

**>> Energiewirtschaftliche Optimierung  
von PV-Anlagen –  
Aktueller Stand und Perspektiven**

*Alexander Zipp, [zipp@izes.de](mailto:zipp@izes.de)*

## Fragen:

- Welche PV-Anlagen haben heute das ‚bedarfsgerechteste‘, d.h. energiewirtschaftlich optimalste Erzeugungsprofil?
- Können die PV-Erlöse innerhalb des Marktprämienmodells durch Variation des Erzeugungsprofils gesteigert werden?
- Welchen Beitrag leisten solche Anlagen zur Systemintegration?

## Ausgangslage:

- Installierte PV-Leistung in Deutschland Ende 2015: ~40 GWp (laut BNetzA zum Stichtag 31.07.2016 etwa 40,3 GWp).
- Großteil der Anlagen hat aus wirtschaftlichen Gründen eine Südausrichtung.
- Mehr als 98 % der PV-Anlagen speisen in das Verteilnetz ein.
- Spürbarer Merit-Order-Effekt auf dem Großhandelsmarkt.

- Bei einer Fixvergütung spielt das Erzeugungsprofil für die Vergütung keine Rolle.
  - Bei der Direktvermarktung nach Marktprämienmodell kann bei einer Steigerung des Marktwertes im Vergleich zum bundesweiten Durchschnitt der Anlagenbetreiber seinen Gewinn erhöhen.
  - Folgende Optionen wurden untersucht:
    - Geographischer Standort innerhalb Deutschlands
    - Anstellwinkel des Moduls ( $0^\circ$  horizontal bis  $70^\circ$  vertikal)
    - Azimutwinkel des Moduls ( $90^\circ$  West bis  $-90^\circ$  Ost)
- } Anlagenausrichtung
- weitere: Batteriespeicher, nachgeführte Anlagen etc.

## - **Datengrundlage:**

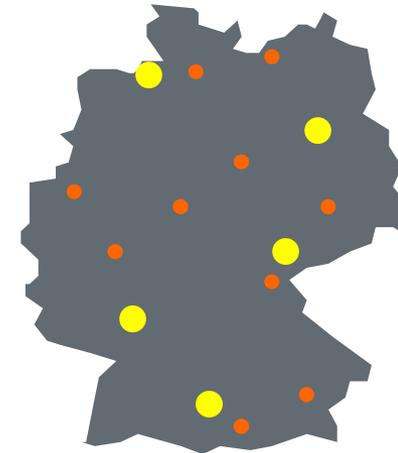
- Messdaten von 114 Stationen des Deutschen WetterDienstes (DWD) aus MIRAKEL-Datenbank.
- Hieraus werden 15 Klimaregionen abgeleitet.
- Pro Region existieren stündliche Durchschnittswerte der Jahre 1988-2007 für Direktstrahlung, Diffusstrahlung, Bedeckungsgrad und Temperatur.
- Referenzanlage mit 30 kWp (polykristallines Modul ‚Sunmodule Plus SW 255 Poly‘ von Solarworld).

## - **Leistungen des Modells:**

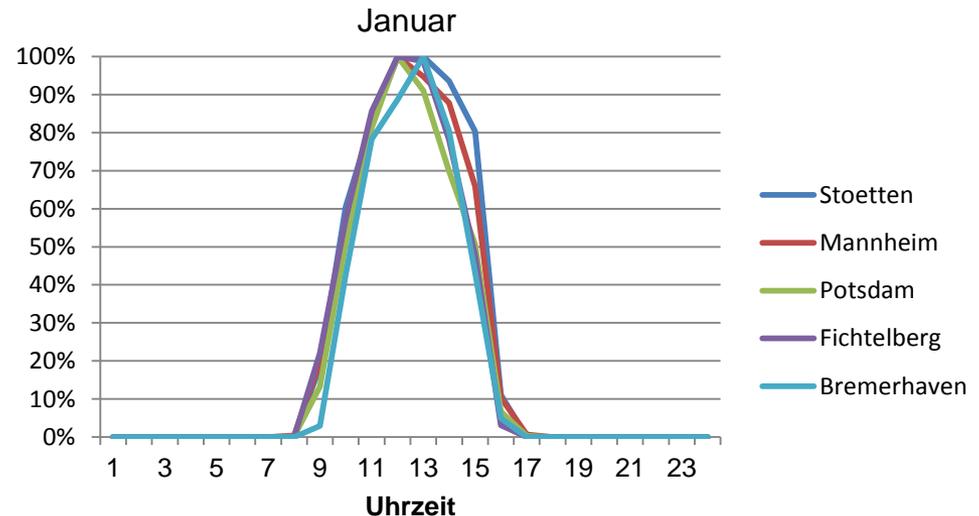
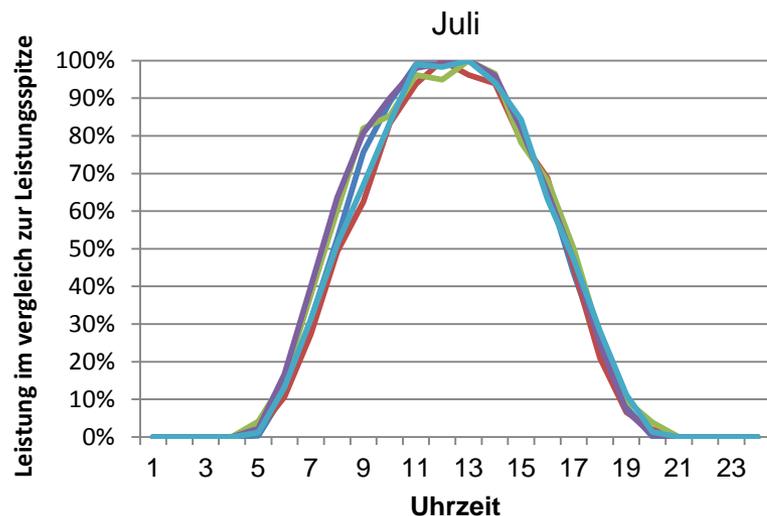
- Stündlich aufgelöstes Leistungsprofil der PV-Anlage für ein Referenzjahr.
- Veränderung des geographischen Standorts: 15 mögliche Standorte
- Veränderung der Anlagenausrichtung:
  - Azimutwinkel (Ost, West, Süd)
  - Anstellwinkel  $0^{\circ}$ - $70^{\circ}$  ( $10^{\circ}$ -Schritte)

- Exemplarische Untersuchung von 5 Standorten (30°-Süd):

Standort	Breiten-/Längengrad	Jahresertrag (VBH)	Relativer Vergleich
Stötten	48,67/9,87	1042	100 %
Mannheim	49,52/8,55	1013	97,2 %
Potsdam	52,38/13,07	1004	96,4 %
Fichtelberg	50,43/12,95	949	91,1 %
Bremerhaven	53,53/8,58	888	85,2 %



- Fokus: Zeitliche Verschiebung des Einspeiseprofiles (30° Süd)

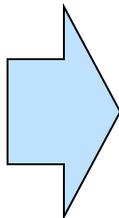


Eigene Berechnungen, Datenquellen: DWD

- Untersuchung des Ertrags der 2 ertragsreichsten Standorte:

Stoetten				Mannheim											
Jahresertrag				Jahresertrag											
70°	781	918	679	70°	75%	88%	65%	70°	767	912	606	70°	76%	90%	60%
60°	828	974	728	60°	79%	94%	70%	60°	811	965	652	60°	80%	95%	64%
50°	870	1013	774	50°	83%	97%	74%	50°	848	998	696	50°	84%	98%	69%
40°	905	1036	817	40°	87%	99%	78%	40°	878	1015	738	40°	86%	100%	73%
30°	932	1042	857	30°	89%	100%	82%	30°	899	1013	778	30°	89%	100%	77%
20°	952	1030	894	20°	91%	99%	86%	20°	910	991	817	20°	90%	98%	81%
10°	960	1000	928	10°	92%	96%	89%	10°	909	951	856	10°	90%	94%	84%
	90°	0°	-90°		90°	0°	-90°		90°	0°	-90°		90°	0°	-90°
	W	S	O		W	S	O		W	S	O		W	S	O

PV-Ertragsmatrizen (absolut in VBH und relativ)



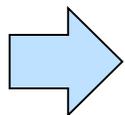
Maximaler Ertrag bei 30° bzw. 40°-Südausrichtung.

Veränderung des Azimutwinkels mit höheren Verlusten behaftet, als die Veränderung des Anstellwinkels.

- Levelized Cost of Electricity (LCOE) berücksichtigt nicht den Zeitpunkt der Stromerzeugung.
- Bewertung der Stromerzeugung muss den Zeitpunkt berücksichtigen.

$$\text{Relativer Marktwert} = \frac{\sum \text{Einspeisung}_h * \text{Preis}_h}{\sum \text{Einspeisung}_h} / \frac{\sum \text{Preis}_h}{\text{Anzahl der Stunden}}$$

*Verhältnis der spezifischen durchschnittlichen Verkaufserlöse pro Energieeinheit und dem durchschnittlichen Marktpreis pro Energieeinheit in dem betrachteten Zeitraum.*



Ein höherer (relativer) Marktwert impliziert eine ‚bedarfsgerechtere‘ Erzeugung im energiewirtschaftlichen Sinne.

# Analyse der relativen Marktwerte

70°	1,0803	1,1069	1,0981
60°	1,0831	1,1065	1,1007
50°	1,0863	1,1059	1,1029
40°	1,0898	1,1052	1,1045
30°	1,0933	1,1043	1,1052
20°	1,0964	1,1033	1,1048
10°	1,0989	1,1023	1,1032
<b>2011</b>	90°	0°	-90°

70°	1,0366	1,0798	1,0787
60°	1,0391	1,0783	1,0805
50°	1,0427	1,0767	1,0814
40°	1,0471	1,0749	1,0808
30°	1,0521	1,0729	1,0788
20°	1,0572	1,0708	1,0752
10°	1,0617	1,0686	1,0707
<b>2012</b>	90°	0°	-90°

70°	0,9995	1,0572	1,0574
60°	1,0017	1,0541	1,0583
50°	1,0047	1,0512	1,0576
40°	1,0092	1,0479	1,0553
30°	1,0148	1,0445	1,0513
20°	1,0210	1,0410	1,0456
10°	1,0270	1,0371	1,0391
<b>2013</b>	90°	0°	-90°

## Standort Stötten

70°	0,9783	1,0144	1,0420
60°	0,9781	1,0121	1,0398
50°	0,9790	1,0100	1,0359
40°	0,9812	1,0082	1,0303
30°	0,9848	1,0064	1,0232
20°	0,9896	1,0047	1,0153
10°	0,9952	1,0030	1,0078
<b>2014</b>	90°	0°	-90°

70°	0,9977	1,0243	1,0568
60°	0,9968	1,0232	1,0544
50°	0,9972	1,0222	1,0505
40°	0,9989	1,0213	1,0448
30°	1,0020	1,0203	1,0379
20°	1,0066	1,0194	1,0303
10°	1,0119	1,0184	1,0232
<b>2015</b>	90°	0°	-90°

Eigene Berechnungen, Datenquellen: DWD, EEX

- **Frage:** Können die PV-Erlöse durch Variation des Erzeugungsprofils gesteigert werden?

$$\text{Erlös} = \text{Energieertrag} * \left( \underbrace{\text{relativer Marktwert} * \overline{\text{ØPreis}}}_{\text{absoluter Marktwert}} + \overline{\text{Marktprämie}} \right)$$

- Durch optimierte Anlagenausrichtung sinkt der Energieertrag um x % und der relativer Marktwert steigt um y %.
- Hieraus folgt die notwendige Bedingung für eine Erlössteigerung:

$$\text{Ertragselastizität (des Marktwertes)} \left| \frac{\frac{\Delta \text{relativer Marktwert}}{\text{Marktwert der Referenzausrichtung}}}{\frac{\Delta \text{Jahresertrag}}{\text{Jahresertrag der Referenzausrichtung}}} \right| > 1$$

- Berechnung der Ertragselastizität für die Jahre 2011 bis 2015 (hier: Standort Stötten)

**Grün** = ertragsmaximale Referenzausrichtung

**Rot** = Reduzierung von Ertrag **und** Marktwert (negativer Wert)

**Orange** = Steigerung von Marktwert, Reduzierung von Ertrag (positiver Wert), jedoch ist die Elastizität geringer als 1

$$= \frac{\text{percentage change of the market value}}{\text{percentage change of the annual energy yield}}$$

	2011			2012			2013			2014			2015		
	90°	0°	-90°	90°	0°	-90°	90°	0°	-90°	90°	0°	-90°	90°	0°	-90°
70°	-0,087	0,020	-0,016	-0,135	0,054	0,016	-0,172	0,102	0,035	-0,111	0,067	0,102	-0,089	0,033	0,103
60°	-0,093	0,030	-0,011	-0,153	0,077	0,023	-0,200	0,142	0,044	-0,137	0,087	0,110	-0,112	0,044	0,111
50°	-0,099	0,054	-0,005	-0,170	0,128	0,031	-0,230	0,231	0,049	-0,164	0,131	0,114	-0,137	0,065	0,115
40°	-0,100	0,144	0,001	-0,182	0,330	0,034	-0,257	0,590	0,048	-0,190	0,320	0,110	-0,160	0,165	0,111
30°	-0,094		0,005	-0,184		0,031	-0,271		0,036	-0,204		0,094	-0,171		0,097
20°	-0,082	-0,074	0,003	-0,170	-0,165	0,015	-0,260	-0,292	0,007	-0,193	-0,148	0,062	-0,156	-0,083	0,069
10°	-0,062	-0,046	-0,009	-0,133	-0,100	-0,019	-0,213	-0,176	-0,047	-0,141	-0,085	0,012	-0,106	-0,048	0,026

➔ Von 2011 bis 2015 war laut den Modellrechnungen keine Erlössteigerung durch die Optimierung des Marktwerts möglich (Südausrichtung als Referenz), jedoch ist ein positiver Trend für Anlagen mit einer Ostausrichtung zu erkennen.

- **Die Stromsystemintegration** ist ein Prozess, der von Marktakteuren oder der Regulierungsinstanz vorangetrieben wird und einen Beitrag zur Optimierung des Zusammenspiels zwischen FEE-Erzeugung und der vielfältigen Flexibilitätsoptionen im Stromsystem leistet. Der Prozess der Stromsystemintegration besteht aus verschiedenen Einzelmaßnahmen, die der Stromsystemtransformation dienen. Die Einzelmaßnahmen können sowohl auf Seite der FEE-Erzeugung als auch auf Seite der Flexibilitätsoptionen stattfinden.
  - Systemfreundliche EE-Anlagen vs. EE-freundliches System (Substitute).
  - Energiewirtschaftlich optimierte PV-Anlagen erhöhen den Marktwert.
  - Systemfreundliche Auslegung reduziert den Transformationsdruck.
- **Die Stromsystemtransformation** ist ein soziotechnischer Prozess, der nicht nur den technologischen, sondern auch den organisatorischen und gesellschaftlichen Wandel umfasst, der mit dem langfristigen Umbau und der Erweiterung des Versorgungssystems einhergeht.

- In den Jahren 2011 bis 2015 war eine Abweichung von der ertragsmaximierenden PV-Anlagenausrichtung mit Gewinneinbußen verbunden (kein Eigenverbrauch).
- Aktuell besteht bei einer Vermarktung nach Marktprämienmodell kein Anreiz für eine PV-Anlagenausrichtung mit einem bedarfsgerechteren Erzeugungsprofil.
- Es ist ein positiver Trend für Anlagen mit Ostausrichtung erkennbar.
- **Jedoch:** Das verwendete Preissignal berücksichtigt weder Netzengpässe, noch das vorhandene Potenzial an Flächen mit einer Südausrichtung oder sonstige externe Effekte!
  
- Bei weiterem Zubau von Südanlagen: Anpassung der Vergütung notwendig?
- Kann die PV überhaupt ausreichend auf Marktpreissignale reagieren?
- Forschungsfragen:
  - Anlagennachführung?
  - Eigenverbrauch und Direktvermarktung an Endkunden?
  - Stromspeicher?
  - Beitrag zur Systemintegration?

Zipp, A. (2015): *Revenue prospects of photovoltaic in Germany – Influence opportunities by variation of the plant orientation*. In: Energy Policy, Volume 81, June 2015, 86-97.

Zipp, A. (erscheint in Kürze): Markt- und Systemintegration von erneuerbaren Energien im Rahmen der Systemtransformation – Ein Beitrag zur definitorischen Abgrenzung. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft.

IZES (in Bearbeitung): Systemintegration Erneuerbarer Energien durch Marktakteure (SEEMA). Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (FKZ: 03MAP329).

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

**Institut für ZukunftsEnergieSysteme (IZES)**

**Altenkesseler Str. 17, Gebäude A1**

**D-66115 Saarbrücken**

**Tel. 0681 – 9762 840**

**Fax 0681 – 9762 850**

**email: [zipp@izes.de](mailto:zipp@izes.de)**

**Homepage [www.izes.de](http://www.izes.de)**

$$\begin{aligned} & \text{Energieertrag} * (1 - x) * (\text{relativer Marktwert} * (1 + y) * \overline{\text{ØPreis}} + \overline{\text{Marktprämie}}) \\ & \geq \text{Energieertrag} * (\text{relativer Marktwert} * \overline{\text{ØPreis}} + \overline{\text{Marktprämie}}) \end{aligned}$$

Durch Umformung erhält man:

$$y \geq x * \underbrace{\frac{1}{\underbrace{1-x}_{>1, \text{ da } 0 < x < 1}} * \left(1 + \frac{\overline{\text{Marktprämie}}}{\underbrace{\text{relativer Marktwert} * \overline{\text{ØPreis}}}_{>0, \text{ falls Marktprämie } > 0}}\right)}_{>1}$$