Dünnschichtmodule unter realen Bedingungen testen

Das Testlabor Solab des ZSW in Stuttgart bietet spezialisiertes Know-how im Bereich der Dünnschichttechnologien. Hier und im Außentestfeld Widderstall werden Dünnschichtsolarmodule normenkonformen Tests unterzogen. Zum Dienstleistungsangebot zählen aber auch Prüfungen mit Werten, die über den Rahmen der Norm hinausgehen.

Einstrahlungsstärke und Modultemperatur

Leistungsbestimmung, Energieertragsbestimmung und die Berechnung weiterer Parameter sind Themen, mit denen sich die Mitarbeiter des Fachgebiets „Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen“ (MSA) des ZSW im Rahmen des Arbeitsfeldes Modul- und Anlagencharakterisierung beschäftigen. Das Thema Langzeitstabilität und Alterungsverhalten von Modulen wurden bereits in **ep** 08/2010, S. 685–687, vorgestellt. Wie schon dort zeigt sich auch im Folgenden an einigen Beispielen, dass die Ergebnisse von Modultests, die unter realen Bedingungen erzielt werden, von Testergebnissen unter Standard-Testbedingungen (STC) fast immer abweichen. Für die Fachleute beim Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden Württemberg steht deshalb fest, dass das Außentestfeld Widderstall eine unverzichtbare Ergänzung zum institutseigenen Labor darstellt.

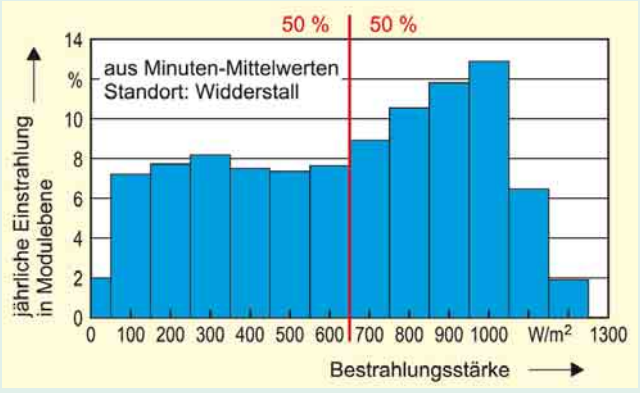
„Messungen von Einstrahlungsstärken unter realen Bedingungen weichen fast immer deutlich von Messungen unter Standard-Testbedingungen ab, wie unsere Untersuchungen beweisen“, bekräftigt Dipl.-Ing. *Dieter Geyer* und belegt seine Aussage mit zahlreichen Diagrammen: Das erste enthält im ZSW-Außentestfeld Widderstall ermittelte Einstrahlungswerte, genauer: Minuten-Mittelwerte, sortiert in 100-W/m²-Klassen (Bild ❶). Fast 13 % der Einstrahlung liegt in der Klasse um 1000 W/m². Fasst man dieselben Daten zu Stunden-Mittelwerten zusammen und teilt sie ebenfalls in Klassen ein, ändert sich die Verteilung (Bild ❷). Das Diagramm zeigt jetzt zu 55 % „schlechtes“ Wetter, bei der Grafik mit den Minuten-Mittelwerten waren es 50 % – bei identischer Datenbasis.

Es offenbart sich aber nicht nur ein Unterschied bei der Verteilung des Wetters, sondern auch eine Änderung des prozentualen Anteils einiger Einstrahlungsklassen an der Gesamteinstrahlung. So ist der Schönwetter-Peak bei 1000 W/m² aus Bild ❶ von rund 13 % auf etwas mehr als 9,5 % gesunken; er existierte offenbar nur für kurze Zeit und nicht für eine ganze Stunde.

Ferner ist deutlich zu erkennen, dass sich der „Einstrahlungsberg“ nach links verschoben hat und jetzt zwischen 650 und 950 W/m² liegt. Die Erklärung sei relativ einfach, erläutert *Geyer:* „Während der Messungen herrschte wechselhaftes Wetter mit Wolken und blauem Himmel, also typisch mitteleuropäisches Sommerwetter, das die Einstrahlungswerte auf ein mittleres Niveau einpendeln ließ. Die niedrigen Werte hingegen blieben in etwa gleich, wie ein Vergleich der beiden Grafiken zeigt. Auch hier zeigt sich ein Wetterphänomen, das für unsere Breitengrade charakteristisch ist: Graues Wetter mit wenig Einstrahlung ändert sich kaum, weshalb Messungen im Minuten- und Stundentakt fast identische Werte ergeben.“

Ganz anders sieht die Grafik aus, die Messergebnisse aus einer Anlage in Sizilien darstellt (Bild ❸). Dort gilt: volle Sonne oder keine Sonne. Das zeigt sich dann auch in der Darstellung: Der „Einstrahlungsberg“ hat sich gegenüber Bild ❷ wieder nach rechts verschoben; das gute Wetter überwiegt eindeutig.

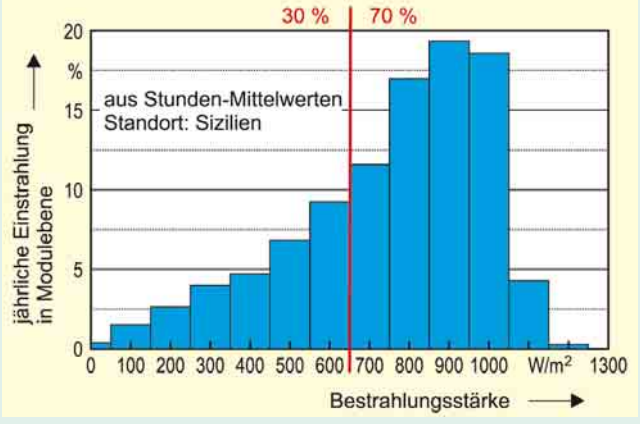
Neben der Bestrahlungsstärke spielt für die Charakterisierung eines Moduls die Modultemperatur eine große Rolle. Messungen an einem aufgeständerten CIS-Modul im Außentestfeld Widderstall ergaben, dass fast drei Viertel der jährlichen Einstrahlung bei Modultemperaturen oberhalb der STC-Temperatur von 25 °C erzielt wird, rund 43 % sind es bei Modultemperaturen zwischen 35 und 55 °C (Bild ❹). Es ist also auch hier so, dass die realen Werte von den STC-Werten, mit denen im Labor gearbeitet wird, erheblich abweichen. „Das spricht auch im Nachhinein noch für unsere Entscheidung, ein Außentestfeld einzurichten“, betont *Geyer.*



❶ **Bestrahlungsstärken aus Minuten-Mittelwerten**
Quellen: ZSW (4), Universität Tallinn (1)



❷ **Bestrahlungsstärken aus Stunden-Mittelwerten**



❸ **Bestrahlungsstärken aus Stunden-Mittelwerten in einer Anlage in Sizilien**

Leistungsbestimmung von Dünnschichtmodulen

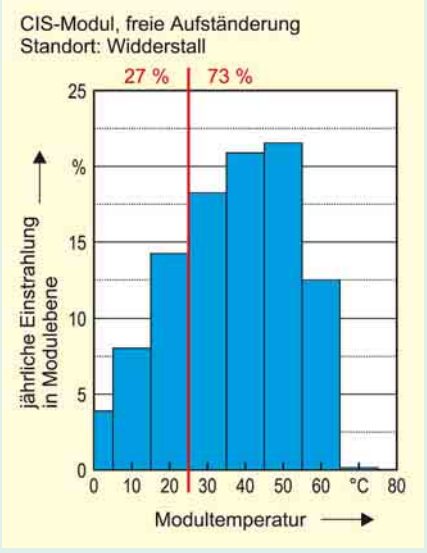
Die Leistungsbestimmung bei Dünnschichtmodulen ist recht anspruchsvoll, denn anders als kristalline Module zeigen Dünnschichtmodule ein Verhalten, das zu großen Teilen von ihrer Vorgeschichte bestimmt wird. *Geyer:* „Wenn wir den Leistungswert unter unserem Sonnensimulator ermitteln, hängt das Ergebnis – je nach Technologie – davon ab, ob das Modul vorher in dunklen oder

hellen Räumen gelagert wurde. Lag es dabei in der Sonne oder unter Kunstlicht, lag es im Warmen oder im Kalten? All das führt dazu, dass wir bei unseren Messungen von Modul zu Modul unterschiedliche Werte bekommen können."

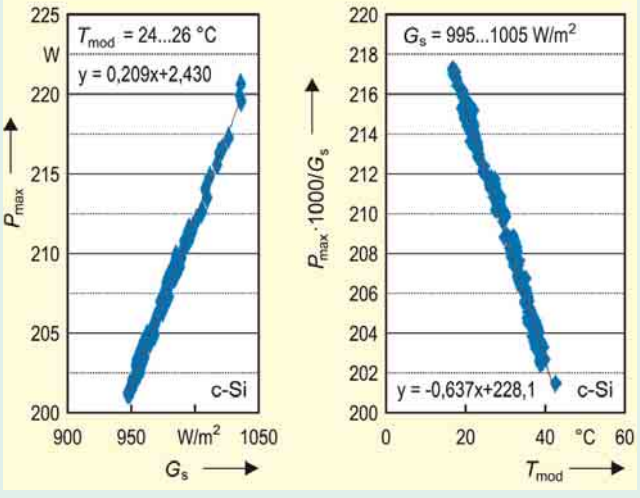
Um dennoch überhaupt vergleichbare Testergebnisse bekommen zu können, wird in der Dünnschicht-Norm beispielsweise gefordert, die Module vor der Messung einer bestimmten Menge Kunstlicht oder natürlichem Licht auszusetzen. Den meisten Herstellern dauert das natürlich zu lange; andererseits sind sie aber natürlich auch bestrebt – oder sollten es zumindest sein –, einen korrekten Wert anzugeben; wenn möglich den Wert, der sich beim Betrieb im Freien endgültig einstellt. Bei manchen Technologien verfahren sie in der Weise, dass sie unmittelbar nach der Fertigung eine Kennlinienmessung mit dem Sonnensimulator durchführen und das Ergebnis mit einem festen Korrekturfaktor (Erfahrungswert) optimieren. Andere Hersteller setzen, bevor sie Messungen durchführen, ihre Module nach der Fertigung zunächst bestimmten Lichtbedingungen aus. Korrekturfaktoren oder bestimmte Lichtvorbehandlungsstrategien können aber erst dann bestimmt werden, wenn endgültige verlässliche Modulkennwerte vorliegen. Voraussetzung dafür ist in jedem Fall eine längere Produktionserfahrung.

Die Modulleistung lässt sich auch aus Langzeit-Kennlinienmessungen im Freien ermitteln, wie *Geyer* anhand eines weiteren Diagramms demonstriert (Bild ❺). Die Darstellung zeigt Messergebnisse und Berechnungen, die Wissenschaftler der Univer-

❹ Modultemperatur, gewichtet

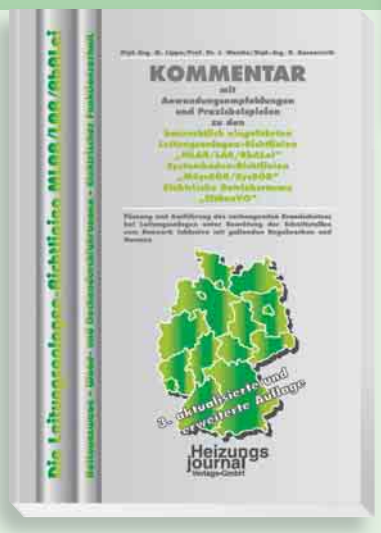


❺ Leistungsbestimmung aus Langzeit-Kennlinienmessungen



Kommentar mit Anwendungsempfehlungen zur Leitungsanlagen-Richtlinie (MLAR/LAR/RbALei)

TIPP



- Enthält den Richtlinientext der MLAR und den Hinweis zu den abweichenden Richtlinientexten der baurechtlich eingeführten Leitungsanlagen-Richtlinien (LAR/RbALei) in den Bundesländern
- Die Kommentierung bezieht sich auf die einzelnen Absätze mit Praxisempfehlungen und die grafische Interpretation durch Zeichnungen und Maßangaben.
- Ausführliche Praxisempfehlungen und Praxisbeispiele helfen die Leitungsanlagen-Richtlinien bei bundesweiten Baustellen in die Praxis umzusetzen.

Lippe/Wesche/Rosenwirth, Kommentar mit Anwendungsempfehlungen und Praxisbeispielen zur Leitungsanlagen-Richtlinie (MLAR/LAR/RbALei)

3., akt. u. erw. Aufl. 2007, 260 S., mit zahlr. Abb. u. Tab., Broschur, Bestell-Nr. 586 881 4, **€ 96,00**

Die Geltungsbereiche:
- Leitungsanlagen in Flucht- und Rettungswegen
- Leitungsdurchführungen durch feuerwiderstandsfähige Wände und Decken
- Deckenabschottungsprinzip für Leitungsanlagen und Bodenabläufe
- Installationsschachtprinzip nach DIN 4102-4 und -11
- Elektrischer Funktionserhalt von Leitungsanlagen
- Systemböden-Richtlinie
- EltBau-Verordnung für elektrische Betriebsräume

shop huss
HUSS-MEDIEN GmbH
10400 Berlin

Direkt-Bestell-Service:
Tel. 030 42151-325 · Fax 030 42151-468
E-Mail: bestellung@huss-shop.de
www.huss-shop.de

Preisänderungen und Lieferm öglichkeiten vorbehalten

Jetzt bestellen!

Ich bestelle zur Lieferung gegen Rechnung zzgl. Versandspesen zu den mir bekannten Geschäftsbedingungen beim

huss-shop
HUSS-MEDIEN GmbH
10400 Berlin

KUNDEN-NR. (siehe Adressaufkleber oder letzte Warenrechnung)

Expl.	Bestell-Nr.	Titel	€/Stück
	586 881 4	Kommentar mit Anwendungsempfehlungen und Praxisbeispielen zur Leitungsanlagen-Richtlinie (MLAR/LAR / RbALei)	96,00

Firma/Name, Vorname

Branche/Position — z. Hd.

Telefon — Fax

E-Mail

Straße, Nr. — Postfach

Land/PLZ/Ort

Datum — Unterschrift — 1012 ep



❻ **Teststand mit 1-kW-Anlagen im ZSW-Testfeld Widderstall. Schon der unterschiedliche Platzbedarf zeigt an, dass (v.l.n.r.) c-Si-, a-Si- und CIS-Module unterschiedliche Wirkungsgrade haben**



❼ **Modul-Teststand im ZSW-Testfeld Widderstall. Die Wissenschaftler gehen hier u. a. der Frage nach, welche Technologie den besten Wirkungsgradverlauf verspricht** Fotos: ZSW

sität Tallinn ermittelt und durchgeführt haben. Sie basieren einmal auf Einstrahlungswerten, aus denen mit Hilfe der Kennlinie die Leistung ermittelt und in einem weiteren Schritt der Temperaturkoeffizient (T_{mod}) bestimmt wurde. Im zweiten Fall errechnete man auf der Basis von P_{max} und T_{mod} die Einstrahlung G_s.

„Die Tallinner haben zur Berechnung also zwei unterschiedliche Wege gewählt und sind trotzdem auf fast gleiche Werte gekommen. Ganz erstaunlich ist, dass die Ergebnisse für die Einstrahlung nur um etwa 10 W/m² (995–1005 W/m²) schwanken. Das ist nur ein halbes Prozent, so genau schafft´s kein Sonnensimulator. Und das beweist: Außenmessungen sind sehr präzise."

Energieertrag und Performance Ratio

Zur Ermittlung des Jahresenergieertrags werden Dünnschichtmodule an eine spezielle Last angeschlossen, die in einem festen Zeitraster die I/U-Kennlinien ermittelt und zwischenzeitlich im Punkt maximaler Leistung arbeitet. Durch Auswertung der Einzelmessungen lässt sich dann eine Charakterisierung des Moduls über den gesamten Betriebsbereich ableiten. „Wir können Energieertragsbestimmungen also auch unabhängig von der Leistungsangabe durchführen", betont *Geyer.* „Wir installieren das Modul in unserem Außentestfeld Widderstall, ermitteln die Außendaten und übertragen sie auf die Kennlinie. Dann sehen wir, welche Leistung das Modul bringt – unter realen Bedingungen, die in der Regel von den Standard-Testbedingungen abweichen."

Doch nicht nur der Energieertrag als solcher ist für Hersteller und Kunden von Interesse, sondern auch die Performance Ratio (PR), die das Verhältnis von tatsächlichem Energieertrag zum theoretisch möglichen Energieertrag einer Photovoltaikanlage wiedergibt. Errechnet wird zunächst der spezifische Ertrag ($Y=E_{Zähler}/P_{Nenn}$ [kWh/kW$_P$]), der dann noch zur gemessenen Einstrahlung in Modulebene ins Verhältnis gesetzt wird ($PR=Y/E_{POA}$ [%]). Das Ergebnis ist eine wetterunabhängige PR. Er würde sich freuen, so *Geyer,* wenn sich die Hersteller dazu durchringen könnten, diese Performance Ratio als Qualitätsgröße in ihren Datenblättern anzugeben. „Dann wäre für die Verbraucher viel gewonnen." Doch leider werde dieser Punkt in Fachkreisen nur ansatzweise diskutiert, wohl auch, weil damit auf die Hersteller mehr Arbeit zukäme als bisher. „Die müssen sich bisher nur um ihren STC-Punkt kümmern und sonst um gar nichts."

Ertragsvergleich verschiedener Techniken

Welche Technologie hat den besten Wirkungsgradverlauf und verspricht von daher den größten Ertrag? Auch diese Frage wollen und können die Wissenschaftler des ZSW beantworten. Dazu wurden am Teststand in Widderstall (Bilder ❻ und ❼) in einem zeitlichen Intervall von 10 Sekunden Kennlinien unterschiedlicher Module gemessen.

Aus der Vielfalt der Messungen ergeben sich Diagramme, die für alle geprüften Technologien unterschiedlich ausfallen. Es wird deutlich, dass die Wirkungsgrade von CdTe- und des a-Si-Modulen auch bei sinkender Einstrahlung relativ konstant bleiben, wobei dieses Phänomen bei der a-Si-Technologie am ausgeprägtesten ist. Beim c-Si- und mehr noch beim CIS-Modul hingegen geht die Leistung bei fallender Einstrahlung – schon ab etwa 400 W/m² – deutlich zurück. Die Werte für den bedeckten Tag sind stark gestreut, Einstrahlungen von mehr als 350 W/m² hat es nicht gegeben.

Bei den Einstrahlungswerten für den Juni macht sich der Temperaturkoeffizient deutlich bemerkbar; das heißt, je wärmer das Modul wird, desto geringer wird die Leistung. Das gilt generell für alle Technologien, der Rückgang der Leistung fällt jedoch unterschiedlich stark aus. So ist an der Bandbreite der Werte zu erkennen, dass a-Si-Module einen geringeren Temperaturkoeffizienten haben als kristalline Module; bei Modulen der CdTe- und CIS-Technologie sind die Werte fast gleich. Bei Einstrahlungswerten ab etwa 500 W/m² abwärts beginnt die Bandbreite der resultierenden Wirkungsgrade, sich mehr oder weniger zu spreizen, je nach Technologie. Beim CIS-Modul beispielsweise wurden bei einer Einstrahlung von 400 W/m² Wirkungsgrade in einer Bandbreite von etwa 8 bis 12 % gemessen. Die Erklärung: Es stellt sich bei einer bestimmten Einstrahlung ein relativ guter Wirkungsgrad ein, weil das Modul noch kalt ist, beispielsweise am frühen Morgen, während sich am Abend bei gleicher Einstrahlung ein über die Maßen niedriger Effizienzwert zeigt, weil das Modul nach starkem Sonnenschein am Tag noch überaus warm ist.

Fazit

Qualität, Lebensdauer und Effizienz von Photovoltaikanlagen hängen von vielen Faktoren ab. Sie zu erkennen, zu analysieren und zu vermitteln und damit gleichzeitig Module und Anlagen zu charakterisieren – das alles zählt zu den Aufgaben des Fachgebiets „Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen" (MSA) des ZSW. Für die notwendigen Prüfungen und Untersuchungen stehen den Wissenschaftlern das institutseigene Solarlabor (Solab) und außerdem das Außentestfeld Widderstall zur Verfügung. Erst die Messungen im Freien, also unter realen Betriebsbedingungen, liefern optimale Untersuchungsergebnisse. Sie unterscheiden sich in der Regel, wie die genannten Beispiele gezeigt haben, erheblich von den Ergebnissen, die sich unter STC-Bedingungen erzielen lassen.

W. Wilming