Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 88 (1997)

Heft: 10

Artikel: Charakterisierung eines Photovoltaik-Grosslaminats

Autor: Durisch, Wilhelm / Urban, Jochen / Wörz, Andreas

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902201

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Photovoltaikanlagen gewinnen eine zunehmende Bedeutung bei der Versorgung mit elektrischer Energie. Um so wichtiger ist es, dass die Solarmodule und Laminate die vom Hersteller garantierte Leistung erbringen. Das ist leider nicht immer der Fall. Ausserdem werden bei der Auslegung von Anlagen die Verluste in der Gleichstromverkabelung oft unterschätzt. Dies verteuert den Solarstrom unnötig.

Charakterisierung eines Photovoltaik-Grosslaminats

Sonnenenergienutzung mit Photovoltaikanlagen: Gutes Material verringert die Verluste.

■ Wilhelm Durisch, Andreas Wörz, Jochen Urban und Dierk Tille

Einleitung

Die Genossenschaft Genosol Martella errichtete 1993 auf dem Oberstufenschulhaus in Marthalen (ZH) eine netzgekoppelte Photovoltaikanlage mit 8 kW Spitzenleistung. Der Solargenerator besteht aus rahmenlosen Grosslaminaten, die in zwei Gruppen ins Dach des Hauses integriert wurden. Die Betreiberin war mit der Leistungsfähigkeit der Anlage nicht zufrieden und wandte sich an die international anerkannte Photovoltaik-Teststelle am Paul Scherrer Institut. Dort wurde ein Laminat gründlich geprüft. Neben dem Wirkungsgrad und seinem Temperaturkoeffizienten wurde die Erwärmung des Laminats bei unterschiedlicher passiver Hinterlüftung sowie sein Verhalten bei verschatteten Zellen untersucht. Die Tests ergaben, dass das Laminat die Leistungsspezifikationen knapp erfüllt und dass durch bessere Hinterlüftung und Gleichstromverkabelung eine Leistungssteigerung bis 10% möglich wäre.

Wichtigste Ergebnisse

Die Abhängigkeit des Zellenwirkungsgrades von der Einstrahlungsintensität weist einen günstigen, praktisch konstanten Wert bis hinunter zu Intensitäten von etwa 100 Wm^{-2} auf. Darunter nimmt er stark ab.

Der Zellenwirkungsgrad bei Standardtestbedingungen wurde in zwei unabhängigen Messreihen bestimmt und beträgt 13,27 bzw. 13,26%. Daraus ergeben sich die entsprechenden elektrischen Leistungen von (106,4 ± 1)W bzw. (106,3 ± 1)W. Damit lag das Laminat zur Testzeit unter dem unteren Grenzwert von 109,4 W, den es 1993 bei Inbetriebnahme hätte haben müssen. Wird hier jedoch die Leistungsgarantie von 90% nach zehn Betriebsjahren mit einer Leistungsabnahme von 1% im Jahr berücksichtigt, hätte das Laminat zur Testzeit im Sommer 1996 eine Leistung von 106,1 W haben müssen. Dies ist nach unseren Messungen knapp erfüllt. Unter der Voraussetzung, dass alle Laminate den selben Wirkungsgrad haben, leisteten die 64 installierten Laminate bei Standard Test Conditions (STC) 1996 noch 87,5% der angegebenen Leistung. Diese Leistung wird jedoch bei realen Betriebsbedingungen nicht erzielt und wird zusätzlich vermindert durch Leitungs- und Wechselrichterverluste und durch zu starke Erwärmung der Laminate bei schlechter passiver Kühlung.

Der Ross-Parameter zur Ermittlung der Zellentemperatur aus der Einstrahlungsintensität und Umgebungstemperatur wurde in verschiedenen Experimenten zu (0,030–0,052) $°C/Wm^{-2}$ bestimmt. Er liegt vergleichsweise hoch und führt zu starker Erwärmung des Laminats bei hohen Umgebungstemperaturen. Dies seinerseits hat eine Verminderung des Wirkungsgrades zur Folge, welcher gemäss unseren Messungen mit 0,066 Prozentpunkten pro Grad Zellenerwärmung abnimmt (bei 10 °C Zellenerwärmung fällt der Wirkungsgrad also beispielsweise von 13,66 auf 13% ab). Der hohe Wert des Ross-Parameters dürfte mit den dunklen Zwischenräumen und dem relativ dicken Frontglas von 8 mm Dicke zusammenhängen.

Durch ungünstige DC-Verschaltung von den Laminaten zu den Wechselrichtern verliert die Anlage rund 6% ihrer Soll-Leistung. Durch grosszügiger ge-

Adressen der Autoren
Dr. *Wilhelm Durisch*
Paul Scherrer Institut, CH-5232 Villigen PSI
Andreas Wörz, Jochen Urban und *Dierk Tille*
Fachhochschule Ulm, FHU, D-89075 Ulm

Anlagedaten

Die gesamte Anlage hat laut Informationsbroschüre folgende Daten:

- Total installierte Leistung: 8,208 kW
- Solargenerator: Siliziumzellen, monokristallin, total 5472 Siemens-Zellen, 64 Laminate, Zellenwirkungsgrad: 13–15%, Gleichspannung 115 V
- Wechselrichter: Typ Solcon 3400 HE, 2 Stück, Wirkungsgrad: 92–94%, 115-VDC-Eingang, 230-VAC-Ausgang

Laminatspezifikationen

Hersteller: Solution, 4624 Härkingen
Typ 3074-01-29
Nenndaten bei Standard Test Conditions, STC (1000 Wm^{-2}, 25 °C und AM 1,5):

Leistung im optimalen Arbeitspunkt	P_{MPP}	121,5 W
Kurzschlussstrom	I_{SC}	10,2 A
Strom im optimalen Arbeitspunkt	I_{MPP}	9,3 A
Leerlaufspannung	U_{OC}	16,2 V
Spannung im optimalen Arbeitspunkt	U_{MPP}	13,1 V

Toleranz der Nenndaten: ± 10%

Messbedingungen und Auswertungsverfahren

- Im Freien bei realen Betriebsbedingungen
- Laminat auf zweiachsig nachgeführtem Sun-Tracker befestigt
- Erfassung der
  - direkt-normalen Sonneneinstrahlung I_n
  - global-normalen Bestrahlungsstärke G_n in der Laminatebene
  - Umgebungstemperatur
  - Windgeschwindigkeit
  - Zellentemperatur
- Abfahren der Kennlinie mit einer dynamischen Last und dabei Erfassung
  - der abgegebenen Spannung
  - des abgegebenen Stromes
- Übergabe der Messdaten an einen PC mit Auswerteprogramm und Ermittlung der charakteristischen Daten. Weitere rechnergestützte Auswertung und graphische Darstellung, zum Beispiel der Abhängigkeit der maximalen Leistung und des Wirkungsgrades von der globalen Bestrahlungsstärke und Zellentemperatur

Eine ausführliche Beschreibung der Testanlage ist in [1] zu finden, ebenso Angaben über die Genauigkeit der Testergebnisse. Vergleiche mit Tests am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (FhG-ISE) in Freiburg sowie am National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO/USA, ergaben hervorragende Übereinstimmung.

wählte Leitungsquerschnitte und die Installation der Wechselrichter näher am PV-Generator könnten diese Verluste deutlich reduziert werden.

Durch bessere passive Hinterlüftung der Laminate könnte deren starke Erwärmung etwas reduziert werden. Eine Verringerung der Laminattemperatur um 10 °C würde für eine Leistungssteigerung der Anlage um rund 6% sorgen. Dies bei einer Absenkung der Temperatur zum Beispiel von 60 auf 50 °C.

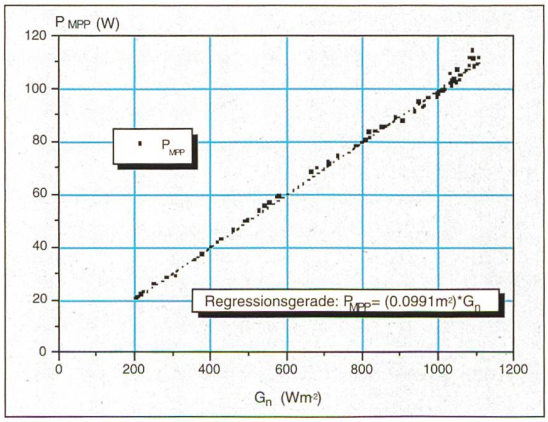
Messungen mit teilbeschattetem Laminat zeigen die Leistungsminderung durch Beschattung einzelner und mehrerer Zellen auf.

Es ist zu beachten, dass sich alle Wirkungsgradmessungen auf rechtwinkligen Einfall der direkten Solarstrahlung auf das Laminat beziehen. Bei schrägem Einfall der direkten Solarstrahlung, wie es bei fix montierten Laminaten morgens und abends der Fall ist, liegt der Wirkungsgrad aufgrund von Reflexionen und höherem Transmisssionsverlust im 8-mm-Frontglas tiefer. Glasverluste bei schrägem Lichteinfall sind in einer separaten Arbeit untersucht worden.

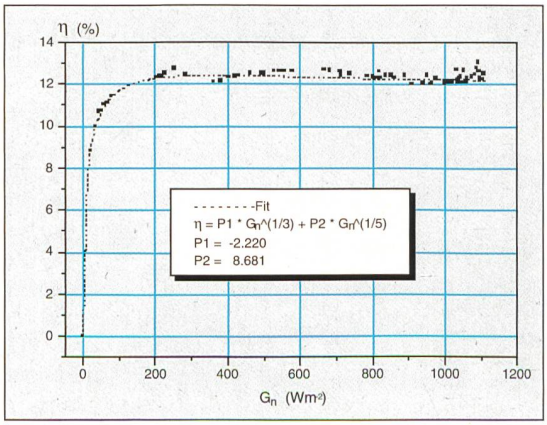
Mit den vorliegenden Ergebnissen sowie Einstrahlungs- und Temperaturdaten am Anlagenstandort könnte nun versucht werden, via Modellrechnungen den zu erwartenden jährlichen Stromertrag abzuschätzen. Von besonderem Interesse hierzu wären aber noch systematische Messungen vor Ort. Damit gelänge es, Modellparameter zu bestimmen, die für die Planung künftiger Anlagen höchst wertvoll sein dürften.

Leistung und Wirkungsgrad bei verschiedenen Einstrahlungen

Bei der ersten Messreihe konnte über einen Einstrahlungsbereich von 200 bis 1100 Wm^{-2} gemessen werden. Bei diesen Messungen wurde der Einfachheit halber die Zellentemperatur noch nicht miterfasst. Bild 1 zeigt die Leistung im optimalen Arbeitspunkt in Abhängigkeit der Einstrahlung. Es ergibt sich eine nahezu lineare Abhängigkeit von der Einstrahlung, trotz variierender Zellentemperatur. Die Umgebungstemperatur betrug während den Messungen etwa 15 °C. Erfahrungsgemäss liegt dann die Zellentemperatur bei voller Sonne, das heisst 1000 Wm^{-2} bei 50–60 °C. Die Laminatleistung beträgt dort gemäss Bild 1 rund 99 W, das heisst noch etwa 80% der Nennleistung bei Standard Test Conditions.



< Bild 1 Leistung im optimalen Arbeitspunkt (MPP) in Abhängigkeit der Einstrahlung.



> Bild 2 Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Einstrahlung, ohne Temperaturkorrektur. Die Streuung der Messpunkte rührt von unterschiedlichen Zellentemperaturen bei praktisch gleicher Einstrahlung her (vgl. Text).

Einige Messpunkte in Bild 1 wurden nach Wolkendurchgängen aufgenommen, das heisst bei leicht abgekühlten Zellen. Dies hatte zur Folge, dass die elektrische Leistung etwas höher ausfiel als bei dauerbesonnten wärmeren Zellen. Dies trifft insbesondere für die Messpunkte bei G_n >1020 Wm^{-2} zu. Über Wolkeneffekte, welche zu Einstrahlungswerten bis weit über 1000 Wm^{-2} führen können, wurde in [2] berichtet.

In Bild 2 ist der Zellenwirkungsgrad über der Einstrahlungsintensität aufgetragen. Es handelt sich dabei um dieselben Messungen wie in Bild 1, jedoch ergänzt um Messungen bei tiefen Intensitäten (20–80 Wm^{-2}). Bild 2 lässt erkennen, dass der Wirkungsgrad über einen recht weiten Intensitätsbereich (100 bis 1100 Wm^{-2}) über 12% liegt. Unter rund 100 Wm^{-2} fällt der Wirkungsgrad mit abnehmender Intensität rasch ab. Darüber Bescheid zu wissen, ist unerlässlich bei Anwendungen mit häufig schwacher Einstrahlung, wie zum Beispiel unter dem Winterhochnebel im Mittelland.

Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Temperatur

Der Wirkungsgrad von Solarzellen und somit die maximale Leistung von Modulen und Laminaten hängt von mehreren Faktoren ab. Eine wichtige Einflussgrösse ist die Zellentemperatur. Zur Bestimmung des Temperaturkoeffizienten des Wirkungsgrades wurde das Laminat auf etwa 20 °C abgekühlt und dann während der Erwärmung durch die Sonnenstrahlen Messungen des Wirkungsgrades und der Zellentemperatur bis zum Erreichen der maximalen Zellentemperatur durchgeführt (dynamische Bestimmung des Temperaturkoeffizienten). Es wurden zwei Messreihen bei rund 1000 Wm^{-2} durchgeführt (Bilder 3 und 4). Die Erfassung der Zellentemperatur ist in [1] beschrieben. Der Zeitpunkt für die Messreihen wurde so gewählt, dass die relative Luftmasse AM gerade dem Standardwert 1,5 entsprach.

Die wichtigsten Ergebnisse der Messreihen 2 und 3 sind in Tabelle I zusammengestellt.

	$\eta_{25,1000}$	α	$P_{25,1000}$
	(%)	(%/°C)	(W)
Reihe 2	13,27	–0,0657	106,4
Reihe 3	13,26	–0,0667	106,3

Tabelle I Standardwirkungsgrad, Temperaturkoeffizient des Wirkungsgrades und Laminatleistung bei Zellentemperatur von 25 °C und Einstrahlung von 1000 Wm^{-2} bei AM = 1,5.

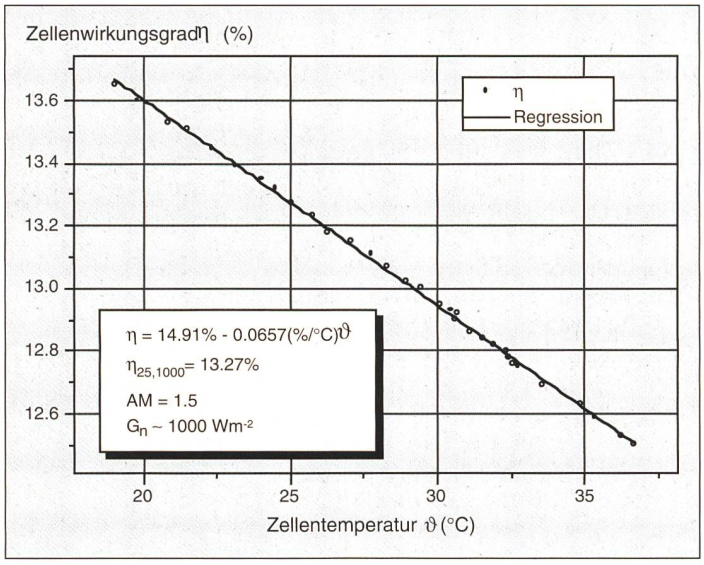


Bild 3 Zellenwirkungsgrad als Funktion der Zellentemperatur, Messreihe 2.

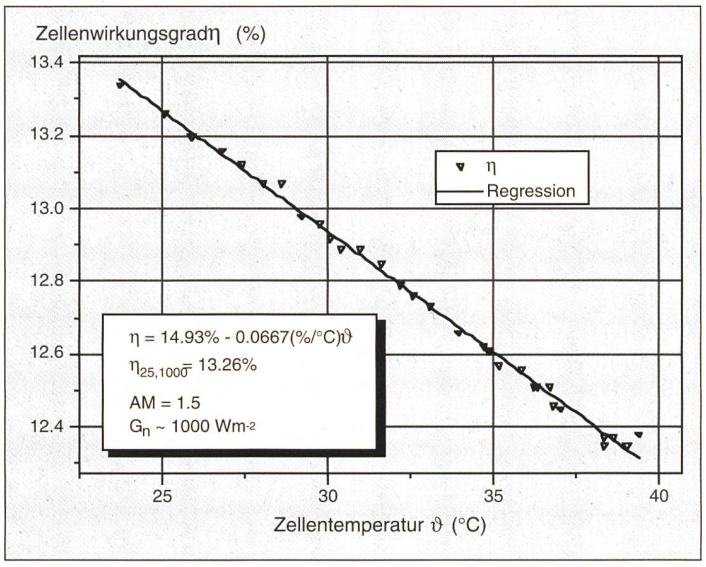


Bild 4 Zellenwirkungsgrad als Funktion der Zellentemperatur, Messreihe 3.

Die ermittelte Leistung des Laminats bei STC liegt somit bei beiden Messserien knapp ausserhalb der unteren Toleranzgrenze von 121,5 W · 90% = 109,4 W. Das Laminat war jedoch bereits drei Jahre in Betrieb. Solution gibt zehn Jahre Leistungsgarantie für 90% der minimal angebotenen Leistung. Bei einer linearen Abnahme der Leistung von 1%/Jahr müsste das Laminat nach 3 Jahren noch eine Leistung von mindestens 106,1 W aufweisen, was gemäss unseren Messungen der Fall ist.

Allgemein muss man aber von einer zeitlich exponentiellen Abnahme der Leistung ausgehen. Bei einer angenommenen Abnahme der Leistung um 6% in den ersten drei Jahren müsste das Laminat 1996 noch mindestens 102,8 W haben, was klar erfüllt ist.

Zu bemerken bleibt hier, dass das Laminat bei Direktanschluss an die Verbinder, die den Strom aus der Laminatsrückseite in die Kabeldosen führen, bei Standard-Testbedingungen eine um rund 0,5 W höhere Leistung abgeben würde als bei Anschluss an die vorhandenen 6-mm-Steckverbindungen. Um diesen Verlust mitzuerfassen, wurde auf den Direktanschluss an die Verbinder bewusst verzichtet.

Ross-Faktor

Der Ross-Faktor h tritt in der Beziehung $\vartheta_z = \vartheta_u + h \cdot G_n$ zur angenäherten Bestimmung der Zellentemperatur ϑ_z auf, wobei ϑ_u die Umgebungstemperatur und G_n die Bestrahlungsstärke ist.

Es wurden Messungen der Zellentemperatur und der Umgebungstemperatur bei rund 1000 Wm^{-2} Einstrahlung bei guter und schlechter passiver Hinterlüftung durchgeführt. Gleichzeitig wurde auch der Wirkungsgrad gemessen.

Aus den Messungen wurde der Ross-Faktor zu h = 0,034 °C / Wm^{-2} für gute passive Hinterlüftung und zu

h = 0,045 °C/Wm^{-2} für schlechte passive Hinterlüftung ermittelt, das heisst die Zellentemperatur liegt bei einer Einstrahlung von 1000 Wm^{-2} um 34–45 °C über der Umgebungstemperatur, je nach Hinterlüftung. Dies gilt für andauernden Betrieb im Maximum Power Point (MPP). Die Ergebnisse zeigt Bild 5. Weitere Ross-Faktor-Bestimmungen im Leerlaufbetrieb ergaben Werte bis 0,052 °C/Wm^{-2}.

Wie in Bild 5 zu erkennen ist, steigt die Zellentemperatur bei schlechter passiver Hinterlüftung um etwa 10 °C an und der Wirkungsgrad sinkt auf rund 11%. Liesse sich in der Marthalenanlage durch bessere passive Hinterlüftung die Zellentemperatur im Betrieb zum Beispiel von 60 auf 50 °C verringern, würde der Wirkungsgrad des Laminats von 10,98 auf 11,63% steigen und somit die Leistung um rund 6% zunehmen.Wie aus unseren Messungen hervorgeht, scheint der Ross-Faktor von der Laminatneigung und der Art der Hinterlüftung abhängig zu sein.

Verluste in Gleichstromverkabelung

Der Verlust in der Verkabelung vom PV-Generator zum Wechselrichter beim kleinen Generator (32 Laminate mit je 81 Zellen) kann wie folgt abgeschätzt werden:

$$P_V = (U_1 - U_2) \cdot I_0^2 / I \qquad (1)$$

P_V	Verlustleistung (W)
U_1	Spannung Generatorausgang (V)
U_2	Spannung Wechselrichtereingang (V)
I_0	Nennstrom Generator: 4 · 9,3 A = 37,2 A
I	Aktueller Strom (A)

Bei I = 25,6 A wurde gemessen: U_1 = 90,9 V und U_2 = 86,5 V.

Die Verlustleistung beträgt dann gemäss (1) 238 W. Das sind 6,1% der Soll-Leistung von 3888 W. Daraus ergibt sich die Empfehlung, dass der Wechselrichter möglichst nahe beim PV-Generator installiert und die DC-Leitungen vom Generator zum Wechselrichter im Querschnitt grosszügig gewählt werden sollten, zum Beispiel 1 mm^2/$A_{MPP, STC}$. Ähnliches dürfte für den grossen Generator (32 Laminate mit je 90 Zellen) gelten.

Neben der DC-Verdrahtung sollten aber auch alle anderen Bauelemente wie Sicherungen, Dioden und Verbindungen auf mögliche Verluste hin untersucht und allenfalls bessere Lösungen realisiert werden.

Messungen mit abgedeckten Zellen

Durch Abdecken von Zellen soll herausgefunden werden, wie stark sich Abschattungen auf die Leistung des Laminats auswirken. Dazu wurden Kennlinien ohne Abdeckung aufgenommen, die mittlere Zelle abgedeckt, drei Zellen jeweils horizontal bzw. vertikal abgedeckt, eine 9er-Reihe jeweils horizontal bzw. vertikal abgedeckt sowie drei nebeneinanderliegende 9er-Reihen vertikal und horizontal abgedeckt. Einzelheiten dazu sind im ausführlichen Testbericht enthalten.

Ergebnis

Schon durch die Abschattung einer einzigen Zelle in der Mitte des Laminats verliert es etwa 20% seiner Leistung. Deckt man drei Zellen der oberen oder unteren drei Stränge in vertikaler Richtung ab, beträgt die Leistung im MPP nur noch rund 1/3 des Wertes ohne Abdeckung.

Deckt man drei Zellen der mittleren Reihen in vertikaler Richtung ab, beträgt die Leistung im MPP noch etwa 2/3 des Wertes ohne Abdeckung.

Deckt man neun Zellen in vertikaler Richtung ab, wird praktisch keine Leistung mehr abgegeben. Deckt man die mittleren neun Zellen in horizontaler Richtung ab, ergibt sich etwa 10% Leistungsverlust. Zu beachten sind die markanten Änderungen der Kennlinien.

Folgerungen

Abschattung einzelner oder mehrerer Zellen des Laminats (z.B. durch Bäume, Masten, Bauten usw.) hat signifikante Leistungseinbussen zur Folge. Da jeweils acht Laminate in Serie geschaltet sind und keine Bypassdiode vorhanden ist, würde bei einer ungünstigen Beschattung eines einzigen dieser acht Laminate die ganze 8er-Serie, das heisst rund 850 W Leistung, praktisch ausfallen und die Gefahr einer Beschädigung des beschatteten Laminats bestehen. Falls Beschattungsgefahr besteht, sollte über jedes Laminat eine Bypassdiode eingebaut sein.

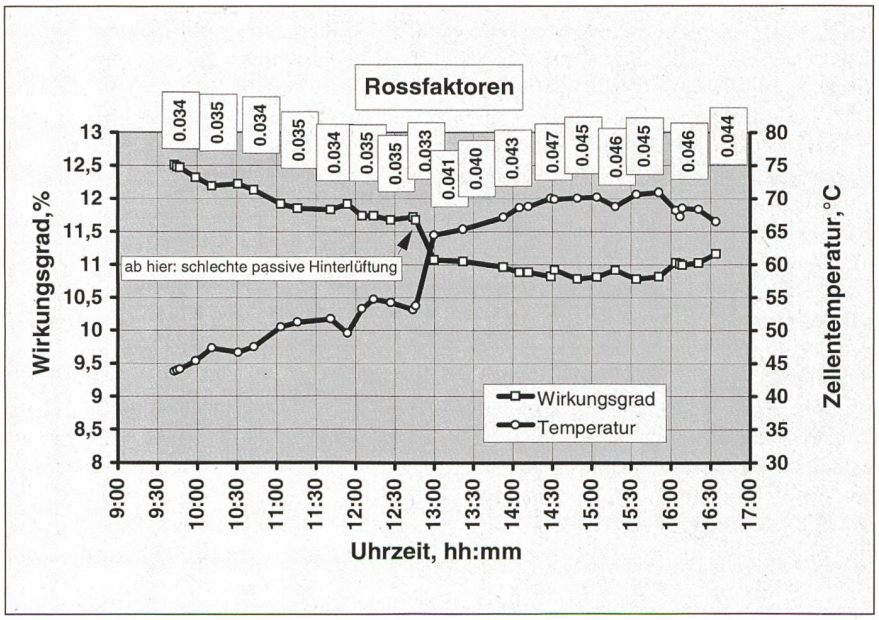


Bild 5 Zellentemperatur und Wirkungsgrad mit guter bzw. schlechter passiver Hinterlüftung. Die zugehörigen Ross-Faktoren sind als Zahlenwerte angegeben.

Caractérisation d'une couche photovoltaïque à grande échelle

Les installations photovoltaïques occupent une place de plus en plus importante dans l'approvisionnement en énergie électrique. Il est donc essentiel que les modules et les couches de protection photovoltaïques fournissent la puissance garantie par le fabricant. Ceci n'est malheureusement pas toujours le cas. De plus, les pertes dans les câbles à courant continu sont souvent sous-estimées lors du montage d'installations, ce qui renchérit inutilement l'électricité solaire.

Literatur

[1] *W. Durisch, J. Urban, G. Smestad*: Characterisation of Solar Cells and Modules under Actual Operating Conditions. Proceedings of World Renewable Energy Congress, June 1996, Denver, Vol. 1, p. 359, Pergamon, Oxford (1996).

[2] *W. Durisch* et al.: Photovoltaik in den Alpen – Betriebserfahungen und Stromkosten. Bulletin SEV/VSE 6 (1988), S. 311–317.

Ein ausführlicher Testbericht ist bei den Autoren erhältlich.

Wir danken Dr. O. Liechti, Genosol Martella, für die kritische Durchsicht dieser Arbeit.