



Untersuchungen zur Qualitätssicherung bei der Entwicklung von PV- Wechselrichtern

C. Bendel, P. Funtan, J. Kirchhof
Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V.
Königstor 59, 34119 Kassel
Tel.: (0561) 7294-226, Fax: (0561) 7294-200
e-mail: cbendel@iset.uni-kassel.de

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Qualitätssicherung bei photovoltaischen Komponenten sollte bereits bei der Konzeption der Produktentwicklung beginnen, bis zur Serienreife der Produkte einen unbedingten Schwerpunkt bilden und bei der Markteinführung ein besonders deutliches Verkaufsargument sein. Diese Strategie bei langlebigen investiven Produkten konsequent anzuwenden ist eine logische und marktrelevante Konsequenz.

Photovoltaische Komponenten und Anlagen sind besonders geeignet unter diesem Reglement konzipiert, entwickelt und produziert zu werden. In der Praxis wird diese Vorgehensweise sehr unterschiedlich umgesetzt, was sich letztlich in der Funktion und Zuverlässigkeit der Produkte widerspiegelt. Auf der Grundlage belastbarer 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 die rasanteste 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 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 wichtigsten Ursachen sowie Folgen für die Geräteentwicklung.

Die Zielsetzung dieser Untersuchungen besteht in der Ermittlung noch bestehender funktionstechnischer Defizite bei marktverfügbaren PV- Wechselrichtern bzw. "Standard"- PV- Systemen, der exklusiven Übergabe der ermittelten Ergebnisse an die entsprechenden Hersteller zwecks Produktnachbesserung, Erarbeitung von verallgemeinerungswürdigen technischen Lösungsansätzen bzw. Reglements/ Normentwürfen sowie deren Veröffentlichung in Fachkreisen.

2 Untersuchungsergebnisse

2.1 Temperaturbelastung von elektronischen Bauelementen

Der Einsatz von elektronischen Bauelementen auf Leiterplatten oder anderen industriellen Substraten erfolgt nach bekannten Richtlinien bzw. physikalischen Grundsätzen. Oft unterliegen aber diese Leiterplattenarchitekturen einem Entwicklungs- und Kostendruck, so daß Bauelementeauswahl oder Leiterplattenlayout inkl. Bauelementeanordnung nicht optimal sind, was sich auf die Zuverlässigkeit und Lebensdauer unmittelbar auswirkt. Die Bilder 1a und 1b zeigen die Anordnung von Kondensatoren in der

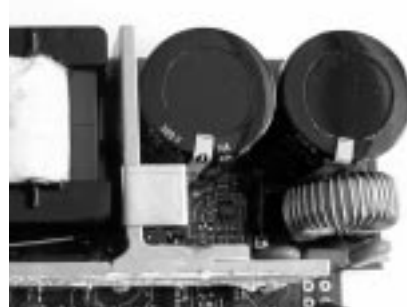




Bild 1a (links) Thermographiaufnahme von 1b (rechts) Leiterplatte mit Kondensatoren

unmittelbaren Nähe eines Kühlkörper mit Leistungshalbleitern, der bereits im Betriebszustand bei geöffnetem Gehäuse eine Temperatur von 48,8 °C aufweist ($T_{\text{Um}} 21,5 \text{ °C}$). Der Kondensator wird in dieser Bauelementeanordnung auf 38 °C aufgeheizt. Als Folge wird die Lebensdauer der Elektrolytkondensatoren und damit die Funktion des PV-Wechselrichters bei einer vom Hersteller angegebenen Einsatztemperatur von 60 °C für ein geschlossenes Gerät begrenzt sein.

Ein anderes Untersuchungsergebnis zeigen die Bilder 2a und 2b. Ebenfalls auf einer Leiterplatte sind aktive elektronische Bauelemente im Original (rechts) und als Thermographie (links) dargestellt. Diese erreichen bei geöffnetem Gerät ($T_{\text{Um}} 22 \text{ °C}$) bereits eine Betriebstemperatur von 70,8 °C. Bei einer zulässigen Umgebungstemperatur für das Gerät von max. 35 °C sollen die Bauelemente bei geschlossenem Gehäuse mittels eines Lüfters funktionstüchtig gehalten werden. Ungünstig erscheint dieses Konzept unter den Gesichtspunkten „niedriger Eigenenergiebedarf“ und „Zwangskühlung“.

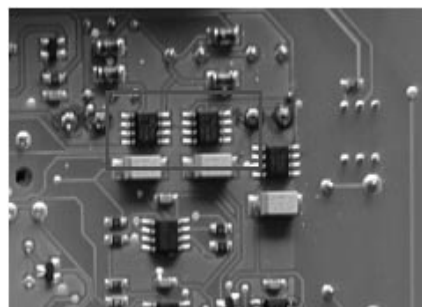


Bild 2a:
Thermographiaufnahme einer Leiterplatte mit aktiven elektronischen Bauelementen

Bild 2b:

2.2 Wärmeabführung durch Kühlkörper und Metallgehäuse

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 langfristige Funktionsausfälle nicht auszuschließen /FUNTAN et al. 1999/.



In Bild 3 ist ein interessantes Gehäusedesign in einer Thermographieaufnahme dargestellt. Die Gehäuseoberfläche ist unterschiedlich gestaltet.

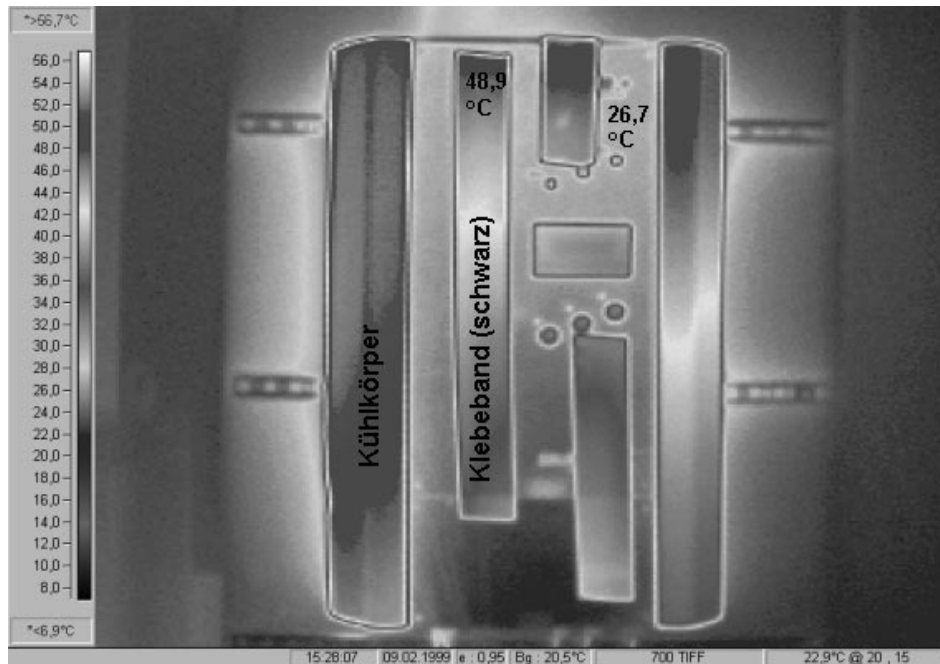


Bild 3: Thermographieaufnahme eines PV- Wechselrichters bei $T_{\text{Umg}} 22,7\text{ °C}$

Aufgrund der metallisch blanken Frontseite ($\epsilon = 0,22$) wird hier kaum die innere Gehäusewärme abgestrahlt, obwohl die echte Gehäusetemperatur höher ist. 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 $\epsilon = 0,95$. Um dies zu verdeutlichen wurden auf der blanken metallischen Frontseite schwarze Klebstreifen befestigt und damit regional der Emissionsfaktor verändert. Die Thermographie zeigt die echte Oberflächentemperatur und damit ein besseres Abstrahlungsverhalten. Design und Funktionalität müssen nicht einander ausschließen, wie beispielhaft im Bild 3 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 Wär-



meabfuhr bei einigen marktverfügbaren PV- Wechselrichtern teilweise Probleme darstellen. Andererseits gibt es gute Beispiele für Design und Funktionalität.

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 des 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 4 stellt den Meßaufbau im Testfeld dar / HENZE et al/.



Bild 4: Messung der elektromagnetischen Abstrahlung eines PV- Generators

In Bild 5 wird die Funkstörfeldstärke eines PV- Generators, die im Test von einem PV- Wechselrichter verursacht wurde, im Vergleich zur Hintergrundstrahlung dargestellt.

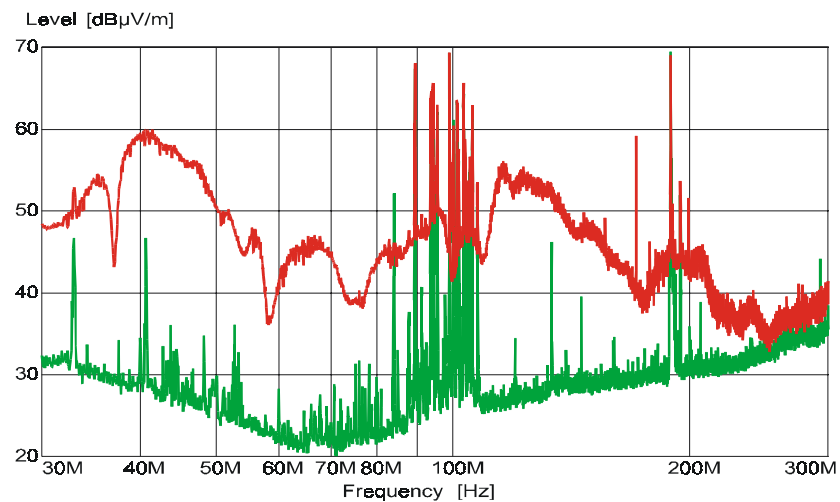


Bild 5: Funkstörfeldstärke einer realen PV- Anlage im Frequenzbereich von 30- 300 MHz in 3 m Meßentfernung



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 dienten 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.

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 6). 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 (Bild 7)/Kirchhof et al./.

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 in Bild 7 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 Abstimmungsgespräche, vorbereitend für europäische Normungsaktivitäten.

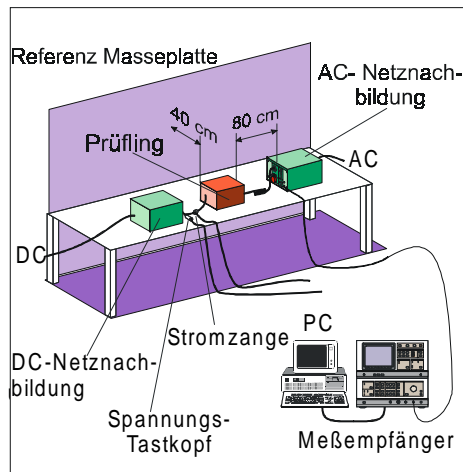


Bild 6: Meßaufbau für DC Leitungen unter Laborbedingungen

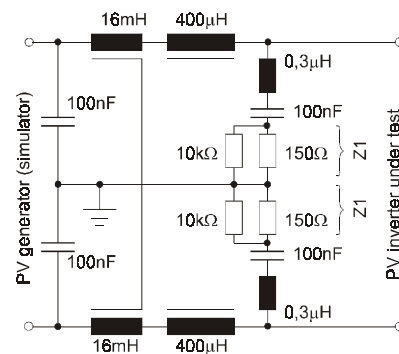


Bild 7: DC- Netznachbildung als Normvorschlag für PV- Wechselrichter

Die folgenden Bilder 8 und 9 zeigen reale Meßergebnisse von Funkstörspannungen, welche im Rahmen o. g. Prüfungen durch marktverfügbare Wechselrichter verursacht wurden. Der Meßaufbau erfolgte nach Bild 7 und wird derzeit im akkreditierten Meßlabor des ISET für informative Prüfungen zur Qualitätssicherung genutzt.

Als Zwischenergebnis 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 Inselssysteme erfordern hier, insbesondere bei Anwendung der Wechselstromtechnik und der Verwendung von 50/ 60 Hz Standardkomponenten, neue Lösungskonzepte. Es besteht ein dringender Entwicklungsbedarf.

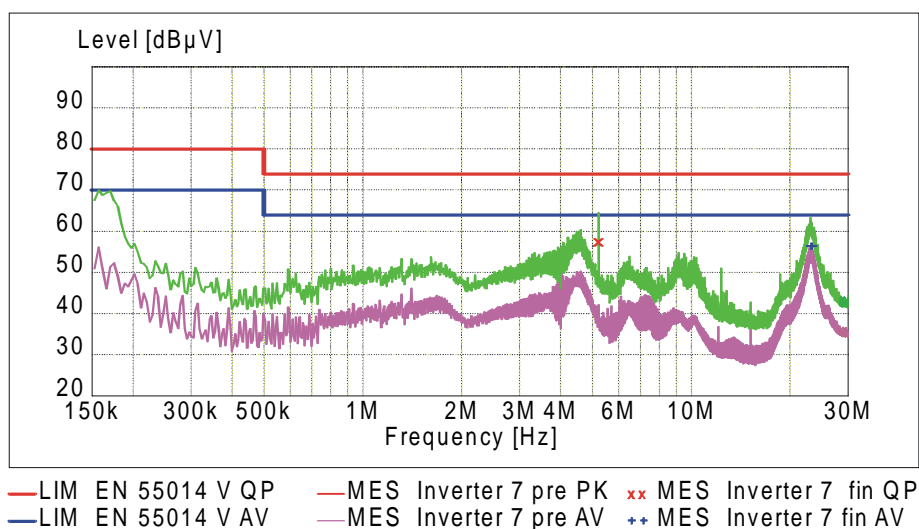


Bild 8: Funkstörspannung auf der DC- Leitung eines korrekt arbeitenden PV- Wechselrichters (Originalprotokoll)

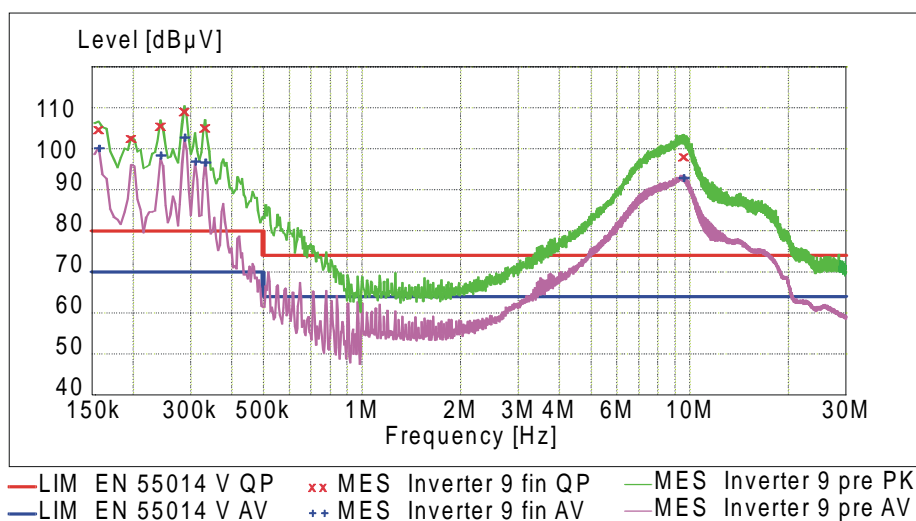


Bild 9: Funkstörspannung auf der DC-Leitung mit Grenzwertüberschreitung (Originalprotokoll)



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 Rücklafrate 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 /HIEBER 1999/ 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 Zyklezahl 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 Mustergerät 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 10 dargestellte Häufigkeitsverteilung von Gesamtausfallraten für Bauelementegruppen anzusehen.

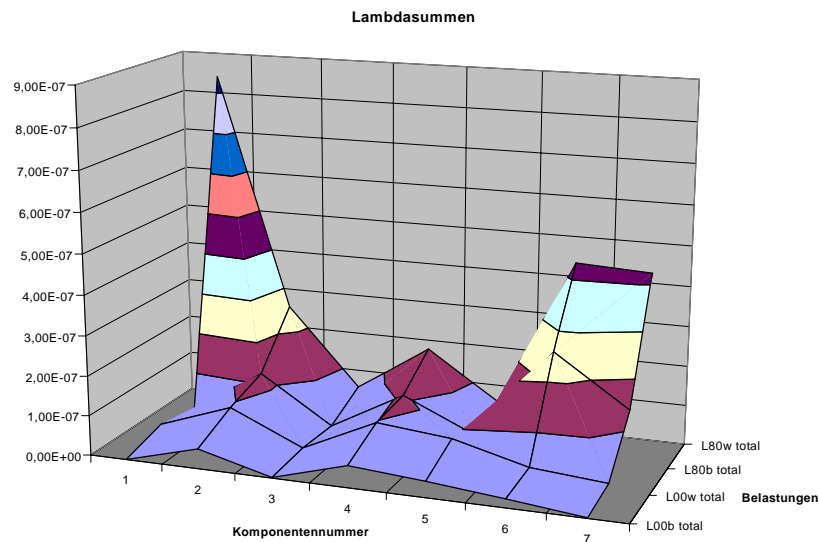


Bild 10: Aufsummierte Gesamtausfallraten für die Bauelementegruppen
1: PLCC68, 2: ICs, disk. HL, 3: Si-Dioden, 4: Ta-C, 5: Folien-C, 6: Festwid., 7: MLC

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 MLCs 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 PINs (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.



3 Zusammenfassung und Perspektiven

Die bisher ermittelten Arbeitsergebnisse und gewonnen Erkenntnisse stellen den Anfang einer umfangreichen Untersuchungskampagne dar, die direkten Einfluß auf die Qualitätssicherung von Produktentwicklungen photovoltaischer Komponenten und – Systemen nehmen soll. Folgende erste Schlußfolgerungen können gezogen werden:

- Die Beachtung der klimatischen Einsatzbedingungen hat maßgeblichen Einfluß auf die Zuverlässigkeit von PV- Komponenten und deren Zusammenspiel im System.
- PV- Anlagen sind insbesondere aufgrund der großen Oberfläche der PV- Generatoren besondere elektrotechnische Installationen, die auch eine besondere Nutzungsstrategie erforderlich machen.
- Prüfvorschriften für PV- Wechselrichter sind auf die DC- Seite zu erweitern.
- Neue Technologien und Arbeitsfrequenzbereiche erfordern neue Entstörkonzepte.
- Zuverlässigkeits-/ Lebensdaueraussagen von Komponenten oder Baugruppen sind durch Schwachstellenanalysen zu verifizieren.

4 Literatur

- | | |
|------------------------|---|
| /FUNTAN et al.1999/ | Funtan, P. et al., Grundlegende Untersuchungen zur Entwicklung photovoltaischer Kompaktsysteme, Abschlußbericht, ISET-Kassel 1999 |
| /HENZE et al. 2000/ | Henze, N. et al., Hochfrequenzeigenschaften von photovoltaischen Generatoren- Ausbreitung von Funkstörungen in Photovoltaikanlagen, 15. Symposium photovoltaische Solarenergie, Staffelstein 2000 |
| /KIRCHHOF et al. 2000/ | Kirchhof, J. et al., Elektromagnetische Verträglichkeit und Sicherheitsdesign für photovoltaische Systeme, Zwischenbericht ESDEPS, Kassel 2000 |
| /HIEBER 1999/ | Hieber, H., Zuverlässigkeitsspezifikation für Wechselrichter, ICR, Jena 1999 |