

Falconing



Flying
Viewing
Marketing
Inspecting

Photovoltaik Grundlagen

Falconing Andreas Schröter
Beethovenstr. 9
40670 Meerbusch
andreas.schroeter@falconing.de
02159 6789-31

1 Einleitung

Photovoltaik (PV) und Solaranlagen sind inzwischen allgemein bekannte Begriffe. Die ausgereifte Technik wird sowohl gewerblich in Solarparks und Dachanlagen, als auch in Konsumgütern eingesetzt. Mit dieser kurzen Zusammenfassung sollen die Grundlagen der Technik und die Ansatzpunkte unserer Inspektionsflüge erläutert werden.

Klimaerwärmung, Atomkatastrophen, der Wunsch nach Unabhängigkeit bei der Energieversorgung, staatliche Förderung und sinkende Investitionskosten haben einen Boom ausgelöst. Neben hochqualifizierten Installationsbetrieben wurden dadurch auch einige auf den Plan gerufen, die den Aufbau und die Abnahme der PV-Anlagen nicht sachgerecht durchgeführt haben, so dass diese Anlagen fehlerhaft sind und nicht die versprochenen und gewünschten Erträge abwerfen. Das ist für den Betroffenen dann eine Fehlinvestition und bringt diese hervorragende Technologie unbegründet in Verruf.

Der Eigenverbrauch des Solarstroms und die Ausnutzung von Ost- und West-Dächern mit einer weiter gespreizten Tageskurve werden immer attraktiver. Batterien bzw. Akkumulatoren zur Zwischenspeicherung der Spitzenerträge werden günstiger und aktuell staatlich gefördert. Der Markt wird sich daher weiter entwickeln - sowohl bei den Privathaushalten, als auch auf den Flachdächern der Industrie- und Logistikunternehmen. Die großen Discounter haben diese Chance bereits ergriffen.

2 Photovoltaik-Anlage

Grundsätzlich besteht eine Photovoltaik-Anlage aus Solarmodulen, Gleichstromverkabelung, Wechselrichter, Wechselstromverkabelung und dem Stromzähler als Netzübergang.

Das Sonnenlicht, das auf ein Solarmodul fällt, erzeugt eine elektrische Spannung bzw. einen Strom, wenn ein Verbraucher - z.B. eine Lampe - angeschlossen wird. Dies ist ein Gleichstrom (DC). Der Wechselrichter wandelt diesen Gleichstrom in einen Wechselstrom (AC) und speist ihn ins öffentliche Stromnetz ein.

Photovoltaik-Anlagen in der Praxis sind komplexer. Mehrere Solarzellen werden in Reihe geschaltet und bilden sogenannte Strings um die Spannung zu erhöhen. Strings wiederum werden parallel geschaltet, um den Strom zu erhöhen. So entstehen Solarmodule, die wiederum parallel oder als String in Reihe verschaltet werden. Solarmodule werden auf unterschiedliche Weise mit verschiedenen Eigenschaften, Energieeinsatz, Material- und Herstellungskosten und Einsatzgebieten (monokristallin, polykristallin, Dünnschicht) hergestellt. Solarmodule haben mehrere relevante Kenngrößen. Eine davon ist die unter standardisierten Bedingungen (STC) ermittelte (Peak) Leistung, die das Modul erzeugen kann (Angabe in Wp). Aussagekräftiger ist allerdings Wp/m², da sich die Flächenmaße der Module unterscheiden.

Der Wechselrichter hat neben der Umrichtung der Spannung noch weitere wichtige Funktionen. Er muss mit dem MPP-Regler, auch MPP-Tracker genannt, zunächst dafür sorgen, dass die Solarmodule im bestmöglichen Betriebspunkt (MPP = Maximum Power Point) aus Spannung und Strom betrieben werden und diesen, abhängig von der Einstrahlung, nachregeln. Anlagen mit mehreren Strings werden meist mit mehreren MPP-Reglern aufgebaut, so dass die

Strings, auch wenn sie verschieden zur Sonne ausgerichtet sind, optimal betrieben werden können. Auf der Wechselspannungsseite befindet sich dann auch noch ein Trennschalter, mit dem die Photovoltaikanlage z.B. bei Reparaturarbeiten oder Brand vom öffentlichen Stromnetz getrennt werden kann.

Zwei Stromzähler erfassen bei privat genutzten Anlagen den verbrauchten und eingespeisten Strom separat.

Größere Solaranlagen können noch aufwändiger aufgebaut sein. Die Wechselrichter speisen den Strom dann u.a. 3-phasig ein, um das Netz des Energieversorgers möglichst gleichmäßig zu beeinflussen.

Überwachungsfunktionen mit Internetanbindung bieten die Möglichkeit, den Ertragsverlauf zu erfassen, zu dokumentieren und abzugleichen. Dieser Verlauf unterliegt klima-, wetter- und umgebungsbedingt jährlichen, jahreszeitlichen, täglichen ja sogar minütlichen Schwankungen. Störungen sind dadurch nur schwer oder gar nicht erkennbar - eine regelmäßige Wartung ist daher notwendig, um Ertragsverluste zu vermeiden.

Damit die Photovoltaik-Anlage Strom erzeugt, muss die Strahlungsenergie der Sonne in elektrische Energie umgewandelt und geeignet verfügbar gemacht werden. Auf diesem Wege kann es zu verschiedenen Verlusten kommen, die den Ertrag mindern und die teilweise durch regelmäßige Wartung vermieden werden können. Diese werden im Folgenden beschrieben.

2.1 Einstrahlung

Die Solarstromerzeugung beginnt auf der Sonne, deren Strahlung durch den Weltraum mit ca. 1367 W/m^2 (Solarkonstante E_0) auf die Erdatmosphäre trifft. Ein Teil der Strahlung wird von der Erdatmosphäre (Wolken, Staubpartikel, ...) absorbiert oder zurück in den Weltraum reflektiert. Der Rest trifft in unterschiedlichen Winkeln auf die Erdoberfläche. Am Äquator ist der Einfallswinkel steil und die Energiedichte hoch. Zu dem Polen hin verringert sich der Einfallswinkel und mit ihm die Energiedichte. Hinzu kommt, dass die Strahlung jenseits vom Äquator einen immer längeren Weg durch die Atmosphäre nehmen muss. Dieser Zuwachs wird mit "Air Mass" bzw. AM in Formeln erfasst und wird für unsere Breitengrade mit ca. 1,5 im Jahresdurchschnitt angegeben. Tatsächlich ändert sich dieser Wert im Laufe des Jahres durch die schräge Rotationsachse der Erde, was ja auch der persönlichen Erfahrung entspricht. Für Berlin gilt: am 21. Juni liegt AM bei 1,15, zu Weihnachten bei 4.

Die jährliche Energiemenge, die je m^2 an einem bestimmten Ort auf die horizontale Erdoberfläche trifft, können wir Globalstrahlungskarten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) oder Datenbanken entnehmen, die durch jahrzehntelange Messreihen erstellt wurden (PVGIS, NASA). Nur durch globale Umweltschutzmaßnahmen können wir diese beeinflussen (so hat die Reduktion der Rußpartikel in den Abgasen der letzten Jahrzehnte zu einer Steigerung der Einstrahlung geführt) - andererseits können starke Vulkanausbrüche den gegenteiligen Effekt bewirken.

Die Einstrahlung kann entweder auf direktem Wege oder durch Wolken und Partikel gestreut und reflektiert - also diffus sein. Hinzu kommt, dass sich die spektrale Aufteilung der Strahlung

abhängig vom Weg ändert. Die Technologie der Solarzelle (z.B. Silizium Si oder Cadmium-Tellurit CdTe) entscheidet, wie gut die Spektren in Strom gewandelt werden.

2.2 Anlagenausrichtung

Die Datenbanken mit den Globalstrahlungswerten liefern typischerweise Werte für horizontal angeordnete Flächen. Durch Neigung und Ausrichtung der PV-Module kann die auftreffende Energiedichte und der Ertrag geändert werden. Neigung und Ausrichtung ergeben sich oft durch die Dachneigung und -ausrichtung oder eine gezielte Aufständering. Die ideale Modulneigung beträgt in Deutschland ca. 30° - 35° bei Südausrichtung (Azimut = 0°). Jedoch auch mit flacheren Ost- (-90°) oder Westdächern (90°) lassen sich gute Erträge erwirtschaften, da bei uns auch ein großer Anteil diffuser Einstrahlung vorherrscht, der z.B. mit Dünnschichtmodulen gut ausgewertet wird. Korrekturwerte für die Ertragsberechnung aus der horizontalen Einstrahlung sind ortsabhängig und sind ebenfalls in Datenbanken verfügbar.

2.3 Temperaturabhängigkeit

Die Solarzellen der Solarmodule bestehen aus Halbleitern wie Silizium. Der elektrische Widerstand von Halbleitern wächst mit zunehmender Temperatur.

Bei starker Einstrahlung steigt dadurch der Widerstand und der erzeugte Strom wird reduziert. Besonders stark wirkt dieser Effekt bei dach-integrierten Modulen im Vergleich zu aufgeständerten Modulen, da die fehlende Hinterlüftung keine Kühlung bringt. Dach-integrierte Module bieten bezogen auf die Wirtschaftlichkeit andere Vorteile, da sie gleichzeitig die Dachhaut bilden und bei Neubauten Kosten sparen können.

In der Ertragsberechnung wird die Temperaturabhängigkeit durch Korrekturfaktoren berücksichtigt.

2.4 Energieerzeugung

Aus den Werten für Ort, Globalstrahlung, Modulneigung, Azimut, Temperaturfaktor und den Eigenschaften des Solarmoduls lässt sich unmittelbar die vom Solarmodul erzeugte Energiemenge berechnen, die im Idealfall von der Anlage geliefert wird.

Beispiel:

Solarmodule: 20 x Firstsolar FS-3100-PLUS (Nennleistung STC = 100 Watt)

Fläche $14,4 \text{ m}^2$

Standort: Düsseldorf

Dachneigung: 45°

Azimut: -30° (Süd-Süd-Ost)

Nennleistung PPV: $20 * 100 \text{ Watt} = 2.000 \text{ Watt} = 2 \text{ kWp}$

Globalstrahlung Z_2 : 1.010 kWh/m² (Mittelwert für Düsseldorf)

Faktor Neigung + Azimut Z_3 : 1,1

Temperaturkorrekturfaktor Z_4 : 0,9585 (hinterlüftete Module)

$$E_{\text{ideal}} = \text{PPV} * Z_2 * Z_3 * Z_4 * [\text{m}^2 / (\text{kW} * \text{Jahr})] = 2 * 1.010 * 1,1 * 0,9585 \text{ kWh} / \text{Jahr} \\ = \mathbf{2.022 \text{ kWh} / \text{Jahr}}$$

Anmerkung: Rechenweg und Formelzeichen entstammen dem Handbuch Photovoltaische Anlagen der Deutschen Ges. für Sonnenenergie e.V.

Ein Vergleich der Leistungsdichten veranschaulicht die Energieverluste. Die betrachtete Anlage hätte eine horizontale Grundfläche von ca. 10,2 m².

Der ideale Flächenertrag an elektrischer Energie pro Jahr wäre damit: .. 198 kWh / Jahr / m²

Globalstrahlung am Ort: 1.010 kWh / Jahr / m²

Energie vor Eintritt in die Atmosphäre (Solarkonstante): 11.975 kWh / Jahr / m²

Dieser Idealwert von 2.022 Kilowattstunden pro Jahr kann aber leider dennoch nicht ins Netz eingespeist werden, da weitere Verluste in den übrigen Anlagekomponenten zu berücksichtigen sind.

2.5 Verluste

Sind in der Umgebung des Solarmoduls Objekte (Bäume, Gebäude, Kamine, Blitzableiter, Freiluftleitungen usw.), die die Einstrahlung durch Verschattung reduzieren, sind dies die ersten Verluste, die bei der Auslegung der Anlage berücksichtigt werden müssen. Wolken und ähnliches werden bereits bei der Globalstrahlung berücksichtigt. Während die Spannung nahezu unverändert bleibt, ist der Strom proportional zur Einstrahlung.

Abschattungen haben gravierende Auswirkungen auf den Ertrag der Anlage, da sie nicht nur die direkt verschatteten Zellen betreffen, sondern auch weitere Zellen oder Module. Bei in Reihe geschalteten Zellen oder Modulen wird der Strom aller Elemente durch das schwächste vorgegeben, so, als ob alle Elemente verschattet wären.

Im Extremfall (Kernschatten eines naheliegenden Objektes) kehrt sich die Funktion der Zelle um: sie erzeugt keinen Strom mehr, sondern verbraucht ihn und erzeugt Wärme, die zur Zerstörung des Moduls führen kann. Genau hier setzt die Erkennung von Defekten mit unseren Inspektionsflügen und Thermografie Aufnahmen an.

Bei der Auslegung der PV-Anlage sollten auf teilverschatteten Flächen daher kurze Strings gebildet werden oder die hoch- oder querkant Lage der Module passend gewählt werden. Um Schattenspenden (Gäuben, Kamine, ...) herum sollte ein großzügiger Abstand eingehalten werden. Weniger Modulfläche bringt dann mehr Leistung. Laubhaftungen, Moos und Schnee

gehen auch in die Verschattung ein. Verluste durch Verschattung sollten zwischen 1 und 10 % liegen.

Weitere Verluste entstehen durch Verschmutzung - darunter versteht man Ablagerungen von Staub, Pollen, Fetten (Viehstall, Biogasanlagen), Salz (Meeresnähe, Solebergwerk) usw. auf dem Solarglas.

Flach liegende Module sind dabei stärker betroffen als steile. Bei steileren Modulen ab etwa 12° Modulneigung reduziert die Selbstreinigung den Verlust ausreichend. Bei flacheren Anlagen sollte zur Wartung auch die Reinigung gehören. Unter normalen Umständen rechnet man ca. 2 % bis 5 % als Verschmutzungsfaktor ein.

Ähnlich wie die Verschattung wirkt sich ein weiterer Effekt auf alle Elemente eines Strings aus: Fertigungstoleranzen ergeben unterschiedliches Verhalten bzw. unterschiedliche Strom-Spannungs-Kennlinien der Zellen oder Module.

Im String ist dann wieder das Element mit dem geringsten Strom maßgebend. Man spricht hier von Mismatch. Der Solarteur sollte daher ähnliche Module (laut Prüfprotokoll oder eigener Messung) kombinieren. Dieser Verlust sollte unter 3 % bleiben.

Verschattung, Verschmutzung und Mismatch sind die Verluste des Solargenerators.

Durch die Gleichstromverkabelung kommen Leitungsverluste und Verluste an den Verbindungsstellen hinzu. Diese steigen mit der Leitungslänge und der Anzahl der Verbinder zwischen Modulen und Wechselrichter. Ein höherer Leitungsquerschnitt verringert die Verluste, die typischerweise zwischen 0,5 % und 1 % liegen.

Nach der Gleichstrom- oder DC-Verkabelung kommt der Wechselrichter mit den für ihn spezifischen Wandlungsverlusten. Die richtige Wahl des Wechselrichters muss viele Faktoren berücksichtigen. Da sind die Parameter des Arbeitsbereiches der Solarmodule über den gesamten Temperaturbereich und deren Zusammenschaltung zu Strings und deren Ausrichtung, die maximale Gesamtleistung und die ein- oder dreiphasige Einspeisung ins Netz sowie die geforderten Eigenschaften zur Netzunterstützung (Leistungsreduktion zu Peak Zeiten, Phasenlage, ...).

Arbeitet der Wechselrichter nicht im optimalen Arbeitspunkt MPP (Maximum-Power-Point), also dem Arbeitspunkt, an dem die Solarmodule die momentan maximal mögliche Leistung abgeben, entstehen Verluste. Da sich dieser Arbeitspunkt mit dem Sonnenstand und jeder Wolke ändert, muss diese Einstellung ständig nachgeführt - dieser Punkt gesucht - werden. Hierzu variiert der Wechselrichter die Eingangsspannung um den bisherigen Arbeitspunkt herum und nimmt dann den aktuell optimalen Wert. Bei dieser Suche entstehen auch Verluste, da ja vorübergehend auch an ungünstigen Arbeitspunkten gesucht werden muss. Andererseits kann eine schnelle und häufige Optimierung eben auch kurzzeitige Einstrahlungsschwankungen nutzen. Schnelle MPP-Regler sind daher zu bevorzugen. Diese Verluste durch MPP-Anpassung sind geringer als der dauerhafte Betrieb im falschen Arbeitspunkt. Sie liegen bei 1 bis 2 %.

Zu den Wechselrichterverlusten gehört natürlich auch der Verlust, der durch die Gleichstrom / Wechselstrom Wandlung entsteht. Es gibt Wechselrichter mit und ohne Trafo, mit spezifischen Vor- und Nachteilen. Die Wechselrichterverluste betragen 2 bis 10 %.

Nach dem Wechselrichter folgt abschließend die Wechselstromverkabelung bis zum Stromzähler. Diese Leitungsverluste kalkuliert man mit 0,5 % bis 1 %.

2.6 Ertragsberechnung

Verschattung: 3 %

Verschmutzung: 2 %

Mismatch: 1,4 %

Abweichung STC: 3 %

DC-Leitungsverlust: 0,7 %

MPP-Anpassung: 1,5 %

Wechselrichterverlust: 6 %

AC-Leitungsverlust: 0,7 %

Der jährlich zu erwartende Anlagenenertrag E_{real} ergibt sich aus dem idealen Ertrag E_{ideal} multipliziert mit sämtlichen Verlustfaktoren.

$$E_{\text{real}} = E_{\text{ideal}} * 0,97 * 0,98 * 0,986 * 0,97 * 0,993 * 0,985 * 0,94 * 0,993$$
$$= 1.678 \text{ kWh / Jahr}$$

gegenüber

$$E_{\text{ideal}} = 2.022 \text{ kWh / Jahr}$$

Das ergibt eine tatsächlich nutzbare Leistungsdichte für die hier betrachtete Anlage von

165 kWh / Jahr / m²

2.7 Anlagenüberwachung

Die Erträge von Photovoltaik Anlagen können durch geeignete Zusatzgeräte bzw. im Wechselrichter integrierte Monitore verfolgt und je nach Ausbau auch mit anderen Anlagen verglichen werden.

Diese „Überwachung“ spiegelt letzten Endes jedoch nur die saisonalen bis minütlichen Schwankungen wieder und gibt nur unzureichend Auskunft über mögliche Defekte der Anlage.

3 Schlussfolgerung

Grundsätzlich sind Photovoltaikanlagen ausgereift und langlebig. Gute Solarteure konzipieren die Anlage so, dass äußere Einflüsse minimiert werden. An der weiten Spanne zwischen idealem und realem Ertrag sieht man jedoch, welche gravierenden Folgen unentdeckte Verluste haben können. Die regelmäßige Wartung der Anlage sollte daher nicht vernachlässigt werden.

Unsere Empfehlung ist, diese Wartung nach der Installation oder Übernahme und dann alle zwei Jahre um eine thermografische Überprüfung aus der Luft zu ergänzen. Aufstieghilfen oder Gerüste sind nicht notwendig. Der Überflug mit dem Falconing Multikopter und der Wärmebildkamera schafft einen schnellen Überblick, um defekte oder falsch installierte Solarmodule aufzuspüren und zahlt sich aus.

