

# **Zuverlässigkeitsbetrachtung von netzgekoppelten Photovoltaik-Wechselrichtern mit kleiner Leistung**

Norbert Henze, Jie Liu

Institut für Solare Energieversorgungstechnik, ISET e.V

Tel.: 0561 7294 219 , Fax: 0561 7294 400

E-Mail: [nhenze@iset.uni-kassel.de](mailto:nhenze@iset.uni-kassel.de)

Internet: [www.iset.uni-kassel.de](http://www.iset.uni-kassel.de)

## **1 Zusammenfassung**

Photovoltaische Anwendungen spielen bei der Deckung des globalen Energiebedarfs eine zunehmend bedeutende Rolle. Hierfür sind PV Systeme mit hoher Zuverlässigkeit erforderlich. Neben den bisher weit verbreiteten Systemtopologien mit String- und Zentralwechselrichtern können in den kommenden Jahren Solarstromsysteme basierend auf hoch zuverlässigen und langlebigen AC Modulen mit integrierten Wechselrichtern eine zentrale Rolle spielen. Verglichen mit der Lebensdauer von PV Modulen von mehr als 20 Jahren, muss auch der Wechselrichter eine hohe Zuverlässigkeit aufweisen, um die Ausfallraten der Systeme gering zu halten. Dieser Beitrag präsentiert zunächst einen einstufigen 3-Phasen Wechselrichter kleiner Leistung, der sich zur Integration in ein PV-Modul eignet. Neben den allgemeinen Kenndaten dieses Wechselrichters liegt der Schwerpunkt insbesondere auf der Analyse von statistischen Ausfallraten. Die hohe Zuverlässigkeit kann durch ein optimiertes Gehäusedesign, integrierte leistungselektronische Komponenten (Power Module) und die Verwendung von Folienkondensatoren anstelle von konventionellen Elektrolytkondensatoren erreicht werden, um nur einige Beispiele zu nennen.

## **2 Einleitung**

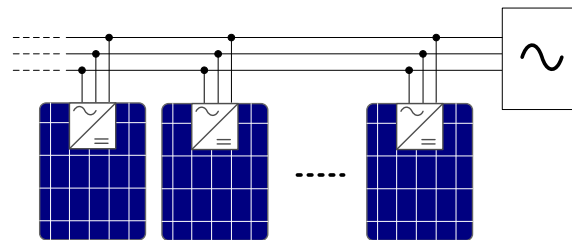
Eine hohe Zuverlässigkeit unter Einbeziehung aller Komponenten ist bei der Gestaltung von PV-Systemen von großer Bedeutung. Dabei müssen jedoch auch Randbedingungen wie ein hoher Umwandlungswirkungsgrad sowie niedrige Kosten berücksichtigt werden. Photovoltaik-Module werden heute mit einer Leistungsgarantie von mitunter über 20 Jahren verkauft und haben in Alterungstests sehr niedrige Ausfallraten demonstriert. In verschiedenen Untersuchungen wurden MTBF-Werte (Mean Time Between Failure, mittlerer Ausfallabstand) von 500 bis 6000 Jahren ermittelt [1].

Bei den Wechselrichtern (WR) sind hingegen Herstellergarantien von nur 5-10 Jahren üblich, eine Garantieverlängerung gibt es nur gegen Aufpreis, der jedoch in die Kostenkalkulation eingeschlossen werden muss. Die Lebensdauer eines AC-Moduls wird im Wesentlichen von dem Wechselrichter bestimmt. Daher sind die Anforderungen an die Zuverlässigkeit insbesondere für modulintegrierten Wechselrichter (Module Integrated Converter, MIC) sehr hoch, da eine Wartung oder ein Austausch der Geräte nicht rentabel wäre.

Für netzgekoppelte PV Systeme werden gewöhnlich mehrere PV Module je nach Anforderung des Wechselrichtereingangs seriell und/oder parallel verschaltet. Typischerweise können Systemtopologien mit Zentralwechselrichtern, (Multi-) Stringwechselrichtern und Modulwechselrichtern unterschieden werden. Modulintegrierte Wechselrichter sind mit einem einzelnen PV-Modul verbunden und besitzen ein individuelles MPP Tracking, so dass jedes Modul im optimalen Arbeitspunkt betrieben werden kann, womit eine höchstmögliche Effizienz erzielt wird.

Systemtopologien mit Modulwechselrichtern (Abbildung 1) besitzen folgende Vorteile [2]:

- Minimale Mismatch-Verluste
- Individuelles MPP Tracking für jedes PV-Modul
- Keine DC-Verkabelung
- Kostenreduktion durch Massenproduktion
- Einfache Anlagenplanung und Installation



**Abbildung 1: Systemtopologie mit modulintegrierten Wechselrichtern.**

Um die erwähnten Vorzügen von MIC zu erzielen ist eine hohe Zuverlässigkeit der Systeme die wichtigste Voraussetzung. Da der Wechselrichter direkt mit dem Modul verbunden ist und somit extremen klimatischen Bedingungen wie hohe Temperatur und Luftfeuchte ausgesetzt sein kann, muss er trotz dieser ungünstigen Einflüsse eine ausgezeichnete Zuverlässigkeit aufweisen. Um die hohen Zuverlässigkeitsanforderungen zu erfüllen, wurde im Rahmen des EU-Projekts PV-MIPS (FP 6, Contract Number TREN/04/FP6EN/S07.34959/503123) ein Wechselrichter kleiner Leistung (250W) entwickelt, der sich für die Modulintegration eignet und einen hohen Wirkungsgrad aufweist [3]. In Labormessungen wurde ein maximaler Wirkungsgrad von 96,5% ermittelt. Ein optimiertes thermisches Management gewährleistet unter den gegebenen anspruchsvollen Umgebungsbedingungen eine hohe Zuverlässigkeit. Der Beitrag konzentriert sich im Folgenden auf die Analyse und Überprüfung der Zuverlässigkeit mit Hilfe von mathematischen Modellen sowie die Simulation des ther-

mischen Verhaltens. Die Zuverlässigkeitsanalyse wird anhand drei verschiedener Verfahren durchgeführt und verglichen. Die thermischen Eigenschaften werden durch FEM Simulation charakterisiert.

### 3 Ausgewählter Ansatz und Topologie

Um die Nachteile und Beschränkungen bisheriger Modulwechselrichter zu überwinden, wurde eine Wechselrichtertopologie gemäß Abbildung 2 gewählt [4]. Aufgrund der dreiphasigen Netzanbindung kann die Größe der Speicherelemente im DC Zwischenkreis des Wechselrichters drastisch reduziert werden. Es sind keine Elektrolytkondensatoren notwendig, die generell bei hohen Temperaturen einer beschleunigten Alterung unterliegen. Die Umsetzung eines einstufigen Konzepts wird durch speziell angefertigte hochvolt PV-Module ermöglicht. Durch die vom PV Modul bereitgestellte hohe Spannung kann auf einen Hochsetzsteller am Wechselrichtereingang verzichtet werden, was eine geringer Bauteilanzahl und damit eine höhere Zuverlässigkeit zur Folge hat.

Der vorgeschlagene Wechselrichter basiert auf einer CSI (Current Source Inverter) Topologie mit Pulsweitenmodulation (PWM). Die Wechselrichterbrücke wird aus 6 rückwärts-sperrenden Schaltern ( $S_1 - S_6$ ) gebildet, die aus einem Transistor und einer Diode in jedem Brückenarm bestehen. Der Zwischenkreis enthält eine Induktivität als Hauptspeicherelement. Obwohl der CSI höhere Leitungsverluste im Vergleich zum VSI mit Hochsetzsteller aufweist, kann dieser Nachteil durch geringere Schaltverluste und eine niedrigere Bauteilanzahl ausgeglichen werden [5]. Andererseits ist der CSI für MOSFETs gut geeignet, da ihre internen Body-Dioden, die allgemein ein schlechtes Verhalten hinsichtlich der Schaltverluste aufweisen, während der Kommutierung inaktiv sind.

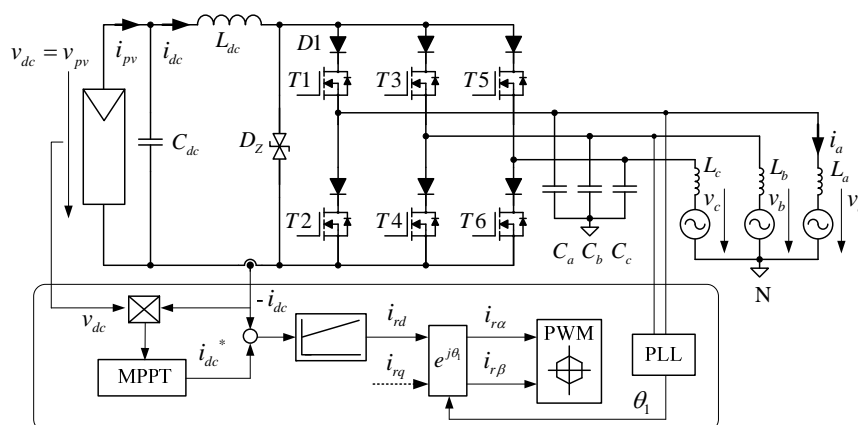


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Current Source Inverters (CSI) mit Regelstruktur.

## 4 Ansätze zur Zuverlässigkeitsvorhersage

### 4.1 Lebensdauerbetrachtungen

Die „Zuverlässigkeit“  $R(t)$  ist definiert als die statistische Wahrscheinlichkeit, dass ein Produkt während seiner sog. „Lebensdauer“ oder Brauchbarkeitsdauer  $T_B$  unter den spezifizierten Umgebungsbedingungen ohne Ausfall bleibt. Für die verwendeten Bauteile kann eine statistische Ausfallrate  $\lambda$ , die üblicherweise in der Einheit „FIT“ (Anzahl der Fehler in  $10^9$  Stunden) angegeben wird, den Datenblättern oder Standards (z.B. MIL-HDBK-217F) entnommen werden. Summiert man die Ausfallraten zusammen, erhält man die gesamte MTBF des Geräts.

$$R(t) = e^{-\frac{T_B}{MTBF}} = e^{-T_B \lambda}$$

Der Zusammenhang zwischen der Zuverlässigkeit und MTBF wird in Abbildung 3 gezeigt.

Im Wesentlichen kann die Zuverlässigkeitsanalyse in zwei Kategorien eingeteilt werden, die auf empirischen Modellen bzw. auf physikalischen Versagensmodellen (Physics-of-failure) beruhen [6]. Empirische Methoden liefern relativ genaue Modelle zur Vorhersage der Zuverlässigkeit von elektronischen Systemen. Die Vorhersage anhand von physikalischen Versagensmodellen beruht auf internen Ausfallmechanismen der Bauteile, die beispielsweise durch elektrische oder thermische Beanspruchung hervorgerufen werden. Die Auswahl der Vorhersagemethode richtet sich nach den Umgebungsbedingungen des Systems sowie nach Produktionsanforderungen. Die Ausfallrate einiger typischer Bauelemente zeigt Tabelle 1.

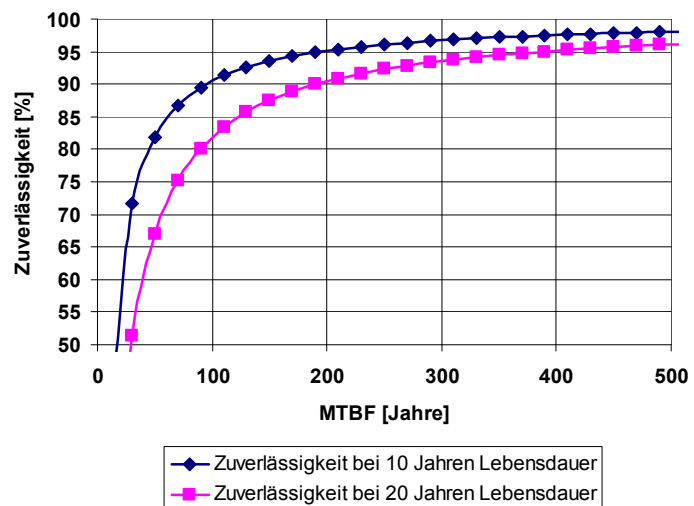


Abbildung 3: Zuverlässigkeit in Prozent während einer Brauchbarkeitsdauer von 10 bzw. 20 Jahren.

Beschreibung	Typ	FIT in 10 <sup>9</sup> Stunden	MTBF in Jahren
Widerstand	Kohle	10	11415
	Draht	25	4566
	Dünnschicht	50	2283
Kondensator	Elektrolyt	1500	76
	Tantal	1000	114
	Papier	500	228
	Keramik	250	456
	Folie	60	1900
Diode	Silizium	50	2283
Transistor	Silizium, diskret	80	1426
Drossel	Kupferwicklung	50	2283
Transformator	Kupferwicklung	200	570
Verbindung	gelötet	10	11415
Stecker	Pro Pin	50	2283

Tabelle 1: Typische Ausfallraten (FIT) einiger Bauelemente nach MIL-HDBK-217F (40°C, 50% Spannungsbelastung, Quality Factor πQ=10, Environmental Factor πE=1)

#### 4.1.1 Kondensator Lebensdauer

Tabelle 1 zeigt, dass Elektrolytkondensatoren einen negativen Einfluss auf die Systemzuverlässigkeit haben, während Folienkondensatoren durch die besseren Betriebseigenschaften die Zuverlässigkeit begünstigen. Die Zuverlässigkeit eines Kondensators wird durch die Temperatur wesentlich beeinflusst. Nach der allgemeinen 10°-Regel verdoppelt sich die Lebensdauer jeweils, wenn die Betriebstemperatur gegenüber dem Nennwert um 10° reduziert wird. Unter Berücksichtigung der Einbausituation kann die Lebensdauer des Kondensators wie folgt dargestellt werden:

$$T_{OL} = T_{SL} \cdot \alpha_V \cdot 2^{\frac{T_{ref} - T_{op}}{10}}$$

$T_{OL}$	Lebensdauer bei Betriebstemperatur
$T_{OL}$	Lebensdauer unter Nennbedingungen
$\alpha_V$	Spannungsbelastungsfaktor
$T_{ref}$	Nenn-Temperatur
$T_{op}$	Betriebstemperatur

Die berechnete Lebensdauer verschiedener Kondensatoren ist in Abbildung 4 dargestellt. Weiterhin ist der ESR (Equivalent Series Resistant) eine wichtige Einflussgröße bei der Bestimmung der Zuverlässigkeit von Elektrolytkondensatoren. Der ESR kann durch folgende Beziehung ausgedrückt werden.

$$\frac{ESR}{ESR_0} = \left( \frac{V_0}{V} \right)^2$$

$ESR_0$ : anfänglicher Wert  
 $V_0$ : anfängliches Volumen des Elektrolyts

Er verdreifacht sich, wenn das Volumen des Elektrolyts um 40% reduziert wird. Daraus ergibt sich eine weitere Beeinträchtigung der Lebensdauer [8]. Jedoch ist der

ESR von Folienkondensatoren gegenüber Elektrolytkondensatoren geringer wie Tabelle 2 zeigt.

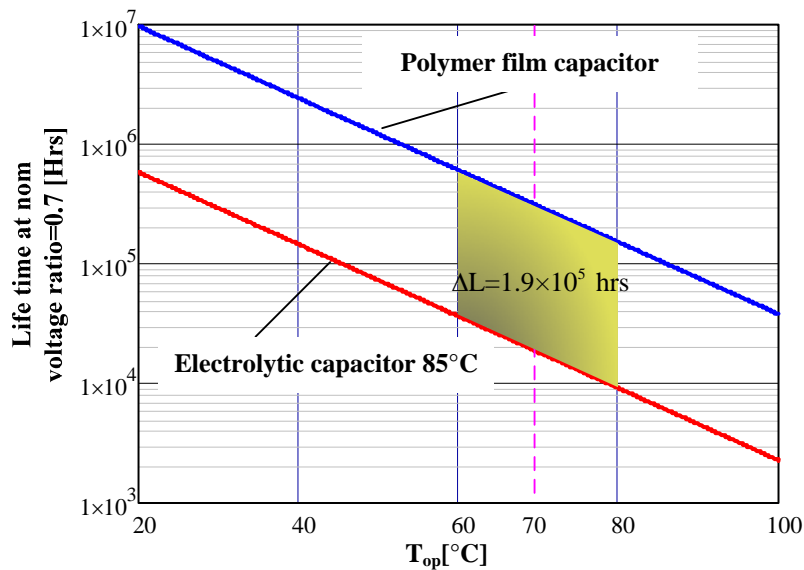


Abbildung 4: Lebensdauer verschiedener Kondensatoren

Dielectric	Dissipation Factor, DF	ESR (1uF cap) ohms
Aluminum Electrolyte (50V)	10% at 120 Hz	132,629
Polyester	1% at 120 Hz	1,592
Polypropylene	0,1% at 1KHz	0,1592

Tabelle 2: ESR Vergleich verschiedener Dielektrika.

Generell kann die maximale interne Temperatur  $T_{Cmax}$  näherungsweise berechnet werden über:

$$T_{Cmax} = T_a + I_{rm-dc}^2 \cdot R_{ESR}(T_C, f, DF) \cdot R_{th}$$

Darin bedeuten  $T_a$  die Umgebungstemperatur,  $R_{ESR}$  der tatsächliche ESR unter Berücksichtigung der Temperatur  $T_C$ , eines Frequenzfaktors  $f$  und des Verlustfaktors  $DF$  (Dissipation Factor).  $R_{th}$  ist der äquivalente thermische Widerstand. Daraus ergibt sich, dass unter gleichen Randbedingungen der Temperaturanstieg während des Betriebs von Folienkondensatoren gegenüber Elektrolytkondensatoren mit hohem ESR deutlich geringer ist. Die vorteilhafte Auswirkung auf die Lebensdauer zeigt Abbildung 4. In [9] wird die Lebensdauer von Folienkondensatoren anhand praktischer Experimente detailliert untersucht.

#### 4.1.2 Ausfallrate des Leistungsmoduls

Leistungselektronische Module (Power Modules, PM) sind heutzutage wichtige Komponenten für Stromversorgungen, elektrische Antriebe und Stromerzeugung aus

erneuerbaren Energien. Eine Vielzahl von innovativen Modulen wurde entwickelt, um die konventionelle diskrete Bauweise zu ersetzen. Damit konnte den Anforderungen eines wachsenden Marktes an Komponenten mit guten Betriebseigenschaften gerecht werden. Gleichzeitig konnte die Zuverlässigkeit von PM durch Fortschritte in der Halbleitertechnologie verbessert werden. Darüber hinaus kann mit PM der erforderliche Platzbedarf gegenüber diskreten Komponenten deutlich reduziert werden. Gemäß Abbildung 2 sind für die CSI Topologie 6 MOSFET und 6 Dioden in der Brücke erforderlich. Prinzipiell kann für diskrete Bauteile die Zuverlässigkeit anhand des Military Handbook MIL-HDBK-217F [7] unter Berücksichtigung der Betriebsbedingungen (Spannungs- und Temperaturbelastung) abgeschätzt werden. Die in diesem Handbuch beschriebene Methode ist seit etwa 40 Jahren die Basis der Zuverlässigkeitsvorhersagen. Es beinhaltet eine Reihe von empirisch entwickelten Ausfallraten-Modellen, welche auf historischen Bauelemente-Teilausfallraten für eine breite Palette von Bauteiltypen basieren. Seit 1995 wurde das Handbuch nicht mehr aktualisiert. Neue Technologien sind daher nicht erfasst. Aus diesem Grund wird in diesem Beitrag ein statistisches Verfahren zur Anwendung gebracht, das mit Hilfe der  $\chi^2$  (Chi-Quadrat) Verteilung die Ausfallraten von Bauelementen aus den Ergebnissen von Lebensdauertests ermittelt [13]. Dabei kann die Ausfallrate  $\lambda$  bei gegebener Vertrauensgrenze über folgende Formel berechnet werden:

$$\lambda = \frac{\chi_{1-\alpha, 2F+2}^2}{2 \times N \times t \times AF} \times 10^9$$

$\alpha$	untere Vertrauensgrenze
F	Fehlerzahl in getesteten Stichproben
N	Anzahl der getesteten Stichproben
t	Gewichtete mittlere Betriebszeit
AF	Beschleunigungsfaktor (Acceleration Factor)

Der Beschleunigungsfaktor AF berechnet sich aus:

$$AF = e^{\frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T+T_a} - \frac{1}{T+T_s} \right)}$$

T	273° Kelvin
T <sub>a</sub>	Umgebungstemperatur
T <sub>s</sub>	Beaufschlagte Temperatur beim Lebensdauertest

Die mit den Werten in Tabelle 3 berechneten Ausfallraten sind in Tabelle 4 dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Belastung des PM im Wechselrichter kann eine mittlere Ausfallrate angegeben werden [12]. Als Beispiel sind für den Standort Kassel die mittleren Betriebstemperaturen in Tabelle 5 dargestellt.

Gemäß  $\lambda_m = \sum_i \lambda_i \cdot h_i$  lassen sich die mittleren Ausfallraten berechnen. Für das Leistungsmodul sowie die diskreten Komponenten ergeben sich die folgenden mittleren Ausfallraten:

$$\lambda_{m,PM} = 0,0225/10^6 \text{ Std}$$

$$\lambda_{m,6MOS} = 0,00442/10^6 \text{ Std}$$

$$\lambda_{m,6Dioden} = 0,0375/10^6 \text{ Std}$$

	Parameter	Wert PM	Wert MOSFET	Wert Diode
Beschleunigungsfaktor	K	$8,6171 \times 10^{-5}$	$8,6171 \times 10^{-5}$	$8,6171 \times 10^{-5}$
	E <sub>a</sub>	1eV	0,7	0,7
	T <sub>s</sub>	125°C	90	90
Ausfallrate bei Testtemperatur	α	0,6	0,6	0
	F	'0' Fehler	-	-
	$\chi^2_{1-\alpha, 2F+2}$	1,833	-	-
	Nt	12000 Stunden	-	-
	λ	-	36	291

Tabelle 3: Parameter zur Berechnung der Ausfallrate.

Temperatur		λ <sub>1</sub> @0°C	λ <sub>2</sub> @10°C	λ <sub>3</sub> @20°C	λ <sub>4</sub> @30°C	λ <sub>5</sub> @40°C	λ <sub>6</sub> @50°C
Fehlerrate PM pro 10 <sup>6</sup> Std		$1,22 \times 10^{-4}$	$5,46 \times 10^{-4}$	0,00212	0,00818	0,0278	0,0877
Fehlerrate Diskrete Komponenten pro 10 <sup>6</sup> Hrs	6 MOSFETs	$1,35 \times 10^{-4}$	$3,86 \times 10^{-4}$	0,001	0,0026	0,006	0,0135
	6 Dioden	0,0011	0,0031	0,0083	0,021	0,049	0,109

Tabelle 4: Ausfallraten des Leistungsmoduls und diskreter Komponenten bei unterschiedlichen Temperaturen.

Umgebungstemperaturbereich T <sub>A</sub> (°C)	Mittelwert T <sub>A</sub> (°C)	Häufigkeit
-5 bis 5	0	h <sub>1</sub> = 4,1%
5 bis 15	10	h <sub>2</sub> = 17,26%
15 bis 25	20	h <sub>3</sub> = 14,25%
25 bis 35	30	h <sub>4</sub> = 20,55%
35 bis 45	40	h <sub>5</sub> = 30,14%
45 bis 55	50	h <sub>6</sub> = 13,7%

Tabelle 5: Über ein Jahr gemittelte Betriebstemperaturen für den Standort Kassel.

Nach [7] ergibt sich eine kombinierte Ausfallrate für ein Hybrid-Element bestehend aus den 6 MOSFETs und 6 Dioden gemäß:

$$\lambda_{\text{hybrid}} = [\lambda_{6\text{MOS}} + \lambda_{6\text{Dioden}}] \cdot [1 + 0,2\pi_E] \cdot \pi_F \cdot \pi_Q \cdot \pi_L$$

$$= \frac{10^{-6}}{\text{Std}} \cdot [0,00442 + 0,0357] \cdot [1 - 0,2 \cdot 0,5] \cdot 21 \cdot 3,1 \cdot 1 = 2,873/10^6 \text{ Std}$$

Daraus folgt für den mittleren gewichteten Ausfallabstand:

$$MTBF_{\text{hybrid}} = 1 / \lambda_{m,\text{hybrid}} = 0,348 \cdot 10^6 \text{ Std} = 40 \text{ Jahre}$$

$$MTBF_{PM} = 1 / \lambda_{m,PM} = 44,44 \cdot 10^6 \text{ Std} = 5037 \text{ Jahre}$$

Diese Abschätzungen verdeutlichen, dass das PM erheblich zur Zuverlässigkeit des Systems beitragen kann. Die dargestellten Ergebnisse basieren auf einer Vertrauensgrenze von 60%, einem Wert, die in den Angaben für Bauelemente oft verwendet wird. Dies bedeutet, dass der mittlere Ausfallabstand (MTBF) mit einer Wahrscheinlichkeit von 60% mindestens die oben angegebenen Werte erreicht. Diese Untersuchungen sind nur Richtwerte. Umfassende und detaillierte Untersuchungen wie Leistungszyklen, Einfluss der Bonddrähte und Herstellungsprozess werden in [14] durchgeführt.

### 4.2 Analyse der Systemzuverlässigkeit

Basierend auf den Anforderungen an den Modulwechselrichter wurden zwei unterschiedliche Konfigurationen hinsichtlich der Zuverlässigkeit untersucht. Im ersten Fall wird eine Bestückung des Wechselrichters mit Elektrolytkondensatoren sowie 6 diskreten Dioden und 6 diskreten MOSFET betrachtet. Demgegenüber steht eine Bestückung mit Folienkondensatoren und einem Leistungsmodul. Um die Zuverlässigkeit des Modulwechselrichters zu ermitteln, wurden die Methoden nach MIL-HDBK-217F [7], Bellcore TR-332 [10] sowie IEC 62380 [11] zur Anwendung gebracht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt.

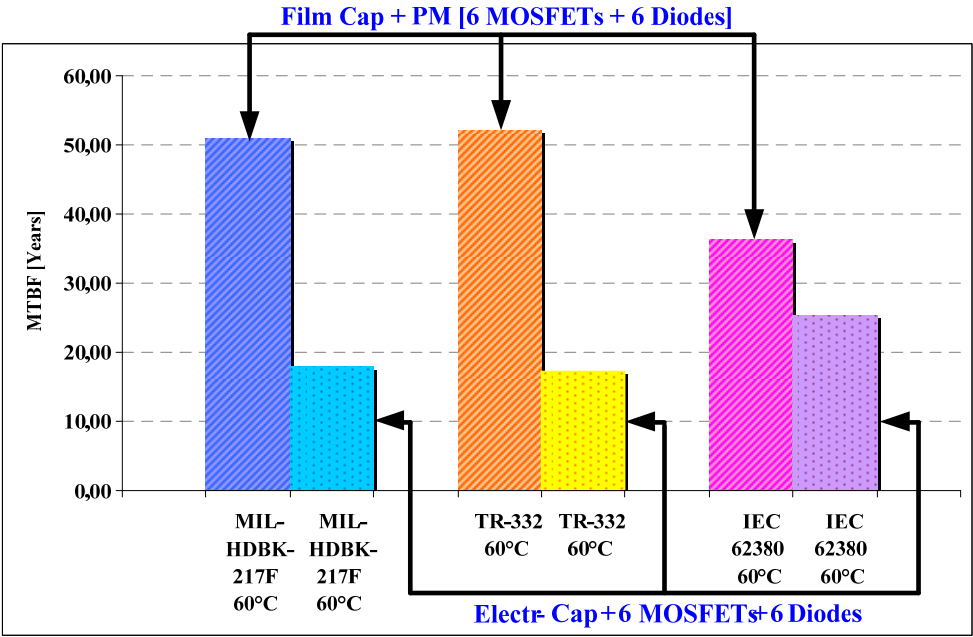


Abbildung 5: MTBF Vergleich nach MIL-HDBK-217F, Bellcore TR-332 sowie IEC 62380 für einen Modulwechselrichter in unterschiedlicher Konfiguration.

## 5 Untersuchung des thermischen Verhaltens

Für die Zuverlässigkeitsanalyse ist neben der elektrischen Belastung der Einfluss der Temperatur von entscheidender Bedeutung. Der Modulwechselrichter wird auf der Rückseite eines PV Moduls angebracht. Die Untersuchung des thermischen Verhaltens des Wechselrichters anhand von Simulationen und Messungen ist daher zur Beurteilung der Zuverlässigkeit wichtig.

Um die Modellierung zu vereinfachen, werden nur die wichtigsten Komponenten nachgebildet. Das Modell gemäß Abbildung 6 berücksichtigt das Leistungsmodul, die interne Stromversorgung, DC Speicherdrossel und Filterinduktivitäten sowie das PV-Modul. In Abbildung 7 sind die Ergebnisse der thermischen Simulation dargestellt, wobei auch die tatsächlichen Bedingungen berücksichtigt sind, die sich durch die Modulintegration des Wechselrichters ergeben. Dabei tragen sowohl die internen Verluste des Wechselrichters, als auch die Betriebstemperatur des PV-Moduls zur thermischen Belastung des Wechselrichters bei.

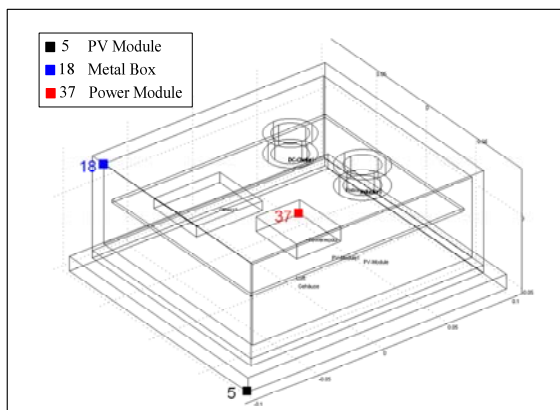


Abbildung 6: 3D Modell des vorgeschlagenen modulintegrierten Wechselrichters.

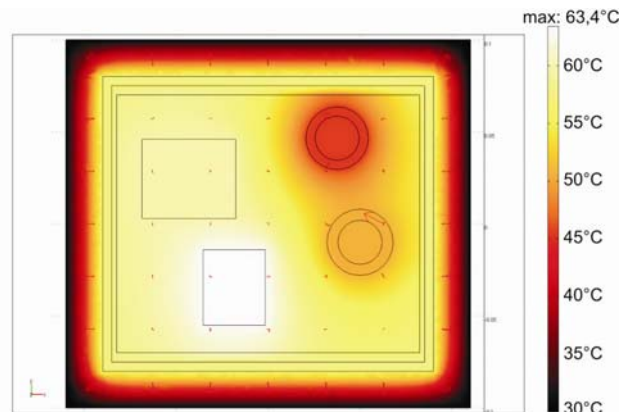


Abbildung 7: Thermische Simulation des Modulwechselrichter (Draufsicht)

In der dargestellten Simulation beträgt die Temperatur des PV-Moduls 60°C. In diesem Fall erreicht die Temperatur am Kühlkörper des Leistungsmoduls aufgrund der internen Verluste einen Wert von 64°C. In dieser Beispielsimulation befindet sich zwischen Wechselrichter und PV-Modul eine metallische Fläche, die aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit die Entwärmung des Wechselrichtergehäuses begünstigt. Aus diesem Grund liegen die Temperaturen der Speicherdrosseln in Abbildung 7 deutlich unterhalb der Kühlkörpertemperatur des PM und des PV-Moduls. Die Umgebungstemperatur bei der Simulation beträgt 30°C. Durch diese Temperaturreduktion wird die Lebensdauer der elektronischen Komponenten verbessert. Ohne diese Metallfläche, d.h. mit einem rückseitig offenen Gehäuse, welches direkt auf das PV-Modul geklebt wird, würden sich der Innenraum und somit auch die Speicherdrosseln mindestens bis zur Modultemperatur erwärmen. Der Prototyp des Wechselrichters im

Feldtest besitzt eine Überwachung der Gehäuseinnentemperatur. Zum Schutz der Elektronik erfolgt ab 65°C eine Abschaltung. Im Feldtest am Standort Kassel sind bisher jedoch keine Abschaltungen aufgrund einer Temperaturüberhöhung beobachtet worden.

## 6 Schlussfolgerungen

Modulintegrierte Wechselrichter werden unter sehr strengen Umgebungsbedingungen betrieben. Aus der Zuverlässigkeitsanalyse für modulintegrierte Wechselrichter lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Vermeidung von Elektrolytkondensatoren und die Verwendung von Folienkondensatoren kann die Zuverlässigkeit begünstigen.
- Die Verwendung integrierter Leistungsmodule verspricht niedrigere Kosten, geringeren Platzbedarf sowie bessere Betriebseigenschaften und Zuverlässigkeit.
- Nach [12] beträgt die über ein Jahr gemittelte Modultemperatur in Kassel 24,1°C. Aufgrund der bereits oben erwähnten 10°-Regel (Arrhenius-Gesetz) für die Lebensdauer elektronischer Komponenten kann der mittlere Ausfallabstand (MTBF) des Wechselrichters am Standort Kassel 200 Jahre betragen. Daraus ergibt sich nach Abbildung 3 eine Lebensdauer von 20 Jahren mit einer Wahrscheinlichkeit von 90%.
- Thermische Simulationen helfen beim Gehäusedesign, um die Temperaturbelastung zu reduzieren und damit die Zuverlässigkeit des Systems zu erhöhen.

In der Praxis tragen noch weitere Faktoren wie Softwarezuverlässigkeit, Herstellungsprozesse oder Benutzereinfluss zur Systemzuverlässigkeit bei, die hier jedoch nicht berücksichtigt sind. Die gezeigten Untersuchungen beschränken sich auf die Zuverlässigkeit der Hardware.

### Danksagung

Das integrierte Projekt PV-MIPS (TREN/04/FP6EN/S07.34959/503123) wird durch das 6. Rahmenprogramm der EU gefördert. Diese Veröffentlichung spiegelt nur die Meinung der Autoren wider. Die Europäische Kommission ist nicht verantwortlich für die Richtigkeit dieser Angaben.

## 7 Literatur

- [1] A. Maish, "Defining requirements for improved photovoltaic system reliability," Prog. Photovoltaics: Res. Appl., vol. 7, pp. 165-173, 1999.
- [2] N. Henze, A. Engler, and P. Zacharias, "Photovoltaic module with integrated power conversion and inter-connection system the European project PV-MIPS,"

in Proc. 21st European Photo-voltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Dresden, Germany, September 2006.

- [3] B. Sahan, A. Notholt-Vergara, A. Engler, and P. Zacharias, "Development of a single-stage three phase pv module integrated converter," in Proc. 12th European Conference on Power Electronics and Applications EPE, Aalborg, Denmark, September 2007.
- [4] B. Sahan, A. Notholt-Vergara, N. Henze, P. Zacharias, A. Engler, "A single stage PV module integrated converter based on a low-power current source inverter", IEEE TIE, Vol 55, No. 7, July 2008.
- [5] T. Bülo, B. Sahan, C. Nöding, and P. Zacharias, "Comparison of three-phase inverter topologies for grid-connected photovoltaic systems," in Proc. 22nd Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib., Milan, Italy, Sep. 2007. CD-ROM.
- [6] A. Goel and R. J. Graves, "Electronic System Reliability: Collating Prediction Models," IEEE Trans. Device and Materials. Reliability., vol. 6, no. 2, pp. 258-265, June. 2006 .
- [7] MIL-HDBK-217F Notice 2, Military Handbook-Reliability Prediction of Electronic Equipment, Department of Defense (DoD), Feb. 28, 1995.
- [8] Y. M. Chen, H. C. Wu, and K. Y. Lee, "Online Failure Prediction of the Electrolytic Capacitor for LC Filter of Switching-Mode Power Converters," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 1, pp. 400-406, Jan. 2008.
- [9] G. M. Buiatti, S. M. A. Gruz, and A. J. M. Cardoso, "Lifetime of Film Capacitors in Single-Phase Regenerative Induction Motor Drives," presented at the 6th IEEE Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives. Sept. 2007.
- [10] Bellcore TR-332, Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment, Bellcore Communication Research, Issue 6, Dec, 1997.
- [11] IEC TR 62382, Reliability data handbook universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment, International Electrotechnical Commission, Aug, 2004.
- [12] B. Sahan, N. Henze, A. Engler, Peter. Zacharias, and Thomas. Licht, "System Design of Compact Low-Power Inverters for the Application in Photovoltaic AC-Modules," presented at CIPS 2008 in Nuremberg Germany March 2008.
- [13] T. I. Bajenescu, "Zuverlässigkeit elektronischer Komponenten", VDE-Verlag, Berlin 1985.
- [14] H. de. Lambilly and H. O. Keser, "Failure Analysis of Power Modules: A Look at the Packaging and Reliability of Large IGBT's," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 16, no. 4, pp. 412-417, June. 1993