

Vorlesung 3:

Einführung in die regenerativen Energien (EE) – WS22

Vorlesung 3: Grundlagen der Solarstrahlung

Prof. Dr. Frerk Haase

Fakultät: Technik und Informatik

Email: frerk.haase@haw-hamburg.de

Büro: Berliner Tor - Raum 03.85)

Inhalt der Vorlesung

Einführung in die regenerativen Energien



Wirtschaftlichkeit und Ökologie

(Energiegestehungskosten, das EEG in Deutschland, ökologische Betrachtungen)

Photovoltaik

Solarzelle

Aufbau und Funktionsprinzip, Arten,
elektr. Beschreibung, PV-Module)

PV-Generatoren

(Aufbau, Belastung, Gleichstromsteller,
Wechselrichter/Netzeinspeisung, Anlagenkonzepte, -güte)

Grundlagen der Solarstrahlung

(Fusionsreaktor Sonne, Solarstrahlung auf der Erde(Neigung, Nachführung, Abschattung)

Bereitstellung elektrischer Energie

(Elektr. Energieversorgungssystem in Deutschland, Energiewandlung/Kraftwerke(konventionell, regenerativ))

Einführung

(Grundaufgaben, Begriffsbestimmungen, Energiebedarf und dessen Deckung, Energieträger und deren Bewertung)

3 Grundlagen der Solarstrahlung

1 Einführung

2 Bereitstellung elektrischer Energie

3 Grundlagen der Solarstrahlung

4 Photovoltaik

5 Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit und Ökologie

3 Grundlagen der Solarstrahlung

3 Grundlagen der Solarstrahlung

3.1 Fusionsreaktor Sonne

3.2 Solarstrahlung auf der Erde

3.3 Bestrahlungsstärke auf horizontalen Flächen

3.3 Bestrahlungsstärke auf geneigten Flächen

3.4 Solarstrahlung und das „Harvesting“ der Sonnenenergie mit PV-Zellen / PV Module

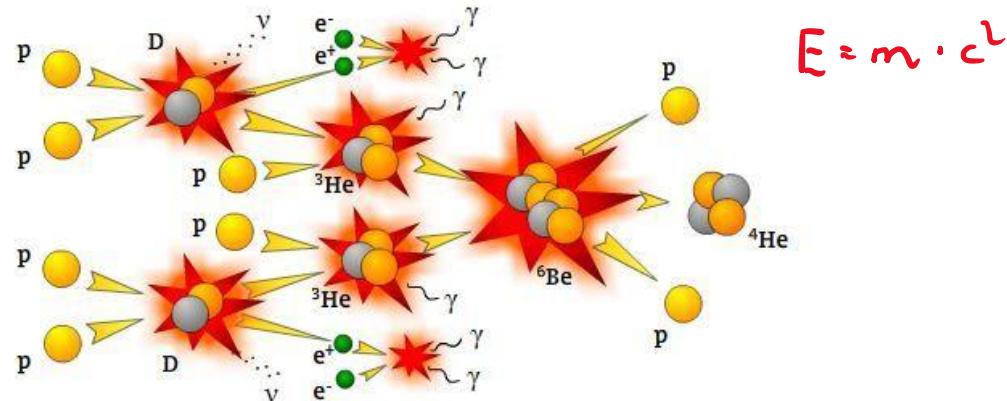
Kernfusionsprozess Sonne

■ Zusammensetzung der Sonne:

- ~80% Wasserstoff
- ~20% Helium
- ~0,1% andere Elemente

■ Proton-Proton-Reaktion:

- Strahlungsleistung der Sonne stammt aus Kernfusion
- Protonen-Protonen-Reaktion 91% der Energieproduktion der Sonne:
Fusion von 4 Wasserstoffkernen zu einem Heliumkern (Alphateilchen) + Positronen + Neutrinos + Energie



Freierdende Energie: $\Delta E = 4,2 \cdot 10^{-12} \text{ J/PP-Reaktion}$

$$\phi = \text{Strahlungsleistung [W]}$$

■ Spezifische Strahlungsleistung der Sonne:

ϕ

$$M_{e,S} = 63,3 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2}$$

Quelle: www.cosmiq.de

Kernfusionsprozess Sonne

Strahlungsleistung auf der Erdoberfläche

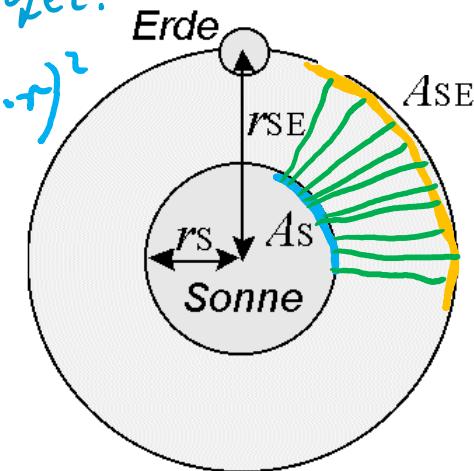
Abschätzung:

- Sonne als Kugel mit 696.260.000 m Radius
- Mittlerer Abstand vom Sonnen- zu Erdmittelpunkt $1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$
- Auf die Erde auftreffende Bestrahlungsstärke:

$$M \cdot A_s = E_e \cdot A_{SE} \Rightarrow E_e \approx M \cdot \frac{A_s}{A_{SE}} = M \frac{\cancel{4\pi} \cdot r^2}{\cancel{4\pi} \cdot r_{SE}^2} = 1367 \frac{W}{m^2}$$

Fläche einer Kugel:

$$A_s = \pi \cdot d^2 = \pi \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot r\right)^2$$
$$A_s = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot r^2$$



- Da der Abstand zw. Sonne und Erde nicht konstant \Rightarrow **Mittelwert**

Solarkonstante E_0 :

- Langjähriges Mittel ohne Einfluss der Atmosphäre senkrecht auf die Erde auftreffend

$$E_0 \approx 1367 \frac{W}{m^2}$$

- Strahlungsleistung der Sonne stammt aus Kernfusion
- Protonen-Protonen-Reaktion 91% der Energieproduktion der Sonne:
Fusion von 4 Wasserstoffkernen zu einem Heliumkern (Alphateilchen) + Positronen + Neutrinos + Energie

3 Grundlagen der Solarstrahlung

3 Grundlagen der Solarstrahlung

3.1 Fusionsreaktor Sonne

3.2 Solarstrahlung auf der Erde

3.3 Bestrahlungsstärke auf horizontalen Flächen

3.3 Bestrahlungsstärke auf geneigten Flächen

3.4 Solarstrahlung und das „Harvesting“ der Sonnenenergie mit PV-Zellen / PV Module

3.5 Übersicht verschiedener PV Anlagensysteme

Solarstrahlung auf der Erde

Spektrale Bestrahlungsstärke

■ Reduktion der Solarkonstante E_0 durch:

- Reflexion an der Atmosphäre
- Absorption durch Moleküle in der Atmosphäre (insbesondere im Infrarotbereich)
- Rayleigh-Streuung (Streuung an Molekülen, besonders bei kurzen Wellenlängen)
- Mie-Streuung (Streuung an Staubteilchen und Verunreinigungen, standortabhängig)

■ Spektrale Bestrahlungsstärke der Sonnenstrahlung:

- Spektrale spezifische Strahlungsleistung
- im Weltall (AM 0) und auf der Erde bei einer Sonnenhöhe von $\gamma_s = 41,8^\circ$ auf einer um 37° in Richtung Sonne geneigten Ebene (AM 1,5g)

$$E_{AM0} = 1367 \text{ W/m}^2$$

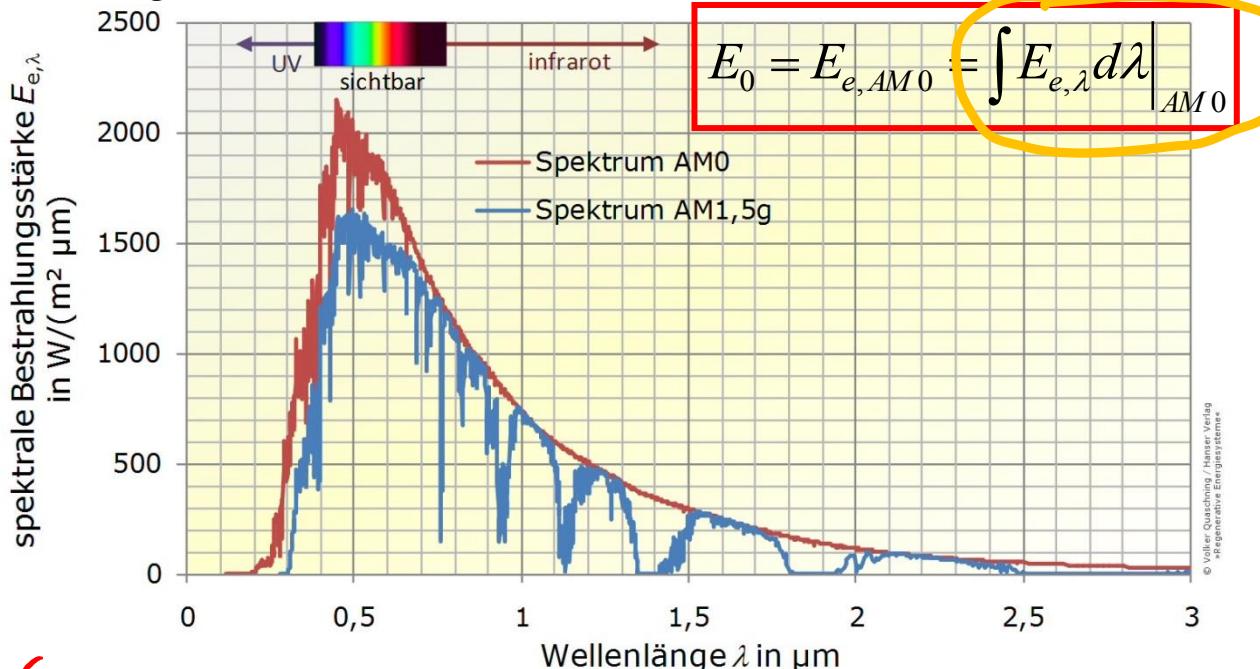
$$E_{AM1,5g} = 1000 \text{ W/m}^2$$

Referenz zur

Klassifizierung von PV-Modulen

STC für
Solar Module

Die Solarstrahlung wird durch Prozesse verschiedener Wellenlängen (λ) übertragen



Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

Solarstrahlung auf der Erde

air mass (AM) und Sonnenhöhe γ_s

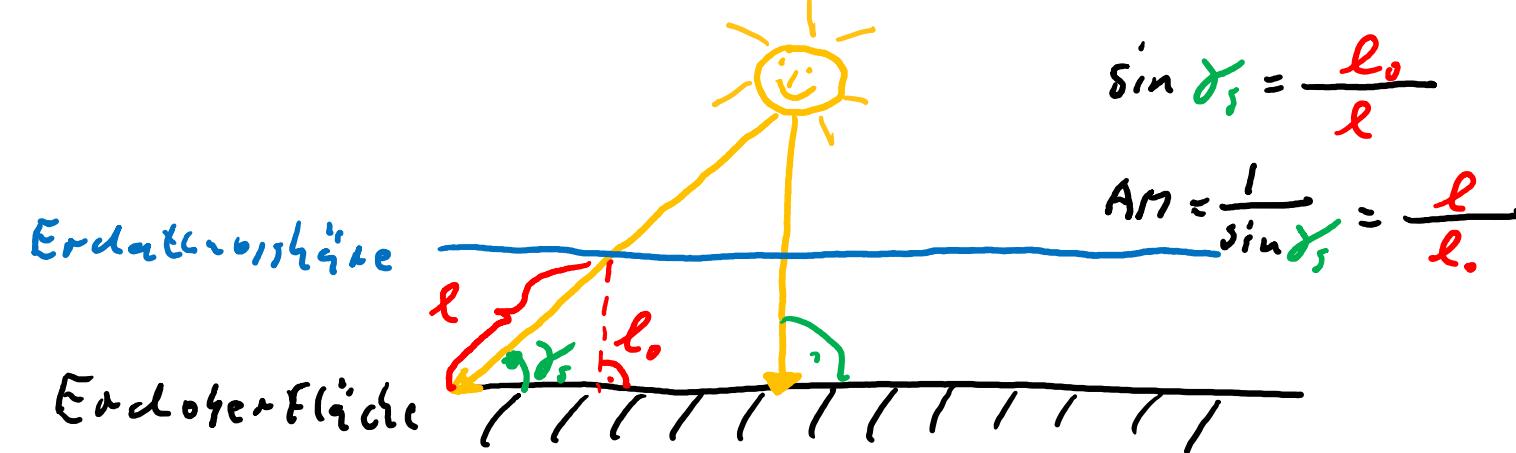


■ Definition air mass (AM) und Sonnenhöhe γ_s (Sonnenhöhenwinkel):

- Luftmasse (air mass) als relatives Maß für die Weglänge vom Himmelskörper bis zum Erdboden bezogen auf kürzeste Weglänge:

$$AM = \frac{l}{l_0} = \frac{1}{\sin(\gamma_s)}$$

Hängt von der
Zahlreizeit ab!



$$\sin \gamma_s = \frac{l_0}{l}$$

$$AM = \frac{1}{\sin \gamma_s} = \frac{l}{l_0}$$

■ Reduktionseinflüsse in Abhängigkeit der Sonnenhöhe γ_s :

γ_s	AM	Absorption	Rayleigh-Streuung	Mie-Streuung	Gesamtschwächung
90°	1,0	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°	2,0	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%

- Bei Sonnenhöhe von 90° senkrecht auf Erdoberfläche (kürzester Weg): AM=1

Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

Solarstrahlung auf der Erde

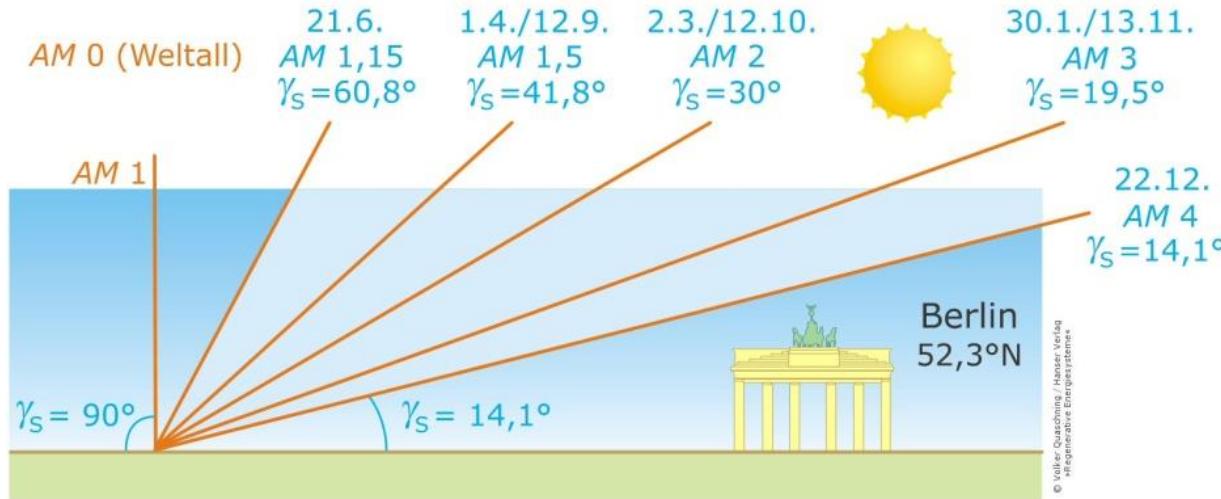
Höchster Sonnenstand und AM-Werte für verschiedene Tage



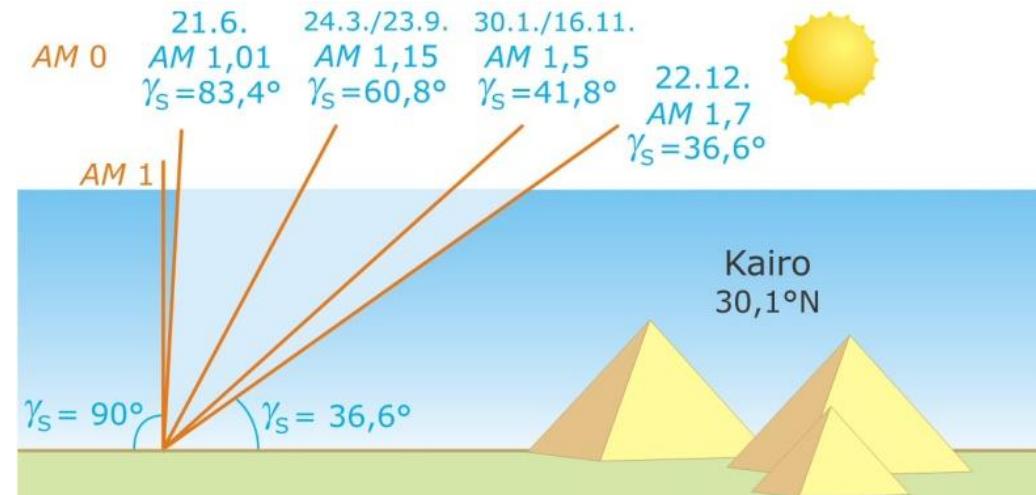
Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg

Hamburg University of Applied Sciences

■ Berlin:



■ Kairo:



Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

Solarstrahlung auf der Erde

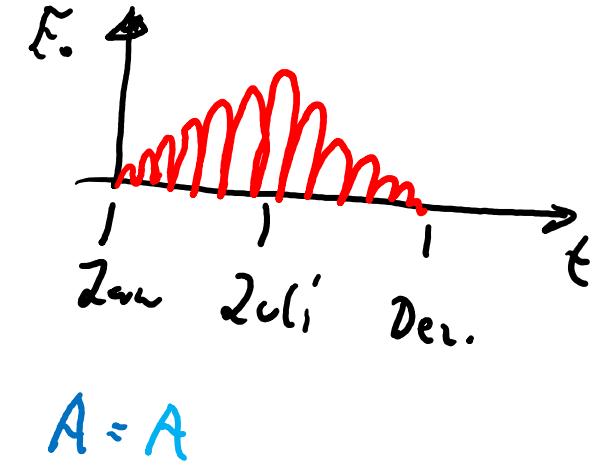
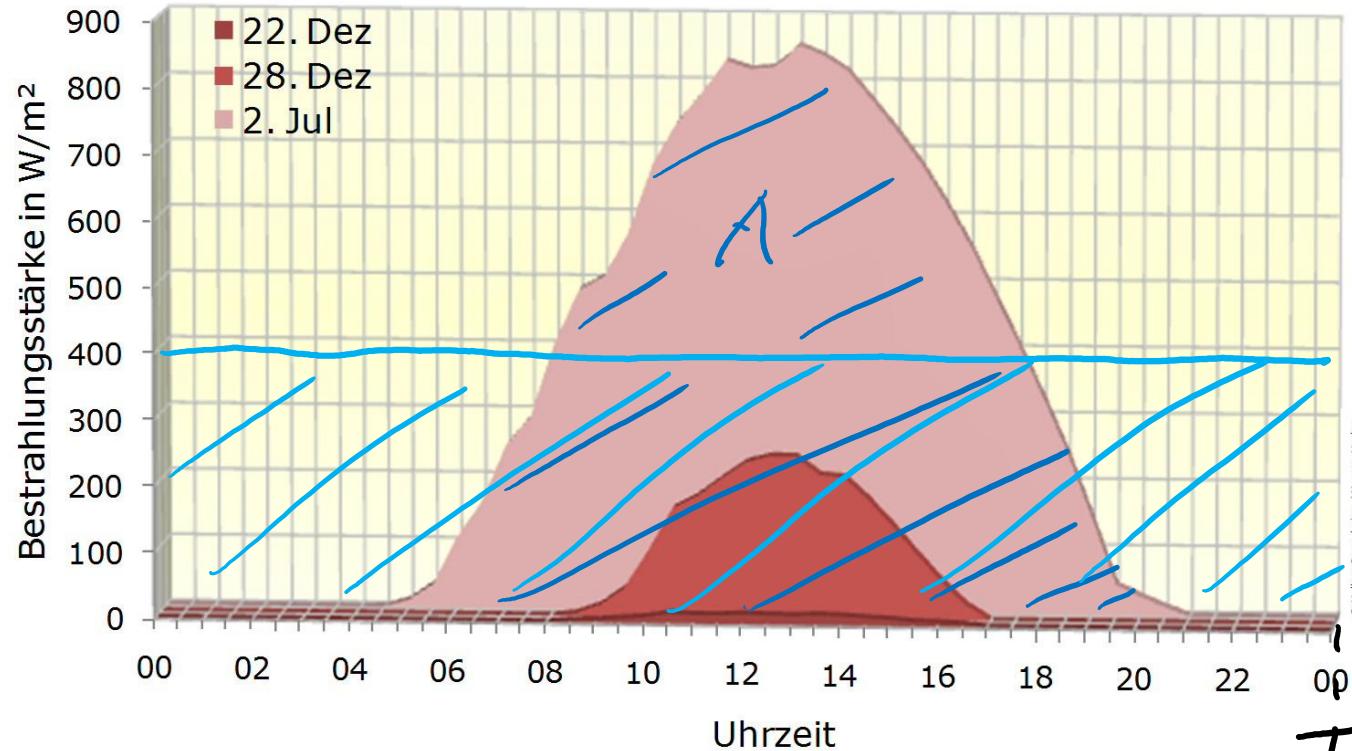
Tagesgänge



■ Tagesgänge:

- In den Morgen- und Abendstunden Reduktion durch längeren Weg durch Erdatmosphäre
⇒ abhängig von Standort, Datum und Uhrzeit

■ Tagesgänge der globalen (gesamten) Bestrahlungsstärke in Karlsruhe (Jahr 1991):



$$A = A$$

$$\frac{E_0}{T} = \frac{A}{T}$$

Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

Solarstrahlung auf der Erde

Mittlere jährliche Globalstrahlung in Deutschland

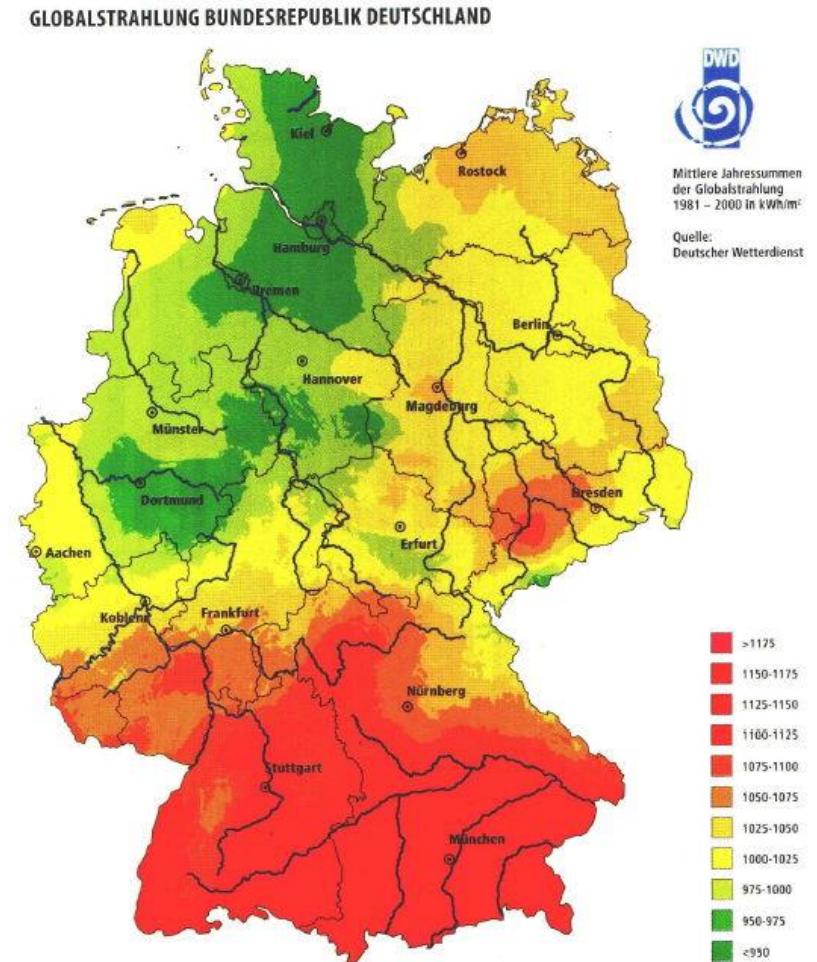
■ Jährliche Globalstrahlung H_G :

- Summe der globalen Bestrahlungsstärke E_G an einem Ort über einen Zeitraum
- Abhängig von Sonnenstand, Jahreszeit, Wetter

$$H_G = \int E_G(t) dt \quad \text{in kWh/m}^2 = \text{solare Energie/m}^2$$

■ Mittlere jährliche Globalstrahlung:

- Nordeuropa: 640 ... 1.000 kWh/m²
- Südeuropa: 1.500 ... 1.700 kWh/m²
- Deutschland: 1.040 kWh/m²
(940...1.200 kWh/m²)
- Sahara: > 2.300 kWh/m²



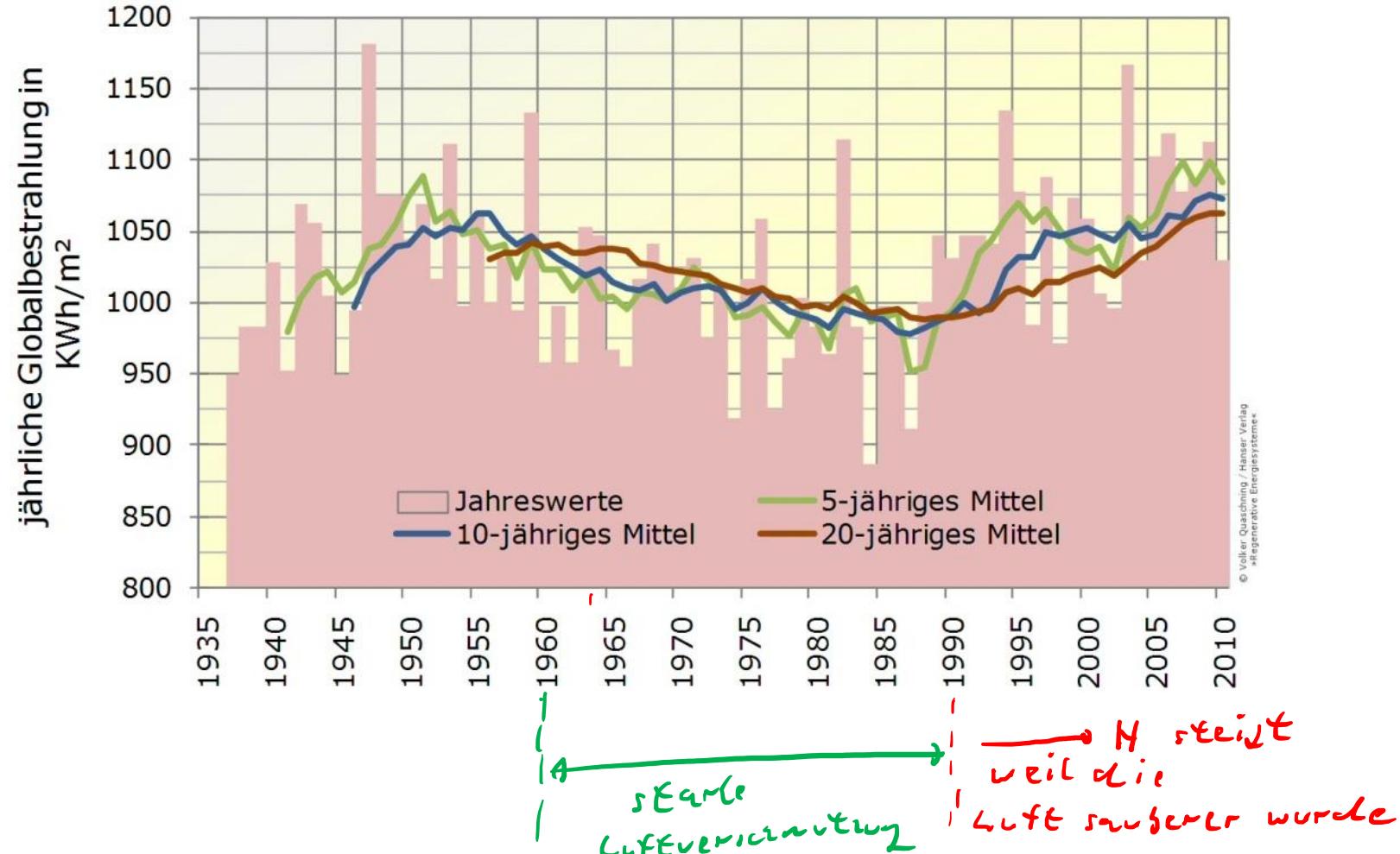
Quelle: Deutscher Wetterdienst

Solarstrahlung auf der Erde

Jahresgänge

■ Jährliche Globalstrahlung in Potsdam über 73 Jahre:

- Einfluss von Wettersituationen und klimatischer Bedingungen



Aufgabe Solarstrahlung

Solarstrahlung und Primärenergiebedarf

HA
Cöyy
 $7,22 \cdot 10^{22} W_s$

Aufgabe (siehe Aufgabensammlung: Aufgabe: 2-1):

- Die Fläche der Sahara beträgt 8,7 Mio km². Der Welt-Primärenergiebedarf im Jahr 2007 betrug 464,7 EJ (Exa 10¹⁸).
- Welche solare Energie trifft pro Jahr (mindestens) auf die Sahara?
- Das Wie vielfache des Welt-Primärenergiebedarfs in 2007 entspricht dies?
- Das Wie vielfache des Welt-Primärenergiebedarfs in 2007 könnte mit Silizium Solarmodulen die einen Wirkungsgrad von 20% hätten erzeugt werden, wenn die ganze Sahara mit diesen PV-Modulen „bedeckt“ werden würde?

$$120\text{Vle} = 1W_s = 1Nm$$

mittlere jährliche Globalstrahlung = mittlere jährliche Energie / m²

$$W = 2300 \frac{Wh}{m^2} \cdot 8,7 \cdot 10^6 \text{ km}^2 = 2,3 \cdot 10^6 \frac{Wh}{m^2} \cdot 3600 \frac{s}{h} \cdot 8,7 \cdot 10^{12} \text{ m}^2$$

$$= 7,22 \cdot 10^{22} W_s = 7,22 \cdot 10^{22} \text{ Joule}$$

$\hat{=} 155 \times 464 \cdot 10^{18} J$ bzw. das 155-fache des Weltenergiebedarfs,

$\hat{=} \text{Bei PV-Modulen mit } \eta=0,2 \text{ den 31-fachen}$

3 Grundlagen der Solarstrahlung

3 Grundlagen der Solarstrahlung

3.1 Fusionsreaktor Sonne

3.2 Solarstrahlung auf der Erde

3.3 Bestrahlungsstärke auf horizontalen Flächen

3.3 Bestrahlungsstärke auf geneigten Flächen

3.4 Solarstrahlung und das „Harvesting“ der Sonnenenergie mit PV-Zellen / PV Module

3.5 Übersicht verschiedener PV Anlagensysteme

- Direkte Sonnenstrahlung:

- aus der Richtung der Sonne und führt zu scharfen Schattenwürfen
→ direkte Bestrahlungsstärke $E_{dir,hor}$

- Diffuse Sonnenstrahlung:

- aus dem Himmelshalbraum gestreute (indirekte) Sonnenstrahlung, ohne definierte Richtung
→ diffuse Bestrahlungsstärke $E_{diff,hor}$

- Globale Bestrahlungsstärke auf einer horizontalen Fläche (Erdoberfläche):

$$E_{G,hor} = E_{dir,hor} + E_{diff,hor}$$

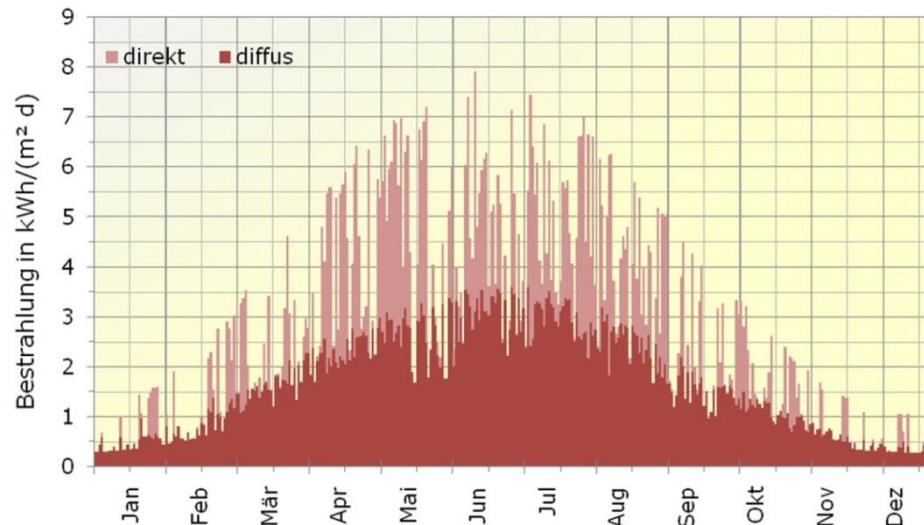


Bestrahlungsstärke auf horizontale Flächen

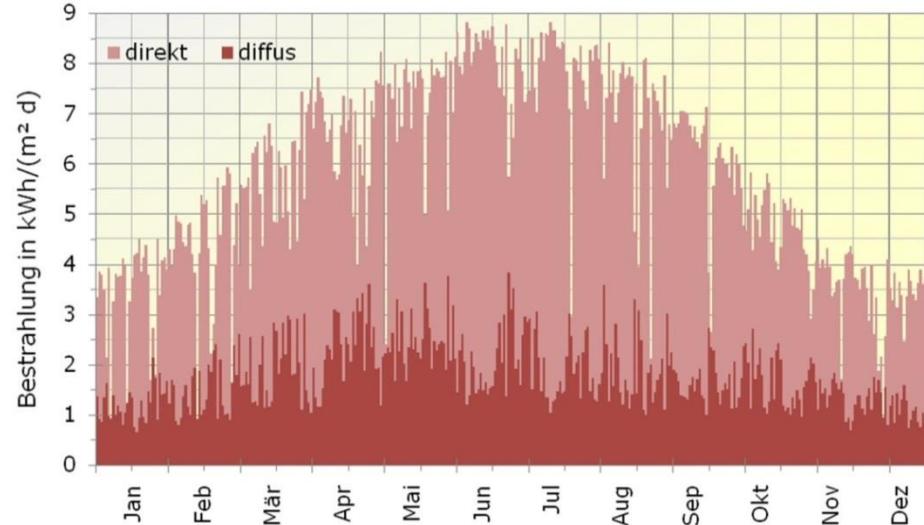
Typischer Verlauf der Tagessummen von direkter und diffuser Sonnenstrahlung



- Berlin:



- Kairo:



Deutschland hat im Jahresmittel: 60% diffuse und 40% direkte Sonnenstrahlung

Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

Aufgabe:

Globalstrahlung auf horizontale Flächen



■ Aufgabe (siehe Aufgabensammlung: Aufgabe: 2-2):

- Nachstehende Tabelle gibt monatsweise die mittlere tägliche Globalstrahlung auf horizontale Flächen in Hamburg an (langjährige Mittelwerte):

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
[kWh/(m ² ·d)]	0,52	1,13	2,23	3,55	4,67	5,44	4,82	4,34	2,79	1,49	0,67	0,40

$\overline{T_{\text{d}}}$

- Berechnen Sie monatsweise die mittlere monatliche Globalstrahlung auf horizontale Flächen in Hamburg.
➤ Wie groß ist die mittlere jährliche Globalstrahlung auf horizontale Flächen in Hamburg?
➤ Lösung: (für horizontale Flächen)

	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
[kWh/(m ² ·d)]	0,52	1,13	2,23	3,55	4,67	5,44	4,82	4,34	2,79	1,49	0,67	0,40
[Tage/Monat]	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
[kWh/(m ² ·Monat)]	16,12	31,64	69,13	106,50	144,77	163,20	149,42	134,54	83,70	46,19	20,10	12,40
[kWh/(m ² ·a)]	977,71											

$$\Rightarrow 977,71 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$$

$\sum \text{Jan-Dec.}$

$$0,52 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} \cdot 31 \frac{\text{d}}{\text{Monat}} = 16,12 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{Monat}}$$

3 Grundlagen der Solarstrahlung

3 Grundlagen der Solarstrahlung

- 3.1 Fusionsreaktor Sonne
- 3.2 Solarstrahlung auf der Erde
- 3.3 Bestrahlungsstärke auf horizontalen Flächen
- 3.3 Bestrahlungsstärke auf geneigten Flächen**
- 3.4 Solarstrahlung und das „Harvesting“ der Sonnenenergie mit PV-Zellen / PV Module
- 3.5 Übersicht verschiedener PV Anlagensysteme

Sonnenposition und Einfallswinkel

Sonnenstand



- Für viele Berechnungen ist genaue Kenntnis des Sonnenverlaufs nötig:

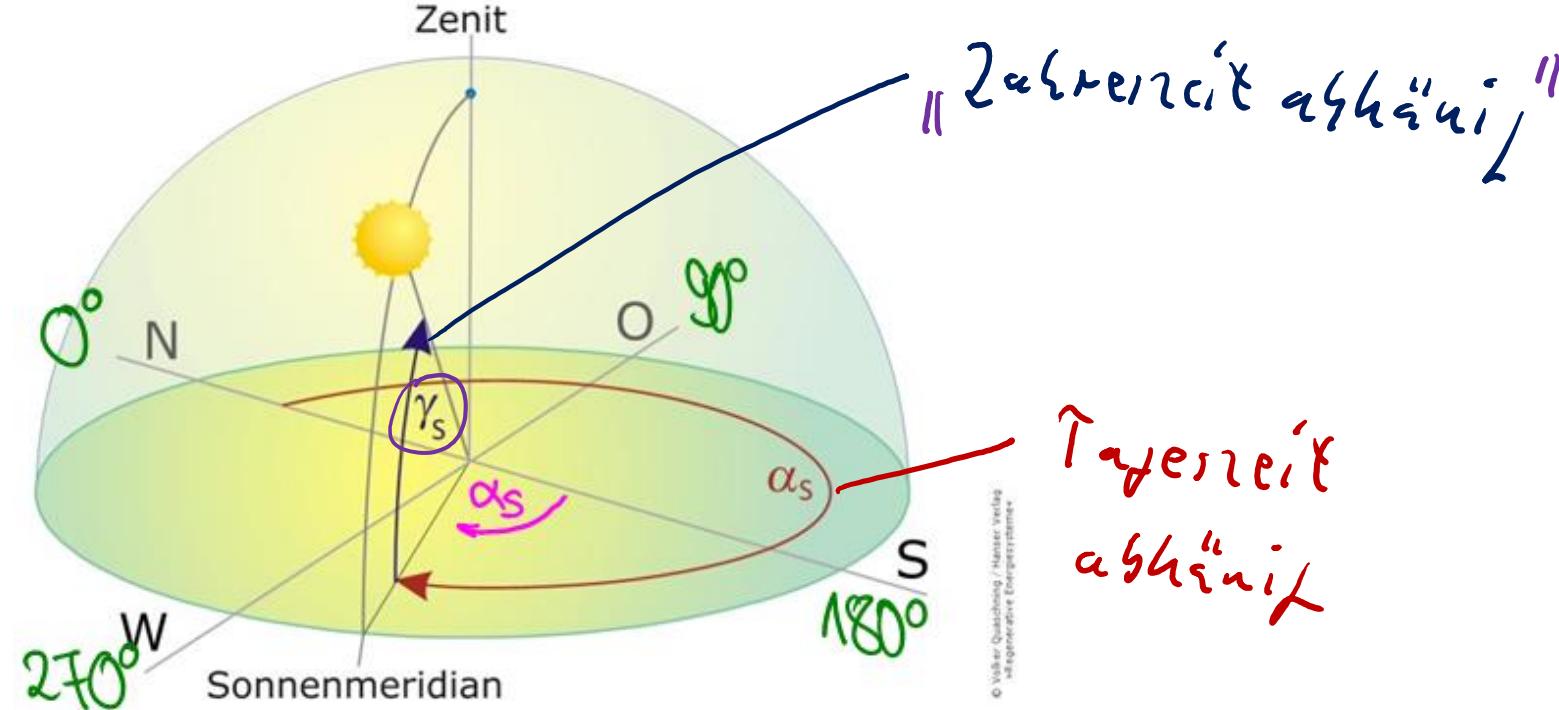
- Sonnenhöhe γ_s (Elevation): \rightarrow siehe Seite 9

➤ Winkel zw. Sonnenmittelpunkt und Horizont

- Sonnenazimut α_s :

➤ Winkel zw. Geographischer Nordrichtung und Vertikalkreis durch Sonnenmittelpunkt

- Winkelbezeichnungen
des Sonnenstandes:



- hängen vom Standort, Datum und Uhrzeit ab

Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

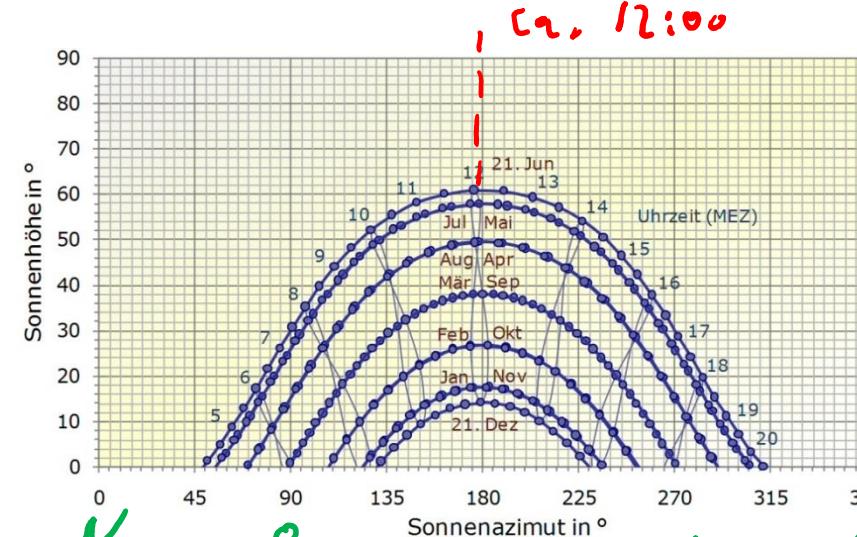
Sonnenbahndiagramme

Sonnenhöhen γ_s



- Sonnenhöhe und Sonnenazimut können auch aus sog. Sonnenbahndiagrammen abgelesen werden
- Berlin:

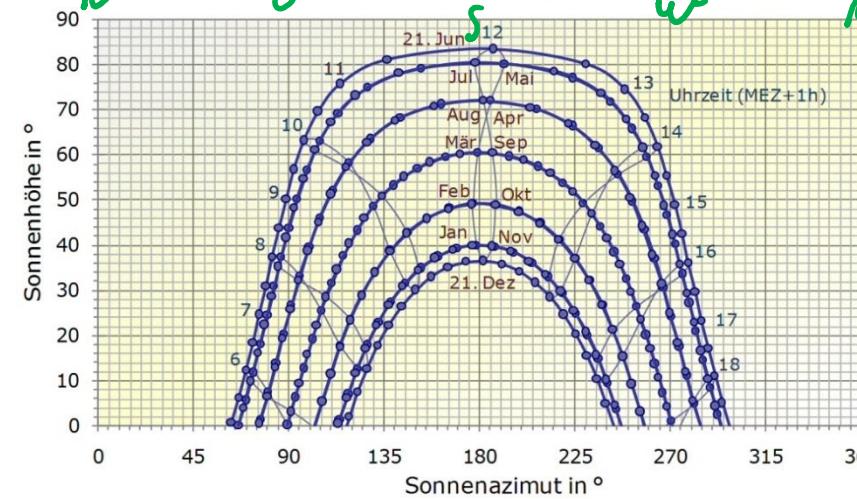
δ_S



Tagesverläufe

- Kairo:

δ_S



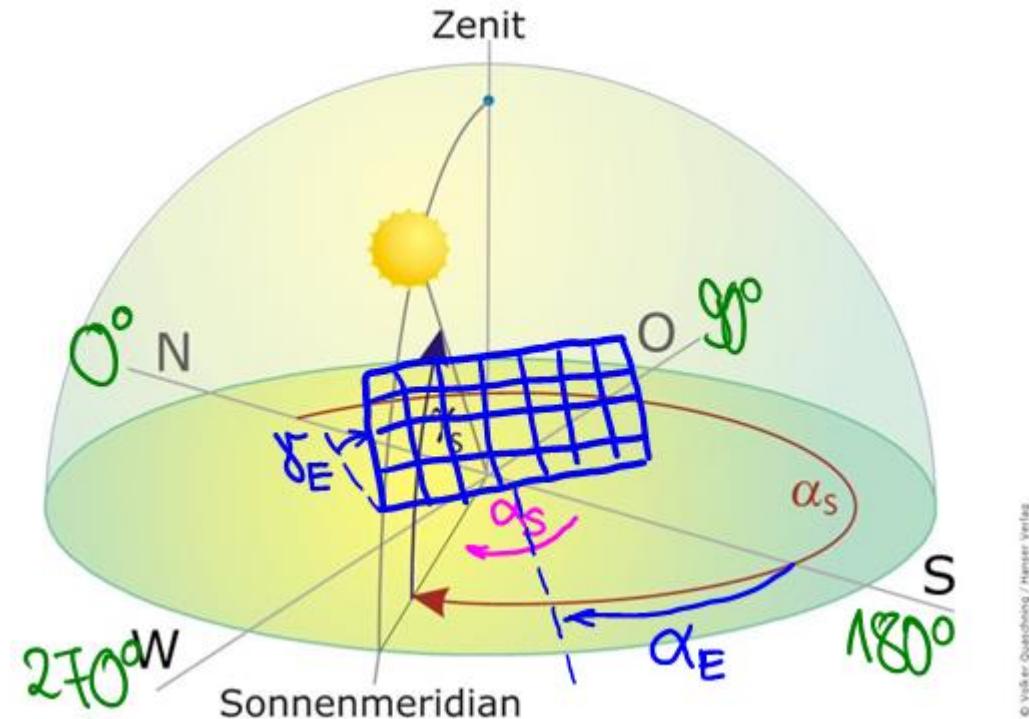
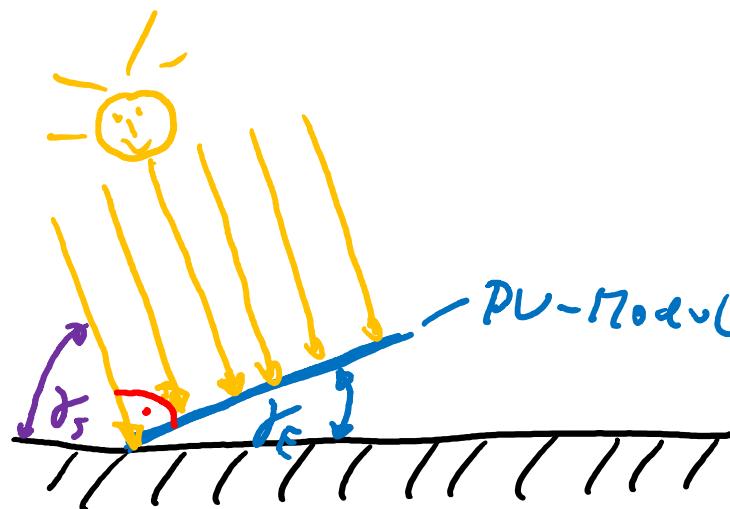
Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

Sonnenposition und Einfallswinkel

Bestrahlungsstärke auf geneigten Flächen

- Einführung zweier weiterer Winkel für geneigte Flächen
 - Neigungs- bzw. Höhenwinkel γ_E :
 - ... der geneigten Ebene / des PV-Generators
 - Azimutwinkel α_E :
 - ... der geneigten Ebene / des PV-Generators
 - Winkelbezeichnungen:

$$\gamma_E = 180^\circ - 90^\circ - \gamma_S \\ \approx 90^\circ - \gamma_S$$



Quelle: V. Quaschnig, Regenerative Energiesysteme, 2013

Bestrahlungsstärke auf geneigten Flächen

- Gesamte Globale Bestrahlungsstärke auf einer geneigten Fläche:

$$E_{G,gen} = E_{dir,gen} + E_{diff,gen} + E_{refl,gen}$$

- 1. Direkte Strahlung auf der geneigten Fläche $E_{dir,gen}$:

➤ Auf eine senkrecht zur Einfallsrichtung der Solarstrahlung geneigten Fläche

Strahlungsleistung

$$\Phi_{dir} = E_{dir,hor} \cdot A_{hor} = E_{dir,gen,\perp} \cdot A_{gen,\perp} = E_{dir,gen,\perp} \cdot A_{hor} \cdot \sin(\gamma_S)$$

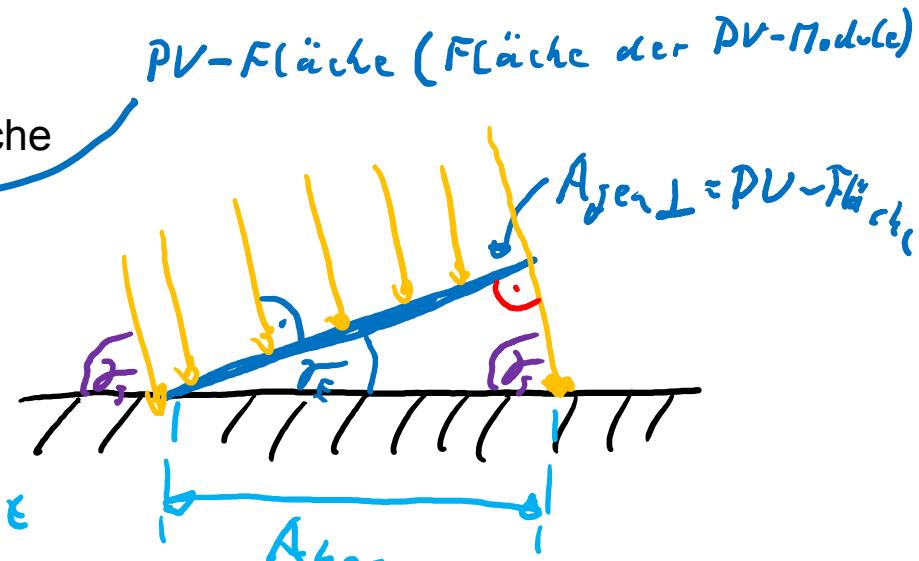
$$\Rightarrow E_{dir,gen,\perp} = \frac{E_{dir,hor}}{\sin(\gamma_S)} = \frac{E_{dir,hor}}{\cos(\gamma_E)} \geq E_{dir,hor}$$

Fläche die mindestens gebraucht wird

- 2. Diffuse Strahlung auf der geneigten Fläche $E_{diff,gen}$:

➤ lässt sich als grobe Abschätzung über vereinfachten, isotropen Ansatz aus $E_{diff,hor}$ bestimmten

$$E_{diff,gen} = E_{diff,hor} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos(\gamma_E))$$



Bestrahlungsstärke auf geneigten Flächen

■ 3. Reflektierte Strahlung auf der geneigten Fläche $E_{refl,gen}$:

- Infolge der Bodenreflexion der Umgebung
(isotroper (gleichverteilte Strahlungsdichte) Ansatz)

$$E_{refl,gen} = E_{G,hor} \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos(\gamma_E))$$

A: Albedowert

Beschreibe den Reflexionsfaktor

- Albedowerte für unterschiedliche Umgebungen:

Untergrund	Albedowert	Untergrund	Albedowert
Gras (Juli, August)	0,25	Asphalt	0,15
Rasen	0,18...0,23	Wälder	0,05...0,18
Trockenes Gras	0,28...0,32	Heide- und Sandflächen	0,10...0,25
Unbestellte Felder	0,26	Wasserfläche ($g_s > 45^\circ$)	0,05
Bloßer Boden	0,17	Wasserfläche ($g_s > 30^\circ$)	0,08
Schotter	0,18	Wasserfläche ($g_s > 20^\circ$)	0,12
Beton, sauber	0,30	Wasserfläche ($g_s > 10^\circ$)	0,22
Beton, verwittert	0,20	Frische Schneedecke	0,8...0,9
Zement, sauber	0,55	Alte Schneedecke	0,45...0,7

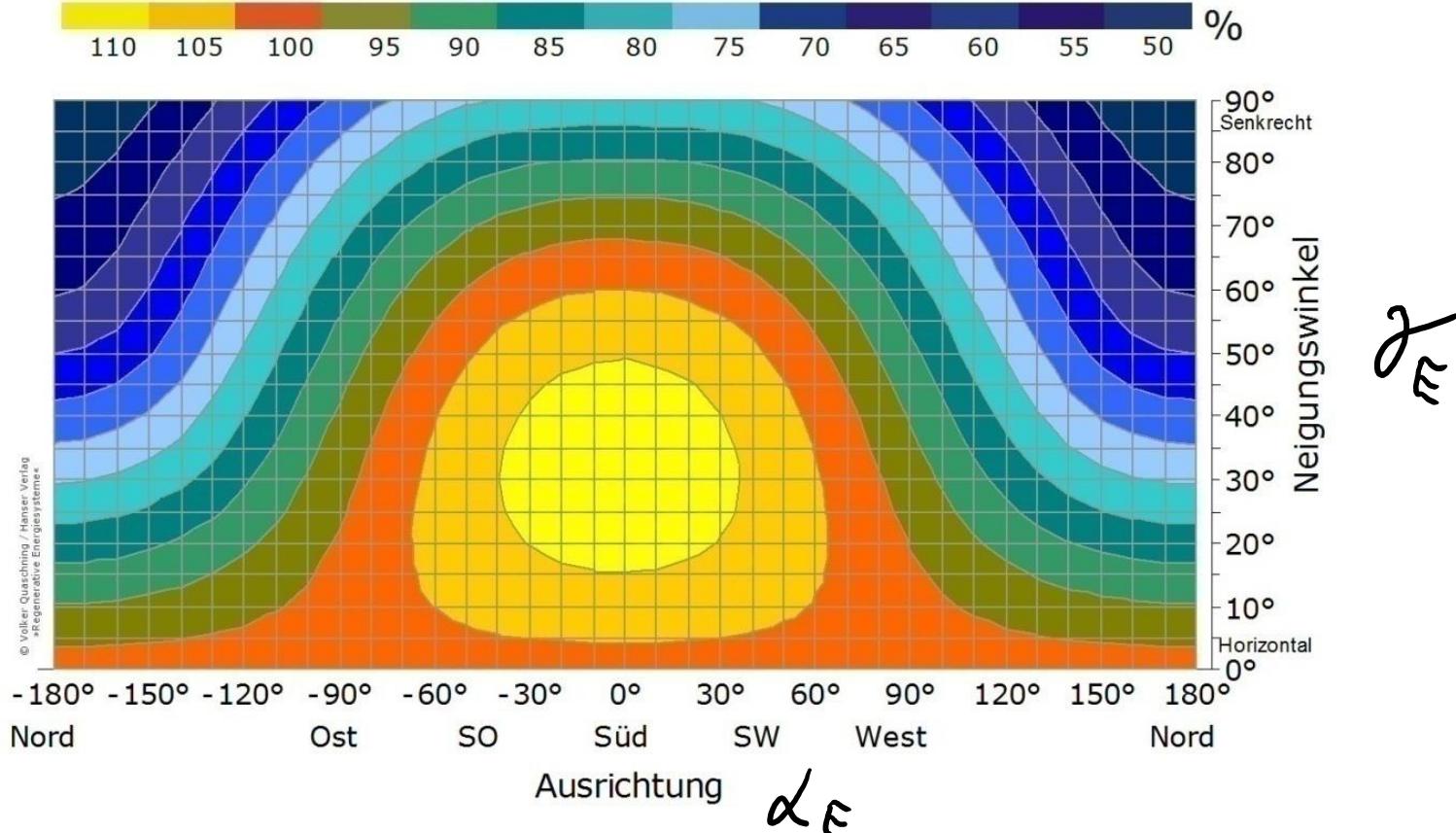
Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

Bestrahlungsstärke auf geneigten Flächen

Berücksichtigung in Simulationsprogrammen



- Berücksichtigung in den verschiedenen Simulationsprogrammen zur Ermittlung der standortspezifischen jährlichen Globalstrahlung:
 - Änderung der jährlichen Globalstrahlung in Berlin in Abhängigkeit von Ausrichtung und Neigung im Vergleich zur Horizontalen:



- Das Optimum liegt in Deutschland bei Südausrichtung und 30° Neigung

Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

Aufgabe:

Globalstrahlung auf geneigte Flächen

■ Aufgabe (siehe Aufgabensammlung: Aufgabe: 2-3):

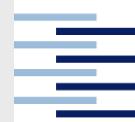
- Nachstehende Tabelle gibt Neigungskorrekturfaktoren für Deutschland für die Abweichung von der Horizontalen an:

Ausrichtung, Neigungswinkel	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Süd, 30°	1,44	1,40	1,17	1,08	1,00	0,96	0,97	1,03	1,17	1,30	1,47	1,42
Süd, 45°	1,57	1,50	1,19	1,05	0,94	0,90	0,91	1,00	1,18	1,37	1,61	1,55
Süd, 60°	1,63	1,54	1,15	0,98	0,85	0,81	0,83	0,92	1,14	1,38	1,68	1,61

- 1. Berechnen Sie unter Zugrundelegung der Daten und Ergebnisse aus der vorigen Aufgabe monatsweise die mittlere monatliche Globalstrahlung in Hamburg auf eine nach Süden ausgerichtete Fläche bei einem Neigungswinkel von 30° bzw. 60°.
- 2. Wie groß ist dann jeweils die mittlere jährliche Globalstrahlung?

Aufgabe:

Globalstrahlung auf geneigte Flächen



■ Aufgabe (siehe Aufgabensammlung: Aufgabe: 2-3):

- Nachstehende Tabelle gibt Neigungskorrekturfaktoren für Deutschland für die Abweichung von der Horizontalen an:

Ausrichtung, Neigungswinkel	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Süd, 30°	1,44	1,40	1,17	1,08	1,00	0,96	0,97	1,03	1,17	1,30	1,47	1,42
Süd, 45°	1,57	1,50	1,19	1,05	0,94	0,90	0,91	1,00	1,18	1,37	1,61	1,55
Süd, 60°	1,63	1,54	1,15	0,98	0,85	0,81	0,83	0,92	1,14	1,38	1,68	1,61

- 1. Berechnen Sie unter Zugrundelegung der Daten und Ergebnisse aus der vorigen Aufgabe monatsweise die mittlere monatliche Globalstrahlung in Hamburg auf eine nach Süden ausgerichtete Fläche bei einem Neigungswinkel von 30° bzw. 60°.
- 2. Wie groß ist dann jeweils die mittlere jährliche Globalstrahlung?
- Lösung:

$$\text{korrigierter Energiefaktor} = 1,44 \cdot 16,12 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{Monat}} = 23,21 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{Monat}}$$

Ausrichtung, Neigungswinkel	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Süd, 30°	1,44	1,40	1,17	1,08	1,00	0,96	0,97	1,03	1,17	1,30	1,47	1,42
Süd, 45°	1,57	1,50	1,19	1,05	0,94	0,90	0,91	1,00	1,18	1,37	1,61	1,55
Süd, 60°	1,63	1,54	1,15	0,98	0,85	0,81	0,83	0,92	1,14	1,38	1,68	1,61
[kWh/(m ² ·Monat)]	23,21	44,30	80,88	115,02	144,77	156,67	144,94	138,58	97,93	60,05	29,55	17,61
[kWh/(m ² ·a)]	1053,50											
Süd, 30°												
[kWh/(m ² ·Monat)]	26,28	48,73	79,50	104,37	123,05	132,19	124,02	123,78	95,42	63,74	33,77	19,96
Süd, 60°												
[kWh/(m ² ·a)]	974,80											
Süd, 60°												

$\Sigma I_{Jan - Dec.}$

Bestrahlungsstärke auf geneigte Flächen

Nachführung

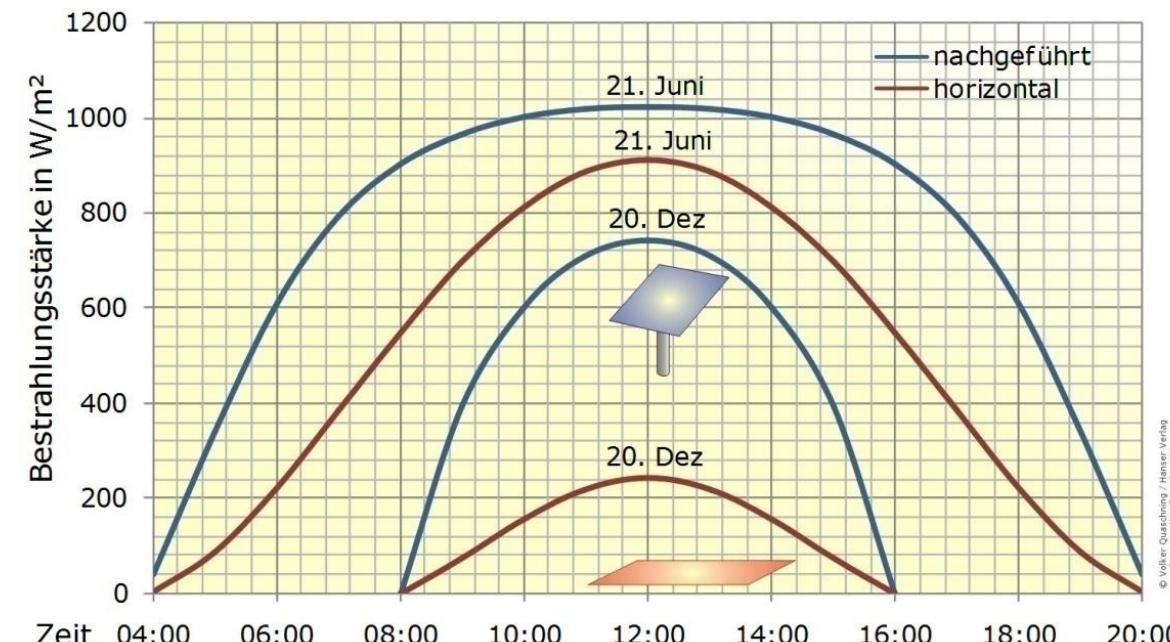
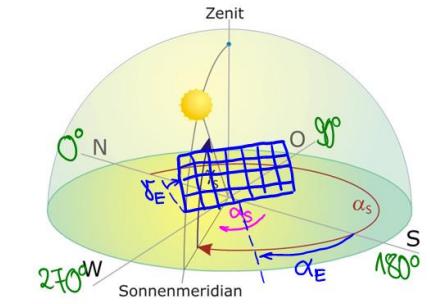


- Nachführung der Fläche der Sonne, so dass Solarstrahlung senkrecht auftrifft

➤ Steigerung des Energieertrags aufgrund höheren Anteils direkter Strahlung

- Unterschiede der globalen (gesamten) Bestrahlungsstärke auf der Horizontalen und der zweiachsig nachgeführten Fläche für wolkenlose Tage und 50° geographische Breite:

➤ Strahlungsgewinne im Sommer von ca. 50% und ca. 300% im Winter



Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

Bestrahlungsstärke auf geneigte Flächen

Nachführung – Tracker Systeme



Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015

Quelle: Wikipedia



Quelle: Danfoss Solar A/S

Bestrahlungsstärke auf geneigte Flächen

Abschattung



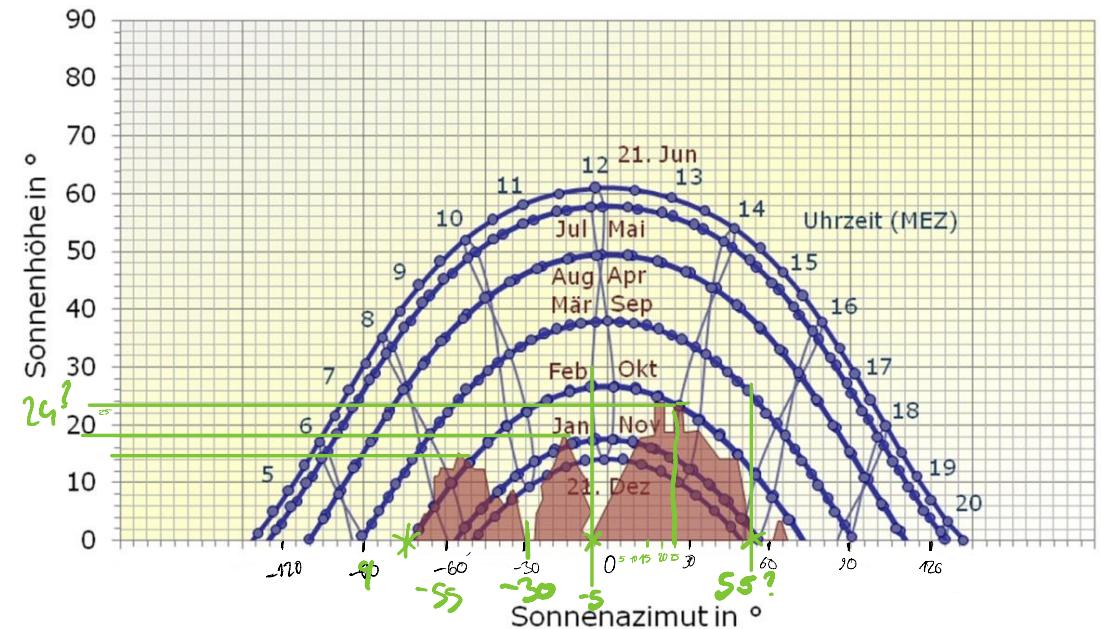
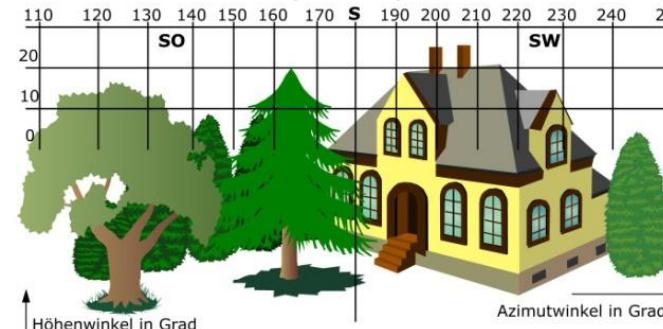
■ Arten der Abschattung:

- Temporäre Abschattung (z.B. Schnee, Laub,...)
- Gebäudebedingte Abschattung (z.B. Antennen,...)
- Eigenbedingte Abschattung (z.B. Aufständerung)
- Standortbedingte Abschattung
(z.B. Nachbargebäude, Bäume,...)

■ Abschattungsanalyse:

- Berechnung von Höhenwinkel und Azimut der Hindernisse
- Hier nur Ergebnis des Sonnenbahndiagramms:
- Ertragsminderung mit Simulationsprogrammen abschätzbar

Bsp.: Berlin mit beispielhafter Umgebungssilhouette



Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

3 Grundlagen der Solarstrahlung

3 Grundlagen der Solarstrahlung

3.1 Fusionsreaktor Sonne

3.2 Solarstrahlung auf der Erde

3.3 Bestrahlungsstärke auf horizontalen Flächen

3.3 Bestrahlungsstärke auf geneigten Flächen

3.4 Solarstrahlung und das „Harvesting“ der Sonnenenergie mit PV-Zellen / PV Module

3.5 Übersicht verschiedener PV Anlagensysteme

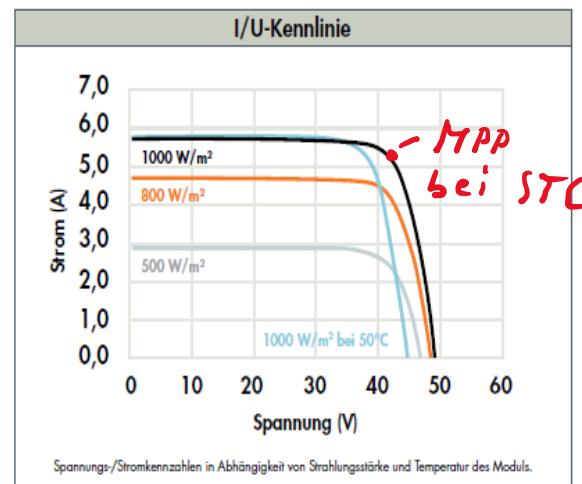
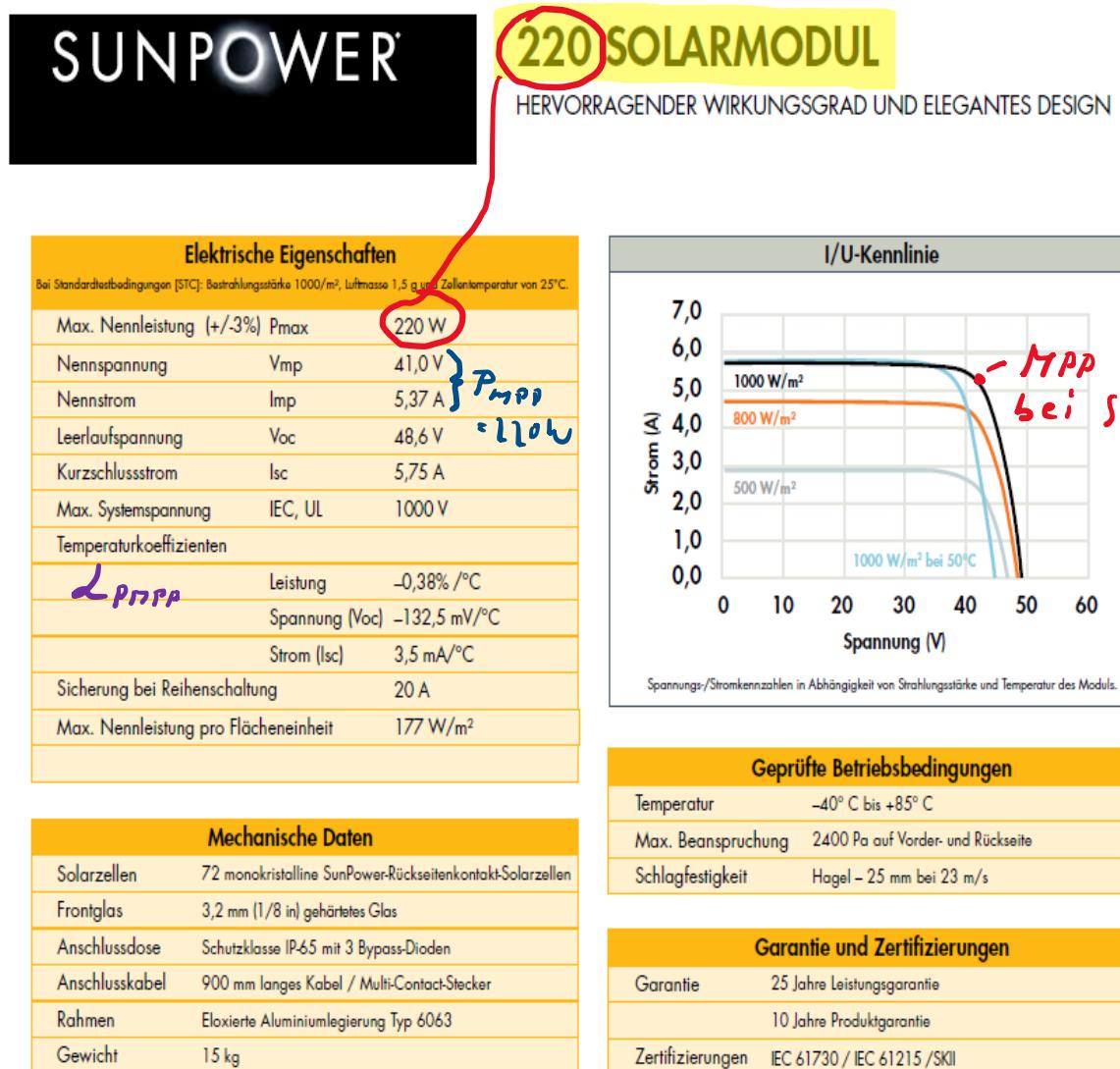
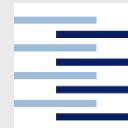
Solarstrahlung und PV-Zellen / PV Module



Quelle: Danfoss Solar A/S

Temperaturverhalten von PV-Modulen

Beispiel: Sunpower 220Vp



Die Leistung von PV Modulen sind von der Temperatur abhängig:

$$P_{MPP}(v_i) = P_{MPP}(\vartheta_1) \cdot (1 + \alpha_{P_{MPP}} \cdot (v_i - v_1))$$

Temperaturkorrekturfaktor
 F_ϑ

Beispiel: Leistung eines Sunpower Moduls im MPP bei $\vartheta_2 = -10^\circ\text{C}$

$$P_{MPP}(-10^\circ\text{C}) = P_{MPP}(25^\circ\text{C}) \cdot (1 + (-0,0038) \cdot (-10^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}))$$

$$= 220 \text{ W} \cdot 1,133$$

$$= 249 \text{ W}$$

d.h. mehr Leistung bei niedriger Temp.

Aufgabe:

Energieertrag eines PV-Generators

■ Aufgabe (siehe Aufgabensammlung: Aufgabe: 2-4):

- Berechnen Sie unter Zugrundelegung der Daten und Ergebnisse aus den Aufgaben 2-2 und 2-3 den Energieertrag eines 1 kWp PV-Generators in Hamburg:

1. Bei horizontaler Montage und gleichbleibender Zellbetriebstemperatur $\vartheta = 25^\circ\text{C}$
2. Bei Montage in Südausrichtung unter einem Neigungswinkel von 30° und gleichbleibender Zellbetriebstemperatur $\vartheta = 25^\circ\text{C}$
3. Bei einer Ausrichtung nach Frage 2, einer mittleren monatlichen Zellbetriebstemperatur gemäß nachstehender Tabelle und einem Temperaturkoeffizienten der MPP-Leistung $\alpha_{\text{PMPP}} = 0,4\%/\text{ }^\circ\text{C}$

Zelltemperatur	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
[°C]	20	23	38	48	55	58	60	60	53	30	25	20

4. Wie groß ist für Teilaufgabe 3 die jährliche Einsparung an CO₂-Emissionen gegenüber einer Bereitstellung der elektrischen Energie durch ein Steinkohlekraftwerk mit einem Wirkungsgrad $\eta = 40\%$?

Aufgabe:

Energieertrag eines PV-Generators



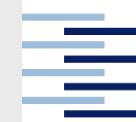
■ Aufgabe (siehe Aufgabensammlung: Aufgabe: 2-4):

- Berechnen Sie unter Zugrundelegung der Daten und Ergebnisse aus den Aufgaben 2-2 und 2-3 den Energieertrag eines 1 kWp PV-Generators in Hamburg:
 1. Bei horizontaler Montage und gleichbleibender Zellbetriebstemperatur $\vartheta = 25^\circ\text{C}$
- Lösung zu 2-4.1:
 - Bemerkung: Hier sind nicht Fläche A_{PV} und Wirkungsgrad η_{PV} des PV-Generators gegeben, sondern seine (den Anwender interessierende) MPP-Leistung. 1kWp PV Generator? Das heißt, dass der PV Generator bei STC (Bestrahlungsstärke 1kW/m²) im MPP ein 1kW leistet!
 - Das heißt nach 1h hat der PV Generator die Energie von 1kWh „geerntet“
 - Die Fläche ist hier wie schon erwähnt, nicht relevant, da in der Aufgabe die Leistung der gesamten/aller PV Module gegeben ist. Das könnten z.B. 3 Sunpower Module - SPR-P19-335-BLK sein. Bei STC hätten diese 3x335W = 1005W. Der hohe Wirkungsgrad von knapp 20% bedeutet eine Fläche A von nur 3x998mmx1690mm = 5059860mm² – also ca. 5m². Weniger effiziente Module bräuchten mehr Fläche... Die Fläche ist aber nicht gefragt/relevant.
 - Aus Aufgabe 2-2 ist bekannt, dass im Mai die mittlere tägliche Globaleinstrahlung 4,67kWh/m² beträgt – siehe Aufgabe 2-2. Die beispielhaften 3 Sunpower (1kW) Module erzeugen in 1h 1kWh, in 2h 2kWh und in 4,67h 4,67kWh. Natürlich scheint die Sonne im Mai länger als nur 4,67h aber nicht immer mit konstant 1kW/m² (STC). Für ein Tag gemittelt sind es im Mai 4,67kWh/m² (Globaleinstrahlung). Diese Energie wird von den 3 Modulen (1kW bei STC) an einem Tag komplett eingefangen – allerdings auf 5m². Hätte man nur ein 335W Modul wären es nur 335W x 4,67h – also 1,56kWh. Bei 2 Modulen 3,12kWh und bei 3 Modulen 4,67kWh pro einem Tag im Mai.

Im Mai: $E_{\text{Erdl}} = 4,67 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$; Für das komplette Jahr: $E_{\text{Erdl}} = 978$

Aufgabe:

Energieertrag eines PV-Generators



■ Aufgabe (siehe Aufgabensammlung: Aufgabe: 2-4):

- Berechnen Sie unter Zugrundelegung der Daten und Ergebnisse aus den Aufgaben 2-2 und 2-3 den Energieertrag eines 1 kWp PV-Generators in Hamburg:

- Bei Montage in Südausrichtung unter einem Neigungswinkel von 30° und gleichbleibender Zellbetriebstemperatur $\vartheta = 25^\circ\text{C}$ *Siehe Berechnung auf Seite 27*

- Lösung zu 2-4.2: *Für das komplette Jahr und einen Neigungswinkel von 30° :*

$$E_{\text{real}} = 1035 \frac{1 \cdot \text{kWh}}{\text{a}} = 1035 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} = E_{\text{real}} = E_{\text{sys}}$$

- Bei einer Ausrichtung nach Aufgabe 2-2, einer mittleren monatlichen Zellbetriebstemperatur gemäß nachstehender Tabelle und einem Temperaturkoeffizienten der MPP-Leistung $\alpha_{\text{PMPP}} = -0,4\%/\text{°C}$

- Lösung zu 2-4.3: *Siehe die vorherige Berechnungen für F_{real} (Temperaturkorrekturfaktor)*

Seite 32

Zelltemperatur [°C]	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
20	23	38	48	55	58	60	60	53	30	25	20	20
F_{Teta}	1,02	1,01	0,95	0,91	0,88	0,87	0,86	0,86	0,89	0,98	1,00	1,02
$E_{\text{real}, \text{Süd}, 30^\circ}$ [kWh/Monat]	23,68	44,65	76,68	104,44	127,40	135,99	124,65	119,18	86,96	58,85	29,55	17,96
$E_{\text{real}, \text{Süd}, 30^\circ}$ [kWh/a]	949,97											

$$23,21 \frac{\text{kWh}}{\text{Jan.}} \cdot 1,02 = 23,68 \frac{\text{kWh}}{\text{Januar}}$$

Aufgabe:

Energieertrag eines PV-Generators



■ Aufgabe (siehe Aufgabensammlung: Aufgabe: 2-4):

- Berechnen Sie unter Zugrundelegung der Daten und Ergebnisse aus den Aufgaben 2-2 und 2-3 den Energieertrag eines 1 kWp PV-Generators in Hamburg:

2. Bei Montage in Südausrichtung unter einem Neigungswinkel von 30° und gleichbleibender Zellbetriebstemperatur $\vartheta = 25^\circ\text{C}$

- Lösung zu 2-4.2:

Siehe Berechnung auf Seite 27:

Für das Complette Jahr und einen Neigungswinkel von 30° :

$$E_{real} = 1035 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 1440 = 1035 \frac{1440}{a} = E_{real} = E_{STC}$$

3. Bei einer Ausrichtung nach Aufgabe 2-2, einer mittleren monatlichen Zellbetriebstemperatur gemäß nachstehender Tabelle und einem Temperaturkoeffizienten der MPP-Leistung $\alpha_{PMPP} = -0,4\%/\text{°C}$

- Lösung zu 2-4.3: Siehe die vorherigen Berechnungen für F_T (Temperaturkorrekturfaktor)

→ siehe
Seite 32

Zelltemperatur [°C]	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
20	23	38	48	55	58	60	60	53	30	25	20	
F_T	1,02	1,01	0,95	0,91	0,88	0,87	0,86	0,86	0,89	0,98	1,00	1,02
$E_{real, \text{Süd}, 30^\circ}$ [kWh/Monat]	23,68	44,65	76,68	104,44	127,40	135,99	124,65	119,18	86,96	58,85	29,55	17,96
$E_{real, \text{Süd}, 30^\circ}$ [kWh/a]	949,97											

$$\rightarrow 23,21 \frac{\text{kWh}}{\text{Monat}} \cdot 1,02 = 23,68 \frac{\text{kWh}}{\text{Monat}}$$

Siehe Seite 27

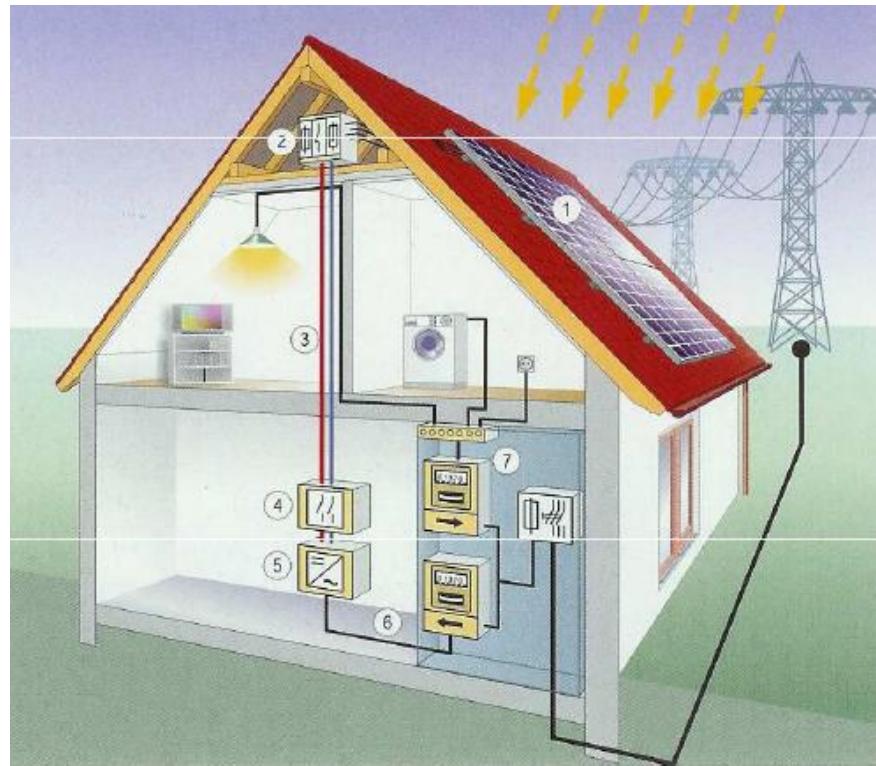
3 Grundlagen der Solarstrahlung

3 Grundlagen der Solarstrahlung

- 3.1 Fusionsreaktor Sonne
- 3.2 Solarstrahlung auf der Erde
- 3.3 Bestrahlungsstärke auf horizontalen Flächen
- 3.3 Bestrahlungsstärke auf geneigten Flächen
- 3.4 Solarstrahlung und das „Harvesting“ der Sonnenenergie mit PV-Zellen / PV Module
- 3.5 Übersicht verschiedener PV Anlagensysteme**

- Unterscheidung nach Anschluss an das öffentliche Stromnetz:

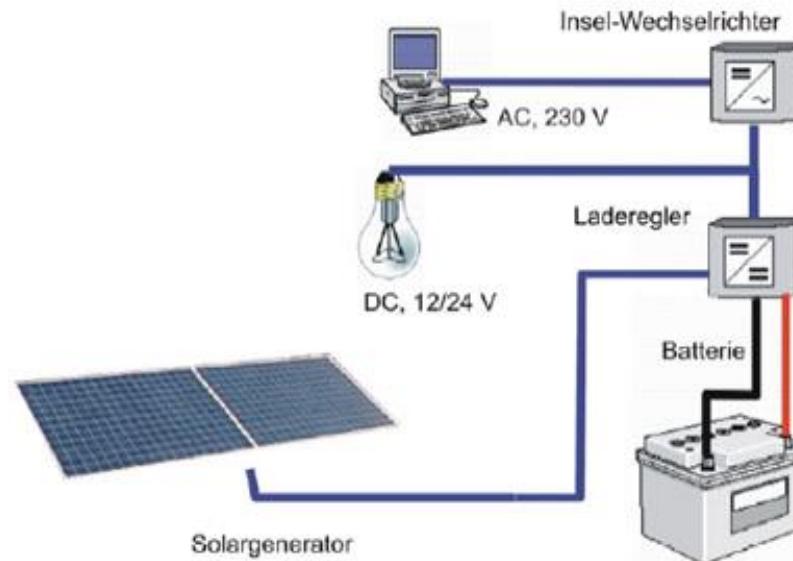
Prinzip einer netzgekoppelten PV-Anlage



→ Energiespeicher ist nicht erforderlich, manchmal aber vorhanden

- (1) PV-Generator, (2) Generatoranschlusskasten, (3) Gleichstromverkabelung,
(4) DC-Hauptschalter, (5) Wechselrichter, (6) Wechselstromverkabelung,
(7) Zählerschrank mit Eigenverbrauchs-, Bezugs- und Einspeisezähler

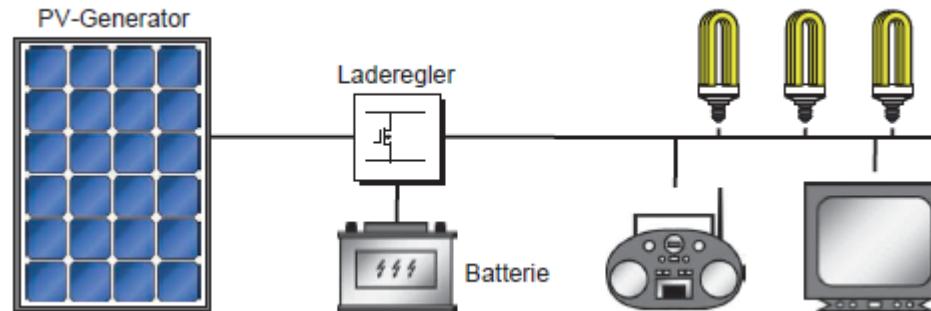
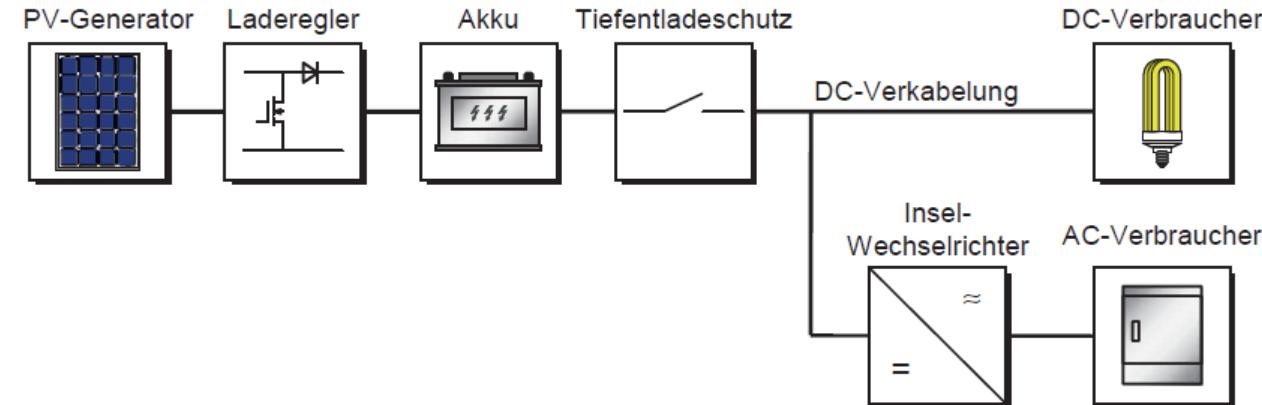
Prinzip eines PV-Inselsystems



→ Inselsysteme benötigen einen Energiespeicher

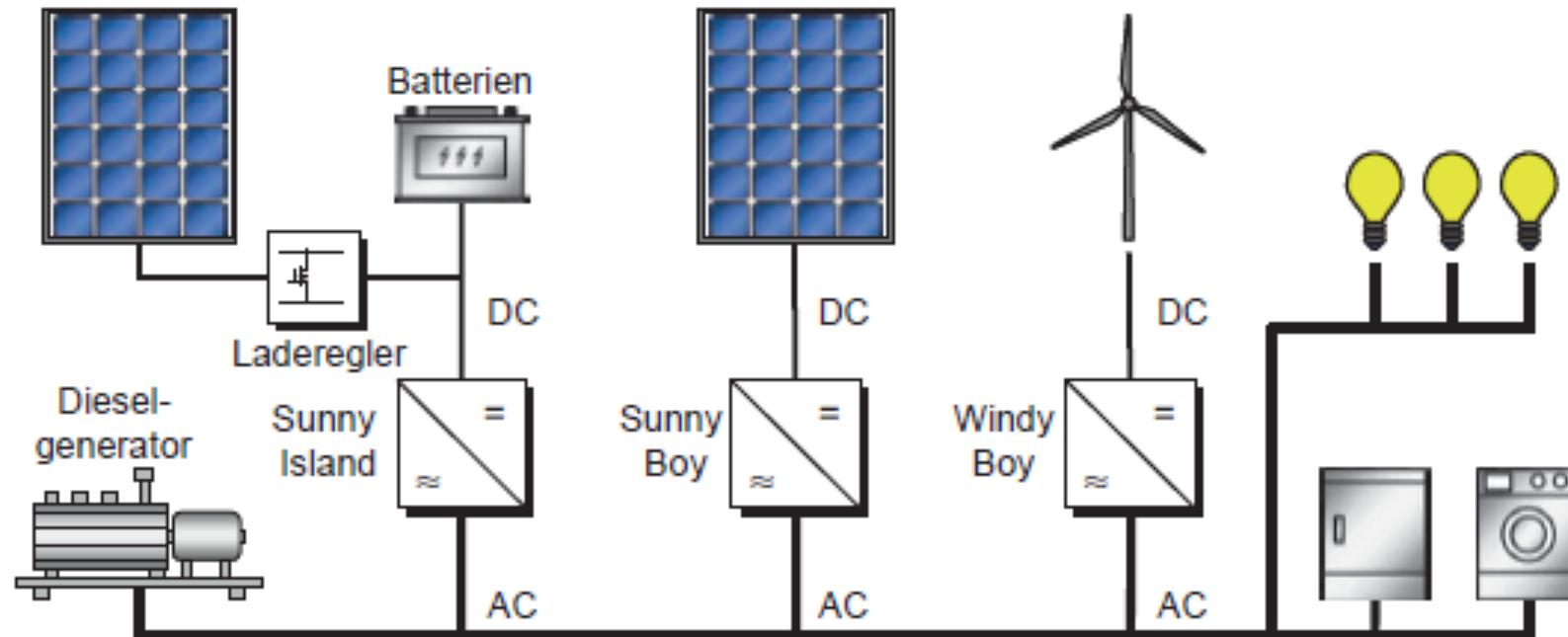
Quelle: Photovoltaische Anlagen, DGS Berlin, 2008, www.dgs.de, www.pvn.at

Prinzip eines PV-Inselsystems



Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015

Prinzip eines Hybridsystems (Bsp. Fa. SMA)



Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015