

Übersicht

1. Einleitung

2. Die Sonne als Energiequelle

2.1 Sonnenstrahlung

2.2 Einfluß der Atmosphäre

2.3 Einstrahlung auf geneigte Flächen

2.4 Direkt- und Diffusstrahlung

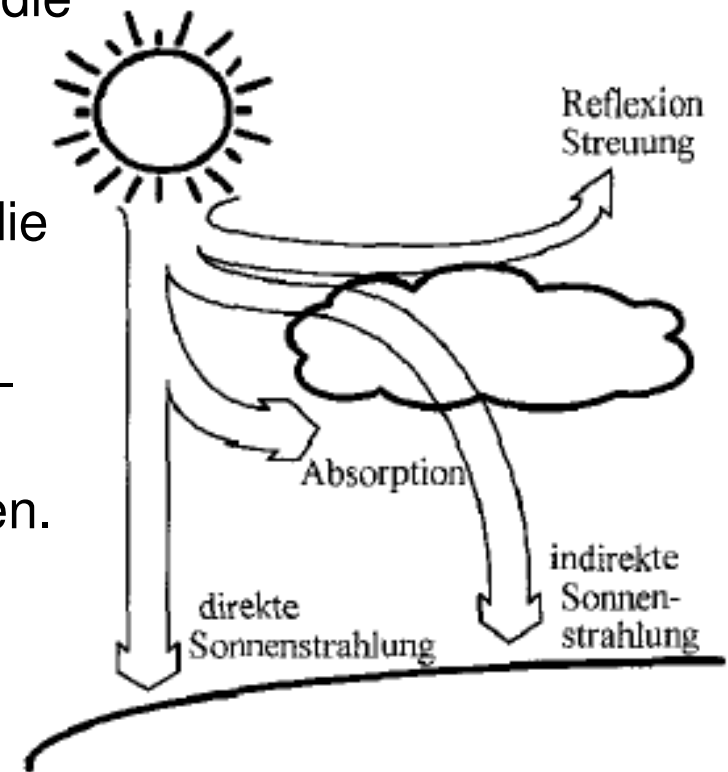
2.5 Strahlungsdaten

Globalstrahlung als natürliche Strahlungsquelle

Extinktion von Sonnenstrahlung auf dem Weg durch die Atmosphäre durch diffuse Reflexion und selektive Absorption

Selektive Absorption, i.w. durch Spurengase, heizt die Atmosphäre auf.

Diffuse Reflexion erfolgt durch Streuung der Sonnenstrahlung an Luftmolekülen, Wassertröpfchen, Eiskristallen der hohen Wolken und weiteren Aerosolen. Der Teil diffus reflektierter Strahlung, der auf die Erde gelangt, heißt (diffuse) **Himmelsstrahlung**.



Globalstrahlung

heißt die Summe aus direkter Sonnenstrahlung und Himmelsstrahlung und ist definiert als die einer horizontalen Flächeneinheit zugestrahlte Leistungssumme aus direkter Sonnen- und diffuser Himmelsstrahlung.

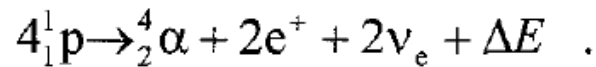
Daten von Sonne und Erde

Tabelle 2.2 Daten von Sonne und Erde

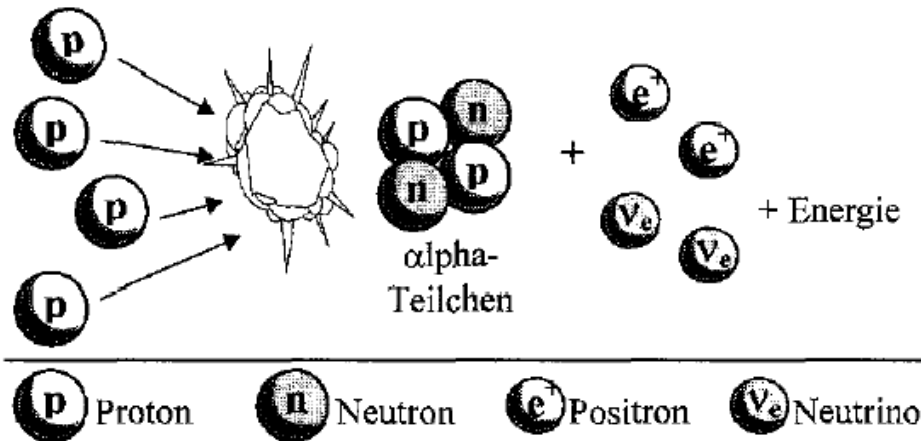
	Sonne	Erde	Verhältnis
Durchmesser	1.392.520 km	12.756 km	1 : 109
Umfang	4.373.097 km	40.075 km	1 : 109
Oberfläche	$6,0874 \cdot 10^{12} \text{ km}^2$	$5,101 \cdot 10^8 \text{ km}^2$	1 : 11.934
Volumen	$1,4123 \cdot 10^{18} \text{ km}^3$	$1,0833 \cdot 10^{12} \text{ km}^3$	1 : 1.303.670
Masse	$1,9891 \cdot 10^{30} \text{ kg}$	$5,9742 \cdot 10^{24} \text{ kg}$	1 : 332.946
mittlere Dichte	1,409 g/cm ³	5,516 g/cm ³	1 : 0,26
Schwerebeschleunigung (Oberfläche)	274,0 m/s ²	9,81 m/s ²	1 : 28
Oberflächentemperatur	5.777 K	288 K	1 : 367
Mittelpunkttemperatur	15.000.000 K	6.700 K	1 : 2.200

Quelle: V. Quaschning

Spezif. Ausstrahlung, Oberflächentemperatur



$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$



$$\frac{dM_S}{dt} = \Delta m \cdot \frac{dN_S}{dt} = 4,3 \cdot 10^9 \text{ kg/s}$$

$$\Phi_S = \frac{dE_S}{dt} = \frac{dM_S}{dt} \cdot c^2 = 3,845 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

Massendefekt der **Kernfusion** setzt Energie frei, die als Strahlungsleistung auftritt.

$$\frac{\Phi_S}{A_S} = 63,11 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2}$$

Spezifische Ausstrahlung der Sonne mit Oberfläche A_S

$$\frac{\Phi_S}{A_S} = \sigma_B \cdot T^4$$

Stefan-Boltzmann-Gesetz für Sonne als Schwarzer Körper

$$\Rightarrow T = 5777 \text{ K}$$

Oberflächentemperatur der Sonne

Sonnenspektrum

Extraterrestrisches Sonnenspektrum:

- Kontinuierliches Spektrum mit Maximum bei 478 nm
- beschreibbar mit der Planck'schen Formel der spektralen Strahldichte eines Schwarzen Körpers (Körper mit Absorptionsgrad = 1) der Temperatur $T=5900\text{K}$:

$$L_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/(kT\lambda)) - 1}$$

$$\Phi_S = \sigma_B A_S T^4$$



Übersicht

1. Einleitung
- 2. Die Sonne als Energiequelle**

2.1 Sonnenstrahlung

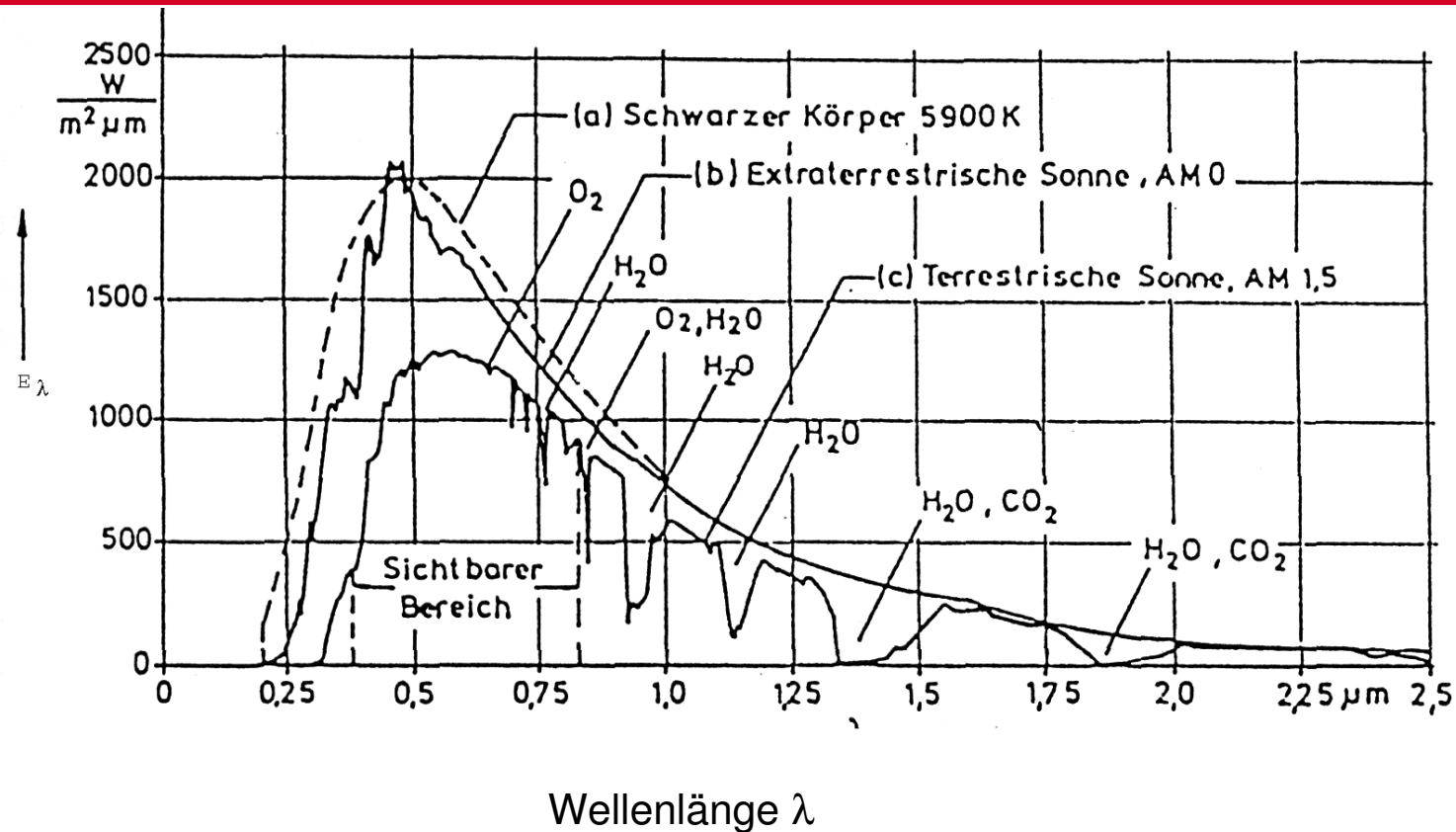
2.2 Einfluß der Atmosphäre

2.3 Einstrahlung auf geneigte Flächen

2.4 Direkt- und Diffusstrahlung

2.5 Strahlungsdaten

Spektrale Bestrahlungsstärken E_λ



(a) Schwarzer Körper von 5900 K

(b) Extraterrestrische Sonnenstrahlung (AM=0) bei mittlerem Sonnenstand nach WMO

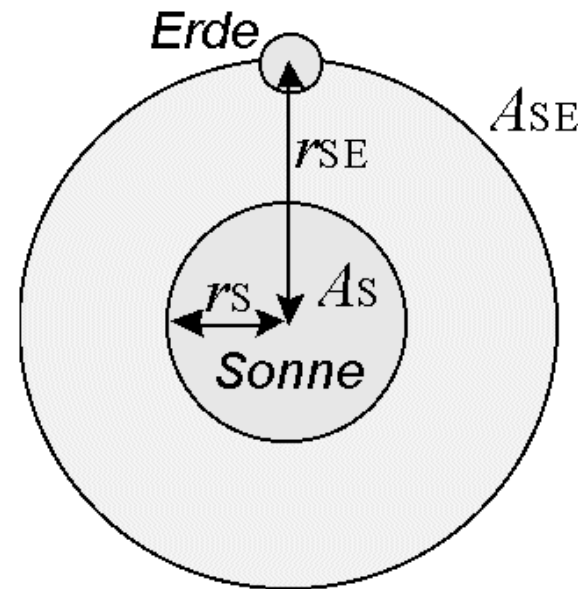
(c) Terrestrische Sonne für AM=1,5

Extraterrestrische Solarkonstante

Integriert man die spektrale Bestrahlungsstärke der extraterrestrischen Sonne über den gesamten Wellenlängenbereich, so erhält man die **extraterrestrische Solarkonstante**:

$$E_0 = 1367 \pm 7 \text{ W m}^{-2}$$

$$E_0 = \frac{\Phi_S}{4\pi \langle r_{SE}^2 \rangle}$$



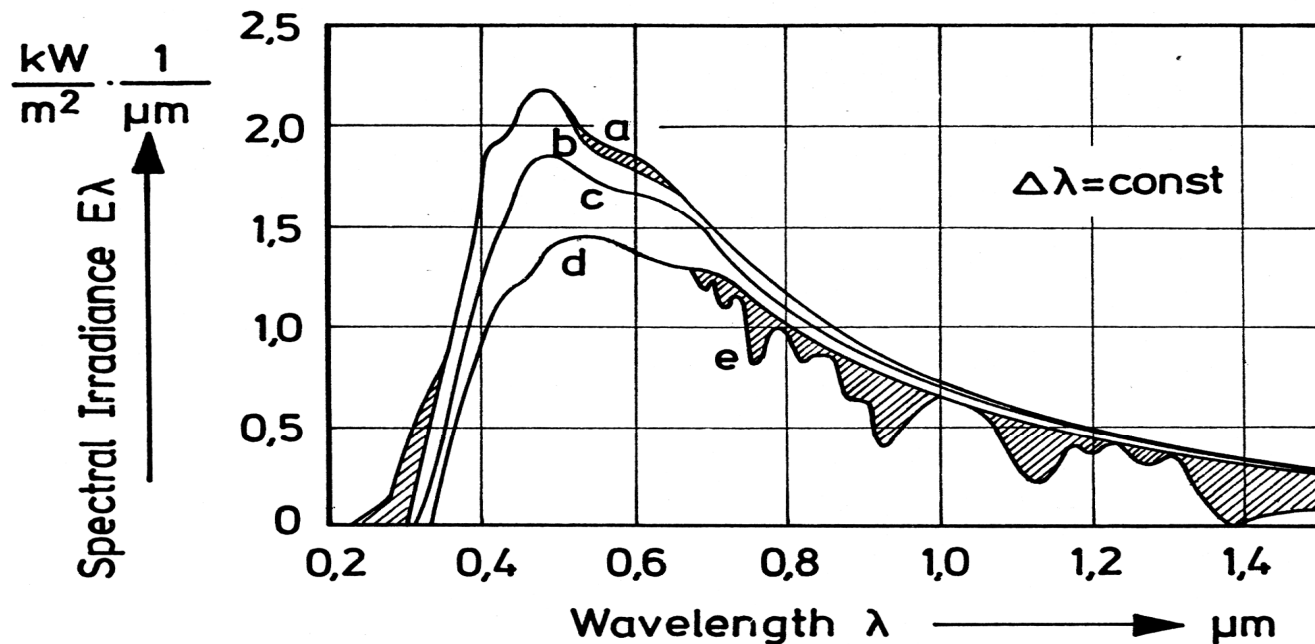
Mittelwert der Bestrahlungsstärke außerhalb der Erdatmosphäre auf einer Fläche senkrecht zur Sonneneinstrahlung bei einer mittleren Entfernung r_{SE} zwischen Erde und Sonne.

Absorption und Streuung in der Erdatmosphäre

Durchgang durch Erdatmosphäre führt zu Schwächung der Strahlung durch
Absorption und Streuung:

- **Ozonschicht** (O_3) in der Stratosphäre filtert Strahlung unter 300nm heraus.
- **Spurengase** (H_2O , CO_2 , N_2O , CH_4 , Fluorchlorkohlenwasserstoffe und Aerosole) in der Troposphäre **absorbieren** im Infraroten.
- **Rayleigh-Streuung** erfolgt i.w. an den Luftmolekülen (mit Durchmesser $< \lambda$).
Streuquerschnitt proportional zu λ^{-4}
→ Blaue Strahlung wird stärker herausgestreut als rote
- **Mie-Streuung** an Staubteilchen und Verunreinigungen der Luft (Aerosolen) mit Durchmesser $> \lambda$ - im Hochgebirge gering, stärker in Industriegebieten

Absorption und Streuung direkter Sonnenstrahlung



Spektrale Verteilung direkter Sonnenstrahlung nach verschiedenen Absorptions- und Streuprozessen

- a) extraterrestrische Sonnenstrahlung
- b) nach Absorption durch Ozon,
- c) nach Rayleigh-Streuung,
- d) nach Absorption und Streuung durch Aerosole,
- e) nach Absorption durch Wasserdampf und Sauerstoff $\Rightarrow$ direkte Sonnenstrahlung am Erdboden

Übersicht

1. Einleitung
- 2. Die Sonne als Energiequelle**

2.1 Sonnenstrahlung

2.2 Einfluß der Atmosphäre

2.3 Einstrahlung auf geneigte Flächen

2.4 Direkt- und Diffusstrahlung

2.5 Strahlungsdaten

Einfallswinkel der Sonnenstrahlung

γ_s Sonnenhöhe

α_s Sonnenazimut

Wintersonnenwende am 21. Dezember:
Sonnenstand senkrecht über 23,5° südl. Breite

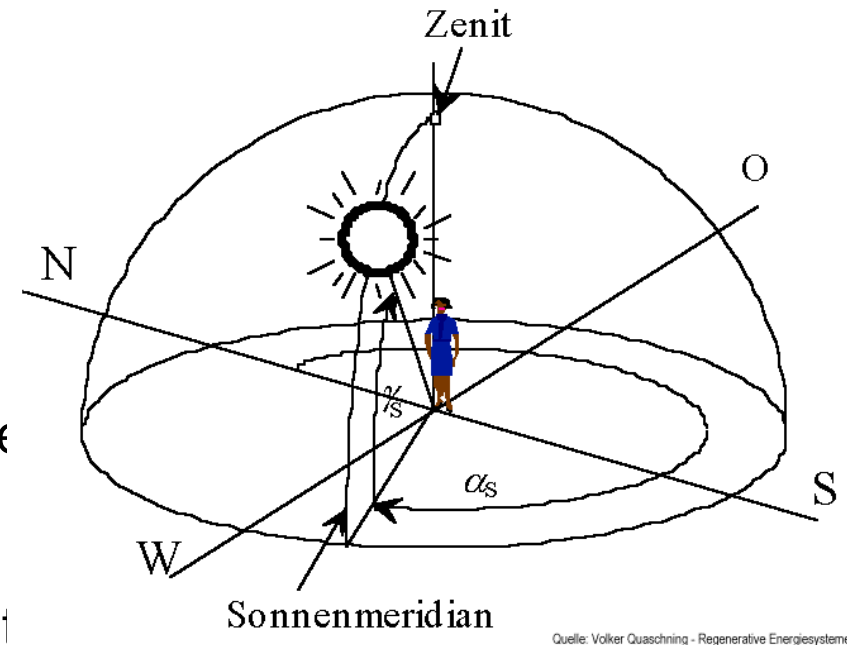
Sommersonnenwende am 21. Juni
Sonnenstand senkrecht über 23,5° nördl. Breite

Karlsruhe auf 49° nördlicher Breite

$$49^\circ + 23,5^\circ = 72,5^\circ < 90^\circ - \gamma_s < 49^\circ - 23,5^\circ = 25,5^\circ$$

Winkel zur Berechnung der
Sonneneinstrahlung

Bei Frühlingsanfang am 21. März und Herbstanfang am 21. September, wenn die Sonne senkrecht über dem Äquator steht, ist der Einfallswinkel für Karlsruhe mittags 49° bzw. die Sonnenhöhe 41°.



Air Mass und horizontale Sonnenbestrahlungsstärke

Maß der Gesamtextinktion ist der Linke-Trübungsfaktor T_L :

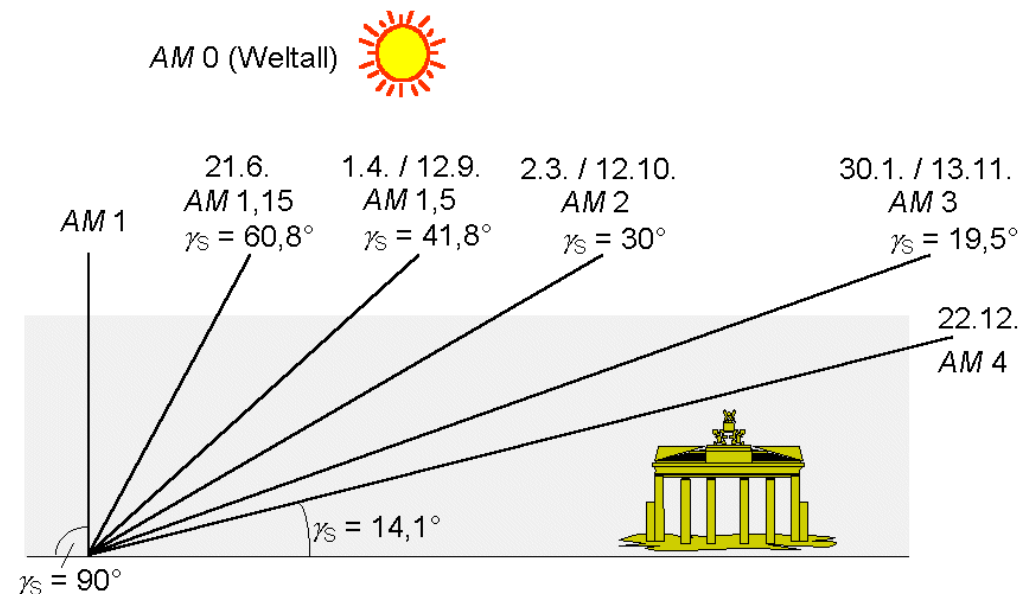
$$E_s = E_0 \sin(\gamma_s) \exp(-T_L \cdot \delta_R \cdot AM \cdot p / p_0) \quad \text{Horizontaleinstrahlung der Sonne}$$

δ_R = mittlere optische Dicke der reinen, trockenen Rayleigh-Atmosphäre

p/p_0 = Luftdruckkorrektur

$$AM = \frac{1}{\sin(\gamma_s)}$$

AM-Werte für Berlin an
verschiedenen Tagen
bei Sonnenhöchststand



Air mass: $AM > 1$ berücksichtigt den längeren Luftweg der Sonnenstrahlung bei schrägem Einfall.

Faktor $\sin(\gamma_s)$ von E_0 durch Flächenprojektion in die horizontale Empfangsebene

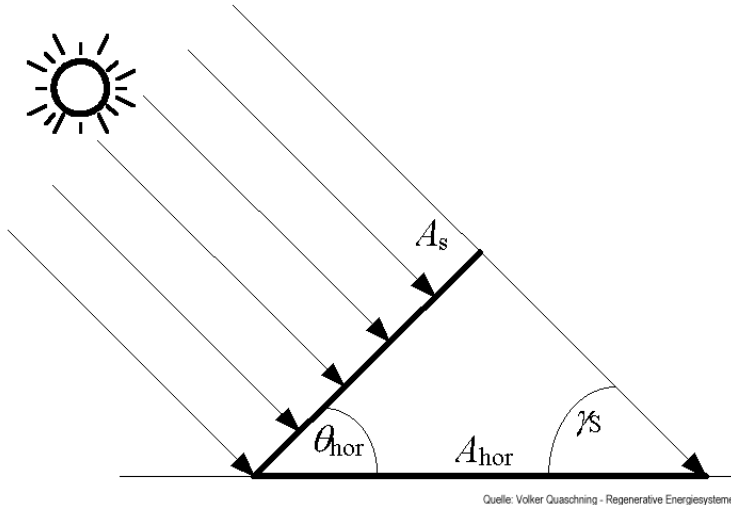
Reduktionseinflüsse in Abhängigkeit der Sonnenhöhe

γ_s	AM	Absorption	Rayleigh-Streuung	Mie-Streuung	Gesamt-schwächung
90°	1,00	8,7 %	9,4 %	0 ... 25,6 %	17,3 ... 38,5 %
60°	1,15	9,2 %	10,5 %	0,7 ... 29,5 %	19,4 ... 42,8 %
30°	2,00	11,2 %	16,3 %	4,1 ... 44,9 %	28,8 ... 59,1 %
10°	5,76	16,2 %	31,9 %	15,4 ... 74,3 %	51,8 ... 85,4 %
5°	11,5	19,5 %	42,5 %	24,6 ... 86,5 %	65,1 ... 93,8 %

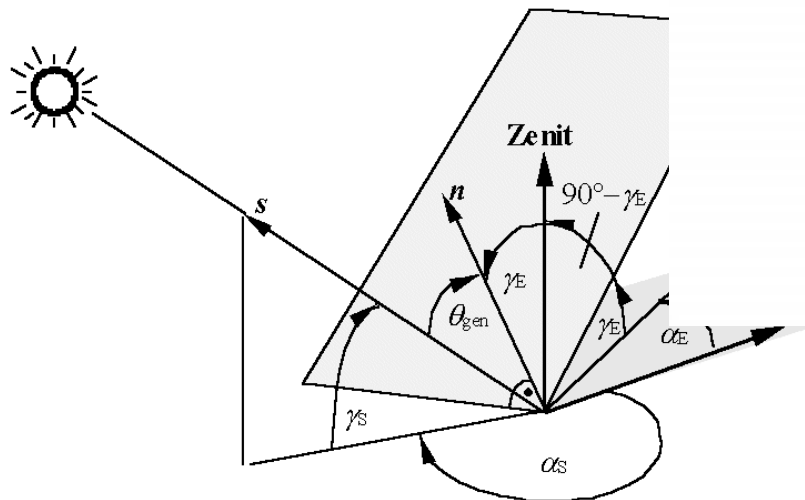
Die Mie-Streuung variiert je nach der Dichte der Verunreinigungen.

Hinzu kommen Reduktionen infolge von Witterungseinflüssen wie starke Bewölkung, Schneefall oder Regen.

Direkte Sonneneinstrahlung auf geneigte Ebene



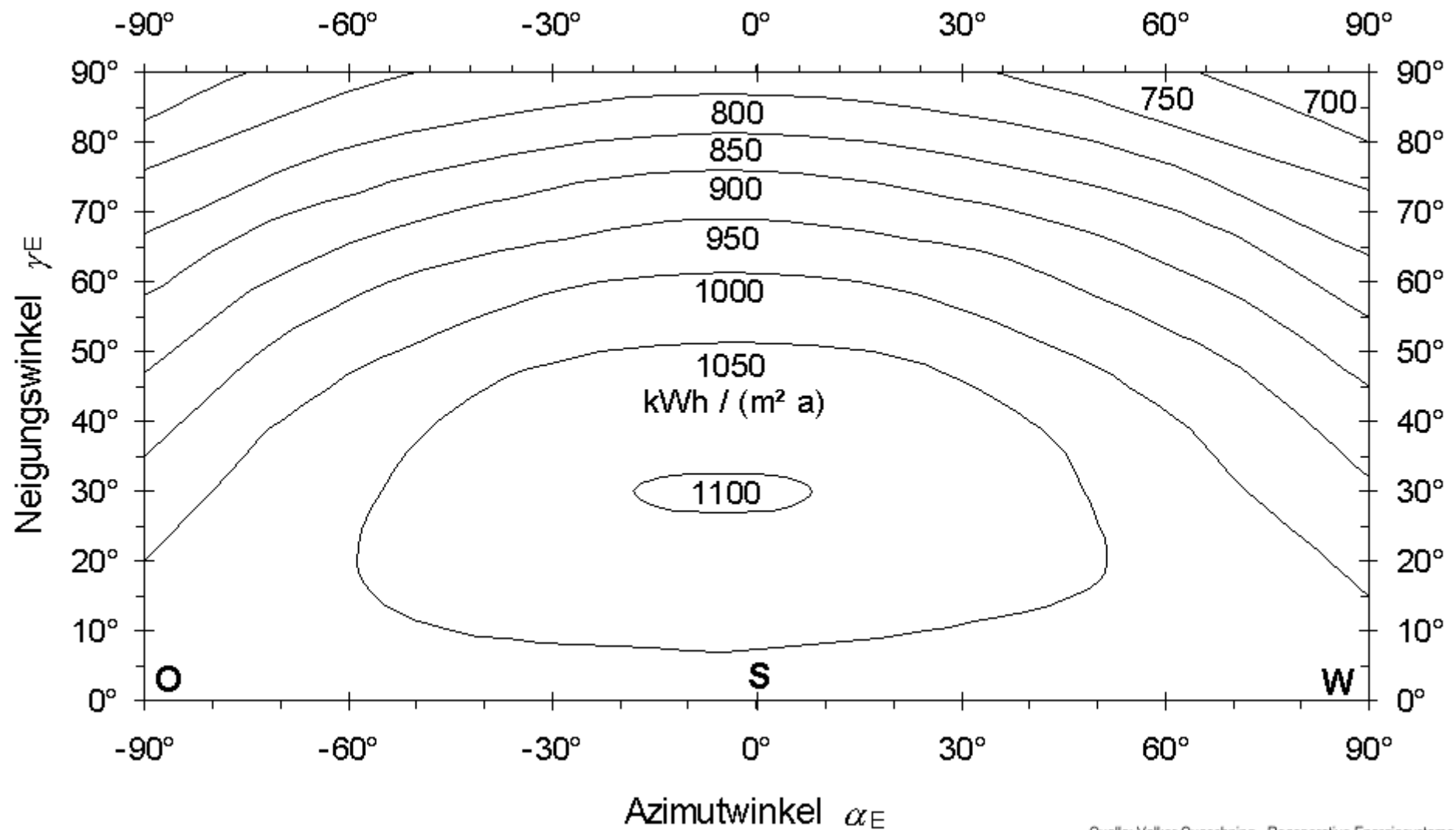
$$E_{dir,s} = \frac{E_{dir,hor}}{\sin \gamma_S} \geq E_{dir,hor}$$



$$\begin{aligned} \theta_{gen} &= \arccos(s \cdot n) = \\ &= \arccos(-\cos \alpha_S \cdot \cos \gamma_S \cdot \cos \alpha_E \cdot \sin \gamma_E - \\ &\quad \sin \alpha_S \cdot \cos \gamma_S \cdot \sin \alpha_E \cdot \sin \gamma_E + \sin \gamma_S \cdot \cos \gamma_E) = \\ &= \arccos(-\cos \gamma_S \cdot \sin \gamma_E \cdot \cos(\alpha_S - \alpha_E) + \sin \gamma_S \cdot \cos \gamma_E) \end{aligned}$$

$$E_{dir,gen} = E_{dir,hor} \cdot \frac{\cos \theta_{gen}}{\sin \gamma_S}$$

Einstrahlung auf geneigte Flächen



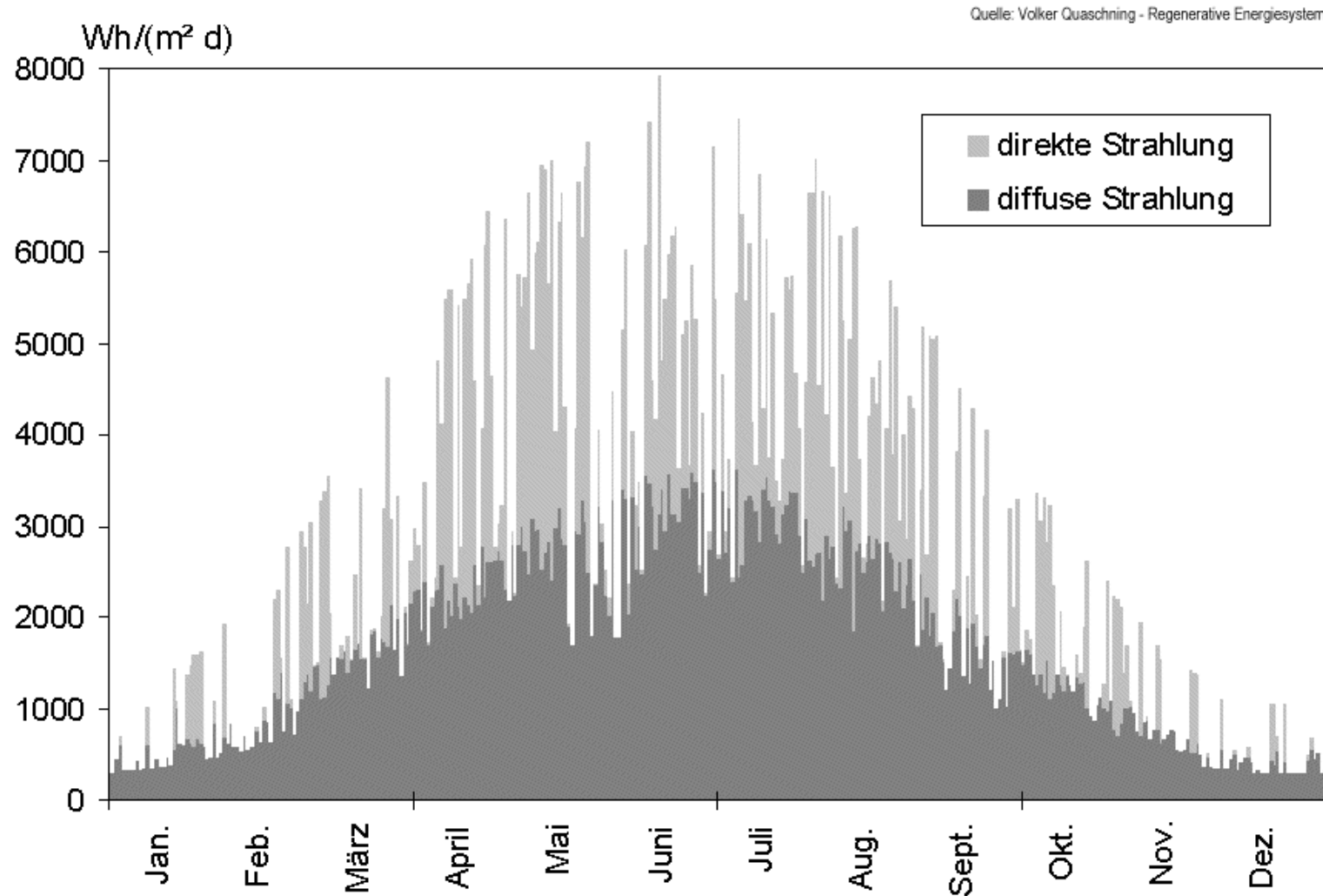
Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

- relativ große Winkeltoleranz bei „falscher“ Ausrichtung

Übersicht

1. Einleitung
2. **Die Sonne als Energiequelle**
 - 2.1 Sonnenstrahlung
 - 2.2 Einfluß der Atmosphäre
 - 2.3 Einstrahlung auf geneigte Flächen
 - 2.4 Direkt- und Diffusstrahlung
 - 2.5 Strahlungsdaten

Tagessummen von Direkt- und Diffusstrahlung



Typischer Verlauf für Berlin. Beachte die starke Variabilität!

Direkt- und Diffusstrahlung

Tabelle 2.7 Tägliche Direkt- und Diffusstrahlung im Monatsmittel (1966-75) in Berlin [Pal96]

kWh/(m ² d)	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
direkt	0,17	0,40	1,03	1,42	2,13	2,58	2,29	2,05	1,38	0,54	0,22	0,10	1,20
diffus	0,44	0,74	1,41	2,07	2,64	2,86	2,97	2,53	1,67	1,05	0,54	0,35	1,61

- hoher Anteil von Diffusstrahlung

Tabelle 2.8 Jahresmittelwerte (1966-75) der täglichen Direkt- und Diffusstrahlung [Pal96]

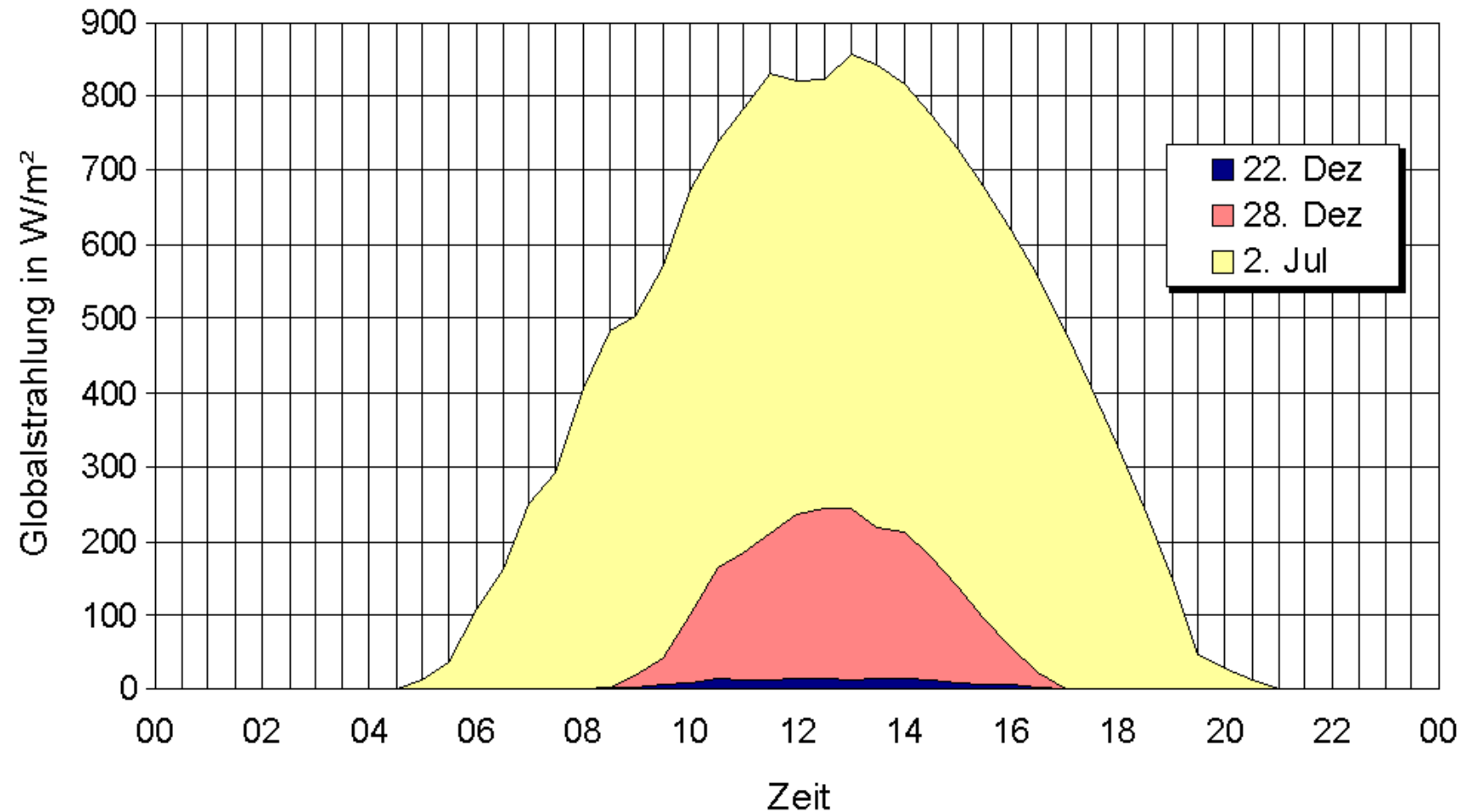
kWh/(m ² d)	Bergen	Stockholm	Berlin	London	Wien	Nizza	Rom	Lissabon	Athen
direkt	0,86	1,41	1,20	0,99	1,40	2,59	2,41	3,06	2,67
diffus	1,29	1,42	1,61	1,47	1,63	1,66	1,78	1,67	1,66

- Enorme Unterschiede für die Direktstrahlung

Übersicht

1. Einleitung
2. **Die Sonne als Energiequelle**
 - 2.1 Sonnenstrahlung
 - 2.2 Einfluß der Atmosphäre
 - 2.3 Einstrahlung auf geneigte Flächen
 - 2.4 Direkt- und Diffusstrahlung
 - 2.5 Strahlungsdaten

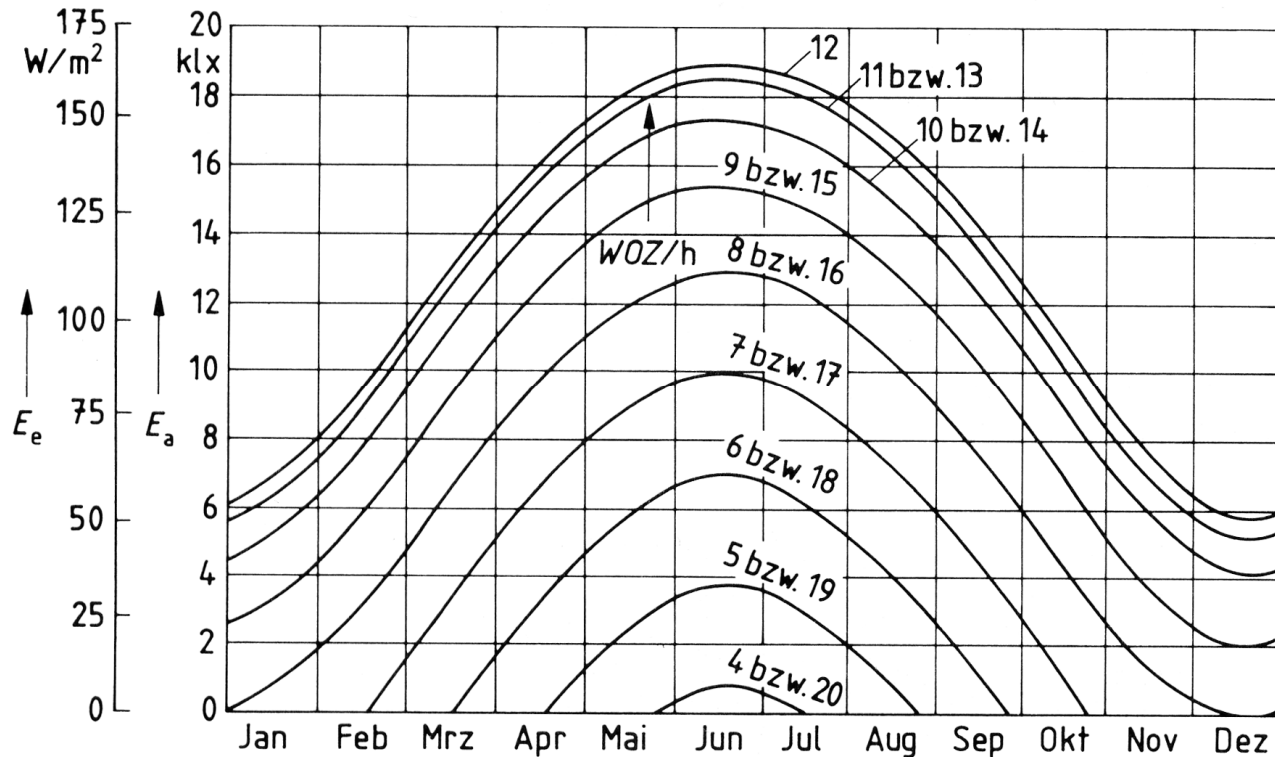
Tagesgänge der Globalstrahlung



Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

Karlsruhe am 2.7., einem wolkenlosen Sommertag, am 22.12., einem stark bedecktem Wintertag, und am 28.12.1991, einem wolkenlosen Wintertag

Monatsgänge der Globalstrahlung



Horizontale Beleuchtungsstärke E_v und horizontale Bestrahlungsstärke E_e bei *bedecktem* Himmel für 51° nördlicher Breite in Abhängigkeit von Jahres- und Tageszeit

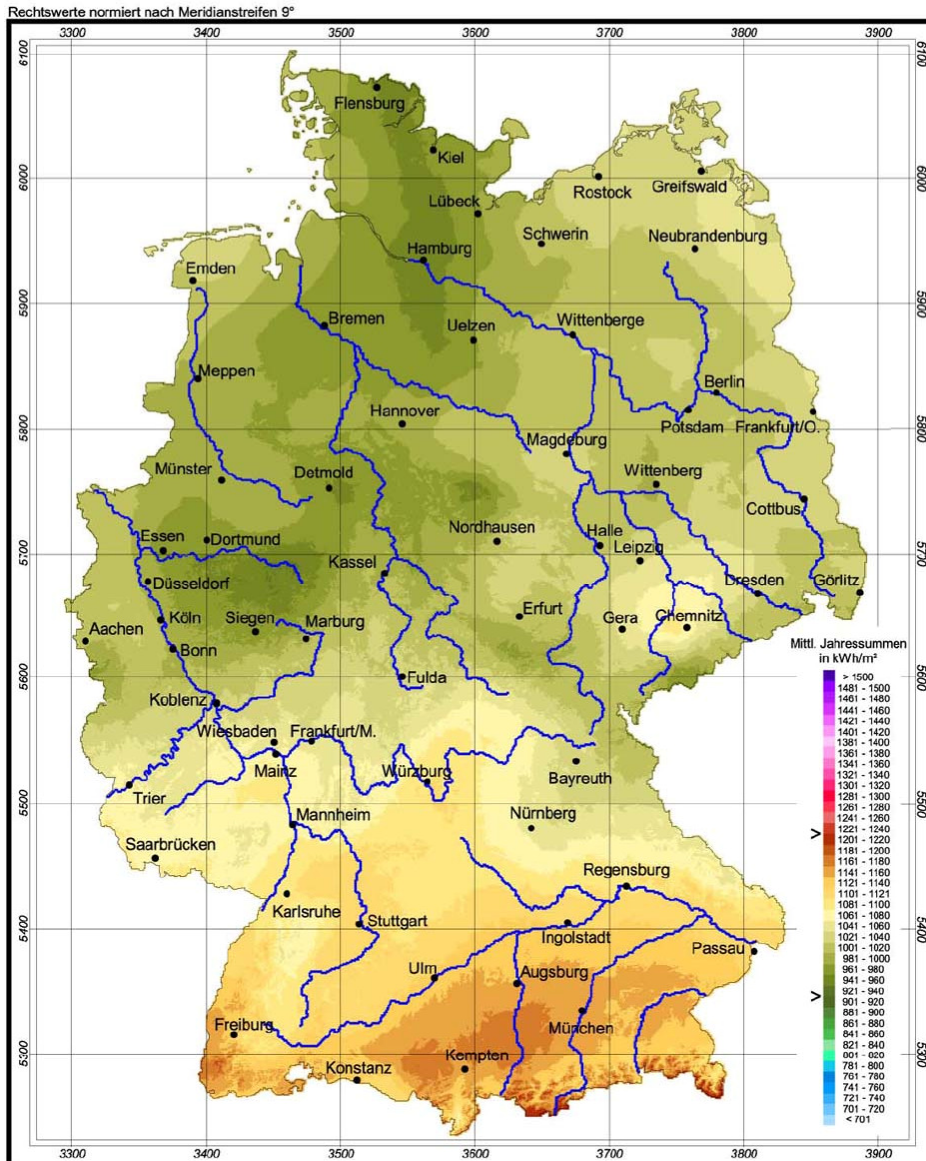
AM 1,5: Standardspektrum für die Messung von Wirkungsgraden von terrestrischen Solarzellen,

Integration von AM = 1,5: maximale terrestrische Globalbestrahlungsstärke für AM = 1,5.

$$E_{AM=1,5} \approx 1,0 \text{ kW/m}^2$$

(keine Trübung, klarer Himmel, Sonne senkrecht)

Einstrahlung in Deutschland



Max. Bestrahlungsstärke variiert nicht stark

Große Unterschiede in den solaren Energien, die in einem Jahr auf eine horizontale Fläche an verschiedenen Orten fallen.

Deutschland: Bestrahlung 1000 kWh/(m²a).

≈1000 Sonnenstunden pro Jahr (mit 1kWh/m²)
Jahresmittel: 115 W/m².

Saudi-Arabien: 2500 kWh/(m²a), Mittel 285 W/m²

Erde: Mittel 230 W/m².

D: Sommereinstrahlung = 10 * Wintereinstrahlung

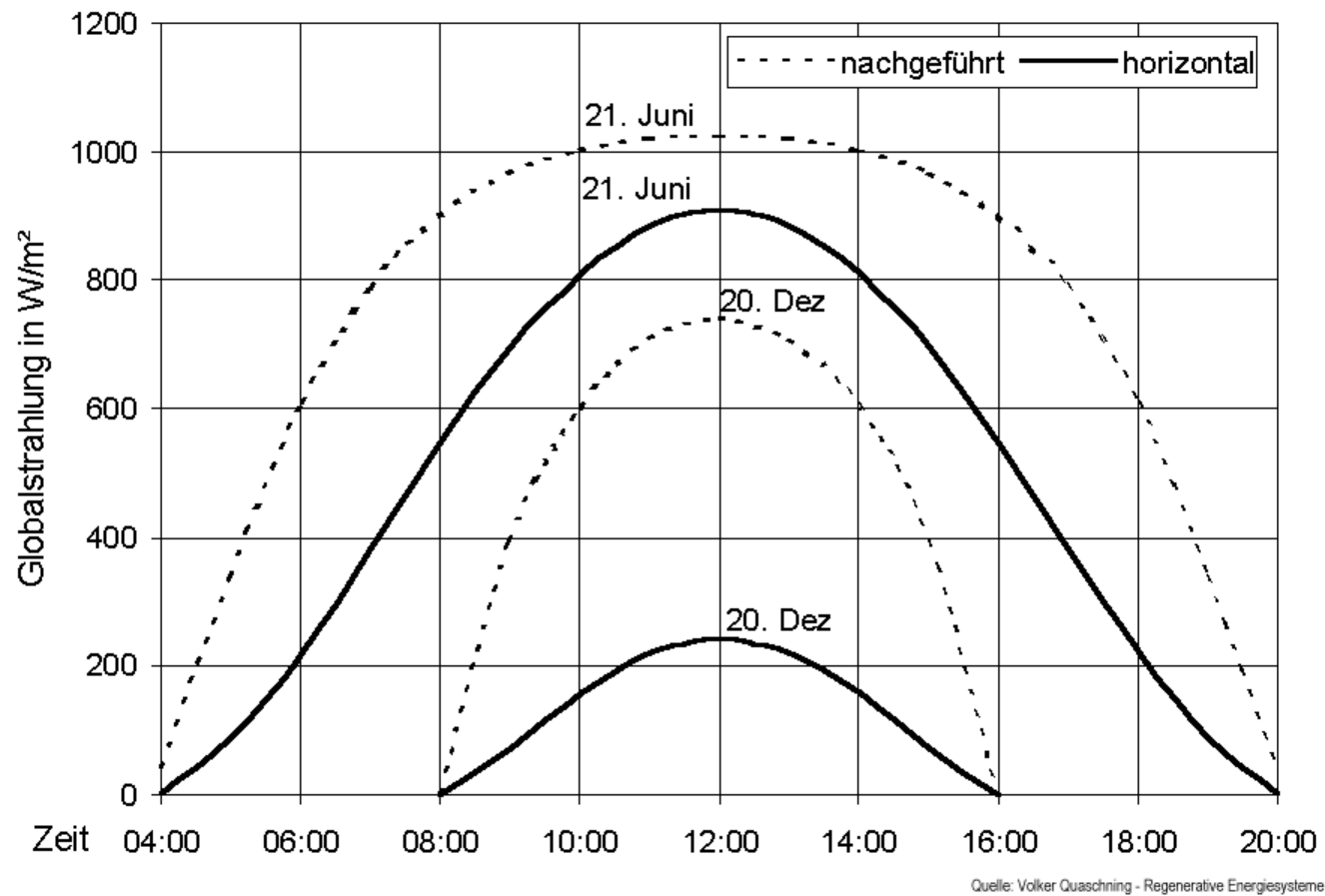
Durchschnittliche Sonnenstunden pro Jahr
(direkter Sonnenstrahlung mit mindestens 0,2
kW/m²) Deutschland 1300 – 1900 h.

Tagessummen für deutsche Orte

Tagessummen der Globalstrahlung für Orte in Deutschland

Ort	Durchschnittliche Globalstrahlung pro Tag (kWh/m ² *d). Bezug: ebene Fläche												kWh m ² /a
	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	
Berlin	0,54	1,14	2,47	3,72	4,83	5,56	5,02	4,21	3,16	1,59	0,64	0,39	1015
Hamburg	0,48	1,01	2,13	3,60	4,65	5,29	4,66	3,89	2,82	1,39	0,58	0,33	940
Bremen	0,49	1,07	2,07	3,58	4,64	5,15	4,52	3,87	2,81	1,44	0,62	0,37	934
Hannover	0,51	1,10	2,18	3,62	4,69	5,24	4,59	3,95	2,86	1,49	0,64	0,38	953
Göttingen	0,56	1,18	2,32	3,58	4,57	5,09	4,49	3,80	2,84	1,55	0,68	0,43	947
Braunlage	0,58	1,22	2,34	3,62	4,55	5,15	4,56	3,79	2,90	1,63	0,68	0,45	959
Dortmund	0,53	1,16	2,28	3,73	4,67	4,71	4,33	3,79	2,85	1,53	0,72	0,43	937
Essen	0,56	1,13	2,20	3,52	4,51	4,94	4,36	3,80	2,83	1,59	0,72	0,43	932
Bocholt	0,56	1,15	2,32	4,01	4,93	5,15	4,61	3,90	2,86	1,46	0,72	0,42	978
Münster	0,54	1,17	2,32	3,95	4,96	5,08	4,59	3,86	2,94	1,52	0,70	0,41	978
Osnabrück	0,51	1,10	2,11	3,48	4,54	5,05	4,37	3,75	2,78	1,53	0,66	0,40	923
Köln	0,62	1,26	2,42	3,91	4,73	4,95	4,58	4,10	3,04	1,78	0,79	0,51	996
Aachen	0,63	1,26	2,43	3,92	4,74	4,96	4,59	4,11	3,05	1,79	0,79	0,52	1000
Trier	0,63	1,29	2,47	3,76	4,77	5,08	4,91	4,07	3,04	1,65	0,74	0,49	1004
Lüdenscheid	0,53	1,19	2,37	3,49	4,48	4,45	4,03	3,48	2,76	1,54	0,70	0,43	897
Kahler Asten	0,59	1,25	2,36	3,65	4,72	4,80	4,43	3,68	2,87	1,60	0,69	0,43	947
Frankfurt	0,63	1,29	2,56	3,86	4,92	5,29	5,04	4,26	3,15	1,67	0,72	0,48	1033
Mannheim	0,69	1,37	2,72	4,04	5,11	5,37	5,34	4,48	3,34	1,81	0,78	0,54	1086
Stuttgart	0,75	1,42	2,60	3,78	4,83	5,23	5,37	4,53	3,37	2,03	0,88	0,61	1080
Tübingen	0,78	1,42	2,64	3,86	4,79	5,18	5,36	4,45	3,33	2,02	0,96	0,63	1079
Karlsruhe	0,71	1,36	2,67	3,89	5,05	5,37	5,42	4,55	3,38	1,90	0,81	0,57	1088
Freiburg	1,04	1,75	2,78	4,24	5,06	5,63	5,69	4,67	3,73	2,25	0,12	0,84	1160
München	0,77	1,44	2,60	3,83	4,72	5,27	5,25	4,41	3,48	2,06	0,87	0,57	1076
Kempten	0,91	1,58	2,80	3,79	4,06	4,90	5,13	4,47	3,43	2,19	1,04	0,76	1085
Ulm	0,75	1,40	2,69	3,90	4,88	5,26	5,43	4,54	3,34	1,83	0,80	0,56	1080
Regensburg	0,72	1,37	2,69	2,98	4,92	5,38	5,36	4,43	3,35	1,87	0,78	0,54	1088
Würzburg	0,65	1,33	2,63	3,94	4,99	5,40	5,26	4,37	3,20	1,76	0,76	0,51	1062

Strahlungsgewinn durch Nachführung



Unterschiede der Bestrahlungsstärke auf der Horizontalen und der nachgeführten Fläche für wolkenlose Tage und 50° geografische Breite

In Deutschland ca. 30% mehr Strahlungsenergie pro m^2 und Jahr durch Nachführung