



RES-SKILL

**Umschulung von Beschäftigten der
Kohleindustrie für den Sektor der
erneuerbaren Energien**

O3-T2: RES-SKILL
Lerneinheit 1
PV-System-Installateur
Anmerkungen des
Dozenten

May 2022



Projekt-Akronym: RES-SKILL

Projektname: Umschulung von Beschäftigten der Kohleindustrie für den Sektor der erneuerbaren Energien

Projekt-Code: 2020-1-EL01-KA202-079114

Dokument Geschichte

Version	Date	Changes	Type of change	Delivered by
1.0	05.01.2022	Initial Document		RENAC
1.1	07.07.2022	Initial Document	DE Translation	RENAC

Informationen zum Dokument	O3: RES-SKILL Lerneinheiten
Name der Dokumenten-ID:	Bericht, der sich an Berufsbildungsanbieter und Arbeitgeber des EE-Sektors richtet und die Grundlagen für einen aktuellen Kurs über EE-relevante Fähigkeiten für Kohlearbeiter legt.
Titel des Dokuments:	RES-SKILL Lerneinheiten
Art der Ausgabe:	Intellektueller Output 3
Datum der Lieferung:	05.05.2022
Art der Tätigkeit:	
Leiter der Aktivität:	RENAC
Verbreitungsgrad:	Vertraulich

Haftungsausschluss

Die Unterstützung der Europäischen Kommission für die Erstellung dieser Veröffentlichung stellt keine Billigung des Inhalts dar, der ausschließlich die Meinung der Autoren wiedergibt, und die Kommission kann nicht für die Verwendung der darin enthaltenen Informationen verantwortlich gemacht werden.

Dieses Dokument ist Eigentum des RES-SKILL Konsortiums. Projektmaterial, das im Rahmen der Projektmanagement- und Implementierungsaktivitäten entwickelt wurde, darf ohne vorherige schriftliche Zustimmung des RES-SKILL-Konsortiums in keiner Form und mit keinen Mitteln kopiert oder verbreitet werden.



Inhalt

Inhalt	iii
Abkürzungen	v
Liste der Tabellen	Error! Bookmark not defined.
Verzeichnis der Abbildungen	vi
Einführung	1
Über dieses Dokument	1
Zielsetzung	1
Gesundheit und Sicherheit	1
Kurs 1.1 Grundlagen der Solarenergie und PV-Systeme	2
Einführung in die Solarenergie	2
Grundlagen der Photovoltaiktechnologie und Systemkomponenten	8
Kurs 1.2 Planung von Photovoltaikanlagen und Standortbestimmung	17
Photovoltaik-Systemkategorien / Anwendung	17
Energiefluss und Messoptionen	20
Hauptkomponenten von netzgekoppelten PV-Anlagen	21
Bewertung der Solarressourcen und Standortbestimmung	31
Planung und Dimensionierung von netzgekoppelten PV-Anlagen	33
Konstruktion und Ertragssimulation mit Standardsoftware	42
Kurs 1.3 Installation der baulichen und mechanischen Komponenten der PV-Anlage	43
Einführung	43
Vorbereitung/Planung	43
Wer darf eine PV-Anlage installieren?	43
Einbauanleitung	44
Werkzeuge, Instrumente, sonstige Ausrüstung	44
Überprüfung des gesamten Bau- und Installationsprozesses	44
PV-spezifische Gesundheit und Sicherheit am Arbeitsplatz	48
Referenzen	49
Anhang 1: Einige Beispiele für derzeit auf dem Markt befindliche PV-Module.	50
Anhang 2: Weiterführende Literatur und Informationen	52
Anhang 3: Netzgekoppelte / netzunabhängige Wechselrichter	53
Netzgekoppelte Wechselrichter	53



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



Netzunabhängige Wechselrichter	54
Anhang 4: Beispiel für ein Umrichterdatenblatt	55



Abkürzungen

HVAC	Heizung, Lüftung und Klimatisierung
RES	Erneuerbare Energiequellen
VET	Berufliche Bildung
MW	Megawatt
GW	Gigawatt
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
EU	Europäische Union
PV	Fotovoltaik
EQR	Europäischer Qualifikationsrahmen
SCC	Sicherheits Zertifikat Contractoren (Sicherheit, Gesundheit und Umwelt), in den Niederlanden auch als VCA bekannt
ECVET	Europäisches Leistungspunktesystem für die Berufsbildung (European Credit System for Vocational Education and Training)
OHS	Gesundheit und Sicherheit am Arbeitsplatz



Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Menge der verfügbaren Solarenergie im Vergleich zu Kohle, fossilen und nuklearen Brennstoffen und unserem weltweiten Energieverbrauch.....	2
Abbildung 2: Karte mit der globalen Solarressource in kWh/m ² , die an verschiedenen Standorten verfügbar ist	3
Abbildung 3: Die verschiedenen Komponenten der globalen Sonnenstrahlung.	4
Abbildung 4: Position der Sonne im Jahresverlauf auf der Nordhalbkugel (links) und am Äquator (rechts).....	5
Abbildung 5: Zenit und Azimut. Der Zenitwinkel ist der Winkel zwischen der lokalen Vertikalen und der Linie, die den Beobachter mit der Sonne verbindet. Der Sonnenazimut ist die Abweichung der Sonnenposition in Bezug auf den Süden. Der Azimut eines PV-Moduls in Bezug auf den Süden ist definiert als (α) und die Neigung ist definiert als (β).	6
Abbildung 6: Karten der Sonneneinstrahlung mit Angaben zu den Breitengraden. Man beachte den Unterschied zwischen Juni (links) und Dezember (rechts). Daten über die Sonneneinstrahlung werden mit einer Vielzahl von Instrumenten erfasst. Der Klassiker ist das Pyrometer, das eine hohe Genauigkeit von $\pm 0,8 \%$ aufweist. Quelle: National Renewable Energy Laboratory, USA.....	7
Abbildung 7(links) Photovoltaik - Sonnenlicht wird in Strom umgewandelt (Gleichstrom), (rechts) Solarthermie - Sonnenenergie erzeugt Wärme, z. B. Warmwasser.	8
Abbildung 8: PV und Solarthermie auf einem Dach, Deutschland. Netzgekoppelte PV-Anlage für Wohngebäude (großes Feld); einzelner thermischer Solarkollektor unter dem PV-Feld..	8
Abbildung 9: Solarzelle unter Lichteinwirkung.	9
Abbildung 10: Funktionsprinzip der Silizium-PV-Zelle.....	9
Abbildung 11: Monokristalline (links) und polykristalline (rechts) Solarzellen.	10
Abbildung 12: Dünnschichtmodule.	11
Abbildung 13 (Links) Ein PV-Modul besteht aus Solarzellen. (Rechts) Typischer Aufbau eines kristallinen Silizium-PV-Moduls.....	12
Abbildung 14: Etiketten auf der Rückseite von zwei PV-Modulen mit den wichtigsten elektrischen Eigenschaften.....	13
Abbildung 15: PV-Anlagen bestehen aus mehreren PV-Modulen, die wiederum aus mehreren PV-Zellen zusammengesetzt sind.	13
Abbildung 16: Übersicht über netzunabhängige (links) und netzgekoppelte (rechts) PV-Systeme.	17
Abbildung 17: Typische PV-Anlage für Wohngebäude.	18
Abbildung 18: Solarpark in Deutschland.....	18
Abbildung 19: Typische netzunabhängige PV-Anlage.	19



Abbildung 20: Ein kleines Solarhaussystem (links), ein großes netzunabhängiges PV-System in einer Schule in Ecuador (Mitte) und eine netzunabhängige Solarparkuhr in Italien (rechts).	19
Abbildung 21: Aufbau eines Mikro-/Mini-Netzes.	20
Abbildung 22: Beispiele für Energieverluste in einer netzgekoppelten PV-Anlage (nur die wichtigsten Verlustfaktoren sind dargestellt).	20
Abbildung 23: Konfiguration der Einspeisevergütung (FiT) (links) und Konfiguration der Netzeinspeisung (rechts). Andere Konfigurationen sind möglich.	21
Abbildung 24: Wechselrichter in einem Solarpark, Deutschland. Jeder Wechselrichter hat eine Nennleistung von 3.000 W und versorgt jeweils eines der im Hintergrund sichtbaren Arrays.	23
Abbildung 25: Einphasiger Wechselrichter (oben links), 3-phasiger Wechselrichter (unten links). 3 einphasige Wechselrichter, die in 3 Phasen einspeisen (Mitte). Drei 3-Phasen-Wechselrichter, die jeweils in 3 Phasen einspeisen (rechts).	24
Abbildung 26: Verschiedene Wechselrichterkonfigurationen: Zentralwechselrichter (Multistring), Stringwechselrichter und Modulwechselrichter.	25
Abbildung 27: Drei 1.000 W SMA String-Wechselrichter auf dem Dach der RENAC in Berlin, Deutschland (links) . SMA Sunny Central CP-Wechselrichter und SMA Transformer Compact Station, Deutschland (rechts) (Quelle: SMA Solar Technology AG).	25
Abbildung 28: Gleichstromkabel in netzgekoppelten PV-Anlagen.	26
Abbildung 29: Der DC-Hauptschalter/Isolator ist zwischen dem PV-Generator und dem Wechselrichter installiert.	27
Abbildung 30: Schematische Darstellung eines PV-Generator-Anschluss-/Kombinationskastens (links). Innenansicht eines PV-Generatoranschlusskastens (rechts).	28
Abbildung 31: Zählerkonfiguration - (links) einphasige Versorgung, (rechts) einphasige Konfiguration.	29
Abbildung 32: - Zählerkonfiguration - (links) einphasige Konfiguration, (rechts) dreiphasige Versorgung.	29
Abbildung 33: Äußerer und innerer Blitzschutz. Äußerer Blitzschutz (links) - Blitzableiter auf dem Dach, Berlin, Deutschland. Innerer Blitzschutz/Überspannungsschutz (rechts) - Überspannungsschutz Typ 2 (rotes Gerät in der Mitte des Bildes) von www.dehn.de in der PV-Anschluss-/Verbindungsdose.	30
Abbildung 34: Handgehaltener Solarstromzähler.	31
Abbildung 35: Verschattungsanalyse eines Flachdachs in einer Stadt. Der Solar Pathfinder wird für den Einsatz auf einem Flachdach eingerichtet.	33
Abbildung 36: Diagramm, das zeigt, wo PV-Anlagen auf einem Flachdach angebracht werden können.	34
Abbildung 37: Beschattung und Anordnung der PV-Module.	35



Abbildung 38: Bodenfreiheit.	35
Abbildung 39: Anordnung der Schmetterlingsverkabelung im Rack/Tisch.	36
Abbildung 40a) Montagesystem für Schrägdach zu Schulungszwecken bei der RENAC, b) Flachdach-Montagekonstruktion auf Geschäftshaus Deutschland, c) Bodenmontagekonstruktion, verzinkter Stahl, Vorder- und d) Rückansicht, e) PV-Fassade auf dem CIS-Gebäude, Manchester, Großbritannien (Quelle: BSW-Solar/Sharp und BWS-Solar/ Langrock.) f) Glas-auf-Glas-PV-Module, integriert in das Glasdach des Hauptbahnhofs in Berlin, Deutschland) Nachgeführte Montage auf einem Solarpark, Wechselrichter auf der Rückseite, Deutschland.	46
Abbildung 41: Art der Fundamente für die Montagestruktur (Quelle: Installation, Operation & Maintenance of Solar PV Microgrid Systems, GSES India Sustainable Energy Pvt. Ltd. for Clean Energy Access Network (CLEAN), 2015)	47
Abbildung 42: Tragen eines Moduls mit einer Saugnapfvorrichtung (links). Quelle: BWS- Solar, Installation von Modulen auf einem Dach in Wales, UK (Mitte). Beachten Sie den Sicherheitsgurt, den der Installateur trägt. Quelle: Frank Jackson. Installation von Modulen auf einem Dach in Freiberg, Deutschland (links). Beachten Sie die Sicherheitsnetze. Quelle: BSW-Solar/ Upmann.	48
Abbildung 43: Monokristalline Siliziummodule mit 72 Zellen (links) und polykristalline Siliziummodule mit 60 Zellen (rechts).	50
Abbildung 44: Monokristallines 36-Zellen-Silizium (links), mikromorphes 115-Wp-Silizium (a- Si/ μ c-Si) (rechts).	50
Abbildung 45: Cadmiumtellurid (CdTe)-Dünnschichtmodule. Quelle: BSW-Solar/Upmann. ...	50
Abbildung 46: 130 Wp Silizium-Dünnschicht-Multifunktionszellen (links), 80 Wp monokristallines Silizium mit Rückkontakt (Mitte), 20 Wp monokristallines Silizium mit 36 Halbzellen (rechts).	51
Abbildung 47: Wechselrichter von Fronius International (links) und SMA Solar Technology AG (rechts).	53
Abbildung 48: Datenblatt des Wechselrichters.	55

Einführung

Über dieses Dokument

Dieses Dokument soll einen umfassenden Überblick über die Photovoltaik (PV)-Technologie geben. Es ist in 3 Kurse (Kapitel) unterteilt, die sind:

- Grundlagen der Solarenergie und PV-Systeme
- Entwurf einer PV-Anlage und Standortbestimmung
- Installation der baulichen und mechanischen Komponenten der PV-Anlage

Die Lerneinheit ist Teil des Pakets für die Umschulung von Kohlearbeitern für Jobs in der PV-Industrie.

In Anbetracht der festgestellten Qualifikationslücken zwischen Kohlearbeitern und Arbeitern in der PV-Branche werden alle wesentlichen Themen zur Schließung von Wissenslücken behandelt, jedoch nicht erschöpfend, da dies in einem Text dieses Umfangs nicht möglich ist. Außerdem ist es wichtig zu beachten, dass die hier gegebenen Informationen kritisch zu interpretieren sind. Während die meisten Informationen für Ihren Standort/Ihre Situation relevant sein werden, treffen einige möglicherweise nicht oder nur teilweise zu.

Quellen für weitere Informationen zu allen Themen wurden angegeben - in Form einiger Bücher zum Thema, nationaler elektrischer Vorschriften und nationaler Leitfäden für Installation und gute Praxis.

Zielsetzung

Die Lerneinheit 1, die sich an Installateure von PV-Anlagen richtet, zielt darauf ab, ihnen die Grundlagen der PV-Technologie zu vermitteln. Nach der Schulung sollten sie in der Lage sein:

- erklären, wie die Sonnenenergie eingefangen und in elektrische Energie umgewandelt wird.
- die Komponenten von PV-Anlagen nennen
- die mechanischen Komponenten des Systems an verschiedenen Standorten zu montieren und in Betrieb zu nehmen.

Gesundheit und Sicherheit

Ein PV-Installationsstandort ist eine Baustelle und ein Elektroinstallationsstandort und muss als solcher alle relevanten Gesundheits- und Sicherheitsvorkehrungen und Arbeitspraktiken einhalten, z. B. sicheres Arbeiten in der Höhe, Schutz vor Stromschlägen usw. Informationen zu Gesundheits- und Sicherheitsvorschriften finden Sie in LU 5.



Kurs 1.1 Grundlagen der Solarenergie und PV-Systeme

Nach diesem Kurs sollten Sie in der Lage sein, mit Hilfe von Grundkenntnissen die verschiedenen Komponenten einer PV-Anlage zu beschreiben und deren Funktionsweise zu erklären.

Einführung in die Solarenergie

Bei Solarenergieanlagen wird die Energie der Sonne, auch Solarenergie genannt, genutzt und je nach Technologie in Strom oder die Erwärmung von Wasser umgewandelt.

Sonnenenergie ist thermische Energie, die von der Sonne durch Kernspaltung und -fusion von Wasserstoffatomen im Sonnenkern und auf der Sonnenoberfläche abgegeben wird. Die Träger dieser Energie in Form von Licht sind fundamentale Teilchen, die Photonen genannt werden.

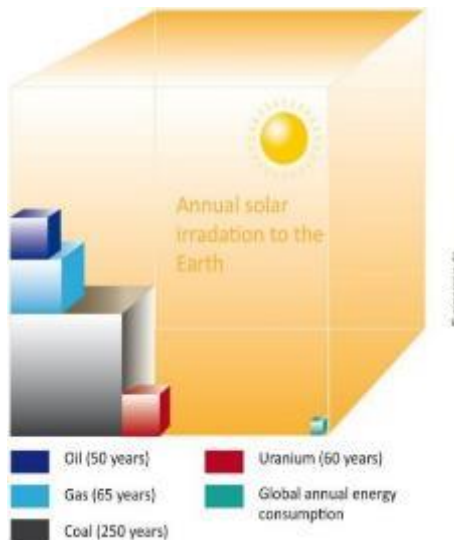


Abbildung 1: Menge der verfügbaren Solarenergie im Vergleich zu Kohle, fossilen und nuklearen Brennstoffen und unserem weltweiten Energieverbrauch

Nicht alle Photonen, die die Sonne verlassen, erreichen die Erdoberfläche.

Physikalische Teilchen und Molekülcluster in der Atmosphäre, wie Sauerstoff (O_2), Ozon (O_3), Wasserdampf (H_2O) und Kohlendioxid (CO_2), absorbieren und streuen einige Photonen und streuen oder reflektieren so die Sonnenenergie.

Auch die Erdoberfläche und die Ozeane reflektieren, absorbieren und strahlen die eintreffende Energie wieder ab, während Pflanzen und Bäume die Lichtenergie in chemische Energie umwandeln und Biomasse erzeugen.

Die von der Sonne erzeugte Energiemenge entspricht etwa dem 12-fachen der Energiemenge, die bei der Verbrennung von Kohle entsteht (siehe Abbildung).

Unser globaler Energieverbrauch in einem Jahr entspricht in etwa der Energie, die wir in nur einer Stunde von der Sonne erhalten. Die entscheidende Herausforderung besteht darin, diese potenziell verfügbare Energie in nutzbare Formen umzuwandeln und sie verfügbar zu machen, wann und wo immer sie benötigt wird.

Die verfügbare Solarressource wird sowohl von der Intensität der Sonneneinstrahlung als auch von ihrer Dauer beeinflusst, Faktoren, die bei der Bewertung der Solarressourcen berücksichtigt werden müssen.

Die **solare Bestrahlungsstärke** ist die Sonneneinstrahlung oder die Sonnenleistung (Watt) der Sonne, die zu einem beliebigen Zeitpunkt auf eine Oberfläche trifft, gemessen in kW/m^2 oder W/m^2 . An einem hellen, sonnigen Tag beträgt die Sonnenbestrahlungsstärke etwa $1.000 W/m^2$.

Die **Sonneneinstrahlung** ist die Energie der Sonne, die über einen bestimmten Zeitraum auf eine Fläche auftritt, beschrieben als die Gesamtmenge an Sonnenenergie pro



Flächeneinheit, die über einen bestimmten Zeitraum empfangen wird. Sie wird in Kilowattstunden pro Quadratmeter und Jahr [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$] oder in Kilowattstunden pro Quadratmeter und Tag [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \text{ d})$] angegeben. **Einstrahlung** ist ein anderer Begriff für **Bestrahlung**.

Die **Spitzen Sonnenstunde** (peak solar hour, PSH), auch bekannt als "volle Sonnenstunde", ist definiert als eine Stunde, in der die Intensität der Sonneneinstrahlung durchschnittlich 1.000 Watt (W) Energie pro Quadratmeter erreicht. Dies entspricht $1.000 \text{ Wh}/\text{m}^2$ oder $1 \text{ kWh}/\text{m}^2$. Wenn ein Ort durchschnittlich $1.200 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ erhält, spricht man von durchschnittlich 1.200 PSH pro Jahr. Erhält ein Ort durchschnittlich $5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ d})$, so erhält er durchschnittlich 5 PSH pro Tag.

Beispiel 2

Ein 100-Watt-Photovoltaikmodul steht den ganzen Tag in der Sonne.

Tagsüber ist sie $5 \text{ kWh}/\text{m}^2$ oder 5 PSH ausgesetzt.

Der Gesamtwirkungsgrad der Solaranlage beträgt 0,7 oder 70 %.

Erzeugte Energie = $100 \text{ W} \times 5 \text{ PSH} \times 0,7 = 350 \text{ Wh}$

Das PV-Modul wird also an diesem Tag 350 Wattstunden produzieren.

Die globale Solarressource

Die Menge an Sonnenenergie, die zu einem bestimmten Zeitpunkt zur Verfügung steht, hängt von der Position der Sonne am Himmel, den örtlichen klimatischen Bedingungen, der Jahreszeit und der geografischen Lage ab. Jedes Jahr erreichen $3,9 \times 10^{24}$ Joule (oder $1,08 \times 10^9 \text{ TWh}$) an Energie von der Sonne die Erdoberfläche. Der Großteil der Weltbevölkerung lebt in den relativ sonnigen Regionen. Für die Planung von Systemen sind genauere Informationen erforderlich (Abbildung 2).

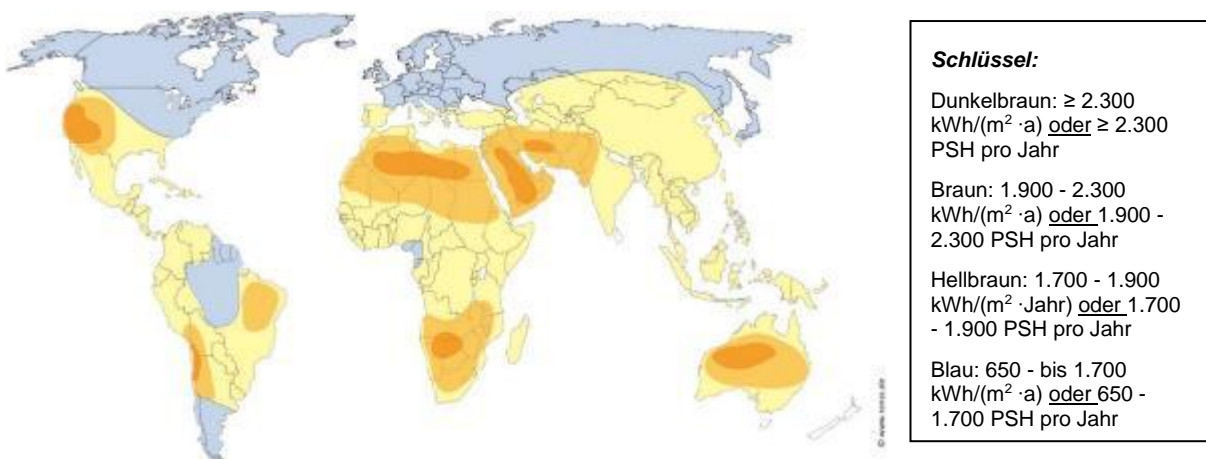


Abbildung 2: Karte mit der globalen Solarressource in kWh/m^2 , die an verschiedenen Standorten verfügbar ist.

Bestandteile der Sonnenstrahlung

Die Sonnenstrahlung besteht aus direktem Sonnenlicht und diffusem Sonnenlicht (von Wolken reflektiert), (Abbildung 3).

Die **direkte Strahlung** ist an klaren Sonnentagen verfügbar, während die **diffuse Strahlung** von der Menge an Wasserdampf, Staubpartikeln und anderen Spurenelementen in der Atmosphäre abhängt, die das Licht streuen.

Die Intensität der direkten Strahlung variiert von einigen 100 W/m^2 an bewölkten Tagen bis zu 1.000 W/m^2 an Tagen mit klarem Himmel.

Die **Albedo** gibt die Lichtmenge an, die von der Umgebung einer PV-Anlage, normalerweise vom Boden, reflektiert wird. Die Albedo variiert von 0 (keine Reflexion) bei schwarzen Körpern bis zu 0,8 - 0,9 bei stark reflektierendem Neuschnee.

Die Gesamtstrahlung, die auf eine Oberfläche fällt, wird als **Globalstrahlung bezeichnet** und ist gleich der Summe aller drei Komponenten (direkt + diffus + Albedo).

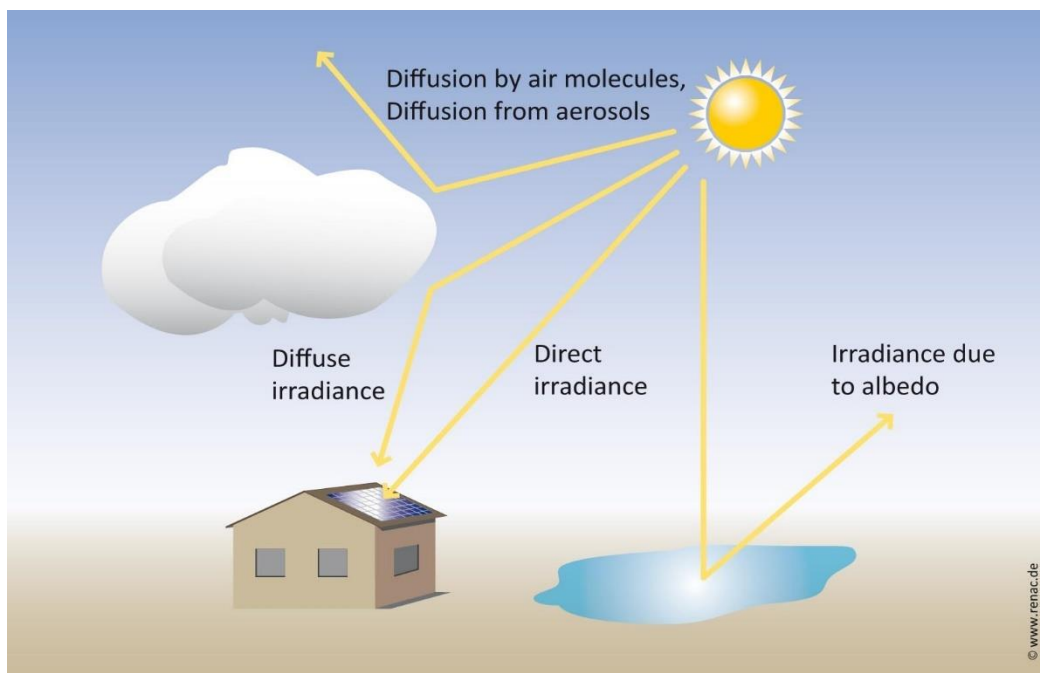


Abbildung 3: Die verschiedenen Komponenten der globalen Sonnenstrahlung.

Sonnenstrahlung – Schlüsselbegriffe

Sonnenkonstante

Die Solarkonstante ist definiert als die Leistungsdichte der einfallenden Sonnenstrahlung beim Auftreffen auf die obere Atmosphäre und beträgt 1.360 W/m^2 . Obwohl die Bestrahlungsstärke am Boden über 1.000 W/m^2 (1 kW/m^2) liegen kann, wird dieser Wert als allgemeine Faustregel für die Mittagszeit bei klarem Himmel verwendet.

Luftmasse (AM)

Die Erdatmosphäre verursacht eine beträchtliche Menge an Absorption und Streuung, wodurch das gesamte Spektrum des Sonnenlichts, das die Erdoberfläche erreicht, reduziert

wird. Je dicker die Atmosphäre ist, die das Sonnenlicht durchqueren muss, desto größer sind die Verluste. Bei der Bemessung von PV-Modulen, wie viel Energie sie bei einer Sonneneinstrahlung von 1.000 W/m^2 erzeugen können, wird ein AM von 1,5 angenommen.

Sonnenstand

Die Erde dreht sich um ihre Nord-Süd-Achse mit einer "Taumelbewegung" (der so genannten Präzession) von $23,5^\circ$. Gleichzeitig dreht sie sich auf einer elliptischen Bahn um die Sonne. Aufgrund der Präzession ist die Sonneneinstrahlung auf der Nordhalbkugel im Juni höher als im Dezember und auf der Südhalbkugel umgekehrt (siehe Abbildung "Geometrie Sonne-Erde"). Dies führt zu Sommer- und Winterjahreszeiten.

Der Weg, den die Sonne über den Himmel nimmt, hängt von der geografischen Breite des Standorts ab. In der nördlichen Hemisphäre, in Breitengraden über 23°N , verläuft der Weg der Sonne über den Himmel immer südlich von einem Beobachter, der auf der Erdoberfläche steht: Im Sommer steht sie hoch am Himmel, im Winter tief (siehe Abbildung 4, linker Teil). Auf der Südhalbkugel steht die Sonne bei Breitengraden über 23°S immer im Norden. Am Äquator und zwischen den Tropen, zwischen 23°N und 23°S , steht die Sonne je nach Tages- und Jahreszeit mal direkt über dem Himmel, mal im Süden und mal im Norden.

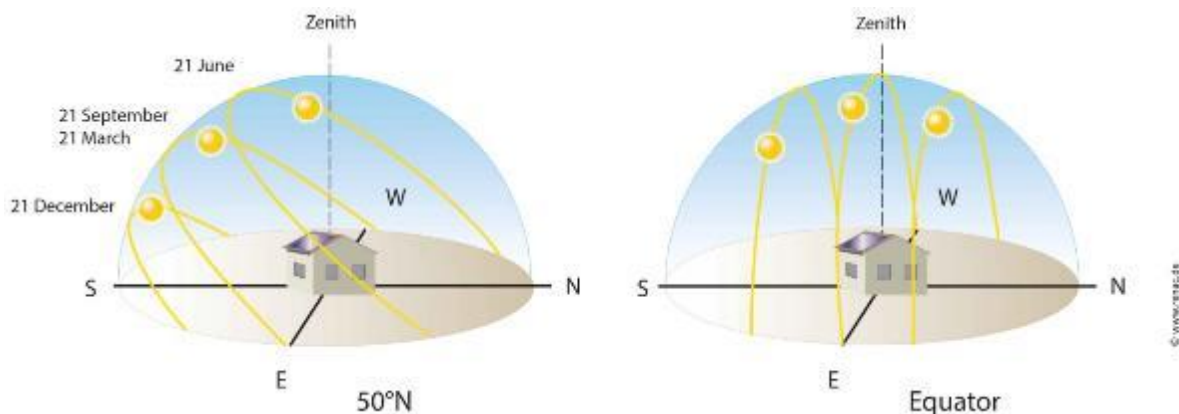


Abbildung 4: Position der Sonne im Jahresverlauf auf der Nordhalbkugel (links) und am Äquator (rechts).

Daher kann für jeden Standort auf der Erde der Lauf der Sonne genau bestimmt werden. Dies ist wichtig für die Entscheidung über die optimale Ausrichtung und den Neigungswinkel jeder Art von Solaranlage.

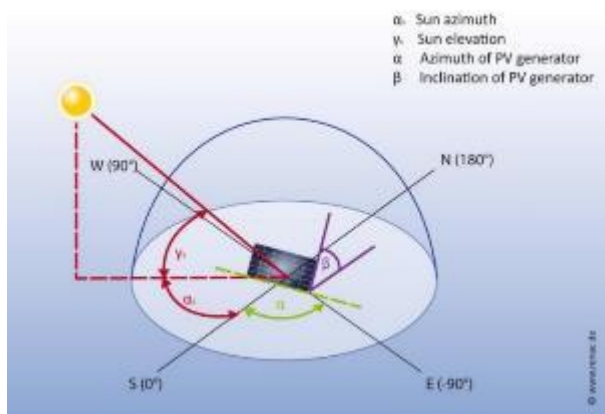


Abbildung 5: Zenit und Azimut. Der Zenitwinkel ist der Winkel zwischen der lokalen Vertikalen und der Linie, die den Beobachter mit der Sonne verbindet. Der Sonnenazimut ist die Abweichung der Sonnenposition in Bezug auf den Süden. Der Azimut eines PV-Moduls in Bezug auf den Süden ist definiert als (α) und die Neigung ist definiert als (β).

Die Höhe der Sonne am Himmel relativ zu einem auf der Erde stehenden PV-Generator kann durch den Elevations- (oder Höhen-) oder Zenitwinkel (γ) und den Azimutwinkel (α) beschrieben werden (Abbildung 4). Der Elevationswinkel beträgt 0° , wenn die Sonne am Horizont steht, und 90° , wenn die Sonne direkt über dem Kopf steht. Der Zenitwinkel (z) ist das Komplement dazu, d. h. 90° , wenn die Sonne am Horizont steht, und 0° , wenn die Sonne direkt über dem Horizont steht. Der Azimutwinkel beschreibt die Abweichung des Sonnenstandes vom Süden. Wenn die Sonne auf der Nordhalbkugel genau südlich des Beobachters steht, hat sie einen Azimutwinkel von 0° , West ist $+90^\circ$, Nord ist 180° und Ost ist -90° .

Sonneneinstrahlung auf einer horizontalen und geneigten Ebene

In der Praxis sollten PV-Module nie auf der horizontalen Ebene, d. h. flach, installiert werden. Sie erhalten mehr Sonneneinstrahlung, wenn sie geneigt sind, und müssen die Selbstreinigung durch den Regen ermöglichen. Der genaue Neigungswinkel, bei dem die Energieausbeute optimiert wird, hängt hauptsächlich von der geografischen Breite des Standorts und dem Anlagentyp ab.

Manchmal werden Daten zur Sonneneinstrahlung in Karten unter dem so genannten "Breitengradwinkel" angegeben. Das bedeutet einfach, dass die Strahlungsdaten für eine Fläche angegeben werden, die in einem Winkel geneigt ist, der dem Breitengrad entspricht, für den sie angegeben werden. Dies vermittelt in der Regel einen besseren Eindruck von der Sonneneinstrahlung, als wenn die Daten für die Horizontebene angegeben würden - aber es ist nicht der "beste Winkel".

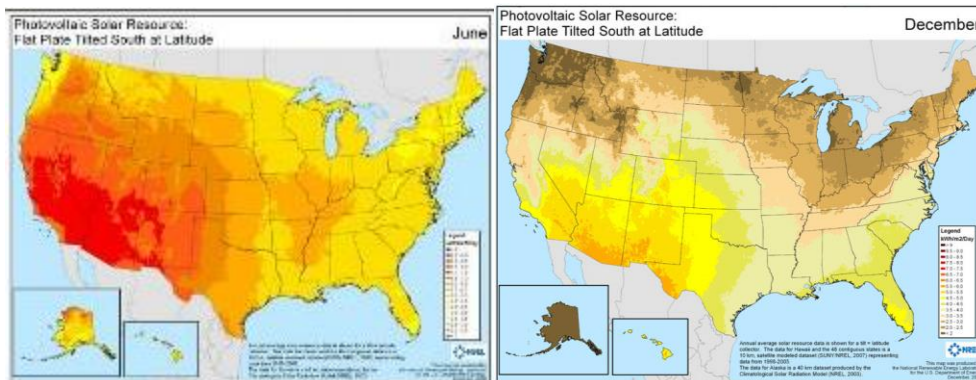


Abbildung 6: Karten der Sonneneinstrahlung mit Angaben zu den Breitengraden. Man beachte den Unterschied zwischen Juni (links) und Dezember (rechts). Daten über die Sonneneinstrahlung werden mit einer Vielzahl von Instrumenten erfasst. Der Klassiker ist das Pyrometer, das eine hohe Genauigkeit von $\pm 0,8\%$ aufweist. Quelle: National Renewable Energy Laboratory, USA.

Datenquellen für Sonneneinstrahlung und Klima

Mehrere frei zugängliche Online-Quellen liefern umfangreiche Daten zur Sonneneinstrahlung:

- PVGIS: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/index.htm>.
- NASA Oberflächenmeteorologie und Sonnenenergie: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>.
- U.S. National Renewable Energy Laboratory: www.nrel.gov/rredc.
- Gaisma: www.gaisma.com.

Daten aus vielen Ländern und Städten auf der ganzen Welt werden in der Regel in die Wetterdatenbanken von PV-Auslegungs- und Simulationsprogrammen wie PVsyst oder PV*SOL aufgenommen.

Kommerziell erhältliche Strahlungsdatenbankprogramme wie Meteonorm ermöglichen die Berechnung von Wetterdaten an fast jedem Ort der Welt. Meteonorm ermöglicht zum Beispiel den Export der Wetterdaten zur Verwendung mit Standard-PV-Simulationsprogrammen.

Grundlagen der Photovoltaiktechnologie und Systemkomponenten

Photovoltaik (PV) ist eine Technologie, bei der **Strom** direkt aus Sonnenlicht durch den photoelektrischen Effekt erzeugt wird. Eine weitere Solarenergietechnologie, die **Solarthermie**, nutzt die Sonnenenergie zur Erzeugung von **Wärme** und nicht von Strom.

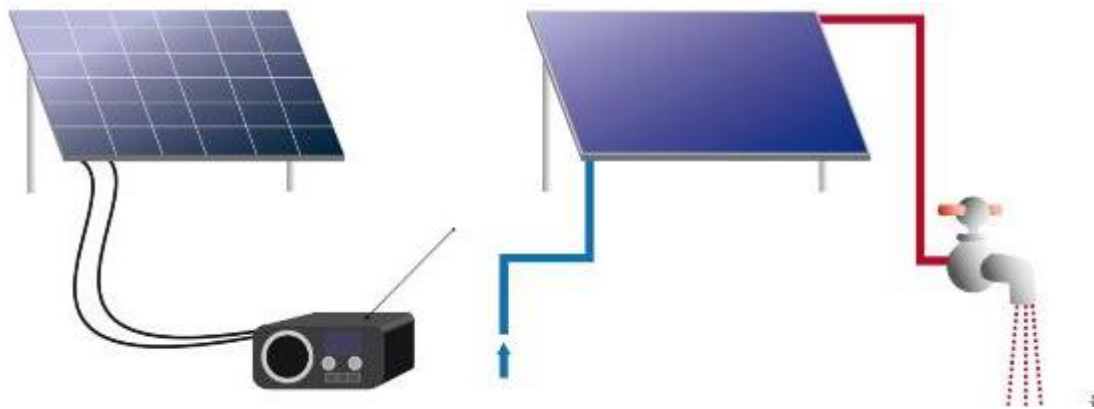


Abbildung 7(links) Photovoltaik - Sonnenlicht wird in Strom umgewandelt (Gleichstrom), (rechts) Solarthermie - Sonnenenergie erzeugt Wärme, z. B. Warmwasser.

Der mit der PV-Anlage (bestehend aus verschiedenen Komponenten) erzeugte Strom kann in das Stromnetz eingespeist, in Batterien zur späteren Nutzung gespeichert oder direkt genutzt werden.



Abbildung 8: PV und Solarthermie auf einem Dach, Deutschland. Netzgekoppelte PV-Anlage für Wohngebäude (großes Feld); einzelner thermischer Solarkollektor unter dem PV-Feld.

Der photovoltaische Effekt

Der photoelektrische Effekt ist ein Phänomen, das elektromagnetische Strahlung in leitfähigen Materialien in Elektrizität umwandelt¹. Ein Beispiel ist die Umwandlung von Sonnenlicht in Gleichstrom in einer photovoltaischen (PV) Solarzelle als Ergebnis des photoelektrischen Effekts.

¹ Die elektrische Leitfähigkeit eines Materials, d. h. seine Fähigkeit, Elektrizität zu leiten, kann durch Veränderung der Materialeigenschaften oder durch äußere Einflüsse, wie z. B. Sonnenlicht, reguliert werden.

Wenn Halbleitermaterialien, z. B. Solarzellen, dem Sonnenlicht ausgesetzt werden, treffen energiereiche Photonen (das Lichtquant) auf das Material. Die Elektronen in der atomaren Struktur des Solarzellenmaterials absorbieren einen Teil der Energie, wodurch sie aus dem Valenzband ihrer Atome in das Leitungsband angeregt werden. Dieses erhöhte Energieniveau setzt die angeregten Elektronen frei und ermöglicht es ihnen, sich im Atomgitter des Materials zu bewegen ("Leitung"). Wenn ein Elektron mobilisiert wird, löst es sich von seinem Mutteratom und hinterlässt ein so genanntes "Loch". Diese Löcher sind ebenfalls beweglich und wandern von Atom zu Atom, während die beweglichen Elektronen in die entgegengesetzte Richtung wandern. Während Elektronen negativ geladene Teilchen sind, werden Löcher als positiv geladene Teilchen betrachtet.

Wenn diese Elektronen zusammengeführt werden, um durch leitende Materialien, wie z. B. Metallkabel, zu fließen, erzeugen sie nützlichen Gleichstrom (Abbildung 9).

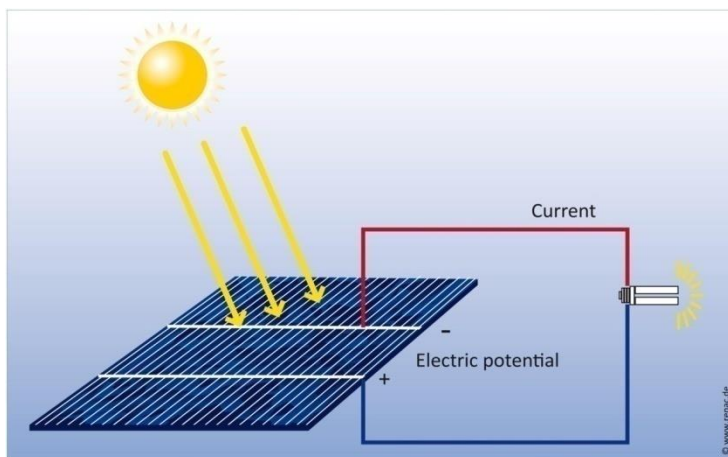


Abbildung 9: Solarzelle unter Lichteinwirkung.

Wenn Sonnenlicht auf die PV-Zelle fällt, wird ein Teil des Lichts von der Oberfläche reflektiert, und ein Teil des Lichts durchdringt die PV-Zelle unbeeinflusst. Der Rest des Lichts wird absorbiert und erzeugt Elektron-Loch-Paare, die durch ein elektrisches Feld getrennt und zu den Kontakten gebracht werden. Einige Elektronen-Loch-Paare rekombinieren, bevor sie an den Kontakten ankommen, und führen zu einer Erwärmung der Solarzelle.

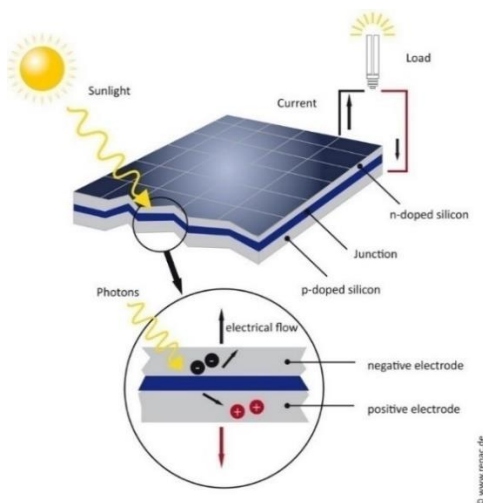


Abbildung 10: Funktionsprinzip der Silizium-PV-Zelle.



PV-Zellen werden aus einer Vielzahl von Halbleitermaterialien hergestellt, wobei Silizium als Metall am häufigsten verwendet wird. Durch Dotierung des Halbleiters, d. h. durch Zugabe winziger Mengen anderer Elemente wie Bor oder Phosphor in die kristalline Struktur des Siliziums, werden p- bzw. n-Halbleiter gebildet. Dadurch werden überschüssige Elektronen und Löcher in dem Material verfügbar gemacht, was seine Leitfähigkeit erhöht. Bei Halbleitern mit einer p-Dotierung stehen mehr Löcher zur Verfügung (und damit eine positive Nettoladung), bei Halbleitern mit einer n-Dotierung mehr Elektronen (und damit eine negative Nettoladung). Durch das Zusammenführen der negativ und positiv geladenen Materialien, einen p-n-Übergang, wird im Halbleiter ein elektrisches Feld erzeugt. Dieses elektrische Feld dient dazu, bewegliche Elektronen und Löcher zwangsweise zu trennen, wodurch der in der Solarzelle erzeugte Fotostrom in die richtige Richtung gelenkt werden kann (Abbildung 10). Dieser Gleichstrom wird zu den Metallelektroden auf beiden Seiten der Solarzelle geleitet und an die Ausgangskontakte weitergeleitet, wo er in einer elektrischen Last verbraucht werden kann.

PV-Zellen

Es gibt viele verschiedene Arten der PV-Zelltechnologie.

a) PV-Zellen aus kristallinem Silizium

Monokristalline und polykristalline/multikristalline c-Si-Zellen sind waferbasiert mit Dicken im Bereich von 100 bis 250 μm und Längen von 100 bis 150 mm.

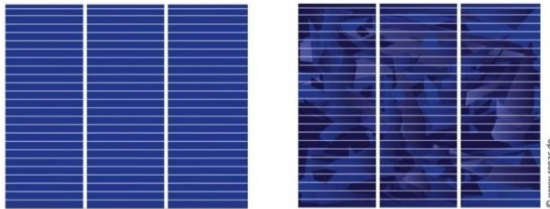


Abbildung 11: Monokristalline (links) und polykristalline (rechts) Solarzellen.

Die monokristalline Struktur erzeugt eine homogene Farbe, während die polykristalline Zelle für jede kristalline Ausrichtung unterschiedliche Schattierungen aufweist - überprüfen Sie das Etikett oder das Datenblatt des Moduls, um dies zu bestätigen. Monokristalline Solarzellen erreichen in der Regel höhere Wirkungsgrade als polykristalline Zellen. Allerdings sind die Herstellungskosten für polykristalline/multikristalline Zellen niedriger, was ihren geringeren Wirkungsgrad ausgleicht. Derzeit gibt es kaum Leistungsunterschiede zwischen den beiden Technologien. Kristalline Si-Zellen haben eine Antireflexionsschicht aus Siliziumnitrid, die ihnen ihre charakteristische blaue Farbe verleiht.



b) Dünnschicht-Solarzellen



Abbildung 12: Dünnschichtmodule.

Dünnschicht-PV-Zellen (amorphes Si, Cadmiumtellurid, CIGS) werden in der Regel auf Glasplatten aufgebracht. Die Oberfläche wird dann mit einem Laser vorbereitet und die elektrischen Kontakte werden aufgebracht. Die wichtigsten derzeit auf dem Markt befindlichen Dünnschicht-PV-Technologien sind **amorphes Silizium (a-Si)**, **Cadmiumtellurid (CdTe)** und **Kupfer-Indium-Gallium-Schwefel-Selenid (CIGS)**. In der Regel ist es nicht möglich, die Art der Dünnschichttechnologie einer Zelle oder eines Moduls allein anhand des Aussehens zu bestimmen, daher sollten Sie immer das Etikett oder Datenblatt des Moduls prüfen.

Der Markt für PV-Zelltechnologie wird zu 80 % von PV-Zellen auf der Basis von kristallinem Silizium (c-Si) beherrscht, der Rest entfällt auf Dünnschichtmodule (amorphes Silizium, CdTe und CIGS).

PV-Module

Das Photovoltaikmodul wird durch die Reihenschaltung von PV-Zellen (auch einfach "Solarzellen" genannt) und deren Umhüllung mit einem Schutzmaterial gebildet (Abbildung 13). Das Modul verfügt über Zwischenräume zwischen den Zellen, einschließlich eines Rahmens. Daher ist die Gesamtoberfläche größer als die Summe der Zellflächen. Dies führt zu einem geringeren Wirkungsgrad als bei einer einzelnen Zelle. Ein Modul kann in Reihe und/oder parallel geschaltet werden, um die gewünschte Spannung und den gewünschten Strom zu erzeugen.

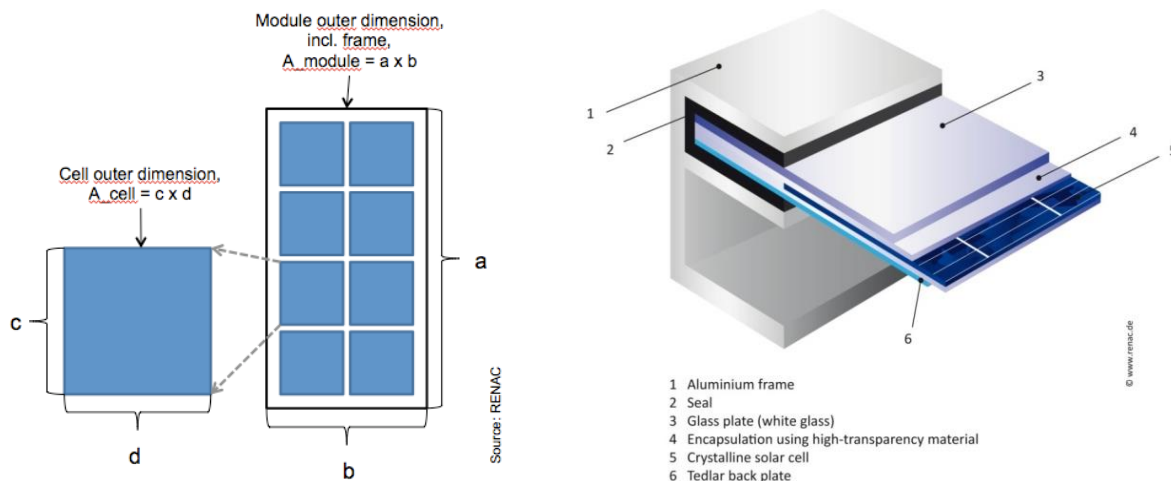


Abbildung 13 (Links) Ein PV-Modul besteht aus Solarzellen. (Rechts) Typischer Aufbau eines kristallinen Silizium-PV-Moduls

Die Anzahl der PV-Zellen in kristallinen Modulen schwankt in der Regel zwischen 36 und 72 Zellen. Die PV-Zellen sind elektrisch verbunden und zwischen zwei sehr dünnen, transparenten Schichten aus dampfdichtem Verkapselungsmaterial (üblicherweise aus Ethylvinylacetat oder EVA) eingebettet. Dieses Material wird dann auf eine reflektierende Trägerfolie (in der Regel aus Polyvinylfluorid) gelegt und mit einer Glasabdeckung in einem Aluminiumrahmen (Abbildung 13).

Diese Materialschichten schützen die PV-Zellen vor Witterungseinflüssen und sorgen dafür, dass keine Feuchtigkeit/Feuchtigkeit in das Modul eindringt (eine der häufigsten Ursachen für die Verschlechterung der Module). Die elektrischen Kontakte werden in einer Anschlussdose auf der Rückseite des Moduls verbunden, und Bypass-Dioden werden über die Anschlüsse gelötet, um Leistungsverluste aufgrund von Abschattung zu verringern.

Moduldatenblätter und Installationsanweisungen

PV-Module werden mit einem Datenblatt geliefert (Abbildung 14), das alle relevanten elektrischen und mechanischen Daten gemäß der internationalen Norm EN 50380 (Datasheets and Nameplate Information for Photovoltaic Modules - Datenblätter und Angaben auf dem Typenschild von Photovoltaikmodulen) enthält, in der festgelegt ist, welche Informationen ein Moduldatenblatt enthalten sollte.

Dazu gehören:

- Die elektrischen Parameter (V_{oc} , V_{mpp} , I_{sc} , I_{mpp} , maximale Systemspannung und Temperaturkoeffizienten) bei STC
- Die Spitzenleistung, gemessen in Watt-Peak (Wp), bei STC
- Die I-U-Kurve des Moduls bei STC
- Toleranzen
- Rückstromwerte (für Anforderungen an Reihenabsicherungen)
- Zelltyp und Anzahl der Zellen
- Modulwirkungsgrad bei STC
- Abmessungen und Gewicht des Moduls
- Informationen über Abzweigdosen, Dioden und Kabelverbinder

- Details zum Modulrahmen
- Anforderungen an die Erdung (falls vorhanden)
- Informationen zu Normen und Zertifizierungen.

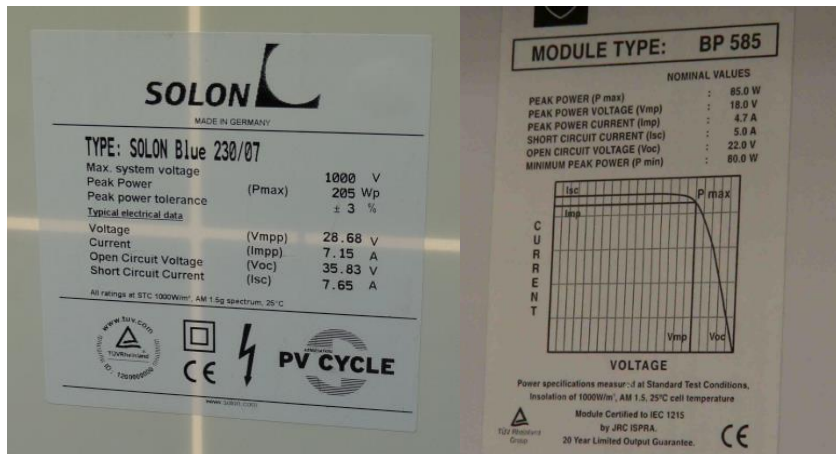


Abbildung 14: Etiketten auf der Rückseite von zwei PV-Modulen mit den wichtigsten elektrischen Eigenschaften.

Darüber hinaus sollten die Hersteller **Installationsanweisungen für die Module** bereitstellen. Diese enthalten Informationen darüber, wie ein Modul installiert werden sollte, und über Anwendungsbeschränkungen - zum Beispiel ist ein Modul möglicherweise nicht für die Integration in eine Gebäudefassade geeignet. Daher sollte vor der Auswahl eines PV-Moduls das Datenblatt des Moduls sorgfältig konsultiert werden.

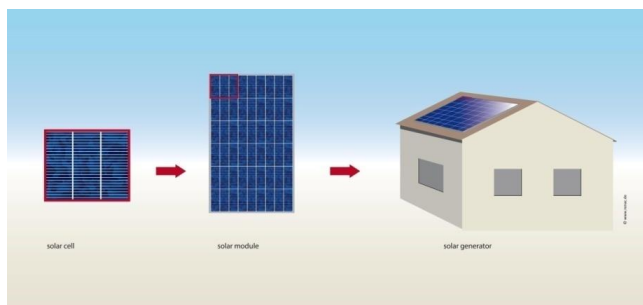


Abbildung 15: PV-Anlagen bestehen aus mehreren PV-Modulen, die wiederum aus mehreren PV-Zellen zusammengesetzt sind.

1. Ungefähre Schätzung der Energieleistung von PV-Modulen und -Anlagen

Eine ungefähre Schätzung des Energieertrags von PV-Modulen und -Anlagen kann wie folgt vorgenommen werden:

$$\text{Module energy output [Wh]} \approx \text{PV module peak power rating} \times \text{PSH} \times \text{PR}$$

wobei

- PSH steht für Peak Sun Hours und
- PR ist das Leistungsverhältnis des Systems [0,7 - 0,8 für netzgekoppelte Systeme, 0,6 - 0,7 für netzunabhängige Systeme], das von mehreren Faktoren abhängt, u. a. vom Systemtyp, den örtlichen Temperaturen usw.

Beispiel für eine netzgekoppelte PV-Anlage



10 × 100 Wp-Module, 2.000 PSH pro Jahr, bei einer angenommenen PR von 0,7:

Die Energieabgabe beträgt etwa

$1.000 \text{ Wp} \times 2.000 \text{ PSH} \times 0,7 \approx 1.400.000 \text{ Wh pro Jahr}$ oder 1.400 kWh pro Jahr

a) Wirkungsgrade verschiedener Typen von Photovoltaik-Modulen

Der Wirkungsgrad eines PV-Moduls beschreibt, wie effizient das Modul Lichtenergie in elektrische Energie umwandelt. Ein PV-Modul mit einem Wirkungsgrad von 15 % wandelt beispielsweise 15 % des Sonnenlichts, das auf das Modul fällt, in elektrische Energie um. Der auf dem Datenblatt eines Moduls angegebene Wirkungsgrad ist der Wirkungsgrad bei STC. Einmal installiert, erreichen die Module diesen Wirkungsgrad nur selten. Der Wirkungsgrad der installierten PV-Module wird als "Feldwirkungsgrad" bezeichnet und variiert je nach Installation, Tageszeit und anderen technischen und umweltbedingten Faktoren.

PV-Wechselrichter,

Ein Wechselrichter wandelt den Gleichstromeingang des PV-Generators in einen Wechselstromausgang um, zum Beispiel von 12 V_{DC} in 230 V_{AC}. PV-Module erzeugen Gleichstrom (DC). Elektrische Energie wird jedoch normalerweise in Form von Wechselstrom übertragen und verteilt, und die meisten Geräte verbrauchen Wechselstrom. Daher sind Wechselrichter für PV-Systeme unverzichtbar, werden aber speziell für netzgekoppelte oder netzunabhängige Systeme entwickelt - siehe - Anhang 2: Weiterführende Literatur und Informationen

Grid-connected Solar *Electric Systems* von Geoff Stapleton & Susan Neil, Kapitel 2: *Solar Resource and Radiation*, Earthscan Expert Series.

Photovoltaic Systems von James P Dunlop, Kapitel 2: *Solar Radiation*, American Technical Publishers.

Stand-alone Solar Electric Systems von Mark Hankins, Kapitel 2: *Fundamentals of Solar Energy*, Earthscan Expert Series.



Anhang 3: Netzgekoppelte / netzunabhängige Wechselrichter.

Batteriespeicher

Eine Solarbatterie ist die Komponente der PV-Anlage, die den von Ihren Solarmodulen erzeugten Strom speichert. Diese gespeicherte Energie kann nachts, an wolkigen Tagen und bei Stromausfällen, wenn die Module keinen Strom erzeugen, zur Stromversorgung verwendet werden. Es gibt vier Haupttypen von Batterien, die in einem Solarsystem verwendet werden können - **Blei-Säure-, Lithium-Ionen-, Nickel-Cadmium- und Durchflussbatterien**. Blei-Säure-Batterien waren aufgrund ihres niedrigen Preises und ihrer Zuverlässigkeit lange Zeit der am häufigsten verwendete Batterietyp in netzunabhängigen PV-Systemen, erfordern jedoch eine regelmäßige Wartung. Jedes Batteriemodell hat unterschiedliche Eigenschaften. Das Datenblatt der Batterie gibt darüber Auskunft. Es gibt einige allgemeine Punkte zu beachten, aber für spezifische Informationen müssen die Datenblätter herangezogen werden. Hochwertige Batterien werden mit ausführlichen Installations- und Inbetriebnahmeanleitungen geliefert. Batterien sind gefährlich: Nur qualifiziertes Personal sollte Batterien installieren und warten. Sie müssen an sicheren Orten und mit entsprechenden Sicherungen oder Schutzschaltern installiert werden.

Andere PV-Systemkomponenten

Die Hauptkomponenten sind durch andere Elemente wie Kabel, Unterbrecher, Sicherungen, Zähler, Schalter, Befestigungsstrukturen usw. miteinander verbunden. Sie werden als Balance of System (BoS) bezeichnet und fallen in zwei Kategorien - elektrische und mechanische Strukturen.

Kabel

Im Allgemeinen entsprechen die Kabel auf der AC-Seite von PV-Anlagen den gleichen Spezifikationen und sind vom gleichen Typ wie in anderen elektrischen Niederspannungsanlagen. Auf der Gleichstromseite jedoch gelten für die Kabel, die den Gleichstrom von der/den PV-Anlage(n) zum/zu den Wechselrichter(n) leiten, besondere Anforderungen, die in den entsprechenden Vorschriften festgelegt sind. In den meisten Fällen werden Kabel mit Kupferleitern verwendet. Die Vorschriften verbieten die Verwendung von Aluminiumkabeln, außer unter besonderen Umständen.

PV-Anlagen-Sicherungen/Leistungsschalter

Gleichstromsicherungen und Leitungsschutzschalter (MCBs) in PV-Generatorkabeln, die auch als Strangsicherungen" oder String-MCBs" bezeichnet werden, dienen in erster Linie dem Schutz vor sogenannten Rückströmen", bieten aber auch Schutz vor Kurzschlüssen, Kabelüberhitzung und Stromschlag.

DC-Haupttrennschalter/Isolator

Der DC-Trennschalter befindet sich am DC-Eingang des Wechselrichters. Er dient dazu, die PV-Anlage vom Wechselrichter zu trennen und muss daher in der Lage sein, die gesamte PV-Last zu schalten.

PV-Generatoranschlusskästen/Verbindungskästen

PV-Generatoranschlusskästen werden zwischen dem/den PV-Generator(en) und dem/den Wechselrichter(n) installiert. Sie werden verwendet, um parallele Strings miteinander zu



verbinden, enthalten Sicherungen und/oder Leitungsschutzschalter (MCBs) und können auch den DC-Haupttrennschalter/Isolator und Beleuchtungs-/Überspannungsschutzeinheiten enthalten. Es ist eine breite Palette von Typen und Größen erhältlich. Einige sind auch für die Fernüberwachung geeignet.

Zähler in netzgekoppelten Anlagen

Zähler in netzgekoppelten Anlagen sind erforderlich, um die ins Netz eingespeiste Energie zu ermitteln. Sie werden in der Regel in der Nähe des Verbrauchszählers (falls vorhanden) installiert. Andernfalls muss das Versorgungsunternehmen zunächst einen Zähler am Einspeisepunkt installieren. Beim Net-Metering können Zähler verwendet werden, die in der Lage sind, die verbrauchte und die aus dem Netz eingespeiste Energie zu messen. Welche Art von Zähler benötigt wird, hängt von der Größe der PV-Anlage, der Art der Vergütungsregelungen (FiTs, Net Metering) und den Anforderungen des Versorgungsunternehmens ab (dies ist von Land zu Land und von Versorgungsunternehmen zu Versorgungsunternehmen unterschiedlich).

Blitzschutz und Überspannungsschutz :

Im Allgemeinen erhöht die Installation einer PV-Modulreihe auf einem Gebäude nicht das Risiko eines Blitzeinschlags. Auf Flachdächern erhöhen die Module jedoch die Höhe des Daches, was ein Problem darstellen kann. Auch auf dem Boden montierte PV-Anlagen müssen möglicherweise geschützt werden. Vorschriften und Bauvorschriften schreiben in bestimmten Situationen verschiedene Arten von Blitzschutz vor. Einige Versicherungsgesellschaften können einen Blitzschutz für eine Anlage vorschreiben.

Transformatoren und PV-Umspannwerke

Bei Solarparks und sehr großen PV-Anlagen müssen möglicherweise Transformatoren (3-phasig) und PV-Umspannwerke installiert werden. PV-Transformatoren/Unterstationen erhöhen die Wechselspannungsleistung des Wechselrichters zur Einspeisung in das Mittelspannungsnetz (MS).

Kurs 1.2 Planung von Photovoltaikanlagen und Standortbestimmung

Das allgemeine Lernergebnis ist die Fähigkeit, den Entwurf einer PV-Anlage zu beurteilen und den vorgesehenen Standort zu bewerten.

Photovoltaik-Systemkategorien / Anwendung

Es gibt zwei allgemeine Kategorien von PV-Anlagen: Netzgekoppelte PV-Anlagen und netzunabhängige PV-Anlagen. Abbildung 16 zeigt einige der wesentlichen Komponenten beider Systeme. Netzunabhängige Systeme erzeugen Strom, der vor Ort verbraucht wird. Netzgekoppelte Systeme speisen den Strom in die nationalen Stromnetze ein, wo er zu verschiedenen Verbrauchsstellen fließt.

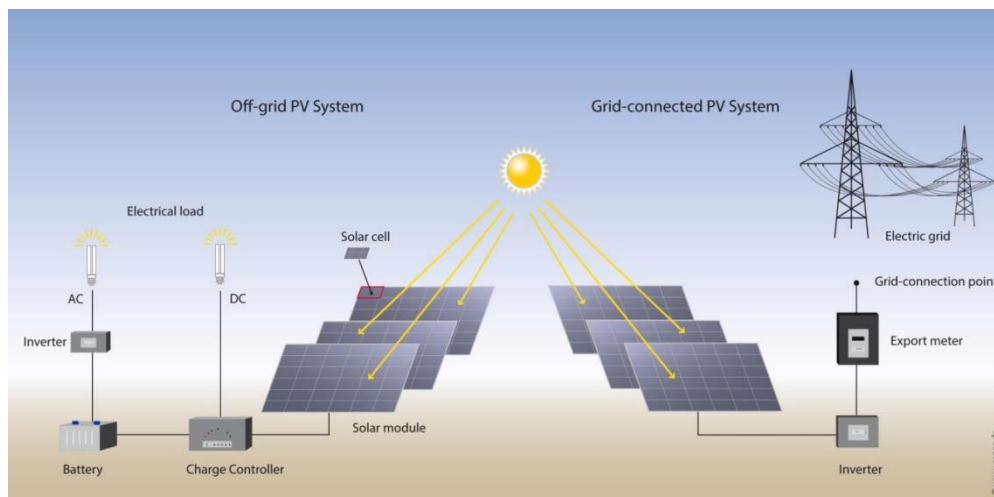


Abbildung 16: Übersicht über netzunabhängige (links) und netzgekoppelte (rechts) PV-Systeme.

Netzgebundene PV-Systeme

Viele Anlagen unterschiedlicher Größe erzeugen Strom an verschiedenen Standorten in einem zentralen Stromnetz. Netzgekoppelte PV-Anlagen lassen sich im Allgemeinen in zwei Kategorien einteilen: dezentrale PV-Anlagen und zentrale PV-Anlagen.

Verteilte PV-Systeme

Bei den dezentralen Systemen kann man zwischen Systemen in Wohngebäuden und Systemen in gewerblichen Gebäuden oder landwirtschaftlichen Betrieben unterscheiden, die an das Niederspannungsnetz angeschlossen sind.

Bei Hausanlagen handelt es sich um kleine Aufdachanlagen, die Strom für den Eigenverbrauch und/oder den Verkauf an das Stromversorgungsunternehmen erzeugen (Abbildung 17). Die PV-Anlage ist über einen PV-Anlagenkombinator/eine Anschlussbox an einen Wechselrichter angeschlossen. Ein Import-Export-Zähler erfasst, wie viel Strom aus dem Netz importiert und wie viel in das Netz exportiert wird. Bei den Verbrauchern handelt es sich um normale Haushaltsgeräte. Andere Konfigurationen sind möglich.

Anlagen auf Nichtwohngebäuden/Gewerbegebäuden haben in der Regel viel größere PV-Anlagen und mehrere Wechselrichter. Größere gewerbliche Anlagen werden oft speziell für den Verkauf von Strom an das Stromversorgungsunternehmen und zur Erzielung von Einnahmen, aber auch zum Ausgleich des eigenen Stromverbrauchs des Unternehmens gebaut.

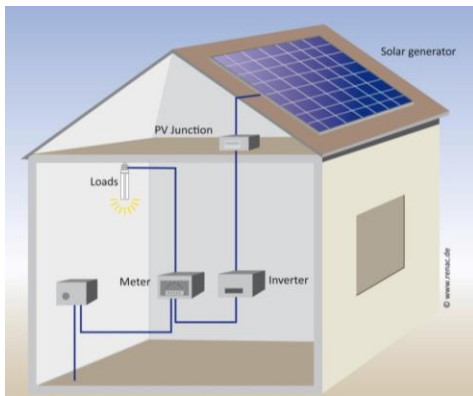


Abbildung 17: Typische PV-Anlage für Wohngebäude.

Zentrale PV-Anlagen

Auch bekannt als Solarfarmen, Solarparks oder PV-Großanlagen. Solche Anlagen, die aus großflächigen, auf dem Boden montierten Arrays bestehen, können große Flächen einnehmen und Strom direkt in das Netz einspeisen (Abbildung 18). Die PV-Anlagen des Solarparks sind mit Wechselrichtern verbunden, und der dreiphasige Strom wird an den Netzanschlusspunkt/Transformator im kleinen Gebäude rechts weitergeleitet. Der Strom wird normalerweise in das Mittelspannungsnetz eingespeist. Es ist eine Reihe von Konfigurationen von PV-Anlagen und Wechselrichtern möglich. Die Konfiguration solcher Anlagen ist eher mit der von konventionellen Kraftwerken vergleichbar. Sie sind an Mittel- oder Hochspannungsnetze angeschlossen.



Abbildung 18: Solarpark in Deutschland

Bei allen netzgekoppelten Systemen ist die PV-Anlage an einen Wechselrichter angeschlossen, der Gleichstrom in Wechselstrom umwandelt. Der Wechselrichter ist mit einem Maximum Power Point Tracker (MPPT) ausgestattet, um sicherzustellen, dass die Anlage unter schwankenden Bedingungen die maximal mögliche Leistung erzeugt. Der Ausgang des Wechselrichters ist an einen Zähler angeschlossen, der die ins Netz eingespeiste Energiemenge erfasst.

Netzunabhängige PV-Systeme

Netzunabhängige PV-Anlagen, die auch als **Inselsysteme** bezeichnet werden, sind nicht an das Stromnetz angeschlossen. Der erzeugte Strom wird ganz in der Nähe des Ortes verbraucht, an dem er erzeugt wird. Netzunabhängige Systeme sind in der Regel mit einem Batteriespeicher ausgestattet, so dass der Strom auch dann geliefert werden kann, wenn die Sonne nicht scheint - solare Wasserpumpensysteme sind hier eine große Ausnahme (Abbildung 19).

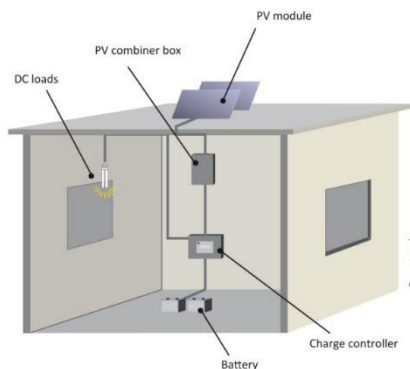


Abbildung 19: Typische netzunabhängige PV-Anlage.

Die PV-Module sind an einen Laderegler angeschlossen, der das Laden und Entladen der Batterien regelt. Es wird nur Gleichstrom geliefert. Viele dieser Systeme verfügen auch über Wechselrichter (die direkt mit den Batterien verbunden sind), die Wechselstrom liefern. Netzunabhängige Systeme sind in der Regel an Orten zu finden, an denen kein Stromnetz vorhanden ist.

Die Systemkomponenten unterscheiden sich von netzgekoppelten Systemen, und die Anlagengröße ist in der Regel viel kleiner, insbesondere bei kleinen netzunabhängigen Anwendungen wie **Solar Home Systems** (SHS) (Abbildung 20).



Abbildung 20: Ein kleines Solarhaussystem (links), ein großes netzunabhängiges PV-System in einer Schule in Ecuador (Mitte) und eine netzunabhängige Solarparkuhr in Italien (rechts).

Bei Mikro- und Mini-Netzen handelt es sich im Grunde um kleine Stromnetze, die z. B. eine kleine Insel, einen abgelegenen Gebäudekomplex oder ein Dorf mit Strom versorgen (Abbildung 21).



Abbildung 21: Aufbau eines Mikro-/Mini-Netzes.

Strom wird in der Regel an einem zentralen Punkt erzeugt und gespeichert, von dem aus er (mit Netzwechselspannung) verteilt wird. Es gibt eine Reihe von Typen und Konfigurationen. In diesem Leitfadens werden sie als netzunabhängige Systeme eingestuft. Sie verfügen in der Regel über eine Reservestromquelle, in der Regel einen Dieseldieselgenerator. Einige größere Mikro- und Mini-Netzsysteme verfügen nicht über einen Batteriespeicher.

Energiefluss und Messoptionen

In einer PV-Anlage fließt die Energie von einer Komponente zur anderen - vom Modul zum Netz oder zur Verbrauchsstelle. Bei diesem Fluss gibt es viele Quellen für Energieverluste. Um Systeme zu entwerfen und zu installieren, die diese Verluste vermeiden oder dort, wo sie unvermeidlich sind, reduzieren, muss man genau wissen, wo sie auftreten. Abbildung 22 zeigt einige der Stellen, an denen Energie verloren geht.

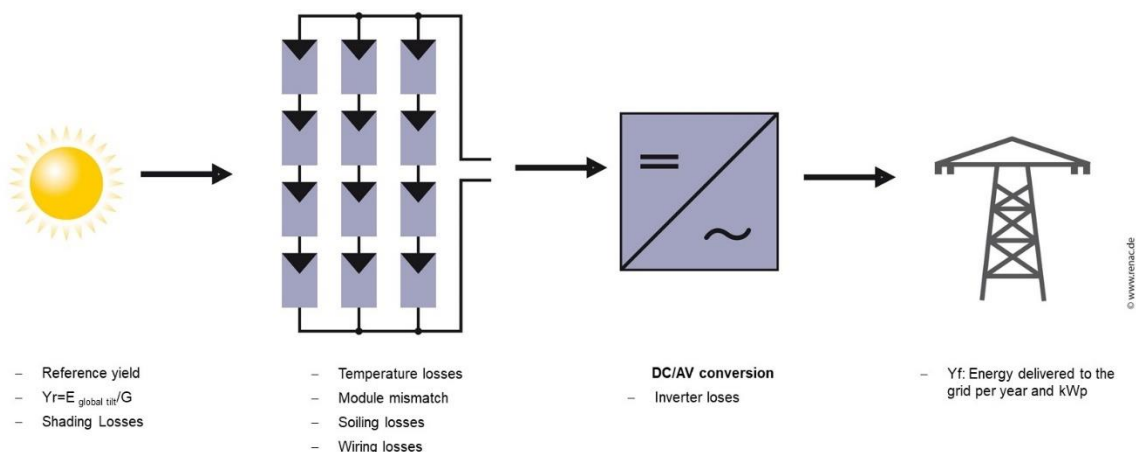


Abbildung 22: Beispiele für Energieverluste in einer netzgekoppelten PV-Anlage (nur die wichtigsten Verlustfaktoren sind dargestellt).

Die Stromerzeugung aus einer netzgekoppelten PV-Anlage sollte gemessen werden, damit sie gekauft und verkauft werden kann. Für Anlagen, die an das Niederspannungsnetz angeschlossen sind, gibt es im Allgemeinen zwei Messverfahren, die sich jedoch von Land zu Land im Detail unterscheiden. Technisch gesehen sind die Systeme im Wesentlichen identisch, der Hauptunterschied besteht darin, wo die Zähler installiert werden und welche Art von Zählern verwendet wird.

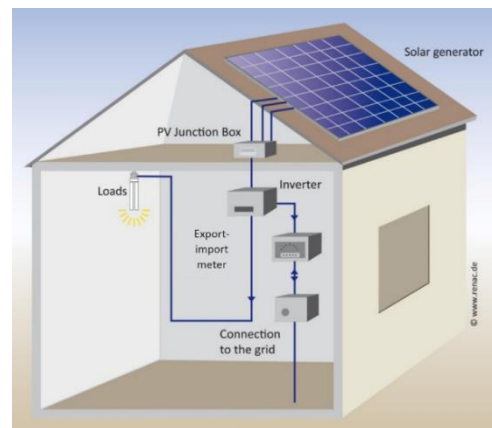
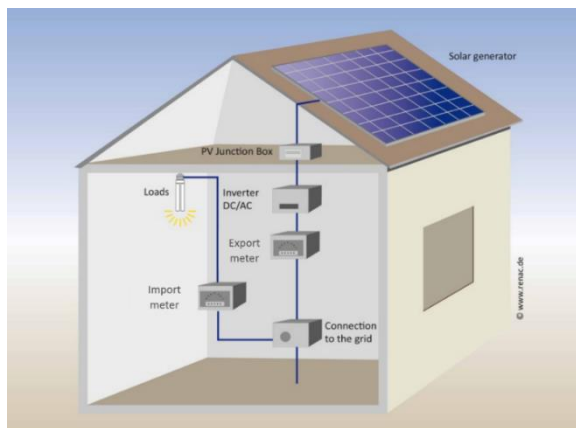


Abbildung 23: Konfiguration der Einspeisevergütung (FiT) (links) und Konfiguration der Netzeinspeisung (rechts). Andere Konfigurationen sind möglich.

Einspeisetarife (FiTs)

Hier wird die Gesamterzeugung der PV-Anlage gemessen und dann direkt ins Netz eingespeist (Abbildung 23- links). Die Verbraucher vor Ort werden durch den Verbrauch von Strom direkt aus dem Netz gespeist. Die Anlage umfasst zwei Zähler: einen Zähler, der die von der PV-Anlage erzeugte und ins Netz eingespeiste Energie misst, und einen Zähler, der die vom Netz verbrauchte Energie misst. Der Anlagenbesitzer erhält eine Vergütung (oder eine Gutschrift) für den erzeugten PV-Strom und eine Rechnung für den verbrauchten Netzstrom. Die Vergütung pro verkaufter kWh muss höher sein als die Kosten für den Verbrauch einer kWh aus dem Netz, damit das System für den Anlagenbesitzer attraktiv ist. Dieses System wird in Deutschland und Europa, aber auch weltweit eingesetzt.

Net Metering

In der Regel wird nur ein Zähler verwendet, der vorwärts laufen kann, wenn Strom aus dem Netz verbraucht wird, und rückwärts, wenn Strom ins Netz eingespeist wird (Abbildung 23- rechts). Eine erzeugte und verbrauchte kWh bedeutet eine kWh weniger, die aus dem Netz entnommen werden muss, wodurch der Eigentümer die Kosten für eine kWh aus dem Netz spart. Die in das Netz eingespeiste überschüssige Energie wird im Wesentlichen für die aus dem Netz bezogene Energie gutgeschrieben. Daher sind die durch die Erzeugung einer kWh PV-Strom eingesparten Kosten und die für eine kWh Netzstrom gezahlten Kosten gleich hoch. In einigen Systemen werden die Anlagenbesitzer nicht für den Strom bezahlt, den sie über ihren jährlichen oder monatlichen Verbrauch hinaus erzeugen. Dieses System wird in den USA und in vielen anderen Teilen der Welt eingesetzt. Es ist besonders in Ländern sinnvoll, in denen die Kosten für die Erzeugung von PV-Strom niedriger sind als der Bezug aus dem öffentlichen Netz.

Hauptkomponenten von netzgekoppelten PV-Anlagen

Module

Die meisten PV-Module werden für den Einsatz in netzgekoppelten Anlagen hergestellt, die einzige wirkliche Ausnahme sind kleinere Module für kleine netzunabhängige Anlagen. Die



Module stellen in der Regel die größten Systemkosten dar, weshalb die Auswahl der geeigneten PV-Module eine sehr wichtige Entscheidung ist. Die Qualität der PV-Module ist im Allgemeinen hoch, und das bestehende System der internationalen Produktzertifizierung ist sehr umfassend. Es ist wichtig, auf die Details zu achten.

Die wichtigsten Punkte, auf die Sie achten sollten, sind:

- die erforderlichen technischen Spezifikationen;
- lange Lebensdauer, 20 bis 25 Jahre Garantie (lesen Sie das Kleingedruckte);
- die erforderlichen Normen/Zertifizierungen erfüllen (z. B. IEC- und/oder UL-Normen);
- für die Anwendung geeignet sind, z. B. sind nicht alle Module für Solarfassaden geeignet;
- Erfolgsbilanz des Herstellers;
- einfache Installation, z. B. Abmessungen der Module, geeignete Anschlüsse, verfügbares Montagesystem usw.;
- Anforderungen der nationalen Vorschriften und Normen;
- Umweltbedingungen, die die Leistung/Eignung des Moduls beeinträchtigen könnten:
 - Lokaler Temperaturbereich - Die Betriebstemperaturbereiche sind in den Datenblättern angegeben;
 - Atmosphärisches Salz in Meeresnähe - Module, die in einem Umkreis von 1 km von der Küste installiert werden, sollten der IEC 61701 entsprechen;
 - In Regionen mit starken Schneefällen benötigen die Module in der Regel eine Tragfähigkeit von 5.400 Pa, die in den Datenblättern angegeben ist;
- Ästhetik des Moduls;
- Recyclinganforderungen am Ende der Lebensdauer der Module.

Netzgekoppelte Wechselrichter

PV-Module erzeugen Gleichstrom (DC). Elektrische Energie wird jedoch normalerweise in Form von Wechselstrom übertragen und verteilt, und die meisten Geräte verbrauchen Wechselstrom. Ein Wechselrichter wandelt den Gleichstromeingang der PV-Anlage in Wechselstrom um. Daher sind Wechselrichter für netzgekoppelte PV-Anlagen unerlässlich. Die Hauptfunktionen eines netzgekoppelten Wechselrichters sind:

- Wandelt den von der PV-Anlage erzeugten Gleichstrom in den vom Netz benötigten sinusförmigen Wechselstrom um und speist diesen in das Netz ein
- MPP-Tracking, um jederzeit die maximal mögliche Stromproduktion der PV-Anlage zu ermöglichen
- Überwachung von PV-Anlage und Netz
- Elektrische Sicherheits-/Schutzeinrichtungen - schalten sich ab, wenn das Netz abgeschaltet wird oder nicht innerhalb der vorgegebenen Parameter funktioniert, und verhindern die so genannte "Inselbildung".
- Display und Schnittstelle zur Überwachung der Ein- und Ausgabe.

Moderne Wechselrichter sind in der Regel mit einer hochentwickelten Leistungselektronik ausgestattet, die es PV-Anlagen ermöglicht, automatisch auf kritische Zustände bestimmter wichtiger Netzparameter zu reagieren, z. B. die schrittweise Reduzierung der Wirkleistungseinspeisung bei einem Anstieg der Netzfrequenz. Ein moderner Wechselrichter

reduziert die Auswirkungen auf das Netz auf ein Minimum und ist sogar in der Lage, die Netzstabilität durch die Bereitstellung von Blindleistung zu unterstützen.



Abbildung 24: Wechselrichter in einem Solarpark, Deutschland. Jeder Wechselrichter hat eine Nennleistung von 3.000 W und versorgt jeweils eines der im Hintergrund sichtbaren Arrays.

Netzgekoppelte Wechselrichter - einphasig und dreiphasig

Einphasige Wechselrichter liefern Wechselstrom an eine Phase eines Stromnetzes. Dreiphasige Wechselrichter liefern Wechselstrom an alle drei Phasen eines Stromnetzes. Bei kleinen Anlagen, in der Regel unter 5 kWp, werden in der Regel einphasige Wechselrichter verwendet. Dies liegt daran, dass eine Leitung ausreicht, um die von der PV-Anlage gelieferte Leistung aufzunehmen. Größere Anlagen verwenden in der Regel dreiphasige Wechselrichter (der von der PV-Anlage gelieferte Strom wird in drei Teile aufgeteilt, von denen jeder in eine der drei Phasen eingespeist wird), was mehr Spielraum bei der Systemdimensionierung bietet (Abbildung 25).

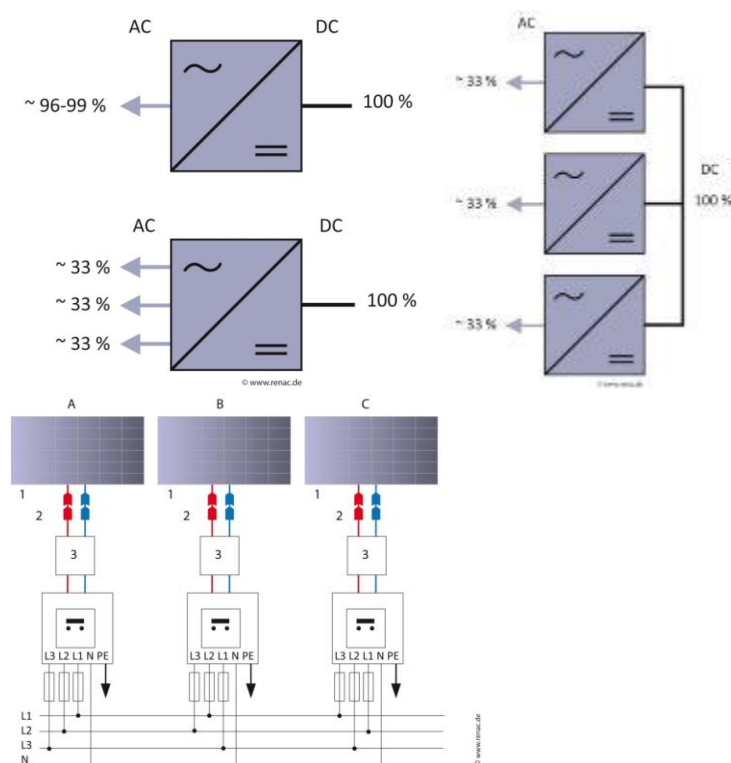




Abbildung 25: Einphasiger Wechselrichter (oben links), 3-phasiger Wechselrichter (unten links). 3 einphasige Wechselrichter, die in 3 Phasen einspeisen (Mitte). Drei 3-Phasen-Wechselrichter, die jeweils in 3 Phasen einspeisen (rechts).

Wechselrichterkonfigurationen / Wechselrichterkonzepte

Hinsichtlich der Konfiguration von Wechselrichtern für den Anschluss an PV-Anlagen gibt es im Wesentlichen drei verschiedene Typen: Zentralwechselrichter, String-Wechselrichter und Modul-Wechselrichter (Abbildung 26). Jedes Anschlusskonzept hat Vor- und Nachteile.

- **Zentralwechselrichter** verbinden mehrere Modulstränge miteinander. Die Nennleistung von Zentralwechselrichtern variiert von 100 - 500 kWp bis zu 2,5 - 5 MWp. Die physische Größe variiert von 0,5 m³ bis zu Wechselrichtern in Containergröße, die mit Kränen aufgestellt werden. Ihr Einsatz wird im Allgemeinen für sehr große Anlagen empfohlen, da das Preis/Watt-Verhältnis mit zunehmender Größe sinkt.
- **String-Wechselrichter** werden üblicherweise in kleinen und mittelgroßen Installationen eingesetzt, z. B. in Haushalten oder kleinen Freiflächenanlagen. String-Wechselrichter können im Freien installiert werden, wenn sie die Schutzart IP65 haben.
- **Modulwechselrichter**, der am wenigsten verbreitete Typ, sind kleine Wechselrichter, die sich auf der Rückseite der PV-Module oder in deren Nähe befinden. Der Hauptvorteil von Modulwechselrichtern besteht darin, dass sie die Leistung einzelner Module umwandeln und damit die Fehlanpassungseffekte verringern, die in Strings aus mehreren Modulen auftreten können. Ihr Einsatz ist derzeit noch nicht sehr verbreitet, nimmt aber zu, insbesondere in Situationen, in denen Mismatch-Effekte zu erwarten sind.

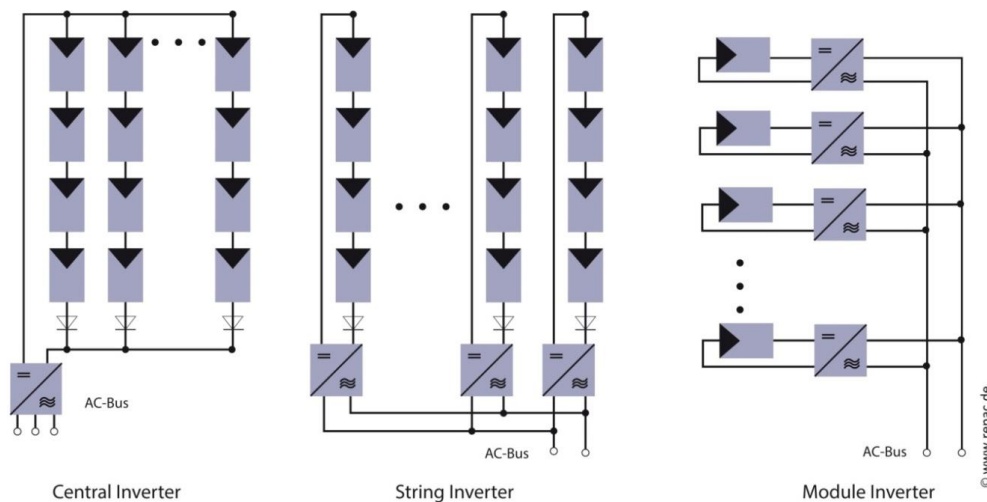


Abbildung 26: Verschiedene Wechselrichterkonfigurationen: Zentralwechselrichter (Multistring), Stringwechselrichter und Modulwechselrichter.



Abbildung 27: Drei 1.000 W SMA String-Wechselrichter auf dem Dach der RENAC in Berlin, Deutschland (links). SMA Sunny Central CP-Wechselrichter und SMA Transformer Compact Station, Deutschland (rechts) (Quelle: SMA Solar Technology AG).

Im Falle einer Störung wird nur der an diesen Wechselrichter angeschlossene Strang vom Netz genommen - ein Vorteil von Strangwechselrichtern gegenüber Zentralwechselrichtern. Siehe Anhang 4: Beispiel für ein Umrichterdatenblatt.

Wechselrichter für Dünnschicht-PV-Module

Dünnschicht-PV-Module haben andere Spannungseigenschaften als PV-Module auf Siliziumbasis. Wechselrichter für Dünnschichtmodule müssen einen größeren Eingangsspannungsbereich haben - die Differenz zwischen V_{oc} und V_{mpp} ist größer. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Dünnschichtmodule im Vergleich zu c-Si-PV-Modulen geringere Ströme und höhere Spannungen erzeugen.

Kabel

Es sind speziell entwickelte "PV-Kabel" oder "Solarkabel" erhältlich. Die genauen Einzelheiten der Gleichstromkabel für PV-Anlagen (Abbildung 28) sind in den nationalen Vorschriften und Verordnungen festgelegt.

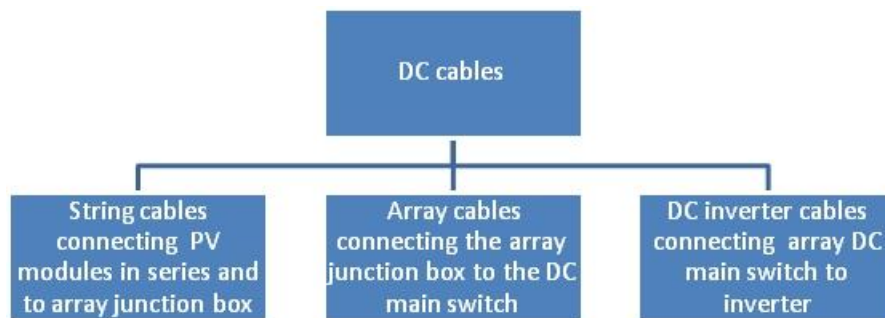


Abbildung 28: Gleichstromkabel in netzgekoppelten PV-Anlagen.

Im Allgemeinen müssen Gleichstromkabel die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Erdschluss- und kurzschlussicher (doppelt isoliert)
- Temperaturklassen für Kabel, z. B. müssen im Vereinigten Königreich Kabel, die hinter einer PV-Anlage verlegt werden, für einen Temperaturbereich von mindestens -15 °C bis 80 °C ausgelegt sein. In den USA wird für Aufdachanlagen ein Temperaturbereich von 90 °C empfohlen. Unterschiedliche Verkabelungsmethoden haben ebenfalls Einfluss auf die erforderlichen Temperaturwerte der Kabel. Auch die Temperaturbereiche, denen die Kabel ausgesetzt werden dürfen, sind in den verschiedenen Ländern sehr unterschiedlich (ca. -40 °C bis 120 °C).
- UV-beständig und feuchtigkeitsbeständig bei Außenaufstellung
- Hochspannungsbereich (bis zu 1.000 V_{DC})
- Robust, aber flexibel
- Flammhemmend, mit geringer Toxizität im Brandfall, halogenfrei
- Geringe Kabelverluste (Spannungsabfall), bis zu 1 % (Verlust % hängt von der Konstruktion ab)
- Leitermaterial - Kupfer (am gebräuchlichsten), Aluminium im Allgemeinen nicht zulässig, außer in besonderen Situationen
- Isoliermaterial - thermoplastischer Kunststoff (am häufigsten).

PV-Anlagen-Sicherungen/Leistungsschalter

In den nationalen Vorschriften ist festgelegt, ob und wann Sicherungen und Sicherungsautomaten in diesen Stromkreisen zu verwenden sind, und es wird angegeben, welcher Typ verwendet werden muss oder nicht zulässig ist (z. B. sind polarisierte DC-Sicherungsautomaten in einigen Ländern wegen der damit verbundenen Gefahren in PV-Anlagen nicht mehr zulässig). Wenn mehr als drei Strings parallel geschaltet sind, sind im Allgemeinen Strangsicherungen erforderlich.

DC-Haupttrennschalter/Isolator

Er muss für Gleichstrom ausgelegt sein (für Spannung und Strom gemäß den nationalen Vorschriften) und in der Lage sein, die bei -10 °C gemessene *Spannung_{oc}* sowie einen Strom vom 1,25-fachen des *I_{sc}* zu schalten/isolieren. Er muss zweipolig sein, d. h. der Plus- und Minuspol werden gleichzeitig geschaltet. Beachten Sie, dass das Schalten von Gleichstrom andere technische Anforderungen stellt als das Schalten von Wechselstrom, da Gleichstrom beim Schalten zur Lichtbogenbildung neigt.

Einige Hersteller von Wechselrichtern integrieren ihre eigenen DC-Freischnalter/Isolatoren in den Wechselrichter oder bieten auf der Grundlage der zulässigen Eingänge des Wechselrichters passende Geräte an. Ein DC-Trennschalter/-Isolator kann auch in der PV-Anschlussdose/Combiner Box untergebracht werden. DC-Leitungsschutzschalter können (bei den in den nationalen Vorschriften festgelegten Nennwerten und unter den dort festgelegten Bedingungen) ebenfalls als DC-Freischnalter/Trenner verwendet werden.

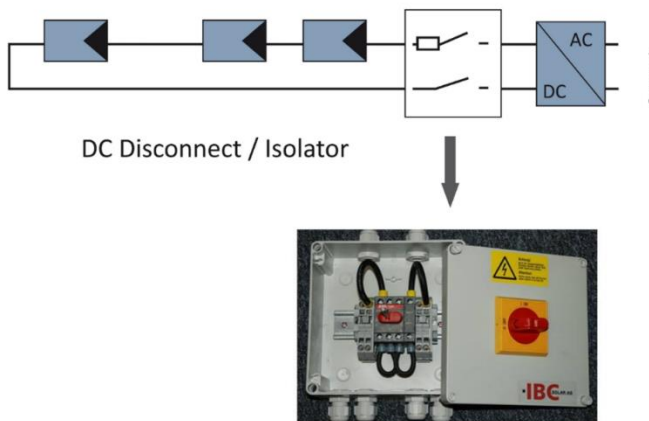


Abbildung 29: Der DC-Hauptschalter/Isolator ist zwischen dem PV-Generator und dem Wechselrichter installiert.

PV-Generatoranschlusskästen/Verbindungskästen

Eine schematische Darstellung und ein interner Überblick über eine Abzweigdose sind unten zu sehen (**Error! Reference source not found.**).

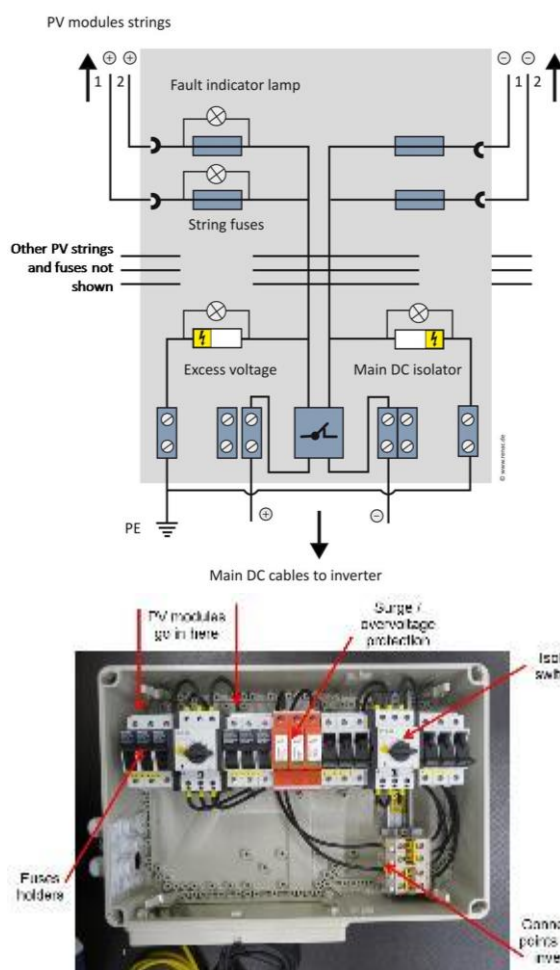


Abbildung 30: Schematische Darstellung eines PV-Generator-Anschluss-/Kombinationskastens (links). Innenansicht eines PV-Generatoranschlusskastens (rechts).

Die Gleichstromkabel von den Sub-Arrays werden auf der linken Seite eingespeist, und das Hauptgleichstromkabel tritt auf der rechten Seite aus. Das rote Gerät ist der Überspannungsschutz. An dieses Modell können sechs PV-Arrays angeschlossen werden, 3 auf einer Seite (des roten Überspannungsschutzgeräts) und 3 auf der anderen Seite. Beachten Sie, dass jede Seite mit sechs Sicherungen ausgestattet ist, 2 Sicherungen für jede Leitung der PV-Anlagen, die in das Gerät eingespeist werden. Es gibt 2 DC-Trennschalter/Isolatoren, einen für jeden Satz von 3 PV-Arrays. Es sind auch viele andere Konfigurationen möglich.

In größeren Anlagen, wie z. B. in Solarparks oder -anlagen, können mehrere PV-Gruppenanschlusskästen/Kombinationskästen verwendet werden. Dies bedeutet, dass Kabel mit kleinerem Querschnitt, Kabellängen und die Komplexität von Kabelgräben, die quer durch einen Solarpark verlaufen, reduziert werden können.

Zähler in netzgekoppelten Anlagen

Zähler in netzgekoppelten Anlagen sind erforderlich, um die ins Netz eingespeiste Energie zu ermitteln. Sie werden in der Regel in der Nähe des Verbrauchszählers (falls vorhanden) installiert. Andernfalls muss das Versorgungsunternehmen zunächst einen Zähler am

Einspeisepunkt installieren. Welche Art von Zähler benötigt wird, hängt von der Größe der PV-Anlage, der Art der Vergütungsregelungen (FiTs, Net Metering) und den Anforderungen des Versorgungsunternehmens ab (dies ist von Land zu Land und von Versorgungsunternehmen zu Versorgungsunternehmen unterschiedlich). Einige Beispiele für Zählermodelle (Abbildung 31):

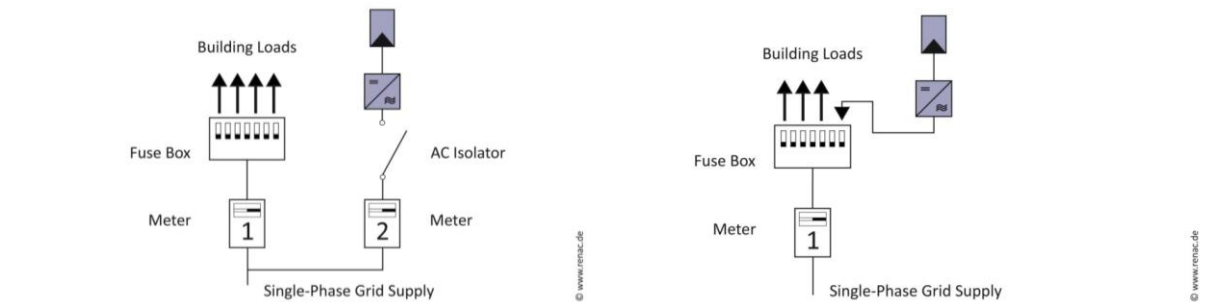


Abbildung 31: Zählerkonfiguration - (links) einphasige Versorgung, (rechts) einphasige Konfiguration.

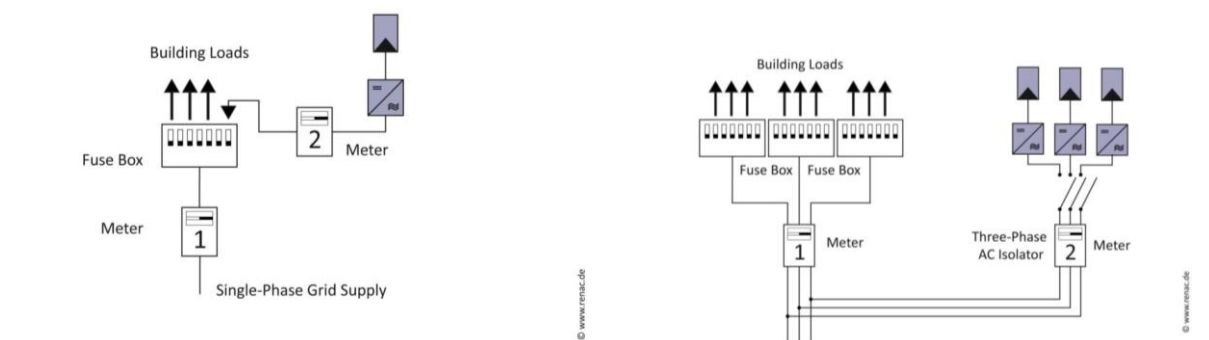


Abbildung 32: - Zählerkonfiguration - (links) einphasige Konfiguration, (rechts) dreiphasige Versorgung.

Bei Abbildung 31 (links) erfolgt der Netzanschluss der PV-Anlage direkt an den eingehenden Netzanschluss. Zähler 1 zählt die Anzahl der vom Netz bezogenen elektrischen Einheiten und Zähler 2 die Anzahl der ins Netz eingespeisten elektrischen Einheiten. Der gesamte von der PV-Anlage erzeugte Strom wird an das Netz verkauft. Wird in Einspeisetarifsystemen (FiT) verwendet. Rechts erfolgt der Anschluss der PV-Anlage an das Netz über einen Sicherungskanal im Hauptsicherungskasten des Gebäudes. Der einzelne Zähler ist ein Import-Export-Zähler (bidirektional). Es wird nicht aufgezeichnet, was von der PV-Anlage erzeugt wird, sondern nur, was ins Netz eingespeist und aus dem Netz verbraucht wird. Geeignet für Net Metering.

In Abbildung 32 (links), Anschluss der PV-Anlage erfolgt der Anschluss an das Netz über einen Sicherungskanal im Hauptsicherungskasten des Gebäudes. Zähler 2 zählt die Anzahl der von der PV-Anlage erzeugten Einheiten. Zähler 1 ist ein Import-Export-Zähler. Er ist für das Net-Metering geeignet. Auf der rechten Seite sind 3 große PV-Anlagen direkt an den eingehenden Netzanschluss angeschlossen. Zähler 1 ist ein dreiphasiger Zähler, der die Anzahl der aus dem Netz entnommenen elektrischen Einheiten zählt, und Zähler 2 ist ein dreiphasiger Exportzähler, der die Anzahl der ins Netz eingespeisten Einheiten zählt. Wird in Einspeisetarifsystemen (FiT) verwendet.

Blitzschutz und Überspannungsschutz

Es gibt zwei sich ergänzende Arten von Systemen (Abbildung 33):

- Externe Systeme schützen vor direkten Einschlägen; Blitzableiter (z. B. Blitzschutzstangen) ziehen den Blitz an und lassen ihn in die Erde fließen.
- Interne Systeme schützen vor indirekten Einschlägen, die Überspannungen verursachen können (dazu gehören elektronische Überspannungsschutzgeräte und Maßnahmen wie die korrekte Bündelung von Gleichstromkabeln und Erdungsmaßnahmen).



Abbildung 33: Äußerer und innerer Blitzschutz. Äußerer Blitzschutz (links) - Blitzableiter auf dem Dach, Berlin, Deutschland. Innerer Blitzschutz/Überspannungsschutz (rechts) - Überspannungsschutz Typ 2 (rotes Gerät in der Mitte des Bildes) von www.dehn.de in der PV-Anschluss-/Verbindungsdose.

Ist an einem Gebäude bereits ein äußeres Blitzschutzsystem vorhanden, muss die Montagekonstruktion des PV-Generators eventuell in dieses integriert werden. Die zu treffenden Maßnahmen hängen von der jeweiligen Situation ab und müssen von Fall zu Fall beurteilt werden.

Möglicherweise ist Fachwissen erforderlich - ein falsch installiertes Blitzschutzsystem kann die Risiken sogar erhöhen.

Auch wenn der Überspannungsschutz im Allgemeinen nicht durch die örtlichen Elektrovorschriften vorgeschrieben ist, kann er in einigen Situationen erforderlich sein. Er ist entsprechend der Netzkonfiguration zu wählen (in Deutschland meist TN-S und TT). In Deutschland hängt es von der Blitzschutzanlage und anderen Faktoren ab, ob ein Überspannungsableiter Typ 2 ausreichend ist.

Transformatoren und PV-Umspannwerke

Es gibt drei Hauptbauarten von Transformatoren/Umspannwerken:

- In einem Metallgehäuse untergebrachte Transformatoren, die auf einer Betonplatte montiert sind; die elektrischen Anschlüsse sind unterirdisch verlegt; diese Transformatoren sind häufig in Wohngebieten, Gewerbe- und Industriegebäuden zu finden.
- Innentransformatoren, die in (bestehenden) Gebäuden installiert sind.

- Transformatoren in eingezäunten Gehäusen, die Freileitungen speisen; der Platzbedarf ist höher als bei den anderen Typen.

Bei den Transformatoren kann es sich um **Trockentransformatoren** handeln, die durch Belüftung gekühlt werden und in Innenräumen aufgestellt werden können und keine Leckwanne benötigen, oder um **flüssigkeitsgefüllte Transformatoren**, die eine Wanne zur Aufnahme von Öl bei Leckagen benötigen und im Freien aufgestellt werden müssen.

In der Regel wird in PV-Anlagen, die an das Mittelspannungsnetz angeschlossen sind, ein dreiphasiger, flüssigkeitsgefüllter Transformator installiert, der auf dem Boden montiert wird.

Bewertung der Solarressourcen und Standortbestimmung



Daten über die Sonneneinstrahlung werden mit einer Vielzahl von Instrumenten erfasst. Der Klassiker ist das Pyrometer, das mit einer Genauigkeit von $\pm 0,8 \%$ extrem genau ist. Die von Drittanbietern gelieferten Klimadaten wurden in der Regel mit einem horizontal montierten Instrument aufgezeichnet, so dass es den gesamten Himmel "sieht". Das bedeutet, dass die erfasste Strahlungsart die Globalstrahlung ist, mit den Komponenten direkte und diffuse Strahlung.

Es gibt einige Handmessgeräte, die sofortige Messwerte liefern können. Da die Daten jedoch über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr gesammelt werden müssen, um von Nutzen zu sein (wenn möglich länger, da die Sonneneinstrahlung von Jahr zu Jahr um bis zu 20 % schwanken kann), wird dies nur selten von Planern oder Installateuren durchgeführt.

Abbildung 34: Handgehaltener Solarstromzähler.

Handmessgeräte können jedoch für Stichproben und als Lehrmittel nützlich sein. Dieses Handmessgerät (Abbildung 34) zeigt eine Sonneneinstrahlung von 935 W/m^2 an.

Der geplante Standort für eine netzgekoppelte PV-Anlage muss bei der Dimensionierung und vor der Installation sorgfältig untersucht werden. Eine Vor-Ort-Besichtigung eines potenziellen Standorts ist unerlässlich, um festzustellen, ob das Gebäude oder das Gelände für eine PV-Anlage geeignet ist. Die Verwendung von Formularen zur Standortbestimmung wird empfohlen. Ein umfassender Erhebungsbogen enthält u. a. folgende Angaben:

- Kundendaten, Standort
- Möglicher Standort für PV-Module; Details zum Dach (Art, Winkel, Ausrichtung, Höhe, Abstand zum Stromanschluss des Gebäudes), wenn die Module auf dem Dach montiert werden sollen; mögliche Schattenquellen durch Bäume, nahe gelegene Häuser, Schornsteine, Freileitungen oder andere Strukturen; mögliche Zugangsprobleme (für Installation und Wartung)
- Lokale Umweltfaktoren wie Staub, Wind, Regen, Schnee, Salzwasser, Salznebel, Feuchtigkeit, Temperatur
- Möglicher Standort für Wechselrichter, PV-Anschluss-/Verbindungsboxen



- Angaben zur vorhandenen elektrischen Anlage (Angaben zur Stromversorgung - V_{AC} , Hz, Hauptsicherung, Anzahl der Phasen, Standort des Hauptsicherungskastens, Zähler, Haupteingang, Erdungsanlage usw.)
- Vorhandensein eines Blitzschutzsystems;
- Name des Versorgungsunternehmens, sonstige Angaben
- Eine Skizze des Standorts mit allen relevanten Gebäudeabmessungen und den Abständen zwischen ihnen, Bäumen und anderen Strukturen sowie der Nord-Süd-Ausrichtung der Gebäude, geschätzte Kabellängen
- Potenzieller Haushalt
- Zweck des Systems (FiTs? Net-Metering? Lastreduzierung? Notstrombedarf usw.?).

Zu den für eine Standortvermessung erforderlichen Geräten gehören: Kompass (es ist wichtig, den Kompass an die Deklination des Erdmagnetfelds anzupassen), Maßband, Kamera, ein geeignetes Instrument zur Schattenanalyse. Häufig werden auch GPS-Geräte verwendet, insbesondere bei großen PV-Anlagen.

Für **größere Solarparks** werden zusätzliche Informationen benötigt. Zu den zu behandelnden Fragen gehören:

- Wie viel Landfläche ist verfügbar?
- Was sind die möglichen Ursachen für die Beschattung des Standorts?
- Ist das Gelände uneben? Muss es nivelliert werden?
- Welche Genehmigungen sind für die Bebauung des Grundstücks erforderlich? Welche Anforderungen muss der Eigentümer der Anlage erfüllen, um das Projekt zu bauen, zu betreiben und zu warten?
- Welche Umweltvorschriften müssen bei dem Projekt beachtet werden?
- Gibt es Zugang zu einem Umspannwerk für den Anschluss an das Stromnetz?

Die Verschattungsanalyse ist für netzgekoppelte Systeme wichtig, um festzustellen, ob ein Standort zu jeder Jahreszeit verschattet ist. Es gibt eine Reihe von Instrumenten, die mit Hilfe von Software abschätzen, wie stark sich die Verschattung auf die Leistung einer PV-Anlage auswirken würde. Ideal und immer empfehlenswert ist jedoch ein Standort ohne jegliche Verschattung.

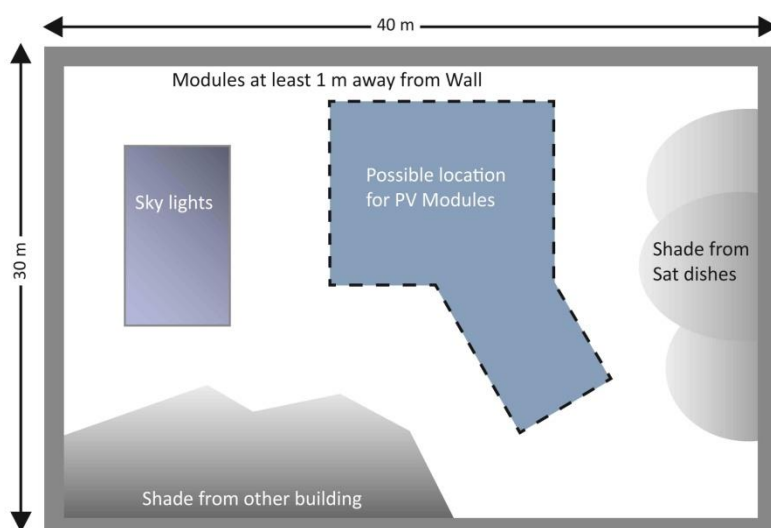




Abbildung 35: Verschattungsanalyse eines Flachdachs in einer Stadt. Der Solar Pathfinder wird für den Einsatz auf einem Flachdach eingerichtet.

Beispiele für Instrumente sind der Solar Pathfinder (www.solarpathfinder.com), das Suneye (www.solmetric.com) oder der HORIcatcher (www.meteotest.ch). Videos und weitere Informationen finden Sie auf den Websites der Hersteller. Diese Instrumente funktionieren sowohl bei sonnigem als auch bei bewölktem Wetter.

Unter Abbildung 35 könnte das im Bau befindliche Gebäude im Hintergrund in Zukunft auch als Schattenspender dienen. Grobe Zeichnung eines möglichen geeigneten Standorts für PV-Module - dies gibt dem Planer eine gute Vorstellung davon, was möglich sein könnte. Wenn der Standort vielversprechend aussieht, muss eine detailliertere und genauere Zeichnung angefertigt werden.

Planung und Dimensionierung von netzgekoppelten PV-Anlagen

Der gesamte Prozess der Planung, Installation und Inbetriebnahme eines Systems umfasst in der Regel die folgenden Schritte:

- Einholung aller erforderlichen Genehmigungen
- Gestaltung des Systems
- Physische Installation des Systems
- Inspektion und Prüfung, Inbetriebnahme der Anlage
- Endgültiger Anschluss an das Stromnetz
- Übergabe an den Kunden.

Dieser Abschnitt behandelt die Auslegung und Dimensionierung von netzgekoppelten PV-Anlagen. Sofern nicht anders angegeben, wird davon ausgegangen, dass es sich bei den besprochenen Anlagen um Systeme handelt, die an das "Niederspannungs"-Verteilungsnetz (typische Stromversorgung von Gebäuden) angeschlossen sind, und nicht an das "Mittelspannungs"-Netz (an das große Solarparks angeschlossen sind).

Erste Dimensionierung einer netzgekoppelten PV-Anlage

Bevor eine detaillierte Dimensionierung der zu installierenden PV-Anlage vorgenommen wird, müssen ungefähre Schätzungen vorgenommen werden. PV-Anlagen sollten genügend Abstand zu Dachrändern und Straßen haben, um:

- verhindern, dass die Windlast die Module destabilisiert (die Windlast ist in der Nähe der Dachränder höher);
- die Staubbildung zu reduzieren;
- schützen das System vor Diebstahl, Beschädigung durch Tiere und Beschattung durch vorbeifahrende Personen und Fahrzeuge;
- Erhöhung der Sicherheit für Installateure und Wartungspersonal der PV-Anlage (z. B.: bei Freiflächenanlagen ein Mindestabstand von 2 m zu Straßen; bei Anlagen, bei denen die Module parallel auf einem Schrägdach montiert werden, ein Mindestabstand von 10-20 cm zu den Dachrändern).

Abbildung 36 zeigt, dass Schatten, Dachkonstruktionen und die Notwendigkeit, sich von den Dachrändern fernzuhalten, dazu führen, dass viel weniger Platz zur Verfügung steht, als oft

zunächst angenommen. Verschattungen können auch durch benachbarte Gebäude entstehen. Neue benachbarte Gebäude, die nach der Installation der PV-Anlage errichtet wurden, sind ebenfalls eine mögliche Ursache für Verschattungen.

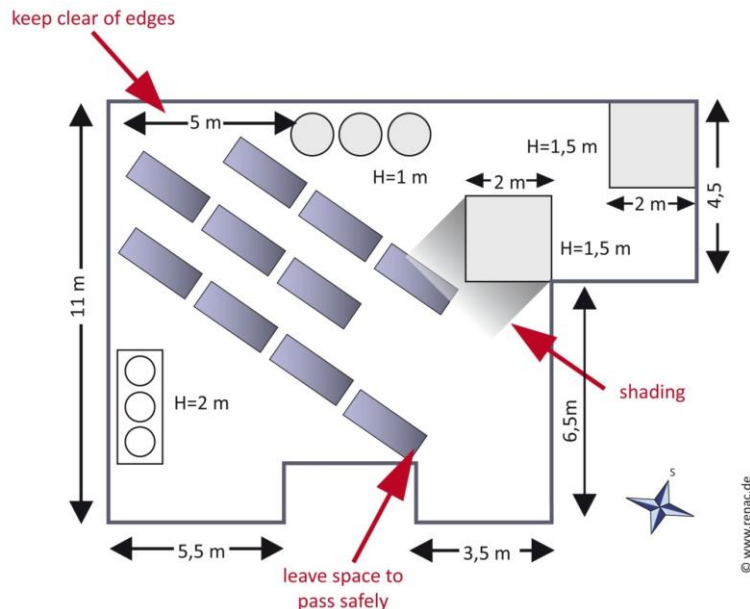


Abbildung 36: Diagramm, das zeigt, wo PV-Anlagen auf einem Flachdach angebracht werden können.

Gestell-/Tischanordnung/Größe für große PV-Anlagen

Sehr große PV-Anlagen, insbesondere für Solarparks, die in das Mittelspannungsnetz einspeisen, werden auf freistehenden Konstruktionen, so genannten "Racks" oder "Tables", montiert, die im Boden befestigt werden, in der Regel in Betonfundamenten oder durch in den Boden gerammte Pfosten.

Die Anzahl der Module, die Anzahl der Reihen und der Abstand zwischen den Modulen (max. ca. 0,02 m) sind die entscheidenden Faktoren für die Berechnung der Größe eines Standard-Racks oder eines Modultisches. Die Rackgrößen variieren, wenn die Module horizontal (Querformat) oder vertikal (Hochformat) montiert werden.

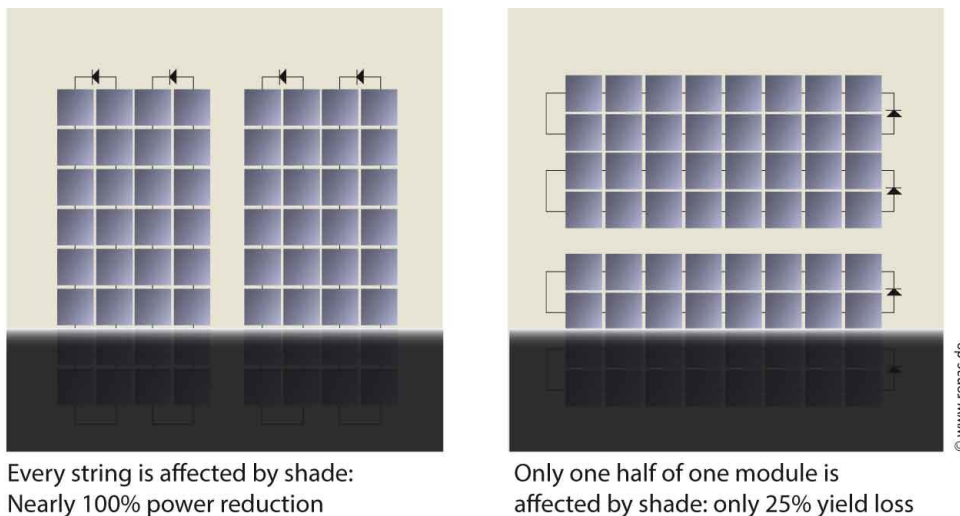


Abbildung 37: Beschattung und Anordnung der PV-Module.

Modulanordnung:

- Die Module werden oft im Querformat installiert, um die Schattenwirkung zu minimieren.
- Das Querformat ermöglicht mehr Flexibilität bei der Anzahl der Zeilen pro Tabelle
- Die Anzahl der Reihen in einem Gestell hängt von vielen Faktoren ab (Windlasten, Beschattung usw.), liegt aber normalerweise zwischen 2 und 5 Reihen pro Tisch.
- Die Anordnung im Hochformat ermöglicht jedoch eine bessere Befestigung am Montagesystem, da sich die Klemmen an der Längsseite eines PV-Moduls befinden und weniger mechanische Belastung vorhanden ist.

In Abbildung 37(links) ist jeder String von der Verschattung betroffen. Je nachdem, wie viel Licht die Verschattung abhält, kann bei starker Verschattung fast die gesamte potenzielle Leistung verloren gehen. Auf der rechten Seite ist nur eine Hälfte eines Moduls von der Verschattung betroffen, bei sehr starker Verschattung sind nur etwa 25 % Ertragsverluste zu erwarten.

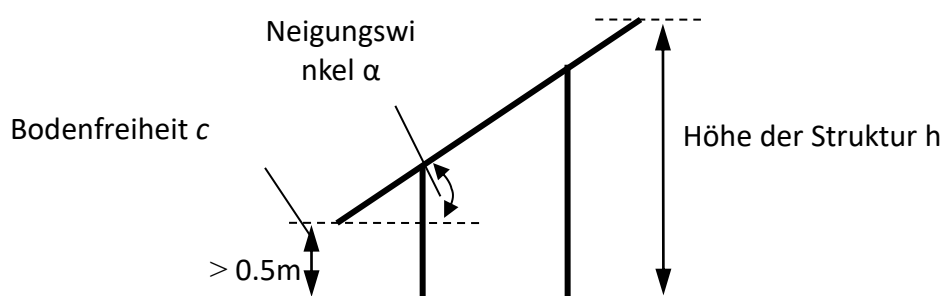


Abbildung 38: Bodenfreiheit.

Der Mindestabstand zwischen der Unterseite des untersten Moduls und dem Boden sollte in der Regel mehr als 0,5 m betragen, um eine gute Belüftung zu gewährleisten, aber auch um eine Beschattung durch wachsende Vegetation oder Verschmutzung durch Schmutzwasser bei starkem Regen zu vermeiden.



Im Allgemeinen werden die Module so geneigt und ausgerichtet, dass sie den größtmöglichen Jahresertrag erzielen. Der ideale Neigungswinkel hängt vor allem von der geografischen Breite ab. Der optimale Neigungswinkel bzw. die optimale Ausrichtung kann mit Software wie PVsyst, PV*Sol oder FLOW berechnet werden. Das Online-Programm PVGIS kann eine Analyse des optimalen Neigungswinkels/der optimalen Ausrichtung für Standorte in Europa, dem Nahen Osten, Afrika und Südostasien erstellen. Weitere Faktoren, die berücksichtigt werden müssen, sind Belüftung, Wind und Schneelasten. Oft werden Neigungswinkel gewählt, die weit unter dem optimalen Neigungswinkel für einen Standort liegen, um die Gesamtkapazität (kWp) zu erhöhen, die an dem Standort installiert werden kann, und um Abschattungseffekte und Windlasten zu verringern.

Rack-Verkabelung

Die Verkabelung macht einen beträchtlichen Teil der Gesamtkosten für die elektrische Systembilanz (BOS) aus. Das Layout und die Positionierung der Wechselrichter sollten optimiert werden, um die Abstände zu den Verteilerkästen und den Wechselrichtern und damit die erforderliche Kabelmenge zu verringern. Die Schmetterlingsverdrahtung ist ein ziemlicher Standard.

Eine symmetrische Verkabelung ist aus Gründen der Standardisierung und des Ausgleichs der elektrischen Verluste immer von Vorteil. Das kann bedeuten, dass alle Module einer Tischreihe einen Strang bilden, oder alle Module des gesamten Tisches; oder zwei benachbarte Reihen in zwei Modultischen bilden einen Strang. Auf diese Weise wird die PV-Anlage symmetrisch aufgebaut, was zur Vereinfachung von Planung, Kauf, Installation, Überwachung und Wartung beiträgt. Dies kann auch zu einer besseren elektrischen Leistung des Systems führen, und die Leistungsdaten können leicht zwischen verschiedenen Teilen der PV-Anlage verglichen werden.

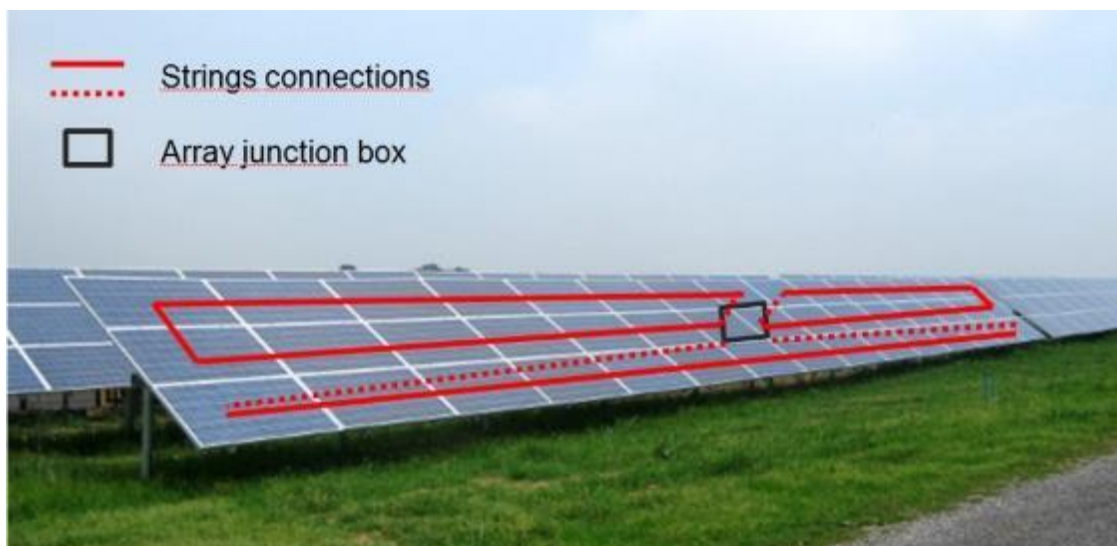


Abbildung 39: Anordnung der Schmetterlingsverkabelung im Rack/Tisch.



Auswahl und Dimensionierung von Wechselrichtern

Die Dimensionierung/Abstimmung von PV-Modulsträngen mit Wechselrichtern hängt weitgehend davon ab, welche PV-Module und welche Wechselrichter verfügbar sind - nicht alle Module und alle Wechselrichter sind möglicherweise immer und überall verfügbar. Wenn die PV-Modulstränge nicht richtig auf den Wechselrichter abgestimmt sind, können Wechselrichter beispielsweise durch eine zu hohe Eingangsgleichspannung beschädigt werden oder sie arbeiten nicht effizient, schalten sich beispielsweise ständig ab oder schalten sich ab, wenn die Eingangsgleichspannung zu niedrig ist.

Die Stromversorgungsunternehmen, an deren Stromnetz ein Wechselrichter angeschlossen werden soll, haben Anforderungen, die erfüllt werden müssen. Auch die Elektrovorschriften enthalten Anforderungen an die Art und Größe des Wechselrichters. Die Hersteller von Wechselrichtern geben in der Regel Empfehlungen für die Auswahl und Dimensionierung. Diese beiden Informationsquellen sollten herangezogen werden.

Die Entscheidung für einen Wechselrichter sollte auf drei Faktoren beruhen:

1. **Wirkungsgradkurve des Wechselrichters:** Wie stark sinkt der Umwandlungswirkungsgrad, wenn der Betrieb auf Teillast umgestellt wird?
2. **Verteilung der Sonneneinstrahlung:** Wie groß ist der PV-Leistungsbereich und wie oft treten bestimmte Einstrahlungsbedingungen auf? Der zweite Teil dieser Frage bestimmt, wie stark der PV-Generator überdimensioniert werden kann und wie oft der Wechselrichter abgeschaltet wird.
3. **Temperaturkoeffizienten der Module:** Die Modultemperatur beeinflusst die Spannung und die Leistungsabgabe des PV-Generators.

Beispiel: Auswahl der Anzahl von Wechselrichtern für einen Solarpark

Geplant ist ein Solarpark mit 20 MWp. Es wird zunächst davon ausgegangen, dass 40×500 kW Zentralwechselrichter installiert werden. Für einen Wechselrichter von 500 kW würde das eine PV-Anlage mit folgendem Leistungsbereich bedeuten: $80\% (400 \text{ kWp}) < P_{DC \text{ max}} / P_{\text{mpp stc}} < 120\% (600 \text{ kWp})$. Dies bedeutet, dass an jeden 500-kW-Wechselrichter unterschiedliche Konfigurationen von Modulen zwischen 400 kWp und 600 kWp angeschlossen werden können oder die Anzahl der Wechselrichter geändert werden kann. Um zur endgültigen Anlagenkonfiguration zu gelangen, müssen verschiedene Konfigurationen von Modulen und Wechselrichtern ausprobiert werden, bis die optimale Gesamtkonfiguration unter Berücksichtigung aller Faktoren erreicht ist. In diesem Fall könnten beispielsweise 34 Wechselrichter mit einer Gesamtnennleistung von 17 MW ausreichen, um die 20 MWp PV-Anlage zu realisieren (118% Auslastung der einzelnen Wechselrichter).

Dimensionierung der PV-Module und Abstimmung mit dem Wechselrichter

Die beiden wichtigsten Fragen, die bei der Abstimmung von Strings und Wechselrichtern zu beantworten sind, lauten:

- Wie viele Module können in dem/den Strang(en), die an einen Wechselrichter angeschlossen werden sollen, in Reihe geschaltet werden?
- Wie viele Strings können parallel an einen Wechselrichter angeschlossen werden?



Wenn die Anpassung nicht korrekt durchgeführt wird, kann das System nicht die erwartete Leistung erbringen oder der Wechselrichter kann beschädigt werden. Die meisten großen Anbieter von PV-Wechselrichtern stellen ihren Kunden kostenlose Software zur Verfügung, mit der berechnet werden kann, wie viele eines bestimmten PV-Moduls in einem String an einen bestimmten Wechselrichter angeschlossen werden können.

Die folgenden Informationen werden benötigt:

- Technische Daten der PV-Module, die an den Wechselrichter angeschlossen werden sollen
- Technische Daten des Wechselrichters, der an den String angeschlossen werden soll, insbesondere:
 - Gleichspannungseingangsbereich des Wechselrichters
 - Reichweite des Maximum Power Point Trackers (Mindest- und Höchstwerte)
 - maximaler Eingangsstrom
- Maximale und minimale Tagestemperaturen am Standort, aus denen die maximalen und minimalen Zelltemperaturen berechnet werden.

Die einzelnen Schritte sind wie folgt:

1. Berechnen Sie die maximale Anzahl von Modulen, die an einen bestimmten Wechselrichter angeschlossen werden können. Um dies zu tun, muss man:
 - Berechnen Sie die maximale Spannung V_{DC} , die ein String erzeugen kann, indem Sie die niedrigste erwartete Temperatur bei Tageslicht verwenden;
 - Ermitteln Sie den - auch leicht temperaturabhängigen - maximalen Kurzschlussstrom I_{sc} des an den Wechselrichter anzuschließenden PV-Generators; der Eingangsnennstrom des Wechselrichters muss höher sein als der maximal mögliche Kurzschlussstrom des/der Strings
2. Optimieren Sie die Stringlänge so, dass der Wechselrichter die meiste Zeit innerhalb seines MPP-Bereichs arbeitet.

Die maximale Anzahl von Modulen, die in einer Reihenschaltung miteinander verbunden werden können, ist begrenzt durch:

- die auf dem Datenblatt des Moduls angegebene maximale Systemspannung
- die maximal zulässige Eingangsspannung des Wechselrichters.

Bestimmung der maximalen V_{DC} einer Zeichenkette

Zur Bestimmung der max. V_{DC} , die ein Wechselrichter von einer Reihe von PV-Modulen erhält, können die folgenden Formeln verwendet werden.



Die maximale Spannung, die **ein Modul** erzeugt, beträgt:

$$V_{oc \max \text{ mod}} = V_{oc} + [(T_{\min \text{ cell}} - 25^{\circ}\text{C}) \times TC_{V_{oc}}]$$

Die maximale Spannung, die **eine Reihe von Modulen** am Wechselrichtereingang erzeugt, beträgt:

$$V_{oc \max \text{ at inv}} = V_{oc \max \text{ mod}} \times N_{\text{modules per string}}$$

Die maximal zulässige Eingangsspannung des Wechselrichters muss geringer sein als die maximale Spannung, die der PV-Modulstrang erzeugen kann:

$$V_{\text{input max inv}} > V_{oc \max \text{ at inv}}$$

wobei

$V_{oc \max \text{ mod}}$ ist die maximale Leerlaufspannung V_{oc} , die ein einzelnes Modul erzeugen kann (bei der niedrigsten Temperatur während der Tageslichtstunden) [V]

$V_{oc \max \text{ at inv}}$ ist die maximale Spannung, die ein String am Eingang eines Wechselrichters erzeugt [V].

$N_{\text{Module pro String}}$ ist die Anzahl der Module pro String

$V_{\text{input max inv}}$ ist die maximal zulässige Eingangsspannung eines Wechselrichters und wird vom Hersteller angegeben [V]

$T_{\min \text{ Zelle}}$ ist die minimale Zelltemperatur, die während der Tageslichtstunden erwartet werden kann [$^{\circ}\text{C}$]

$TC_{V_{oc}}$ ist der Temperaturkoeffizient des Moduls für die Leerlaufspannung [$\%/^{\circ}\text{C}$].

Bestimmung des maximalen I_{DC} einer Zeichenkette

Der maximale Kurzschlussstrom $I_{sc \max}$ des Moduls bei der maximal zu erwartenden Zelltemperatur T_{\max} wird berechnet. Die höchste Zelltemperatur wird verwendet, da die Stromabgabe mit steigender Zelltemperatur leicht zunimmt.

Dieser maximale Kurzschlussstrom eines Moduls $I_{sc \max}$ entspricht dem maximalen Kurzschlussstrom I_{sc} eines jeden in Reihe geschalteten Strangs. Bei in Reihe geschalteten Modulen in einem Strang bleibt der Strom im gesamten Strang gleich.

Beachten Sie, dass der maximale Strom $I_{sc \max}$ für die Berechnung verwendet wird und nicht der niedrigere $I_{mpp \max}$. Es handelt sich um den maximal möglichen Strom, der an den Wechselrichter geliefert werden könnte, und nicht um den Strom unter normalen Betriebsbedingungen.

Während die Anzahl der in Reihe geschalteten Module in einem String die Spannungseigenschaften des Arrays/Teilarrays bestimmt, bestimmt die Anzahl der parallel geschalteten Strings die Stromeigenschaften des Arrays/Teilarrays.

Strings können parallel konfiguriert werden, solange der Maximalstrom des sich ergebenden größeren Arrays/Subarrays $I_{sc \max}$ niedriger bleibt als der DC-Nenneingangsstrom des Wechselrichters.

Anpassung des PV-Generatorstrings an den MPPT-Spannungsbereich des Wechselrichters

Neben der maximalen DC-Eingangsspannung des Wechselrichters sollten auch die höchste MPP-Spannung $V_{mpp \max}$ des Strings und die niedrigste Spannung $V_{mpp \min}$ des Strings



innerhalb des MPPT-Spannungsbereichs des Wechselrichters liegen. Dadurch wird sichergestellt, dass der Wechselrichter effizient arbeitet.

Wenn der Modultemperaturkoeffizient TC für V_{mpp} [mV/°C] angegeben ist, sollte er bei der Berechnung der angepassten V_{mpp} verwendet werden.

Wenn das Datenblatt des Moduls keinen Temperaturkoeffizienten für V_{mpp} enthält, kann der Modultemperaturkoeffizient für die Leerlaufspannung, TC_{VOC} [mV/°C], verwendet werden.

Die minimale Modulspannung am MPP beträgt:

$$V_{min \text{ mod mpp}} = V_{mpp} + [(T_{max \text{ cell}} - 25^{\circ}\text{C}) \times TC_{VOC}]$$

Die maximale Modulspannung am MPP beträgt:

$$V_{max \text{ mod mpp}} = V_{mpp} + [(T_{min \text{ cell}} - 25^{\circ}\text{C}) \times TC_{VOC}]$$

wobei

V_{mpp} ist die Spannung am Punkt maximaler Leistung für STC [V]

$V_{min \text{ mod mpp}}$ ist die V_{mpp} bei der niedrigsten Modultemperatur vor Ort [V]

$V_{max \text{ mod mpp}}$ ist die V_{mpp} bei der höchsten vor Ort gemessenen Modultemperatur [V]

$T_{max\text{-Zelle}}$ und $T_{min\text{-Zelle}}$ sind die Höchst- bzw. Mindesttemperaturen, die die Zellen erfahren haben [°C].

Beachten Sie, dass wir TC von V_{oc} und nicht TC von V_{mpp} verwendet haben, da wir davon ausgehen, dass letzteres nicht verfügbar ist.

Sowohl die höchste MPP-Spannung $V_{mpp \text{ max}}$ als auch die niedrigste Spannung $V_{mpp \text{ min}}$ des Arrays sollten in den MPPT-Eingangsspannungsbereich des Wechselrichters fallen.

Die Anzahl der Module in einem String wird also auch durch den MPPT-Bereich des Wechselrichters bestimmt. Der Spannungsbereich des Strings muss innerhalb dieses

Die Mindestspannung für MPP am Wechselrichtereingang beträgt:

$$V_{min \text{ mpp at inv}} = V_{min \text{ mod mpp}} \times N_{modules \text{ per string}} \times (100\% - \text{cable losses in } \%)$$

Die maximale Spannung für den MPP am Wechselrichtereingang beträgt:

$$V_{max \text{ mpp at inv}} = V_{max \text{ mod mpp}} \times N_{modules \text{ per string}}$$

wobei

$V_{min \text{ mpp at inv}}$ und $V_{max \text{ mpp at inv}}$ sind die Mindest- und Höchstspannungen für MPP am Wechselrichtereingang [V]

$V_{min \text{ mod mpp}}$ ist die V_{mpp} bei der höchsten am Standort auftretenden Modultemperatur [V]

$V_{max \text{ mod mpp}}$ ist die V_{mpp} bei der niedrigsten Modultemperatur vor Ort [V].

Bereichs liegen.

Die Energieverluste in der DC-Verkabelung zwischen dem String und dem Wechselrichter sollten ebenfalls berücksichtigt werden (vor allem, wenn die Kabel lang sind). Diese Verluste verringern die Stringspannung, die tatsächlich an den Wechselrichter geliefert wird. Wenn beispielsweise die $V_{mpp \text{ min}}$ innerhalb von 3 % der unteren Grenze des MPPT-Spannungsbereichs des Wechselrichters liegt und zusätzlich ca. 3 % Verlust in der DC-Verkabelung, die den String mit dem Wechselrichter verbindet, auftreten, dann ist es möglich, dass die am Wechselrichter anliegende Spannung unter den MPPT-Betriebsspannungsbereich des Wechselrichters fällt.



Beachten Sie, dass etwas höhere Werte von $V_{\max \text{ mpp at inv}}$ akzeptabel sind, da dieser Wert im Laufe der Zeit aufgrund der Degradation der PV-Module abnimmt.

Anzahl der Module, die in einem Strang verbunden werden

Die Anzahl der Module, die aneinandergereiht werden können, ergibt sich wie folgt:

$$N_{\text{modules per string}} = \begin{cases} \leq \frac{V_{\max \text{ mpp at inv}}}{V_{\max \text{ mod mpp}}} \\ \geq \frac{V_{\min \text{ mpp at inv}}}{V_{\min \text{ mod mpp}} \times (100\% - \text{cable losses in } \%) } \end{cases}$$

Normalerweise bevorzugt man eine gerade Anzahl von Modulen, um die Verdrahtung und das Rack-Design zu vereinfachen. → rundet auf eine gerade Anzahl auf oder ab, wenn dies die Designkriterien erfüllt (V_{oc} und V_{mpp}).

Kabeldimensionierung

Die Anforderungen an die Dimensionierung von Kabeln in netzgekoppelten PV-Anlagen ähneln denen in allen elektrischen Anlagen (wie in den nationalen Elektrovorschriften festgelegt), jedoch gibt es zusätzliche wichtige Anforderungen, insbesondere in Bezug auf die Art und Dimensionierung der Kabel von DC-Generatoren/Modulen.

DC-Kabel-Dimensionierung

Die DC-Stringkabel, das DC-Hauptkabel und die DC-Buskabel müssen dem maximalen Strom standhalten, der im PV-Generator erzeugt wird. Normalerweise wird das 1,25-fache von I_{sc} bei STC ausgelegt.

Die Spannungsabfälle in den Kabeln von PV-Anlagen müssen gering gehalten werden. Die IEC 60364-7-712 schreibt vor, dass die gesamten Leitungsverluste auf der Gleichstromseite 1 % nicht überschreiten sollten. Dies wird in die meisten nationalen Vorschriften übernommen. In den verschiedenen Ländern werden unterschiedliche Methoden zur Kabeldimensionierung verwendet: manchmal werden Diagramme, manchmal Tabellen oder definierte Berechnungsalgorithmen verwendet. Software (kostenlos von einigen PV-Unternehmen) kann ebenfalls sehr hilfreich sein.

AC-Kabeldimensionierung

Aus technischer Sicht ist ein maximaler Spannungsabfall von 2 % auf der Wechselstromseite - von den Wechselrichtern zum Einspeisepunkt - akzeptabel. Die AC-Verkabelung sollte internationalen Normen wie IEC 60364 für Niederspannungskabel, IEC 60502 für Kabel zwischen 1 - 36 kV und IEC 60840 für Kabel zwischen 30 - 150 kV entsprechen. Detaillierte Spezifikationen sind in den nationalen Vorschriften zu finden, ebenso wie Methoden zum Erreichen von Spannungsabfällen von <2%.

DC-Trennschalter, PV-Anschluss-/Verbindungskästen und String-Sicherungen

Alle Systeme benötigen einen oder mehrere DC-Trennschalter, und viele benötigen PV-Anschluss-/Verbindungsboxen und Strangsicherungen. Die Vorschriften müssen sorgfältig konsultiert und beachtet werden.



Konstruktion und Ertragssimulation mit Standardsoftware

Die Software kann verwendet werden für:

- Bewertung der Sonneneinstrahlung für den Standort der Anlage
- Dimensionierung und Entwurf von Systemen/Ausprobieren verschiedener Konfigurationen/Abstimmung von Komponenten, z. B. Modulen und Wechselrichtern/Modulauslegung/Dimensionierung
- Simulation der Systemleistung.

Kostenlose/Online-Tools:	PVGIS - Sonneneinstrahlungsdaten, Ertragsschätzungen, deckt Europa, Afrika, den Nahen Osten und Südostasien ab - http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis oder http://pvwatts.nrel.gov/ für Nordamerika, Mittel- und Südamerika. NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set, Daten zur Sonneneinstrahlung (auf einer horizontalen Ebene) für alle Standorte - http://eosweb.larc.nasa.gov/sse .
Kommerzielle Software (kostenlose Demoversionen):	PV*Sol - www.valentin-software.com/en . PVsyst - www.pvsyst.com FLOW von ESDAR Energy Services.
Unternehmenssoftware (in der Regel kostenlos für Kunden):	Normalerweise enthält sie nur Wechselrichter des Unternehmens, aber jedes Modul in der Datenbank kann ausgewählt werden. Prüfen Sie die Websites der Wechselrichterhersteller.

Kurs 1.3 Installation der baulichen und mechanischen Komponenten der PV-Anlage

Das übergeordnete Lernergebnis ist die Fähigkeit, bauliche und mechanische Komponenten von Photovoltaik-Solarsystemen zu installieren.

Einführung

Die Installationsrichtlinien für PV-Anlagen können von Land zu Land und sogar von Installationsunternehmen zu Installationsunternehmen unterschiedlich sein, hängen aber oft von der Erfahrung mit der Installation von PV-Anlagen ab.

In diesem Abschnitt werden die Installation der baulichen und mechanischen Komponenten, die verschiedenen Faktoren, die relevanten Normen und Vorschriften, die berücksichtigt werden müssen, behandelt. Sofern nicht anders angegeben, wird davon ausgegangen, dass es sich bei den besprochenen Anlagen um Systeme handelt, die an das "Niederspannungs"-Verteilungsnetz (typische Stromversorgung von Gebäuden) angeschlossen sind, und nicht an das "Mittelspannungs"-Netz (an das große Solarparks angeschlossen sind).

Vorbereitung/Planung

Die Installation (und Inbetriebnahme) von netzgekoppelten PV-Anlagen wird in den einzelnen Ländern durch unterschiedliche Vorschriften und Normen geregelt. Je nach Reifegrad der PV-Industrie in einem Land können diese sehr umfassend sein oder nicht.

Eine wichtige Aufgabe des Planers/Installateurs ist es, sich mit den örtlichen Gegebenheiten vertraut zu machen. Dies beinhaltet:

- Einholung der für den Netzanschluss erforderlichen Genehmigungen bei den Versorgungsunternehmen
- Es kann ein standardisiertes Formular zur Verfügung stehen; in der Regel müssen alle relevanten Systemspezifikationen vorgelegt werden, einschließlich der Unterlagen, die bescheinigen, dass es sich um einen zugelassenen Wechselrichtertyp handelt (die Bescheinigung wird oft als "Einheitsbescheinigung" bezeichnet)
- Einholung der erforderlichen Bau-/Planungsgenehmigungen, falls erforderlich
- Erforderliche Verfahren für den Anschluss an das Stromnetz
- Anforderungen an Inspektion, Prüfung und Zertifizierung
- Einhaltung der Anforderungen an die Verbrauchsmessung.

Wer darf eine PV-Anlage installieren?

Die Qualifikation des Personals, das an der Installation von PV-Anlagen beteiligt ist, und andere Voraussetzungen sind von Land zu Land unterschiedlich. Neben speziell ausgebildeten Elektrikern kann das Installationspersonal auch Dachspezialisten, Monteure und (bei größeren Anlagen auf Gebäuden) einen Statiker umfassen. In einem Land gibt es möglicherweise eine Reihe von Organisationen, bei denen die Installationsunternehmen/-



personale registriert sein müssen. Speziell geschultes und zertifiziertes Personal ist in der Regel erforderlich, wenn es um den Netzanschluss der Anlage geht.

Einbauanleitung

Bestehende internationale und nationale Normen und Vorschriften können sehr nützlich sein, aber man muss bedenken, dass sich elektrische Systeme von Land zu Land unterscheiden, ebenso wie die tatsächlichen Umgebungsbedingungen, unter denen die Systeme installiert werden.

Beachten Sie bei der Lektüre von Vorschriften und Leitfäden, dass eine Installationsmethode/Ausrüstung, die in einer bestimmten Situation zulässig ist (z. B. auf dem Dach einer Lagerhalle oder für einen auf dem Boden montierten PV-Generator), in einer anderen Situation möglicherweise nicht zulässig ist (z. B. in einem Wohnhaus/Krankenhaus, wo möglicherweise zusätzliche Sicherheitsanforderungen gelten).

Werkzeuge, Instrumente, sonstige Ausrüstung

Neben den üblichen Werkzeugen/Instrumenten, die bei Elektroinstallationsarbeiten verwendet werden, sind auch die folgenden erforderlich/empfohlen:

- Digitales Multimeter, geeignet zum Messen von bis zu 10/20 A_{DC}, robust; eine "Zangen"-Version kann ebenfalls sehr nützlich sein
- Saugnäpfe für die sichere Handhabung/Bewegung der Module
- Crimpwerkzeuge für Stringkabelverbinder
- Werkzeuge zur Befestigung von Muttern/Schrauben/Befestigungselementen an PV-Generator-Montagekonstruktionen.

In der Phase der Inbetriebnahme können weitere Spezialinstrumente erforderlich sein.

Überprüfung des gesamten Bau- und Installationsprozesses

PV-Modul-Montagesysteme für netzgekoppelte Anlagen

Für netzgekoppelte PV-Anlagen gibt es ein umfangreiches Angebot an kommerziell erhältlichen Montagekonstruktionen. Diese können in die folgenden Kategorien eingeteilt werden als Systeme für

- Schräge Dächer
- Flachdächer (freistehend, in der Regel durch Gewichte gehalten oder mit dem Dach verbunden; letztere Option wird gewählt, wenn das Dach das zusätzliche Gewicht der Ballastierung nicht tragen kann)
- Felder/Freiflächen (bodenmontierte Strukturen, freistehend)
- Integration in das Dach (Module, Ziegel und Schiefer)
- Gebäudefassaden
- Nachführung von PV-Anlagen (automatisch, ein- oder zweiachsig).

Die Anlagenstrukturen müssen so konzipiert und installiert werden, dass sie den zu erwartenden Windlasten standhalten. Große Anlagenstrukturen (einschließlich Module) sind



schwer. Außerdem erhöht der Wind die Last auf dem Dach erheblich. Wenn große PV-Anlagen auf Gebäuden installiert werden, ist in den meisten Fällen der Rat eines Statikers erforderlich.

Je nach Standort, Systemkapazität, Wartungsplan, Bodenbeschaffenheit, Windgeschwindigkeit, Möglichkeit der Staunässe usw. kann es sich bei der Montage der Arrays um verschiedene Typen handeln. Es kann sich um eine Einzelmaststruktur mit festem Neigungswinkel oder mit einstellbarem Neigungswinkel oder um eine Doppelmaststruktur mit festem Neigungswinkel oder einstellbarem Neigungswinkel handeln.



Abbildung 40a) Montagesystem für Schrägdach zu Schulungszwecken bei der RENAC, b) Flachdach-Montagekonstruktion auf Geschäftshaus Deutschland, c) Bodenmontagekonstruktion, verzinkter Stahl, Vorder- und d) Rückansicht, e) PV-Fassade auf dem CIS-Gebäude, Manchester, Großbritannien (Quelle: BSW-Solar/Sharp und BWS-Solar/ Langrock.) f) Glas-auf-Glas-PV-Module, integriert in das Glasdach des Hauptbahnhofs in Berlin, Deutschland)Nachgeführte Montage auf einem Solarpark, Wechselrichter auf der Rückseite, Deutschland.

Die Ausrichtung des Fundaments und des Aufbaus, so dass die Stellen, an denen sie aufeinandertreffen, eben sind, ist das wichtigste Element. Die Montagebolzen müssen in den richtigen Abständen angebracht werden, daher ist es äußerst wichtig, dass sowohl die Abstände als auch die Ebenheit sorgfältig gemessen werden. Die Ausrichtung des Fundaments muss genau nach Süden erfolgen.

Das Fundament für die Montagestruktur eines Solargenerators kann je nach Standort, Art und Tragfähigkeit des Bodens, Windgeschwindigkeit, Möglichkeit der Staunässe und Art der Montagestruktur unterschiedlich sein. Nachfolgend werden Konzeptzeichnungen von Fundamenten vorgestellt, die in der Regel zur Befestigung von PV-Anlagen verwendet werden:

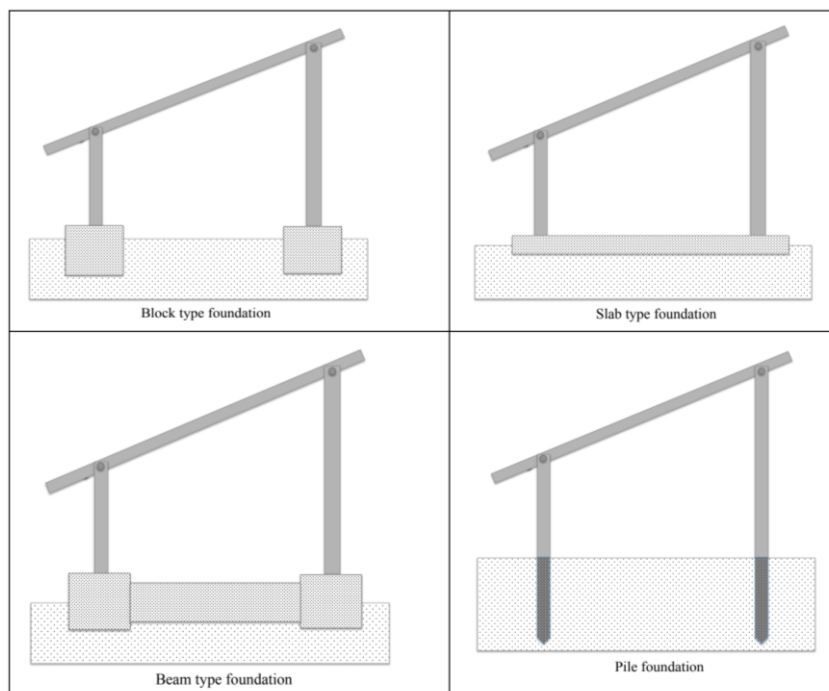


Abbildung 41: Art der Fundamente für die Montagestruktur (Quelle: *Installation, Operation & Maintenance of Solar PV Microgrid Systems*, GSES India Sustainable Energy Pvt. Ltd. for Clean Energy Access Network (CLEAN), 2015)

Montage von PV-Modulen/Paneelen

Sobald die Montagestruktur vorhanden ist, werden die Module darauf platziert und ordnungsgemäß befestigt. Einige grundlegende Richtlinien:

- Befolgen Sie sorgfältig die Montage- und Installationsanweisungen des Herstellers der Modul- bzw. Array-Montagevorrichtung.
- Beachten Sie die Bedingungen der Modulgarantien. So vermeiden Sie Schäden, die zum Erlöschen der Garantie führen könnten, z. B. durch das Bohren zusätzlicher Löcher in Modulrahmen.
- Die Installation sollte bei geeigneten Wetterbedingungen erfolgen (z. B. nicht bei Regen oder wenn in der Ferne ein Donner zu hören ist).



- Wenn die Installationsfläche groß ist, könnte es vorteilhaft sein, die Module am Boden vorzumontieren und zu verkabeln, und ein Kransystem könnte zum Entladen der Module am Standort verwendet werden.
- Möglicherweise sind Gerüste, Leitern zum Betreten von Dächern, Sicherheitsgurte und andere Schutzausrüstung erforderlich.



Abbildung 42: Tragen eines Moduls mit einer Saugnapfvorrichtung (links). Quelle: BWS- Solar, Installation von Modulen auf einem Dach in Wales, UK (Mitte). Beachten Sie den Sicherheitsgurt, den der Installateur trägt. Quelle: Frank Jackson. Installation von Modulen auf einem Dach in Freiberg, Deutschland (links). Beachten Sie die Sicherheitsnetze. Quelle: BSW-Solar/ Upmann.

PV-spezifische Gesundheit und Sicherheit am Arbeitsplatz

Das gesamte Personal sollte alle Sicherheitsvorkehrungen kennen, die für Baustellen, Arbeiten in der Höhe (z. B. Gerüste, Sicherheitsgurte) und Elektroinstallationen erforderlich sind - und darüber hinaus auch die besonderen Gefahren, die mit der Installation von PV-Anlagen verbunden sind.

Plus- und Minuskabel sollten idealerweise mit möglichst geringem Abstand zueinander verlegt werden. Sogenannte Kabelschleifen, die bei Gewitter Spannungen induzieren können, sollten vermieden werden.



Referenzen

- Biggs, J. B. (2003). *Lehren für hochwertiges Lernen an der Universität* (2 Hrsg.). Buckingham: Open University Press/Society for Research into Higher Education.
- BP. (2020). *BP Statistical Review of World Energy - Alle Daten 1965-2019*. Abgerufen am 21.02.2021, von <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/xlsx/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-all-data.xlsx>.
- Cedefop. (2010). *Lernergebnisorientierte Ansätze in den Lehrplänen der beruflichen Bildung*. Luxemburg: Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union.
- Cedefop. (2017). *Definition, Erstellung und Anwendung von Lernergebnissen: ein europäisches Handbuch*. Luxemburg: Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union. Abgerufen von <http://dx.doi.org/10.2801/566770>
- Bildung 2030. (2016). *Erklärung von Incheon und Aktionsrahmen für die Umsetzung des Ziels 4 für nachhaltige Entwicklung: Inklusive und gerechte Bildung von hoher Qualität gewährleisten und Möglichkeiten des lebenslangen Lernens für alle fördern*. Paris: UNESCO.
- EurObserv'ER. (2020). *Der Stand der erneuerbaren Energien in Europa*. Abgerufen am 12.02.2021, von <https://www.eurobserv-er.org/19th-annual-overview-barometer>
- Europäische Kommission. (2011). *Verwendung von Lernergebnissen - Reihe Europäischer Qualifikationsrahmen: Note 4*. (P. O. Union, Hrsg.) doi:10.2766/17497
- Reitz, F. (2021, 25.01.). *Europe Beyond Coal: Europäische Datenbank für Kohlekraftwerke*. Abgerufen am 21.02.2021, von https://beyond-coal.eu/wp-content/uploads/2021/01/2021-01-25_Europe_Beyond_Coal-European_Coal_Database_hc.xlsx
- UNESCO. (2017). *Schulbuchinhalte inklusiv gestalten: A focus on religion, gender, and culture*. Paris: UNESCO.
- UNESCO. (2021, 01 11). *Lern- und Lehrmaterialien*. Abgerufen am 15.02.2021 von Learning Portal-Planning education for improved learning outcomes: <https://learningportal.iiep.unesco.org/en/issue-briefs/improve-learning/curriculum-and-materials/learning-and-teaching-materials>



Anhang 1: Einige Beispiele für derzeit auf dem Markt befindliche PV-Module.



Abbildung 43: Monokristalline Siliziummodule mit 72 Zellen (links) und polykristalline Siliziummodule mit 60 Zellen (rechts).



Abbildung 44: Monokristallines 36-Zellen-Silizium (links), mikromorphes 115-Wp-Silizium ($a\text{-Si}/\mu\text{c-Si}$) (rechts).



Abbildung 45: Cadmiumtellurid (CdTe)-Dünnschichtmodule. Quelle: BSW-Solar/Upmann.



Abbildung 46: 130 Wp Silizium-Dünnschicht-Multifunktionszellen (links), 80 Wp monokristallines Silizium mit Rückkontakt (Mitte), 20 Wp monokristallines Silizium mit 36 Halbzellen (rechts).



Anhang 2: Weiterführende Literatur und Informationen

Grid-connected Solar Electric Systems von Geoff Stapleton & Susan Neil, Kapitel 2: *Solar Resource and Radiation*, Earthscan Expert Series.

Photovoltaic Systems von James P Dunlop, Kapitel 2: *Solar Radiation*, American Technical Publishers.

Stand-alone Solar Electric Systems von Mark Hankins, Kapitel 2: *Fundamentals of Solar Energy*, Earthscan Expert Series.

Anhang 3: Netzgekoppelte / netzunabhängige Wechselrichter

Netzgekoppelte Wechselrichter

- Wandelt den von der PV-Anlage erzeugten Gleichstrom in den vom Netz benötigten sinusförmigen Wechselstrom um und speist diesen in das Netz ein
- MPP-Tracking, um jederzeit die maximal mögliche Stromproduktion der PV-Anlage zu ermöglichen
- Überwachung von PV-Anlage und Netz
- Elektrische Sicherheits-/Schutzeinrichtungen - schalten sich ab, wenn das Netz abgeschaltet wird oder nicht innerhalb der vorgegebenen Parameter funktioniert, und verhindern die so genannte "Inselbildung".
- Display und Schnittstelle zur Überwachung der Ein- und Ausgabe.



Abbildung 47: Wechselrichter von Fronius International (links) und SMA Solar Technology AG (rechts).

Netzwechselrichter können entweder einphasig sein und Wechselstrom an eine Phase einer Stromleitung liefern oder dreiphasige Wechselrichter liefern Wechselstrom an alle drei Phasen einer Stromleitung. Bei kleinen Anlagen, in der Regel unter 5 kWp, werden in der Regel einphasige Wechselrichter verwendet. Dies liegt daran, dass eine Leitung ausreicht, um die von der PV-Anlage gelieferte Leistung aufzunehmen. Größere Anlagen verwenden in der Regel dreiphasige Wechselrichter (der von der PV-Anlage gelieferte Strom wird in drei Teile aufgeteilt, von denen jeder in eine der drei Phasen eingespeist wird), was mehr Spielraum bei der Dimensionierung der Anlage bietet. Was die Konfiguration der Wechselrichter im Hinblick auf ihren Anschluss an die PV-Anlagen betrifft, so gibt es hauptsächlich drei verschiedene Typen: String-Wechselrichter, die an einen Modulstrang angeschlossen werden, Zentralwechselrichter, die an mehrere Modulstränge angeschlossen werden, und Modulwechselrichter, der am wenigsten verbreitete Typ, der sich auf der Rückseite der PV-Module oder in deren Nähe befindet. (Weitere Informationen finden Sie im PV-Elektrokurs).



Netzunabhängige Wechselrichter

In netzunabhängigen PV-Systemen ist die Quelle des Gleichstroms eine Batterie oder eine Batteriebank. Hier werden "netzgekoppelte" Wechselrichter nur in AC-gekoppelten Kleinstnetzen verwendet. Es gibt verschiedene Arten von netzunabhängigen Wechselrichtern, darunter:

- Batterie-Wechselrichter (eine Richtung oder 'unidirektional')
- Wechselrichter (unidirektional) mit integrierten Solarladeregeln
- Wechselrichter-Ladegeräte für DC-gekoppelte Systeme (oft als "bidirektional" bezeichnet)
- Wechselrichter-Ladegeräte für AC-gekoppelte Systeme (auch "bidirektional" genannt und manchmal als "Insel-Wechselrichter" bezeichnet)
- Netzgekoppelte Wechselrichter (auch "netzgekoppelt" oder "netzinteraktiv" genannt).

Die Terminologie ist unterschiedlich und es ist daher notwendig, sowohl das Datenblatt als auch die Installations- und Betriebsanleitung eines Wechselrichters zu lesen, um sich mit dem genauen Typ und den Funktionen vertraut zu machen.

Anhang 4: Beispiel für ein Umrichterdatenblatt

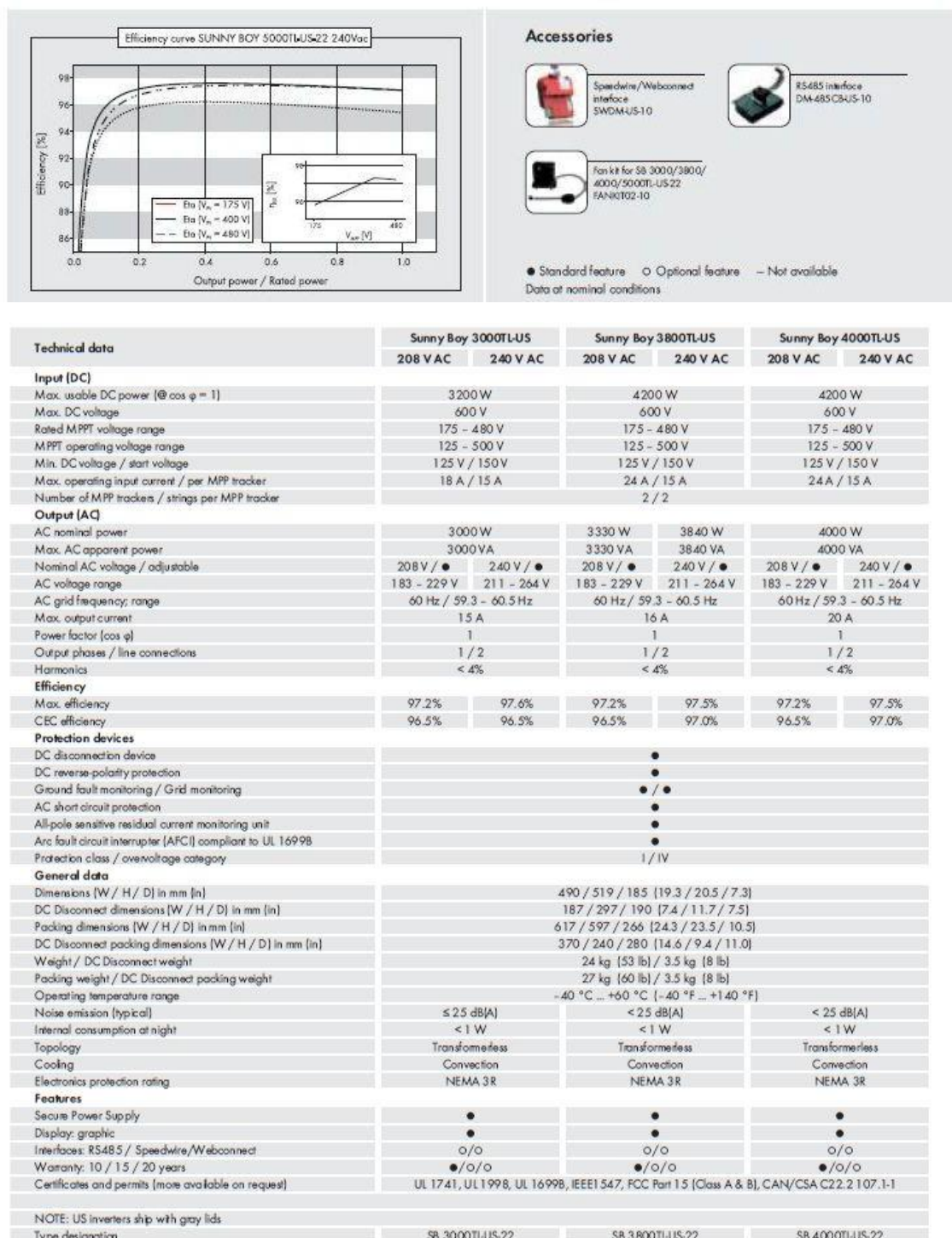


Abbildung 48: Datenblatt des Wechselrichters.

Technische Daten zu den netzgekoppelten Wechselrichtern SMA Sunny Boy 3000TL-US, 3800TL-US und 4000TL-US. Die Geräte sind speziell für Länder konzipiert, die eine UL-Zertifizierung verlangen (vor allem die USA), und reichen von 3.000 W - 4.000 W (AC-Leistung). Quelle: SMA Solar Technology AG.