



Gefährdung der Feuerwehr beim Löschangriff an PV-Anlagen bei Mond- und Kunstlicht

Prof. Dr. Heinrich Häberlin

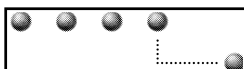
**Berner Fachhochschule, Technik und Informatik (BFH-TI)
Abteilung Elektrotechnik
Photovoltaiklabor
Jlcoweg 1**

CH-3400 Burgdorf, SCHWEIZ

**Tel: +41 34 426 6811, Fax: +41 34 426 6813,
e-Mail: heinrich.haeberlin@bfh.ch**

Internet: www.pvtest.ch

01



Inhaltsverzeichnis

- 1. Einführung**
- 2. Überlegungen zur effektiven elektrischen Gefährdung**
- 3. Gefahr durch Restlicht in der Nacht**
 - 3.1 Situation bei Mondlicht**
 - 3.2 Situation bei künstlicher Beleuchtung**
 - 3.3 Gefahr durch Eingangskondensator von Wechselrichtern**
- 4. Technische Möglichkeiten zur Spannungsreduktion
beim Feuerwehreinsatz**
 - 4.1 Spannung U_L am Eingangskondensator C_E und evtl.
auf DC-Leitung**
 - 4.2 Feuerweherschalter in Serieschaltung**
- 5. Situation beim Feuerwehreinsatz**
- 6. Schlussfolgerungen**

02

1. Einführung

- **Kürzliche Schlagzeilen: Nicht abschaltbare PV Anlagen stellen eine Lebensgefahr für die Feuerwehrleute dar.**
- **Deshalb wage die Feuerwehr nicht mehr, brennende Gebäude mit PV-Anlagen zu löschen.**
- **Dies ist übertrieben und basiert auf einem mangelnden Verständnis der Eigenschaften von PV-Anlagen.**
- **In diesem Beitrag werden wichtige Informationen zur realistischen Beurteilung dieser Gefahren dargestellt.**
- **Es werden auch Möglichkeiten für die Reduktion dieser Gefahren und die resultierenden Konsequenzen für den Betrieb von PV-Anlagen diskutiert.**

03

2. Grundsätzliche Überlegungen zur effektiven elektrischen Gefährdung

- **Bei Niederspannung (AC: $U \leq 1000 \text{ V}$, DC: $U \leq 1500 \text{ V}$) ist die Ursache für tödliche Unfälle nicht die Spannung an sich, sondern der durch das Herz fließende Strom (Auslösung von Herzkammerflimmern beim Überschreiten gewisser Grenzwerte [IEC/TS 60479]).**
- **Ströme unter diesen Limiten können schon unwillkürliche Muskelkontraktionen auslösen. Bei AC können Muskelkrämpfe ein Loslassen des berührten Leiters verhindern.**
- **DC ist aber um einen Faktor 4 bis 5 weniger gefährlich als Wechselstrom und verhindert das Loslassen nicht.**
- **Deshalb ist die Gefahr von DC von 1kV etwa vergleichbar mit der Gefahr durch 230V AC.**

04

Für Feuerwehreinsatz: Grenzwerte für dauernde Berührung:

Grenzwerte für Gefährdung durch elektrische Dauerströme
(IEC 60479-1, Strom unten → oben (Füsse zu linker Hand))

	AC	DC
Bereich 1	< 0,5 mA	< 2 mA
Bereich 2	0,5 - 5 mA	2 - 25 mA
Bereich 3	5 - 35 mA	25 - 150 mA
Bereich 4	> 35 mA	> 150 mA

Bereich 1: Bemerkbarkeit bereits möglich, keine körperliche Reaktion

Bereich 2: Muskelkontraktionen möglich beim Berühren + Loslassen

Bereich 3: Starke unwillkürliche Muskelreaktionen möglich

Bereich 4: Mit steigendem Strom Herzkammerflimmern möglich

Bei umgekehrter DC-Stromrichtung etwa doppelte Werte zulässig!

Bei anderen Strompfaden auch noch höhere Ströme möglich

05

Abschätzung des Widerstandes des Löschwasserstrahls:

Generelle FW-Vorschrift bei AC-Niederspannung $\leq 1\text{kV}$:

Abstand $\geq 5\text{m}$ bei Vollstrahl, $\geq 1\text{m}$ bei Sprühstrahl.

Da dabei der Bereich 3 nicht überschritten werden darf:

⇒ Widerstand R_W des Wasserstrahls:

$$R_W \geq \frac{1\text{ kV}}{35\text{ mA}} \approx 30\text{ k}\Omega, \text{ resp. besser } R_W \geq \frac{1\text{ kV}}{5\text{ mA}} \approx 200\text{ k}\Omega$$

Diese Werte sind Minimalwerte für eine erste Abschätzung des beim Löschen von PV-Anlagen mit Wasser maximal fließenden Körperstroms. Sie sind auch in den gemessenen Kennlinien (Folien 11 – 13) eingetragen.

Genauere Resultate siehe Versuche des TÜV mit der Feuerwehr Köln (Vortrag von Herrn Horst Thiem 26.1.2012)

06

3. Gefahr durch Restlicht in der Nacht

- Einige Leute behaupten, dass an PV-Generatoren bereits bei sehr schwacher Beleuchtung (z.B. im Vollmondlicht!) lebensgefährliche Spannungen auftreten können.
- Dies ist Unsinn! **PV Generatoren** sind keine Spannungsquellen, sondern **Stromquellen** (Strom proportional zur Bestrahlungsstärke)!
- **Bei schwacher Beleuchtung** kann der Strom trotz einer möglicherweise bereits beträchtlichen Spannung kaum gefährliche Werte erreichen und bricht bei Belastung rasch zusammen.

07

3.1 Situation bei Vollmond

- Das Licht des Vollmondes ist mehr als 100'000 mal schwächer als das volle Sonnenlicht \Rightarrow **Durch Vollmondlicht allein kann kein gefährlicher Strom erreicht werden!**
- Experimente haben gezeigt, dass im Licht des Vollmonds **U_{OC} typisch unter 2% von U_{OC-STC} und I_{SC} typisch unter 0,0002% von I_{SC-STC} ist.**

Messungen an 4 verschiedenen Strängen einer PV-Inselanlage:

\approx Vollmond bei PV-Anlage (pro Strang 2 Module M50 in Serie, $\beta = 60^\circ$)
(2 M50 (je 33 Zellen) in Serie, bei STC: U_{OC} 19,9/39,8 V, I_{SC} 3,4A)

	U_{OC} [mV]	I_{SC} [μ A]	I_{SC}/I_{SC-stc} in %	U_{OC}/U_{OC-stc} in %
Maximum	387	5.12	0.000151	1.0
Minimum	166	4.5	0.000132	0.4

08

3.2 Situation bei künstlicher Beleuchtung

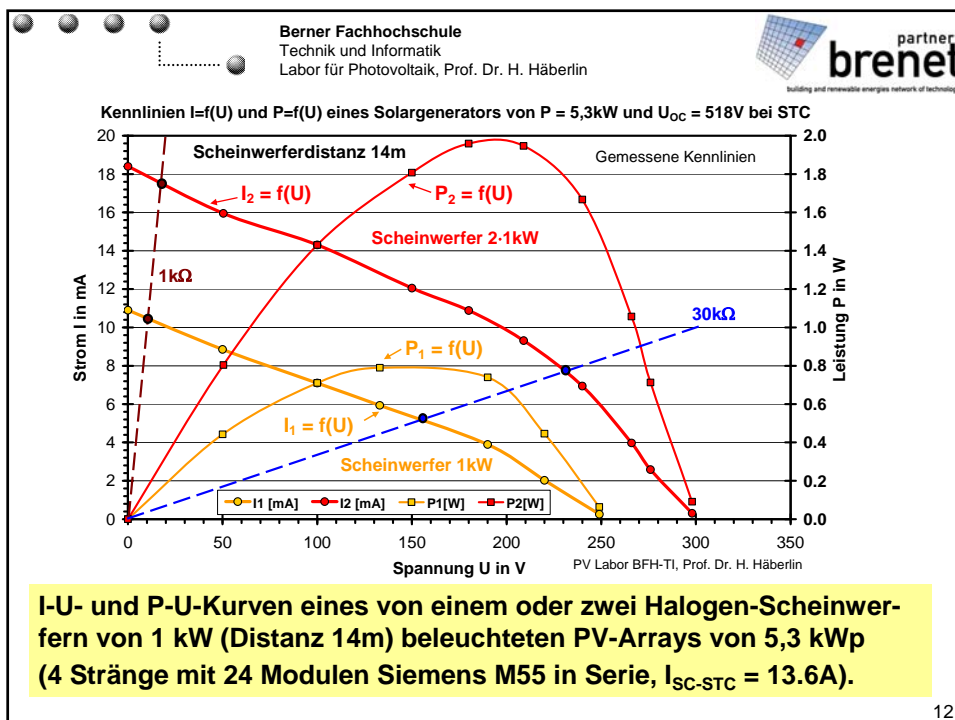
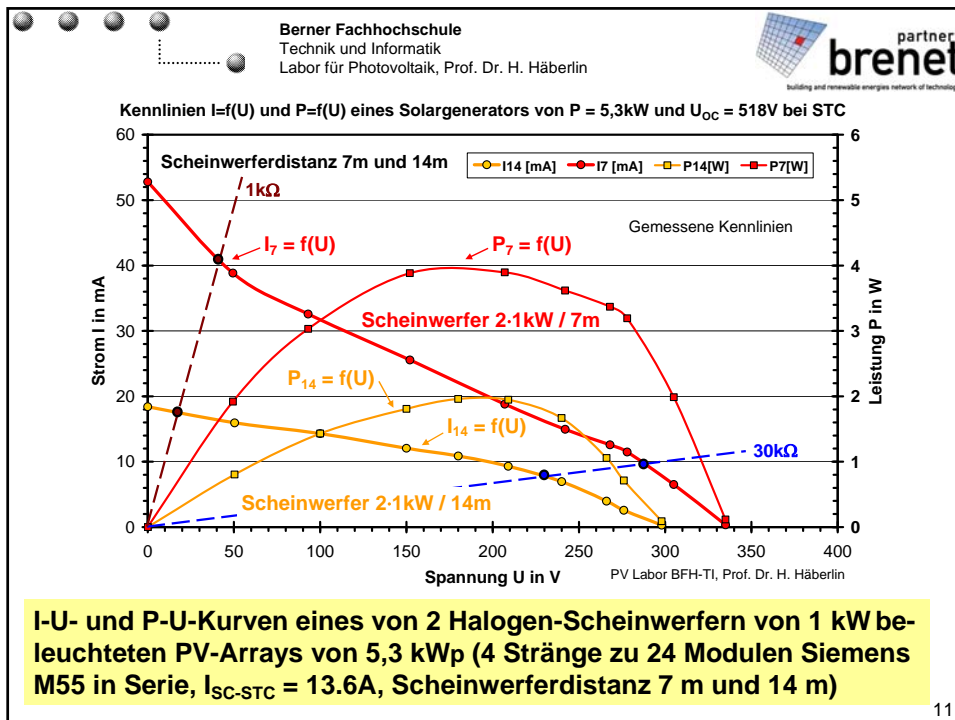
- In der Nacht sind im Licht von Scheinwerfern höhere Einstrahlungen möglich
- Diese Werte sind aber immer noch viel kleiner als am Tag und *nicht gleichmässig über die ganze Anlage verteilt.*
- Deshalb ist der mögliche Kurzschlussstrom I_{SC} aus dem PV- Generator selbst immer noch viel kleiner als I_{SC-STC} .
- In einer Serieschaltung von PV Modulen unter Kunstlicht weicht die I-U-Kennlinie wegen der ungleichmässigen Einstrahlung deutlich vom normalen Verlauf ab und ähnelt dem einer Spannungsquelle mit sehr hohem Innenwiderstand.

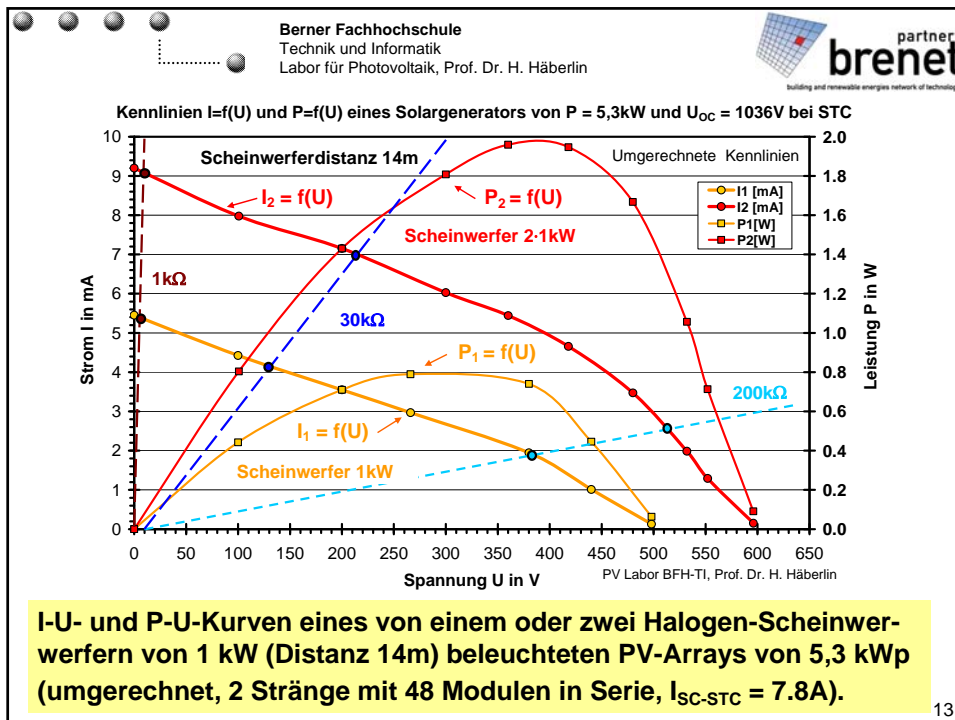
09



Situation bei Beleuchtung des PV-Generators der Teilanlage West der BFH-TI durch 2 Scheinwerfer von je 1 kW am 27.10.2010 im Abstand von wenigen Metern durch die Feuerwehr Burgdorf. Die vorderen Module werden relativ stark (mit bis 150 Lux) bestrahlt, die weiter entfernten Module viel schwächer.

10





Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet
building and renewable energies network of technology

Fazit aus diesen Experimenten mit Scheinwerfern:

- Die Beleuchtung eines Scheinwerfers ist proportional zur Leistung und umgekehrt proportional zum Quadrat der Distanz.
- Basierend auf den gezeigten Messungen mit der Feuerwehr (an Anlagegrößen typisch für Einfamilienhäuser) kann gefolgert werden, dass in der Nacht bei künstlicher Beleuchtung eines Schadenplatzes bei Einhaltung eines gewissen Minimalabstandes (z.B. 12m für einen Scheinwerfer von 1kW und 17m für einen Scheinwerfer von 2kW) die höchste mögliche **Leerlaufspannung $U_{OC} \leq 60\%$ von U_{OC-STC}** und der höchste mögliche **Kurzschlussstrom $I_{SC} \leq 0.1\%$ von I_{SC-STC} sein wird.**
- Für grössere PV-Generatoren ist es nicht möglich, eine genügend homogene Einstrahlung in die Generatorebene zu produzieren. Deshalb nimmt die Gefahr bei weitem nicht proportional zur installierten PV-Leistung zu.

14

- Von einem nächtlich durch Scheinwerfer beleuchteten PV-Generator allein (**ohne Verbindung mit einem Wechselrichter!**) geht somit nur eine sehr geringe Gefahr aus. Auch die möglichen Ströme sind so klein, dass eine Zündung und Aufrechterhaltung von allfälligen Lichtbögen kaum denkbar ist.

3.3 Gefahr durch Eingangskondensator von Wechselrichtern

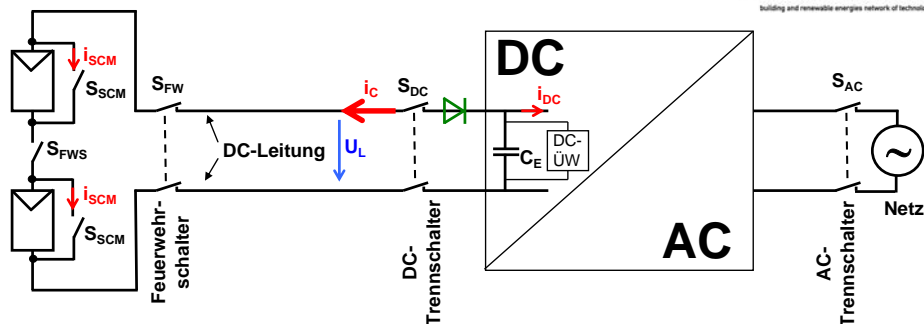
- In einer noch verschalteten PV-Anlage kann sich der Eingangskondensator des Wechselrichters auf eine gewisse Spannung aufladen (Details siehe folgende Folien).
- Dieser Kondensator kann unter ungünstigen Umständen bei Berührung defekter Leitungen noch während kurzer Zeit gefährliche Stossströme abgeben.
- Bei geringer Einstrahlung liegt diese Spannung aber wegen der Belastung durch die DC-seitige Eingangsschaltung des Wechselrichters aber noch unter der durch die sehr geringe Einstrahlung reduzierten Leerlaufspannung des PV-Generators.

4. Technische Möglichkeiten zur Spannungsreduktion beim Feuerwehreinsatz

- In einer im Betrieb stehenden PV-Anlage (mit geschlossenem DC-Trennschalter am Wechselrichter-Eingang) befindet sich in den meisten Fällen direkt an den Eingangsklemmen ein Eingangskondensator C_E (bis einige 100 μF bei dreiphasigen, bis einige 1000 μF bei einphasigen Geräten).

- **Dieser Eingangskondensator C_E wird auf die Betriebsspannung aufgeladen!**

17



Prinzipschema einer PV-Anlage mit verschiedenen Möglichkeiten zur Spannungsreduktion bei Bränden. Parallel zum Eingangskondensator C_E ist in den meisten Fällen eine Eingangsüberwachungsschaltung (DC-ÜW).

Mit diesem Schema kann auch der Einfluss von C_E auf die Situation auf der DC-Leitung untersucht werden.

18

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet
building and renewable energies network of technology

Das Öffnen des DC-Trennschalters S_{DC} unterbricht den Strom auf der DC-Seite, löscht potenzielle Serienlichtbögen und trennt C_E von der DC-Leitung.

Auf der DC-Leitung ist jedoch immer noch eine Spannung (und unter Last auch ein Strom) gemäss der I-U-Kennlinie gemäss der aktuellen Einstrahlung vorhanden. Wie bereits erwähnt, sind die Ströme im Scheinwerferlicht in der Nacht sehr tief.

19

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet
building and renewable energies network of technology

Wird die DC-Seite durch einen seriellen Feuerwehrscharter S_{FW} beim PV-Generator abgeschaltet, sind zwischen dem PV-Generator und S_{FW} die gleichen U und I wie vorher vorhanden.

Durch Öffnen von zusätzlichen Schaltern S_{FWS} in den Strängen ist es möglich, die Spannung in jedem Teilstrang auf $< 120\text{ V}$ zu reduzieren.

20

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet
building and renewable energies network of technology

offen geschlossen

i_{sCM} S_{SCM} S_{FW} S_{FWS} S_{SCM} i_{sCM}

DC-Leitung U_L i_c S_{DC} i_{DC} C_E DC-ÜW

Feuerwehrschalter DC-Trennschalter AC-Trennschalter S_{AC} Netz

DC AC

- Ist aber S_{DC} geschlossen und keine Diode (grün) am Wechselrichtereingang, ist auf der DC-Leitung auf der Wechselrichterseite von S_{FW} immer noch die Spannung auf C_E vorhanden.
- Nach Öffnen von S_{FW} und/oder S_{FWS} entlädt die DC-Eingangsüberwachungsschaltung DC-ÜW langsam C_E . Deshalb ist auf der DC-Leitung während einigen Sekunden bis Minuten noch eine langsam abnehmende Spannung U_L vorhanden.

21

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet
building and renewable energies network of technology

offen

i_{sCM} S_{SCM} S_{FW} S_{FWS} S_{SCM} i_{sCM}

DC-Leitung U_L i_c S_{DC} i_{DC} C_E DC-ÜW

Feuerwehrschalter DC-Trennschalter AC-Trennschalter S_{AC} Netz

DC AC

- Es gibt auch eine technische Lösung für dieses Problem: Mit einer Diode am Eingang (oder wenn S_{DC} oder ein Wechselrichter-Eingangrelais gleichzeitig öffnet) fällt die Spannung U_L auf der DC-Leitung nach dem Öffnen von S_{FW} sofort auf 0.

22

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet
building and renewable energies network of technology

geschlossenen geschlossenen

i_{SC} S_{SCM} S_{FW} S_{DC} i_C S_{DC} i_{DC} S_{AC}

Feuerwehrschalter DC-Leitung U_L DC-Trennschalter DC-ÜW C_E AC-Trennschalter Netz

DC

AC

- Im Brandfall oder bei einer andern Katastrophe wollen einige Hersteller die **Module mit Kurzschlusschaltern S_{SCM} direkt am Modul** kurzschliessen.
- Bei PV-Anlagen mit Wechselrichtern können diese Kurzschlusschalter S_{SCM} (besonders der zuletzt schliessende im Strang) **durch hohe Entlade-Stossströme i_C aus C_E** (und evtl. durch Rückströme von benachbarten, noch nicht kurzgeschlossenen Strängen **beschädigt werden. Abhilfe: Diode(n)!**

23

Berner Fachhochschule
Technik und Informatik
Labor für Photovoltaik, Prof. Dr. H. Häberlin

partner
brenet
building and renewable energies network of technology

4.1 Zeitabhängiges Verhalten der Spannung U_L am Eingangskondensator C_E (und evtl. auf DC-Leitung)

23-Nov-10
17:01:38

1 s 200 V

2 1 s 10.8 V

AC switch and switch S_{FB} off

1 s BWL

1 1 V DC 20m

2 10 V DC

3 50 mV AC

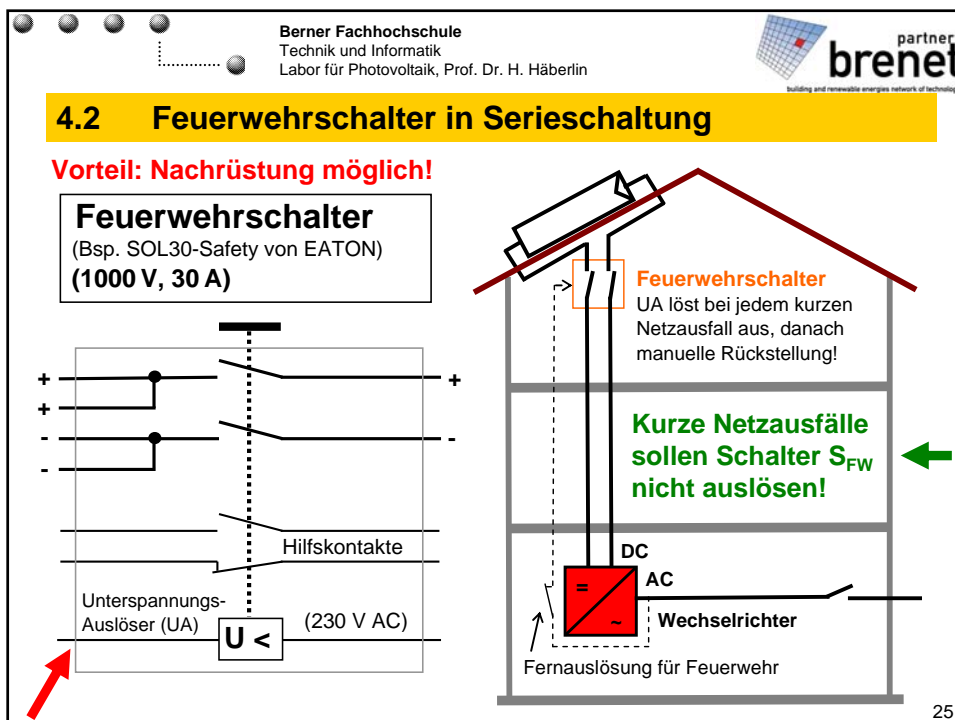
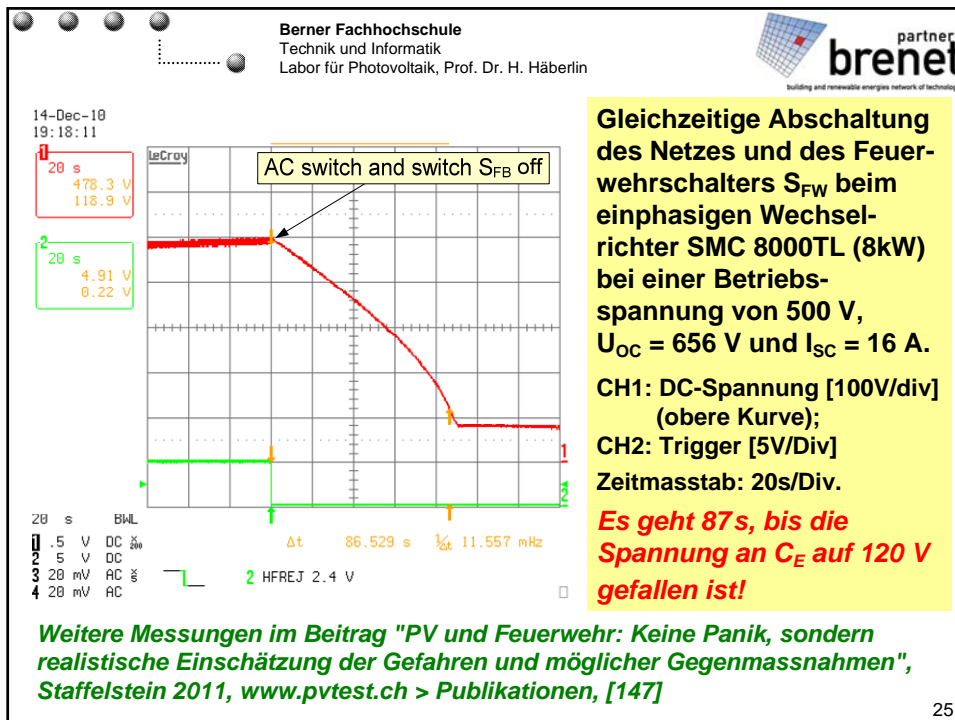
4 20 mV AC

2 DC 2.4 V

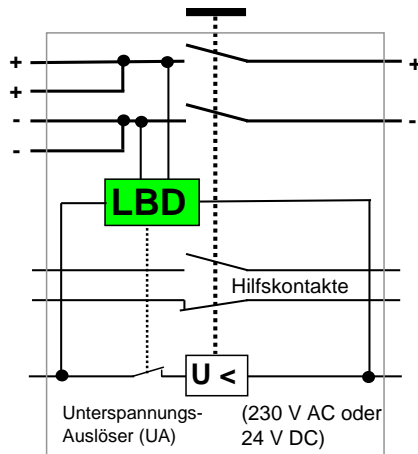
Gleichzeitige Abschaltung des Netzes und des Feuerwehrscharter S_{FW} beim dreiphasigen Wechselrichter SolarMax 15MT (15kW) bei einer Betriebsspannung von 650 V, $U_{OC} = 810$ V und $I_{SC} = 25$ A. CH1: DC-Spannung [200V/div] (obere Kurve); CH2: Trigger [10V/Div] Zeitmassstab: 1s/Div.

Es geht nur etwa 4.8s, bis die Spannung an C_E auf 120 V gefallen ist.

24



**Idee:
Feuerwehrscharter +
Lichtbogendetektor**



Eine gute Idee um die Sicherheit weiter zu erhöhen wäre die Kombination eines Feuerwehrscharters mit einem Lichtbogendetektor LBD!

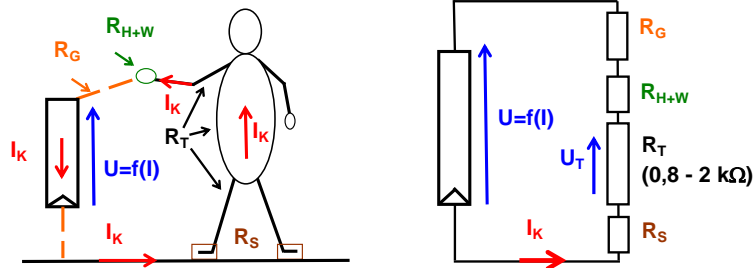
Nachrüstungen an bestehenden PV-Anlagen wären ebenfalls möglich.

27

Andere Lösungen wie Modul-Wechselrichter, Leistungsoptimierer und spezielle Modulüberwachungsgeräte wurden in einem Betrag zur 26. EU PV Konferenz in Hamburg 2011 kurz diskutiert (siehe www.pvtest.ch > Publikationen, [151]).

28

5 Situation beim Feuerwehreinsatz



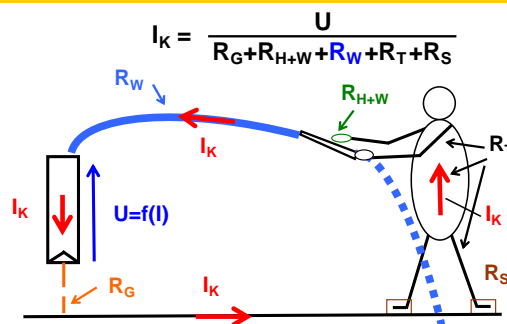
Steigt der Strom I in die Nähe des Kurzschluss-Stromes I_{SC} (prop. Bestrahlungsstärke G), bricht U rasch zusammen!

$$I_k = \frac{U}{R_G + R_{H+W} + R_T + R_S}$$

Feuerwehrlaute verfügen über eine effiziente Schutzausrüstung (Handschuhe, schwere Spezialschuhe). Zudem sind PV-Generatoren i.A. nicht direkt geerdet, sondern über einen relativ hochohmigen Widerstand. Auch der Wasserstrahl hat einen Zusatzwiderstand R_W (siehe nächste Folie).

29

Spezielle Situation beim Löschen mit Wasser:



R_W relativ gross (z.B. $> 200k\Omega$ bei vorschriftsgemäsem Abstand)

⇒ Auch bei Spannungen von bis 1000 V am Tag sollte kein gefährlicher DC-Strom fließen, wenn keine die Leitfähigkeit erhöhenden Löschmittelzusätze eingesetzt werden!

30

- Zusätzlich zum totalen Körperwiderstand R_T des Feuerwehrmanns sind weitere Widerstände (R_{H+W} , R_S , evtl. R_W) in Serie geschaltet, die den Körperstrom I_K limitieren.
- **Mit geeigneter Schutzkleidung, Verwendung isolierter Werkzeuge und korrektem Vorgehen sollte für die Feuerwehr bei PV-Anlagen auch am Tag bei Spannungen deutlich höher als 120 V keine wirkliche Gefahr auftreten.**
- Diskussionen mit verantwortlichen Offizieren der Berufsfeuerwehr Bern haben ergeben, dass diese oft ohne Abschaltung des 230V/400V-Netzes Brände bekämpfen, ohne dass eine spezielle Gefährdung der Feuerwehrleute auftritt.
- **Werden Brände bei Niederspannung bis 1 kV AC und 1,5 kV DC mit Wasser gelöscht und die empfohlenen Minimalabstände eingehalten (1 m mit Sprühstrahl, 5 m mit Vollstrahl), besteht gegenüber AC sogar noch eine zusätzliche Sicherheit!**

31

6. Schlussfolgerungen

- Mit den dargestellten Lösungen ist es im Prinzip möglich, die Sicherheit beim Feuerwehreinsatz zu erhöhen, **WENN bei einer Katastrophe (z.B. nach vielen Jahren oder sogar Jahrzehnten) die verwendete Technik noch wie vorgesehen funktioniert** (in der vom Feuer verursachten Hitze und trotz eventueller Schäden an der Schutztechnik selbst!).
- **Die Langzeit-Zuverlässigkeit könnte vor allem bei elektronischen Lösungen kritisch sein. Zudem beeinträchtigen viele Lösungen die Testbarkeit und Zuverlässigkeit.**
- Auch mit mechanischen Lösungen kann nicht garantiert werden, **ob ein durch Hitze beschädigter Feuerweerschalter alle elektrischen Leitungen unterbrechen kann** oder ob nicht noch restliche, zufällig entstandene Verbindungen bleiben.

32

Wichtiger Hinweis

Dieser Beitrag wurde auf Grund langjähriger Erfahrung auf dem Gebiet Photovoltaik-Systemtechnik unter Verwendung der verfügbaren Unterlagen über elektrische Sicherheit mit grosser Sorgfalt erarbeitet und stellt den aktuellen Stand des Wissens des Autors dar.

Dabei wurde auch die im Photovoltaiklabor verfügbare Literatur, Kontakte mit PV-Forschern in Deutschland, Handlungsempfehlungen von Feuerwehren beim Lösch-einsatz bei PV-Anlagen und Gespräche mit Verantwortlichen von Feuerwehren über die Einsatzpraxis berücksichtigt.

Eine Haftung für inhaltliche Richtigkeit und Eignung der Hinweise und Empfehlungen im Einsatzfall kann aber nicht übernommen werden.

33

ENDE

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

www.pvtest.ch

34