



Elektrische Sicherheit und Sicherheitsnormen für PV-Anlagen stellen eine besondere Herausforderung für Betreiber dar

## Photovoltaik-Anlagen sicher und effizient betreiben

Wie von jeder komplexen technischen Anlage können auch von einer PV-Anlage Gefahren ausgehen. Zusätzlich stellt eine PV-Anlage mit ihren naturgemäß großen Spannungsschwankungen hohe Anforderungen an die Netzschutztechnik dar. Hinzu kommt die Beanspruchung der PV-Anlage durch heterogene Klimabedingungen wie UV-Strahlung, Hitze, Frost, Feuchtigkeit, Salzgehalt und weitere Umwelteinflüsse z. B. Nagerbisschäden, denen die häufig weitläufigen Anlagen ausgesetzt sind. Damit gelten für PV-Anlagen weitreichende Sicherheitsnormen. Dieser Beitrag behandelt die Anforderungen dieser Normen und wie ihre Erfüllung realisiert werden kann.



▶▶▶ Bezüglich des „Schutzes gegen elektrischen Schlag“ werden in der Sicherheitsgrundnorm DIN EN 61140 (VDE 0140-1):2007-03 national bzw. in der IEC 61140:2001 + A1:2004 international grundlegende „Gemeinsame Anforderungen für Anlagen und Betriebsmittel [...] ohne Begrenzung der Spannung“ für diese Anlagen und Betriebsmittel beschrieben. Eine essenziell wichtige Anforderung für alle elektrischen Anlagen und Betriebsmittel ist:

*„Gefährliche aktive Teile dürfen nicht berührbar sein und berührbare leitfähige Teile dürfen nicht gefährlich aktiv sein, weder unter normalen Bedingungen (bei bestimmungsgemäßer Verwendung ohne Fehler) noch unter Einzelfehlerbedingungen“.*

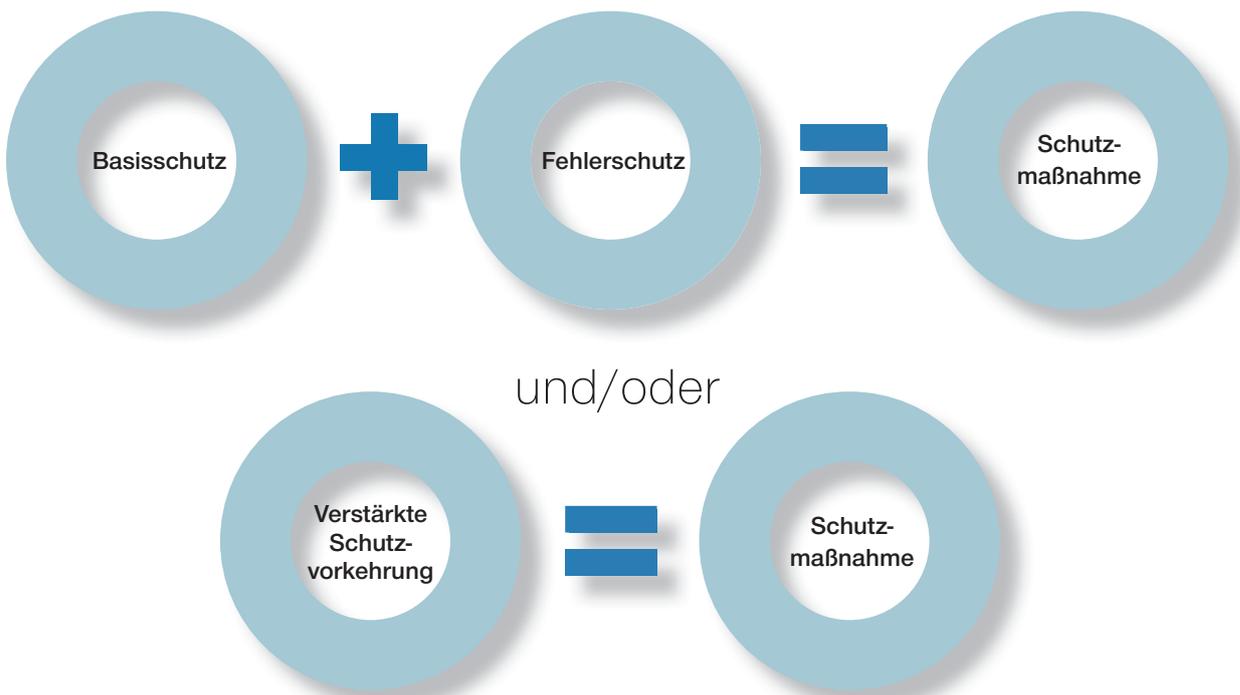
Hier gibt es keine Unterscheidung zwischen PV-Anlagen und anderen elektrischen Anlagen.

Eine gleichwertige erlaubte Realisierung einer Schutzmaßnahme gegen elektrischen Schlag nach DIN EN 61140 (VDE 0140-1):2007-03 besteht aus:

Konkretisierte Anforderungen bezüglich der Schutzmaßnahmen beim Errichten von Niederspannungsanlagen wird national in der Sicherheitsgrundnorm DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410):2007-06 und international in der IEC 60364-4-41:2005 beschrieben.

Es liegt ebenfalls eine harmonisierte europäische Norm vor, die HD 60364-4-41:2007.

Im Abschnitt 411 der DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410):2007-06 wird die „Schutzmaßnahme: Automatische Abschaltung der Stromversorgung“ beschrieben. Diese Schutzmaßnahme findet eine breite Anwendung in den meisten elektrischen Anlagen und ist für geerdete Netze und für ungeerdete Netze (IT-Systeme) anwendbar.



## ►►► Umfangreichere Schutzmaßnahmen sind erforderlich



Auf die Photovoltaikgeneratoren von PV-Anlagen kann die Schutzmaßnahme „Automatische Abschaltung der Stromversorgung“, nach heutigem Stand der Technik, nicht angewendet werden, da ein spannungsfreier Zustand in dem üblicherweise flächenmäßig breit ausgedehnten Photovoltaikgenerator nur durch Abdecken der Solarmodule oder durch die Dunkelheit der Nacht erreicht werden kann. In PV-Anlagen wird daher zumindest für den Photovoltaikgeneratorteil die „Schutzmaßnahme: Doppelte oder verstärkte Isolierung“ angewendet. Die Anforderungen an die „Schutzmaßnahme: Doppelte oder verstärkte Isolierung“ werden im Teil 412 der DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410):2007-06 beschrieben. Besonders zu beachten ist der Abschnitt 412.1.3:

*„In Fällen, wo diese Schutzmaßnahme als alleinige Schutzmaßnahme angewendet wird (z. B. wenn für einen Stromkreis oder einen Teil einer Anlage vorgesehen ist, nur Betriebsmittel mit doppelter oder verstärkter Isolierung zu errichten), muss nachgewiesen werden, dass sich dieser Stromkreis oder der Teil der Anlage im normalen Betrieb unter wirksamer Überwachung befindet, so dass keine Änderung gemacht werden kann, die die Wirksamkeit der Schutzmaßnahme beeinträchtigt. Diese Schutzmaßnahme darf nicht angewendet werden für alle Stromkreise, die Steckdosen enthalten, oder wo ein Anwender ohne Berechtigung Teile von Betriebsmitteln auswechseln kann.“*



## Nachlässigkeit kann Leben kosten

Dieser Teil gilt aktuell für die meisten Photovoltaikgeneratoren von PV-Anlagen und bedeutet, dass die Qualität der Isolierung sowohl bei der Inbetriebnahme als auch im Laufe der Betriebszeit über Jahrzehnte



hinweg darüber entscheidet, ob die Anforderungen an die „Schutzmaßnahme: Doppelte oder verstärkte Isolierung“ erfüllt werden. Im Fehlerfall entscheidet die Einhaltung der geforderten Eigenschaften der Isolierung über Leben und Tod, denn eine Nachlässigkeit kann Menschenleben kosten.

Mit der Isolierung sind in PV-Anlagen neben der Isolierung von Kabeln und Leitungen, den Luft- und Kriechstrecken (z. B. in Steckverbindern und Klemmstellen) auch Isolierfolien und isolierende Gläser in den PV-Modulen gemeint.

## Normen zur Vermeidung von elektrischem Schlag und Brandgefährdung

Da diese Eigenschaften schon weit vor der Energiewende als wichtig erkannt wurden, gab es bereits Anfang der 90er Jahre weitgehende Untersuchungen und Überlegungen, in denen versucht wurde abzuschätzen, welche konstruktiven Maßnahmen in PV-Modulen auch langfristig zu einem sicheren Verhalten im fehlerfreien Betrieb und im ersten Fehlerfall führen. Neben dem Schutz vor elektrischem Schlag wurde auch die Brandgefährdung betrachtet.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen und Überlegungen wurden von den Experten der Normengremien bei der Erarbeitung der Normen für die Bauartprüfung und Bauartzulassung von PV-Modulen berücksichtigt.

Aktuell sind dies für

- Terrestrische kristalline Silizium-Photovoltaik-(PV-) Module die DIN EN 61215 (VDE 0126-31):2006-02 (vorgesehener Ersatz ist die E DIN EN 61215 (VDE 0126-31):2012-07)
- Terrestrische Dünnschicht-Photovoltaik(PV)-Module die DIN EN 61646 (VDE 0126-32):2009-03





Trotz der vielfältigen umfangreichen Prüfungen bei der Bauartzulassung von PV-Modulen und einer Berücksichtigung der Anforderungen aus den Sicherheitsgrundnormen in der Errichtungsnorm DIN VDE 0100-712 (VDE 0100-712):2006-06 „Errichten von Niederspannungsanlagen–Teil 7-712: Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art – Solar-Photovoltaik-(PV)-Stromversorgungssysteme“ gibt es immer wieder neue Erkenntnisse über gefährliche Schwachstellen bei der Errichtung und beim dauerhaften Betrieb von PV-Anlagen, die normativ noch nicht berücksichtigt wurden.

– In der Präsentation des GDV (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. Berlin) werden z. B. folgende Mängel aufgezeigt (Auszug):

- Ammoniakbeständigkeit nicht berücksichtigt. Kommentar: Dies bedeutet z. B. die dauerhafte chemische Beständigkeit der verwendeten Isoliermaterialien gegen Gülle.
- Umgebungsbedingungen nicht beachtet (Frost, Luftfeuchtigkeit, Temperaturgefälle, direkte Sonneneinstrahlung). Kommentar: *Betauung ändert das Kriechstromverhalten extrem, dies muss bei der Auslegung von Kriechstrecken berücksichtigt werden.*
- Leitungsverlegung. Kommentar: Es wird ein Bild gezeigt, wo die Isolierung eines Kabels durch eine scharfe metallische Kante beschädigt wurde.

### Beispielhafte Schwachstellen in PV-Anlagen:

- Untersuchungen vom Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM zur „Lebenserwartung von Solarmodulen“



[www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2013/Okttober/lebenserwartung-von-solarmodulen-vorhersagen-7.html](http://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2013/Okttober/lebenserwartung-von-solarmodulen-vorhersagen-7.html)

„Wir haben anhand der Simulation beispielsweise herausgefunden, dass die UV-bedingte Versprödung eine weitaus größere Rolle bei der Materialermüdung spielt als bislang angenommen.“

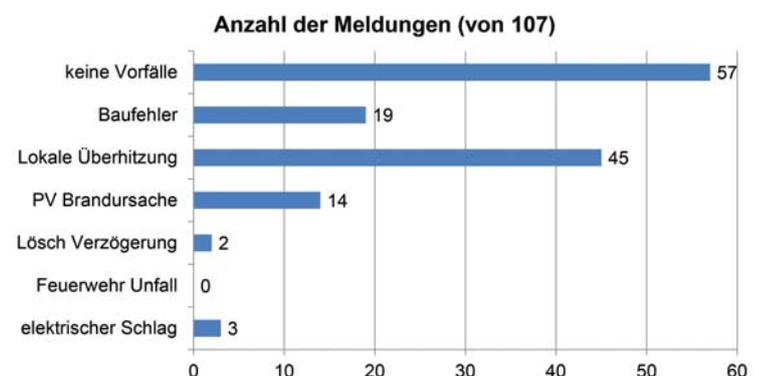
- Die Ergebnisse der „Statistischen Schadensanalyse an deutschen PV-Anlagen“ von Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. [www.pv-brandsicherheit.de/fileadmin/WS\\_26-01-12/Stat.Schadensanalyse\\_an\\_dt\\_PV-Anlagen.pdf](http://www.pv-brandsicherheit.de/fileadmin/WS_26-01-12/Stat.Schadensanalyse_an_dt_PV-Anlagen.pdf) Auf Seite 6 der Präsentation => Von 107 Rückmeldungen 3 Fälle mit der Klassifizierung „elektrischer Schlag“.



- Im Rahmen des 3 1/2 jährigen Forschungsprojekts zum „Brandschutz und Lichtbogenrisiko von PV-Anlagen“ wurden u. a. drei Workshops durchgeführt. Im dritten Workshop vom 03. April 2014 in Köln (<http://www.pv-brandsicherheit.de/koeln2014/>) sind den Beiträgen der Teilnehmer interessante Informationen zu entnehmen.



Abb. 1: Auswertung im Überblick



© Fraunhofer ISE



- – In einer Vielzahl von eindrucksvollen Bildern werden in den 15 Präsentationen des Workshops von verschiedenen Teilnehmern sehr viele Installationsmängel in PV-Anlagen gezeigt, die belegen, dass die normativen Anforderungen zum Erreichen der Schutzziele
- Schutz gegen elektrischen Schlag
  - Brandschutz
- offensichtlich häufig nicht eingehalten werden.
- Der TÜV Rheinland trifft z. B. die Aussage: „Mindestens 50 % der Fehler sind installationsrelevant.“
- Ebenfalls mehrfach bemängelt werden die Qualität der Wartung von PV-Anlagen und der Wartungszyklus.
- Es gibt einen Zusammenhang zwischen der Schadenshäufigkeit und der Jahreszeit. So kommt es im Sommer zu mehr Schäden.
  - Die Bedeutung der wiederkehrenden Prüfung wird hervorgehoben.



- Bezüglich „Nagetierfraß“ gibt es im Buch „Brandschutz in elektrischen Anlagen“ von Herbert Schmolke folgende Feststellung: „Oft stellt man derartige Isolierungsschäden nicht einmal durch eine Isolationswiderstandsmessung fest, da der zwischen den blanken Leitern verbleibende Luftabstand sehr hochhohmig ist. Dem Messgerät wird so eine intakte Isolierung vorgetäuscht. Erst bei hinzukommender Luftfeuchtigkeit, Verschmutzungen oder dergleichen kommt es zu gefährlichen Kriechströmen.“

### Wiederholungsprüfungen nicht praktikabel:

Die Anforderungen an Geräte zur Isolationswiderstandsmessung sind in der Norm DIN EN 61557-2:2008-02 beschrieben. Diese Geräte arbeiten üblicherweise mit 500 V oder sogar 1000 V Messspannung, so dass meistens nicht das komplette Niederspannungssystem mit allen Betriebsmitteln sowie Schutz- und Überwachungsgeräten gemessen bzw. getestet wird, sondern häufig nur das Kabel. Um aber eine Isolationswiderstandsmessung als Wiederholungsprüfung in einem Photovoltaiksystem durchzuführen, ist ein nicht zu unterschätzender Umbauaufwand notwendig. Da in den Photovoltaikgeneratoren nach dem derzeitigen Stand der Technik dieser Teil der Anlage nicht spannungslos geschaltet werden kann, ist eine Isolationswiderstandsmessung als Wiederholungsprüfung in Photovoltaikanlagen eigentlich nicht praktikabel.



Unbefugte (Familie mit Kindern) laufen im Solarfeld umher ohne zu wissen, welche Gefahren dort lauern.



## ►►► Messen ohne Abklemmen

Im Gegensatz hierzu sind Isolationsüberwachungsgeräte nach DIN EN 61557-8 (VDE 0413-8):2007-12 in der Lage, den Gesamtisolationswiderstand eines ungeerdeten Netzes (IT-System) im Betrieb zu bestimmen, ohne dass hierfür Betriebsmittel abgeklemmt werden müssen. Die Messung erfolgt mit kleinen Spannungen, so dass keine Vorschädigung von Betriebsmitteln oder Schutz- und Überwachungsgeräten zu erwarten ist. Die Bestimmung des Gesamtisolationswiderstandswertes durch Isolationsüberwachungsgeräte funktioniert auch bei Photovoltaikgeneratoren im normalen Betriebszustand ohne notwendige Umbaumaßnahmen unter anstehender PV-Spannung!

Wird der Solarwechselrichter nicht als IT-System betrieben sondern in einem geerdeten System, so kann keine kontinuierliche Überwachung der Photovoltaikgeneratoren im normalen Betriebszustand erfolgen, da bereits über die betriebsmäßig notwendige galvanische Verbindung mit dem Solarwechselrichter auch eine niederohmige Verbindung mit Erde entsteht. Parallel dazu liegende, meist hochohmigere, Isolationswiderstandswerte können nicht unterschieden werden.

Obwohl in dem Fall mit geerdetem Solarwechselrichter keine lückenlose kontinuierliche Überwachung im 24-Stunden-Betrieb möglich ist, ist der Einbau eines Isolationsüberwachungsgerätes durchaus vorteilhaft, da z. B. über Nacht die Verbindung des geerdeten Solarwechselrichters mit dem ungeerdeten Photovoltaikgenerator aufgetrennt werden kann und zumindest der Isolationswiderstandswert dieses Teils der PV-Anlage über einen Zeitraum von einigen Stunden durch ein Isolationsüberwachungsgerät überwacht wird.

## Kontinuierliche Protokollierung ist Prävention

Bei modernen Isolationsüberwachungsgeräten kann der Verlauf des Isolationswiderstandsniveaus über die Zeit aufgezeichnet und visualisiert werden. Wird bei diesem Verlauf z. B. eine Korrelation des Isolationswiderstandsniveaus mit der über Nacht zunehmenden Betauung festgestellt und daraufhin eine Fehlersuche gestartet, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Nagetierfraß entdeckt wird, sehr viel größer als bei den meist seltener stattfindenden Wiederholungsprüfungen.

Auch bei anderen aktuell bekannten Fehlerbildern in PV-Anlagen bietet die kontinuierliche Überwachung des Photovoltaikgenerators über Nacht eine gute Chance, auch brandgefährliche Zustände rechtzeitig aufzudecken, bevor ein Schadensfall entsteht.

Als Beispiel hierfür sei auf den Artikel verwiesen: „Warum kompatible PV-Steckverbinder gefährlich sind“ in der ELEKTRONIKPRAXIS Nr. 16 vom 26.8.2013. Hier wird beschrieben, dass durch Installationsfehler bei der Errichtung von PV-Anlagen die notwendige Dichtigkeit von PV-Steckverbindern nicht erreicht wurde. Durch Eindringen von Schmutz und Feuchtigkeit erhöht sich im Laufe der Zeit der Kontaktwiderstand in dem betroffenen PV-Steckverbinder. Bei Anlagenzuständen mit hohem Stromfluss kommt es dann durch die Erhitzung am Kontaktwiderstand mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem Brand.



Gleichzeitig führen mit nicht geringer Wahrscheinlichkeit Feuchtigkeit und Verschmutzung in einem solchen fehlerhaft ausgeführten PV-Steckverbinder auch zu einem Absinken des Isolationsniveaus.

Bei dem Einsatz eines über eine möglichst lange Zeit kontinuierlich überwachenden Isolationsüberwachungsgerätes und bei der Darstellung eines grafischen Verlaufs des Isolationswiderstandsniveaus möglichst seit Erst-Inbetriebnahme der PV-Anlage wird das Erkennen auch solcher kritischer Fehler wahrscheinlicher als über die selten durchgeführten Wiederholungsprüfungen.



▶▶▶ Auch der immer häufiger geforderte Einsatz von Lichtbogen-detektoren liefert nicht immer die erwartete zuverlässige Meldung entstehender Lichtbögen, wie der Präsentation des Fraunhofer ISE unter folgendem Link zu entnehmen ist

@ [http://www.pv-brandsicherheit.de/fileadmin/WS\\_03-04-14/GRAB\\_Lichtbogendetektion\\_in\\_PV-Anlagen\\_K%C3%B6ln\\_2014-04-03.pdf](http://www.pv-brandsicherheit.de/fileadmin/WS_03-04-14/GRAB_Lichtbogendetektion_in_PV-Anlagen_K%C3%B6ln_2014-04-03.pdf)

Bei der Nutzung eines Isolationsüberwachungsgerätes ist der Isolationswiderstandswert in diesem Fall nur ein Frühindikator. Dieser kann in Verbindung mit einer rechtzeitigen Fehlersuche nach der Ursache für das Absinken des Isolationswiderstandsniveaus zu dem eigentlichen Problem erhöhter Kontaktwiderstand führen. Je hochohmiger ein Isolationüberwachungsgerät bei vorhandenen Netzableitkapazitäten messen kann, um so wahrscheinlicher werden auch solche kritischen Zustände erkannt.

### Vorteil ungeerdetes IT-System

Bei komplett als IT-System ausgeführten PV-Anlagen ist eine Überwachung des Isolationswiderstandswertes durch ein Isolationsüberwachungsgerät kontinuierlich, lückenlos über alle Betriebszustände hinweg möglich. Bei modernen Isolationsüberwachungsgeräten erfolgt eine Aufzeichnung von Isolationswiderstandswerten und sogar weiteren Netzparametern mit Zuordnung zu Datum und Zeit, so dass der Fachmann über eine Korrelation mit Betriebs- und Umweltparametern auf kritische Zustände schließen und eine rechtzeitige Fehlersuche einleiten kann. Für die Fehlersuche in PV-Anlagen existieren sehr unterschiedliche Methoden, die in der Praxis mehr oder weniger effizient funktionieren. Sehr häufig werden bei der Erstellung von PV-Anlagen die Kosten für integrierte Fehlersuchsysteme eingespart. Beim Anwender und beim Wartungsdienst sind zudem die Möglichkeiten eines modernen Fehlersuchsystems nicht bekannt.



**Prüfung von LBD an der BFH nach UL1699B**  
**Messergebnisse: Prüfling 1**

**Kurze Leitung ohne Widerstand**

Imp [A]	Elektroden-abstand [mm]	Höchste zugelassene Reaktionszeit [s]	Auslösezeit Messung 1 [s]	Auslösezeit Messung 2 [s]	Auslösezeit Messung 3 [s]	Bestanden Ja - Nein
7	1.6	2	0.00	0.00	0.00	Nein
7	4.8	1.5	0.00	0.00	0.00	Nein
14	3.2	1.2	0.00	0.00	0.00	Nein
14	6.4	0.8	0.00	0.00	0.00	Nein

**Lange Leitung ohne Widerstand**

Imp [A]	Elektroden-abstand [mm]	Höchste zugelassene Reaktionszeit [s]	Auslösezeit Messung 1 [s]	Auslösezeit Messung 2 [s]	Auslösezeit Messung 3 [s]	Bestanden Ja - Nein
7	1.6	2	0.1	0.08		Ja
7	4.8	1.5	Nein	0.06		Nein
14	3.2	1.2	0.07	0.08		Ja
14	6.4	0.8	0.08	0.085		Ja

12 © Fraunhofer ISE Grundlagen UL-Messungen Neue Prüfverfahren Fraunhofer ISE

**Prüfung von LBD an der BFH nach UL1699B**  
**Messergebnisse: Zusammenfassung**

**Messungen mit Serienwiderstand**

DUT	Bestanden Ja - Nein
Prüfling 1	Ja (17/17)
Prüfling 2	Nein (16/23)
Prüfling 3	Ja (17/17)
Prüfling 4	Nein (7/16)

**Nur 50% Erfolgsquote!**

15 © Fraunhofer ISE Grundlagen UL-Messungen Neue Prüfverfahren Fraunhofer ISE

## ▶▶▶ Methodenvielfalt bei der Fehlersuche

Häufig kommen einfache Methoden zur Anwendung, wie z. B. die Verlagerungsspannungsmessung, die schon vor über 70 Jahren zur Erdschlusssuche in Energieanlagen angewendet wurde. Hierbei ist zu beachten, dass symmetrische Fehler, die brandgefährlich sein können, nicht gefunden werden.

Bei einer weiteren, ebenfalls häufig zum Einsatz kommenden Methode werden sehr zeitaufwändig Teile der PV-Anlage, die Strings, nacheinander außer Betrieb genommen, um anhand der Änderung des Isolationswiderstandwertes einzuschätzen, ob der abgeschaltete String fehlerhaft war. Hier werden bei Verwendung eines Isolationsüberwachungsgerätes nach DIN EN 61557-8 (VDE 0413-8):2007-12 immerhin symmetrische Fehler entdeckt.

Der Nachteil dieser Methode liegt in der sehr groben Eingrenzung des fehlerhaften Strings, denn bis auf die Modulebene kann man die Fehler nicht detektieren. Besonders nachteilig wird die Fehlersuche nach dieser Methode, wenn das eingesetzte Isolationsüberwachungsgerät bei eventuell vorhandenen großen Netzableitkapazitäten Messzeiten von 30 Minuten bis zu Stunden benötigt! Hierdurch ergeben sich entsprechend hohe Einspeiseverluste, die die Effizienz der PV-Anlage über die Lebensdauer in weit größerem Maße verringern als die etwaige Einsparung am Anfang durch die Auswahl eines billigen, aber leistungsschwachen Isolationsüberwachungsgerätes.

Statt also fehlerhafte Strings durch kostspieliges selektives Abschalten zu suchen, welches an sich schon gefahrenbehaftet ist, da manuell geschaltet werden muss, sind moderne Einrichtungen zur Isolationsfehlersuche nach DIN EN 61557-9 (VDE 0413-9):2009-11 das Mittel der Wahl. Sie bieten in speziellen Ausgestaltungen für PV-Anlagen eine schnelle und zuverlässige Lokalisierung von Fehlern bis auf die PV-Modulebene herunter, selbst in extrem großen und weitläufigen PV-Anlagen.



## Steigerung der Sicherheit für Mensch- und Maschinen

Diese Einrichtungen zur Isolationsfehlersuche stehen auch als portable Systeme zur Verfügung. Als Empfehlung sei jedoch angemerkt, bereits bei der Erstellung von PV-Anlagen die Fehlersuche mit zu berücksichtigen und bevorzugt Isolationüberwachungsgeräte zu wählen, die bereits für die Isolationsfehlersuche vorbereitet sind. Bei einem so aufgebauten System muss die Elektrofachkraft zur Fehlersuche nicht erst im Feld einen portablen Messtromgenerator anschließen. Eine Gefährdung der Elektrofachkraft durch das Hantieren mit spannungsführenden Teilen des Photovoltaikgenerators entfällt somit vollständig.

Die Isolationsfehlersuche in einer so ausgestatteten PV-Anlage ist problemlos und auch in kurzen Wartungsintervallen möglich. Schadensfälle und Stillstandszeiten werden minimiert. Dies kommt letztendlich der Sicherheit und der Effizienz der PV-Anlage zugute. ■

Dipl.-Ing. Dieter Hackl  
T-MIS