man eine Abschwächung der Intensität in allen Wellenbereichen. Nur noch etwa 800 von den ursprünglich 1 353 Watt erreichten ein Quadratmeter Erdoberfläche unter guten Witterungsbedingungen. Besonders auffallend sind jedoch die durch Ozon-, Wasserdampf-, Sauerstoff- und Kohlendioxidabsorption der Sonnenstrahlung hervorgerufenen Scharten im Strahlungsspektrum. Bei schönem Wetter gelangt noch ein erheblicher Infrarotteil der Solarstrahlung an die Erdoberfläche. Bei trüben Wetterlagen wird jedoch fast die gesamte solare Wärmestrahlung durch den Wassergehalt der Atmosphäre herausgefiltert.

Für den beobachtenden Leser sei bemerkt, daß sich die Natur bei der Evolution der Sehorgane gerade auf den Wellenlängenbereich spezialisiert hat, der am wenigsten durch die genannten witterungsbedingten Absorptionsphänomene beeinflusst wird. Dieser Strahlungsbereich wird, weil die Natur unsere Augen entsprechend sensibilisiert hat, als "sichtbarer Bereich" bezeichnet. Für ein infrarotempfindliches Auge würden alle Schlechtwetterperioden Zeiten der partiellen Dunkelheit sein.

Die in der Atmosphäre absorbierte Strahlungsenergie wird zum Teil auf andere Wellenlängen wieder abgestrahlt. Es ist jedoch äußerst schwierig, den Himmel als Strahler darzustellen, nicht zuletzt, weil die Strahlungseigenschaften der Atmosphäre stark mit dem Wetter, der Luftverschmutzung, dem Einstrahlungswinkel der Sonne usw. variieren. In starker Vereinfachung ist jedoch die Himmelstemperatur für wolkenlose Verhältnisse von Whillier 9) mit

$$(16) T_{\text{Himmel}} = T_{\text{Luft}} - 6^{\circ}\text{Kelvin (Sommer)}$$

$$= T_{\text{Luft}} - 20^{\circ}\text{ Kelvin (Winter)}$$

und von Swinbank et al. 10) mit

$$(17) T_{\text{Himmel}} = 0,0552 (T_{\text{Luft}})^{1,5}$$

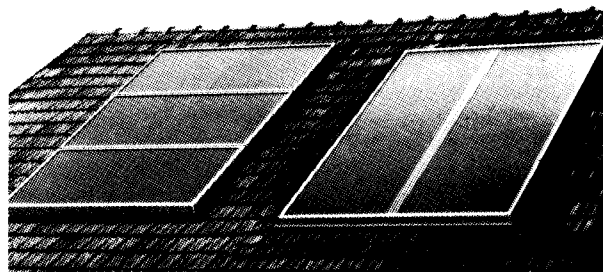
angegeben worden. Bei trüben Wetterlagen lassen sich für geneigte Flächen, die ja obendrein auch von der umliegenden Landschaft und anderen Gebäudeteilen bestrahlt werden können, keine vereinfachten Aussagen über die "Himmelsstrahlung" treffen. Hier müssen meteorologische Untersuchungen hinzugezogen werden.

Literaturhinweise

- 6) NASA SP-8005, National Aeronautics and Space Administration, Mai 1971, "Solar Electromagnetic Radiation"
- 7) Ratschow, P., ein "Heizen mit Sonne", Tagungsbericht der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie eV (DGS) vom 23./24.2.76, Göttingen (Anmerkung: Die von Ratschow übernommene Darstellung des Sonnenspektrums enthält eine frequenzabhängige Wichtung und kann nicht ohne Umrechnung mit den üblichen Spektren verglichen werden.)
- 8) Vergl. auch "Duffie, J.A. und Beckman, W.A.: "Solar Energy Thermal Process", New York 74 demnächst in deutscher Übersetzung
- 9) Whillier, A.: Low Temperature Engineering Applications of Solar Energy, New York, 1967
- 10) Swinbank, W.C.: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 89, (1963)

Unsere Sonnenkollektoren sind 100%

- korrosionsbeständig
- trinkwasserverträglich
- schwimmbadwasserfest
- wartungsfrei
- und ab Lager lieferbar



solar-tech[®] GSJ (Links: 3 Kollektoren auf Dach aufgebaut. Rechts: 3 Kollektoren in Dachhaut integriert, grossflächig verglast.)

für Warmwasser, Raumheizung, Schwimmbad, industrielle und gewerbliche Anwendung

Das ist der Sonnenkollektor, der zeitlebens keinen Unterhalt benötigt: sämtliche Materialien sind korrosionsfest; das Absorptionsschwarz ist im Absorbermaterial drin — es kann nicht abgekratzt werden, es blättert nicht ab, es oxydiert nicht; die Spezialverglasung ist hagelresistent... und übrigens nicht-spiegellnd!

Standardgrösse 3.5 m² (Sondermasse auf Anfrage), zerlegbar, in Betrieb nur 20 kg/m², Befestigung an vier Punkten frei wählbar rundherum, einfacher Anschluss mit nur zwei Schraubverbindungen.

«solar-tech GSJ»-Kollektoren stehen seit 1974 im Einsatz — ein praxiserprobtes Konzept!



solar-tech[®] POOL

Spezial-System für Schwimmbäder, steckerfertig geliefert*, in 1 bis 2 Tagen betriebsbereit montiert

Früher baden, länger baden, wärmer baden, Energiekosten sparen! Das ist jetzt sofort möglich. Direkte Badewasserzirkulation (drucklos) mittels bestehender Filteranlage — also keine Umwälzpumpe, kein Expansionsgefäß und Frostschutz nötig!

Günstig! Für ein 4 x 8 m Bad, 5 Kollektoren von zusammen ca. 18 m², mit sämtlichen Befestigungs- und Verbindungsmaterialien sowie Rückschlagventil, Sensor, Steuerautomatik und Trafo 220/24 V, ab DM 4300.— (zuzügl. Transport und Montage und * exkl. Zuleitungen).

solar-tech[®] 

Prospekt und Preislisten:

BRD: solar-tech R. Janssen, 2900 Oldenburg, Kurwickstrasse 23-24, Tel. 0441-27325, Telex 25 740

Zentrale: Solar-Technik AG, Postfach 122, CH-2500 Biel 3 Tel. (032) 22 13 19, Telex 34 746

Schreiben Sie uns, falls Sie an einer Lizenz für Fabrikation und/oder Vertrieb interessiert sind.