

Von simulierten Blitzströmen in Solarmodulen und Solargeneratoren induzierte Spannungen

H. Häberlin, R. Fischer und R. Minkner

Berner Fachhochschule, Hochschule für Technik und Architektur (HTA) Burgdorf

Labor für Photovoltaik, Jlcoweg 1, CH-3400 Burgdorf / SCHWEIZ

Tel: +41 34 426 68 11, Fax: +41 34 426 68 13 , e-Mail heinrich.haeblerlin@hti.bfh.ch

1. Einführung

An der HTA Burgdorf wurden bereits 1990 – 1993 im Laufe mehrerer Semester- und Diplomarbeiten die Schäden untersucht, welche von im Rahmen von Solarmodulen fließenden Blitzströmen verursacht werden [1, 2]. Dazu wurde ein im Hochspannungslabor entwickelter Stossstromgenerator verwendet, der Stossströme mit $i_{\max} \leq 100\text{kA}$, $(di/dt)_{\max} \leq 50\text{kA}/\mu\text{s}$ und einer Ladung $Q \leq 0,6\text{As}$ erzeugen konnte. Mit diesem Generator konnte im dem Stossstrom am nächsten liegenden Teil des Moduls (Fläche $\leq 50\text{cm} \cdot 40\text{cm}$) ein sich schnell änderndes, sehr starkes Magnetfeld erzeugt werden und die dadurch im Modul induzierten Spannungen gemessen werden. In diesen Arbeiten wurde auch festgestellt, dass im Rahmen von Solarmodulen fließende Ströme zwar gewisse Schäden an den I-U-Kennlinien von Solarmodulen verursachen, dass aber schon durch einen geringen Abstand (einige cm) zwischen Blitzstrom und gerahmtem Modul direkte Schäden vermieden werden können. Ebenso wurde festgestellt, dass unter gleichen Bedingungen die Schäden an rahmenlosen Modulen wesentlich grösser sind. Mit den damaligen Mitteln war es jedoch nicht möglich, ein ganzes Modul oder gar einen verdrahteten Solargenerator dem Feld derartiger simulierter Blitzströme auszusetzen.

Im Rahmen des EU-Projektes PV-EMI (JOR3 CT98 0217, Partner: FhG/ISE, HTA Burgdorf, KEMA) bot sich die Gelegenheit, einen wesentlich grösseren Stossstromgenerator zu bauen und die früheren Arbeiten weiterzuführen. Dabei konnte durch Messungen an mehreren verschiedenen Modulen und verdrahteten Solargeneratoren klar belegt werden, dass bei gerahmten Modulen die induzierten Spannungen sowohl in einzelnen Modulen als auch in verdrahteten Solargeneratoren deutlich reduziert werden können. Eine noch etwas stärkere Reduktion der induzierten Spannungen haben Folien auf der Modulrückseite zur Folge. Ebenso konnte gezeigt werden, dass bei vielen Modulen die Bypassdioden bei Blitzschlägen ein eindeutiger Schwachpunkt sind.

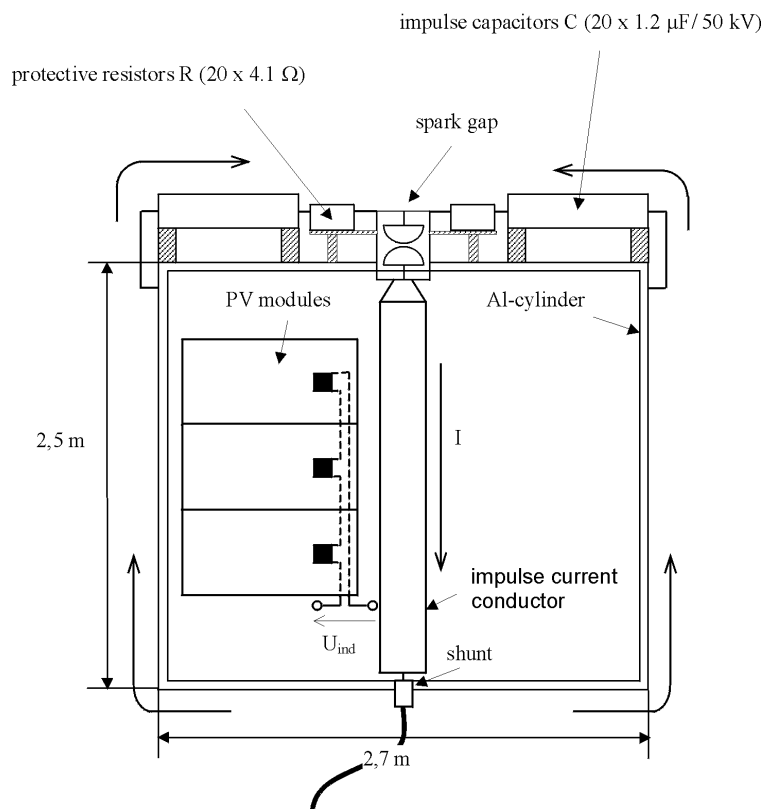
2. Der Stossstromgenerator

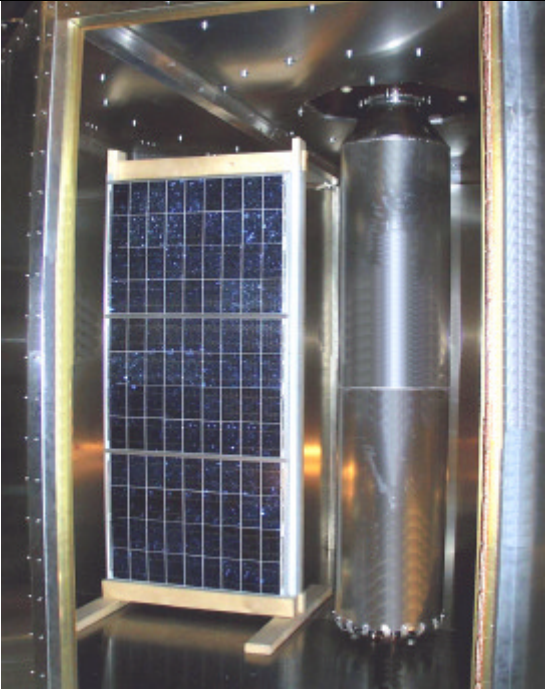
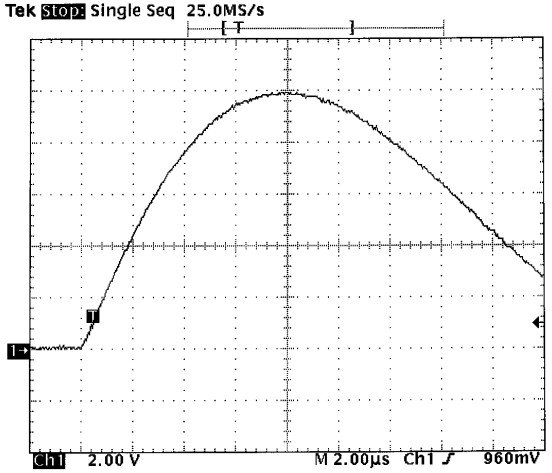
Bild 1 zeigt schematisch den Aufbau des koaxialen Stossstromgenerators, der es erlaubt, Solarmodule und verdrahtete Solargeneratoren mit einer Fläche bis zu etwa $1,25\text{m} \cdot 2,25\text{m}$ dem Magnetfeld eines simulierten Blitzstroms auszusetzen. Bild 2 zeigt drei in diesem Stossstromgenerator montierte Module KC60 von Kyocera und Bild 3 einen typischen für die Tests verwendeten Stossstrom.

Bild 1:

Schematischer Aufbau des koaxialen Stossstromgenerators der HTA Burgdorf.

$i_{\max} = 120\text{kA}$,
 $di/dt_{\max} = 40\text{kA}/\mu\text{s}$,
 $Q_{\max} = 1,2\text{As}$.



	
<p>Bild 2: Blick in den Stossstromgenerator mit einem zu Testzwecken montiertem Solargenerator aus drei Modulen Kyocera KC60.</p>	<p>Bild 3: Kurvenform des für die meisten Tests verwendeten Stossstroms ($i_{\max} \approx 100\text{kA}$, $di/dt_{\max} \approx 25\text{kA}/\mu\text{s}$, Massstäbe: $20\text{kA}/\text{Div.}$ und $2\mu\text{s}/\text{Div.}$).</p>

3. Ergebnisse der Tests von einzelnen Modulen

In jeder aufgespannten Schleife wird, ganz gleich ob sie durch die modulinterne Serieschaltung der Solarzellen oder durch die äussere Verdrahtung der Module innerhalb eines Solargenerators gebildet wird, durch den Blitzstrom gemäss dem Induktionsgesetz eine Spannung induziert:

Induzierte Spannung in einer Leiterschleife: $u = M \cdot di/dt$

Dabei bedeutet M die Gegeninduktivität zwischen dem Blitzstrom und der betrachteten Schleife.

In einem Solarmodul aus kristallinen Solarzellen treten in der Regel mindestens zwei modulinterne Schleifen auf. Je nach der gegenseitigen Orientierung dieser Schleifen können sich die induzierten Spannungen im Prinzip addieren oder (teilweise) kompensieren. Die Situation wird allerdings durch die meist über diesen Schleifen vorhandenen Bypassdioden kompliziert, da diese entweder sperren oder leiten. Unter Einbezug der Wirkung der Bypassdioden können drei grundsätzliche Arten von Modulen unterschieden werden:

- **Additive Module mit einer geraden Anzahl Zellenreihen** (häufigster Typ, Beispiel: Kyocera KC60):
Je nach der Richtung des Blitzstroms addieren sich die induzierten Spannungen in den internen Schleifen (Bypassdioden sperren) oder sind praktisch 0 (Bypassdioden leiten).
- **Kompensierende Module mit einer geraden Anzahl Zellenreihen** (Beispiel: Solarex MSX60/64):
Unterschiedliche Polaritäten der in den einzelnen Schleifen induzierten Spannungen. Gegen aussen tritt immer die Spannung der Schleife(n) in Erscheinung, deren Bypassdioden sperren. Alle Schleifen, in denen Spannungen umgekehrter Polarität induziert werden, werden durch deren Bypassdioden kurzgeschlossen.
- **Kompensierende Module mit einer ungeraden Anzahl Zellenreihen** (Beispiele: Siemens SM46, SM55):
Unterschiedliche Polaritäten der in den einzelnen Schleifen induzierten Spannungen. Gegen aussen tritt nur die Spannung der Schleife in Erscheinung, deren Bypassdioden sperren. Die andere Schleife, in der eine Spannung umgekehrter Polarität induziert wird, wird durch deren Bypassdiode kurzgeschlossen.

Aus Platzgründen werden hier nur die Testergebnisse des häufigsten Modultyps näher gezeigt.

3.1 Induzierte Spannungen bei einem additiven Modul (KC60) in Parallel-Position

Die grössten Spannungen treten zu Beginn des Stossstroms auf, wenn di/dt maximal ist. Bei dieser maximalen Spannung sind auch die grössten Probleme und Schäden zu erwarten. Wenn ein Metallrahmen vorhanden ist, wird in diesem Rahmen ein Kurzschlussstrom induziert, der das induzierte Feld schwächt und somit die induzierten Spannungen reduziert. Ist das Modul relativ nahe beim Blitzstrom, kann in der weiter entfernten Schleife sogar eine Überkompensation mit einer Polaritätsumkehr auftreten. In der Praxis hätte eine solche Polaritätsumkehr wie bei den kompensierenden Modulen zur Folge, dass wegen der Bypassdioden nur die Spannung der inneren Schleife an den Klemmen wirksam wird. Um bei den durchgeführten Messungen nicht unnötige Bypassdiodendefekte zu erhalten, wurden die gezeigten Messungen ohne Bypassdioden durchgeführt. Bild 5 zeigt die in verschiedenen Abständen gemessenen maximalen induzierten Spannungen bei einem KC60 in Parallelposition.

Fig. 4a:
In rahmenloses KC60 (60Wp, 751mm-652mm) in Parallel-Position (Längsseite parallel Blitzstrom) induzierte Spannungen bei einem Stossstrom nach Bild 3. Da Spannungsteiler 100:1 verwendet werden, sind die effektiven Spannungen 100 mal grösser.

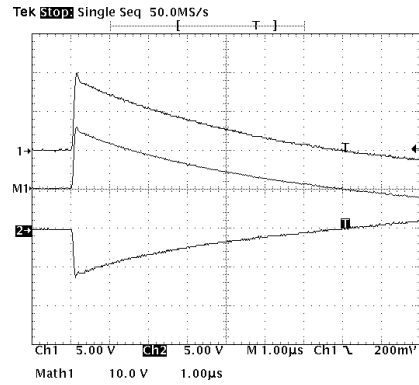


Fig. 4b:
In KC60 mit Alu-Rahmen (Längsseite parallel Blitzstrom) induzierte Spannungen bei einem Stossstrom nach Bild 3. Da Spannungsteiler 100:1 verwendet werden, sind die effektiven Spannungen 100 mal grösser.

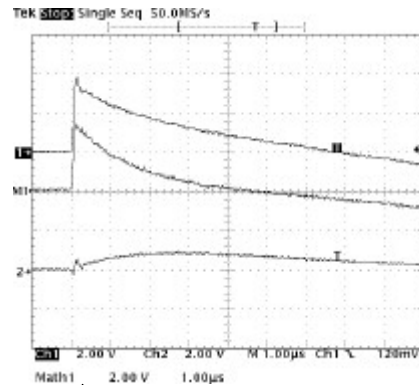


Bild 4c:
Modul KC 60 in Parallel-Position, beide Schleifen im Leerlauf ($d_{m1} = 450\text{mm}$, $d_{m2} = 900\text{mm}$)

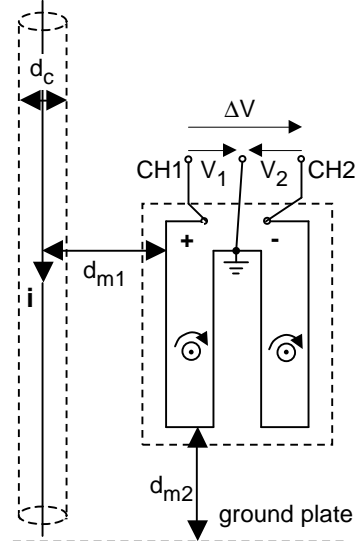
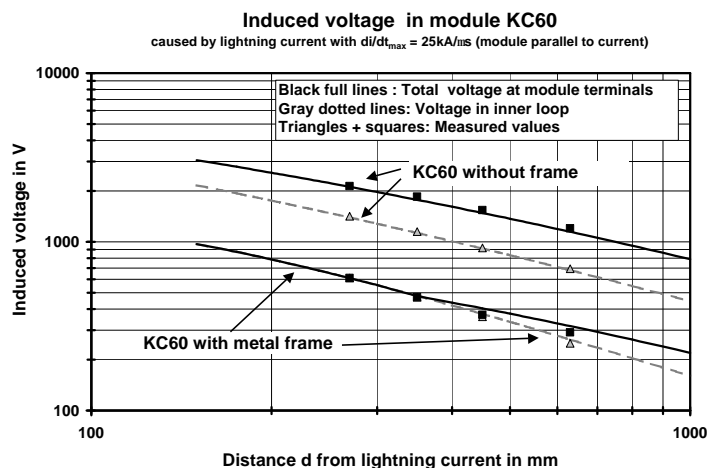


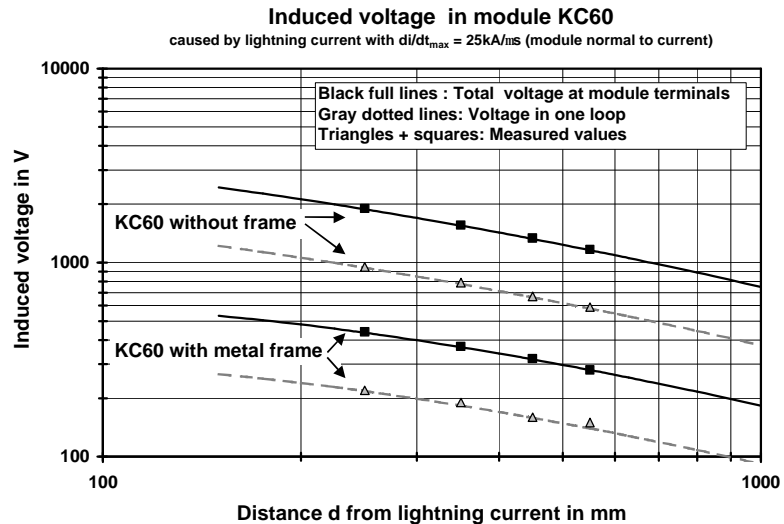
Bild 5:
In einem additivem Solarmodul KC60 in Parallel-Position (Modul-Längsseiten parallel zum Blitzstrom) ohne (oben) und mit Metallrahmen (unten) induzierte Spannungen (Maximalwerte) bei einem $di/dt_{max} = 25\text{kA}/\mu\text{s}$. Beim gerahmten Modul wird im Rahmen ein Kreisstrom induziert, der das Magnetfeld des Blitzstroms schwächt, so dass die im Modul induzierten Spannungen wesentlich kleiner werden.



3.2 Induzierte Spannungen bei einem additiven Modul (KC60) in Normal-Position

Bild 6:

In einem additivem Solarmodul KC60 in Normal-Position (Modul-Längsseiten senkrecht zum Blitzstrom) ohne (oben) und mit Metallrahmen (unten) induzierte Spannungen (Maximalwerte) bei einem $di/dt_{max} = 25kA/\mu s$. Beim gerahmten Modul wird im Rahmen ein Kreisstrom induziert, der das Magnetfeld des Blitzstroms schwächt, so dass die im Modul induzierten Spannungen wesentlich kleiner werden.



3.3 Rahmen-Reduktionsfaktor bei anderen Modultypen

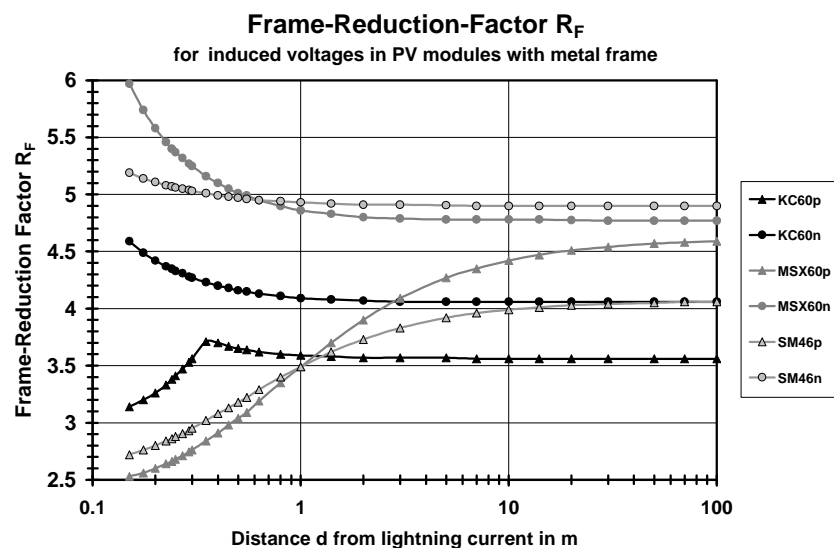
Um das Verhalten von Modulen mit und ohne Rahmen zu vergleichen, kann ein Rahmen-Reduktionsfaktor R_F eingeführt werden, der das Verhältnis der ohne und mit Metallrahmen induzierten Maximalspannung angibt. R_F ist vom Modultyp und vom Abstand des Moduls zum Blitzstrom abhängig.

Bild 7:

Rahmen-Reduktionsfaktor R_F in Funktion des Abstandes vom Blitzstrom bei drei verschiedenen Modultypen:

- Additives Modul KC60
- 4-reihiges kompensierendes Modul MSX60
- 3-reihiges kompensierendes Modul SM46

Bei allen Modulen zeigt sich das gleiche Verhalten, d.h. ein Rahmen reduziert die induzierte Spannung beträchtlich. Für grössere Distanzen wurden die Werte mit einem Rechenmodell ermittelt.



3.4 Einfluss von Aluminiumfolie auf der Modulrückseite

Manche Modulhersteller verwenden auf der Rückseite von Modulen Aluminiumfolie als Dampfsperre. Bei einem Blitzschlag werden darin Wirbelströme induziert, welche das Magnetfeld und damit die induzierten Spannungen stark reduzieren. Um diesen Effekt quantitativ erfassen zu können, wurde Aluminiumfolie auf der Rückseite der bereits früher getesteten KC60 mit und ohne Rahmen aufgeklebt (minimaler Abstand zum Rahmen ca. 5mm). Dabei zeigte sich, dass eine Aluminiumfolie eine weitere Reduktion der induzierten Spannungen um einen Faktor 7 – 10 bewirkt. Dieser Effekt ist kumulativ zur Reduktion infolge des Metallrahmens. Bei Modulen mit Aluminiumfolie ist es aber viel schwieriger, die Anforderungen der Schutzklasse II zu erfüllen.

3.5 Einfluss von gerahmten Nachbarmodulen auf die induzierten Spannungen

Die in den Rahmen von benachbarten Modulen bei einem Blitzschlag fließenden Ströme beeinflussen die induzierten Spannungen in einem Modul. Befinden sich zusätzliche gerahmte Nachbarmodule in grösserer Entfernung vom Blitzstrom, sinkt die Spannung im betrachteten Modul. Liegen diese Nachbarmodule dagegen in geringerer Entfernung, erhöht sich die induzierte Spannung im betrachteten Modul. In einem Fall verdoppelte sich bei einem Modul mit zwei dem Blitzstrom näher liegenden Nachbarmodulen die gemessene Spannung nahezu.

3.6 Bypassdioden

Ein in der Praxis oft angetroffener Schwachpunkt waren die Bypassdioden, die bei den Tests häufig zerstört wurden. Für PV-Anlagen, welche direkte Blitzschläge ins Gebäude überleben sollen, müssen deshalb Bypassdioden mit genügend hoher Sperrspannung vorgesehen werden. Durch Blitzschläge beschädigte Bypassdioden stellen nachher oft einen Kurzschluss dar, was besonders bei PV-Anlagen, welche aus vielen parallelen Strängen ohne Sicherungen bestehen, gefährlich werden kann.

4. Induzierte Spannungen bei verdrahteten Solargeneratoren

Grundsätzlich kann man feststellen, dass für die maximal auftretende Spannung, die unmittelbar zu Beginn des Blitzstroms auftritt, trotz der vielen nichtlinearen Elemente immer noch das Überlagerungsprinzip gilt, d.h. die Spannung in einem verdrahteten Seriengang ist in schlimmsten Fall die Summe der Spannung, welche in der Verdrahtung zwischen den Modulen induziert wird, und der Summe der in den einzelnen Modulen induzierten Spannungen. Natürlich ist es denkbar, dass sich die Verdrahtungsspannung und die Modulspannungen teilweise kompensieren, davon kann aber im allgemeinen Fall nicht ausgegangen werden.

Die Verdrahtungsspannung ist minimal, wenn man die durch die Modulverdrahtungsschleifen aufgespannten Flächen möglichst klein hält. Dies ist aber im allgemeinen Fall nicht immer möglich. Experimente mit gerahmten Modulen haben aber gezeigt, dass in einer ausgedehnten Modulverdrahtungsschleife, die sich in der Ebene des Solargenerators befindet und dessen Grenzen nicht überschreitet, die induzierten Spannungen in einem ähnlichen Masse reduziert werden wie in den Modulen selbst.

5. Erdung von Solargeneratoren

Ausgedehnte Experimente wurden auch mit auf verschiedene Arten geerdeten Modellen von Solargeneratoren mit und ohne Varistoren durchgeführt. Die dabei unter sonst gleichen Bedingungen auftretenden Spannungen wiesen sehr grosse Unterschiede auf. Aus Platzgründen können hier keine konkreten Resultate gezeigt werden, sondern nur kurz die wichtigsten Erkenntnisse dargestellt werden.

Wenn Solargeneratoren vor direkten Blitzschlägen geschützt werden sollen, werden sie am Besten im Schutzbereich einer Blitzschutzanlage nach EN61024 angeordnet. Wenn Module mit Metallrahmen oder einer metallischen Tragstruktur verwendet werden, sollten diese Elemente mit einem möglichst dicht an der DC-Hauptleitung mitgeführten Erdleiter geerdet werden (Querschnitt $\geq 6\text{mm}^2$).

Wenn eine zusätzliche Erdverbindung dieser Metallrahmen oder der Tragstruktur besteht (absichtlich, um einen Überschlag infolge zu geringer Distanz zu einer Blitzschutzanlage zu verhindern oder unabsichtlich infolge Fehlern bei der Planung oder Realisierung) und wenn die PV-Anlage Blitzeinschläge in die in unmittelbarer Nähe befindliche Blitzschutzanlage ohne Schäden überstehen soll, ist die beste Lösung die Verwendung einer beidseitig geerdeten abgeschirmten DC-Hauptleitung mit genügendem Schirmquerschnitt und zwei Überspannungsableitern von + und - gegen Erde mindestens auf der Solargeneratorseite (besser je 2 stärkere Varistoren auf der Solargeneratorseite und 2 schwächere auf der Seite des Wechselrichters/Ladereglers). Ist kein geeignetes DC-Kabel mit genügendem Abschirmquerschnitt verfügbar, können auch zwei separate abgeschirmte Koaxialkabel verwendet werden. In diesem Fall ist es aber sehr wichtig, dass die beiden Koaxialkabel sehr nahe beieinander verlegt werden und dass die beiden Schirme beidseitig miteinander verbunden und auf der Solargeneratorseite mit der Metallstruktur des Generators und auf der andern Seite mit Erde verbunden werden.

Eine billigere, aber weniger wirksame Lösung wäre an sich die Verwendung eines mit der DC-Hauptleitung mitgeführten und mit ihr verdrehten Erdleiters (mit möglichst grossem Querschnitt, also z.B. $25 - 50\text{mm}^2$) und der Einsatz von teilblitzstromtragfähigen Varistoren auf beiden Seiten der Leitung. Leider sind auf dem Markt gegenwärtig kaum Varistoren erhältlich, welche eine für diese Anwendung ausreichende Strombelastbarkeit aufweisen.

Verdankungen:

Die meisten der in diesem Bericht beschriebenen Arbeiten wurden im Rahmen eines EU-Projektes (JOR3 CT98 0217, Partner: FhG/ISE, HTA Burgdorf, KEMA) durchgeführt und vom Bundesamt für Bildung und Wissenschaft (BBW) finanziert. Die Aktivitäten der HTA Burgdorf auf dem Gebiet der Photovoltaik wurden auch vom BFE, den IBB Burgdorf und dem EWB unterstützt.

Literatur:

- [1] H. Häberlin, R. Minkner: "Blitzschläge - eine Gefahr für Solarmodule?". SEV/VSE-Bulletin 1/1993.
- [2] H. Häberlin, R. Minkner: "Einfache Methode zum Blitzschutz von Photovoltaik-Anlagen". SEV/VSE-Bulletin 19/1994.

Informationen über weitere Aktivitäten des Photovoltaik-Labors der HTA Burgdorf und weitere Publikationen (teilweise online) sind unter <http://www.pvtest.ch> zu finden.