



Leseprobe

Konrad Mertens

Photovoltaik

Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis

ISBN (Buch): 978-3-446-44232-0

ISBN (E-Book): 978-3-446-44107-1

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44232-0>

sowie im Buchhandel.

2

Strahlungsangebot der Sonne

Grundlage allen Lebens auf der Erde ist die Strahlung der Sonne. Ebenso basiert die Nutzung der Photovoltaik auf dem Vorhandensein des Sonnenlichts. Wir wollen uns daher in diesem Kapitel die Eigenschaften und Möglichkeiten der Solarstrahlung ansehen.

2.1 Eigenschaften der Solarstrahlung

2.1.1 Solarkonstante

Die Sonne stellt einen gigantischen Fusionsreaktor dar, in dessen Innerem je vier Wasserstoffkerne zu einem Heliumkern verschmelzen. Bei dieser Kernfusion entstehen Temperaturen von rund 15 Millionen Grad Celsius. Die frei werdende Energie wird in Form von Strahlung in den Weltraum abgegeben.

Bild 2.1 zeigt maßstäblich das Sonne-Erde-System. Der Abstand zwischen beiden Himmelskörpern beträgt rund 150 Mio. km, die weiteren Größen können Tabelle 2.1 entnommen werden.

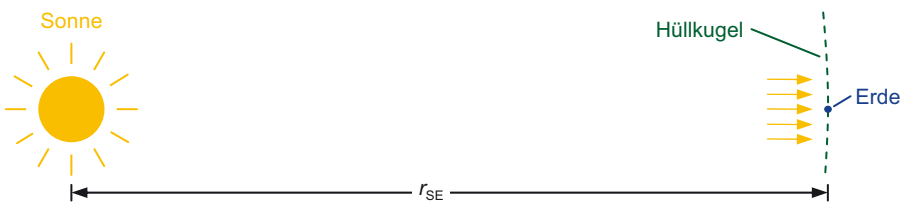


Bild 2.1 Ermittlung der Solarkonstanten

Tabelle 2.1 Eigenschaften von Sonne und Erde

| Eigenschaft | Sonne | Erde |
|------------------------|--|---------------------------------------|
| Durchmesser | $d_{\text{Sonne}} = 1.392.520 \text{ km}$ | $d_{\text{Erde}} = 12.756 \text{ km}$ |
| Oberflächentemperatur | $T_{\text{Sonne}} = 5778 \text{ K}$ | $T_{\text{Erde}} = 288 \text{ K}$ |
| Mittelpunktstemperatur | 15.000.000 K | 6700 K |
| Abgestrahlte Leistung | $P_{\text{Sonne}} = 3,845 \cdot 10^{26} \text{ W}$ | – |
| Abstand Sonne–Erde | $r_{\text{SE}} = 149,6 \text{ Mio. km}$ | |

Die Sonne strahlt kontinuierlich eine Strahlungsleistung von $P_{\text{Sonne}} = 3,845 \cdot 10^{26} \text{ W}$ in alle Richtungen ab, von der die Erde nur einen minimalen Bruchteil empfängt. Um diesen Wert

zu berechnen, stellen wir uns eine Hüllkugel um die Sonne herum vor, die einen Radius von $r = r_{SE}$ aufweist. Die von der Sonne abgestrahlte Leistung hat sich in diesem Abstand bereits auf die gesamte Kugeloberfläche verteilt. Am Ort der Erde erhalten wir somit folgende Leistungsdichte bzw. **Bestrahlungsstärke**:

$$E_S = \frac{\text{Strahlungsleistung}}{\text{Kugeloberfläche}} = \frac{P_{\text{Sonne}}}{4 \cdot \pi \cdot r_{SE}^2} = \frac{3,845 \cdot 10^{26} \text{ W}}{4 \cdot \pi \cdot (1,496 \cdot 10^{11} \text{ m})^2} = 1367 \text{ W/m}^2 \quad (2.1)$$

Das Ergebnis von 1367 W/m^2 wird als **Solarkonstante** bezeichnet.

Die Solarkonstante beträgt $E_S = 1367 \text{ W/m}^2$. Sie gibt die Bestrahlungsstärke außerhalb der Erdatmosphäre an.

2.1.2 Spektrum der Sonne

Jeder heiße Körper gibt Strahlung an seine Umgebung ab. Nach dem **planckschen Strahlungsgesetz** bestimmt dabei die Oberflächentemperatur das Spektrum der Strahlung. Im Fall der Sonne liegt die Oberflächentemperatur bei 5778 K , was zu dem in Bild 2.2 gezeigten idealisierten **Schwarzkörperspektrum** führt (gestrichelte Linie). Das tatsächlich außerhalb der Erdatmosphäre gemessene Spektrum (**AM 0**) folgt dieser idealisierten Linie annähernd. Der Ausdruck AM 0 steht für **Air Mass 0**; dies bedeutet, dass dieses Licht nicht durch die Atmosphäre gelaufen ist. Summiert man die Einzelbeiträge dieses Spektrums in Bild 2.2, so ergibt sich eine Bestrahlungsstärke von 1367 W/m^2 ; also die schon bekannte Solarkonstante.

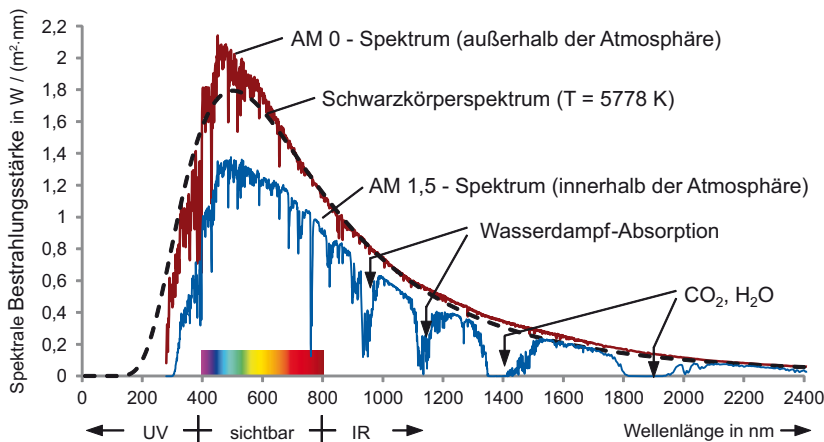


Bild 2.2 Spektren außerhalb und innerhalb der Atmosphäre

Bei Durchtritt des Sonnenlichts durch die Atmosphäre ändert sich das Spektrum allerdings. Dafür gibt es verschiedene Gründe:

1. Reflexion von Licht:

An der Atmosphäre kommt es zu einer Reflexion von Licht, die die auf die Erde auftreffende Strahlung reduziert.

2. Absorption von Licht:

Bei bestimmten Wellenlängen werden Moleküle (O_2 , O_3 , H_2O , $CO_2 \dots$) angeregt und absorbieren einen Teil der Strahlung, daher entstehen insbesondere im Infrarotbereich „Lücken“ im Spektrum (siehe z. B. Bild 2.2 bei $\lambda = 1400 \text{ nm}$).

3. Rayleigh-Streuung:

Fällt Licht auf Teilchen, die kleiner als die Wellenlänge sind, so kommt es zur **Rayleigh-Streuung**. Diese ist stark wellenlängenabhängig ($\sim 1/\lambda^4$), so dass kürzere Wellenlängen (blau) besonders stark gestreut werden.

4. Streuung an Aerosolen und Staubteilchen:

Hierbei handelt es sich um Teilchen, die groß gegenüber der Wellenlänge des Lichts sind. In diesem Fall spricht man von **Mie-Streuung**. Die Stärke der Mie-Streuung ist stark vom Standort abhängig; in dicht besiedelten Gebieten mit Industrie ist sie am größten.

2.1.3 Air Mass

Wie wir gesehen haben, ändert sich das Spektrum bei Durchtritt durch die Atmosphäre. Dieser Effekt ist umso größer, je länger der Lichtweg ist. Daher benennt man die verschiedenen Spektren nach der Weglänge der Strahlen durch die Atmosphäre. Bild 2.3 zeigt dazu das Prinzip: Der Ausdruck AM 1,5 bedeutet beispielsweise, dass das Licht den 1,5-fachen Weg im Vergleich zum senkrechten Durchtritt durch die Atmosphäre zurückgelegt hat.

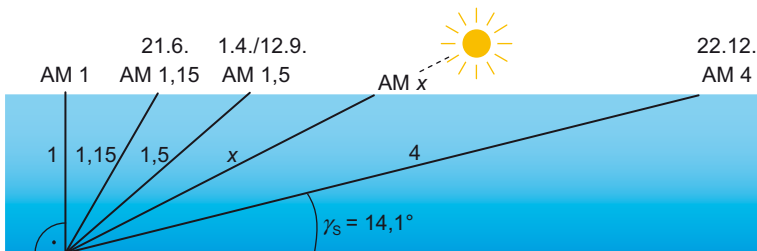


Bild 2.3 Erklärung des Begriffes Air Mass: Die Zahl x gibt jeweils die Wegverlängerung gegenüber dem senkrechten Durchtritt durch die Atmosphäre an (hier für den Standort Berlin, nach [Qua13a])

Bei bekanntem **Sonnenhöhenwinkel γ_s der Sonne** ergibt sich der AM-Wert x zu:

$$x = \frac{1}{\sin \gamma_s} \quad (2.2)$$

Je nach Tages- und Jahreszeit steht die Sonne unterschiedlich hoch. In Bild 2.3 ist für den Standort Berlin angegeben, an welchen Tagen die jeweiligen AM-Werte erreicht werden (jeweils mittäglicher Sonnenhöchststand).

Als **Standardspektrum** zur Vermessung von Solarmodulen hat sich das **AM 1,5-Spektrum** etabliert, da es im Frühjahr und Herbst auftritt und gewissermaßen als **durchschnittliches Jahrespektrum** angesehen werden kann.

2.2 Globalstrahlung

2.2.1 Entstehung der Globalstrahlung

Die verschiedenen Effekte wie Streuung und Absorption bewirken eine Abschwächung des aus dem Weltraum kommenden AM 0-Spektrums. Bei der Summation des in Bild 2.2 gezeigten AM 1,5-Spektrums erhält man lediglich 835 W/m^2 . Am Erdboden kommen also von den ursprünglich vorhandenen 1367 W/m^2 nur noch 61 % als so genannte **Direktstrahlung** an. Allerdings entsteht durch die Streuung von Licht in der Atmosphäre ein weiterer Strahlungsanteil: die **Diffusstrahlung** (siehe Bild 2.4).

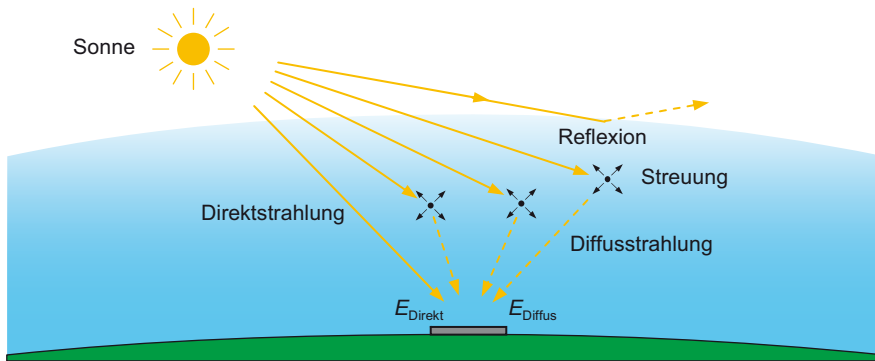


Bild 2.4 Entstehung der Globalstrahlung: Sie ergibt sich aus der Summe von Direkt- und Diffusstrahlung

Aus allen Richtungen des Himmels kommen schwache Strahlungsanteile und addieren sich zur Diffusstrahlung auf. Die Summe aus beiden Strahlungsarten nennt man **Globalstrahlung**:

$$E_G = E_{\text{Direkt}} + E_{\text{Diffus}} \quad (2.3)$$

An einem schönen, klaren Sommertag kann man auf einer Fläche senkrecht zur Sonneinstrahlung Globalstrahlungswerte von $E_G = E_{\text{STC}} = 1000 \text{ W/m}^2$ messen. Dies ist der Grund, warum man bei der Festlegung der **Standardtestbedingungen für Solarmodule** (siehe Abschnitt 1.5) ein um den Faktor $1000/835 = 1,198$ **aufgewertetes AM 1,5-Spektrum** verwendet. Dieses hat dann eine Gesamtleistungsdichte von exakt $E_{\text{STC}} = 1000 \text{ W/m}^2$ und ist somit geeignet, die Spitzenleistung eines Solarmoduls zu ermitteln.



Kommen in der Realität eigentlich niemals höhere Bestrahlungsstärken als 1000 W/m^2 vor?



In Einzelfällen kann es durchaus zu höheren Globalstrahlungsstärken kommen. Dies ist zum einen der Fall in Bergregionen wie den Alpen. Neben der verringerten Atmosphärendicke kann es dort zur Reflexion von Sonnenlicht an Schnee und Eis

kommen. Zum anderen misst man auch im Flachland manchmal Strahlungswerte von bis zu 1300 W/m^2 . Dies passiert bei sonnigem Wetter und hellen leichten Wolken rund um die Sonne, welche den Diffusstrahlungsanteil anheben. Diesen Effekt bezeichnet man als **Cloud Enhancements**.

2.2.2 Beiträge von Diffus- und Direktstrahlung

Der Beitrag der Diffusstrahlung zur Globalstrahlung wird oft unterschätzt. In Deutschland liefert die Diffusstrahlung über das ganze Jahr gesehen einen größeren Beitrag als die Direktstrahlung. Als Beweis betrachten wir Tabelle 2.2. Dort sind für verschiedene Standorte die Monatsmittel der **Strahlungssummen H** auf eine horizontale Fläche aufgeführt.

Tabelle 2.2 Strahlungssummen pro Quadratmeter und Tag über das Jahr auf eine horizontale Ebene für verschiedene Standorte in $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ [Hüb10]

| Ort | | Jan | Feb | Mrz | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Σ |
|-----------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| Hamburg | H_{Direkt} | 0,13 | 0,37 | 0,74 | 1,49 | 2,18 | 2,32 | 2,01 | 1,82 | 1,10 | 0,52 | 0,18 | 0,10 | 1,08 |
| | H_{Diffus} | 0,40 | 0,78 | 1,35 | 2,04 | 2,55 | 2,79 | 2,67 | 2,26 | 1,63 | 0,99 | 0,51 | 0,31 | 1,52 |
| | H | 0,53 | 1,15 | 2,09 | 3,53 | 4,73 | 5,11 | 4,68 | 4,08 | 2,73 | 1,51 | 0,69 | 0,41 | 2,60 |
| Berlin | H_{Direkt} | 0,15 | 0,38 | 0,86 | 1,51 | 2,28 | 2,45 | 2,35 | 2,04 | 1,26 | 0,58 | 0,18 | 0,09 | 1,18 |
| | H_{Diffus} | 0,45 | 0,82 | 1,42 | 2,06 | 2,57 | 2,80 | 2,69 | 2,28 | 1,69 | 1,05 | 0,54 | 0,34 | 1,56 |
| | H | 0,60 | 1,20 | 2,28 | 3,57 | 4,85 | 5,25 | 5,04 | 4,32 | 2,95 | 1,63 | 0,72 | 0,43 | 2,74 |
| München | H_{Direkt} | 0,36 | 0,75 | 1,28 | 1,83 | 2,43 | 2,62 | 2,69 | 2,26 | 1,71 | 0,89 | 0,38 | 0,24 | 1,45 |
| | H_{Diffus} | 0,67 | 1,05 | 1,60 | 2,18 | 2,61 | 2,81 | 2,71 | 2,35 | 1,82 | 1,24 | 0,75 | 0,55 | 1,70 |
| | H | 1,03 | 1,80 | 2,88 | 4,01 | 5,04 | 5,43 | 5,40 | 4,61 | 3,53 | 2,13 | 1,13 | 0,79 | 3,15 |
| Marseille | H_{Direkt} | 1,01 | 1,34 | 2,40 | 3,24 | 4,03 | 4,78 | 5,03 | 4,24 | 3,05 | 1,76 | 1,05 | 0,79 | 2,72 |
| | H_{Diffus} | 0,79 | 1,11 | 1,49 | 1,90 | 2,16 | 2,18 | 2,02 | 1,85 | 1,58 | 1,24 | 0,87 | 0,70 | 1,49 |
| | H | 1,80 | 2,45 | 3,89 | 5,14 | 6,19 | 6,96 | 7,05 | 6,09 | 4,63 | 3,00 | 1,92 | 1,49 | 4,21 |
| Kairo | H_{Direkt} | 2,16 | 2,94 | 3,80 | 4,60 | 5,41 | 5,95 | 5,82 | 5,34 | 4,50 | 3,56 | 2,48 | 1,92 | 4,04 |
| | H_{Diffus} | 1,26 | 1,47 | 1,76 | 1,99 | 2,05 | 2,01 | 1,99 | 1,89 | 1,73 | 1,50 | 1,30 | 1,18 | 1,68 |
| | H | 3,42 | 4,41 | 5,56 | 6,59 | 7,46 | 7,96 | 7,81 | 7,23 | 6,23 | 5,06 | 3,78 | 3,10 | 5,72 |

In **Hamburg** liegt die mittlere Diffusstrahlungssumme H_{Diffus} bei $1,52 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ gegenüber einem H_{Direkt} von $1,08 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. Somit trägt die **Diffusstrahlung knapp 60 % zur Jahresglobalstrahlung** bei. In **München** ist die Lage etwas verändert: die Diffusstrahlung erbringt hier nur einen **Beitrag von 54 %**.

Wir fassen daher zusammen:

In Deutschland liefert die Diffusstrahlung einen leicht höheren Beitrag zur Globalstrahlung als die Direktstrahlung.

Anders ist die Lage in südlichen Ländern: In **Marseille und Kairo** erbringt die **Direktstrahlung mit 65 % bzw. 71 %** den Hauptanteil an der Globalstrahlung.

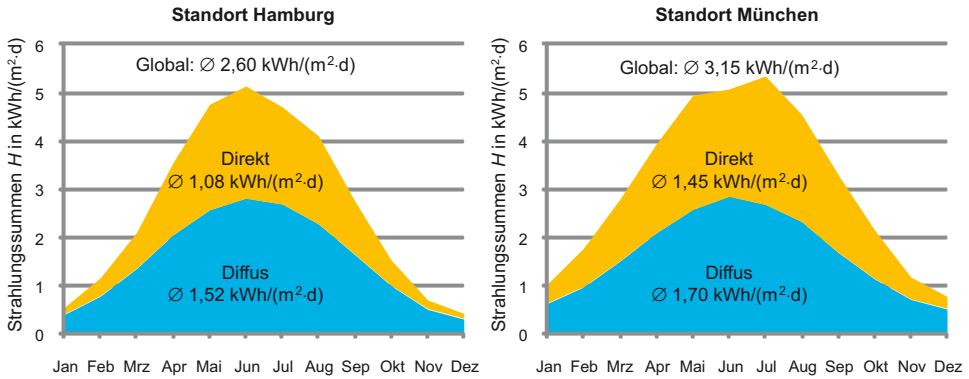


Bild 2.5 Strahlungssummen über das Jahr auf eine horizontale Ebene für die Standorte Hamburg und München

In Bild 2.5 sind die Daten von Hamburg und München noch einmal graphisch dargestellt. Was können wir daraus entnehmen? Zunächst einmal wird sichtbar, dass sich der Betrieb einer Photovoltaikanlage in München mehr lohnt als in Hamburg. Die mittlere Globalstrahlungssumme von $H = 3,15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ergibt über das ganze Jahr gesehen (365 Tage) eine Jahressumme von

$$H = 3,15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}) \cdot 365 \text{ d/a} = 1150 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}).$$

Die entsprechende Jahressumme in Hamburg beträgt lediglich 949 Kilowattstunden pro Quadratmeter und Jahr.

Weiter wird sichtbar, dass die Diffusstrahlung in München nur wenig über der in Hamburg liegt. Die höhere Globalstrahlung in München wird hauptsächlich durch die größere Direktstrahlung erreicht. Der Grund dafür ist leicht zu erraten: Die in München höher stehende Sonne. Die Sonnenhöhe hat aber offensichtlich kaum einen Einfluss auf die Diffusstrahlung.

Wie unterschiedlich die Tagesgänge von Direkt- und Diffusstrahlung sein können, zeigt Bild 2.6. Hier werden die Stundensummen der Strahlung für einen sonnigen und einen be-

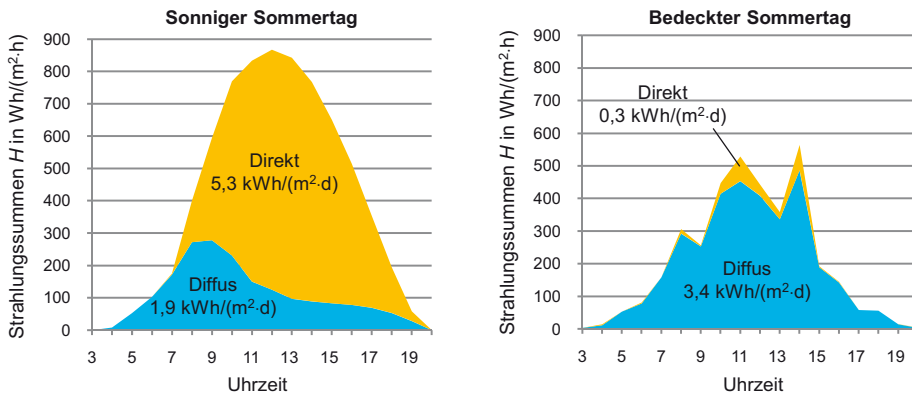


Bild 2.6 Stunden-Strahlungssummen an zwei Sommertagen in Braunschweig: Der bedeckte Tag erbringt immerhin gut die Hälfte der Strahlungsenergie des sonnigen Tages [Pal98]

deckten Sommertag dargestellt. Am sonnigen Tag dominiert deutlich die Direktstrahlung, während sie am bedeckten Tag gegenüber der Diffusstrahlung praktisch keine Rolle spielt. Dennoch erbringt der bedeckte Tag mit $3,7 \text{ kWh/m}^2$ noch mehr als die Hälfte der Strahlung des sonnigen Tages. Dies zeigt, wie ergiebig auch die bedeckten Tage für die Photovoltaiknutzung sein können.

2.2.3 Globalstrahlungskarten

Um den Ertrag einer Photovoltaikanlage bereits im Planungsstadium abschätzen zu können, benötigt man Daten zur Globalstrahlung am geplanten Standort. Die wichtigste Kenngröße ist dabei die Jahressumme H der Globalstrahlung auf eine horizontale Ebene. Inzwischen gibt es Globalstrahlungskarten, die diese Kenngröße hochaufgelöst darstellen. Als Grundlage dienen langjährige Messungen an einem dichten Netz von Messstationen, Satellitenbilder und Simulationstools. Bild 2.7 zeigt eine derartige Karte des Deutschen Wetterdienstes.

Deutlich sichtbar nimmt die Jahres-Strahlungsenergie von Norden nach Süden hin zu. Die Werte reichen von 900 bis $1150 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Im Mittel kann man in Deutschland etwa von $1000 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ausgehen. Die dabei verwendete ungewohnte Einheit kann man durch ein sehr anschauliches Modell umgehen, das **Modell der Sonnen-Volllaststunden**.

Wir stellen uns dazu vor, dass die Sonne nur zwei Zustände einnehmen kann:

1. Sie strahlt mit „Volllast“: $E = E_{\text{STC}} = 1000 \text{ W/m}^2$.
2. Sie ist ganz „ausgeschaltet“: $E = 0$.

Wie lange muss die Sonne nun mit Volllast laufen, damit sie z. B. eine Strahlungssumme von $H = 1000 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ auf den Erdboden abgibt?

$$\frac{H}{E_{\text{STC}}} = \frac{1000 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}}{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} = 1000 \frac{\text{h}}{\text{a}} \quad (2.4)$$

Die Sonne würde also 1000 Volllaststunden benötigen, um die gleiche optische Energie abzugeben, wie sie sie tatsächlich über ein Jahr (8760 h) liefert.

Die Sonne erbringt in Deutschland etwa 1000 Volllaststunden.

In anderen Ländern sieht die Einstrahlungssituation teilweise deutlich besser aus. Dies zeigt Bild 2.8 anhand einer Globalstrahlungskarte von Europa. Die **Strahlungswerte** liegen größtenteils im Bereich von **1000 bis 1500 $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$** . Extreme Werte finden sich z. B. in **Schottland** mit nur **700** und in **Südspanien** mit rund **1800 $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$** .

Zur Gesamtübersicht zeigt Bild 2.9 eine **Weltkarte** der Globalstrahlungssummen. Die höchsten Einstrahlungen liegen oberhalb und unterhalb des Äquators mit **Spitzenwerten** von rund **2500 Volllaststunden**.