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: 84 (1993)

Heft: 1

Artikel: Blitzeinschläge : eine Gefahr für Solarmodule? : Experimente zur Blitzstromempfindlichkeit von Photovoltaikanlagen

Autor: Häberlin, Heinrich / Minkner, Ruthard

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902651

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: 09.07.2025

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

Photovoltaikmodule auf Gebäudedächern sind Blitzschlägen ausgesetzt. Auf dem Neubau der Abteilung Elektrotechnik der Ingenieurschule Burgdorf (ISB) wird 1993 ein Solargenerator von 60 kW installiert, der für Untersuchungen an Photovoltaiksystemen (speziell Wechselrichter) eingesetzt wird. Da über die Auswirkungen von direkten Blitzschlägen in Photovoltaikanlagen nur wenig bekannt ist, wurden im Rahmen von Semester- und Diplomarbeiten im Hochspannungslabor ausgedehnte Tests an Solarzellen, Solarmodulen und einem Modell einer Photovoltaikanlage durchgeführt.

Blitzeinschläge – eine Gefahr für Solarmodule?

Experimente zur Blitzstromempfindlichkeit von Photovoltaikanlagen

■ Heinrich Häberlin und Ruthard Minkner

Die Erstellung neuer Kraftwerke wird zunehmend schwieriger. Der Bau neuer Kernkraftwerke ist in Europa und den USA politisch kaum mehr durchzusetzen. In der Schweiz besteht zudem ein zehnjähriges Moratorium auf Verfassungsstufe. Nach der kürzlich erfolgten Annahme des Gewässerschutzgesetzes muss man froh sein, wenn die Produktion aus der Wasserkraft auch in Zukunft auf dem bisherigen Stand gehalten werden kann.

Seit einigen Jahren interessieren sich die Elektrizitätswerke deshalb vermehrt für neue erneuerbare Energien (Photovoltaik, Windenergie, Biogas usw.). Besonders die Photovoltaik, die Technik der direkten Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom, hat das Potential, mittel- und langfristig einen substantiellen Beitrag an die Stromversorgung der Schweiz zu liefern [1, 2].

Photovoltaikanlagen zur Produktion grösserer Energiemengen besitzen eine relativ grosse Flächenausdehnung. Sie müssen im Freien montiert werden und sind deshalb der Witterung voll ausgesetzt. Eine besondere Gefährdung solcher Anlagen stellen Gewitter (Blitzschläge und Hagel) dar. Über die indirekten Auswirkungen von Blitzschlägen liegen gewisse Erfahrungen vor [3]. Die Auswirkungen von direkten Blitzschlägen in den Rahmen von Solarmodulen wurden aber nach den verfügbaren Informationen noch nicht genügend untersucht.

Zur Ausarbeitung eines optimalen Blitzschutzkonzepts wurde deshalb beschlossen, einige Untersuchungen im Hochspannungslabor der ISB durchzuführen. Neben dem Aufbau eines Stossstromgenerators musste dazu auch ein Testplatz zur reproduzierbaren Aufnahme von Solarmodulkennlinien unter definierten Einstrahlungsbedingungen entwickelt werden.

Der Stossstromgenerator

Für PV-Anlagen wichtige Blitzkennwerte

Blitze gefährden Photovoltaikanlagen einerseits durch hohe Spannungen, die zu Durchschlägen führen können, andererseits aber auch durch hohe Ströme, welche die Verkabelung oder die Überspannungsschutzelemente beschädigen können. Aufgrund des Induktionsgesetzes erzeugen Blitze während des raschen Stromanstiegs zu Beginn der Entladung entlang von Leitern sehr hohe induktive Längsspannungsabfälle ($u = L \cdot di/dt$) und induzieren in Installationsschleifen hohe Spannungen ($u = M \cdot di/dt$). Für die Durchführung realistischer Tests sollte der Stossstromgenerator deshalb di/dt-Werte erzeugen können, die deutlich über den Werten durchschnittlicher Blitze liegen. In kurzgeschlossenen Schleifen erreichen die von Blitzen induzierten Ströme Maximalwerte von etwa $I_{max} \cdot M/L$ [5]. Deshalb sollte der Stossstromgenerator auch Maximalströme I_{max} erzeugen können, die deutlich über denen von durchschnittlichen Blitzen liegen (Bild 1).

Adressen der Autoren
Dr. *Heinrich Häberlin*, Prof. an der Ingenieurschule Burgdorf, 3400 Burgdorf, und
Dr. *Ruthard Minkner*, c/o Ingenieurschule Burgdorf, 3400 Burgdorf.

	Maximalstrom I_{max} [kA]	Max. Steilheit di/dt [kA/µs]	Ladung Q [As]
Durchschnittsblitz	30	25	9
Starker Blitz	100	100	100

Bild 1 Kennwerte von Blitzen nach [4]

Durchschnittsblitz: 50% aller Blitze haben kleinere oder höchstens gleiche Kennwerte
Starker Blitz: 95% aller Blitze haben kleinere oder höchstens gleiche Kennwerte

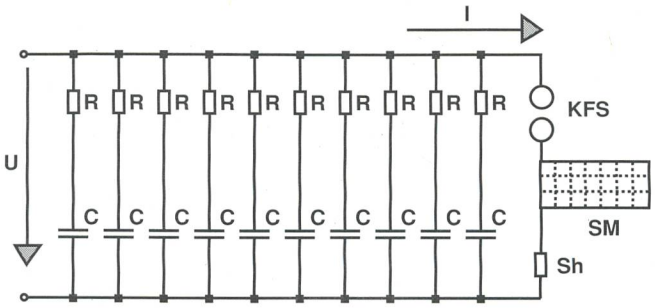

Bild 2 Schema des Stossstromgenerators der ISB

C = 1,2 µF; R = 3,4 Ohm
KFS Kugelfunkenstrecke
SM Solarmodul
Sh Shunt

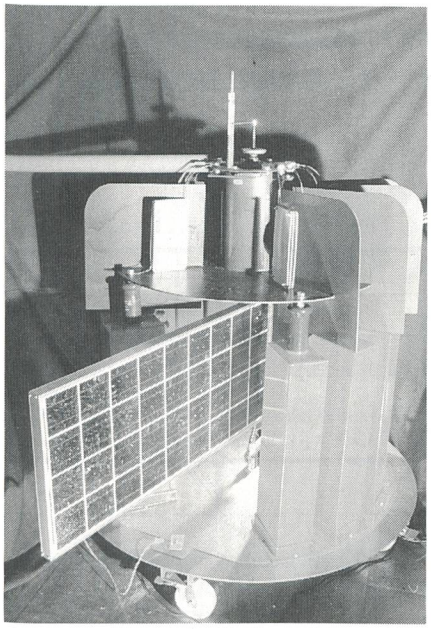

Bild 3 Fotografie des Stossstromgenerators der ISB mit zu Testzwecken montiertem Solarmodul

Aufbau und Kenndaten der Stossstromanlage der ISB

Die Stossstromanlage besteht aus 10 Stosskondensatoren 1,2 µF/50 kV und wurde mit einem koaxialen Aufbau speziell darauf ausgelegt, hohe Stossströme mit steilem Stromanstieg in die metallischen Rahmen von Solarmodulen einzuspeisen (siehe Bilder 2 und 3). Die maximal mögliche Modulbreite beträgt etwa 50 cm. Bild 4 zeigt die maximal erreichbaren Kennwerte von Stossströmen, die mit der Anlage erzeugt werden können. Bei I_{max} und di/dt werden Werte erreicht, die deutlich über denen von durchschnittlichen Blitzen liegen. Einzig bei der Ladung Q, die vermutlich bei den in Photovoltaikanlagen zu erwartenden Schäden von untergeordneter Bedeutung ist, erreicht die Anlage deutlich unterdurchschnittliche Werte. Aus Kostengründen war diese Einschränkung aber unvermeidlich.

Der Aufbau und die Inbetriebnahme einer solchen Anlage benötigte sehr viel Zeit. Infolge der starken elektromagnetischen Eigenstörungen beim Betrieb der Anlage erforderte der korrekte Aufbau der Messtechnik (Shunts, Teiler, Abschirmungen, Führung und Erdung der Koaxialkabel, Anpassungsprobleme) besondere Aufmerksamkeit und Sorgfalt. Bild 5 zeigt einen typischen von der Anlage erzeugten Stossstrom. Ein besonderes Problem bei der Durchführung solcher Arbeiten im Rahmen von Semester- und Diplomarbeiten war auch die personelle Diskontinuität. Es dauerte immer sehr lange, bis sich eine neue Studentengruppe soweit eingearbeitet hatte, dass sie die Arbeit vom früher erreichten Stand aus fortsetzen konnte.

Testplatz für Solarmodulkennlinien

Um die Auswirkungen von Blitzströmen auf die Funktion von Solarmodulen quantitativ erfassen zu können, ist es notwendig, U-I-Kennlinien von Solarmodulen bei definierten Einstrahlungen und Modultemperaturen genau reproduzierbar aufnehmen zu können. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen einer Semester- und Diplomarbeit ein relativ preisgünstiger Solarmodultestplatz mit 30 Fluoreszenzlampen entwickelt (siehe Bild 6). Die verwendeten Lampen (Osram Biolux) weisen ein ziemlich sonnenähnliches Spektrum auf. Mit diesem Testplatz ist es möglich, auf einer rechteckigen Fläche von etwa 130 cm Länge und 50 cm Breite eine bis auf wenige Prozent homogene Einstrahlung von 300 bis 400 W/m² (je nach Modulgrösse) zu erreichen. Mit dieser Anlage können nun die U-I-Kennlinien von Solarmodulen vor und nach der Beanspruchung durch simulierte Blitzströme der Stossstromanlage gemessen werden.

Tests mit einzelnen Solarzellen und Solarmodulen

Viele Tests wurden aus Kostengründen zunächst mit Einzelzellen, danach mit dreizelligen Minimodulen und schliesslich mit einigen Solarmodulen durchgeführt. Bei den Tests mit Einzelzellen und dreizelligen Minimodulen floss der simulierte Blitzstrom jeweils durch einen Draht im Abstand von 1 bis 4 mm von der Kante der Solarzelle (siehe Bild 7). Für die Modultests wurde der Stossstrom jeweils entweder in die kürzere Seite des Modulrahmens (siehe Bild 2) oder in die Mitte des Modulrahmens (siehe Bild 8), oder im Falle eines rahmenlosen Moduls, in einen flachen Leiter unmittelbar unter der Modulrückseite (siehe Bild 9) eingespeist. Auf diese Weise konnten direkte Blitzeinschläge in den Modulrahmen oder in die Tragstruktur eines rahmenlosen Moduls (Laminates) simuliert werden.

Vor der Testdurchführung wurden primär Schäden infolge direkter Überschläge zwischen dem Modulrahmen und unmittelbar benachbarten Solarzellen und somit ein Totalausfall des Moduls erwartet. Mit den relativ hohen di/dt-Werten von 40 bis 50 kA/µs beträgt die induktive Längsspannung längs eines metallischen Leiters (Induktivitätsbelag L' in der Grössenordnung 1 µH/m) etwa 40–50 kV/m. Bei den durchgeführten Tests konnten aber nie derartige Überschläge beobachtet werden.

Ergebnisse der Zellen- und Modultests

Die Experimente zeigten als einzige Auswirkung der im Modulrahmen fliessenden Blitzströme eine sukzessive Verschlechterung des Füllfaktors der U-I-Kennlinie der betreffenden Solarzelle oder des entspre-

Bild 4 Kennwerte der ISB-Anlage

Mit der ISB-Anlage maximal erreichbare Kennwerte von Stossströmen

Maximalstrom I_{max} [kA]	Max. Steilheit di/dt [kA/µs]	Ladung Q [As]
108	53	0,6

chenden Moduls (siehe Bilder 10 und 11). Dies dürfte eine Folge des schnell wechselnden elektromagnetischen Feldes des Blitzstromes sein. Solarzellen mit einer nennenswerten Verschlechterung des Füllfaktors haben meist sichtbare Schäden an der frontseitigen und rückseitigen Kontaktierung, die vermutlich von im Gitter zirkulierenden Wirbelströmen verursacht werden. Die Bilder 12 und 13 zeigen entsprechende Schäden bei einer monokristallinen Solarzelle. Bild 14 zeigt ähnliche Defekte in der Rückseitenkontaktierung einer polykristallinen Solarzelle (auf der Frontseite keine sichtbaren Schäden, da kurzgeschlossene Schleifen am Solarzellenrand fehlen).

Die Verschlechterung der U-I-Charakteristik ist möglicherweise nicht nur auf eine Erhöhung des Seriewiderstandes infolge Beschädigung der Front- und Rückseitenkontakte zurückzuführen, sondern auch auf interne Defekte im Halbleitermaterial, die durch das schnelle elektromagnetische Wechselfeld entstanden sind. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Verschlechterung der U-I-Charakteristik der Gesamtzelle durch das vom Feld geschädigte Gebiet in unmittelbarer Nähe des Blitzstromes verursacht wird.

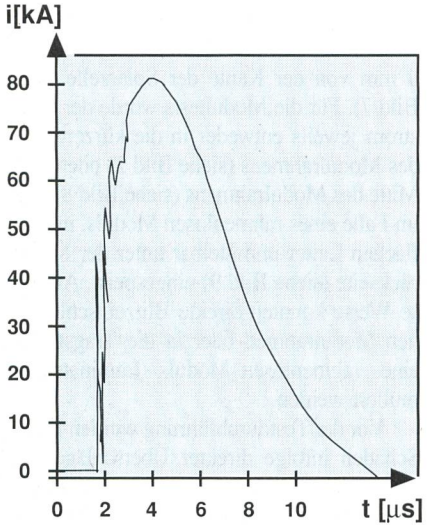

Bild 5 Stossstrom der ISB-Anlage

Typischer, mit der ISB-Anlage erzeugter Stossstrom [7]: I_{max} = 80 kA, di/dt = 53 kA/µs

Einflüsse auf die Schwere der Schäden

Der von Blitzströmen im Modulrahmen verursachte Schaden hängt in hohem Mass vom Aufbau des Moduls ab. Module mit kleinen Abständen (1–2 mm) zwischen Rahmen und Solarzellenrand werden schwerer beschädigt als Module mit grösseren Abständen (zum Beispiel 5 mm). Umgekehrt können Wirbelströme in einer eventuell auf der Modulrückseite vorhandenen Metallfolie das schnell ändernde elektromagnetische Feld beträchtlich schwächen und somit die darüber befindlichen Solarzellen schützen. Metallfolien können andere Probleme verursachen, erwiesen sich aber bei unseren Tests mit im Modulrahmen fliessenden Blitzströmen als Vorteil für die damit ausgerüsteten Module. In einem Modul, das zufällig beide günstigen Bedingungen (Metallfolie und grossen Abstand zu den Solarzellen) aufweist (Kyocera LA361J48), konnte auch nach mehreren Stössen mit Maximalstärke keine Veränderung der U-I-Kennlinie festgestellt werden. Andere getestete Solarmodule (Solarex MSX60, Siemens M20 und M65), die keine Metallfolie auf der Rückseite und eine geringere Distanz zwischen Rahmen und Zellen aufweisen, zeigten Veränderungen der U-I-Charakteristik wie in Bild 10 oder 11.

Tests an einem Modell einer Photovoltaikanlage

Die von Blitzströmen verursachten Schäden hängen auch von der Verdrahtung der Module ab. Ein bestimmter Blitzstrom erzeugt an kurzgeschlossenen Solarzellen oder Modulen die schwersten Schäden. Werden die Zellen oder Module dagegen im Leerlauf betrieben, sind die vom gleichen Strom verursachten Schäden dagegen geringer. Die im vorangehenden Kapitel beschriebenen Experimente wurden deshalb meist mit kurzgeschlossenen Modulen durchgeführt.

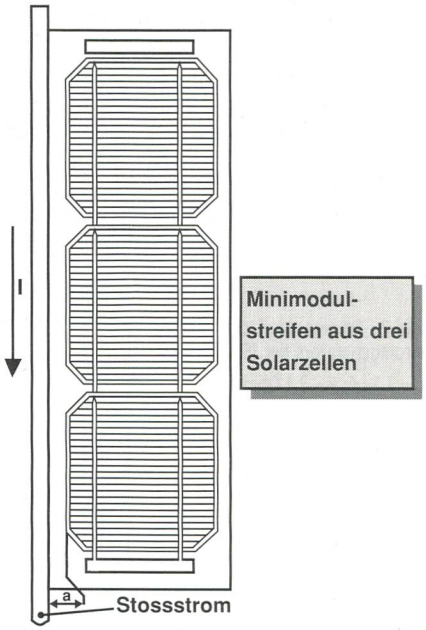

Bild 7 Testanordnung

Anordnung zum Test von dreizelligen Mini-Solarmodulen (aus [7])

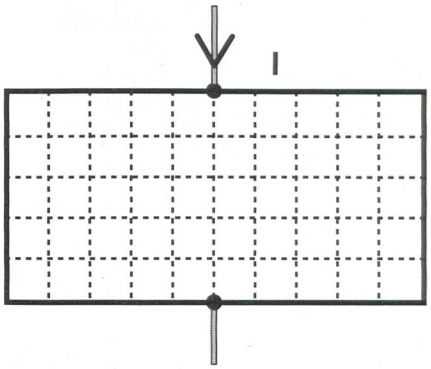

Bild 8 Strossstrom-Einspeisung bei PV-Modul mit Rahmen

Stossstrom wird in die Mitte des Modulrahmens eingespeist

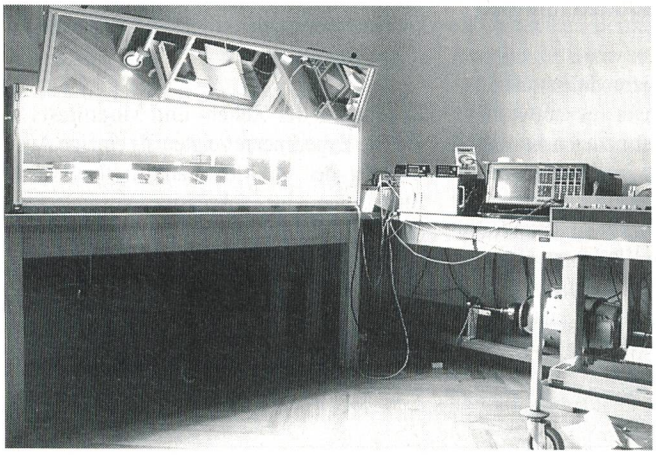

Bild 6 ISB-Testplatz für Solarmodule

aus [7]

Aufbau des Anlagenmodells

Für die weiteren Untersuchungen wurde ein Modell einer Photovoltaikanlage aufgebaut (siehe Bild 15). Es besteht aus einem Solarmodul, in dessen Rahmen ein Blitzstrom fliesst, einer kurzen Verbindung (ungefähr 1 m) zu einem Feldanschlusskasten mit Überspannungsableitern auf beiden Seiten (+ und –), einer abgeschirmten Leitung

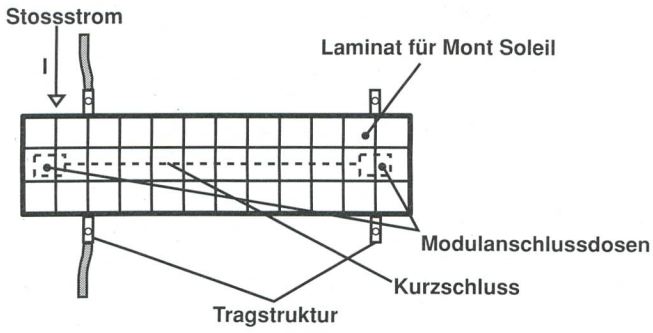

Bild 9 Strossstrom-Einspeisung bei rahmenlosem PV-Modul

Rahmenloses, kurzgeschlossenes Modul (Siemens M55, für Mont-Soleil verwendet), bei dem der Stossstrom durch einen flachen Leiter unmittelbar unter dem Laminat fliesst (Abstand Leiteroberfläche–Zellen etwa 2 mm [7])

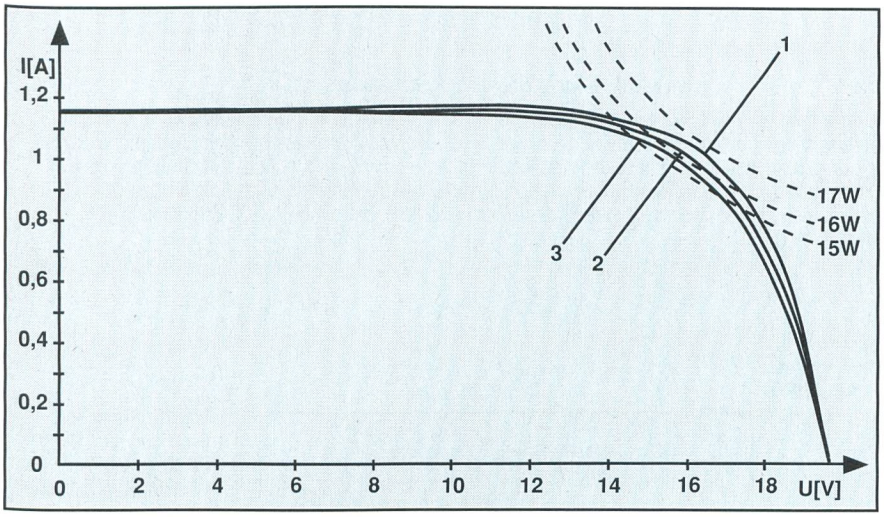

Bild 10 Kennlinien eines Moduls mit Rahmen

U-I-Kennlinien eines Solarex MSX60-Moduls bei $G' = 300$ W/m²
Stossstromeinspeisung gemäss Bild 8, Modul kurzgeschlossen [7]
1 Ursprüngliche Kennlinie
2 Nach Stossstrom mit $I_{max} = 53$ kA, $di/dt = 33$ kA/µs
3 Nach einem weiteren Stoss mit $I_{max} = 80$ kA, $di/dt = 53$ kA/µs

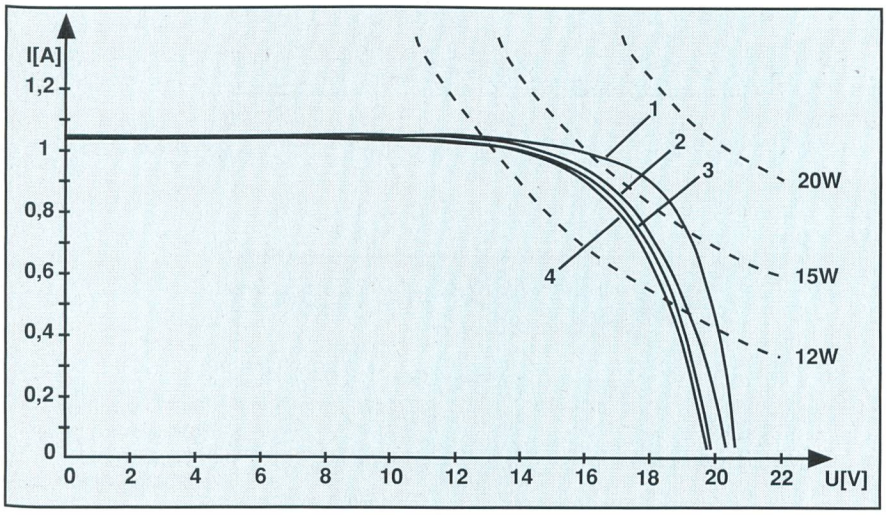

Bild 11 Kennlinien eines rahmenlosen Moduls

U-I-Kennlinie eines Moduls Siemens M55 (für Mont-Soleil verwendet) bei $G' = 320$ W/m²
Stossstromeinspeisung nach Bild 9, Modul kurzgeschlossen [7]
1 Ursprüngliche Kennlinie
2 Nach Stossstrom mit $I_{max} = 53$ kA, $di/dt = 33$ kA/µs
3 Nach einem weiteren Stoss mit $I_{max} = 69$ kA, $di/dt = 43$ kA/µs
4 Nach einem weiteren Stoss mit $I_{max} = 80$ kA, $di/dt = 53$ kA/µs

von etwa 6 m Länge, einem zweiten Satz von Überspannungsableitern und einem simulierten DC-Verbraucher (PV-Wechselrichter oder Akkumulator, nicht angeschlossen). Um die Effektivität des Überspannungsschutzes abschätzen zu können, wurden auf beiden Seiten der Leitung Spannung und Strom an den Überspannungsableitern gemessen. Module ohne eingebaute Bypassdioden wurden für diese Tests mit Bypassdioden in den Modulanschlussdosen ausgerüstet.

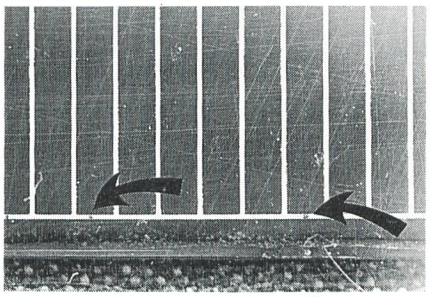

Bild 12 Defekte im vorderseitigen Kontaktgitter

Von Stossströmen erzeugte Defekte im Kontaktgitter auf der Vorderseite einer monokristallinen Solarzelle von Siemens (siehe Pfeile)

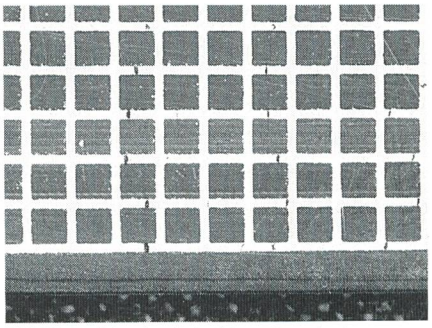

Bild 13 Defekte im rückseitigen Kontaktgitter

Von Stossströmen erzeugte Defekte am rückseitigen Kontaktgitter einer monokristallinen Solarzelle von Siemens

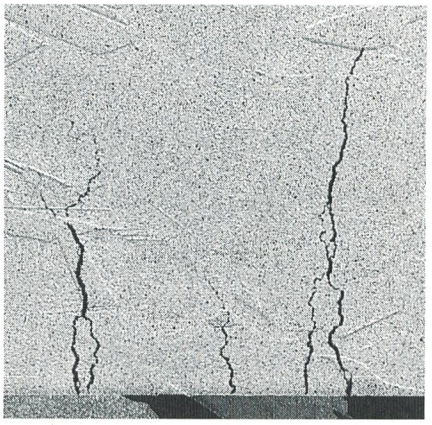

Bild 14 Schäden am Rückseitenkontakt einer polykristallinen Solarzelle

Von Stossströmen erzeugte rissartige Schäden an polykristalliner Solarzelle von Telefunken Systemtechnik

Ergebnisse der Tests mit dem Anlagenmodell

Die Experimente zeigten, dass die Schäden an verdrahteten Modulen nicht schwerer waren als bei kurzgeschlossenen Modulen, selbst wenn die Überspannungsableiter in der Front von Blitzströmen (hohe Werte von d*i*/d*t*) zu leiten begannen.

Modulaufbau und Höhe der induzierten Spannungen

Bei Modulen mit 3 parallelen Reihen von 10 Zellen (zum Beispiel Siemens M20 und M65) waren die induzierten Spannungen zu klein, um die verwendeten Überspannungsableiter (Dehn VM500) zum Leiten zu bringen. Tests mit Modulen mit 4 parallelen Reihen von 9 Zellen (zum Beispiel Kyocera LA361J48), die flächenmässig nur unwesentlich grösser sind, brachten die Überspannungsableiter dagegen deutlich zum Leiten. Es scheint also, dass ein durch die schmale Seite des Rahmens fliessender Blitzstrom in der internen Verdrahtung von dreireihigen Modulen geringere induzierte Spannungen erzeugt als in der von vierreihigen Modulen.

Gefährdung von Bypassdioden

Direkt an den Modulklemmen montierte Bypassdioden wurden bei Modulen mit nur einer Modulanschlussdose (zum Beispiel Kyocera LA361J48) schon bei mittleren Blitzströmen regelmässig zerstört (Kurzschluss nach dem Test). In Modulen mit zwei über je 2/3 der Zellen eingebauten Bypassdioden (zum Beispiel Siemens M65) wurden dagegen auch bei starken Blitzströmen keine Schäden an den Bypassdioden beobachtet. Es scheint, dass die Serieimpedanz des restlichen Drittels der Zellen (10 Zellen bei einem M65) den Strom durch die Bypassdioden auf einen sicheren Wert limitiert.

Beidseitige Verwendung von Überspannungsableitern

Um die Auswirkung von auf beiden Seiten der Leitung eingesetzten Überspannungsableitern auf die entstehenden Überspannungen und -ströme ohne den Einfluss von (langsam ändernden) Modulparametern untersuchen zu können, wurde für die meisten Tests zunächst ein Dummy-Modul aus Draht verwendet. Die erhaltenen Resultate wurden anschliessend mit einigen Tests mit wirklichen Modulen verifiziert.

Durch den beidseitigen Einsatz von Überspannungsableitern konnte der Strom auf der Wechselrichter-/Akkumulator-Seite beträchtlich reduziert werden. Im verwendeten Testaufbau betrug der Strom im Ableiter am Ende der durch ein Stahlrohr von etwa 6 m Länge geführten Leitung nur noch etwa 30% des Wertes am Anfang der Leitung (sie-

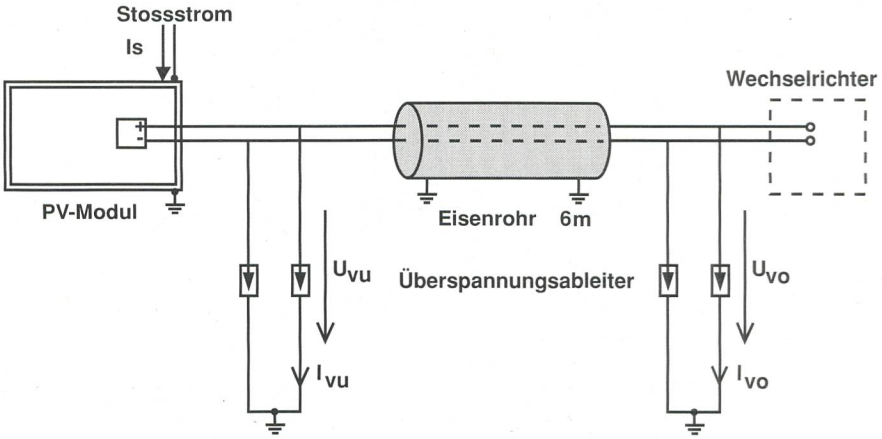

Bild 15 Schema des verwendeten Modells einer Photovoltaikanlage

Schema nach [6]. Links: Solarmodul mit durch den Rahmen fliessendem Stossstrom und zwei in geringem Abstand parallel geführten Anschlussdrähten (ca. 1 m) vom Modulanschlusskasten zum Feldanschlusskasten mit Überspannungsableitern in beiden Anschlussleitungen (+) und (–). Mitte: Mit Stahlrohr (Länge ca. 6 m, Durchmesser ca. 5 cm) abgeschirmte Leitung (2 · 10 mm²) zwischen Solarmodul und simuliertem DC-Verbraucher. Rechts: Zweiter Satz von Überspannungsableitern und simulierter DC-Verbraucher (nicht angeschlossen)

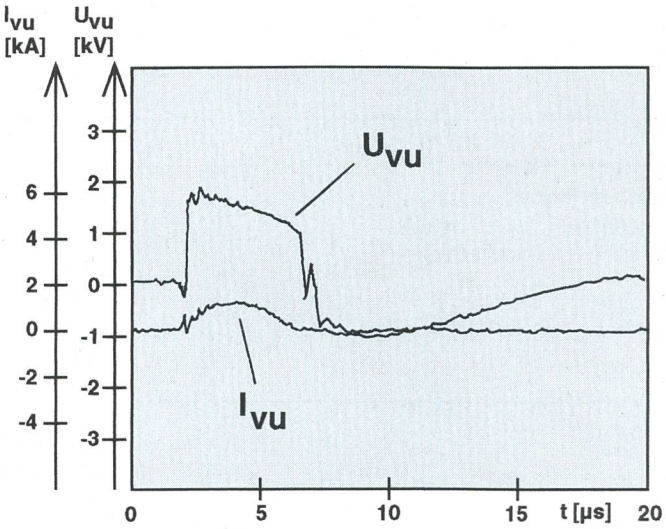

Bild 16 Strom und Spannung am PV-Modulseitigen Überspannungsableiter

Strom I_{vu} und Spannung U_{vu} am Überspannungsableiter in der Nähe eines Dummy-Solarmoduls (linke Seite von Bild 15), die durch einen Stossstrom von I_{max} = 108 kA und d*i*/d*t* = 53 kA/µs durch den Modulrahmen erzeugt werden [6]

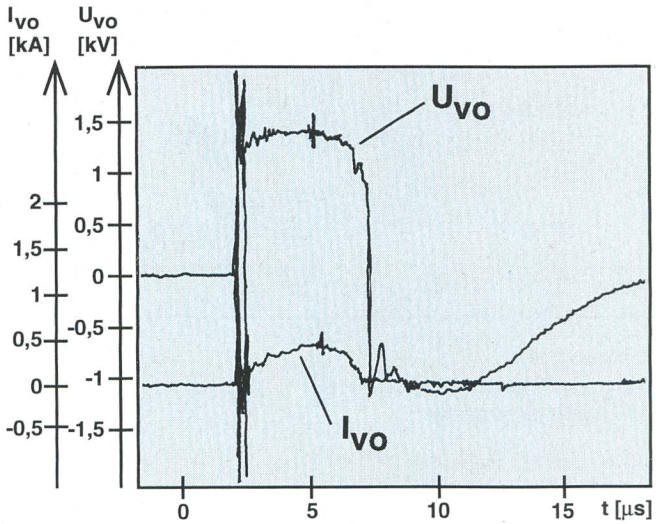

Bild 17 Strom und Spannung am wechselrichterseitigen Überspannungsableiter

Strom I_{vo} und Spannung U_{vo} am Überspannungsableiter nach der abgeschirmten Leitung zum DC-Verbraucher (rechte Seite in Bild 15), unter den gleichen Bedingungen wie in Bild 16 [6]

he Bilder 16 und 17). Ein abgeschirmtes Kabel von 10 m Länge mit dem gleichen Leiterquerschnitt (10 mm²) und einer Abschirmung von 10 mm² (Cu) hatte ungefähr die gleiche Wirkung. Die wesentlich aufwendigere Lösung mit einem Eisenrohr bringt also in der Praxis keine Vorteile. Die Verwendung von Überspannungsableitern auf beiden Seiten einer abgeschirmten Leitung scheint dagegen eine wirksame Methode zu sein, um die transienten Spannungen und Ströme auf den Eingangsleitungen von Wechselrichtern oder Ladereglern zu reduzieren.

Schlussbemerkungen

Die Experimente haben gezeigt, dass Solarmodule eigentlich erstaunlich geringe Schäden erleiden (Veränderung der U-I-Kennlinie mit Verschlechterung des Füllfaktors), wenn der Modulrahmen von einem simulierten Blitzstrom durchflossen wird. Ungeschützte Bypassdioden können in solchen Fällen dagegen Totalausfälle erleiden. Die Verwendung von Überspannungsableitern sowohl beim Solargenerator als auch beim Verbraucher auf beiden Seiten einer abgeschirmten Gleichstrom-Hauptleitung reduziert die auf den Verbraucher einwirkenden transienten Spannungen und Ströme wesentlich.

Literatur

[1] *H. Häberlin*: Photovoltaik – Strom aus Sonnenlicht für Inselanlagen und Verbundnetz. AT-Verlag, Aarau, 1991, ISBN 3-85502-434-0.

[2] *H. Häberlin*: Photovoltaik-Wechselrichter für Netzverbundanlagen. Elektroniker 6/92, S. 29–36 und 7/92, S. 31–38.

[3] *H.J. Stern*: Magnetische Beeinflussung von Photovoltaik-Modulen durch indirekte Blitzeinwirkung. Elektrie, Berlin 46(1992)6, S. 279–284.

[4] *M. Beyer, W. Boeck, K. Möller, W. Zaengl*: Hochspannungstechnik. Springer Verlag, Berlin, 1986, ISBN 3-540-16014-0.

[5] *P. Hasse, J. Wiesinger*: Handbuch für Blitzschutz und Erdung. Pflaum Verlag, München, 1989, ISBN 3-7905-0559-5.

[6] *M. Boss, D. Ettlin*: EMV-Festigkeit von Photovoltaik-Systemen. Diplomarbeit 1992, ISB (interner Bericht).

[7] *M. Ingold, H.R. Röthlisberger*: EMV-Festigkeit von Solarmodulen. Diplomarbeit 1991, ISB (interner Bericht).

[8] *A. Zgraggen, T. Bühlmann*: EMV-Festigkeit von Solarzellen. Diplomarbeit 1990, ISB (interner Bericht).

Verdankung

Die Autoren danken Herrn W. Reichen, Laborant im Hochspannungslabor, für die Herstellung der Fotografien und Herrn H. R. Röthlisberger, Assistent am Photovoltaiklabor, für die Herstellung einiger Grafiken. Ebenso danken sie allen Firmen, welche die Arbeiten materiell unterstützt haben (Günther Solar, Lintech, EWI, Elvatec, Emil Haefely & Cie AG). Ein spezieller Dank geht schliesslich an die ehemaligen Diplomanden der ISB [6, 7, 8], welche den grössten Teil der praktischen Arbeit in ihren Semester- und Diplomarbeiten durchgeführt haben.

Les modules solaires peuvent-ils supporter des coups de foudre?

Expériences sur la sensibilité des installations photovoltaïques au courant de foudre

Les modules photovoltaïques montés sur les toits de bâtiments sont exposés aux coups de foudre. En 1993, un générateur solaire de 60 kW va être installé sur le toit du nouveau bâtiment abritant le Département électrotechnique de l'Ecole d'ingénieurs à Berthoud, qui doit servir à examiner des systèmes photovoltaïques (spécialement les onduleurs). Etant donné le peu de connaissances disponibles sur les effets des coups de foudre directs dans les installations photovoltaïques, des tests étendus ont été effectués dans le cadre de travaux de semestre et de diplôme sur des cellules solaires, des modules solaires et sur un modèle d'une installation photovoltaïque.

Avec un générateur de courant de choc on a injecté des courants de choc élevés à montée rapide de l'intensité dans les cadres métalliques des modules solaires (fig. 2–5) et examiné sur un banc d'essai de modules solaires construit à cet effet, les effets sur les caractéristiques U-I (fig. 6). Les tests ont été effectués sur des cellules simples, des mini-modules de trois cellules et, finalement, sur quelques modules solaires. L'alimentation utilisée est représentée aux fig. 7–9.

Les expérimentations ont montré comme seul effet des courants de foudre s'écoulant dans le cadre des modules, une dégradation successive du coefficient de remplissage de la caractéristique U-I de la cellule solaire concernée ou du module correspondant (voir fig. 10 et 11). La dégradation de la caractéristique U-I est probablement imputable à une augmentation de la résistance en série due à l'endommagement des contacts avant et arrière (fig. 12–14), mais peut-être aussi à des défauts internes du matériau des semi-conducteurs, qui ont été produits par le champ électromagnétique alternant rapide. Finalement, on a aussi monté et testé le modèle d'une installation photovoltaïque complète (fig. 15–17).

De manière générale les expérimentations ont montré que les modules solaires ont présenté des dommages étonnamment faibles quand le cadre de module est traversé par le courant de foudre. Dans de tels cas, cependant, des diodes à bypass non protégées peuvent subir une défaillance totale. L'utilisation de parafoudres sur le générateur solaire comme sur le consommateur des deux côtés d'une ligne principale de courant continu blindée réduit considérablement les tensions et courants transitoires et semble de ce fait recommandable.