

Schäden an Bypassdioden in PV-Modulen durch induzierte Spannungen und Ströme, die durch nahe gelegene Blitzströme verursacht werden

Heinrich Häberlin und Martin Kämpfer

Berner Fachhochschule (BFH), Technik und Informatik, Labor für Photovoltaik

Jlcoweg 1, CH-3400 Burgdorf / SCHWEIZ

Tel: +41 34 426 6811, Fax: +41 34 426 6813

e-Mail: heinrich.haeberlin@bfh.ch

Internet: www.pvtest.ch

Einführung

Am PV-Labor der BFH wurden zunächst 1990 – 1993 im Laufe mehrerer Semester- und Diplomarbeiten und 1998 – 2000 auch im Rahmen eines EU-Projektes (JOR3CT980217, Partner: FhG/ISE, HTA Burgdorf, KEMA) die Schäden untersucht, die von in der Nähe von Solarmodulen fließenden Blitzströmen verursacht werden [1]. Dazu wurde ein im Hochspannungslabor entwickelter Stossstromgenerator verwendet, der Stossströme mit $i_{\max} \leq 100\text{kA}$, $(di/dt)_{\max} \leq 40$ bis $50\text{kA}/\mu\text{s}$ und einer Ladung $Q \leq 1,2\text{ As}$ erzeugen konnte.

Es 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 um einen Rahmenreduktionsfaktor R_R reduziert werden können [1]. Eine noch 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 klarer Schwachpunkt sind. Sie können durch nahe gelegene Blitzströme zerstört werden, denn es können leicht Spannungen auftreten, die viel grösser als die zulässige Sperrspannung der verwendeten Bypassdioden sind.

Entgegen früheren Annahmen, dass ein Überschreiten der zulässigen Sperrspannung relativ rasch zu einer Zerstörung der Bypassdioden führt, wurde im Rahmen eines Messauftrags für eine neuartige Bypassdiodenschaltung festgestellt, dass die Situation dank der Fähigkeit der Bypassdioden, vor einem Durchbruch eine gewisse Avalanche-Energie auszuhalten, nicht ganz so schlimm ist wie zunächst angenommen [2]. Deshalb wurde dieses Problem sowohl theoretisch [3] als auch praktisch näher untersucht [3], [4].

Genauere Analyse des Problems

Beim Blitzschutz von PV-Anlagen ist es zweckmässig, einen Blitzstrom i mit einer geeigneten Fangeinrichtung aufzufangen, ihn in mehrere Teilblitzströme aufzuteilen, die nur einen Teilblitzstrom $i_A = k_C \cdot i$ ($k_C \leq 1$) führen und die gefährdete Installation (z.B. den PV-Generator) im Schutzbereich dieser Fangeinrichtung in einer genügenden Distanz d von den Teilblitzstrom führenden Leitern zu platzieren.

Üblicherweise liegt d etwa zwischen 0,3 m und 3 m oder mehr. Meist ist dann in erster Näherung für die induzierten Spannungen und Ströme nur der Teilblitzstrom

$i_A = k_C \cdot i$ massgebend, welcher der kritischen Schleife am nächsten liegt, so dass primär dieser Fall untersucht werden muss (siehe Bild 1).

$$M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{b+d}{d}$$

($\mu_0 = 0,4\pi \mu\text{H/m}$)
Für $b \ll d$:

$$M \approx \frac{\mu_0 b l}{2\pi d_s} = \frac{\mu_0 A_s}{2\pi d_s}$$

$$u = M \frac{di_A}{dt}$$

Bild 1:
Berechnung der Gegeninduktivität M zwischen einer Schleife (z.B. einer Bypassdiodeschleife in einem Modul) und einem Teilblitzstrom $i_A = k_C \cdot i$ (i = gesamter Blitzstrom gemäss Blitzschutznormen, $k_C \leq 1$). Wenn das Modul einen Metallrahmen hat, ist der effektive Wert von M um den Rahmenreduktionsfaktor R_R geringer [1], [3].

Je nach der gegenseitigen Lage und Orientierung von Blitzstrom führender Ableitung und modulinterner Schleife treten zwei verschiedene Fälle auf, die sich bezüglich der Polarität der in der Front des Blitzstroms induzierten Spannung unterscheiden. Im einen Fall werden die Bypassdiode und die Solarzellendioden in Sperrrichtung (Bild 2), im andern in Durchlassrichtung beansprucht (Bild 3).

Bypassdiode in Sperrrichtung beansprucht

Bypassdiode in Durchlassrichtung beansprucht

Bild 2:
Bypassdiode und Solarzellendioden werden in der Front des Blitzstroms in Sperrrichtung beansprucht. Beim Überschreiten der relativ hohen Durchbruchsspannung können sie bei nicht allzu hohen Strömen ohne Schaden ganz kurze Zeit im Durchbruch-(Avalanche-)Bereich arbeiten. Wegen der hohen Gegenspannung nimmt der Strom rasch ab.

Bild 3:
Bypassdiode und Solarzellendioden werden in der Front des Blitzstroms in Durchlassrichtung beansprucht. An Solarzellen und Bypassdiode tritt nur ein relativ kleiner Spannungsabfall auf. Beim Überschreiten des zulässigen Grenzstroms wird die Bypassdiode zerstört. Wegen der kleinen Gegenspannung nimmt der Strom langsamer ab.

In Sperrrichtung stellen die Solarzellen eine Parallelschaltung einer Kapazität (bis zu einigen μF bei 0V, mit zunehmender Sperrspannung rasch zurückgehend) und einer Diode mit einer Durchbruchspannung von etwa 10 V – 30 V dar. Schottky Dioden haben in der Regel eine Durchbruchspannung vom etwa 1,5 bis 2-fachen ihrer Nenn-Sperrspannung. Oft ist auch noch eine Angabe einer Avalanche-Energie im Bereich von 10 mJ bis 100 mJ vorhanden. Da eine Bypassdiodeschleife meist aus 12 – 24 Solar-

zellen in Serie besteht, ist in diesem Fall eine induzierte Spannung von bis zu einigen hundert Volt zulässig, bevor hohe induzierte Ströme entstehen, welche die Bypassdiode (und bei allzu hohen Werten sogar die Solarzellen) zerstören können.

In Vorwärtsrichtung leiten sowohl die Solarzellen als auch die Bypassdioden und haben einen Vorwärtsspannungsabfall von etwa 1 V. Deshalb fließt ein nennenswerter Vorwärtsstrom, der einen Maximalwert von gegen $(M/L_S) \cdot i_A$ erreichen kann (M = Gegeninduktivität zwischen (Teil-)Blitzstrom i_A und Bypassdiodenschleife, L_S = Induktivität der Bypassdiodenschleife). Dieser Strom kann leicht einige 100 A und mehr erreichen, die Bypassdioden zerstören und die Solarzellen beschädigen, wenn er zu hoch ist. In den Datenblättern hat es meist Angaben für einen Spitzenstrom I_{FSM} für Sinushalbwellen (8.3 ms oder 10 ms) von einigen 100 A, und es kann angenommen werden, dass die Diode mindestens einen Spitzenstrom mit diesen Werten aushalten kann.

Wenn das Modul einen Metallrahmen hat, reduziert sich der effektive Wert von M und deshalb die induzierte Spannung um einen Rahmenreduktionsfaktor R_R , der typischerweise zwischen etwa 2.5 und 6 liegt [1], [3].

Berechnung der induzierten Spannung und des Kurzschlussstromes in Modulschleifen

Die von einem Teilblitzstrom $i_A = k_C \cdot i$ in einer Schleife induzierte Spannung beträgt:

$$\text{Vom Teilblitzstrom } i_A \text{ induzierte Spannung: } u = M \frac{di_A}{dt} = M \cdot k_C \frac{di}{dt} = M_i \frac{di}{dt} \quad (1)$$

Dabei kann $M_i = M \cdot k_C$ als effektive Gegeninduktivität zwischen dem vollen Blitzstrom und der betrachteten Schleife bezeichnet werden. Die Gegeninduktivität bei Schleifen, die den Teilblitzstrom nicht enthalten, berechnet sich wie in Bild 1 angegeben:

$$\text{Gegeninduktivität bei von Ableitung getrennter Schleife: } M = 0,2 \cdot l \cdot \ln \frac{b+d}{d} \quad (2)$$

Dabei ist M die Gegeninduktivität in μH , wenn alle Längenangaben (l , b , d) in m angegeben werden.

Wenn das betrachtete Modul einen Rahmen hat, reduziert sich die induzierte Spannung und damit die effektive Gegeninduktivität M_i . Für Bypassdiodenschleifen in Modulen beträgt die effektive Gegeninduktivität somit [3]:

$$\text{Effektive Gegeninduktivität in Bypassdiodenschleifen: } M_i = \frac{k_C \cdot M}{R_R} \quad (3)$$

Dabei ist R_R der Rahmen-Reduktionsfaktor: 2,5 – 6 für gerahmte, 1 für andere Module.

Um den induzierten Strom zu berechnen, wird auch die Selbstinduktivität der Bypassdiodenschleife benötigt. Die Induktivität von Bypassdiodenschleifen in normalen kristallinen Modulen berechnet sich näherungsweise (L_S in μH , l und b in m, Details in [3]):

$$\text{Bypassdioden-Schleifeninduktivität } L_S \approx 1,2 \cdot (l + 2 \cdot b) + 0,05 \quad (4)$$

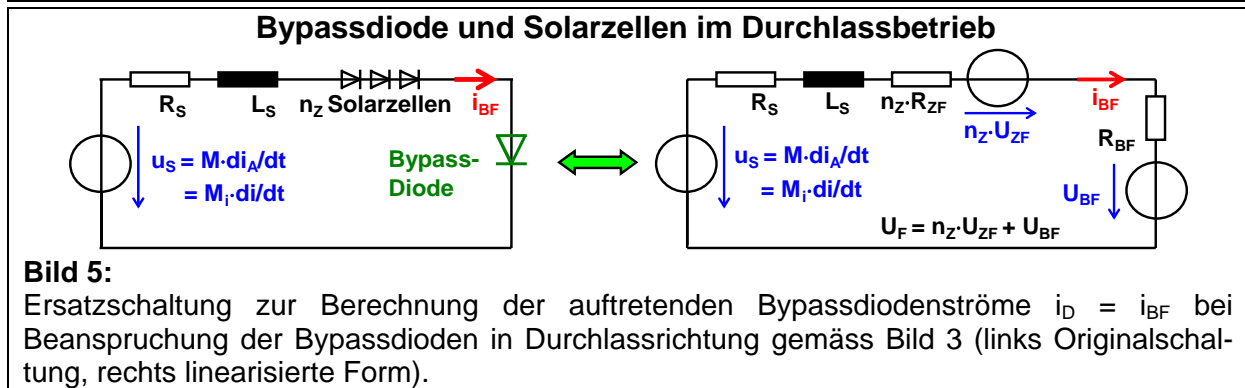
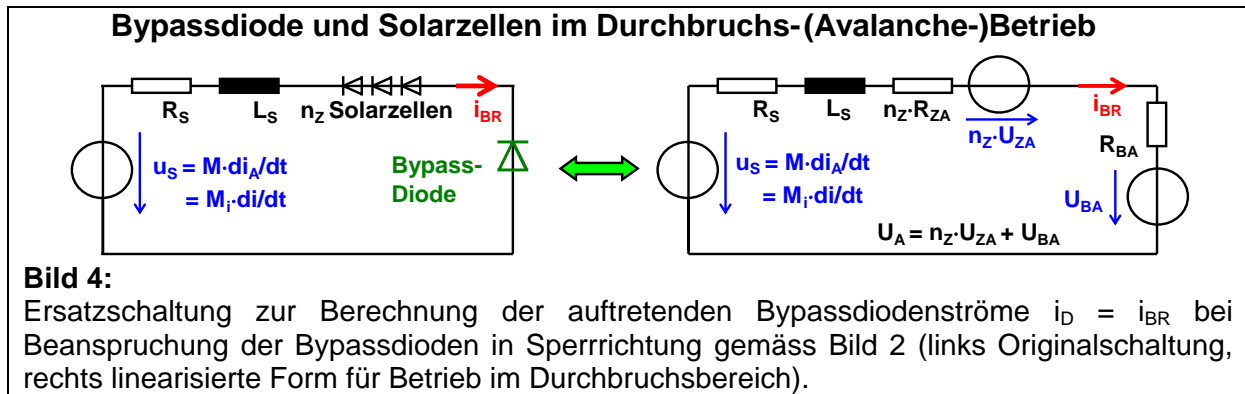
Typische Werte für die Schleifeninduktivität liegen etwa im Bereich 1 μH bis 3 μH .

Damit kann der resultierende Kurzschlussstrom i_{s0} in einer verlustlosen Leiterschleife (Schleifenwiderstand $R_S = 0$) berechnet werden:

$$\text{Induzierter KS-Strom in Schleife mit } R_S = 0: i_{s0} = \frac{M}{L_S \cdot R_R} i_A = \frac{M}{L_S \cdot R_R} k_C \cdot i = \frac{M_i}{L_S} i \quad (5)$$

Modelle für die Abschätzung von induzierten Spannungen und Strömen in Bypassdiodenschleifen

Mit zwei separaten linearisierten Ersatzschaltbildern für die Sperrrichtung (Bild 4) und die Durchlassrichtung (Bild 5) und der Laplace-Transformation kann eine grobe Abschätzung für auftretenden Ströme, Spannungen und Energien gemacht werden. Die verwendete Methode wird in [3] noch ausführlicher behandelt. Die prinzipielle Korrektheit dieser Modelle und Berechnungen konnte auch in Versuchen mit unserem Stossstromgenerator im Hochspannungslabor der BFH gezeigt werden.



Für einen Blitzstrom ist folgende mathematische Näherung zweckmässig:

$$i(t) = I \left(e^{-\sigma_1 t} - e^{-\sigma_2 t} \right) \quad (\sigma_2 \gg \sigma_1) \quad (6)$$

Mit Hilfe der Laplace-Transformation erhält man (Details siehe [3]):

$$i_D(t) = \frac{M_i \cdot I}{L_S} \left[\frac{\sigma_1 \cdot e^{-\sigma_1 t}}{(\sigma_1 - \sigma_3)} + \frac{\sigma_2 \cdot e^{-\sigma_2 t}}{(\sigma_3 - \sigma_2)} + \frac{\sigma_3 \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot e^{-\sigma_3 t}}{(\sigma_1 - \sigma_3)(\sigma_2 - \sigma_3)} \right] - \frac{U_{tot}(1 - e^{-\sigma_3 t})}{L_S \cdot \sigma_3} \quad (7)$$

wobei $i_D(t)$ = Diodenstrom allgemein (i_{BR} oder i_{BF} je nach dem betrachteten Fall)
und $U_{tot} = U_A$ oder U_F (je nach dem betrachteten Fall) und $\sigma_3 = R_{tot}/L_S$
(R_{tot} = Summe aller Widerstände in der Bypassdiodenschleife mit der Induktivität L_S).

Als Beispiel wird eine Bypassdiodenschleife mit $n_z = 18$ Solarzellen und einer Schleifeninduktivität $L_S = 2 \mu\text{H}$ untersucht.

Für den Betrieb im Durchbruchsbereich wird für jede Solarzellendiode eine Durchbruchspannung $U_{ZA} = 20 \text{ V}$ und ein Widerstand $R_{ZA} = 5 \text{ m}\Omega$, für die Bypassdiode dagegen eine Durchbruchspannung $U_{BA} = 70 \text{ V}$ und ein Widerstand $R_{ZA} = 50 \text{ m}\Omega$ angenommen. Damit ergibt sich $U_{\text{tot}} = U_A = 430 \text{ V}$ und $R_{\text{tot}} = 140 \text{ m}\Omega$. Bild 6 und 7 zeigen die damit mit (7) berechneten Bypassdioden-Rückströme i_{BR} , die sich bei einer Überbeanspruchung der Bypassdiode in Sperrrichtung in der Front eines Blitzstroms für typische Werte von M_i von 10 nH, 20 nH, 40 nH und 80 nH ergeben.

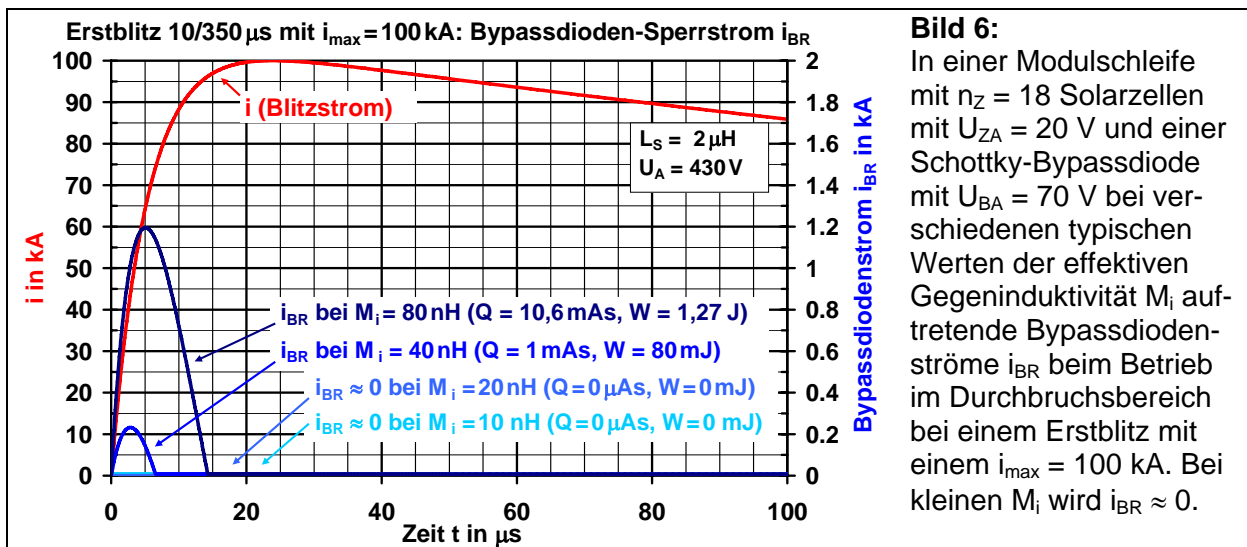


Bild 6: In einer Modulschleife mit $n_z = 18$ Solarzellen mit $U_{ZA} = 20 \text{ V}$ und einer Schottky-Bypassdiode mit $U_{BA} = 70 \text{ V}$ bei verschiedenen typischen Werten der effektiven Gegeninduktivität M_i auftretende Bypassdiodenströme i_{BR} beim Betrieb im Durchbruchsbereich bei einem Erstblitz mit einem $i_{\text{max}} = 100 \text{ kA}$. Bei kleinen M_i wird $i_{BR} \approx 0$.

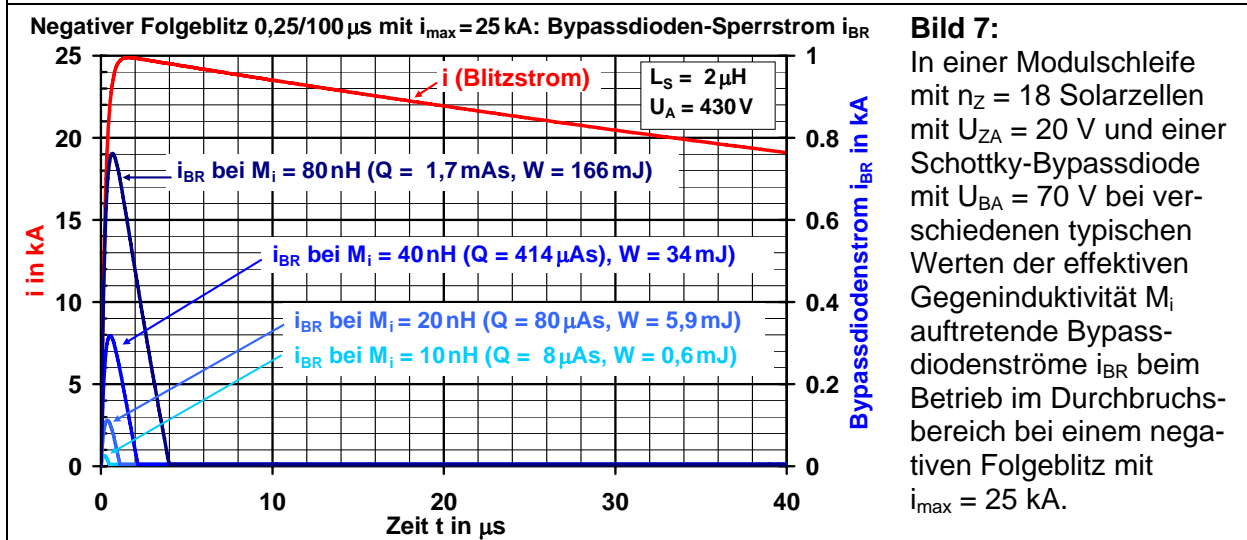
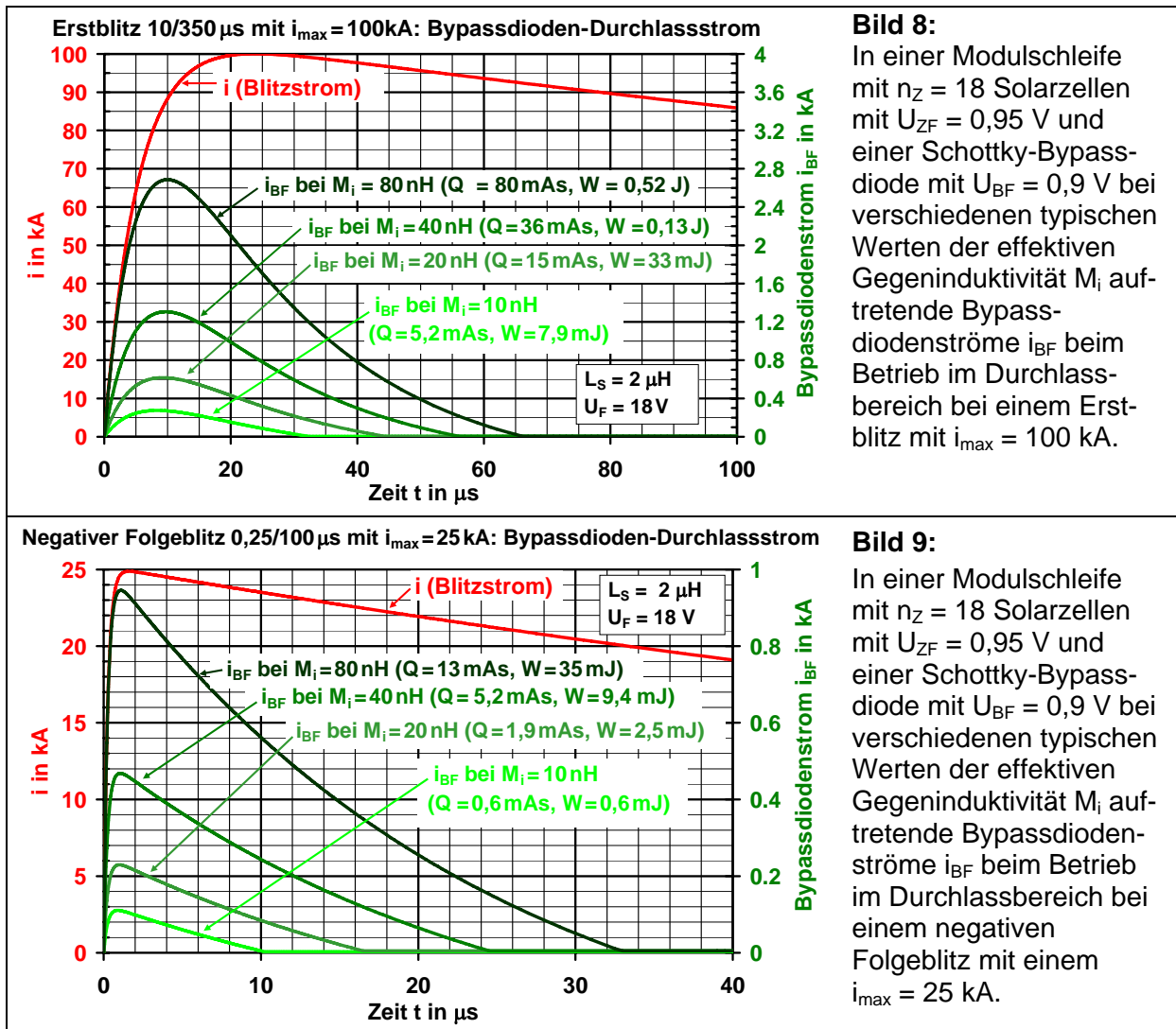


Bild 7: In einer Modulschleife mit $n_z = 18$ Solarzellen mit $U_{ZA} = 20 \text{ V}$ und einer Schottky-Bypassdiode mit $U_{BA} = 70 \text{ V}$ bei verschiedenen typischen Werten der effektiven Gegeninduktivität M_i auftretende Bypassdiodenströme i_{BR} beim Betrieb im Durchbruchsbereich bei einem negativen Folgeblitz mit $i_{\text{max}} = 25 \text{ kA}$.

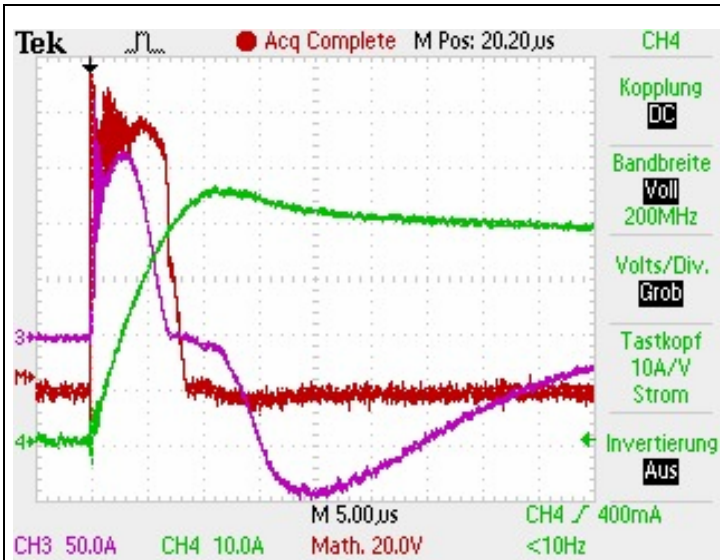
Wird im gleichen Beispiel die Beanspruchung in Durchlassrichtung untersucht, resultieren für U_{tot} und R_{tot} wesentlich kleinere Werte. Für die Solarzellendioden können $U_{ZF} = 0,95 \text{ V}$ und $R_{ZA} = 4 \text{ m}\Omega$, für die Bypassdiode $U_{BF} = 0,9 \text{ V}$ und $R_{BF} = 3 \text{ m}\Omega$ angenommen werden, womit sich ein $U_{\text{tot}} = U_F = 18 \text{ V}$ und ein $R_{\text{tot}} = 75 \text{ m}\Omega$ ergibt. Bild 8 und Bild 9 zeigen die mit diesen Werten berechneten Bypassdioden-Vorwärtsströme i_{BF} , die sich in der Front eines Blitzstroms für typische Werte von M_i von 10 nH, 20 nH, 40 nH und 80 nH ergeben.



Praktische Messungen im Hochspannungslabor

Für die praktischen Versuche im Hochspannungslabor der BFH wurde der bestehende und für die ersten Versuche in [3] und [4] verwendete Stossstromgenerator so umgebaut, dass auch Stossströme mit annähernd Normkurvenform 10/350 μ s erzeugt werden können. Die damit im Labor erzeugbaren Stossströme haben aber prinzipbedingt kurz nach dem Erreichen des Maximalwerts einen kleinen Bereich, in dem sie eine negative Rückensteilheit von (betragsmässig) noch etwa 7% der maximalen Steilheit in der Front des Stossstroms aufweisen, so dass kurzzeitig eine gegenüber einem Normstoss etwas zu hohe negative induzierte Spannung entsteht, was immer noch eine gewisse Verfälschung der Messergebnisse zur Folge hat, denn die Bypassdiode und die Solarzellendioden erfahren so kurz nach der Hauptbeanspruchung noch eine (allerdings deutlich mildere) Beanspruchung in der Gegenrichtung. Mit diesem Stossstromgenerator wurden einige Messungen mit einem rahmenlosen Modul KC60 in Parallelposition durchgeführt (wie in Bild 1, Länge der Bypassdiodenschleife $l \approx 71$ cm, Breite der Bypassdiodenschleife $b \approx 15,5$ cm).

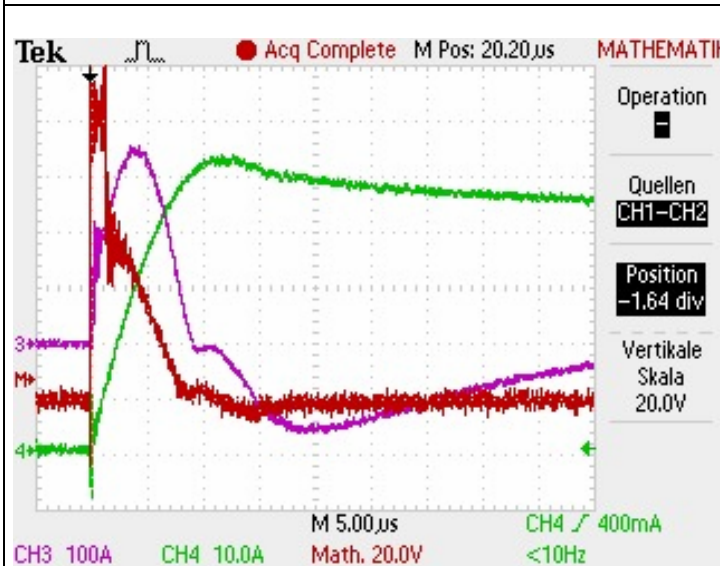
Die Bilder 10 und 11 zeigen zwei Tests, bei denen die Solarzellen und die Bypassdiode (eine 80SQ045, $U_{RRM} = 45\text{ V}$) in Sperrichtung beansprucht wurden und dabei kurzzeitig in den Durchbruchs-(Avalanche-)Betrieb gerieten. In der Front des Blitzstroms ist der Strom dank der Spannungsabfälle an den im Avalanche-Betrieb arbeitenden Dioden trotz der hohen induzierten Spannung noch relativ klein. In Bild 10 überlebte die Diode gerade noch, in Bild 11 wurde sie dagegen zerstört.



In diesem Fall überlebt die Diode gerade noch!

Bild 10:

Bypassdioden-(Avalanche-)Rückstrom i_{BR} in Modulschleife mit $n_z = 18$ Solarzellen in einem Modul KC60 in Parallelposition (wie in Bild 2, Details siehe [3]) bei $d_{S1} = 15\text{ cm}$ ($M_i \approx 100\text{ nH}$, $L_S \approx 1,5\text{ }\mu\text{H}$ inkl. Zu-leitung zum Messshunt) von einem Blitzstrom (grün, in kA statt A!) mit $i_{max} \approx 46\text{ kA}$ und $di/dt_{max} \approx 8\text{ kA}/\mu\text{s}$. Im Avalanchebetrieb wird die Spannung (rot) während $\approx 7\text{ }\mu\text{s}$ auf $\approx 90\text{ V}$ begrenzt, der Spitzenwert des Sperrstroms (violett) ist $\approx 160\text{ A}$. Im Rücken des Blitzstroms werden Bypassdiode und Solarzellendioden auch noch etwas in Vorwärtsrichtung beansprucht und es fließt ein gewisser Durchlassstrom.



In diesem Fall wird die Diode zerstört!

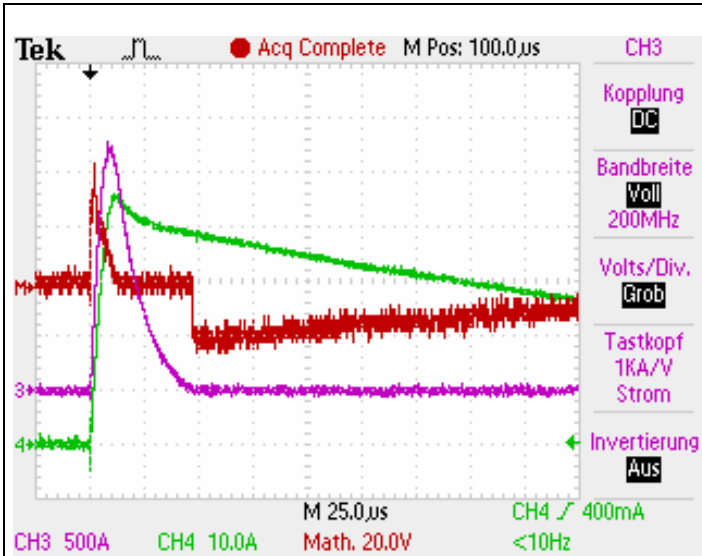
Bild 11:

Bypassdioden-(Avalanche-) Rückstrom i_{BR} in Modulschleife mit $n_z = 18$ Solarzellen in einem Modul KC60 in Parallelposition (wie in Bild 2, Details siehe [3]) bei $d_{S1} = 15\text{ cm}$ ($M_i \approx 100\text{ nH}$, $L_S \approx 1,5\text{ }\mu\text{H}$ inkl. Zu-leitung zum Messshunt) von einem Blitzstrom (grün, in kA statt A!) mit $i_{max} \approx 54\text{ kA}$ und $di/dt_{max} \approx 9,2\text{ kA}/\mu\text{s}$. In diesem Fall fällt die Diode nach etwa $1,5\text{ }\mu\text{s}$ aus. Die Spannung über ihr (rot) fällt von zunächst $\approx 100\text{ V}$ immer mehr zusammen und der Spitzenwert des Sperrstroms (violett) steigt auf etwa 350 A . Im Rücken des Blitzstroms werden Bypassdiode und Solarzellendioden auch noch etwas in Vorwärtsrichtung beansprucht (wie in Bild 10).

Wird berücksichtigt, dass die beim Test verwendete Strom-Anfangsteilheit di/dt knapp die Hälfte der Anfangsteilheit von Bild 6 beträgt, dass hier somit für die gleiche induzierte Spannung gut der doppelte Wert von M_i notwendig ist, stimmt der in der Front des Blitzstroms in der Bypassdiodenschleife (totale Schleifeninduktivität

$L_S \approx 1,5 \mu\text{H}$) gemessene Strom recht gut mit der für $M_i = 40 \text{ nH}$ in Bild 6 gezeigten Stromkurvenform überein.

Die Bilder 12 und 13 zeigen zwei Tests, bei denen die Solarzellen und die Bypassdiode in Durchlassrichtung beansprucht wurden. In der Front des Blitzstroms werden die Diodenströme wegen der geringen Spannungsabfälle an den Dioden nun viel grösser. In Bild 12 überlebte die Diode gerade noch, in Bild 13 wurde sie dagegen zerstört. Die Kurvenform des in der Bypassdiodenschleife gemessenen Stromes stimmt relativ gut mit den berechneten Stromkurvenformen überein (siehe Bild 8).

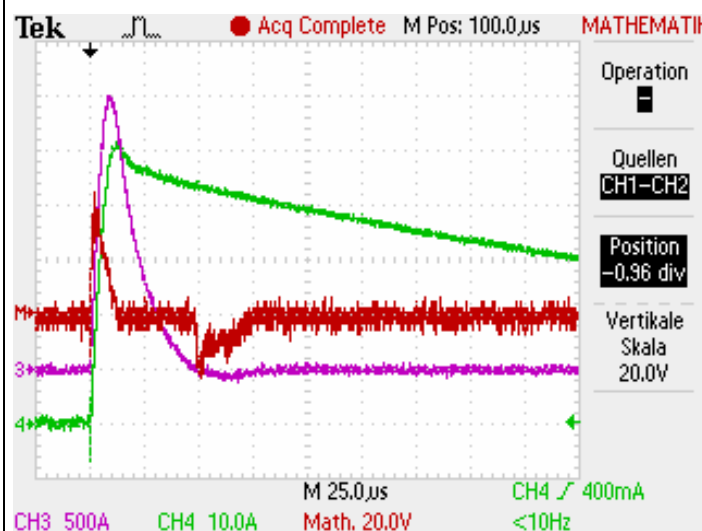


In diesem Fall überlebt die Diode gerade noch!

Bild 12:

Bypassdioden-Vorwärtsstrom i_{BF} in Modulschleife mit $n_Z = 18$ Solarzellen in einem Modul KC60 in Parallelposition (wie in Bild 3), bei $d_{S1} = 15 \text{ cm}$ ($M_i \approx 100 \text{ nH}$, $L_S \approx 1,5 \mu\text{H}$ inkl. Zu- leitung zum Messshunt) von einem Blitzstrom (grün, in kA statt A!) mit $i_{\text{max}} \approx 46 \text{ kA}$ und $di/dt_{\text{max}} \approx 8 \text{ kA}/\mu\text{s}$. Verwendete Bypassdiode: 80SQ045 ($U_{RRM} = 45 \text{ V}$).

Im Vorwärtsbetrieb entsteht eine Restspannung (rot, vermutlich wegen des hohen di/dt eingestreut) von max. etwa 30V. Der Strom (violett), der eine ähnliche Form wie in Bild 8 hat, erreicht einen Spitzenwert von etwa 2,3 kA. Im Rücken des Blitzstroms werden Bypassdiode und Solarzellendioden auch noch etwas in Sperrrichtung beansprucht.



In diesem Fall wird die Diode zerstört!

Bild 13:

Bypassdioden-Vorwärtsstrom i_{BF} in Modulschleife mit $n_Z = 18$ Solarzellen in einem Modul KC60 in Parallelposition (wie in Bild 3) bei $d_{S1} = 15 \text{ cm}$ ($M_i \approx 100 \text{ nH}$, $L_S \approx 1,5 \mu\text{H}$ inkl. Zu- leitung zum Messshunt) von einem Blitzstrom (grün, in kA statt A!) mit $i_{\text{max}} \approx 50 \text{ kA}$ und $di/dt_{\text{max}} \approx 8,6 \text{ kA}/\mu\text{s}$. Verwendete Bypassdiode: 80SQ045 ($U_{RRM} = 45 \text{ V}$).

Im Vorwärtsbetrieb entsteht wieder eine Restspannung (rot). Der Strom (violett) erreicht bereits einen Spitzenwert von etwa 2,5 kA. Die zerstörte Bypassdiode (\approx Kurzschluss) hat im Rücken des Blitzstroms keine Sperrfähigkeit mehr, die wegen des leicht negativen di/dt induzierte Restspannung wird kurzgeschlossen.

Schlussbemerkungen

Mit der dargestellten Methode ist es erstmals möglich, eine grobe Abschätzung für die elektrische Beanspruchung von Bypassdioden in Solarmodulen zu erhalten, die dem magnetischen Feld von in der Nähe fliessenden Blitzströmen ausgesetzt sind.

Auf Grund dieser ersten Untersuchungen ist zu vermuten, dass für Werte der effektiven Gegeninduktivität $M_i \leq 20$ nH bei Beanspruchungen gemäss Blitzschutzklasse III und IV in der Regel keine Schäden auftreten dürften [3], [4]. Es ist geplant, diese Versuche im kommenden Jahr mit verschiedenen anderen Diodentypen und an einigen Modulen mit der heute üblichen Modul-Standardgrössen im Bereich 160 cm·80 cm bis etwa 200 cm·100 cm fortzusetzen, sofern solche Module von interessierten Herstellern zur Verfügung gestellt werden.

Verdankungen

Die dargestellten Arbeiten wurden im Rahmen der BFE-Projekte "Photovoltaik-Systemtechnik 2005 bis 2006" und "Photovoltaik-Systemtechnik 2007 bis 2010" durchgeführt. Diese Projekte wurden ausser vom Bundesamt für Energie auch von der Gesellschaft Mont Soleil, der Localnet AG, Burgdorf und der Elektra Baselland unterstützt. All diesen Institutionen gebührt Dank für ihren wertvollen Beitrag.

Literatur

- [1] H. Häberlin, R. Fischer und R. Minkner: "Von simulierten Blitzströmen in Solarmodulen und Solargeneratoren induzierte Spannungen". 16. Symposium PV-Solarenergie, Staffelstein, 2001.
- [2] H. Schmidt, B. Burger und H. Häberlin: "Überspannungsfestigkeit von Bypassdioden – Ergebnisse einer vergleichenden Untersuchung". 22. Symposium PV-Solarenergie, Staffelstein, 2007.
- [3] H. Häberlin: "Photovoltaik – Strom aus Sonnenlicht für Verbundnetz und Inselanlagen". AZ Fachverlage AG, CH-5001 Aarau, 2007, ISBN 978-3-905214-53-6 und VDE-Verlag, Berlin, 2007, ISBN 978-3-8007-3003-2.
- [4] H. Häberlin: "Damages at Bypass Diodes by Induced Voltages and Currents in PV Modules Caused by Nearby Lightning Currents". 22. EU PV Conf., Milano, 2007.

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

An English paper about this topic is available under [4] (consult www.pvtest.ch).