



PV- Wechselrichter – Anforderungen und Konsequenzen

Dr.-Ing. Christian Bendel

Institut für Solare Energieversorgungstechnik , Verein an der Universität Gesamthochschule Kassel, Königstor 59, 34119 Kassel
Tel.: (0561) 7294-226, Fax: (0561) 7294-200
e-mail: cbendel@iset.uni-kassel.de

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Neu- und Weiterentwicklung von photovoltaischen Komponenten, im vorliegenden Fall von PV- Wechselrichtern, sollte, beginnend mit der Konzeption, über die Entwicklung, Fertigung und Markteinführung, von qualitätssichernden Maßnahmen begleitet werden.

Diese Strategie bei langlebigen hoch investiven PV- Produkten konsequent anzuwenden ist eine logische und marktrelevante Konsequenz.

In der Praxis wird diese Vorgehensweise sehr unterschiedlich umgesetzt, was sich letztlich in der Funktion und Zuverlässigkeit der Produkte widerspiegelt. Auf der Grundlage statistischer Aussagen ist der PV- Wechselrichter immer noch an Ausfällen von PV- Anlagen die am häufigsten beteiligte Komponente. Gleichzeitig haben die PV- Wechselrichter aber auch eine rasante Weiterentwicklung erfahren und verfügen noch über ein deutliches Weiterentwicklungspotential.

In der Vergangenheit wurden von unterschiedlichen Institutionen bereits Wechselrichtervergleichstests durchgeführt. Obwohl die Testprozeduren üblicherweise nach bereits vorliegenden Normen - wenn vorhanden - durchgeführt wurden, sind die Ergebnisse nur teilweise vergleichbar. Die Ursachen sind: Konflikt zwischen Bandbreite der Grenzwerte und die Messgenauigkeit der Prüfeinrichtungen, zu großer Auslegungsspielraum der Richtlinien/ Normen sowie das Fehlen von produktspezifischen Normen insbesondere bei PV- Wechselrichtern.

Im Rahmen von verschiedenen Forschungsprojekten werden derzeit zielgerichtete Untersuchungen zu Problemen der Parametersicherheit (Vorgaben der Hersteller) und Zuverlässigkeit von PV- Wechselrichtern durchgeführt. Schwerpunkte bilden dabei:

- die Einhaltung der vorgegebenen Temperatureinsatzbedingungen für marktverfügbare PV-Wechselrichter
- die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) für PV- Wechselrichter bzw. – Systeme unter Normprüfbedingungen und Arbeitsbereichen ohne Normvorschriften
- Ausfallratenhäufigkeit von elektronischen Bauelementen und deren wichtigste Ursachen sowie Folgen für die Geräteentwicklung.

Als Ergebnis dieser Untersuchungen sollen zielgerichtet noch bestehende funktionelle Defizite bei marktverfügbaren PV- Wechselrichtern bzw. "Staß-



„dard“- PV- Systemen ermittelt werden. Konkret ermittelte, produktspezifische Ergebnisse werden an die entsprechenden Hersteller zwecks Produktnachbesserung übermittelt. Abgeschlossen werden die Untersuchungen mit der Erarbeitung von verallgemeinerungswürdigen technischen Lösungsansätzen bzw. Reglements/ Normentwürfen sowie deren Veröffentlichung in Fachkreisen /1/.

2 Anforderungen an PV – Wechselrichter

Die Anforderungen an PV- Wechselrichter kann man grundsätzlich in drei Kategorien einteilen, wobei sehr schnell erkennbar wird, dass bestimmte Inhalte in allen drei Kategorien korrelierend miteinander verknüpft sind.

Technische Anforderungen	Betriebswirtschaftliche Anforderungen	Marktwirtschaftliche Anforderungen
Einhaltung der elektromagnetischen Verträglichkeit	wirtschaftlich herstellbar (preiswerte BG, BE und Mat.)	akzeptables Design
optimaler Wirkungsgrad	wenig oder keine Spezialbauelemente (BE)	einfache Bedienbarkeit
geräuscharm (-los)	gleichbleibend gute Qualität von BE`n	einfach installierbar
techn. und personenspezifisch sicher (VDE 100)	wenig bzw. keine Kalibrier- und Einstellarbeiten	geringer Platzbedarf
kommunikationsfähig	Konzept mit Standardtechnologien umsetzbar	servicefreundlich/ guter Kundendienst
parameterstabil	planbarer Absatz	weiter Eingangsspannungsbereich
parallelschaltbar	Machbare Qualitätssicherung (QS)	Garantierte QS
Einhaltung realer Einsatzbedingungen (T_{amb} , $F_{rel.}$, IP, SK)	hohe Verfügbarkeit	akzeptables Preis-/ Leistungsverhältnis
geringe Eigenverluste		angepasste Garantie für langlebige Systeme
hohe Verfügbarkeit		hohe Verfügbarkeit

Tab. 1 Anforderungen an PV- Wechselrichter (Abkürzungen: T_{amb} = Umgebungstemperatur, $F_{rel.}$ = relative Luftfeuchtigkeit, IP= Schutzgrad/ Interelement Protection, SK= Schutzklasse, BE= Bauelement, BG= Baugruppe, Mat= Material)

Diese Verknüpfung untereinander bedeutet aber nicht in jedem Fall, dass alle Anforderungen gleichrangig erfüllbar sind. Oft stehen sich diese in einer konkreten



Produktentwicklung auch entgegen. Hier bedarf es klarer Prämissen und Prioritäten im Entwicklungs- und Marketingbereich des jeweiligen Unternehmens.

3 Technischer Stand und Untersuchungsergebnisse

3.1 Stand der Technik

Verschiedene Förderprojekte bzw. Förderprogramme des Bundes haben sich mit dem Einsatz von PV- Wechselrichtern in PV- Anlagen mittel- und unmittelbar befasst. Beispielhaft seien hier genannt:

- „Mess- und Auswerteprogramm 1000- Dächer- Photovoltaik“ (ISET)
- „Entwicklung und Erprobung von photovoltaischen Kleinkraftwerken im Netzparallelbetrieb“ (ISET, TÜV)
- „Programm zur Förderung photovoltaischer Kompaktsysteme“ (ISET)
- „Untersuchungen zur Entwicklung photovoltaischer Kompaktgeräte und Kleinsysteme“ (ISET)

Es wurden Fragen bzw. Problemstellungen offenbart und fachlich bearbeitet, die sich u.a. auch mit der Stabilität, der technischen Sicherheit, der Personensicherheit, der Versorgungsqualität und -sicherheit von insbesondere netzgekoppelten Photovoltaikanlagen befassten bzw. auf neuen Teilgebieten nur ansatzweise befassen konnten. Bild 1 stellt schematisch Problembereiche („Brennpunkte“) in

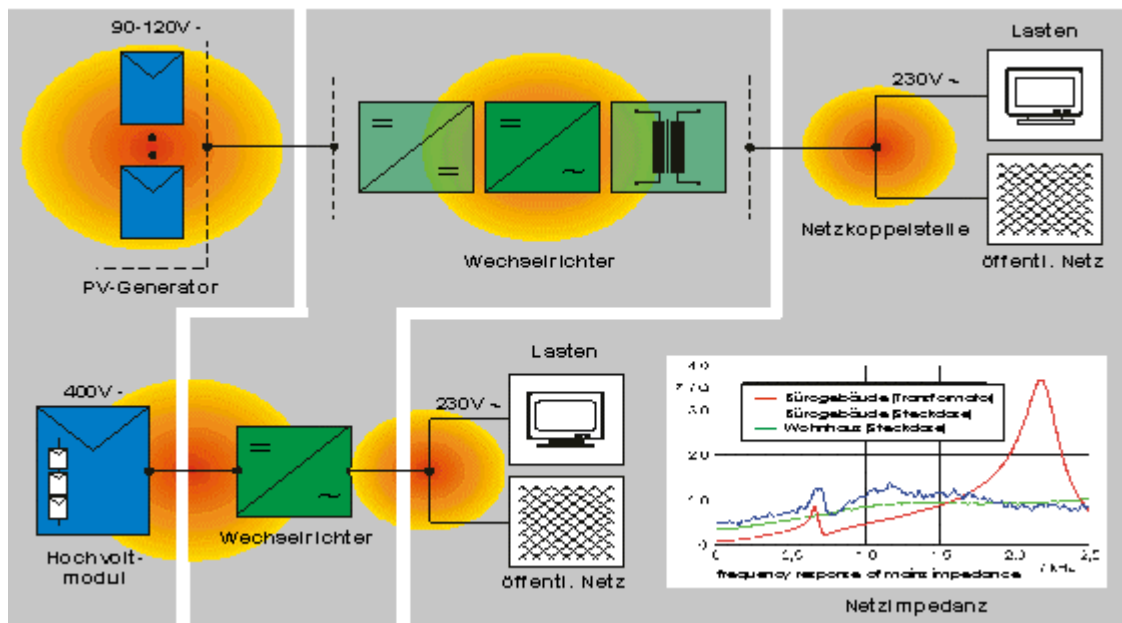


Bild 1 Problembereiche - „Brennpunkte“- in einer PV- Anlage

einer PV- Anlage dar.



Mit der zunehmenden Vielfalt von Geräte- und Systemkonzepten, seit dem erfolgreichen Beginn des 100.000 Dächer Programms und der Ablösung des StrEG durch das EEG, werden wieder zunehmend neue Effekte und Wechselwirkungen in den immer vielfältigeren Systemen festgestellt (Bild 1), auf die es derzeit noch keine befriedigenden Antworten bzw. Lösungen gibt.

Als Ergebnis bisheriger Recherchen und Erkenntnisse, aufgrund von Anfragen bzw. Veröffentlichungen, gibt es für verschiedene Energiewandlungskomponenten (insbesondere PV- Wechselrichter), die aufgrund neuer Techniken und Technologien einen erheblichen wirtschaftlichen Vorteil in Aussicht stellen, ein immer noch nicht vernachlässigbares Sicherheits- und Zuverlässigkeitsrisiko. Beispielhaft seien hier genannt:

- Hochvolt- PV-Module mit integrierten Wechselrichtern (Isolationsfestigkeit, kapazitive Ableitströme)
- trafolose Wechselrichter (EMV, Überspannungsfestigkeit)
- PV- WR (Netzabwurf wegen undefinierter Netzstörungen/ transiente Überspannungen, ENS)
- PV- Wechselrichter/ ENS- Überfunktion (Netzabwurf wegen Lastanpassungsmaßnahmen im Mittel- und Hochspannungsnetz)
- Störeinfluss von Wechselrichtern bei Netzleitungskommunikation
- Fehlerhaftes Betriebsverhalten von PV- Wechselrichtern bei Standard- Einsatzbedingungen (Temperatur- und Korrosionsverhalten)
- elektromagnetische Verträglichkeit von PV- Wechselrichtern am Netzkoppel- punkt und auf der Gleichspannungsleitung (Einsatzbedingungen, Grenzwerteinhaltung)

Die Grenze zum vertretbaren Sicherheits- und Zuverlässigkeitsrisiko ist in der Praxis nicht immer einfach zu finden. Bild 2 erklärt den Zusammenhang und zeigt die Position des derzeitigen Standes der Technik bzw. des Forschungsbedarfs.

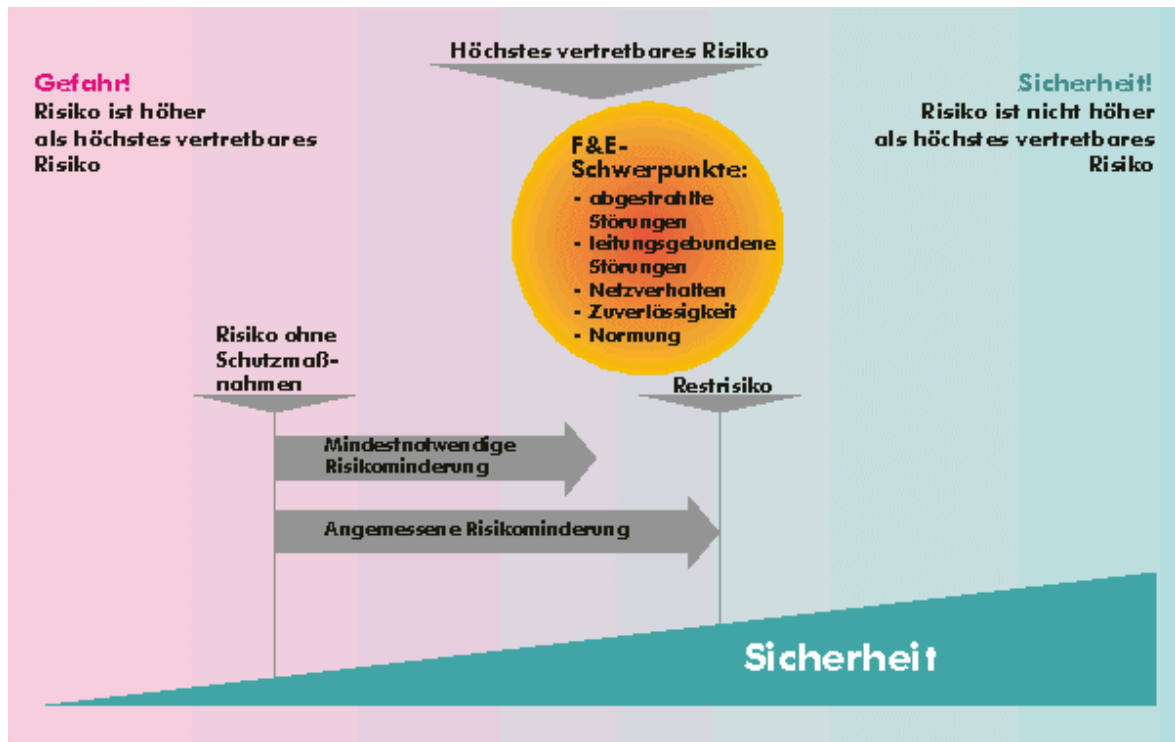


Bild 2 Vertretbares Sicherheitsrisiko und Positionierung des F&E Bedarfs

Die Fachwelt ist sich darüber einig, dass die Photovoltaikanlage auf Grund der flächenhaften Energiewandlungseinheit (PV-Generator) und spezieller elektrischer Signalwandlung (PV-Wechselrichter) ein besonderes elektrisches Netzwerk mit speziellen Eigenschaften darstellt. Mit zunehmender Häufigkeit werden wir derzeit mit immer neuen und oft nicht vorhersehbaren Wirkungen dieser Eigenschaften konfrontiert.

Aktuelle Untersuchungsergebnisse im Projekt „Entwicklung von photovoltaischen Kompaktgeräten und Kleinsystemen“ weisen z.B. bei der Thematik „Temperaturverhalten von Wechselrichtern“ auf erhebliche Differenzen zwischen Herstellerangaben und realistischem Betriebsverhalten hin. Die vorzeitige Abregelung bis hin zur Abschaltung führen in der Praxis zu erheblichen Energieeinbußen, obwohl dazu technisch bzw. physikalisch kein Anlass besteht. Lokale Temperaturüberschreitungen (Hot-spot) von Bauelementen gefährden den zuverlässigen Betrieb einschließlich z.B. den sicheren „Netzabwurf“ bei Netzabfall. Hier bestehen noch erhebliche Defizite zwischen Machbarkeit (wissenschaftlicher Vorlauf) und Umsetzung (Praxis).

Auf der Basis von Testergebnissen an PV- Anlagen wurden jetzt nach zehn Jahren erstmalig Auswirkungen von Korrosion an speziellen PV-Modulen und Anschlusskabeln festgestellt. Die im Jahr 1990 gemeinsam mit dem TÜV Rheinland festgelegten Installationsrichtlinien wurden anfänglich in Fachkreisen als übertrie-



ben eingeschätzt. Inzwischen beweist die Unfallstatistik die Richtigkeit der Forderungen. Aufgrund aktuell vorliegender Langzeitergebnisse zum Betriebverhalten von PV-Anlagen ist ein Umdenken bezüglich der Installationsrichtlinien nur in Einzelfällen notwendig. Anders bei Korrosionsschäden von Komponenten und der Unterkonstruktion. Hier besteht ein berechtigtes Defizit der Betriebssicherheit - d.h. Personen- und Anlagenrisiko /2/.

Wesentlich schwieriger gestalten sich die Bewertungen und Vergleiche von Messergebnissen bei der elektromagnetischen Verträglichkeit, besonders dann, wenn Grenzwertüberschreitungen bzw. Fehlfunktionen festgestellt wurden. Beispielsweise wird das Verhalten von PV-Wechselrichtern auf der Gleichspannungsseite durch das Fehlen entsprechender Normvorschriften sowie Grenzwerte von Herstellern völlig unzureichend behandelt, weil Prüflinge mit Energieeinspeisung in den bisherigen Normen nicht vorgesehen sind. Derzeitig werden keine leitungsgebundenen Störleistungsprüfungen von PV-Wechselrichtern im Frequenzbereich über 30 MHz gefordert und Schäden (Störungen im Rundfunk- und Nachrichtenverkehr, mögliche Beeinflussung von Personen) sind damit nicht ursächlich eintragbar.

Auch für das normengerechte Prüfen auf der Wechselstromseite gibt es notwendigen Bedarf an Korrekturen im Prüfaufbau. Netzparallel arbeitende Wechselrichter, die die Netzspannung als Führungsgröße für den generierten Netzstrom verwenden (Marktanteil: ca. 90 % bei Geräten bis 5-kW-Nennleistung), erhöhen insbesondere in schwachen Netzen den Oberschwingungsanteil (elektronische Mitkopplung). In der Vergangenheit kam es hier zu schwerwiegenden Irritationen zwischen EMV überprüfenden Labors und Geräteherstellern, weil die normkonformen Netznachbildungen schwache Netze „simulieren“ und die gemessenen Oberschwingungen oft die Grenzwerte überschritten. Hier besteht ein dringender Bedarf, die geltenden Normen zu überprüfen.

Industrieanfragen /3/ befassen sich mit Netztrennstellen (u.a. auch Einrichtungen zur Netzüberwachung mit zugeordneten allpoligen Schaltern in Reihe - ENS) für dezentrale dreiphasige Energieversorgungsanlagen mit Nennleistung größer 30 kW, die über die derzeit gültige VDEW Richtlinie /4/ nicht abgedeckt werden. Man erwartet unabhängig vom Stand der internationalen Diskussionen für den VDEW-Bereich eine wissenschaftlich und technisch fundierte Lösung. Insbesondere die Verknüpfung einer großen Anzahl und vielen verschiedenen dezentralen Energiewandlungseinheiten in netzgekoppelten Energieversorgungssystemen - inkl. der implementierten PV- Wechselrichter - erfordert derzeit noch mehr Wissen für eine



problemlose Leistungssicherung mit den Ansprüchen der bisher bekannten Versorgungssicherheit.

Neue Untersuchungsergebnisse zum Impedanzverhalten von PV-Wechselrichtern in Netzen erfordern, insbesondere für Einspeisepunkte in Ballungsgebieten, eine neue Messmethodik. Etablierte Wechselrichterhersteller lassen theoretisch mit ihrer ENS max. 20 Geräte an einem Netzkoppelpunkt zu, empfehlen aber in der Praxis den Parallelbetrieb von nur 10 Wechselrichter.

Erste Grundlagenuntersuchungen im ISET führten zu einer erfolgversprechenden neuen Messmethodik, deren Praxistauglichkeit im Rahmen einer Produktentwicklung noch nachgewiesen werden muss. Bei erfolgreicher Erprobung stünde hier eine grundlegende Lösung bereit, die - gegebenenfalls auch modifiziert - auf alle dezentralen Energiewandlungsanlagen übertragen werden könnte.

Besorgte Anfragen von technischen Laien bis hin zu sachkundigen Betreibern von Photovoltaikanlagen stellen immer wieder die Sicherheit gegen elektromagnetische Strahlung von PV- Anlagen infrage und verweisen dabei auf die in der Öffentlichkeit sehr konträr diskutierten „Beweise“ aus dem Telekommunikationsbereich. Kommen dann konkrete Beispiele von Rundfunkstörungen durch Wechselrichter hinzu, dann verbleiben aufgrund eigener Messergebnisse kaum belastbare Gegenargumente, die derzeitig solche Möglichkeiten nicht ausschließen. Durch elektromagnetische Felder (PV- Gleichstromverdrahtung) in Wohnbereichen unter dem Dach fühlen sich besorgte Bürger beeinflusst. Dass bei PV- Anlagen auch auf der Gleichspannungsseite „Elektrosmog“ nachweisbar ist, haben eigene Messungen bestätigt. Ursachen waren hier der fehlerhafte Einbau eines EMV- Filters und zu starke leitungsgebundene Störleistungen eines Wechselrichters.

Wenn Reinigungsfirmen die Arbeit an PV- Fassaden einstellen, weil ein „Kribbeln von elektrischen Strom“ fühlbar ist, dann handelt es sich in der Regel um kapazitive Ableitströme, die durch die Installation von traflosen Wechselrichtern auftreten können. Zwar sind die fühlbaren elektrischen Entladungen nach bisherigen Erkenntnissen nicht direkt gesundheitsschädigend, aber Folgeschäden z.B. Erschrecken und davon ableitbare Unfälle sind nicht ausgeschlossen. Es gilt abzuwägen, ob hier von einem vertretbaren Risiko ausgegangen werden kann. Technische Lösungen sind bekannt, die hier Abhilfe schaffen, aber sie werden noch nicht umfassend umgesetzt.

Immer häufiger werden Hausinstallationen noch zusätzlich für moderne leitungsgebundene Kommunikationstechnologien (Power Line Communication- PLC und Wireless LAN) genutzt. Hier besteht mit hoher Sicherheit ein vermutetes Risiko mit Folgen für die Kommunikationsnetz- und PV- Anlagenbetreiber. Aufgrund des Fehlens von verbindlichen Grenzwerten für elektromagnetische Störungen in den



Frequenzbereichen, die z.B. auch von PLC- Netzen benutzt werden, besteht hier ein dringender Regulierungsbedarf (Normung).

3.2 Untersuchungsergebnisse – ein Überblick

3.2.1 Temperaturbelastung von elektronischen Bauelementen in PV- Wechselrichtern /5/

Der Einsatz von elektronischen Bauelementen auf Leiterplatten oder anderen industriellen Substraten von PV- Wechselrichtern erfolgt nach bekannten Richtlinien bzw. physikalischen Grundsätzen. Oft unterliegen aber diese Leiterplattenarchitekturen einem Entwicklungs- und Kostendruck, so daß Bauelementauswahl oder Leiterplattenlayout inkl. Bauelementanordnung nicht optimal sind, was sich auf die Zuverlässigkeit und Lebensdauer unmittelbar auswirkt. Die Bilder 3a und 3b zeigen die Anordnung von Kondensatoren in der unmittelbaren Nähe eines Kühlkörpers mit Leistungshalbleitern, der bereits im Betriebszustand

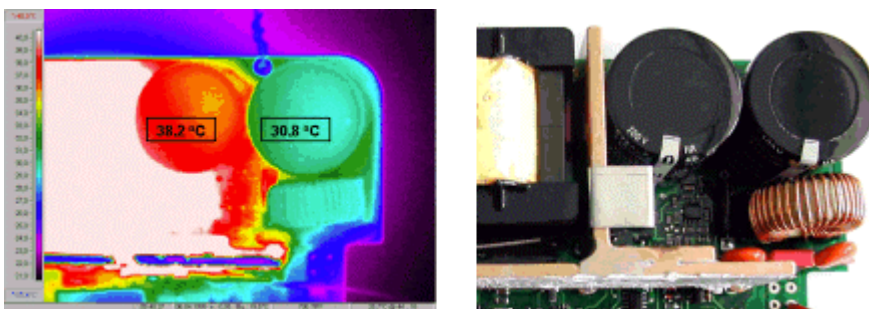


Bild 3a (links) Thermographieaufnahme von 3b (rechts) Leiterplatte mit Kondensatoren

bei geöffnetem Gehäuse eine Temperatur von $+48,8\text{ °C}$ aufweist ($T_{\text{Umg}} 21,5\text{ °C}$). Der Kondensator wird in dieser Bauelementanordnung auf $+38\text{ °C}$ aufgeheizt. Als Folge wird die Lebensdauer der Elektrolytkondensatoren und damit die Funktion des PV- Wechselrichters bei einer vom Hersteller angegebenen Einsatzstemperatur von $+60\text{ °C}$ für ein geschlossenes Gerät begrenzt sein.

Ein anderes Untersuchungsergebnis zeigen die Bilder 4a und 4b. Ebenfalls auf einer Leiterplatte sind aktive elektronische Bauelemente im Original (rechts) und als Thermographie (links) dargestellt. Diese erreichen bei geöffnetem Gerät ($T_{\text{Umg}} +22\text{ °C}$) bereits eine Betriebstemperatur von $+70,8\text{ °C}$. Bei einer zulässigen Umgebungstemperatur für das Gerät von max. $+35\text{ °C}$ sollen die Bauelemente bei geschlossenem Gehäuse mittels eines Lüfters funktionstüchtig gehalten werden.



Fragwürdig erscheint dieses Konzept unter den Gesichtspunkten „niedriger Eigenenergiebedarf“ und „Zwangskühlung“.

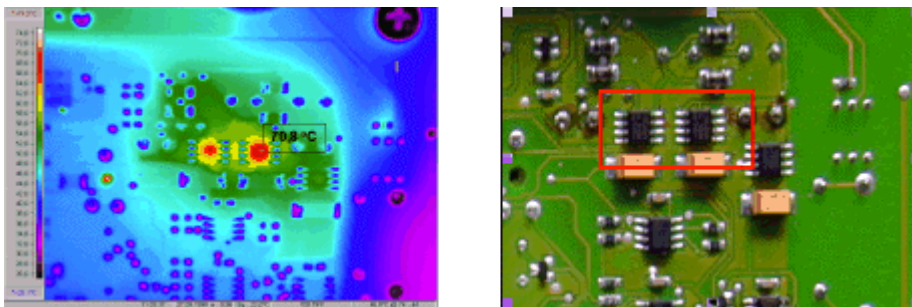


Bild 4a (links) Thermographieaufnahme einer Leiterplatte mit aktiven elektronischen Bauelementen Bild 4b (rechts)

3.2.2 Wärmeabführung durch Kühlkörper und Metallgehäuse /5/

Beim Betrieb insbesondere von Leistungshalbleitern wird die Verlustwärme in der Regel über eigenständige Kühlkörper mit Gehäusedurchbruch abgeführt. Verschiedene Hersteller von PV- Wechselrichtern verzichten auf diese Form der Verlustwärmeabführung und benutzen das metallische Gerätegehäuse als Kühlfläche. Diese Möglichkeit ist insbesondere bei Geräten mit hohem Wirkungsgrad und damit geringerer Verlustwärme durchaus sinnvoll, vorausgesetzt, daß die Gehäusegröße und Oberflächengestaltung auch die höheren Einsatzbedingungen (z.B. Dachboden im Sommer) berücksichtigt. Treffen diese Voraussetzungen nicht zu, sind mittel- und langfristig Funktionsausfälle nicht auszuschließen Im Bild 5 ist ein interessantes Gehäusedesign in einer Thermographieaufnahme dargestellt. Die Gehäuseoberfläche ist unterschiedlich gestaltet.

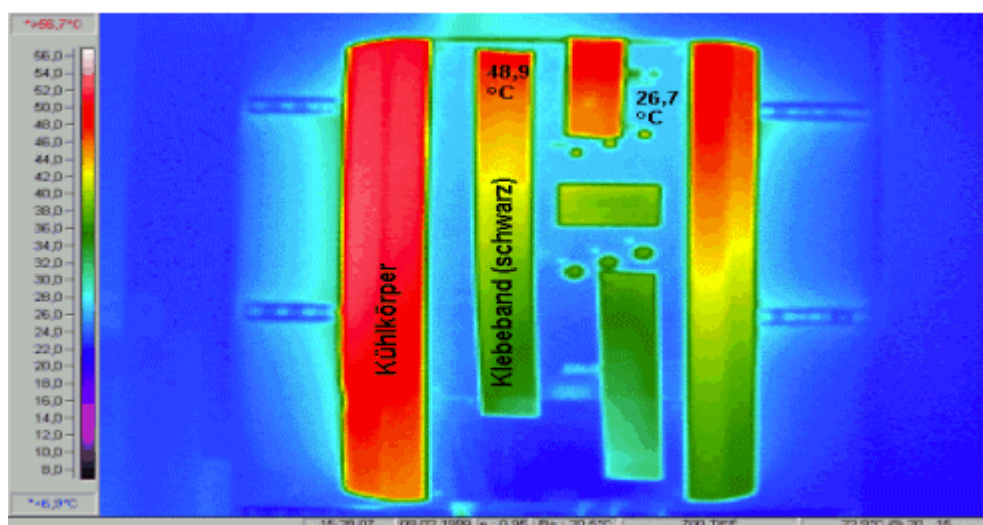


Bild 5 Thermographieaufnahme eines PV- Wechselrichters bei $T_{Umgebung} +22,7\text{ °C}$



Aufgrund der metallisch blanken Frontseite ($\varepsilon = 0,22$) wird hier kaum die innere Gehäusewärme abgestrahlt. Anders verhalten sich die strukturierten als Kühlkörper ausgebildete Seitenteile. Entscheidend für eine gute Wärmeabfuhr ist die Leitfähigkeit des Metallgehäuses und die Oberflächengestaltung, z.B. ein optimaler Emissionsfaktor $\varepsilon = 0,95$. Um dies zu verdeutlichen wurden auf der blanken metallischen Frontseite schwarze Klebstreifen befestigt und damit regional der Emissionsfaktor verändert. Die Thermographie zeigt höhere Oberflächentemperaturen und damit ein besseres Abstrahlungsverhalten. Design und Funktionalität müssen nicht einander ausschließen, wie beispielhaft im Bild 5 dargestellt.

Als Zwischenergebnis kann festgestellt werden, daß Hot-Spots auf Leiterplatten, die bewußte Trennung von Temperaturquellen und –senken auf Leiterplattenlayouts, der störungsfreie Betrieb bei hohen Umgebungstemperaturen und die Methodik der Wärmeabfuhr bei einigen marktverfügbaren PV- Wechselrichtern teilweise Probleme darstellen. Andererseits gibt es gute Beispiele für Design und Funktionalität.

3.2.3 EMV von PV- Wechselrichtern auf der Gleichspannungsseite

In der Fachwelt ist bekannt, daß PV- Anlagen unter bestimmten Bedingungen elektromagnetische Wellen abstrahlen können. Die meistens als Störungen in der Umgebung wahrgenommenen elektromagnetischen Wellen werden ausschließlich von einer elektrisch aktiven Quelle, z.B. Wechselrichter, Gleichspannungsladeregler u.ä. Komponenten, generiert und weisen nach bestehenden elektrotechnischen Richtlinien auf eine nicht ausreichend geprüfte Fehlfunktion hin.

Das seit 1996 gültige Gesetz zur “Elektromagnetischen Verträglichkeit” schreibt ohne Ausnahmen vor, daß Hersteller oder Inverkehrbringer von u.a. technischen Geräten den Nachweis der elektromagnetischen Verträglichkeit ihrer Produkte erbringen müssen. Dies geschieht durch die Konformitätserklärung (CE- Zeichen). Elektromagnetische Konformität besagt, daß die Produkte weder ihre Umgebung stören noch von ihr beeinflusst werden dürfen.

EMV Prüfungen im akkreditierten ISET Meßlabor an wiederum marktverfügbaren PV- Wechselrichter zeigen, daß nach wie vor erhebliche Mängel bei einigen Prüflingen festgestellt wurden. Die betroffenen Hersteller wurden inzwischen über diese Defizite informiert, um ihnen vor einer Veröffentlichung die Chance einer Nachbesserung einzuräumen. Es muß ausdrücklich betont werden, daß die o. g. Prüfungen auf der Grundlage nur gültiger Normen durchgeführt wurden.



Weitergehende Untersuchungen der Betriebsverhaltens o. g. Prüflinge in bisher unbeachteten Frequenzbereichen zeigen, daß insbesondere neue Schaltungs- und Modulationsprinzipien (hohe Taktfrequenzen) in den Geräten zu überhöhten Störungen im Frequenzbereich von 30 – 300 MHz führen. Aufgrund dieser ermittelten Störleistungen können elektromagnetische Felder vom Generator und von den DC- Leitungen abgestrahlt werden. Bild 6 stellt den Meßaufbau im Testfeld dar /6/.



Bild 6 Messung der elektromagnetischen Abstrahlung eines PV- Generators

Im Bild 7 wird die Funkstörfeldstärke eines PV- Generators, die im Test von einem PV- Wechselrichter verursacht wurde, im Vergleich zur Hintergrundstrahlung dargestellt.

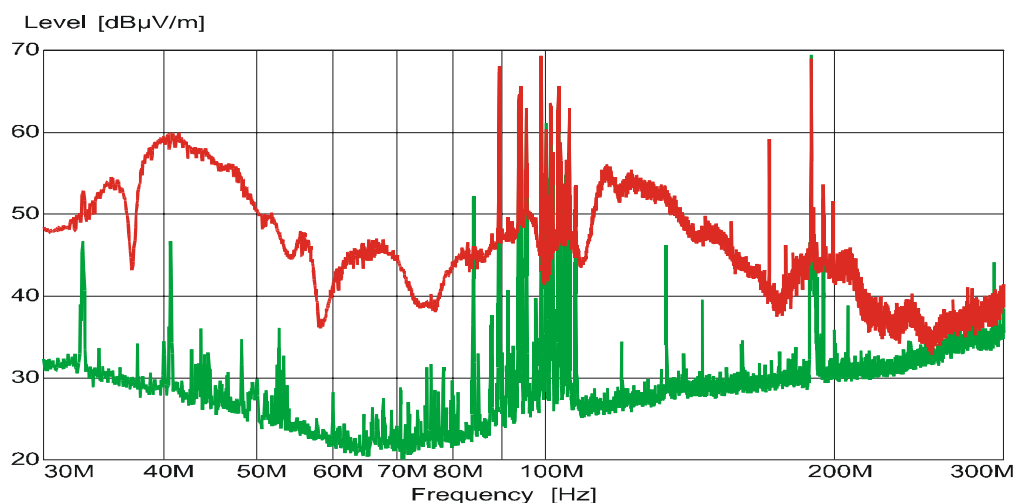


Bild 7 Funkstörfeldstärke einer realen PV- Anlage im Frequenzbereich von 30- 300 MHz
in 3 m Meßentfernung



In weitergehenden Untersuchungen wird nunmehr der Frage nachgegangen, inwieweit diese frequenzabhängigen Störungen mit der geometrischen Größe von PV- Generatoren korrelieren, d. h., ob mit größer werdendem PV- Generator eine immer bessere "Antennenanpassung" erfolgt, weil die Wellenlänge der Störfrequenz sich der geometrischen Ausdehnung der PV- Generatorkonstruktion nähert. Das Ziel ist, aus Labormessungen eine Aussage über das EMV- Verhalten von PV- Anlagen zu gewinnen.

Weitere Meßkampagnen dienen der Überprüfung von Maßnahmen zur Unterdrückung der Störsignale auf Gleichspannungsleitungen. Dabei hat sich gezeigt, daß die Wirksamkeit der Filtermaßnahmen sehr stark vom Massebezug am Aufstellungsort abhängt. Eine wichtige Erkenntnis insbesondere für Inselanlagen in trockenen Klimaten oder in Bergregionen. Besser wäre es auf Entstörmaßnahmen zu verzichten und generell störarme Komponenten einzusetzen. Hier besteht noch ein entsprechender Entwicklungsbedarf.

3.2.4 Normgerechte DC- Netznachbildung

EMV- Prüfverfahren müssen den Erfordernissen photovoltaischer Komponenten gerecht werden, um realitätsnahe und reproduzierbare Prüfungen durchführen zu können. Das erfordert die hinreichende Spezifizierung der Meßgeräte, der Meßverfahren und des Meßaufbaus (Bild 8). Für die Messung der Funkstörspannung auf DC- Leitungen im Bereich von 150 kHz – 30 MHz ist eine Netznachbildung mit definierter Impedanz erforderlich. Diese Impedanz muß die zum Teil divergierenden Anforderungen der technischen Realisierbarkeit und der Simulation erfüllen /7/.

Die Entwicklung nachfolgend dargestellter DC- Netznachbildung war erforderlich, weil bisher weder eine Prüfvorschrift bzw. Produktnorm, noch ein Prüfaufbau für das Produkt „PV- Wechselrichter“ bestand.

Die im Bild 9 vorgeschlagene DC- Netznachbildung wird vom Prinzip her inzwischen erfolgreich von anderen Fachinstitutionen in der Schweiz (Fachhochschule Burgdorf und Fa. Schaffner) und in Österreich (Forschungszentrum ARSENAL) angewandt. Erste vergleichende Meßergebnisse im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes ESDEPS erfordern aber noch weitergehende fachliche Ab-



stimmungsgespräche für europäische Normungsaktivitäten. Ein erster Kommentar zum Normentwurf IEC 62093 wurde bei der IEC eingereicht /8/.

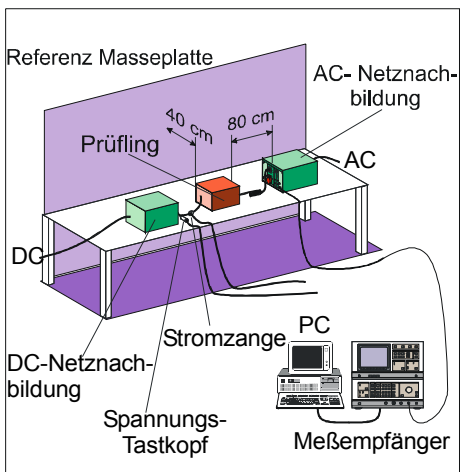


Bild 8 Meßaufbau für DC Leitungen unter Laborbedingungen

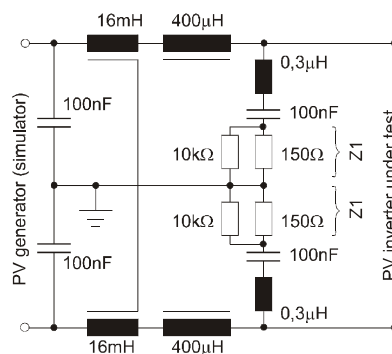


Bild 9 DC- Netznachbildung als Normvorschlag für PV- Wechselrichter

Die folgenden Bilder 10 und 11 zeigen reale Meßergebnisse von Funkstörspannungen, welche im Rahmen o.g. Prüfungen durch marktverfügbare Wechselrichter verursacht wurden. Der Meßaufbau erfolgte nach Bild 8 und wird derzeit im akkreditierten Meßlabor des ISET für informative Prüfungen zur Qualitätssicherung genutzt.

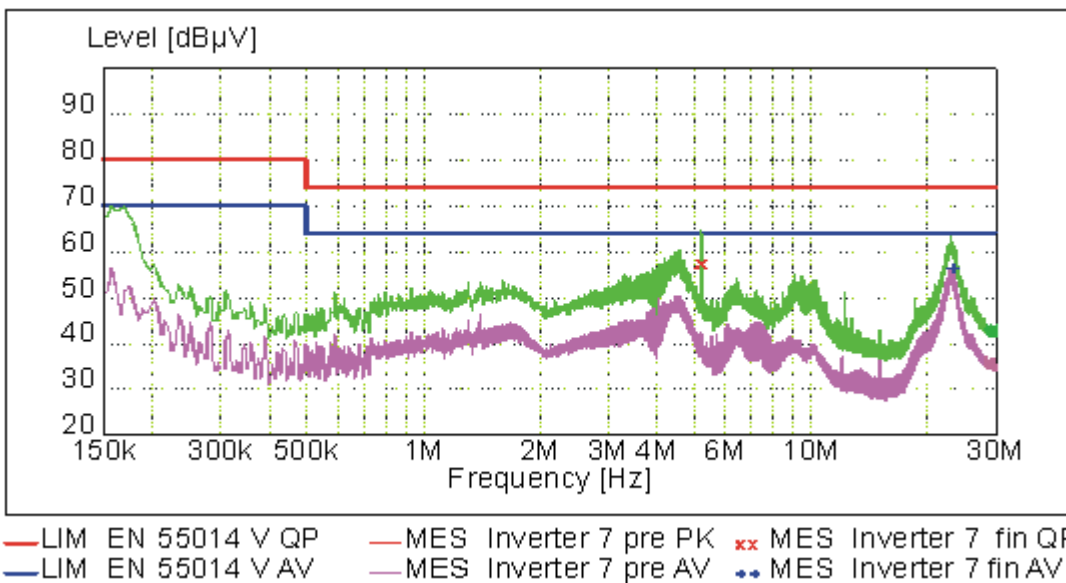


Bild 10 Funkstörspannung auf der DC- Leitung eines korrekt arbeitenden PV- Wechselrichters (Originalprotokoll)

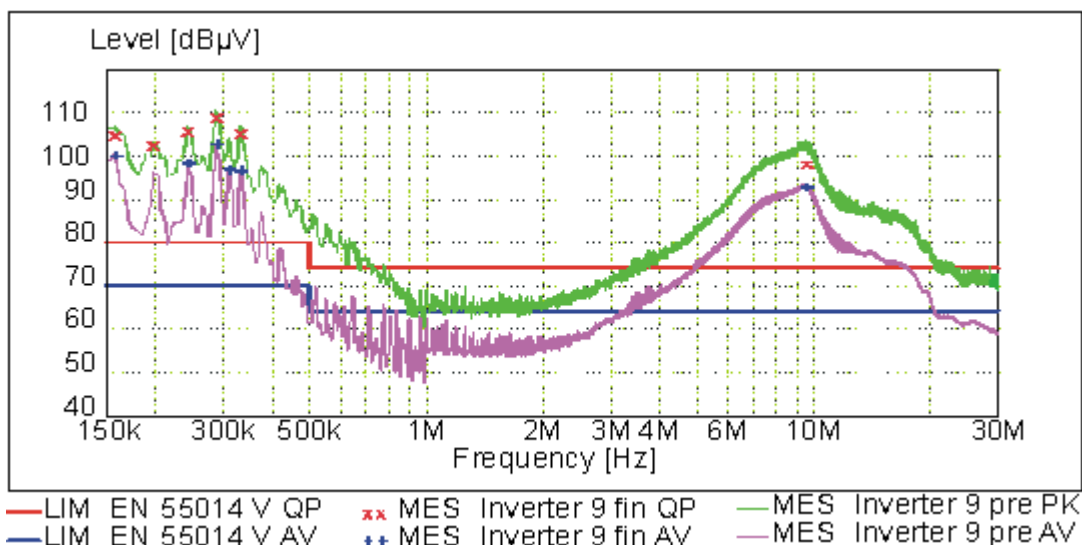


Bild 11 Funkstörspannung auf der DC- Leitung mit Grenzwertüberschreitung (Originalprotokoll)

Als Ergebnis zur EMV- Problematik kann festgestellt werden, dass die Definition von Grenzwerten der Funkstörspannung bzw. der Funkstörleistung auf DC- Leitungen für PV-Wechselrichter einer dringenden Lösung bedarf. Aufgrund neuer Technologien und der damit verbundenen Taktfrequenzerhöhung entstehen Störungen in bisher nicht beachteten höheren Frequenzbereichen. Diese müssen bei zukünftigen Normungsaktivitäten berücksichtigt werden. Entstörmaßnahmen auf DC- Leitungen sind nur dann wirklich erfolgreich, wenn ein guter Massebezug gegeben ist. Photovoltaische Inselsysteme erfordern hier, insbesondere bei Anwendung der Wechselstromtechnik und der Verwendung von 50/ 60 Hz Standardkomponenten, neue Lösungskonzepte. Es besteht ein dringender Entwicklungsbedarf.

3.2.5 Ausfallhäufigkeit von elektronischen Bauelementen

Die Qualitätssicherung bei elektronischen Baugruppen oder Geräten findet auf unterschiedlichen Ebenen und in definierten organisatorischen, prüftechnischen, statistischen und fehleranalytischen Zusammenhängen statt. Nach ersten Rechercheansätzen bei Wechselrichterherstellern über den Weg ihrer Produkte wurde schnell klar, daß es sehr unterschiedliche Strategien der Qualitätssicherung in den Unternehmen gibt. Ein belastbarer Vergleich war bisher nicht möglich, weil die



Problematik der Fehlerquote beim Herstellungsprozeß sowie die Rücklaufrate im Garantiefall streng gehütete Interna sind.

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich deshalb auf eine Musteruntersuchung eines marktverfügbaren Wechselrichters bezüglich seiner Gerätezuverlässigkeit/ Lebensdauer durch Bewertung statistischer Aussagen von Bauelementeherstellern (Zuverlässigkeitskennwerte), den aufbau- und verbindungstechnischen Einflüssen sowie meßtechnischer Erkenntnisse unter den vorgegebenen Fertigungs- und Anwendungsbedingungen.

In Kooperation mit dem ICR Jena /9/ entstand eine erste Aussage als „Zuverlässigkeitsspezifikation für Wechselrichter“, die als methodisches Arbeitspapier Verwendung fand, jedoch noch umfangreicher statistischer Daten bedarf. Insbesondere Informationen zum qualitätstechnischen Durchgriff auf Zulieferer, die statistische Erfassung konkreter Ausfälle aktiver Bauelemente als Folge unbekannter Lastwechsel nach Frequenz, Amplitude und Zykelzahl kann eine höhere Belastbarkeit einer Voraussage ermöglichen.

Im konkreten Fall wurden röntgenografische und metallografische sowie mikroskopische Oberflächenuntersuchungen an den industriell gefertigten Leiterplatten durchgeführt. Die Lotmengen pro Lötpad hatten die industrieübliche Streuung. Nach Vorgabe der Lastwechsel und der Temperaturbegrenzungen konnte für das

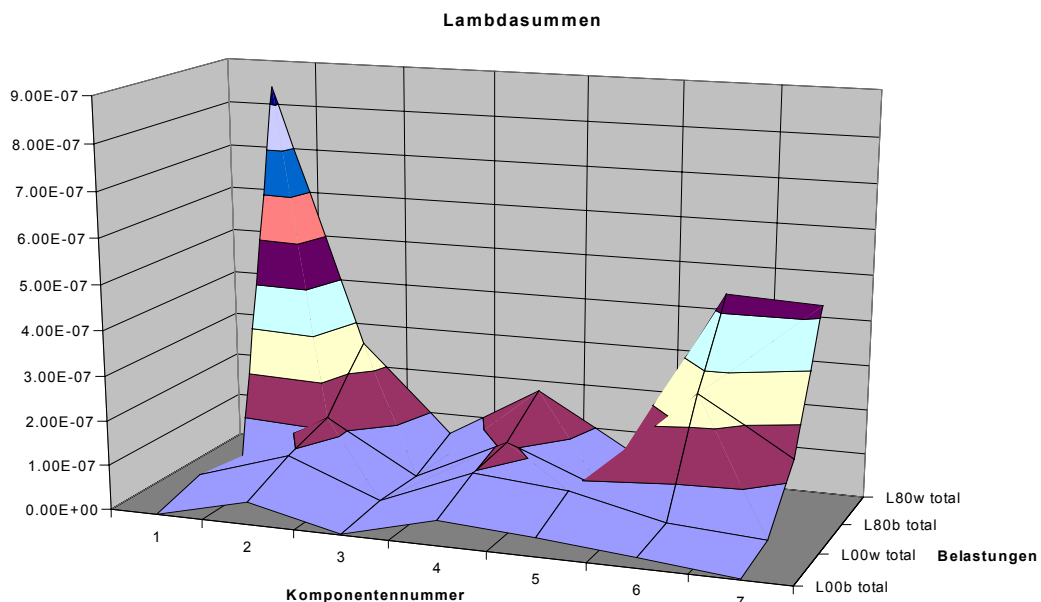


Bild 12 Aufsummierte Gesamtausfallraten für die Bauelementegruppen:

1- PLCC68, 2- IC's, disk. HL, 3- Si-Dioden, 4- Ta-C, 5 –Folien-C, 6- Festwid., 7-MLC



Mustergehäufigkeit von einer mittleren Funktionsdauer bis zum Eintritt eines gravierenden Fehlers zwischen $2,1 \times 10^5$ h (bei 80 °C und Vollast) und $1,1 \times 10^7$ h (bei 0°C und Minimallast) für eine Vertrauensgrenze von 75% ausgegangen werden. Ein erfreuliches Ergebnis, wenn nicht die Problematik der Vertrauensgrenze wäre. Für die Industriepraxis sind solche Aussagen schwierig umsetzbar.

Als wesentlich praktikabler ist die im Bild 12 dargestellte Häufigkeitsverteilung von Gesamtausfallraten für Bauelementgruppen anzusehen.

Die Grafik beschreibt die wesentlichen Beiträge einiger Bauelemente an den Ausfallwahrscheinlichkeiten unter verschiedenen extremen Einsatzbedingungen. Besonders erwähnenswert erscheint die Aussage, daß die Festwiderstände und die MLC's zu den möglichen Langzeitfehlern am meisten beitragen. Verifiziert werden müßten diese Aussagen durch die Untersuchung von tatsächlichen Ausfällen mit Ursachenforschung. Dann erst kann auf die wirklichen Schwachstellen der Geräte geschlossen werden.

Resümierend konnten folgende grundsätzliche Empfehlungen ausgesprochen werden: Konzipierung kleiner Bauteilsortimente, Nutzung risikobeurteilter Bauteile und Technologien, Beschaltung aller PIN's (auch unbenutzte Logikeingänge), Konzipierung niedriger Chiptemperaturen, Verwendung von Si- Dioden, niedrige Arbeitstemperaturen und Spannungen an Widerständen und Kondensatoren, störtechnische Trennung der Schnittstellen, Entkopplung langer Signalleitungen, LP-Design mit guter Prüfbarkeit, Reihenfolge von Ein- und Ausschaltvorgängen.

4 Konsequenzen - mögliche oder notwendige

Photovoltaische Wechselrichter haben trotz stetiger Weiterentwicklung und Implementierung neuer Konzepte, Technologien und Features ein noch lange nicht ausgeschöpftes Entwicklungspotential. Zur Erfüllung der IEC 62093 (Entwurf Oktober 2001) werden Bauart- Prüfungen notwendig, die nach unseren Untersuchungen von nur wenigen marktverfügbaren Produkten schon jetzt in allen Punkten erfüllt werden.

D.h. als notwendige Konsequenz, dass Nachbesserungen notwendig werden. Im Extremfall kann es auch möglicherweise zu Rücknahmen vom Markt führen. Das ist auch ein Grund, warum bereits in dieser frühen Phase das ISET diese bisher nicht üblichen Untersuchungen durchgeführt hat und die Ergebnisse verallgemeinert der Fachöffentlichkeit vorstellt.

Bezüglich der elektromagnetischen Verträglichkeit von Wechselrichtern beinhaltet der o.g. Normentwurf leider nicht die aktuellen Normvorschläge des ISET, die in



gemeinsamer Abstimmung mit dem ISE Freiburg, dem ARSENAL Wien und der Fachhochschule Burgdorf (CH) bei der IEC eingereicht wurden.

Daraus ergibt sich die mögliche Konsequenz, dass zu einem späteren Zeitpunkt weitere Normänderungen stattfinden werden, mit Einfluss auf weitere Prüfprozeduren einschließlich Grenzwerten.

Im Rahmen des Wechselrichterworkshops werden diese Normvorschläge vorgestellt. Damit sollen die Wechselrichterhersteller gleichberechtigt in einer sehr frühen Phase über Vorschläge und Hintergründe neuer Normentwürfe informiert werden.

Der Wechselrichterworkshop soll, bei Einverständnis der Beteiligten, als künftige Informations- und Arbeitskreisplattform in regelmäßigen Zeiträumen stattfinden. Die inhaltliche Gestaltung sollte durch allgemein interessierende, aber anspruchsvolle Themen, Erkenntnisse, Informationen aus Wissenschaft, Technik/ Industrie, Markt, Normung und Förderpolitik geprägt sein.

5 Literatur

- /1/ C. Bendel et al., „Qualitätssicherung bei der Entwicklung von photovoltaischen Wechselrichtern“, 16.Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein 2001
- /2/ Fa. Kunz Solartec et al., „Korrosionsschutzprobleme in PV- Systemen“ (Studie), Kassel 2001
- /3/ H. Georg, „Sicherheitsprobleme bei PV- Anlagen“(Informationsgespräch), Sprecher der Sicherheitsingenieure der EVU Deutschland, Kassel, 09/2001
- /4/ Verband der Elektrizitätswirtschaft (Hrsg.), „Eigenerzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz – Richtlinie für Anschluss und Parallelbetrieb von Eigenerzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz“, Frankfurt/M., VWEW Energieverlag, 2001
- /5/ P. Funtan, et al., „Untersuchungen zur Entwicklung photovoltaischer Kompaktgeräte- und Kleinsysteme“ (Zwischenbericht), ISET- Kassel 2000
- /6/ N. Henze et al., „Hochfrequenzeigenschaften von photovoltaischen Generatoren- Ausbreitung von Funkstörungen in Photovoltaikanlagen, 15. Symposium photovoltaische Solarenergie, Staffelstein 2000



- /7/ J. Kirchhof et al., „Elektromagnetische Verträglichkeit und Sicherheitsdesign für photovoltaische Systeme“ (Zwischenbericht), ESDEPS, ISET- Kassel 2000
- /8/ Kommentar zum Normentwurf „IEC 62093 Balance-of-system components for photovoltaic systems – design qualification“, ISET 07/2001
- /9/ H. Hieber, „Zuverlässigkeitsspezifikation für Wechselrichter“, ICR-Jena, 1999