

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:	90 (1999)
Heft:	10
Artikel:	Allmähliche Reduktion des Energieertrags von Photovoltaikanlagen durch permanente Verschmutzung und Degradation
Autor:	Häberlin, Heinrich / Renken, Christian
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-901941

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: 13.01.2026

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

Allmähliche Reduktion des Energieertrags von Photovoltaikanlagen durch permanente Verschmutzung und Degradation

Über permanente Leistungsverluste und Alterungserscheinungen terrestrischer Solarmodule sind nur wenige Informationen vorhanden. Bisher wurde meist angenommen, dass in Mitteleuropa die natürliche Reinigung des Solargenerators durch Regen und Schnee ausreicht und dass keine zusätzliche Reinigung nötig ist. Während Leistungsverluste infolge permanenter Verschmutzungen durch periodische Reinigungen der Solargeneratoren rückgängig gemacht werden können, sind durch Delaminationen bedingte Leistungsverluste irreversibel und damit gravierender.

■ Heinrich Häberlin und Christian Renken

Einführung

Seit Frühling 1994 betreibt das Photovoltaiklabor der HTA Burgdorf (vormals Ingenieurschule Burgdorf, ISB) ein Testzentrum für Photovoltaikanlagen mit einem Solargenerator (60 kW_p, Anstell-

winkel 30°) auf dem Dach des Neubaus der Abteilung Elektrotechnik [1]. Die Anlage liegt in unmittelbarer Nähe der Eisenbahn-Hauptstrecke Bern–Zürich. Im Laufe der Zeit wurde die Entwicklung eines **permanenten Verschmutzungstreifens** am unteren Rand der verwendeten (gerahmten) Solarmodule beobachtet, der eine allmähliche Reduktion des Energieertrags der Anlage bewirkte.

Da im deponierten Material auch Eisenstaub nachgewiesen wurde, lag zunächst die Vermutung nahe, dass dieser Eisenstaub für die Entwicklung dieser Verschmutzung mitverantwortlich ist und dass es sich primär um ein lokales Phänomen handelt, das durch die Eisenbahn-Hauptstrecke bei dieser Anlage bedingt ist. Im Bereich der Anlage, welche einige 100 m vom Bahnhof Burgdorf entfernt in einer Distanz von etwa 50 m von der Bahnlinie liegt, führen nämlich viele Züge Bremsmanöver durch. Untersuchungen bei anderen, weiter von der Bahnlinie entfernten Anlagen in Burgdorf zeigten aber ebenfalls permanente Verschmutzungen, welche allerdings etwas weniger gravierend sind.

Die HTA Burgdorf hat bereits 1988 eine erste Photovoltaikanlage mit 3 kW_p in Betrieb genommen, die während einiger Jahre für Tests von Wechselrichtern für netzgekoppelte Photovoltaikanlagen verwendet wurde. Die Module dieser Anlage wurden nach dem Umzug des Photovoltaiklagers in einen Neubau im Jahre 1993 weiter verwendet. Ab etwa 1994 wurden bei einigen dieser in den Jahren 1987 bis 1989 hergestellten Module sichtbare Veränderungen (**Delaminationen** in der Nähe der Hauptkontakteierungsstreifen) der Zellen beobachtet, welche nicht nur eine Beeinträchtigung des Erscheinungsbildes, sondern auch



Bild 1 Ansicht auf das Gebäude der Abteilung Elektrotechnik der HTA Burgdorf mit dem Solargenerator (60 kW_p) der PV-Testanlage. Eine Eisenbahn-Hauptstrecke führt etwa 10 m hinter dem Aufnahmestandort durch.

Adresse der Autoren

Dr. Heinrich Häberlin, Professor
Christian Renken, Dipl.-Ing. FH, Assistent
Berner Fachhochschule
Hochschule für Technik und Architektur (HTA)
Burgdorf
Labor für Photovoltaik
Jlcoweg 1
CH-3400 Burgdorf

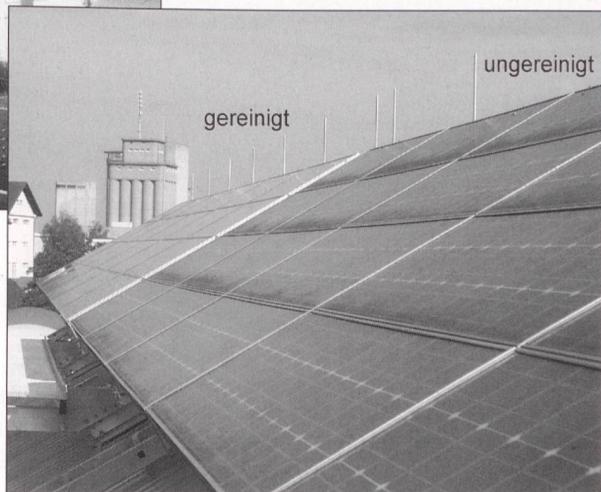


Bild 2 Ansicht eines Teils des Solargenerators der 60-kW_p-PV-Testanlage der HTA Burgdorf: Die Module auf der linken Seite sind frisch gereinigt. Bei den Modulen auf der rechten Seite ist die Verschmutzung am unteren Modulrand sichtbar, die sich in der Zeit von Juni 1993 bis Mai 1998 angesammelt hat.

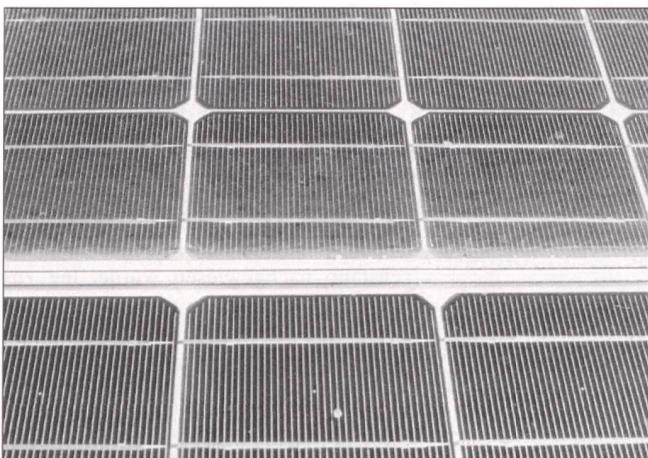


Bild 3 Verschmutzungsstreifen an der Unterkante eines gerahmten Moduls Siemens M55 (längere Seite in horizontaler Position gemäss Bild 2).

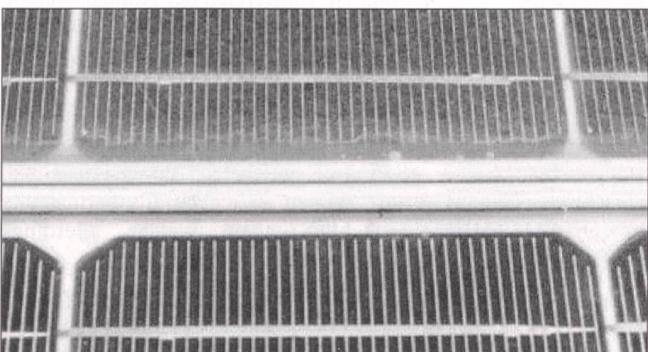


Bild 4 Detailansicht des relativ kompakten, etwa 1 cm breiten Verschmutzungsstreifens an der Modul-Unterkante (Detail von Bild 3).

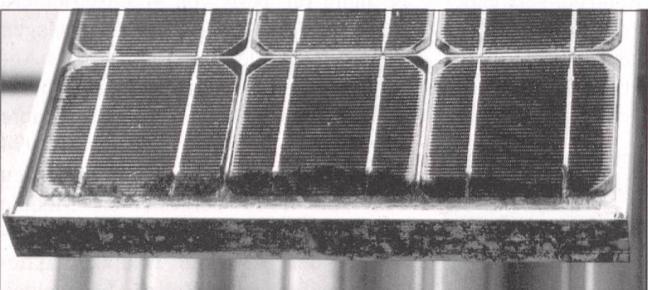


Bild 5 Auch bei steiler angestellten, hochkant montierten Modulen können derartige Verschmutzungsstreifen auftreten. Beim gezeigten Modul ist der Anstellwinkel 65°.

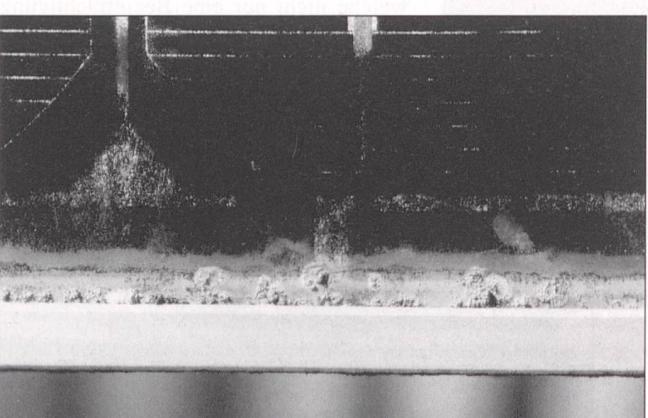


Bild 6 Detailansicht des Moduls von Bild 5 von einer Stelle, wo sich bereits Flechten entwickeln.

eine Veränderung der U-I-Kennlinie und damit einen irreversiblen Leistungsverlust zur Folge hatte. Diese Delaminationen haben sich seither an den betroffenen Modulen noch deutlich verstärkt. Bereits sind auch an ersten Modulen der neuen 60-kW_p-Testanlage, welche 1993 hergestellt wurden, erste Anzeichen beginnender Delaminationen festgestellt worden.

Allmähliche Ertragsreduktion durch Entwicklung einer permanenten Verschmutzung

Verschmutzung der Photovoltaikanlage der HTA Burgdorf

Im Juni 1998, also etwa fünf Jahre nach der Montage der Module, wurde der So-

largenerator der Anlage gereinigt und die U-I-Kennlinien der Arrays der Anlage vor und nach der Reinigung ausgemessen. Glücklicherweise zeigten die Messungen, dass der Leistungsverlust weitgehend reversibel ist. Aufgrund der Messungen betrug die Reduktion der auf STC umgerechneten Leistung infolge dieser Verschmutzung zwischen **3,1 % bis 13,8 %** pro Array. Die **durchschnittliche Reduktion**, bezogen auf die gesamte PV-Anlage, betrug **7,6 %**. Auf dem beobachteten Verschmutzungsstreifen etablierten sich teilweise bereits **Pionierpflanzen (Moose und Flechten)**, welche die Entwicklung des Schmutzstreifens durch Zurückhaltung von organischem und anorganischem Staub weiter verstärkten.

Da am Standort dieser Anlage für die Wechselrichtertests ein sehr detailliertes Monitoring durchgeführt wird, war es möglich, nicht nur die nach einer Betriebszeit von fünf Jahren resultierende Verschmutzung zu bestimmen, sondern aus den vorhandenen Messdaten auch ihren zeitlichen Verlauf. Dabei zeigte es sich, dass die Entwicklung des Schmutzstreifens im Verlauf der Zeit nicht kontinuierlich erfolgt, sondern sich nach zunächst langsamem Beginn deutlich beschleunigt. In den ersten Jahren wurde auch noch keine biologische Aktivität beobachtet. Die Erklärung dazu ist naheliegend: sobald Pionierpflanzen (Moose und Flechten) auftauchen, haben diese die Tendenz, durch den Wind und andere Einflüsse abgelagerte organische und anorganische Substanzen zurückzuhalten und daraus Humus für ihre weitere Entwicklung zu bilden. Bei ungünstigen Bedingungen (z.B. im Hochsommer oder im Winter) können diese Pflanzen temporär absterben, sie entwickeln sich aber aus den vorhandenen Sporen immer wieder neu, so dass eine einmal vorhandene Pflanzenbesiedelung und die daraus resultierenden Schmutzstreifen ohne künstliche Reinigung erhalten bleiben.

Analoge Verschmutzungen bei weiteren Anlagen in Burgdorf

Da im auf dem Solargenerator der HTA Burgdorf deponierten Material auch Eisenstaub nachgewiesen wurde, lag zunächst die Vermutung nahe, dass dieser Eisenstaub für die Entwicklung dieser Verschmutzung mitverantwortlich ist und dass es sich primär um ein lokales Phänomen bedingt durch die Eisenbahn-Hauptstrecke bei dieser Anlage handelt. Im Oktober 1998 wurden in Burgdorf weitere Messungen an einer gleich alten PV-Anlage mit gerahmten monokristallinen Modulen vom gleichen Typ (längere Seite der Module in horizontaler

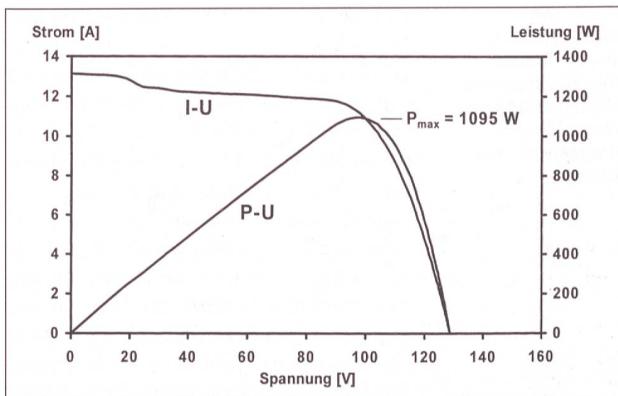


Bild 7 Auf STC umgerechnete U-I- und P-U-Kennlinien sowie MPP-Leistung eines ungereinigten Arrays der PV-Anlage der HTA Burgdorf (4 parallele Stränge von je 6 Modulen M55 in Serie) nach fünf Betriebsjahren (gemessen im Juni 1998). Der Wendepunkt auf der U-I-Kennlinie ist ein typisches Merkmal bei dieser Verschmutzung.

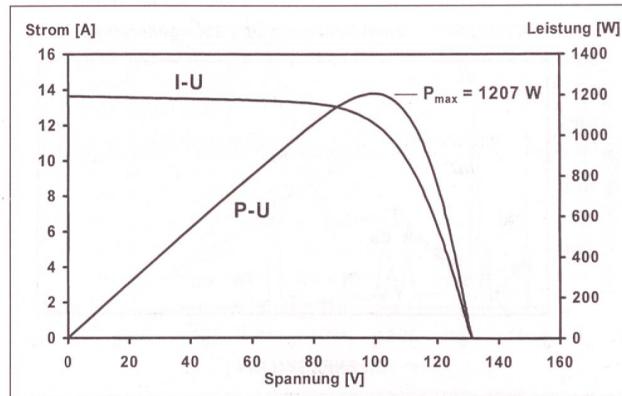


Bild 8 Auf STC umgerechnete U-I- und P-U-Kennlinien sowie MPP-Leistung des Arrays von Bild 7 nach der Reinigung.

Position) durchgeführt. Diese Anlage befindet sich jedoch in weiter Entfernung von der Bahnlinie in einem Wohngebiet ohne Industrie- oder Gewerbebetriebe. Hier wurde die Messung eines Strangs (6 Module) vor und nach der Reinigung durchgeführt. Auch hier war die Verschmutzung deutlich sichtbar, sie haftete jedoch weniger stark und liess sich leichter entfernen als die auf dem Solargenerator der HTA Burgdorf. Bei der Messung wurde eine **Leistungsreduktion von 8%** infolge der Verschmutzung festgestellt.

Bei einer weiteren PV-Anlage gleichen Jahrgangs mit grossen polykristallinen Modulen (102 W_p), die sich auf dem gleichen Gebäude befindet, konnte ebenfalls ein Schmutzstreifen an der unteren Modulkante festgestellt werden. Dieser Streifen war jedoch erheblich weniger ausgeprägt. Die zur Moduloberfläche hin abgeschrägte Modulkante erleichtert hier wahrscheinlich das Abfließen von verschmutztem Regenwasser, somit wird die Ausbildung des Schmutzstreifens weniger begünstigt. Messungen an dieser Anlage zur Bestimmung der Leistungsreduktion infolge Verschmutzung sind geplant.

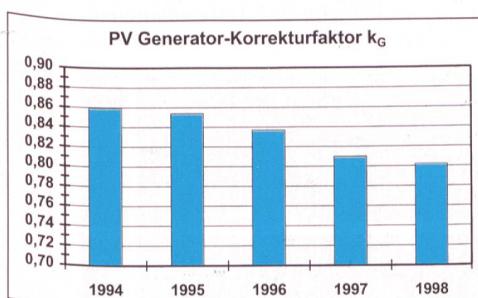


Bild 9 Verlauf der Generatorleistung in Funktion der Zeit: Generator-Korrekturfaktor k_G in den drei Sommermonaten der Jahre 1994 bis 1997 und im Mai 1998. k_G sinkt zunächst langsam, dann nach Entwicklung biologischer Aktivität rascher ab ($k_G = Y_s/Y_T$, siehe [3]).

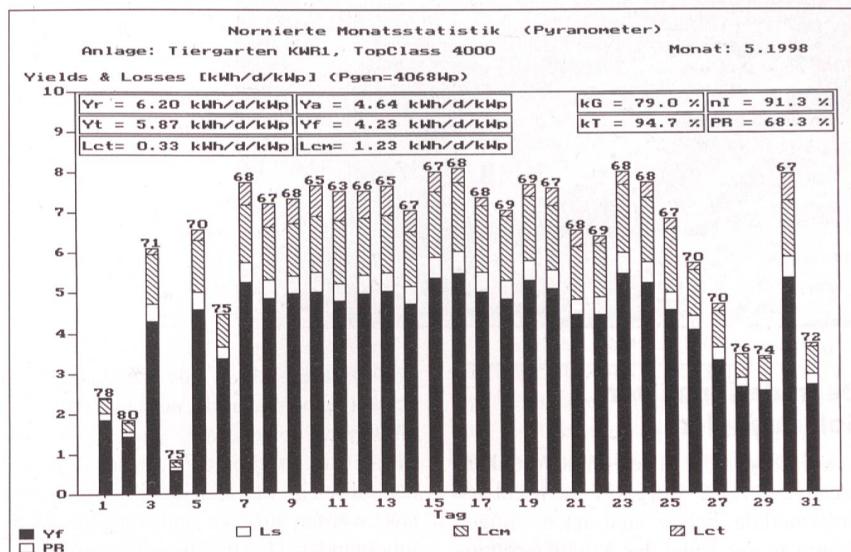


Bild 10 Normierte Monatsstatistik eines Teils der 60-kW_p-Testanlage vor der Reinigung des Solargenerators im Mai 1998. Die nicht temperaturbedingten Feldverluste L_{cm} sind durch die Verschmutzung ungewöhnlich hoch. Dadurch sind der Generator-Korrekturfaktor k_G und das Performance Ratio PR relativ niedrig (weitere Erläuterungen in [3]).

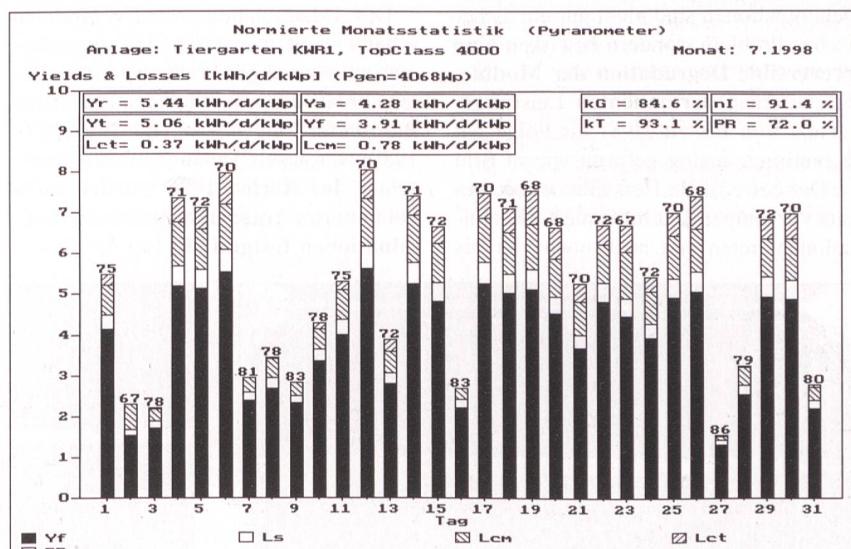


Bild 11 Normierte Monatsstatistik für Juli 1998 nach der Reinigung (s. Bild 10). Die nicht temperaturbedingten Feldverluste L_{cm} sind nun erheblich geringer. Dadurch ist der Generator-Korrekturfaktor k_G und das Performance Ratio PR der Anlage deutlich gestiegen, trotz tieferem Temperatur-Korrekturfaktor k_T im Vergleich zum Mai 1998.

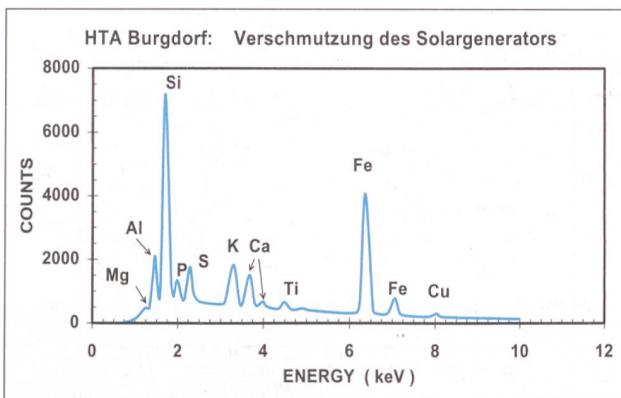


Bild 12 Analyse der Zusammensetzung des verschmutzenden Materials: Eine dispersive Mikro-Röntgenaufnahme zeigt die wichtigsten anorganischen Komponenten.

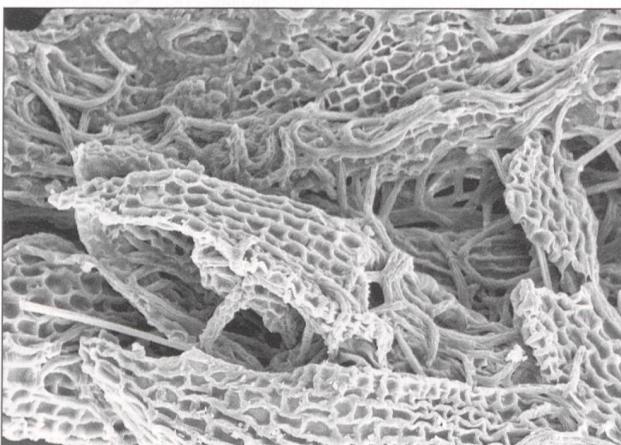


Bild 13 Elektronenmikroskopische Aufnahme der in einem Verschmutzungsstreifen enthaltenen Flechten.

Degradationen von Solarmodulen

Bei einigen der in den Photovoltaikanlagen der HTA Burgdorf verwendeten Solarmodule haben sich nach einigen Jahren in der Nähe der Kontaktierungsstreifen (Abstand bis zu 1 cm) unregelmässig geformte, weissliche Gebiete gebildet, welche vermutlich die Folge von Delaminationen sind (siehe Bild 14). Delaminationen sind nicht nur ein ästhetisches Problem, sondern bewirken **eine irreversible Degradation der Module**, welche einen **permanenten Leistungsverlust von bis zu 10%** zur Folge hat (Kennlinien analog geformt wie in Bild 7). Der betreffende Hersteller wurde bereits vor einiger Zeit informiert. Delaminationen treten erst nach etwa vier bis

fünf Betriebsjahren als zunächst nur schwer zu bemerkende, nur beim näheren Hinsehen bemerkbare, kleine weisse Flecken in Erscheinung. In den folgenden Jahren breiten sich diese immer mehr aus, werden grösser und verschmelzen miteinander. Da sich diese Delaminationen nur in der Nähe der Kontaktierungsstreifen bilden, ist anzunehmen, dass nach einiger Zeit eine Stabilisierung eintreten wird.

Die Delamination bei PV-Modulen scheint nicht wie anfänglich angenommen ein einmaliges Problem zu sein. Bereits 1994 wurden auf Modulen von älteren Burgdorfer PV-Anlagen (Baujahr 1987-1989) vereinzelt Delaminationen beobachtet. **Im Herbst 1998 wurden auch bei neueren Anlagen beginnende Delaminationen festgestellt.** Bei der Unter-

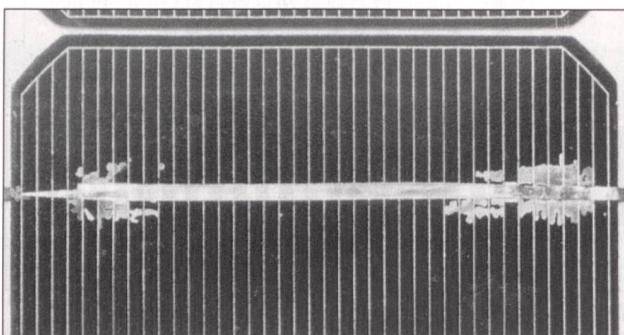


Bild 14 Ende 1998 aufgenommene Delaminationen bei einem etwa neunjährigen monokristallinen Solarmodul (Produktionsjahr 1989).

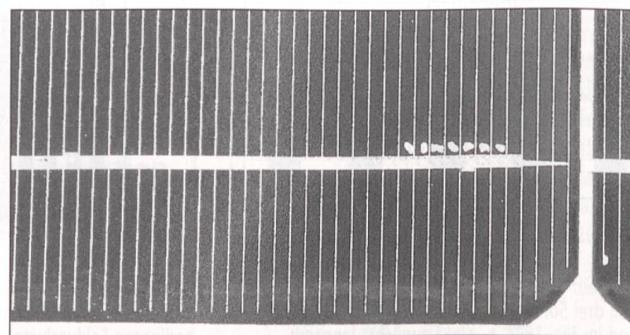


Bild 15 Ende 1998 aufgenommene beginnende Delaminationen bei einem neueren monokristallinen Solarmodul (Produktionsjahr 1993).

suchung von etwa 100 Modulen (Baujahr 1993) des Solargenerators der 60-kW_p-Testanlage der HTA Burgdorf wurden an einigen Modulen erste Delaminationen festgestellt (s. Bild 15). Wie ein Vergleich der Bilder 14 und 15 zeigt, nehmen diese Delaminationen in ihrer Häufigkeit und Grösse im Laufe der Zeit zu.

Wegen Eichproblemen der Referenzzellen war es bisher noch nicht möglich, den zeitlichen Verlauf der Degradation quantitativ genau zu erfassen. Es ist vorgesehen, dieses Problem in den kommenden Jahren weiter zu untersuchen. Insbesondere ist abzuklären, ob dieses Problem nur (wie bisher beobachtet) bei den Modulen eines bestimmten Herstellers oder auch bei anderen auftritt. Über die Langzeitschäden an PV-Modulen wird auch in [4] berichtet.

Energieverlust infolge von Wechselrichterausfällen

Erfreulicherweise werden die in netzgekoppelten Photovoltaikanlagen in der Schweiz eingesetzten Wechselrichter immer zuverlässiger. Im Rahmen des Projektes «Langzeitverhalten von netzgekoppelten Photovoltaikanlagen» wurden während mehrerer Jahre die Energieproduktion und die Wechselrichterausfälle bei allen Photovoltaikanlagen in Burgdorf und bei einigen andern Anlagen in den Kantonen Bern und Baselland im Detail untersucht. In Bild 16 ist zu erkennen, dass die Anzahl der Wechselrichterausfälle pro Wechselrichter-Betriebsjahr seit Beginn der Messungen deutlich gesunken ist und somit die Zuverlässigkeit der Wechselrichter dank zunehmender Erfahrung der Hersteller wesentlich gestiegen ist. In den Jahren **1996, 1997** und **1998** ging bei den im erwähnten Projekt untersuchten Anlagen **nur noch zwischen 0,3% und 1% der produzierten Energie infolge von Wechselrichterausfällen verloren**. Andere Verlustquellen, wie die sich entwickelnde permanente Verschmutzung und Delaminationen, dürften im Vergleich dazu wesentlich be-

Verdankungen

Die in diesem Artikel verwendeten Daten wurden im Rahmen eines Langzeit-Messprojektes im Auftrag des PSEL (Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft), des BFE (Bundesamt für Energie) und der IBB (Industrielle Betriebe Burgdorf) gewonnen. All diesen Institutionen gebührt Dank für ihre wertvolle Unterstützung. Wir danken auch Herrn Prof. Dr. H. Scheidiger und Herrn Prof. Dr. H. Köppel von der HTA Burgdorf für die Analyse des die Module verschmutzenden Materials.

deutsamer sein. Ein Indiz dafür ist, dass in Burgdorf bei einigermassen günstig ausgerichteten Anlagen mit vergleichbaren Komponenten die spezifische Energieproduktion der jeweils neuesten Anlagen in der Regel am höchsten ist, während sie bei älteren Anlagen meist langsam abfällt.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Über permanente Leistungsverluste und Alterungerscheinungen von terrestrischen Solarmodulen sind nur sehr wenige Informationen vorhanden. Bisher wurde meist angenommen, dass in Mitteleuropa die natürliche Reinigung des Solargenerators durch Regen und Schnee ausreicht und dass keine künstliche Reinigung nötig ist. Nur in wenigen Beiträgen wurde bisher auf das Problem der permanenten Verschmutzung hingewiesen [2]. Treten solche Verschmutzungen nicht nur lokal, sondern an vielen Orten auf, hat dies auch einen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Photovoltaikanlagen.

Während Leistungsverluste infolge von permanenten Verschmutzungen durch periodische Reinigungen der Solargeneratoren rückgängig gemacht werden können, sind durch Delaminationen bedingte Leistungsverluste irreversibel und damit gravierender. Die beobachteten Probleme traten an den Modulen eines bekannten und renommierten Herstellers auf, der jahrzehntelange Erfahrung hat. Neuerdings erfolgt die Produktion von Solarzellen und Modulen im Sinne einer Arbeitsteilung oft nicht mehr durch den gleichen Hersteller. Diese Entwicklung ist nicht unproblematisch. Bei derartigen Modulen sind die Verantwortlichkeiten bei später eventuell auftau chenden Langzeitproblemen (wie den beschriebenen Delaminationen) unklar. Der Kunde riskiert bei solchen Problemen, dass sowohl der Zellenhersteller als auch der Modulfabrikant jede Verantwortung

und eventuelle Garantieansprüche von sich weisen und auf die jeweils andere Firma abschieben.

Die Wechselrichter-Zuverlässigkeit hat sich dagegen sehr erfreulich entwickelt, und der mittlere jährliche Energieproduktionsverlust infolge von Wechselrichterausfällen beträgt bei gut überwachten Geräten mittlerweile noch maximal 1%. Es ist zu hoffen, dass dieser tiefe Wert noch während einigen Jahren erhalten bleibt und dass in den kommenden Jahren die alterungsbedingten Wechselrichterausfälle nicht zu rasch ansteigen.

Die aus den erwähnten Gründen möglichen Energieproduktionseinbussen sollten insbesondere von Contracting-Firmen beachtet werden, die für Solarbörsen Offerten für die Produktion von Solarstrom über lange Zeiträume einreichen, sonst können böse Überraschungen und unvorhergesehene Verluste eintreten.

Es ist ungewiss, ob es sich bei den beobachteten permanenten Langzeitverschmutzungen und Delaminationen um ein generelles Problem von Photovoltaikanlagen handelt oder nicht. Es ist auch nicht klar, ob und wann allenfalls eine Stabilisierung eintritt. Auch die weitere Entwicklung der Wechselrichterzuverlässigkeit sollte an einer genügend grossen Anzahl von Geräten weiter überwacht werden, um relevante Aussagen über die wirtschaftlich sinnvolle Nut

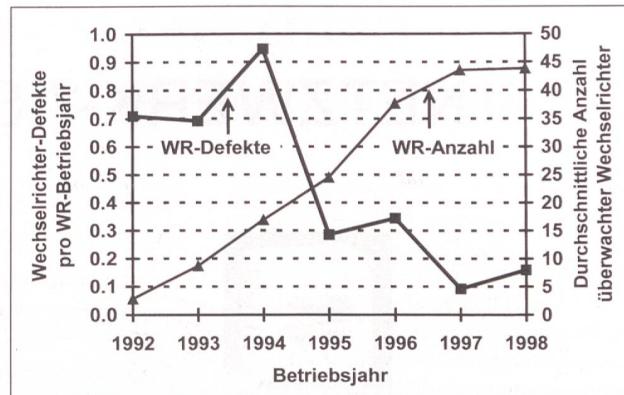
zungsdauer derartiger Geräte machen zu können. Die HTA Burgdorf beabsichtigt deshalb, im Rahmen eines neuen Projektes die Energieproduktion einer genügenden Anzahl Photovoltaikanlagen über längere Zeit weiter zu verfolgen, um daraus die nötigen Erkenntnisse zu gewinnen, welche eine sicherere Prognose der Energieproduktion und der Zuverlässigkeit von Photovoltaikanlagen erlauben.

Literatur

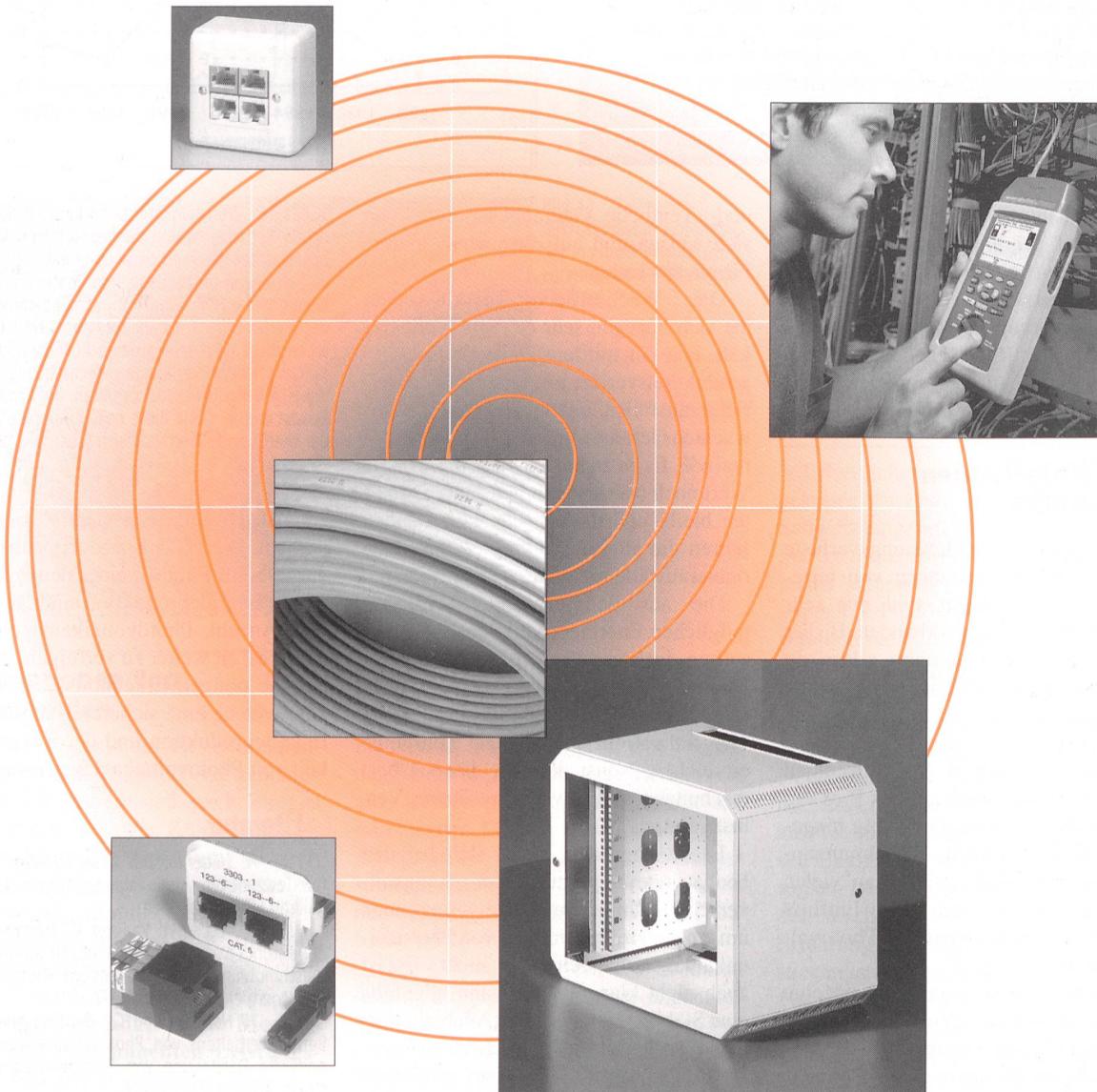
- [1] H. Häberlin: Das neue 60-kWp-Photovoltaik-Testzentrum der Ingenieurschule Burgdorf. Bulletin SEV/VSE 22/1994.
- [2] H. Becker, W. Vaassen, W. Herrmann: Minderleistungen von Solargeneratoren aufgrund von Verschmutzungen. 12. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein, 1997.
- [3] H. Häberlin und Ch. Beutler: Analyse des Betriebsverhaltens von Photovoltaikanlagen durch nomierte Darstellung von Energieertrag und Leistung. Bulletin SEV/VSE 4/95.
- [4] G. Schauer: Langzeitstabilität von PV-Modulen, Schadensfälle und -analysen. 14. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein (1999).

Réduction progressive du rendement énergétique d'installations photovoltaïques due à une altération et un encrassement permanents

Il n'existe que peu d'informations sur les pertes de puissance et les altérations permanentes des modules solaires terrestres. On a jusqu'à présent supposé que la pluie et la neige suffisaient en Europe centrale à nettoyer naturellement les générateurs photovoltaïques; aucun nettoyage supplémentaire n'avait donc été prévu. Contrairement aux pertes de puissance irréversibles, et de ce fait graves, dues à des délamination, celles dues à des encrassements permanents peuvent être réparées par des nettoyages périodiques des générateurs photovoltaïques.



NETZWERK-/ISDN-MATERIAL



Verlangen Sie unsere neue Broschüre!

425

100
Jahre
ans
anni



OTTO FISCHER AG

Elektrotechnische Artikel en gros
Aargauerstrasse 2, Postfach, 8010 Zürich
Tel. 01/276 76 76, Telefax 01/276 76 86

Coupon für Broschüre
«Netzwerk/ISDN»
Otto Fischer AG
Aargauerstrasse 2
Postfach
8010 Zürich

Firma: _____
zuständig: _____
Adresse: _____
PLZ/Ort: _____
Tel.: _____



Bu