

PV & WIND: EINE IDEALE KOMBI?

LEISTUNGSSCHWANKUNGEN VON SOLAR- UND WINDKRAFTANLAGEN IN NORDDEUTSCHLAND UND MÖGLICHE AUSGLEICHSEFFEKTE

Im Jahr 2019 deckte die Photovoltaik im Schnitt 8% des Stromverbrauchs in Deutschland, an sonnigen Tagen aber manchmal bis zu 50%¹⁾. Die Leistung von Windkraftanlagen (WKA) hängt von der Windgeschwindigkeit ab. Bei einer großen Anzahl von Anlagen verursachen die meteorologischen Gegebenheiten somit Einbrüche der in das Netz eingespeisten elektrischen Leistung, die ausgeglichen werden müssen. Die Kenntnis der Statistik der Schwankungen ist etwa für die Dimensionierung von Speichersystemen und Kompensationsanlagen von Bedeutung. Diese Thematik wird in zahlreichen Publikationen untersucht, die aber aufgrund der jeweils verfügbaren Daten immer nur geografisch lokale Aussagekraft haben^{2) 3) 4)}. Dieser Artikel basiert auf langjährigen, zeitlich hoch aufgelösten Strahlungs- und Windmessungen in Norddeutschland. Es wird auch untersucht, inwieweit sich die Fluktuationen von Solar- und Windkraftanlagen gegenseitig kompensieren können.

Datenbasis

Auf dem Dach des Laborgebäudes (Bild 1) befinden sich vier Strahlungsmessgeräte, die die Globalstrahlung messen. Sie sind unterschiedlich ausgerichtet: Horizontal, 30° Neigung und Südrichtung, 60° Süd, 90° West. Daneben gibt es ein Messgerät für die direkte Sonnenstrahlung und ein Anemometer zur Messung der Windgeschwindigkeit. Auf einer 2-achsig der Sonne nachgeführten Plattform befindet sich ein weiteres Globalstrahlungsmessgerät. Es wurden 5-Minuten-Werte von 2001 bis 2010 verwendet.

Datenauswertung

Die Leistung der PV-Anlagen ist proportional zur Einstrahlung auf die jeweilige Modulfläche und kann so durch Multiplikation mit der Nennleistung erhalten werden. Die Einstrahlung auf beliebig orientierte Flächen kann man für jedes Zeitintervall aus den Messwerten der Direkt- und der Globalstrahlung berechnen⁵⁾. Temperatur- und Spektrumseffek-

te wurden vernachlässigt. Die Leistung der WKA wird aus dem Mittelwert der Windgeschwindigkeit über fünf Minuten berechnet. Um mehr darüber zu erfahren, ob sich die kurzzeitigen Schwankungen bei Tage gegenseitig kompensieren wird die Leistung der WKA bei Nacht gleich Null gesetzt, alle Aussagen über Erträge und Schwankungen beziehen sich nur auf den Tag. Um die Abhängigkeit von der Jahreszeit zu erkennen, werden die Daten getrennt jeweils für das Sommer- und Winterhalbjahr ausgewertet. Die Untersuchung ergab, dass positive und negative Differenzen gleich häufig auftreten. Deshalb wurde nur die Häufigkeit der Absolutbeträge der Fluktuationen statistisch ausgewertet. Der Mittelwert der Histogramme über die Jahre 2001 bis 2010 stellt das Ergebnis dar.

Auswahl der Anlagen

Zur Vergleichbarkeit wurden alle Anlagen so gewählt, dass sie im Sommerhalbjahr den Ertrag von 1.000 kWh liefern. In Tabelle 1 sind sie aufgeführt. Die erste Anlage A1 ist eine WKA. Mit zunehmendem Bedarf an Solarstrom und sinkenden Modulpreisen können zunehmend auch ungünstiger ausgerichtete Flächen für PV-Anlagen genutzt werden, z.B. senkrechte Solarfassaden wie die Anlagen A2 und A3. Anlage A4 wird 2-achsig der Sonne nachgeführt (Solartracker). Aufgrund der jederzeit optimalen Position der Anlage ist die erforderliche Nennleistung für den

gewünschten Ertrag besonders gering. Die Anlage A5 entspricht mit 30° Neigung und der Südausrichtung dem weit verbreiteten Typ einer „optimalen“ fest aufgeständerten Anlage mit maximalem Ertrag pro Nennleistung. Besonders interessant ist, wie sich eine Kombination aus unterschiedlich orientierten PV-Anlagen verhält (A6). Anlage A7 ist eine Kombination von drei verschiedenen PV-Anlagen und einer WKA. Im Gegensatz zum Sommerhalbjahr liefern die Anlagen im Winterhalbjahr aufgrund der verschiedenen Orientierung und der anderen Sonnenbahn unterschiedliche Erträge.

Ergebnisse und Diskussion

Einen Überblick über Häufigkeit und Größe der Fluktuationen gibt das kumulative Histogramm in Bild 2. So ergibt die Kurve der Anlage A2 bei $\Delta P = 500$ W genau den Wert 100, d.h. es geschieht im Sommer durchschnittlich 100mal, dass sich die mittlere Leistung zwischen zwei aufeinander folgenden Stunden um mehr als 500 W unterscheidet.

Die häufigsten Schwankungen treten bei der WKA auf, aber auch die mit Solarmodulen belegten senkrechten Solarfassaden mit Ost- und Westrichtung (A2 und A3) liefern auch relativ viele und große Fluktuationen. Wenn hier die Sonnenstrahlung kurzzeitig günstig auf die Module auftrifft, steigt die Leistung schlagartig, um diese hohe Leistung herum treten dann auch große Schwankungen auf.

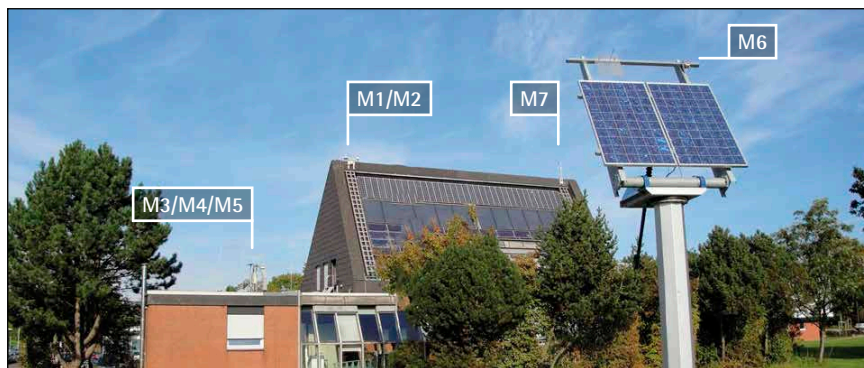


Bild 1: Labor für Solartechnik der Technischen Hochschule Lübeck. M1-M7: Position der Sensoren

	Typ	Ausrichtung	Neigung	Nennleistung P _{No} [kW]	Ertrag (Winter) [kWh]
A1	WKA			1,6*	918
A2	PV	West	90°	1,9	275
A3	PV	Ost	90°	2	272
A4	PV Tracker			1,0	325
A5	PV	Süd	30°	1,2	322
A6	3 PV	Süd	30°	0,75	303
		West	90°	0,4	
		Ost	90°	0,4	
A7	3 PV + WKA	Süd	30°	0,7	347
		West	90°	0,35	
		Ost	90°	0,35	
				1,2*	

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Anlagen – Alle Anlagen A1 bis A7 haben im Sommerhalbjahr den Ertrag 1.000 kWh, * Leistung der WKA bei der Windgeschwindigkeit 12 m/s

Der Solartracker (A4) ist immer optimal zur Sonne ausgerichtet. Deshalb reicht hier eine Nennleistung von 1 kWp für den gleichen Ertrag aus. Da dort die direkte Sonnenstrahlung immer senkrecht auftrifft, liefert sie einen höheren Beitrag als bei der fest montierten Anlage. Die direkte Strahlung wird jedoch durch Wolken besonders stark und schnell abgedeckt, weshalb die Schwankungen häufiger als bei A5 sind. Andererseits ist bei gutem Wetter der Tagesgang wesentlich gleichmäßiger, da die Einstrahlung zwischen den Mittagsstunden und dem Morgen oder Abend nicht so unterschiedlich ist.⁶⁾

Besonders interessant ist Anlage A6: Eine Kombination von 3 PV-Anlagen mit unterschiedlichen Ausrichtungen. Die Nennleistung ist mit 1,55 kWp etwas höher als bei der nur nach Süden ausgerichteten Anlage A5 (1,2 kWp), um den gleichen Ertrag zu liefern. In Zukunft werden solche Solarfassaden mehr zur Energieversorgung beitragen. Insofern ist eine Untersuchung einer Kombianlage wie A6 sinnvoll. Die Zahl der Fluktuationen mit $\Delta P > 400$ W ist dort mit 32 fast nur halb so hoch wie bei A5. Eine Leistungsfluktuation entsteht meistens durch eine

schnelle Abschattung der direkten Strahlung durch Wolken. Hier trifft die direkte Strahlung – je nach Tageszeit – immer nur auf eine der drei Anlagen unter günstigem Winkel auf und nur diese reagiert mit einer schnellen Fluktuation. Eine Kombination von Solaranlagen erfordert also eine etwas höhere Investition, liefert aber einen deutlich gleichmäßigeren Ertrag mit weniger Fluktuationen. Wenn nun noch eine WKA hinzukommt wie bei Anlage A7, dann sinkt die Zahl der Fluktuationen mit $\Delta P > 400$ W in Bild 2 noch einmal um ca. 20 % relativ zu A6. Dieser Ausgleichseffekt tritt auf, wenn ein Wolkenfeld die Sonne bedeckt und gleichzeitig der Wind auffrischt, was in Norddeutschland oft der Fall ist.

Die Auswertung der Fluktuationen im Stundenintervall hat den Vorteil, dass man eine Information über eine länger andauernde Leistungsveränderung erhält, z.B. wenn eine ausgedehnte Wolkenfront die Einstrahlung auf einem großen Gebiet für eine längere Zeit reduziert. Andererseits können sehr schnelle und starke Einstrahlungsfluktuationen durch diese Mittelung über 1h nivelliert werden. Deshalb wurden auch für alle 5-Minuten-Inter-

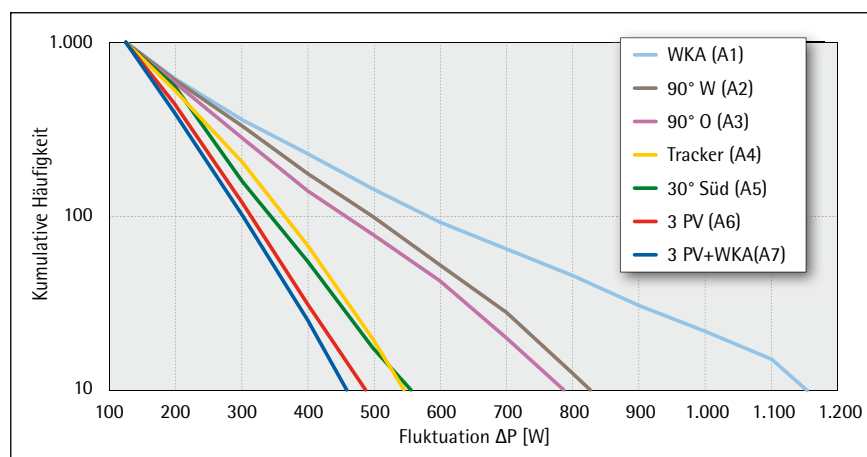


Bild 2: Kumulatives Histogramm der Fluktuationen. Stundenintervalle im Sommerhalbjahr, gemittelt über 2001 bis 2010, alle Anlagen haben den Ertrag 1.000 kWh

valle der Jahre 2001 bis 2010 die Histogramme berechnet. Die Kurven verlaufen relativ ähnlich zueinander wie in Bild 2.

Da die Zahl der Messungen bei den 5-min Intervallen größer ist, ist die Häufigkeit der Fluktuationen natürlich größer. Besonders auffallend ist die Tatsache, dass auch wesentlich stärkere Schwankungen in hoher Zahl auftreten. Um starke und schnelle Fluktuationen auszuwerten, sind also kurze Messintervalle nötig.

Da die Histogrammkurven in Bild 2 fast wie eine Gerade abfallen, kann man sie durch eine lineare Funktion gut annähern. Aufgrund des logarithmischen Maßstabs ergibt sich aber mathematisch eine Exponentialfunktion für die näherungsweise Berechnung der Häufigkeit einer Schwankung.

Zusammenfassung

Die Untersuchung der Leistungsfluktuationen von Solar- und WKA in Norddeutschland über einen Zeitraum von 10 Jahren ergibt, dass eine Kombination von verschiedenen ausgerichteten Solaranlagen eine deutlich gleichmäßigere Leistung liefert. Eine zusätzliche WKA reduziert die Fluktuationen weiter. Die Ergebnisse können leicht auf Anlagen mit anderen Nennleistungen umgerechnet werden. Mit Hilfe unserer langjährigen, zeitlich hoch aufgelösten Strahlungs- und Windmessungen ist es möglich Fluktuationen von beliebigen Kombinationen von PV und WKA in Norddeutschland zu berechnen.

Literatur

- 1) Fraunhofer ISE: „Aktuelle Fakten zur Photovoltaik“
- 2) Anvari, Lorenz, Heinemann et al.: „Short term fluctuations of wind and solar power systems“
- 3) Adye, Pearre, Swan: “Contrasting distributed and centralized photovoltaic system performance using regionally distributed pyranometers”
- 4) Chattopadhyay, Kies, Lorenz, von Bremen, Heinemann: „The impact of different module configurations on storage...“
- 5) Duffie, John, Beckman, William: “Solar Engineering of Thermal Processes”
- 6) Kreuzler, Bergmann: “Mehrertrag 2-achsig nachgeführter Solartracker im Norden”, SONNENERGIE 1|16

ZU DEN AUTOREN:

▶ Prof. Dr. Siegfried Kreuzler
Dipl.-Ing. Manfred Bergmann
Labor für Solartechnik
Technische Hochschule Lübeck
siegfried.kreussler@th-luebeck.de