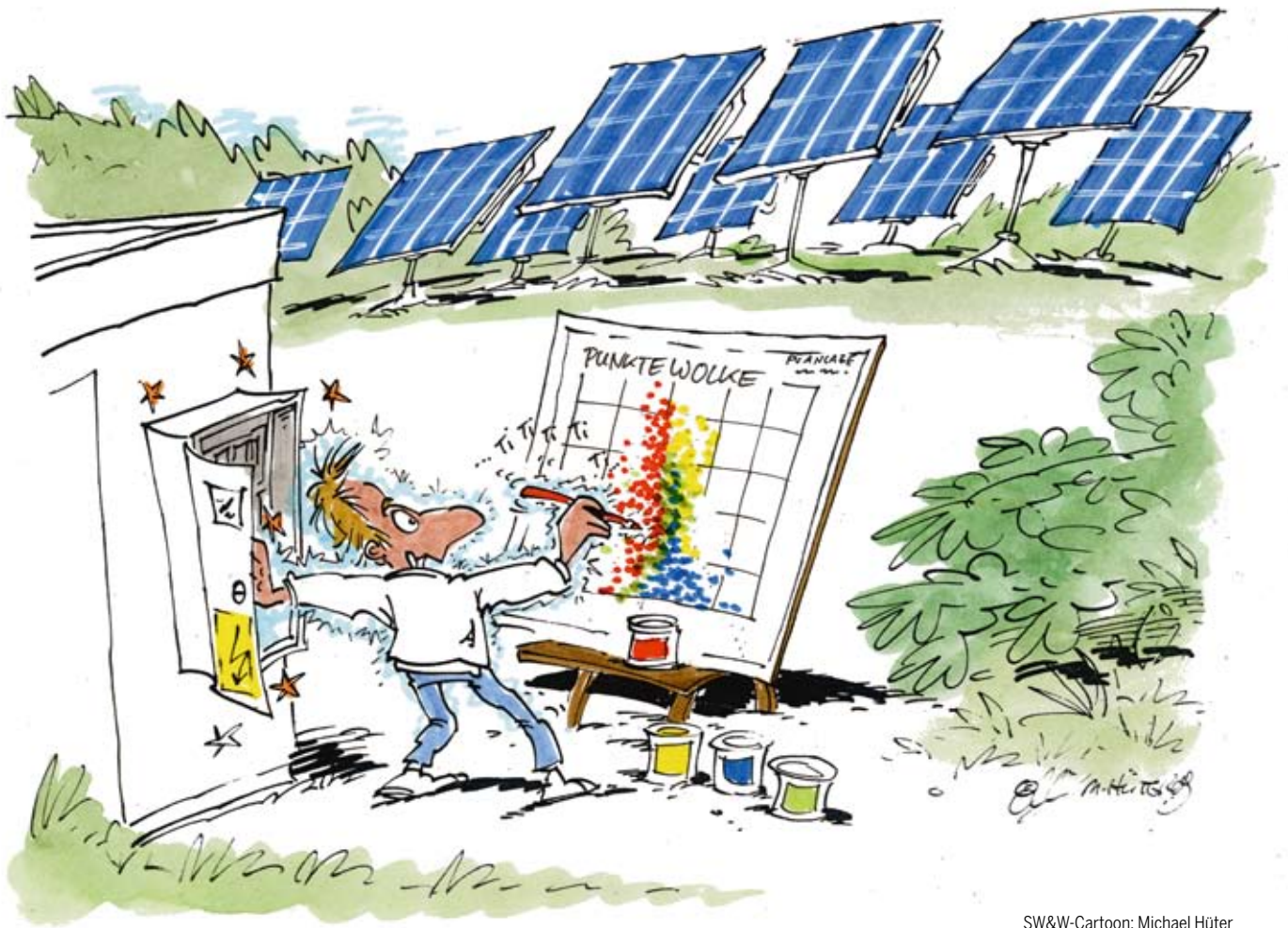


Punkt für Punkt



SW&W-Cartoon: Michael Hüter

Mit Punktwolken zum Erfolg: Durch eine neue Form der grafischen Darstellung können Fehler in der Konfiguration netzgekoppelter PV-Anlagen schnell identifiziert und analysiert werden.

In der Praxis wird man bei der Analyse des Betriebsverhaltens realisierter PV-Anlagen mit Systemkonfigurationen netzgekoppelter PV-Anlagen konfrontiert, die Defizite im Anlagenenertrag zeigen. Die Bandbreite möglicher Ursachen ist weit. Dies kann verursacht sein durch Standortgegebenheiten (Morgennebel, Verschattung durch Horizontüberhöhungen), Komponentendefekte, Fehlern beim Bau der PV-Anlage bis hin zu Planungsfehlern. Ein Planungsfehler sehr grundsätzlicher Natur kann beispielsweise in der Abstimmung von PV-Generator und Wechselrichterwahl liegen. Wie sich solche Fehler im Betriebsverhalten netzgekoppelter PV-Anlagen auswirken, welche Fehlerbilder sie verursachen und wie sie identifizierbar sind, wird nachfolgend exemplarisch skizziert.

Für die einfache, schnelle und anschauliche Analyse netzgekoppelter PV-Anlagen wurde eine grafischen Form gefunden, die sehr schnell Rückschlüsse und

Aussagen erlaubt. Auf Basis gemessener Betriebsdaten erfolgt die grafische Leistungsbeschreibung von PV-Generatoren, indem Messdaten der Anlagen in Form von Punktwolken in Flächendiagrammen dargestellt werden (Abb. 1). In den Flächendiagrammen werden tatsächlich gemessene Betriebsbedingungen abgebildet. Dargestellt werden die MPP-Punkte des PV-Generators in möglichst hoher zeitlicher Auflösung. Hilfreich ist eine Auflösung der Messdaten im Minutenbereich (circa 30.000 MPP-Arbeitspunkte pro Jahr). Dabei sollten Momentanwerte und keine Mittelwerte aufgezeichnet werden. Die Messergebnisse werden als Punktwolken in üblichen I(U)-Diagrammen dargestellt. In dem Flächendiagramm werden DC-Seitig die Maximum Power Point-Wertepaare Strom und Spannung aufgezeichnet. Daraus resultierend erhält man eine Art Häufigkeitsverteilung der MPP-Werte des PV-Generators in dem aufgezeichneten Zeitintervall.

Durch diese Darstellung können Fehlerbilder als Abweichungen von der idealen Form erkannt und einer Fehlerquelle zugeordnet werden. Die Leistungspunkte der optimalen Wolke liegen möglichst weit rechts und laufen nach oben rund aus, da die Leistungsmaxima über das Jahr statistisch verteilt sind. Die Breite der Wolke ergibt sich aus der Temperatur-

erhöhung, mit steigender Modultemperatur liegen die Leistungspunkte bei geringeren Spannungen. Durch die Anwendung verschiedener Farben auf die weiteren Charakteristika der einzelnen MPP-Wertepaare, bekommt die Darstellung eine dritte Dimension. Es werden dadurch Zuordnungen möglich, die konkrete Rückschlüsse erlauben. Beispielsweise kann eine zeitliche Zuordnung der Punkte gewählt werden, wie die zu den Jahreszeiten.

Abb. 1 zeigt alle MPP-Werte eines einzelnen Strings einer PV-Anlage aus Oberbayern im Jahr 2007. Sehr schön zu sehen ist, wie im Winter die dunkelblaue Punktemenge durch höhere Spannungen bei gleichzeitig geringen Strömen charakterisierbar ist. Die höheren Spannungen liefern die im Vergleich zum Jahresverlauf niedrigeren Außentemperaturen. Der Strom ist proportional zur Einstrahlung und entsprechend der schlechteren Einstrahlungsbedingungen im Winter liefert der Strang in dem Zeitbereich nur geringere Ströme. Im Sommer (rote Punktemenge) ist es genau umgekehrt. Die im Vergleich zum Jahresverlauf höheren Temperaturen drücken die Spannung und die höheren Einstrahlungswerte liefern die höheren Ströme. Während der Winter die Punktelcke rechts unten prägt, findet man die Sommerwerte links oben. Beide Punktebereiche umfassen die Punktemengen der Übergangsmonate im Frühjahr und im Herbst. Die Form der Kurve ist sonst fehlerfrei.

Würde man als Zeitintervall für die Aufzeichnung nun einen Tagesverlauf der MPP-Wertepaare wählen und als zeitliche Zuordnung die Uhrzeit, so würde man einen Punktelverlauf erhalten, der typischerweise, aber natürlich abhängig von den Tagesbedingungen, rechts unten beginnend, in dem Farbbereich der Jahreszeit ansteigend, auf der linken Seite der Farbfläche nachmittags und Abends abfallen würde. Mit den Farbzusordnungen können auch andere Abhängigkeiten dargestellt werden, wie beispielsweise von der Einstrahlung, Außen- oder Modultemperatur.

Das Fehlerbild bei schlecht ausgelegten Anlagen

In der Anwendung der Punktelwolken lässt sich beispielsweise schnell und anschaulich erkennen, ob das Zusammenspiel der Systemkomponenten optimal funktioniert, ob die Anlage richtig ausgelegt und geplant ist. Einfluss auf die optimale Abstimmung von Solargenerator und Wechselrichter haben die charakteristischen Betriebsbereiche von Modul und Wechselrichter, die geografische

Lage, die Ausrichtung der Generatorebene (Azimut und Elevation), die standortspezifischen Wetterprofile, die Gegebenheiten vor Ort und die Montageart. Der Anlagenplaner kann bei der Berechnung und Optimierung der Systemkonfigurationen inzwischen auf eine ganze Serie verschiedener Auslegungs- und Simulationsprogramme zurückgreifen. Letztendlich erschienene Veröffentlichungen geben Hinweise zur Auslegungsarbeit [1].

Ob der Wechselrichter wirklich optimal zum Generator passt, war bislang grafisch nur mit viel Aufwand darstellbar. Dies ändert sich durch den Einsatz der Leistungsdarstellung in den Flächendiagrammen. Aus einer Punktelcke lässt sich mit relativ geringem Aufwand und sehr anschaulich erkennen, ob die Auslegung der Systemkonfiguration richtig ist. Ist dies der Fall, läuft die Punktelcke wie die ideale Wolke nach oben rund aus. Andernfalls tritt ein abruptes Verschwinden der Leistungspunkte an einer leicht gekrümmten, aber scharfen Linie auf. An dieser Linie, welche genau der Hyperbel seiner Maximalleistung entspricht, riegelt der Wechselrichter ab. Der PV-Generator könnte eine höhere Leistung liefern, da aber der unterdimensionierte Wechselrichter diese Leistung nicht aufnehmen kann, zwingt er die Leistungspunkte, die über der Hyperbel liegen würden, auf sein Leistungsmaximum herunter. Das Leistungspotenzial der Anlage wird also nicht vollständig genutzt.

Die Punktelcke in Abb. 2, einer weiteren netzgekoppelten PV-Anlage aus Oberbayern, zeigt am oberen Ende diese Strukturierung oder Begrenzung. Wenn nun der Betriebsbereich des Wechselrichters mit seiner Leistungshyperbel dazu eingezeichnet wird [2], ist festzustellen, dass die obersten Punkte der Wolke exakt auf dieser Linie liegen (Abb. 3). Eigentlich müsste die Wolke nach oben rund auslaufen (Abb. 1), da aber der Wechselrichter nicht für diese höheren Leistungen ausgerichtet ist, wird nicht die entsprechend mögliche Leistung der PV-Anlage ins Netz eingespeist. So werden Fehlpassungen sehr schnell transparent.

In guten Wechselrichter-Herstellerdatenblättern werden Wirkungsgradkennlinien als Funktion der Ausgangsleistung mit der Eingangsspannung als Parameter dargestellt [3]. Daraus lassen sich mit geringem Rechenaufwand Linien gleichen Wirkungsgrades ableiten und in typischen I(U)-Diagrammen – gleichspannungsseitig – darstellen. Mit diesen Äquieffizienzlinien erhält man eine adäquate Charakterisierung des Schnittstellenverhaltens eines Wechselrichters zum Solargenerator innerhalb der zulässigen Strom- und Spannungsgrenzwerte. Durch die Form der Darstellung zeigt sich, in

Wer sich früh entscheidet,
spart länger!

Signet Solar-
Dünnschicht-Solarmodule
aus Deutschland.
85 Wp – jetzt verfügbar!

Start der Serienproduktion
am 14.10.2008

- Umweltfreundliche aSi-Module
- Schnelle Montage mit alfasolar A2-System
- Hervorragende Wirtschaftlichkeit!



Neben eigen entwickelten innovativen Solarsystemen (wie alfasolar Pyramid, ecoline oder MBPV) und Montagegestellen vertreiben wir ab sofort auch die neuen Signet Solar-Dünnschicht-Module. Mit dem bekannt starken alfasolar-Service und dem Know-how aus über 15 Jahren erfolgreicher Marktpresenz.

Hohe Qualität, faires Miteinander, zufriedene Kunden und umweltfreundliche Produktion sind die Eckpfeiler für unseren Erfolg – und für Ihren Mehrwert!

Wir informieren Sie gern ausführlich:

alfasolar Vertriebsgesellschaft mbH

Ahrensburger Straße 4-6 · D-30659 Hannover

Tel. +49 (0) 511 261 447-10 · Fax +49 (0) 511 261 447-50
sales@alfasolar.de · www.alfasolar.de

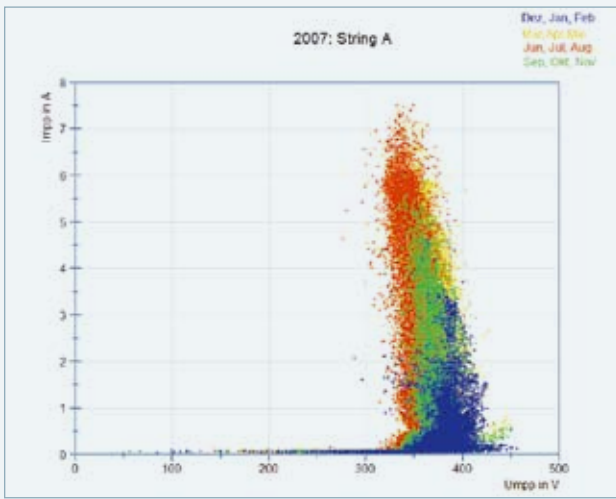


Abb. 1: Flächendiagramm einer richtig dimensionierten PV-Anlage

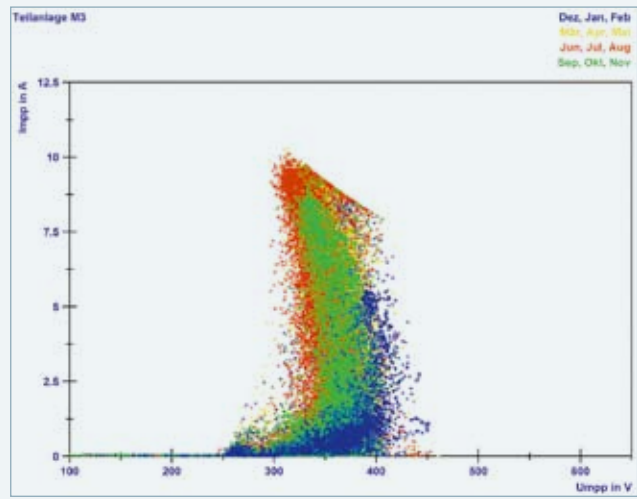


Abb. 2: Punktewolke einer PV-Anlage mit unterdimensioniertem Wechselrichter

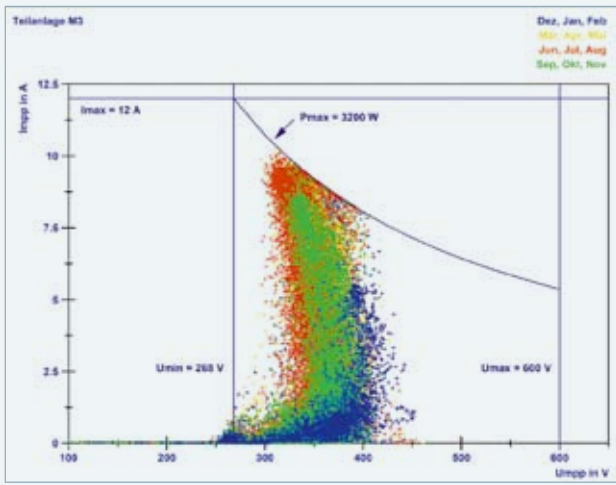


Abb. 3: Punktewolke mit eingezeichneter Leistungshyperbel

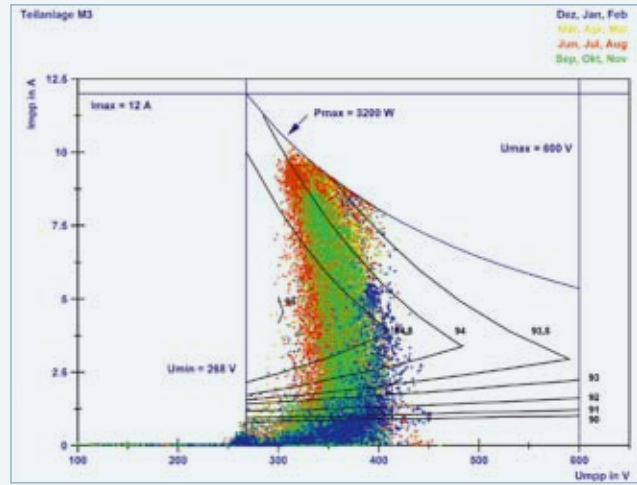


Abb. 4: Punktewolke mit eingezeichneten Äquieffizienzlinien



Satellitenaufnahme des Hauses zu den Abbildungen 5 und 6

welchen Wirkungsgradbereichen des Wechselrichters der PV-Generator unterwegs ist (Abb. 4). Auch wird sichtbar, dass isolierte Spitzenwerte des Wirkungsgrades unter Umständen nicht erreicht werden können.

Das Fehlerbild bei Verschattung

In vielen Fällen ist mit einem schnellen Blick auf das Satellitenbild eines Hauses nicht zu erkennen, ob auf die Dachfläche, auf der sich die Solarmodule befinden, beispielsweise durch entfernte Bäume oder benachbarte Bauwerke, Schatten geworfen werden. Zu ermitteln, zu welcher Jahres- und Tageszeit dies gegebenenfalls eintritt, ist nur mit etwas Rechenaufwand möglich. Durch die Punktewolken lassen sich auch Verschattungsereignisse identifizieren. Punktstrukturen links von der Hauptwolke, jenseits der typischen Bananenform der Punktewolke, können Verschattungssituationen vermuten lassen. Je mehr Punkte sich links der Hauptwolke befinden, desto größer sind die verschattungsbedingten Ertragseinbußen.

Durch die Farbe der MPP-Punkte außerhalb der Wolke lässt sich die Jahreszeit leicht bestimmen in der sich ein Schatten auf den PV-Modulen befindet (Abb. 5). Durch eine höhere zeitliche Auflösung genau dieser Monate ist es möglich die Tageszeit des Schattenein- und Austritts bis auf die zeitliche Auflösung des Datensatzes genau zu ermitteln (Abb. 6): Indem man die einzelnen Stunden mit verschiedenen Farben aufträgt und anschließend die Farben der Punkte, welche die Verschattung anzeigen, ihrer Zeit zuordnet.

Für unsere gemeinsame Zukunft

heroal PV - was heroal aus Sonne macht!

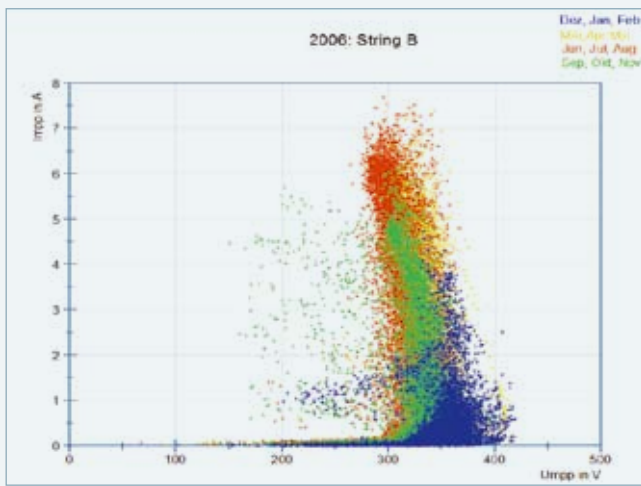


Abb. 5: Jahres-Punktewolke mit verschattungsbedingter Ertragsverminderung

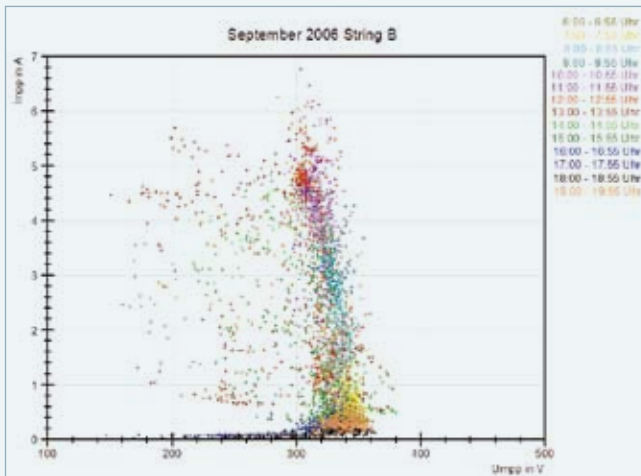


Abb. 6: September-Punktewolke zur Verschattungszeitbestimmung

Wenn die Zeiten der Verschattung ermittelt sind, ist es über eine Sonnenstandsanalyse einfach festzustellen, welches Objekt die Leistungseinbußen verursacht.

Bei dieser Anlage geht man bei einem Blick auf das Satellitenbild von einer unverschatteten Anlage aus, durch die Punktewolke erkennt man jedoch Verluste im Ertrag durch den Schattenschwurf der Bäume westlich des Hauses im Herbst und Winter. Durch die genauere Betrachtung des Septembers erkennt man, dass der Schatten zwischen 14:00 und 17:00 Uhr auf den Modulen liegt. Da der Schatten die Punkte über den gesamten Nachmittag sehr weit nach links treibt, ist ein entsprechendes Defizit im Ertrag die Folge.

Konfidenzbereiche durch die vierte Dimension

Wenn man dem Flächendiagramm eine weitere Achse hinzufügt, kann noch mehr Information in dem Diagramm verarbeitet werden. Es wird eine weitere anschauliche Fehleridentifikation möglich. Man kann beispielsweise die Proportionalität des Stroms der Module zur Einstrahlung überprüfen. Auf der y- und x-Achse wird weiterhin der Strom über der Spannung aufgetragen. Hinzu kommt nun auf der z-Achse die Einstrahlung. Zur verbesserten Erkennung fehlender Proportionalität kann eine Hilfsebene eingezeichnet werden. Liegen die Punkte der Wolke unter der Ebene, liefern die PV-Module nicht den Strom, der bei der entspre-

heroal bietet Systeme für Photovoltaik:

- Alles aus einer Hand
- Alle Systemkomponenten sind optimal aufeinander abgestimmt
- Bestmögliche Planungsunterstützung durch heroal Software
- Garantie auf Leistung und Funktion



- Rolläden
- Rolltore
- Fenster
- Türen
- Fassaden
- Insektenschutz
- Photovoltaik

heroal-Johann Henkenjohann
GmbH & Co. KG
Östervieher Str. 80 · D-33415 Verl
Tel. +49 (0) 52 46-5 07-0 · Fax +49 (0) 52 46-5 07-222
info@heroal.de · www.heroal.de

heroal

chenden Einstrahlung möglich wäre.

Die resultierende Punktwolke (Abb. 7 und 8) ermöglicht die Darstellung eines Referenzraums, indem sich die Punktwolke bewegen sollte. Findet sich die Punktwolke nicht in diesem Konfidenzbereich, werden Systemfehler bestätigt. Diese Art der Darstellung veranschaulicht bei der Auswertung von Messdaten

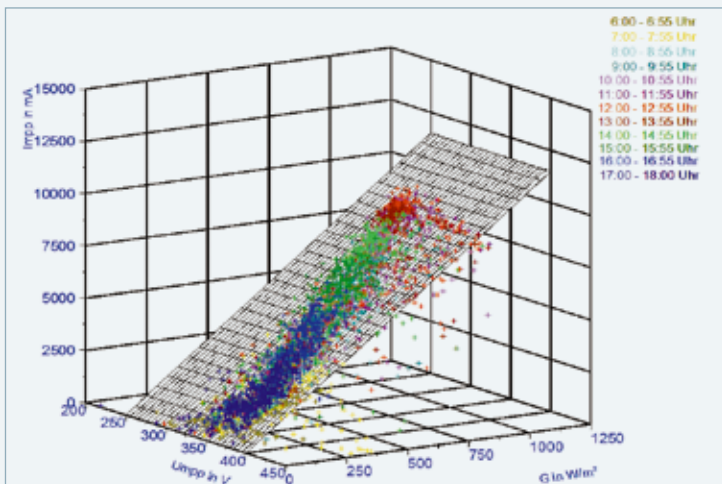


Abb. 7: 3D-Darstellung von Punktwolke und Referenzebene für einen exemplarischen Monat (Megawattanlage in Höslwang)

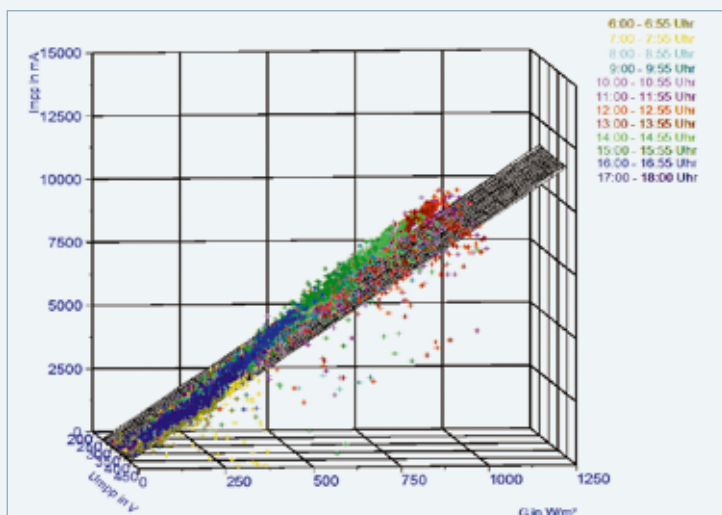


Abb. 8: Leicht gedrehte Grafik aus Abb. 7. Die Spannungsgrenzen wurden aus Darstellungsgründen heraus genommen (Megawattanlage in Höslwang)

sehr schön die Qualität und Charakteristik des untersuchten Systems. Daraus resultiert eine schnelle und eingängige Interpretation des Systemverhaltens.

Anwendung auf PV-Kraftwerke – Megawattanlagen

1997 wurde die erste Aufdach-MW-Anlage und damit damals weltweit größte Aufdachanlage (auf der Neuen Messe München) mit einem Zentralwechselrichter errichtet. In der Anlagenplanung wurden dabei alle Komponenten einzeln und auch im Zusammenspiel optimiert. Ziel der Anlagenplanung war eine ertragsoptimierte Anlage, die über Jahrzehnte hohe und stabile Erträge generiert. Ergebnis war eine damals eher unübliche, konservativ gehaltene Auslegungsstrategie ([4] und [5]). Bei der Anlage in München wurde eine 1:1,08-Auslegung von Wechselrichter-AC- zu PV-Generatorenleistung gewählt. Die Betriebsdaten dieser PV-Anlage zeigen, wie wertvoll unter anderem diese Auslegungsarbeit im Ergebnis war und ist. Die PV-Anlage zeigt seit 12 Jahren stabile Performance-Ratio-Werte um 80 % (80 % in 2008) und spezifische Jahreserträge von beispielweise 1.047 kWh/(kW·a) in 2008.

Bei der 1,8-MW-PV-Anlage in Höslwang ist 2004 erstmals eine 1,8-MW-Zentralwechselrichteranlage im Master-Slave-Slave-Slave verschaltet worden – für die höchste energetische Verfügbarkeit. In der Anlagenplanung sind wieder verschiedene Arbeiten zur Systemauslegung dem Bau vorausgegangen. Die PV-Anlage wird mit WinCC, einem PC-basierten Prozessvisualisierungs- und -leitsystem der Siemens AG in hoher zeitlicher Auflösung überwacht. Basierend auf den Sekundenmesswerten von WinCC konnten Systemoptimierungen im laufenden Betrieb durchgeführt werden und die Abregelgrenze erhöht werden. Das MPP-Regelverhalten und die Tagesspannungswerte eines exemplarischen Tages zeigt Abb. 9.

Durch die zeitliche Zuordnung auf Stundenbasis wird der Tagesverlauf des Anlagenverhaltens innerhalb der Punktwolke sehr schön sichtbar. Bei Megawattanlagen mit Master-Slave Prinzip lässt sich auch gut die Zuschaltung der Slaves durch die Punktwolke erkennen. Doch selbst bei der in Höslwang gewählten 1,03:1-Auslegung von Wechselrichter-DC- zu PV-



Unsere Montagesysteme helfen in fast allen Lebenslagen!



Gewerbegebiet an der B15
Alustr. 1
83527 Kirchdorf/ Haag i. OB

Tel. 08072 / 91 91 200 solar@schletter.de
Fax. 08072 / 91 91 9200 www.solar.schletter.de

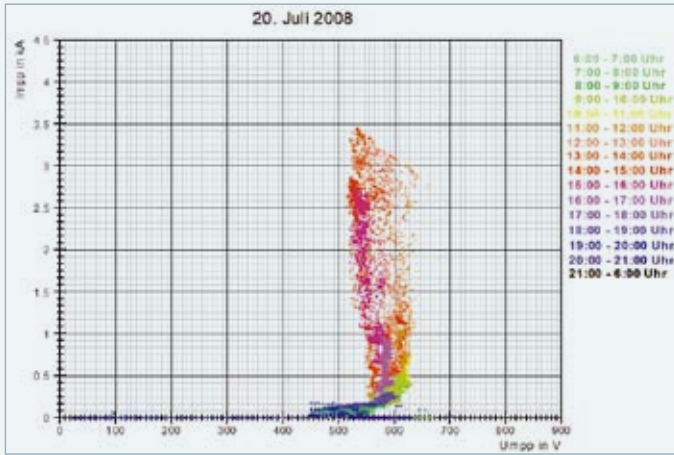


Abb. 9: Der Tagesverlauf der MPP-Werte der 1,8-MW-Anlage ‚Höslwang‘ am 20. Juli 2008 [4]

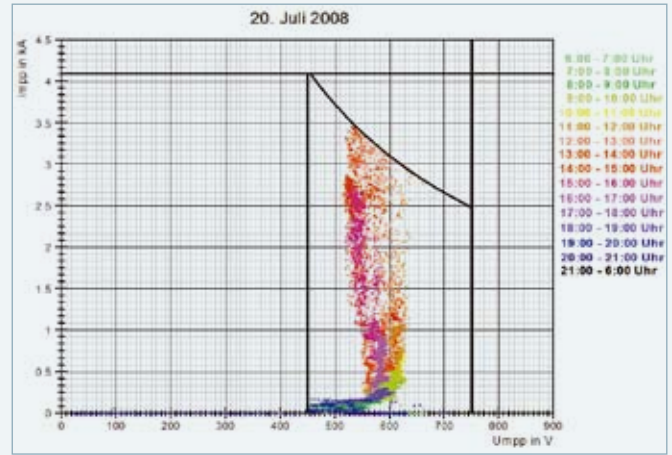


Abb. 10: Der Tagesverlauf mit Wechselrichterbetriebsfenster und sichtbarer Leistungsbegrenzung [4]

Generatorkennleistung erfolgen ähnlich wie bei der Neuen Messe München noch Leistungsbegrenzungen. Mit der Integration des Wechselrichterbetriebsfensters (Abb. 10) ist auch die Abregelung bei der DC-Nennleistung von 1.860 kW der Wechselrichter deutlich zu erkennen. Trotz Leistungsbegrenzungen hat die Anlage in 2008 PR-Werte von 82,6 % bei 1.119 kWh/(kW·a) erzielt.

In der Anlagenplanung sollte die Optimierung des Zusammenspiels aller Komponenten auf jeden Fall mit aktuellen Programmen und hoch aufgelösten Einstrahlungsdatensätzen vorgenommen werden. Die Basisanpassung des MPP-Bereichs der Wechselrichter und das mögliche Temperaturfenster mit dem ausgewählten Modul werden so sinnvoll und verständlich optimiert. Bei optimalen Anlagen ist fast keine Abregelung vorhanden. Bei einer 1:1-Auslegung treten bei einer 1-MW-Anlage schon bezogen auf Minutenmittelwerte Abregelungsverluste von 1 bis 2 % auf.

Zusammenfassung

Auf Basis tatsächlich gemessener, hoch aufgelöster Betriebsdaten erfolgt eine neue Leistungsbeschreibung von PV-Generatoren in drei- bzw. vierdimensionalen Grafiken. Diese neue Form der graphischen Darstellung ermöglicht die anschauliche und schnelle Darstellung von Systemzusammenhängen und die

Identifikation von Fehlern in der Konfiguration netzgekoppelter Photovoltaik-Anlagen. Fehlerfälle können über Konfidenzbereiche schnell identifiziert werden. In der Analyse der Fehler sind die Punktwolken ein spannendes Werkzeug. Die Anwendung der Punktwolken reicht bis zur Systemoptimierung. Bereits vorhandene Wirkungsgradinformationen von Wechselrichterherstellern werden in Äquieffizienzlinien umgerechnet und in die Grafik integriert. Die Arbeit bildet die Grundlage für eine Serie weiterer Untersuchungen.

Mike Zehner, Toni Weigl und Anna Izycki

Mike Zehner leitet die Arbeitsgruppe des Labors für Solartechnik im Studiengang Regenerative Energien Energietechnik der Hochschule München und ist Geschäftsführer der Solarschmiede GmbH. Toni Weigl und Anna Izycki sind Mitarbeiter der Arbeitsgruppe an der Hochschule München.

Referenzen und Quellen:

- [1] Bruno Burger, Auslegung und Dimensionierung von Wechselrichter für netzgekoppelte PV-Anlagen, Staffelstein 20. PV-Symposium 2005;
- [2] Heribert Schmidt, Bruno Burger, Modellierung der Spannungsabhängigkeit des Wechselrichter-Wirkungsgrades, Staffelstein 23. PV-Symposium 2007;
- [3] Heinrich Hufnagel, Mike Zehner, Illustration der Auslegung netzgekoppelter PV-Anlagen und die Suche nach der optimalen Abstimmung zwischen Generator und Wechselrichter, Staffelstein 22. PV-Symposium 2006;
- [4] Bodo Giesler, Mike Zehner, Toni Weigl, Auslegungs- und Betriebserfahrungen bei Megawattanlagen, Staffelstein 24. PV-Symposium 2009;
- [5] Giesler B., Zehner M., Erbeck G., Hartung A., Wu S., Karg N., Auslegungsprogramm SINVERT solar select; Siemens AG und Solarschmiede GmbH, Entwicklung seit 2001;



Eine Unternehmung der MDT technologies GmbH



Hersteller und Systemanbieter für Photovoltaik

Module - Wechselrichter - Komplettsysteme

Service & Qualität zu Top-Preisen

Wir beliefern ausschließlich Fachhändler und Installateure

Unser Angebot:

- MDT Module mit 200 Wp bis 230 Wp
- First Solar First Solar Module für preisgünstige Anlagen > 30 kWp
- SMA - KACO Wechselrichter
- MDT AluFix Montagesysteme

Alle MDT Komplettsysteme beinhalten im Preis eine „Solar-Vollkasko“ mit Ertragsausfallversicherung



www.mdt solar.de
solar@mdt.de

Papiermühle 1
51766 Engelskirchen
Fon +49/2263/88-116
Fax +49/2263/2587